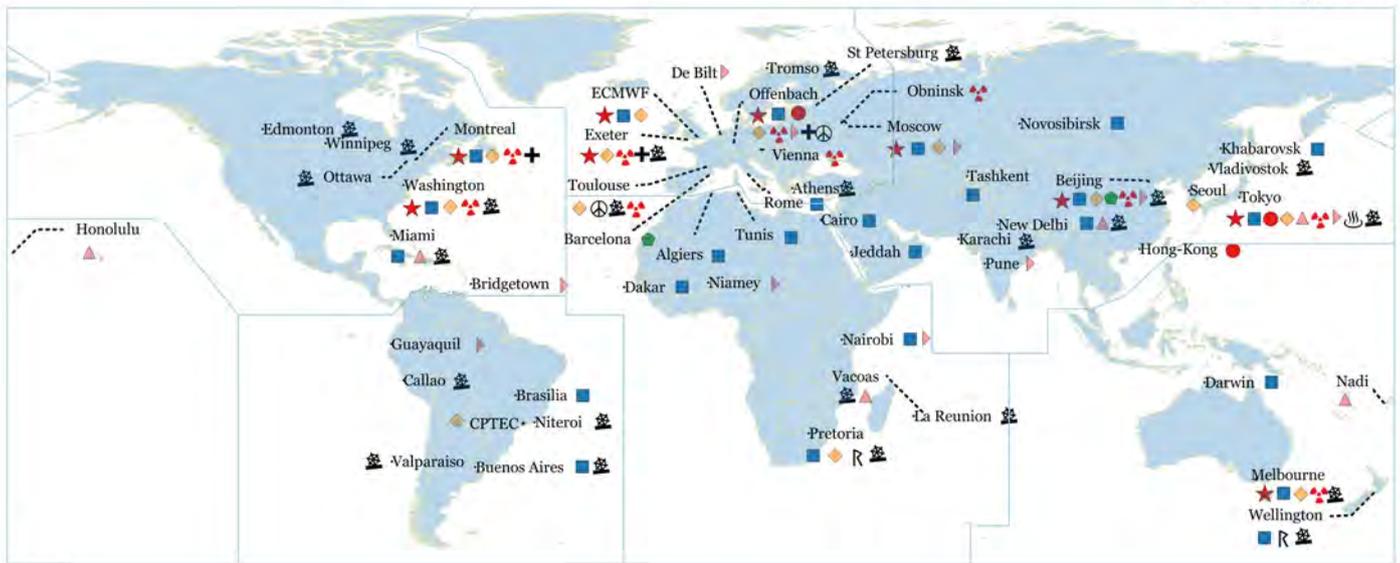


全球数据处理和预报系统

WMO Designated Global Data-processing and Forecasting System Centres

Updated on 30 August 2018



Legend

- ★ World Meteorological Centres* (9)
- ◆ Global Producing Centres for Long-Range Forecasts (13)
- ⊕ Global Producing Centres for Annual to Decadal Climate Prediction (3)
- RSMCs Geographic (25)
- RSMC Nowcasting (3)
- ▲ RSMCs TC (6)
- RSMCs Sand/Dust (2)
- ▶ Regional Climate Centres (11)
- ⚡ RSMCs Nuclear Emergency Response** (10)
- ☪ RSMCs Non-Nuclear Emergency Response** (2)
- ☪ RSMCs Volcano Watch Services for International Air Navigation (1)
- ℝ RSMCs Severe Weather Forecasting (2)
- ⚓ RSMCs Marine Meteorological Services (24)

* World Meteorological Centres are also Global Producing Centres for a) Deterministic Numerical Weather Prediction, b) Ensemble Numerical Weather Prediction, and c) Long-Range Forecasts.

** RSMC for nuclear and non-nuclear emergency response have Atmospheric Transport and Dispersion Modelling (ATDM) capabilities.

DESIGNATIONS USED

The depiction and use of boundaries, geographic names and related data shown on maps and included in lists, tables, documents, and databases on this web site are not warranted to be error free nor do they necessarily imply official endorsement or acceptance by the WMO.



主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
出版 《气象科技进展》(英文) 编辑部

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

王志强 中国气象局气象干部培训学院
肖子牛 中国科学院大气物理研究所
翟盘茂 中国气象科学研究院
于玉斌 中国气象局
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 北京大学
孙健芳 中国气象局公共气象服务中心
费建芳 国防科技大学
赵立成 国家气象信息中心
张鹏 国家卫星气象中心
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程大学
黄建平 兰州大学
廖小罕 中国科学院地理科学与资源研究所
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

常务编委 (按音序排名)

成秀虎	高学浩	龚建东	郭虎	郭学良
李柏	李国平	罗云峰	倪允琪	曲晓波
任国玉	任小波	沈文海	王存忠	王怀刚
王卫丹	武炳义	杨修群	俞小鼎	张朝林
张庆云	赵平			

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈镜明	陈云峰	陈振林	崔春光
崔讲学	董文杰	杜钧	封国林	何金海
何清	胡欣	胡跃文	姜彤	金飞
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠	梁旭东	刘晶	刘黎平
刘立	刘实	刘征宇	卢乃锰	陆日宇
罗兵	罗亚丽	马舒庆	马耀明	彭莹
浦一芬	宋燕	索渺清	汤绪	田红
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王海元
王建林	王式功	王延青	王迎春	吴立广
王自发	卫晓敏	温敏	翁富	杨立
谢志辉	闫冠华	延晓冬	杨萍	杨松
杨昭明	姚学祥	伊兰	翟武全	张大林
张广俊	张立祥	张小玲	张跃堂	赵广忠
周定文	周建华	周凌晔	周显信	朱定
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立	邹晓蕾

编辑部

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民
崔晓军

地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081

电话: (010) 68409927/68409333

邮箱: amst@cma.gov.cn

Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA

网址: <http://cmalibrary.cn/amst>

投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>

官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>

印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 张萌

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

定价: 30元

目次

第9卷 第2期 2019年4月20日

(内含: 进展报告2019“新能源气象”)

1 许小峰: 主编语

研究论文

气象发展前沿报告

- 6 王毅, 周庆亮, 代刊, 张晓美, 刘向文: 全球数据处理和预报系统发展及展望
- 11 刘蕊, 张同文, 陈峰, 尚华明, 喻树龙, 张瑞波, 王勇辉: 中亚区域树木年轮气候学研究进展
- 17 徐嘉昕, 李璇, 朱永超, 房世波, 吴东, 武英洁: 地表土壤水分的卫星遥感反演方法研究进展

专题 基层气象现代化

- 24 陈城, 边泽强, 曾涛: 区域自动气象站校准关键技术研究
- 28 王培, 王佳丽, 李康丽, 陈艳梅, 王露: 荆门市近十年气象灾害特征分析以及防御对策

论坛

- 32 孔海江, 田力, 王蕊, 赵培娟: 预报员培训的“复盘”方法
- 36 杨萍, 王邦中, 邓京勉: 二十四节气内涵的当代解读

阅读

书评

- 39 李蓓蓓, 钱馨平, 张改珍: 中华气象历史之探寻——刘昭民《中华气象学史》读后

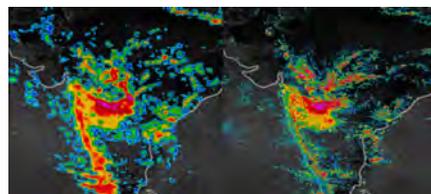
往事钩沉

台站巡礼

- 42 何溪澄, 冯颖竹: 民国时期的中山大学天文台和广州市气象台

科学观察

- 2 读图 数字 榜单



主编语

低碳经济、绿色能源、保护环境等理念已在世界范围内成为坚持可持续发展的重要共识，如何有效开发和利用风能、太阳能资源也受到世界各国的普遍关注。我国在快速发展的进程中，面临资源和环境的双重压力，更需要在风电、光伏发电开发利用中做出更多的努力，探索出传统能源替代的新途径。近年来中国风能、太阳能利用取得了快速发展，在科技、装备、实际利用等领域都走在了世界前列，且与之相伴随发展的新的应用气象学分支——新能源气象学通过气象部门及相关行业技术人员的不懈努力，也逐渐成熟，在气象业务服务中取得了显著成效。

在湖北省气象服务中心等单位科技人员的支持下，本期特别推出该领域的一些研究成果，主要涉及以下方面：气象灾害对风电场影响，大型光伏电站、风电场群对局地气候影响及评价，风能太阳能资源开发过程中的生态环境保护，风能太阳能资源评估技术的发展和应用检验，风能太阳能发电功率预报系统的开发与应用等。今后还将根据学科发展情况开设相关专栏，期待能够对新能源气象领域的

研究和应用起到促进作用，并为相关从业人员提供一个学习交流的平台。

延续上期，本期继续推出“气象发展前沿报告”专栏，分别从全球数据处理和预报系统的发展、中亚区域树木年轮气候学的研究进展及农田地表土壤水分的反演方法3个方面介绍了学科发展的前沿动态。

科技史的研究可以通过解读历史事件为当今科技发展给出启示。二十四节气是中国科学史上重要成就之一，“二分二至”阐释了古人对太阳照射地球的时间长短的认知。通过对天象的研究，古人在2000年前就已认识到地球围绕太阳公转的规律，比15世纪哥白尼提出的日心说早了一千多年。本期论坛栏目文章对这一中华文明的瑰宝进行了当代解读。往事钩沉栏目文章则对中山大学天文台与广州市气象台的传承关系进行了梳理和考证。希望这些成果可以提升读者对气象史研究的兴趣。

许小峰

进²⁰¹⁹展报告 新能源气象

研究论文

研究进展

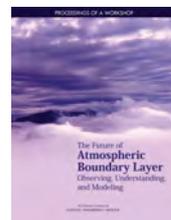
- 49 曾琦, 陈正洪: 近年来气象灾害对风电场影响的研究进展
- 56 张雪婷, 李金鑫, 陈正洪, 何飞, 崔杨: 我国大别山区风电场群对局地气候影响研究初探——以湖北大悟为例
- 62 孙朋杰, 王彬滨, 陈正洪, 张雪婷, 许杨, 孟丹: 测风塔风速插补对风功率密度误差的影响分析
- 66 金燕, 王学锋, 范立张: 两个新参数在云南山地风电场风能资源评估中的适用性分析
- 71 李芬, 杨勇, 赵晋斌, 陈正洪, 高晓清, 申彦波: 光伏电站建设运行对气候环境的能量影响
- 78 郭鹏, 申彦波, 陈峰, 赵晓栋: 光伏发电潜力分析——以山西省为例
- 84 顾正强, 朱玲, 沈历都, 龚强, 赵春雨, 晁华, 徐红, 蔺娜: 辽宁省追踪式与最佳倾角斜面总辐射的推算与分析
- 90 康慨, 孙振宇, 张超, 张云龙, 李慧: 实际环境下光储离网型发电系统优化设计研究
- 95 张文波, 闫晓敏, 王亚同, 邸燕君, 王琦: 甘肃省风能太阳能气象服务业务平台开发及应用
- 100 刘银秀, 熊守权: 靠近迭代法获取湿球温度初探

阅读

信息

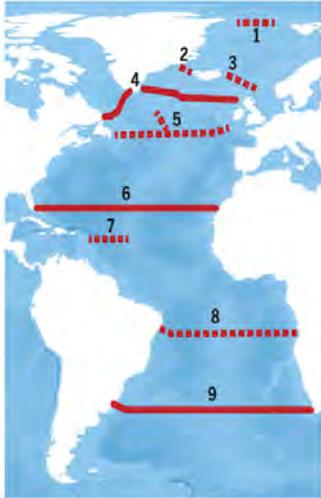
- 10 黄红丽: 《大气物理学》正式出版
- 41 黄海燕: “云知识探秘科普丛书”之《观云识云》简介
- 70 岳婷: 中关村高企协气象科技专业委员会正式运行
- 94/99 新书架
- 107 高被引论文选编
- 109 编辑选编
- 111 涓流细语
- 封3 媒体扫描

封3



Measuring circulation strength

Several arrays are collecting long-term time series of the AMOC or of main AMOC components. Lozier *et al.* now report an analysis of 21 months of continuous data from OSNAP that elucidate AMOC characteristics in the subtropical North Atlantic, a critical component of the circulation.

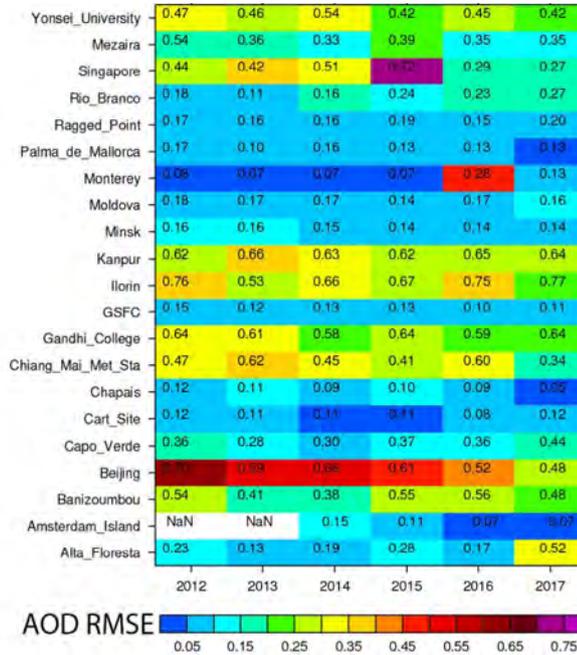


- | | |
|--|----------------------------------|
| ----- AMOC components | —— Full AMOC |
| 1 FRAM, AWI
Bremerhaven, Germany | 6 RAPID, NOC
Southampton, UK |
| 2 DS-Overflow,
IFM Hamburg, Germany | 7 MOVE, SIO,
San Diego, USA |
| 3 IS-Overflow, FMRI,
Faroe Islands | 8 11°S, GEOMAR,
Kiel, Germany |
| 4 OSNAP, Duke
University, USA | 9 SAMBA, NOAA,
Miami, USA |
| 5 NOAC, MARUM,
Uni Bremen, Germany | |

海洋环流数据：各国改进预报的发力点

北大西洋环流的形态，为各种气候模式提供了一个基准。目前，德国、美国 and 英国等各国在大西洋海洋部署了若干观测阵列开展海洋环流强度的长期观测，这些观测大多围绕大西洋经向翻转环流（AMOC）展开。

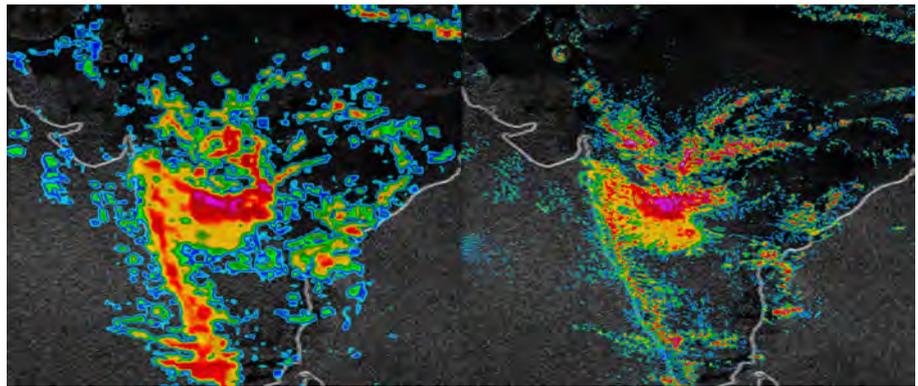
来源：Science



全球气溶胶及其业务预报：实况和预报能力的双改进

多国学者在一项最新研究中，就全球气溶胶业务预报能力进行了分析，尤其是总结了气溶胶预报国际合作（ICAP）项目中多模式集合（MME）系统业务化预报成效，该系统从最初的5个业务气溶胶模式增加到9个。图中给出2012—2017年针对AERONET网的21个地点的预报效果。图中的数字为该地年均AERONET V3L1.5在550 nm的AOD总量，预报RMSE用色标表示。

来源：QJRM



IBM：推出改进的逐时全球天气预报

新年伊始，全球天气领头企业之一IBM公司便迫不及待通过气象天气公司宣布，即将推出基于高分辨率模式的全球逐小时天气预报，这一全球天气预报重要的技术更新意味着目前欧美等部分国家已经可以获取的逐小时预报，将惠及全球。不仅如此，IBM新预报系统GRAF（Global High-Resolution Atmospheric Forecasting System，全球高分辨率大气预报系统）的分辨率，将从13 km（左图）提升到3 km（右图），将成为全球第一个商业化每小时更新的天气预报系统。

来源：IBM

数字

1.4天

全球27家学术机构和政府间组织自2017年开启的柳叶刀2030倒计时项目最新发表的年度报告指出，全球每人每年经历的热浪天数增加了1.4天，极端气候事件带来的经济损失，2017年是前一年的3倍。

183m

计划于2021年首航的“研究探险船”由挪威富豪资助建设，其长度达183m，是大多数同类船只的两倍多，能耐受极地冰、恶劣天气并且在全球航行。

2.7%

全球碳项目最新研究显示，2018年全球工业碳排放二氧化碳可能增加2.7%，达到历史最高，这标志着在排放相对平稳期过后，连续第二个大幅度增加年。

7年

美国加州受益于冬季全州充分的雨雪，3月宣布完全解除旱情。这是7年来该州首次宣布百分之百解除旱情。

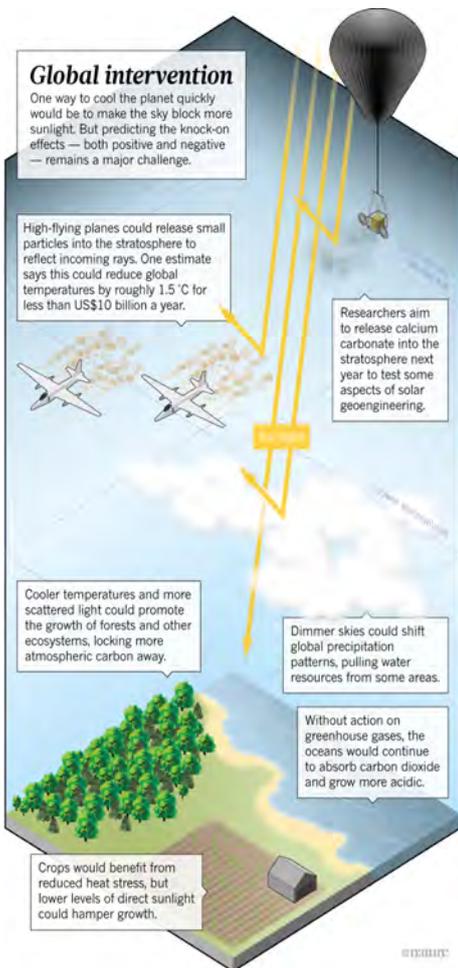
中国“全球数据处理与预报系统”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	美国WRF模式的进展和应用前景	章国材	气象, 2004/12	390
2	雷暴与强对流临近天气预报技术进展	俞小鼎	气象学报, 2012/06	276
3	暴雨和中尺度气象学问题	丁一汇	气象学报, 1994/08	265
4	集合预报的现状和前景	杜钧	应用气象学报, 2002/02	231
5	数值天气预报业务模式现状与展望	陈德辉	气象学报, 2004/10	201
6	热带气旋研究和业务预报技术的发展	陈联寿	应用气象学报, 2006/12	179
7	对流天气临近预报技术的发展与研究进展	陈明轩	应用气象学报, 2004/12	167
8	基于人工神经网络的集成预报方法研究和比较	金龙	气象学报, 1999/04	165
9	中国新一代极轨气象卫星——风云三号	杨军	气象学报, 2009/08	157
10	新一代数值预报系统GRAPES研究进展	陈德辉	应用气象学报, 2006/12	155

来源: CAJD数据库

检索时间: 2019年4月8日

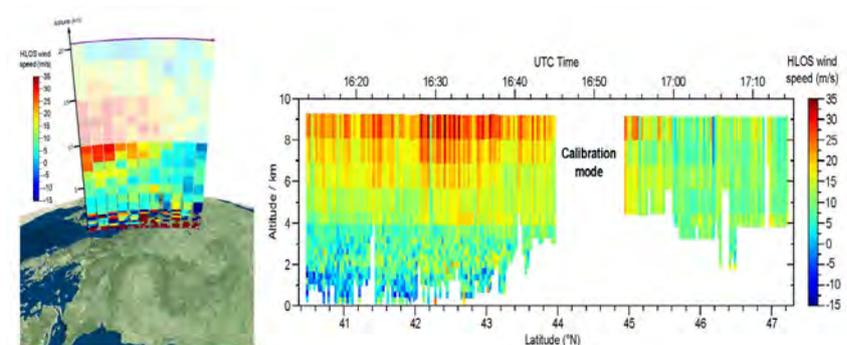
刘文剑、张萌 提供



冷却地球: 地球工程设想从实验室走出来

美国哈佛大学学者领衔的研究团队, 通过SCoPEX (Stratospheric Controlled Perturbation Experiment, 平流层控制扰动试验) 项目, 向平流层投放碳酸钙 (calcium carbonate) 这种可以反射部分阳光的颗粒物, 从而降低地球温度。然而, 这样的试验依然面临很多学术争议和不确定性, 需要更多学者面对。

来源: Nature



风神卫星: 全球风廓线面数据可期

2018年8月发射成功的风神 (Aeolus) 卫星, 专注于地球大气最下层 30 km 风廓线数据的观测, 其拥有的独创技术是利用激光获得风信息。目前, 该卫星在经过初期调整后已经进入第二阶段, 即对卫星获取的风场信息进行校准, 卫星欧洲空间局 (ESA) 还组织的外场试验, 通过在飞机上模拟卫星上的观测获得卫星轨道附近的风数据, 同时参考来自地面和气球的探测数据, 与风神卫星观测进行对比和验证。图为飞机沿卫星在德意志轨道进行类似激光观测获得的数据。

来源: ESA

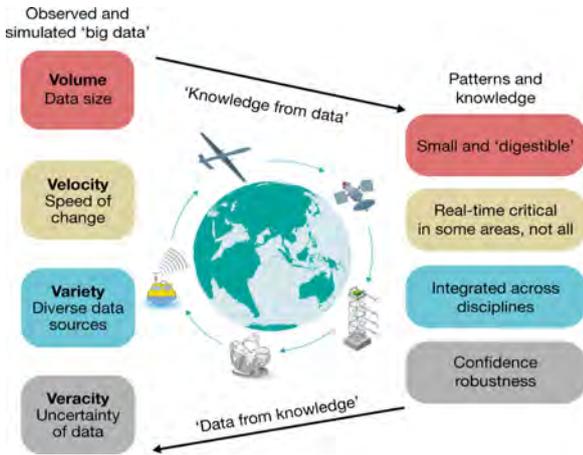
30倍 2018年英国夏天热浪是正常情况的30倍, 极端高温出现在7月27日, 达到35.6 °C, 这一态势被认为最可能的原因是气候变化造成的。

1.4°C 法国气象局的统计表明, 2018年该国平均温度较1981—2010年平均温度高出1.4 °C, 超过2012年的1.2 °C和2011年的1.1 °C, 是法国记录以来最热年。

3倍和8倍 2018年末成功升空的美国新一代GPS首颗卫星, 其定位精度是当前系统的3倍, 而抗干扰能力更是目前系统的8倍, 卫星的研发机构为洛克希德-马丁公司。

第1位 西班牙媒体在预测2019年将进一步发展的十大人道主义危机时, 将气候变化列为第1位, 指出如果导致气候变化的因素不发生改变, 或将导致上亿人流离失所。

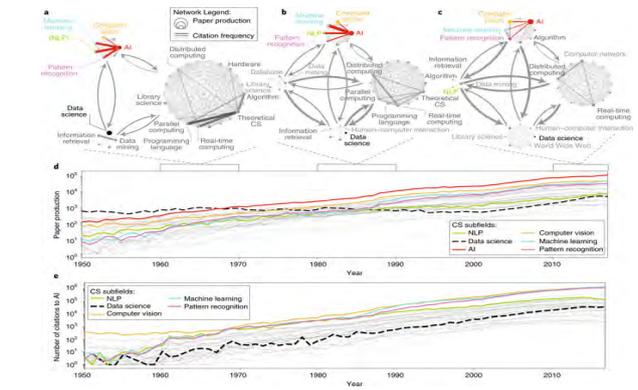
读图



深度学习助力数据驱动的地球系统科学

欧美多国学者在最新的研究中，探讨了深度学习对数据驱动的地球系统科学的作用。其中，地球系统科学所涉及的观测和模拟数据，无疑具有了大数据的特性并为深度学习创造了条件。

来源: *Nature*



AI文献解析

《自然—机器智慧》创刊版发表了针对AI研究文献计量学分析文章，作者借助Microsoft Academic Graph工具研究了自1950年以来相关论文走向，发现早期AI相关的领域主要集中在哲学、地理学和艺术，但现代AI研究则大量转向数学和计算机科学。相反，包括社会科学在内的其他学科，涉及AI的文章数并没有随着学科论文数量的增加等比例增长。

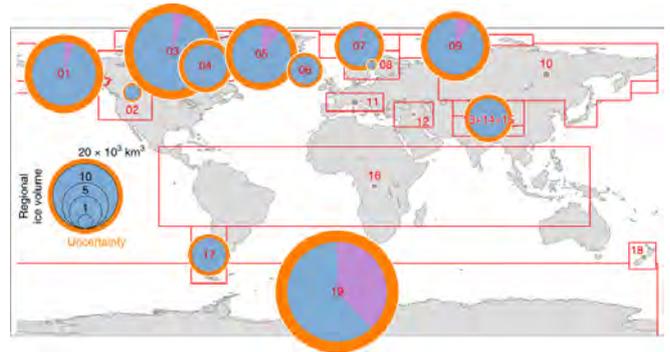
来源: 《自然—机器智慧》



美国国家生态观测网面临变数

美国国家生态观测网 (NEON) 项目于2000年开始实施以来，几乎完成遍布美国80多个生态站的建设。然而，近期该观测网因预算大幅度增加和管理不善等问题，包括首席科学家在内的高层人员突然调整而带来混乱。这一理念先进的观测网未来走向如何，被更多的人关注。图为位于阿拉斯加针对针叶树林的NEON观测塔。

来源: *Nature*



全球冰川冰厚度分布

瑞士等多国学者利用5个模式给出了南极和格陵兰以外全球大约21.5万个冰川冰厚度的估计。研究表明，这些冰川的总体积为 $(158 \pm 41) \times 10^3 \text{ km}^3$ ，因为其中大约15%位于今天海平面之下，这些冰相当于 $(0.32 \pm 0.08) \text{ m}$ 海平面变化。图中给出Randolph冰川清单 (RGI, 6.0版) 中不同区域冰体积分布，其中蓝色和紫色分别对应位于今天海平面以上和以下部分。

来源: *Nature-Geoscience*

数字

2680^个

美国NASA宣布，2009年升空的开普勒空间望远镜因燃料停止运行，借助该望远镜，已经发现并证实了超过2680个太阳系外星球。

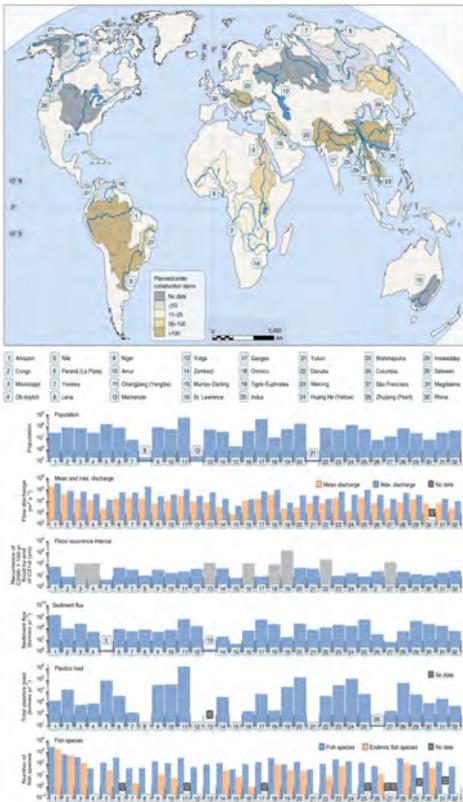
1.2×10^4 亿 kW·h

初步统计表明，至2018年底，我国大陆已建5万kW及以上水电站约640座，全国水电总装机容量约3.5亿kW，年发电量约 1.2×10^4 亿 kW·h，双双继续稳居世界第一。

第12位

Nature 基于2015—2017年统计最新公布了中国自然指数，在地球和环境科学前50家机构中中国气象局位列第12位，中科院大气物理研究所 (第10位)、中国地震局 (第16位)、中国环境保护局 (第35位) 和国家海洋局 (第40位) 等榜上有名。

中国“新能源气象”主题被引频次最高的前10篇论文



全球32条最重要河流人类影响清单

美国伊利诺伊大学学者基于文献综合，梳理了大规模水坝、水文改变、污染、非原始物种侵入和沉积物采集等给全球32条最大河流在完整性和未来方面带来的影响。在按照流域面积和支流排列的32条河流中，包括了中国的长江（编号11）、黄河（编号24）和珠江（编号28）。地图（上）给出河流大坝建设情况，统计数据分别给出了流域人口、流量、到21世纪末20世纪百年一遇洪水预测、平均年沉积物通量和塑料容量、鱼产量等（下）。

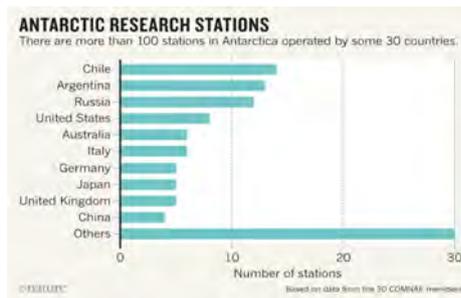
来源: Nature-Geoscience

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究	代倩	中国电机工程学报, 2011/12	209
2	光伏发电功率预测统计方法研究	卢静	华东电力, 2010/04	181
3	风能资源评估技术方法研究	李泽椿	气象学报, 2007/10	151
4	基于模糊识别的光伏发电短期预测系统	陈昌松	电工技术学报, 2011/07	126
5	基于相似日和径向基函数神经网络的光伏阵列输出功率预测	王晓兰	电力自动化设备, 2013/01	100
6	太阳能光伏发电量预报方法的发展	李芬	气候变化研究进展, 2011/03	88
7	江苏省风能资源重新估算与分布研究	黄世成	气象科学, 2007/08	68
8	基于LVQ-GA-BP神经网络光伏电站出力短期预测	罗建春	电力系统保护与控制, 2014/06	65
9	大型风电场的风资源评估	陕华平	华东电力, 2006/02	62
10	内蒙古电网区域风电功率预测系统	白永祥	电网技术, 2010/05	58

来源: CAJD数据库

检索时间: 2019年4月8日

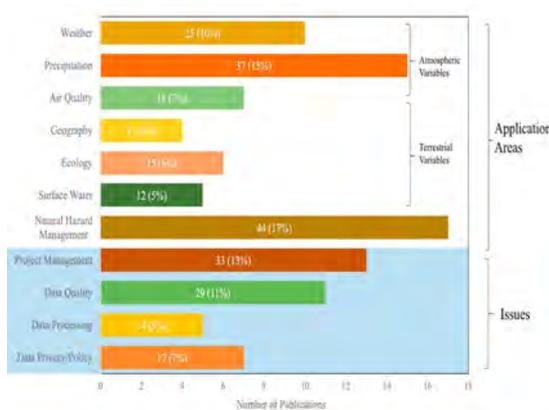
刘文科、张萌提供



南极站数量突破100

2019年2月，土耳其成为在南极建站的第36个国家。1959年，当时在南极建站的12个国家签订了南极条约，同意和平利用南极原则。到2018年，南极站、极地和机场设施的数量猛增到了109个。

来源: Nature



众包地球物理数据研究

中外学者共同基于文献计量方法，研究了1981年以来地球物理数据的众包方法的研究文献，发现近年来这类文献的数量大量增加，研究涉及的领域中，灾害管理、降水和天气位列前3位，而研究主题则集中在项目管理、数据质量、数据处理和政策等。

来源: Rev Geophy

12% 荷兰气象局学者用欧洲数千个气象站资料，分析了欧洲积雪厚度的变化，发现自1951年以来以每10年12%的速率在减少，且自1980年代以来因温度上升和对降水的影响，积雪减少在加速。

3.4% 一家独立研究机构最新数据显示，美国能源相关碳排放于2007年达到峰值，之后到2015年以年均1.6%的幅度下降。但自2016年以来下降放缓，2018年不降反升，增加了3.4%。

3.8倍 欧空局在一份文稿中阐述新观测带来新经济增长点，指出该机构在未来地球观测项目中每投入1欧元，欧美成员国GDP将增加3.8欧元，投入产出效率高达3.8倍。

16% 澳大利亚学者利用大约70万张卫星图像，绘制了1984—2016年全球潮滩范围及变化，发现这一对防风暴、稳定海岸线和粮食生产具有重要意义的生态系统，在33年里减少了约16%。

全球数据处理和预报系统发展及展望

王毅¹ 周庆亮¹ 代刊¹ 张晓美² 刘向文³

(1 国家气象中心, 北京 100081; 2 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 3 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 全球数据处理和预报系统 (GDPFS) 是世界气象组织 (WMO) 世界天气监视网计划中负责制作和向WMO会员提供气象分析和预报产品的业务系统。GDPFS由世界气象中心、区域专业气象中心和国家级气象中心构成三级业务体系。介绍了GDPFS的发展现状和相关数值预报模式的进展, 并分析了GDPFS发展面临的挑战。进一步结合WMO未来“无缝隙GDPFS”的发展战略, 指出无缝隙预报的内涵包括时空尺度无缝隙、学科融合无缝隙和影响预报无缝隙。未来无缝隙GDPFS的发展将聚焦滚动评估用户需求、科技引领业务发展、建立质量管理框架等方面, 实现向WMO会员和各国提供更高质量的天气、水、气候和环境信息, 支持用户做出更明智的决策。

关键词: 无缝隙预报, 世界气象组织, 数值天气预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.001

Development and Outlook of Global Data-Processing and Forecasting System

Wang Yi¹, Zhou Qingliang¹, Dai Kan¹, Zhang Xiaomei², Liu Xiangwen³

(1 National Meteorological Centre, Beijing 100081; 2 Public Meteorological Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081; 3 National Climate Centre, Beijing 100081)

Abstract: The Global Data-Processing and Forecasting System (GDPFS) belongs to the World Meteorological Organization (WMO)'s World Weather Watch plan. It is responsible for preparing and making available to the WMO member's meteorological analyses and forecast products. It is organized as a three-level system of the World Meteorological Centers, the Regional Specialized Meteorological Centers and the National Meteorological Centers. This paper introduced the current status of GDPFS and progress of relevant numerical prediction models. The challenges facing the development of GDPFS are analyzed. Combined with the WMO "seamless GDPFS" strategy, it further pointed that seamless prediction includes seamless time-space scale, seamless discipline integration and seamless impact-based forecast. Future development of seamless GDPFS will focus on rolling review of user requirement, advancement of operation led by science and technology, and quality control system. It is expected that GDPFS will provide better information of weather, climate, water and environmental to make better decisions.

Keywords: seamless prediction, World Meteorological Organization, numerical weather prediction

0 引言

准确的天气、气候、水和环境信息不仅对于人类抵御自然灾害具有重要作用, 也对保障日常社会经济活动的高效和安全以及社会可持续发展的科学决策具有重要意义。1963年, 世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 推出了在全球范围内开展规范、收集、分析、加工和分发天气、气候和其他环境信息的一项核心计划——世界天气监视网

(World Weather Watch, WWW) 计划。它由全球观测系统 (Global Observing System, GOS)、全球通信系统 (Global Telecommunication System, GTS) 和全球数据处理和预报系统 (Global Data-Processing and Forecasting System, GDPFS) 组成。

近年来, 得益于观测技术、电子通信和计算系统的进步, WMO先后发展了WMO信息系统 (WMO Information System, WIS)^[1]和WMO综合观测系统 (WMO Integrated Global Observing System, WIGOS)^[2], 将WWW计划中的GOS和GTS进行了拓展和升级, 逐步实现了全球天气、水、气候及环境等信息的综合观测、实时收集、高效分发和数据共享。全球、区域业务数值预报模式的快速发展为GDPFS构建从全球到区域到国家层面的级联业务体系奠定了

收稿日期: 2019年1月7日; 修回日期: 2019年3月5日
第一作者: 王毅 (1982—), Email: yiwang@cma.gov.cn
资助信息: 气象小型建设项目“全球预报业务能力建设”; 国家重点研发计划 (2017YFC); 科技支撑项目 (2015BAC03B01); 国家重点研发计划 (2018YFF0300104)

直层数达137层。

对于月以上到2年时间尺度的长期预报，全球气候模式是目前GDPFS长期预报中心的主要工具。在海气耦合动力模式基础上，多圈层耦合的高分辨率气候系统模式已成为发展趋势。目前全球气候模式对ENSO的可预报时效在6个月以上，对次季节预报主要信号——大气季节内振荡（MJO）的可预报时效超过两周^[10]。

为解决不确定性问题而提出的集合预报，随着几十年的实践已被实际业务所接受^[11]。集合预报系统已成为各国数值预报中心业务系统的重要组成部分，包括全球集合预报、区域集合预报和对流尺度集合预报。集合预报不仅可以提高长时效预报的稳定性，而且对极端天气的早期预警起到重要作用^[12]。

2 面临的挑战

过去几十年，GDPFS已在全球范围内建立起一套向WMO各成员提供天气、水、气候、环境等产品的有效机制，并通过级联预报体系向发展中国家会员提供支持。然而，社会各界（航空、海事、农业、能源、卫生等）对气象信息的需求愈加精细化、个性化和专业化，目前GDPFS中心的产品还未能完全满足社会经济各部门的新需求；一些国家气象水文部门获取和利用GDPFS中心产品的能力存在差距；临近预报和次季节—季节预报能力还需要提高；发展影响预报和风险预警产品的非传统气象数据还非常欠缺；GDPFS中心提供数据和信息的标准需要进一步统一，并且缺乏友好的通用平台方便用户高效地获取GDPFS的数据。

另一方面，进入21世纪以后，新一轮科技革命和产业变革正在兴起。从云计算、人工智能的发展，机器学习技术、物联网的创新到星载平台（公共卫星和商业卫星）数据的爆炸式增长，包括社会新媒体信息传播、获取方式的转变，这些都是改变天气、气候、水和环境等信息收集、制作和分发传统“游戏规则”的元素。此外，一些私营部门和科研机构也在积极发展相关预报和服务产品。例如，美国天气预报公司AccuWeather一直与Google公司合作，利用云计算和机器学习技术发展逐小时和逐天精细预报^[13]。因此，用户需求、技术创新和外部竞争这三大因素对GDPFS继续发挥WMO核心业务系统的作用提出了挑战，同时也带来了新的机遇。

3 无缝隙预报

为了应对众多挑战和满足未来需求，GDPFS在WMO框架下的发展和演进是当务之急，势在必行。

发展无缝隙预报是WMO及各国气象部门的一大共识。首次世界天气开放科学大会（WWOSC-2014）的主题就是“地球系统无缝隙预报：从分钟到月”^[14]。2017年地球系统科学家学会（YESS）联合世界气候研究计划（WCRP）、世界天气研究计划（WWRP）和全球大气观察计划（GAW）创建的地球系统科学前沿白皮书^[15]，更是将无缝隙预报作为未来几十年科学界指导方针的重要指标，提出从分钟级到世纪尺度、从米到全球空间尺度的预报发展趋势。实际上，无缝隙预报不仅仅意味着打破天气和气候预测的界限，而是在天气、水、气候、环境等领域各个维度上的无缝隙，概括起来体现为三个方面。

3.1 时空尺度无缝隙

月际—季节预报是天气预报和气候预测之间的桥梁，是构建无缝隙预报系统的一个关键部分。2013年，WMO世界气候研究计划（WCRP）、世界天气研究计划（WWRP）联合全球观测系统研究与可预报性试验（THORPEX）发起了次季节—季节（Sub-Seasonal-to-Seasonal, S2S）预测计划。该计划建设的S2S数据库汇集了来自全球11个业务预报中心制作的次季节预报产品（预报时效长达60 d），包括近实时集合预报和集合再预报^[16]。

数值预报模式可以实时生成大气状态的三维网格预报，为无缝隙网格预报提供了技术前提。中国气象局自主研发的全球区域一体化同化预报系统GRAPES，经过十几年的努力，在动力框架、物理过程和变分同化技术等方面均取得显著进展^[17-18]，并且建立了体系完善的全球预报模式、区域中尺度预报模式和集合预报模式系统（表2）。

表2 GRAPES数值天气预报体系
Table 2 GRAPES numerical weather forecast systems

模式	空间范围	预报时效/h	时间分辨率/h	空间分辨率
GRAPES_3KM	区域	36	1	3 km×3 km
GRAPES_MESO/RAFS	区域	84/30	1	0.1°×0.1°
GRAPES_GFS	全球	240	3 h (0~120 h) / 6 h (120~240 h)	0.25°×0.25°
GRAPES_ENS	全球	360	6	0.5°×0.5°

英国气象局发展的统一模式（Unified Model, UM）^[17]基于相同的模式框架构建了无缝隙预报体系，含1.5 km的区域对流尺度模式，几十千米的气候模式及上百千米的地球系统模式（图3）。

3.2 学科融合无缝隙

WMO的S2S计划使得天气和气候研究更加紧密地结合并且相互促进。另外，科学研究越来越倾向于

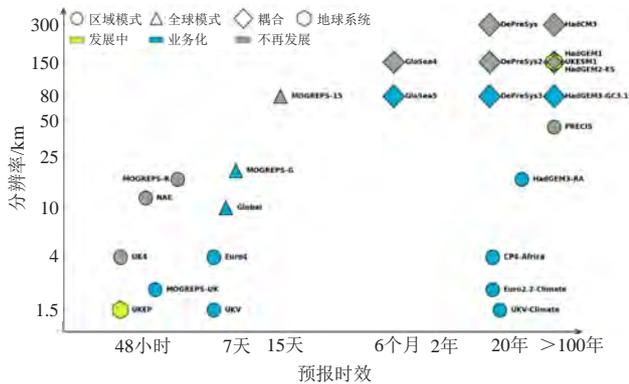


图3 英国气象局统一模式无缝预报体系

Fig. 3 Unified Model seamless modeling hierarchy at the Met Office

将地球系统作为一个整体来考虑。地球作为一个由多时、空尺度过程构成的复杂巨系统，其涉及的学科领域非常广泛，不仅涵盖地球科学各领域，而且与计算机科学密切相关^[18]。相关专业领域的预报服务也需要气象与水文、海洋、海浪和风暴潮、空气质量和沙尘暴、自然资源、能源、旅游、交通等学科的融合，并且一直延伸到整个价值链上，包括观测网络、数值模式、预报制作、专业产品、信息发布、解释应用和用户的决策。

3.3 影响预报无缝隙

每年全球气象灾害的影响都会造成大量伤亡，对财产和基础设施造成极大损害。尽管相关国家气象水文部门已做出了准确的预报和预警，但与民防和应急管理等部门及民众对灾害的潜在影响认识之间存在脱节。例如，2013年超强台风海燕造成菲律宾超过5000人的伤亡，一大原因是民众对风暴潮的影响认识不足^[19]。为了填补这一缝隙，需要发展基于影响的预报和基于风险的预警，开展气象灾害风险评估业务^[20]。

4 无缝隙GDPFS发展展望

在2016年召开的WMO执行理事会第68次界会上，提出了未来无缝隙GDPFS的愿景^[21]：GDPFS将成为一个更加高效和适应性强的业务中心体系，促进WMO会员和合作伙伴帮助用户做出更明智的决策；GDPFS将通过伙伴关系和协作提供基于影响的预报和基于风险的预警；通过以低成本高效益、及时和灵活的方式共享天气、水、气候和相关环境资料及产品来实现这一目的，并惠及所有WMO会员，进一步缩小发达国家会员和发展中国家会员的能力差距。面向无缝隙GDPFS的长远目标，迎接时代发展带来的挑战，未来GDPFS的发展主要包括以下几个方面。

1) 滚动评估用户需求。为了能够满足社会各

部门行业的需求，增加用户对无缝隙预报的理解和认同，首先需要开展滚动评估（Rolling Review of Requirements, RRR）活动。滚动评估可以通过收集、更新用户需求，与现有和计划中的业务系统进行对比，分析评估在哪些领域还存在空白和差距，为GDPFS确立优先重点领域提供指导。

2) 科技引领业务发展。开展以满足用户需求和应用服务为目的的科学研究，加强地球系统多圈层、跨学科的合作研究。利用WIS和WIGOS的先进技术，引入人工智能等创新技术，协调与伙伴组织和私营部门的合作，进而在无缝隙背景下改进所有时间尺度上的预报能力。

3) 建立质量管理框架。通过质量管理（QM）框架建立定期评价机制，确保GDPFS业务中心的能力达到WMO的要求并继续提升。面对来自私营部门预报服务的竞争，加强对GDPFS提供的天气、水、气候和环境等相关产品的检验，保证信息和服务的高质量、可靠性和一致性，满足用户新的和不断变化的需求。

4) 提升无缝隙预报效益。拓展GDPFS的级联预报体系的全球覆盖率，加强天气、气候、海洋等预报系统的整合，增加互操作性。开发通用平台促进用户便捷地获取无缝隙预报信息和产品。将影响数据（如暴露度和脆弱性）、社会经济、地理等信息纳入GDPFS，不仅提高预报的准确性，而且还应该考虑将预报不确定性信息有效传达给用户，不是简单地提供“最佳预报”，而是支持用户做出“最佳决定”。

5 结论

过去几十年，GDPFS作为WMO框架下的核心业务系统，协同WIGOS和WIS为WMO成员提供天气、水、气候、环境等信息和预报产品，为防灾减灾和可持续发展做出了突出的贡献。

为了应对来自用户需求、技术创新和外部环境带来的挑战，未来GDPFS将朝着“综合无缝隙GDPFS”的方向发展，即构建从分钟到年代际，从局地到全球的无缝隙全球数据处理和预报系统。可以预见，无缝隙GDPFS的发展和实施将对WMO成员国和社会各个领域带来巨大益处和广泛的影响，主要体现在：1) 更高质量的天气、水、气候、环境等信息和产品可以促进用户做出更明智的决策，降低各种灾害风险及其潜在影响；2) 促使国家气象水文部门能够以更加集约的方式高效地获取分析和预报信息，有利于为终端用户服务增加附加值；3) 为WMO成员提供应用大数据信息的工具和技术，提升国家气象水文部门的日常业务的自动化和智能化水平；4) 促进观测新技术、

科学研究新成果向业务和服务端的转化，以满足用户的各种需求。

参考文献

[1] 李湘, 王甫棣, 姜立鹏, 等. WIS的实现技术研究及应用. 气象, 2011, 37(10): 1301-1308.

[2] 张文建. 世界气象组织综合观测系统(WIGOS). 气象, 2010, 36(3): 1-8.

[3] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. Nature, 2015, 525: 47-55.

[4] 杜钧, 钱维宏. 天气预报的三次跃进. 气象科技进展, 2014, 4(6): 13-26.

[5] Thiaw W M, Kumar V B. Twenty years of developing capacity in weather and climate forecasting in Africa. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96: 737-753

[6] WMO-No.1150. WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services, 2015. Available at http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1150_en.pdf.

[7] 曾庆存, 林朝晖. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展. 地球科学进展, 2010, 25(1): 1-6.

[8] WMO-No. 485. Manual on the Global Data-Processing and Forecasting System. Available at <http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/Manual/GDPFS-Manual.html>

[9] Harper K, Uccellini L W, Morone L, et al. 50th anniversary of operational numerical weather prediction. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88: 639-650.

[10] 宋连春, 肖风劲, 李威. 我国现代气候业务现状及未来发展趋势. 应用气象学报, 2013, 24(5): 513-520.

[11] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革. 气象, 2010, 36(11): 1-11.

[12] Lalaurette F. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2003, 129: 3037-3057.

[13] 许小峰. 从物理模型到智能分析——降低天气预报不确定性的新探索. 气象, 2018, 44(3): 341-350.

[14] Brunet G, Jones S, Ruti P M. Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months. 2015, WMO Rep. 1156. Available online at http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1156_en.pdf.

[15] Florian R, Mohammad A, Steve A, et al. Earth system science frontiers: an early career perspective. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(6): 1120-1127.

[16] Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98: 163-173.

[17] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统 GRAPES研究进展. 应用气象学报, 2016, 17(6): 773-777.

[18] 沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. GRAPES_GFS全球中期预报系统的研发和业务化. 应用气象学报, 2017, 28(1): 1-10.

[19] Brown A, Milton S, Cullen M, et al. Unified modeling and prediction of weather and climate: a 25-year journey. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93: 1865-1877.

[20] 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.

[21] Yasuhito J, Shuichi K, Miwa K, et al. Analysis of early warning systems: the case of super-typhoon Haiyan. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 15: 24-28.

[22] 陈海燕, 雷小途, 潘劲松, 等. 气象灾害风险评估业务发展研究. 气象科技进展, 2018, 8(4): 18-21.

[23] 王建婕. WMO基本系统委员会资料加工和预报系统实施协调组会议简介. 气象科技合作动态, 2018, (5): 18-22.

《大气物理学》正式出版

黄红丽



近日, 由南京信息工程大学大气物理学院银燕教授团队精心编著的《大气物理学》正式出版。不求大而全, 但求少而精, 力求把所讨论的问题讲透彻, 主要集中在大气热力学、大气辐射、云降水物理及与雾霾关系密切的大气气溶胶。

《大气物理学》在传统大气物理理论和基本自然现象讨论基础上, 吸收国内外经典教材和最新研究成果, 对重点内容提出深入浅出、理论完整的编写框架。全书共分5章, 从大气物理学的研究内容、近期发展、大气基础知识开始, 重点介绍如何应用热力学原理研究大气热力学过程、水的

热力学属性、大气中主要热力学过程、热力学图解应用、大气静力稳定度分析等以及辐射的基本概念、大气吸收和大气散射、辐射传输方程和地球—大气辐射过程等。针对大气科学领域内普遍关注的云降水物理过程和大气气溶胶机理, 着重介绍了云雾形成的宏-微观特征和机制, 云粒子的核化理论, 水滴冰晶的增长机理, 典型降水理论, 气溶胶的化学组成及来源估计, 气溶胶的观测与测量, 对流层气溶胶的气候学特征等。

本书以大专院校和科研院所大气科学、大气物理学、大气环境、应用气象学、气候学、海洋科学等专业学生为主要对象, 也可以作为气象、海洋、环境、电力等业务部门, 以及大气科学类相关从业者的教学和研究参考书。

(作者单位: 气象出版社)

中亚区域树木年轮气候学研究进展

刘蕊^{1,2,3} 张同文^{1,2} 陈峰^{1,2} 尚华明^{1,2} 喻树龙^{1,2} 张瑞波^{1,2} 王勇辉³

(1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室, 乌鲁木齐 830002; 3 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 中亚地处亚欧大陆中部, 距海较远, 是典型的中纬度干旱半干旱区域, 在全球变化研究中占有特殊地位。其山区分布着大量对气候响应敏感的针叶树种原始森林, 是树轮气候研究的理想区域。干旱的气候条件不仅使该地区树木对气候变化响应敏感, 同时也有利于长龄树的生长和古木的保存, 这为研究过去气候和环境变化提供了可靠的代用资料。对国内外在中亚区域开展树木年轮气候研究的现状和进展进行了综述, 探讨了树轮记录的这一地区历史时期温度和湿度变化特征, 总结了气候变化规律, 并为进一步开展中亚树轮气候研究提出建议与展望。

关键词: 中亚, 树木年轮, 气候响应, 气候变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.002

Advance in Dendroclimatology in Central Asia

Liu Rui^{1,2,3}, Zhang Tongwen^{1,2}, Chen Feng^{1,2}, Shang Huaming, Yu Shulong, Zhang Ruibo^{1,2}, Wang Yonghui³

(1 Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002)

2 Key Laboratory of Tree-ring Physical Chemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002

3 School of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054)

Abstract: Central Asia is located in the middle of the Eurasian Continent and far from ocean. It's a typical arid and semi-arid region in the middle latitudes, and is in a special position for the study of global change. There are a large number of conifer primeval forests in the mountainous, which are sensitive to climate response. The arid climate conditions not only make the trees sensitive to climate change in this area, but also have benefits on the growth of old trees and the preservation of ancient trees. These provide reliable alternative data for the study of past climate and environmental changes. This paper summarizes the present situation and progress of the research on tree-ring climate in Central Asia, discusses the change characteristics of temperature and humidity, which are recorded by tree-ring in this region, summarizes the law of historical climate change, and puts forward some suggestions and prospects for further research on dendroclimatology in the Central Asia.

Keywords: Central Asia, tree-ring, the climate response, climate change

0 引言

中亚泛指亚洲中部内陆地区, 有广义和狭义之分。本文研究区域为狭义上的中亚干旱区, 包括哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦等5个国家。该地区不仅深居欧亚大陆腹地, 远离海洋, 还是“丝绸之路经济带”倡议向西走出国门的第一站, 其地理位置十分重要。由于该地区东南缘高山阻隔了印度洋、太平洋暖湿气流, 因此形成了中亚地区干旱少雨的大陆性山地气候特征, 主

要受西风环流和北大西洋涛动的影响。研究区气候波动大, 生态环境脆弱, 在全球变化研究中具有特殊地位。但由于气象站点稀少, 仪器设备陈旧, 数据精准度不高, 观测数据不连续等原因, 严重阻碍了中亚地区长期气候变化研究的顺利开展。因此, 研究人员需要寻找记录着过去气候变化信息的高分辨率替代资料。

树木年轮作为研究过去气候变化的重要代用资料之一, 由于其具有分辨率高、定年准确、空间分布广、时间序列长、环境变化指示意义明确、可定量等特点, 在揭示气候变化规律及机理研究中拥有着独特优势^[1-4]。随着科学技术的发展, 树木年轮研究对象在国际上已从过去仅针对气象观测要素, 发展到了对径流量^[5]、干旱指数^[6]、植被指数^[7]、沙尘天气^[8]等的重建研究; 研究区域已从过去的单个采样点针对较小区域的气候重建, 发展为使用多采样点、大样本量的较大区域气候重建^[9-10]; 在将重建结果放

收稿日期: 2018年8月31日; 修回日期: 2019年1月7日
第一作者: 刘蕊 (1996—), Email: 1049830541@qq.com
通信作者: 张同文 (1982—), Email: zhangtw@idm.cn
资助信息: 国家自然科学基金 (41605047); 上海合作组织科技伙伴计划 (2017E01032); 新疆维吾尔自治区“天山雪松计划——青年拔尖人才后备人选” (2017XS18)

入过去千年全球气候背景下考察的同时，也已开始考虑大气—海洋—陆面耦合作用^[11]、导致短期降温的气候扰动因子——火山爆发^[12]以及过去100年气温的“超常”上升——人类温室气体排放对研究区域气象要素的影响^[13]。目前世界上有少量的树轮年表超过千年，最长的年表序列超过7000 a^[14]。我国建立的最长树轮年表达3585 a^[15-16]，重建的最长气候序列为3500 a^[17]。在中亚山区分布着大量的西伯利亚云杉 (*Picea obovata*)、西伯利亚落叶松 (*Larix sibirica* Ledeb.)、西伯利亚冷杉 (*Abies sibirica*)、雪岭云杉 (*Picea Schrenkiana*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* L.)、土耳其斯坦圆柏 (*Juniperus turkestanica*) 及天山圆柏 (*Juniperus semiglobosa*) 等对气候响应敏感的针叶树种原始森林，这为科研人员开展树木年轮学研究提供了机会。

中亚区域的树木样本系统采集起始于20世纪90年代，相关研究主要在欧美科研人员主导下开展完成^[18-21]。自2012年起，新疆气象局研究人员组织团队共17次赴中亚哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦等国开展学术交流和联合科考工作。研究成果涉及树轮年表的建立^[22]、树木生长的气候响应^[23]、历史时期气候水文重建^[24]等方面。但国内在这一地区的研究起步较晚，现阶段在区域范围、年表长度、成果数量、研究深度以及影响力等方面与欧美还存在差距。本文通过整理目前已发表的文献资料，综述国内外在中亚地区开展树轮气候研究的现状，总结了近500年基于树轮

资料的中亚地区较为一致的气候变化规律，提出了这一地区树轮气候学薄弱环节和未来研究的重点发展方向，以期为进一步开展中亚地区树轮气候研究提供指导意见和建议。

1 中亚树轮采样点分布情况

中亚山区分布有大面积的原始针叶林，这为开展树轮研究提供了巨大的潜力。目前，这一地区树木年轮气候研究内容相对较少，研究区域主要集中在哈萨克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦这三个国家，而乌兹别克斯坦和土库曼斯坦则较少涉及。各国研究人员在哈萨克斯坦天山山区及阿尔泰山东南部的研究成果有14篇论文，研究树种主要有雪岭云杉、西伯利亚落叶松和樟子松等，其树龄一般均在100~500年。在塔吉克斯坦西北部的帕米尔-阿莱山脉的研究成果有10篇论文。主要研究树种为长龄针叶树种天山圆柏和土耳其斯坦圆柏。目前，所采树木树龄最大超过1400年。在吉尔吉斯斯坦西天山山区的研究成果有14篇论文。主要研究树种为土耳其斯坦圆柏和雪岭云杉，目前在该地区所采集云杉的树龄一般在200~400年；而圆柏树龄则一般在400~500年。图1显示了中亚已发表的树轮气候学研究相关论文所涉及的采样点空间位置。本文统计了在文献中明确给出采样点位置的树轮研究成果。对于文献中只给出采样范围或采点较多，且位置较近的研究，采取采样范围的中心位置来表示这项研究所在的位置。

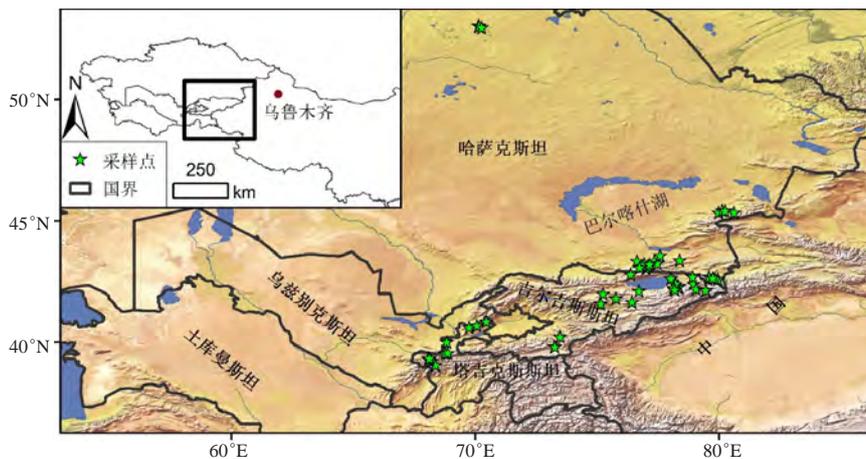


图1 中亚区域树轮气候学研究成果涉及采样点空间位置分布图

Fig. 1 Map of the spatial distribution of sampling points of the dendroclimatological research results in the Central Asia

2 中亚树轮生长对气候的响应研究

在中亚地区，利用树木年轮资料指示或重建的气候要素主要有温度、径流、降水和干旱指数 (PDSI)，其中，PDSI、降水和径流同属于湿度变化的范畴，因此我们将这三者归为同一类进行讨论。

此外，也有少量利用树木年轮资料指示或重建植被指数^[25]、树木生产力和碳封存潜力^[26]等的研究。但这些研究相对较少，并且用于指示或重建植被指数等变化的树轮资料一般为之前已经被用于重建过PDSI、降水或径流等变化的树轮资料。本文则重点讨论了中亚地

区树轮记录的温度和湿度变化研究。以上研究所采用的树轮指标主要为树轮宽度，少量为树轮密度。

相关文献显示，中亚区域树轮年代学和树木千年年轮记录潜力的研究较少，并多集中在塔吉克斯坦。其研究工作一般是将当地同一树种的死树与活树交叉定年，确定每一树轮形成的准确年份。Opała-Owczarek等^[27]的研究是将在两座旧建筑中采集30个死树样本与在帕米尔-阿莱西部采集的活树（圆柏）样本进行交叉定年，最老的木头可以追溯到公元11世纪和12世纪。其研究结果为帕米尔-阿莱地区和亚洲高海拔地区未来气候重建提供了时间序列超过千年的年表，年表序列长达1070a；Opała-Owczarek等^[28]研究发现，塔吉克斯坦帕米尔-阿莱山脉的灌木具有树轮气候学研究的潜力；Opała-Owczarek等^[29]研究表明，塔吉克斯坦帕米尔-阿莱地区具有重建过去一千年气候的应用潜力。此外，中亚地区已发表的树轮气候研究工作还包括NDVI、PDSI、SPEI、降水、径流、温度等重建工作，其中的大部分是利用树轮宽度开展气候响应的研究，且相对集中分布在哈萨克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦这三国，乌兹别克斯坦仅存有极少数的树木气候学应用潜力的研究^[20]，而土库曼斯坦则仅发现了阿姆河流域胡杨（*Populus euphratica Oliv.*）生产力和碳封存潜力的研究^[26]。

大量研究表明^[22,30-31]，中亚山区树木年轮径向生长对降水的响应要好于气温，尤其是在接近森林下线的区域。树轮宽度对生长季和生长季前期的降水响应均较好，生长季和生长季前期的降水量是树木径向生长的主要限制因子。吉尔吉斯斯坦西天山雪岭云杉树轮宽度对气候的响应表明，位于森林下线的树轮径向生长对6月和7月的气温响应较好，而森林上线树轮径向生长则对4月和5月的气温响应较好，且温度对树木径向生长的影响主要表现为随海拔升高而增强的水分应力；在树轮对降水响应方面，较低树线的年轮宽度与水分的相关性最强，树轮宽度年表与上年7月到当年6月的降水相关最好。以上结果表明，降水可能是吉尔吉斯斯坦西天山北坡森林下线树木径向生长的主要限制性因子，降水对森林下线树轮径向生长起决定性作用。这与张瑞波等发现的天山山区雪岭云杉树轮宽度对降水，尤其是生长季及生长季前期降水响应最为敏感的研究结果一致^[31]。

在哈萨克斯坦天山北坡森林下线的研究发现^[32]，云杉幼龄树树轮宽度与标准化降水-蒸散发指数（SPEI）相关性最强，而老龄树树轮宽度与降水量相关性最强。中上层林带的云杉也可能会根据不同树龄而显示出树木与气候间不同的生长关系。在哈萨克

斯坦东北部布拉拜（Burabai）地区^[33]，樟子松与降水呈正相关，与5月和6月的气温呈显著负相关。夏季降水和温度对树轮宽度影响明显。夏季降水增加，气温下降，年轮宽度增加。反之，夏季降水减少，气温升高，年轮宽度减小。这是由于5月和6月的高温对树木早材生长起主要限制作用，晚材生长则主要取决于当前生长期的降水量。20世纪40年代以后，该地区气温和降水量均呈上升趋势，樟子松树轮宽度对气候因子的敏感性也随之增加。在阿尔泰山南坡的森林上线，树轮宽度对气候的响应表明^[34]，树轮宽度与当年6月温度呈显著正相关；与5—6月的降水呈负相关，而与生长季前期的降水没有较明显的相关关系。这表明，在阿尔泰山南坡西伯利亚落叶松分布的上线，制约树木径向生长最主要的气候因子为生长季初期的温度。由于6月为西伯利亚落叶松生长的关键阶段，且这一时段也是阿尔泰山南坡冰雪融水补给河流的主要时期，河流最大径流量出现在5—6月，同时山区降水相对于平原区域也较为丰沛。在水分条件充足的情况下，较高的温度有利于植物的光合作用，从而延长生长期，形成较宽的年轮；反之低温会降低光合作用效率，强冷空气甚至会冻死刚开始生长的幼枝嫩叶，从而形成窄轮。据此可以推断，树轮宽度指数与5—6月的降水呈负相关是因为降水通常会伴随冷空气入侵、云量增多和太阳辐射减少，导致温度较低。

陈峰等研究发现^[35]，在塔吉克斯坦Kuramenian山脉下线，树轮宽度与当年6—7月PDSI相关性较高，说明了在干旱半干旱地区，圆柏径向生长需水量大，水分有效性是树木生长的主要决定因素。塔吉克斯坦帕米尔-阿莱山区森林上线树轮宽度对气候的响应分析表明^[36]，圆柏树轮宽度指数对上年8月到当年7月PDSI的变化非常敏感，并与当年6—9月最低温度呈正相关；Opała-Owczarek等研究表明^[21]，在塔吉克斯坦帕米尔-阿莱山区森林中上线，圆柏树轮宽度与上年12月到当年2月的降水相关性最高（ $r=0.73$ ， $p<0.01$ ），与3月最高温正响应，与夏季温度正相关，与6—7月最低温度呈显著相关。这表明在塔吉克斯坦西北部山区的森林上线，冬季降水为限制因子，温度起到间接作用，通过融雪和蒸发来调节土壤含水量，而制约树木径向生长最主要的气候要素为生长季初期的温度。

在乌兹别克斯坦高海拔地区^[20]，圆柏树木年轮径向生长与降水之间存在正相关关系，温暖的冬季对树木生长有积极的影响，春季温度的升高则对树木生长有消极影响，但其具体的响应机制尚未在相关文献中出现，有待深入研究。土库曼斯坦树木生长对气候的响应关系尚不清晰，还有待进行大量基础研究工作。

随着科学技术的发展,国际树木年轮研究手段已从过去单一的树轮宽度,发展到目前利用树轮密度^[37-38]、灰度^[39-40]、同位素^[41]等多种手段综合分析研究。但在中亚地区,以往开展的树木年轮气候学研究大多基于树轮宽度参数,较少考虑和运用其他树轮参数。

3 中亚地区树轮气候重建研究

本文采用统计中亚干旱区已发表的树轮气候学相关文献中注明的干湿、冷暖时期的方法来提取该区域的气候变化特征^[42]。干湿、冷暖时期的统计严格按照相关文献中提及的温度变化中的冷暖时段以及湿度变化中的干湿时段来进行统计,由于已发表的中亚五国树轮气候重建文献还未出现乌兹别克斯坦和土库曼斯坦两个地区的研究内容,且树轮记录的不同区域气候要素存在一定差异,为了方便比较区域间的一致性和差异,本文将属于同一国家的树轮数据排列在一起,分别总结了吉尔吉斯斯坦,哈萨克斯坦和塔吉克斯坦这三个国家树轮记录的温度和湿度变化特征,考虑到研究区基于树轮的重建较少,其树轮记录的温度和湿度变化特征在大尺度范围上的准确度并不高。

3.1 温度变化

图2显示,中亚地区树轮记录的公元1600年以来温度冷暖变化时段的统计序列较少,但其树轮记录的冷暖变化较为一致。如,哈萨克斯坦2条树轮记录的温度冷暖变化表现出几个比较一致的冷暖时段:1714—1732年,1780—1794年,1887—1890年,1943—1950年。此外,塔吉克斯坦公元1840—2016年夏季最低温度的重建研究表明^[43],其表现出来最冷的年代有:1850年代,1860年代,1880年代,1890年代,1900年代,1910年代,1950年代,1960年代,1970年代和1980年代;最温暖的年代有:1870年代,1920年代,1930年代,1940年代,2000年代和2010年

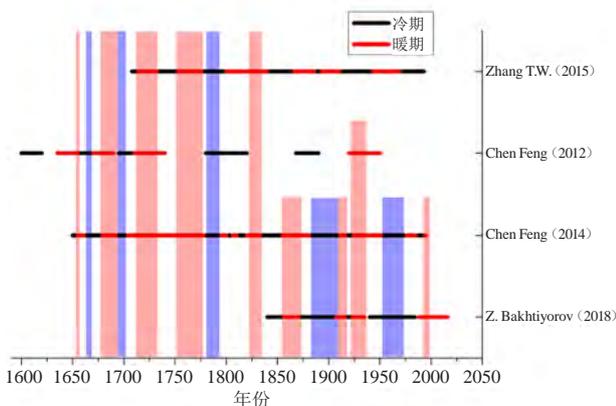


图2 中亚地区树轮记录的温度冷暖变化时期
Fig. 2 Warm and cold periods recorded by tree rings in Central Asia

代。该重建序列具有84.7年 ($p < 0.001$) 的周期变化,同时,发现了2.9年 ($p < 0.001$)、2.6年 ($p < 0.001$)、2.5年 ($p < 0.001$)、2.4年 ($p < 0.001$) 和2.2年 ($p < 0.001$) 的高频变化。这表明,该区域温度变化与印度洋—海洋气候系统之间存在很强的联系。陈峰等^[44]利用最大密度标准化年表重建的吉尔吉斯斯坦天山山区公元1650—1995年7—8月平均温度结果显示,其最长的暖期为1704—1778年,出现了75年的夏季高温;最长的冷期为1882—1910年,显示出29年的夏季低温。吉尔吉斯斯坦天山山区7—8月平均温度在1707年、1777年、1818年、1835年、1856年、1882年、1912年、1923年和1951年,而且突变幅度较大,与干旱半干旱地区气候变化较剧烈的特征相符。利用晚材密度标准化年表重建了哈萨克斯坦东部斋桑湖地区近400年夏季(6—8月)平均最高温度^[45],重建序列揭示了1650—1680年这30年显著偏暖。10个最冷年则均匀分布于近400年。张同文等^[46]利用四种基于树轮宽度重建的较小区域温度序列,将中亚东部阿尔泰山脉南部的平均气温恢复到1698年。结果表明,这种温度重建包含了中亚大部分地区的气候信号。新重建的温度序列与中亚地区的区域温度重建以及哈萨克斯坦东部斋桑湖地区的局部温度重建的一致性表明,此温度重建在低频域捕获了广泛的区域气候变化。

3.2 湿度变化

中亚地区的树轮记录主要以反映湿度变化为主,各国研究人员在此地区基于树轮记录开展了较多的湿度变化研究。图3总结了公元1600年以来塔吉克斯坦、哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦三个国家的气候干湿变化。结果显示,塔吉克斯坦树轮记录的几个比较一致的气候干湿变化时段有^[29,35-36]:1810—1840年代、1880—1910年代、1930—1950年代和1990—2010年

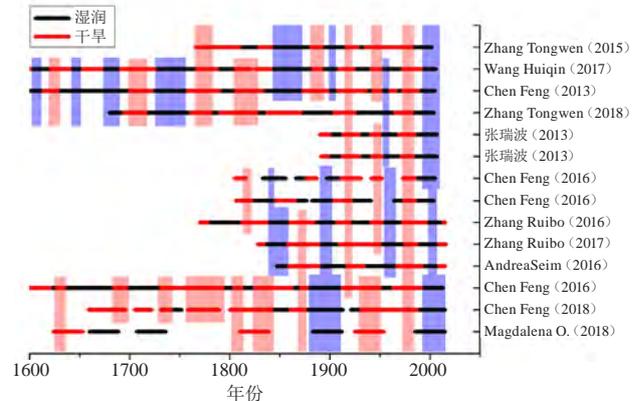


图3 中亚地区树轮记录的湿度变化干湿时期
Fig. 3 Wet and dry periods recorded by tree rings in Central Asia

代；哈萨克斯坦树轮记录的几个比较一致的气候干湿变化时段有^[47-50]：1840年代、1860年代、1890—1900年代、1970—1980年代和1990—2000年代；吉尔吉斯斯坦树轮记录的几个比较一致的气候干湿变化时段有^[23,50-54]：1700—1710年代、1730—1760年代、1810—1830年代、1910—1920年代、1950—1960年代、1970—1980年代以及1990—2000年代。从中亚地区干湿变化的统计结果可以看出，该区域研究的干湿变化时段划分就整体而言较为破碎，使得一些干湿时段很难界定，难以找出较为完整的气候干湿变化一致时段，且对于界定的干湿时段在本研究中也较难确定不同时期的干湿程度。因此，很难将整个中亚区域的干湿变化特征进行比较。尽管如此，我们仍找到了几个较为一致的气候干湿变化时段：1900年代、1920年代、1950年代、1970—1980年代、2000—2010年代。说明了整个中亚地区在某些时段的湿度变化特征较为一致。此外，陈峰等研究发现^[50]，重建的近两百年哈萨克斯坦西天山干湿变化与吉尔吉斯斯坦西天山和中国境内西天山山区降水变化一致；张瑞波等研究表明^[51]，近百年吉尔吉斯斯坦西天山的干湿变化与中国境内天山山区的降水变化也较为一致，也能较好地代表西天山大部分区域干湿变化。张同文等^[55]研究表明，东天山地区与其空间距离较近的中天山地区降水变化最接近，但随着空间距离的增加，其相似性逐渐减弱。这证明，天山区域历史时期降水变化的局地性，不同区域间存在空间差异。

4 展望

中亚区域属于典型的寒旱区。在干旱半干旱地区，水是发展和生存的根本条件。自然降水是地表水、地下水和高山积雪冰川等水体的根本补给源，是水循环过程中的一个重要分量。降水不仅决定着中亚水资源总量，而且其空间分布随时间的变化直接影响着中亚的水分布状况、河川径流形成等，直接关系到中亚地区的生态环境与经济社会发展。此外，中亚作为我国天气的上游关键地区，和我国西北地区区域气候密切联系。研究其过去气候变化特征和未来气候变化趋势，对预测未来气候和减少干旱损失具有重要意义。中亚国家的自然地理环境与我国新疆接近。其境内的矿产资源、光热资源和水资源等均很丰沛，而作为塔里木河源头之一的阿克苏河也发源于吉国西部山区。2013年9月，国家主席习近平在访问中亚四国时提出共建“丝绸之路经济带”的构想。2014年5月，第二次中央新疆工作座谈会在北京举行，更加明确提出了着力打造新疆丝绸之路经济带核心区的总体

要求。因此，中亚对于新疆区域水资源安全具有非常重要的意义。在中亚国家和中国新疆开展气候变化研究将有助于科学认识中亚干旱区的历史气候变化事实和未来气候变化趋势，气候时空演变规律及其区域差异，以及区域气候变化对全球变化的响应等，并为我国制定涉及中亚区域的可持续发展及规划研究提供数据参考和理论依据。开展未来气候变化预估，尤其是降水和温度等关键气候要素的变化，可增进我国在国际气候变化谈判中的话语权和主动权，为维护国家利益、促进我国经济社会可持续发展做出贡献。

在充分发挥各自优势的基础上，我国新疆气象局已与吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和哈萨克斯坦科研单位共签订了4份项目合作意向书，共建了西天山森林生态气象监测站，建立了稳定的合作交流机制，实现了人员定期互访和项目组内相关资料共享。近年来，科研人员多次赴中亚哈吉塔三国进行树芯样本采集和树木年轮研究工作，特别是2017年和2018年，在中亚山区获取了多棵树龄超过千年的树芯样本。在与中亚国家科研人员进行联合野外科考的同时，积极开展学术研究，与中亚合作单位学者联合发表论文9篇、出版专著《中亚气候变化调查研究》和《新疆北部及周边地区过去一万年的气候与水文变化》2部，培养博士2名，硕士2名，引进博士1名，项目组成员获世界气象组织青年科学家研究奖，取得了初步的研究成果。

依托获批的国家自然科学基金、国家国际科技合作计划、亚洲区域合作专项、上海合作组织科技伙伴计划、中国气象局气候变化专项等项目支持，联合中亚多国研究人员共同开展中亚气候变化研究，并开展基于历史气候序列的未来气候变化趋势预估工作，所撰写的咨询报告也积极响应科研成果业务转化的迫切需求，为国家相关政策的制定和国际谈判提供了数据参考和理论依据。

本文通过总结分析中亚已有的树轮气候研究工作发现，中亚干旱区由于其特殊的地理环境和干旱的气候特征，为树轮长年表的建立提供了良好的场所。目前中亚长年表所采用的树种均为土耳其圆柏和天山圆柏，最长的树轮年表长度达千年，说明了中亚地区具有建立树轮长年表的潜力和开展千年历史气候重建的可行性。且我国新疆气象局树轮学研究团队已获取了多个树龄达千年以上的树芯样本，也证实了在中亚区域开展千年历史气候重建和研究这一区域较长时间尺度气候变化的可行性。过去，该地区树轮年表的建立大多是基于活树样本，而未来树轮长年表建立则可以通过活树和古木交叉定年的方法来延长树轮年表长度，并且可以考虑借鉴欧洲北美等地建立树轮常年表

序列的方法, 结合树轮考古学, 在古湖泊或古建筑等考古样点中寻找能够定年的古木后, 采用交叉定年等方法, 建立浮动年来表延长此地区树轮年表的长度。此外, 以往在中亚地区树轮气候研究工作中, 主要以树轮宽度记录为主, 利用其他树轮指标开展的研究工作则很少。而我国新疆气象局树轮学研究团队骨干曾多次完成在我国西北地区进行的树轮密度、灰度、同位素参数获取及其相关分析研究工作, 现已熟练掌握基于X射线分析法的树轮密度测定技术和利用树轮图像分析软件获取树轮灰度数据等研究技术。这使得我国研究人员在中亚区域获取多种树轮参数, 特别是利用多种树轮数据开展研究成为可能。因此, 在中亚地区, 树木年轮作为一种高分辨率的气候代用指标, 需要通过联合中亚多国研究人员在该区域扩大采样范围, 改进数据分析手段, 通过结合森林气象站、树木径向生长监测、树木形成层活动监测、木材解剖、模型模拟等研究方法深入探讨中亚树木年轮对气候要素的响应机理, 更好地区分树轮记录中的温度和降水信号, 提取树轮中包含的共同气候信号, 重建更多可靠的、大范围的降水、温度、湿度等长时间尺度序列, 从而进一步理解中亚乃至全球气候变化和历史气候变化机制。

参考文献

- [1] Shao X M, Huang L, Liu H B, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Deliangha, Qinghai. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48: 939-949.
- [2] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. Chronology development and climate response analysis of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) tree-ring parameters in the Urumqi River basin, China. *Geochronometria*, 2010, 36: 17-22.
- [3] Liu Y, Cai Q F, Song H M, et al. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future trends over the central-eastern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 2986-2994.
- [4] Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, et al. 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 2011, 331: 578-582.
- [5] 袁玉江, 喻树龙, 穆桂金, 等. 天山北坡玛纳斯河355 a来年径流量的重建与分析. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 411-417.
- [6] Li J B, Gou X H, Cook E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in northwest China. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L07715. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL025803>.
- [7] 高卫东, 袁玉江, 张瑞波. 基于树木年轮的呼图壁河流域草地归一化植被指数重建. *东北林业大学学报*, 2012, 40(4): 26-30.
- [8] 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 等. 树轮记录的历史时期阿克苏河流域沙尘天气变化. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1040-1046.
- [9] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区235 a气候变化及降水趋势预测. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 803-808.
- [10] Fang K Y, Davi N, Gou X H, et al. Spatial drought reconstruction for central High Asia based. *Climate Dynamics*, 2010, 35: 941-951.
- [11] Hurrell J W, Kushnir Y, Visbeck M. The North Atlantic Oscillation. *Science*, 2001, 26: 603-605.
- [12] Gervais B R, MacDonald G M. Tree-ring and summer-temperature response to volcanic aerosol forcing at the northern tree-line, Kola Peninsula, Russia. *The Holocene*, 2001, 11: 499-505.
- [13] Osborn T J, Briffa K R. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years. *Science*, 2006, 311: 841-844.
- [14] Frank D, Esper J, Zorita E, et al. A noodle, hockey stick, and spaghetti plate: a perspective on high-resolution paleoclimatology. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2010, 1(4):507-516.
- [15] Shao X M, Wang S Z, Zhu H F, et al. A 3585-year ring-width dating chronology of Qilian juniper from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *IAWA Journal*, 2009, 30(4): 379-394.
- [16] Shao X, Xu Y, Yin Z Y, et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17):2111-2122.
- [17] Yang B, Qin C, Wang J, et al. A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2014, 111(8):2903-2908.
- [18] Esper J, Shiyatov S G, Mazepa V S, et al. Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Climate Dynamics*, 2003, 21: 699-706.
- [19] Winter M B, Wolff B, Gottschling H, et al. The impact of climate on radial growth and nut production of Persian walnut (*Juglans regia L.*) in Southern Kyrgyzstan. *European Journal of Forest Research*, 2009, 128(6): 531-542.
- [20] Seim A, Tulyaganov T, Omurova G, et al. Dendroclimatological potential of three juniper species from the Turkestan range, northwestern Pamir-Alay Mountains, Uzbekistan. *Trees*, 2016, 30(3): 733-748.
- [21] Opała M, Niedźwiedz T, Rahmonov O, et al. Towards improving the Central Asian dendrochronological network- New data from Tajikistan, Pamir-Alay. *Dendrochronologia*, 2017, 41: 10-23.
- [22] Zhang T W, Yuan Y J, He Q, et al. Development of tree-ring width chronologies and tree-growth response to climate in the mountains surrounding the Issyk-Kul Lake, Central Asia. *Dendrochronologia*, 2014, 32: 230-236.
- [23] Zhang T W, Zhang R B, Yuan Y J, et al. Reconstructed precipitation on a centennial timescale from tree rings in the western Tien Shan Mountains, Central Asia. *Quaternary International*, 2015, 358: 58-67.
- [24] Chen F, He Q, Bakytbek E, et al. Reconstruction of a long streamflow record using tree rings in the upper Kurshab River (Pamir-Alai Mountains) and its application to water resources management. *International Journal of Water Resources Development*, 2017, 33(6): 976-986.
- [25] Zhang T W, Zhang R B, Lu B, et al. *Picea schrenkiana* tree-ring chronologies development and vegetation index reconstruction for the Alatau Mountains, Central Asia. *Geochronometria*, 2018, 45(1): 107-118.
- [26] Buras A, Thevs N, Zerbe S, et al. Productivity and carbon sequestration of *Populus euphratica* at the Amu River, Turkmenistan. *Forestry*, 2013, 86(4):429-439.
- [27] Opałowczarek M, Owczarek P, Rahmonov O, et al. The first dendrochronological dating of timber from Tajikistan- potential for developing a millennial tree-ring record. *Tree-Ring Research*, 2018, 74(1):50-62.
- [28] Opałowczarek M, Niedźwiedz T, Rahmonov O, et al. The Dendroclimatic potential of shrubs from Western Pamir-Alay (Tajikistan). *Association for Tree-ring Research*, 2014.
- [29] Opałowczarek M, Niedźwiedz T. Last 1100yr of precipitation variability in western central Asia as revealed by tree-ring data from the Pamir-Alay. *Quaternary Research*, 2018. doi:10.1017/qua.2018.21.
- [30] 张瑞波, 尚华明, 魏文寿, 等. 吉尔吉斯斯坦西天山上下线树轮对气候的响应差异. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(4): 1-6.
- [31] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(4):1-9.
- [32] Bulat Z, Karl-uwe H, Hilmar S. Searching for the best correlation between climate and tree rings in the Trans-Ili Alatau, Kazakhstan. *Dendrobiology*, 2018, 19: 119-130.
- [33] Araiilm K, Kuralay M, Nesibe K. et al. Tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* from Burabai Region (Kazakhstan) and their response to climate change. *Dendrobiology*, 2017, 78: 96-110.
- [34] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应. *生态学报*, 2010, (9): 2246-2253.

(下转23页)

地表土壤水分的卫星遥感反演方法研究进展

徐嘉昕¹ 李璇¹ 朱永超² 房世波¹ 吴东¹ 武英洁¹

(1 中国气象科学研究院生态环境与农业气象研究所, 北京 100081; 2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730000)

摘要: 土壤水分是影响农业生产的重要因子之一, 掌握农田地表土壤水分对农业生产实践有着重要的意义和作用。目前监测土壤水分的方法有传统的点尺度物理监测、基于物理模型和数学计算方法的模拟技术以及遥感监测方法。而随着遥感技术的发展, 逐渐克服了前两种方法由于采样点限制以及所需参数复杂等制约因素。从不同的遥感波段和遥感方法划分, 介绍了可见光-近红外遥感、热红外遥感、微波遥感的发展现状及不同波段所对应的研究方法, 并对各种方法的优势和局限性进行了总结, 加强改进模型方法研究, 增强主被动微波结合反演方法的利用对于减少植被对土壤水分的影响有很大的益处, 这也是今后遥感技术反演农田地表土壤水分的趋势。

关键词: 热红外, 遥感反演, 合成孔径雷达, 被动微波, 干旱指数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.003

Progress of the Methods of Remote Sensing Monitoring the Soil Moisture

Xu Jiixin¹, Li Xuan¹, Zhu Yongchao², Fang Shibo¹, Wu Dong¹, Wu Yingjie¹

(1 Institute of Ecoenvironment and Agrometeorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730000)

Abstract: Soil moisture is one of the crucial elements affecting agricultural production. To monitor the surface soil moisture of the cropland is of great significance for agricultural production. Currently, the methods applied to monitor the soil moisture include the traditional physical measurement based on the sites, the simulation techniques by physical models and mathematical methods, and the remote sensing technology. The deficiencies induced by the first two methods mainly are the limited samples and the complicated parameters. Now these have been overcome with the development of remote sensing. On the basis of the differences among spectral bands and methods for remote sensing, this paper introduces the progress of remote sensing techniques about visible-near infrared, thermal infrared, microwave and their corresponding methodology, summarizes the advantages, disadvantages and applicability for different methods and also give the outlook about the retrieval of surface soil moisture of cropland by the remote sensing technology. Strengthen the study of improved model method and enhance the use of active and passive microwave data to reduce the influence of vegetation on soil moisture. It is also the trend of remote sensing monitoring the soil moisture over agricultural area in the future.

Keywords: thermal infrared, remote sensing monitoring, synthetic aperture radar, passive microwave, drought index

0 引言

在地球生态系统中, 地表土壤水分是连接地表水和地下水的纽带, 也是气候、水文和农业等研究领域衡量土壤干旱程度的重要指标^[1-3]。同时可以通过其变化来改变地表反射率、地表蒸发量、土壤热容量和植被生长状况等地表参数, 从而影响地表水热过程^[4-5], 在农业生产中, 农田地表土壤水分是农作物生长发育

的基本条件, 也是作物干旱灾害的预警信息^[6], 在作物灌溉前, 土壤水分是干旱监测的重要指标、判断作物需水量的重要依据和作物长势监测、估产的重要参数; 作物灌溉后, 土壤水分的变化情况是评价灌溉效果的重要依据。因此获取精确可靠的土壤水分信息对准确实施农田灌溉具有重要的指导意义。

近年来, 国内外对土壤水分的反演做了大量研究, 现有反演方法已相对成熟, 主要有以下三类: 传统的基于点尺度土壤水分物理监测方法、基于物理模型和数学计算方法的土壤水分模拟技术和基于空间遥感技术的土壤水分反演方法^[3, 7-9]。传统的基于点尺度土壤水分物理监测方法主要有取样称重法(烘土法)^[10]、张力计法(负压计法)^[11]、电阻法、中子仪

收稿日期: 2018年9月13日; 修回日期: 2019年2月27日

第一作者: 徐嘉昕(1993—), Email: xjxkiwi@163.com

通信作者: 房世波(1974—), Email: sbfang0110@163.com

资助信息: 干旱气象科学研究基金(IAM201607); 中国气象科学研究院的基本科研业务费(2018Z008, 2017Z004); 国家自然科学基金(61661136005)

法^[12]、驻波比法、时域反射仪法（TDR法）^[13-14]和土壤湿度计法等。上述方法具有测定的土层多、深度大、精度高等特点，同时，大气和植被等要素对其影响很小。由于取样称重法在测量精度上具有其他方法不可比拟的优势，因此它作为一种实验室测量方法并用于其他方法的标定将长期存在。但是，由于土壤水分在空间、时间尺度上的变化都较大，因此基于点尺度的土壤水分监测方法最大的不足则是取样代表性难以保证，不仅会消耗大量人力财力，而且无法在规定时间内取得大范围的地表土壤湿度信息，数据实时性差。基于数学模型的土壤水分模拟计算方法主要有数理统计模型（统计回归模型、人工神经网络模型等）^[15]、概念性机理模型、物理机理模型等。对于较小空间尺度来说，一般利用确定性的土壤水动力模型或者基于随机理论的数理统计模型都可对土壤水分变化进行研究。其中，数理统计模型与概念型模型这类模型的优势是参数要求不高，计算量较小，缺点是模拟精度有限；而物理机理模型虽然模拟精度较高，但对土壤参数要求较为复杂，所需气象数据较多，不适用于大尺度农田地表土壤水分监测^[16-18]。

而随着空间遥感技术的发展，以上反演土壤水分方法的缺点可以逐渐被克服，其时效快、区域广等特点使得遥感技术成为反演农田地表土壤水分变化的主要方法。从原理上可分为两大类：一类基于土壤水分的变化引起土壤光谱反射率的变化。另一类基于干旱引起植物生理过程的变化，从而改变叶片的光谱属性，并显著地影响植物冠层的光谱反射率^[19]。

1 土壤水分遥感反演方法发展与现状

1.1 可见光和近红外遥感

该方法主要利用土壤及土壤上所覆盖植被的光谱反射特性来估算土壤水分。当土壤含水量较高时，各个波段的光谱反射率下降，反之上升，因此光谱反射率在一定程度上可以反映土壤表面的干湿状况。20世纪60年代初期，基于遥感技术进行土壤水分反演的理论研究已经开始了^[20]，到70年代中期，日本学者以5种土壤的反射率为基础，建立了绿波段和蓝波段的胶片密度和土壤水分含量的多元回归线性方程^[21]。Henricksen等^[22]利用1983年和1984年两个时期Ethiopia的四景AVHRR影像，比较了同地区不同时期的干旱状况。80年代起我国学者也开始了此方面的研究，李建龙等利用TM 2~4波段数据，建立了农田土壤水分遥感监测模型，采用反演模型与地面实践相结合的方法，建立土壤水分遥感动态监测系统^[23]。徐彬彬等^[24-26]通过野外观测不同水分情况下的稻田光谱反射曲线，发现水体在蓝绿波段（0.4~0.6 μm）反射率较

高，红波段开始下降，红外波段明显吸收；水中含有较多泥沙时，光谱反射率明显增高，湿土的光谱反射率明显下降。进一步表明特别是在红外波段，土壤含水量的增加会降低光谱反射率。但是当田间持水量超过最大值时，土壤的光谱反射率又再次增加，这是因为土壤水表面的镜面反射引起的。郭广猛等基于水的吸收率曲线，利用MODIS数据的中红外波段来反演土壤湿度，通过野外调查验证和回归分析，表明土壤水分与MODIS第7波段的反射率之间具有良好的相关性^[27]。但虞献平等^[28]指出，利用土壤反射率的差异来反演土壤水分，会因为土壤类型不同，使得土壤水分反演误差较大。

1.2 热红外遥感

该方法的理论基础是不同水分含量土壤的热力学特征明显不同，即土壤水分的变化会导致土壤的热传导系数、密度以及比热容都发生变化，从而使得土壤温度发生变化。热红外遥感主要是利用土壤表面温度变化幅度、土壤植被冠层和冠层空气温差、表观热惯量、蒸散比等来监测土壤含水量^[29]。Myers等^[30]指出，无植被或者植被覆盖较少的土壤其水分含量可由土壤表面温度变化测定，最深可到50 cm。Watson等通过热红外遥感影像插值计算得到地表温度日较差，从而获得土壤热惯量^[31]。Jackson^[32-34]等利用NDVI监测干旱发现只有水分胁迫严重时，植被指数才会发生明显的变化。Kogan^[35]在20世纪90年代初提出了植被状态指数（Vegetation Condition Index，VCI），Price用植被指数、地表温度来监测研究区蒸散发量。章立玲等^[36]通过实验发现，土壤水分含量越大，土壤温度变化越慢，潮湿土壤热容量大，温度不易升高，干燥土壤热容量低，温度易升高。罗秀陵^[37]和李杏朝^[38]利用AVHRR4波段的数据，分别结合密度分割法、日夜温差法和地面气象、农情等资料进行旱情监测。目前有较多植被、水文、土壤水分等指数应用于微波遥感法，如表1所示^[39]。

1.3 微波遥感

微波遥感反演土壤水分的理论基础是土壤的介电特性与土壤水分含量有密切的相关性，表现在遥感影像是灰度值及亮度温度的变化^[40-41]。液态水的介电常数大概在80，干土的为3，随着土壤中水分含量的不断增加，土壤介电常数随之增大，导致后向散射系数同样增大^[42-44]。李俐等^[45]总结出用于建立土壤水分与后向散射系数之间关系的常用算法，主要有变化检测法^[46-47]、回归分析法^[48-49]、人工神经网络法^[50-52]、优化方法^[53]、查找表反演法^[54-55]、多极化数据反演方法^[56-57]。主要分为主动微波遥感、被动微波遥感和主被动结合微波遥感。

表1 常用指数名称、类型总结
Table 1 Summary of common index type

指数名称	指数类型	所需变量
干旱异常指数 (AAI)	降水和温度	<i>P, T, PET, ET</i>
Keetch-Byram干旱指数 (KBDI)	降水和温度	<i>P, T</i>
标准化降水指数 (SPI)	降水和温度	<i>P</i>
综合干旱指数 (CDI)	合成、建模或实验	<i>Mod, P, Sat</i>
全球干旱监测与预报系统 (GIDMaPS)	合成、建模或实验	<i>Multiple, Mod</i>
全球土地数据同化系统 (GLDAS)	合成、建模或实验	<i>Multiple, Mod, Sat</i>
多变量标准化干旱指数 (MSDI)	合成、建模或实验	<i>Multiple, Mod</i>
美国干旱监测 (USDM)	合成、建模或实验	<i>Multiple</i>
增强型植被指数 (EVI)	植被	<i>Sat</i>
蒸发气压指数 (ESI)	植被	<i>Sat, PET</i>
归一化植被指数 (NDVI)	植被	<i>Sat</i>
温度条件指数 (TCI)	植被	<i>Sat</i>
植被条件指数 (VCI)	植被	<i>Sat</i>
植被干旱响应指数 (VegDri)	植被	<i>Sat, P, T, AWC, LC, ER</i>
植被健康指数 (VHI)	植被	<i>Sat</i>
水需求满足指数 (WRSI和Geo WRSI)	植被	<i>Sat, Mod, CC</i>
加权异常标准化降水 (WASP)	降水和温度	<i>P, T</i>
干旱指数 (AI)	降水和温度	<i>P, T</i>
中国Z指数 (CZI)	降水和温度	<i>P</i>
作物水分指数 (CMI)	降水和温度	<i>P, T</i>
干旱面积指数 (DAI)	降水和温度	<i>P</i>
干旱监测指数 (DRI)	降水和温度	<i>P, T</i>
有效干旱指数 (EDI)	降水和温度	<i>P</i>
NOAA干旱指数 (NDI)	降水和温度	<i>P</i>
帕尔默干旱严重性指数 (PDSI)	降水和温度	<i>P, T, AWC</i>
帕尔默Z指数 (PzI)	降水和温度	<i>P, T, AWC</i>
降雨异常指数 (RAI)	降水和温度	<i>P</i>
自校准Palmer干旱严重性指数 (sc-PDSI)	降水和温度	<i>P, T, AWC</i>
标准化异常指数 (SAI)	降水和温度	<i>P</i>
标准化降水蒸发指数 (SPEI)	降水和温度	<i>P, T</i>
帕尔默水文干旱严重性指数 (PHDI)	水文	<i>P, T, AWC</i>
标准化水流指数 (SSFI)	水文	<i>SF</i>
标准水位指数 (SWI)	水文	<i>GW</i>
流域干旱指数 (SDI)	水文	<i>SF</i>
地表水供应指数 (SWSI)	水文	<i>P, RD, SF, S</i>
土壤水分异常 (SMA)	土壤水分	<i>P, T, AWC</i>
干旱农业参考指标 (ARID)	降水和温度	<i>P, T, Mod</i>
作物特异性干旱指数 (CSDI)	降水和温度	<i>P, T, T_d, W, Rad, AWC, Mod</i>
校正干旱指数 (RDI)	降水和温度	<i>P, T, S, RD, SF</i>
总干度指数 (ADI)	水文	<i>P, ET, SF, RD, AWC, S</i>
标准融雪和降雨指数 (SMRI)	水文	<i>P, T, SF, Mod</i>
蒸散发亏缺指数 (ETDI)	土壤水分	<i>Mod</i>
土壤水分亏缺指数 (SMDI)	土壤水分	<i>Mod</i>
土壤水分储存 (SWS)	土壤水分	<i>AWC, RD, ST, SWD</i>
土壤调整植被指数 (SAVI)	植被	<i>Sat</i>
归一化差分水指数 (NDWI)	植被	<i>Sat</i>

注: *P*为降水数据; *T*为温度数据; *Mod*为建模数据; *Sat*为卫星数据; *Multiple*为多重指标应用; *AWC*为有效水分含量; *SF*为径流数据; *GW*为地下水数据; *RD*为水库数据; *S*为积雪场数据; *ET*为蒸发皿蒸发数据; *PET*为潜在蒸发皿蒸发数据; *T_d*为露点温度数据; *W*为风速数据; *Rad*为太阳辐射数据; *LC*为土地覆盖类型数据; *ER*为生态区数据; *CC*为产量系数数据

1.3.1 主动微波遥感

土壤含水量不同,其雷达回波信号也不同,据此可建立土壤水分与后向散射系数的关系。目前大多数研究多采用统计方法,通过实验数据的相关分析建立土壤水分与后向散射系数之间的经验函数关系^[21],其中以线性关系的应用最为普遍。国内李杏朝^[58]利用这种方法,在植被较少、地形较平坦的区域用X波段散射计测量了土壤后向散射系数,并与同步获取的X波段、HH极化的机载SAR影像反演出的土壤水分相比较,得出两种方法所测出的土壤水分精度相似。田国良等^[59]利用11月中旬在河南取得的波段机载合成孔径雷达影像进行小麦区土壤水分监测,将测量的结果分成8个不同水分等级。曾旭静等^[60]以哨兵1号双极化合成孔径雷达遥感影像为基础,结合同时段光学遥感数据Landsat 8,对北安—黑河高速沿线地区不同植被覆盖程度下复杂地表土壤水分进行反演研究,探讨不同极化组合方式在不同土地利用方式下的土壤水分含量反演结果。结果表明:VH等极化方式反演的整体效果不佳,VV极化和双极化VV/VH组合在裸地和低植被覆盖区的效果更好,而VV与辅助变量NDVI组合方式在中等植被覆盖地区土壤含水量反演精度最高,同时也说明了哨兵1号C波段合成孔径雷达在土壤水分研究中的高效性和精确性。李新武^[61]等提出了一个针对重复轨道SIR-C数据的极化干涉SAR植被覆盖地表土壤水分反演方法,同时,探讨和分析了极化干涉SAR最大似然反演分解模型在植被覆盖区土壤水分反演中的潜力和有效性。试验结果表明:基于极化干涉SAR最大似然反演分解模型的植被覆盖区土壤水分反演方法得到的结果具有足够高的反演精度。

1.3.2 被动微波遥感

随着土壤水分的变化,由辐射计观测到的亮温也在随之变化。针对裸露的土壤表面而言,土壤水分的增加将会导致亮度温度减小。国内外专家围绕两者的关系做了大量的野外试验和理论研究,与主动微波遥感相比,被动微波遥感土壤水分研究开展较早,技术和算法相对也更加成熟一些。20世纪70年代,Schmugge等^[62]对试验数据进行了分析,发现亮度温度与土壤水分具有较好的线性相关。在植被覆盖的地区,由于植被中含有水分,使得同一地区土壤水分的反演出现了较大误差,因此需建立土壤水分与植被之间的联系^[63-64]。Christian等通过对大麦5个波段的微波亮度进行野外测量,得出了被动微波辐射信息包含土壤水分和植被含水量信息,并且植被水分对低频波段产生了强烈的反应,而作物生育过程对高频波段的发展变化更加敏感。毛克彪等^[65]总结出针对于裸

露无植被覆盖的地表而言,典型的微波模型有几何光学模型(GOM)、物理光学模型(POM)、积分模型(IEM)、改进的积分模型(AIEM)、小扰动模型(SPM)、Q/H及Q/P模型;若地表有植被覆盖,代表模型有水云模型、农作物模型、MMICS模型。其中,由于被动微波受植被水分的影响很大^[66],因此裸露地表的辐射信号相对简单,所以针对其的模型也更成熟。

1.3.3 主被动微波结合遥感

主被动微波遥感结合对在反演土壤水分可以提高土壤水分的反演精度,而且相对于单一使用主动或被动微波遥感,可提高空间分辨率^[67-68]。当前的方法主要分为两类:一是将二者融合,共同反演土壤水分;二是先采用高分辨率的主动微波遥感测定植被和粗糙度参数,然后辅助以低分辨率被动微波遥感测定的亮温值来估算土壤湿度或者以高分辨率的主动微波下推被动法获得的土壤湿度^[69-71]。李震等^[72]为消除植被覆盖的影响,建立了一个半经验公式模型,用来计算体散射项,综合时间序列的主被动微波遥感数据,进而监测地表土壤水分的变化状况。赵天杰等^[73]针对ALOS/PALSAR数据,通过对大量后向散射模拟数据的分析,建立裸露地表粗糙度计算模型;利用模拟数据分析地表辐射亮温随土壤水分和粗糙度的变化规律,在此基础上构建NN模型结合粗糙度计算结果和辐射计飞行数据反演研究区域的土壤水分。卫炜^[74]利用主被动微波遥感的特点,提出了基于PALS系统的主被动微波遥感联合监测土壤水分方法,使得不用大量获取植被含水量和地表温度等辅助数据就可以实现对农田土壤水分的反演以及动态变化监测。孙亚勇^[75]开展C波段主动微波雷达数据和L波段被动微波辐射计亮温数据协同反演表层土壤水分研究。

红外—近红外遥感、热红外遥感和微波遥感这几种不同波段反演土壤水分的优缺点归纳如表2。

表2 不同遥感波段反演土壤水分的优缺点归纳
Table 2 Advantages and limitations of different spectral bands in monitoring the soil moisture

遥感波段	优势性	局限性
近红外—红外遥感	空间、时间分辨率高,数据来源广泛,技术较为成熟	受大气和植被的影响大,对地物穿透能力差,适用于无植被或植被覆盖较少的农田
热红外遥感	空间、时间分辨率高,数据来源广泛,技术较为成熟	受大气和植被的影响大,对地物穿透能力差
微波遥感	受大气影响小,对地物穿透能力较好	受植被和土壤表面粗糙度影响大

2 农田地表土壤水分主要反演方法

2.1 变化检测法

变化监测法是通过建立两景不同时期影像的土

壤水分与后向散射系数差值间的简单关系模型来进行土壤水分的反演。张祥等^[76]基于改进的变化检测模型,利用不同时期Sentinel-1A数据反演农田土壤水分变化信息。首先利用积分方程模型(Integral Equation Model, IEM)模拟数据分析雷达后向散射系数变化与土壤水分变化之间的关系,在作物生育期内,土壤表面粗糙度没有发生变化的情况下,以上两者具有极高关联性,验证了IEM模型用于反演土壤水分变化的合理性。在此基础上,利用研究区时序Sentinel-1A合成孔径雷达数据和研究区实测数据构建土壤水分变化检测模型,从而利用雷达后向散射系数变化估算土壤水分变化信息。由此验证了时序Sentinel-1A数据用于监测农田土壤水分变化的实用性。

何连等^[77]基于变化检测法的Alpha近似模型,结合哨兵1号卫星C波段SAR数据,实现了农田地表土壤水分的反演。首先利用微波辐射传输模型验证了Alpha近似模型(1)在土壤水分反演中的可行性。验证结果发现,对于土壤散射起主要作用的实验区域,Alpha近似模型可以有效地消除地表粗糙度和植被对雷达后向散射系数的影响。

$$\frac{\sigma_{o,PP}^{T_2}}{\sigma_{o,PP}^{T_1}} \approx \left| \frac{\alpha_{PP}^{T_2}(\theta, \varepsilon_s)}{\alpha_{PP}^{T_1}(\theta, \varepsilon_s)} \right|^2, \quad (1)$$

式中 σ_o 表示雷达后向散射系数; θ 为雷达入射角度; ε_s 为土壤相对介电常数; T_1 和 T_2 表示雷达数据获取的时间; α_{PP} 为极化幅度,是雷达入射角度和土壤介电常数的函数;PP表示极化方式,为HH或者VV^[77]。

在此基础上,结合研究区多个时间段内哨兵1号合成孔径雷达数据,利用Alpha近似模型构建了农田植被覆盖较多时土壤水分观测方程组,最终得到了农田地表土壤水分并且反演精度较好。

2.2 植被指数法

植被指数法是植被反射波段的红外和近红外两种波段的组合^[78]。苏永荣等^[79]基于能量平衡方程和TVDI,提出一种定量干湿边选取方法和改进的TVDI模型——定量温度植被指数(Temperature Vegetation Quantitative Index, TVQI),以MODIS遥感数据为基础,实现了陕西省关中平原中6个县的真实土壤水分的遥感估算。汪倩倩等^[80]利用GF-3和Landsat8等遥感数据在土壤水分监测中的优势,通过水云模型消除植被对雷达后向散射系数的影响,获取土壤直接后散射系数,然后结合入射角、PDI等指数共同作为模型输入参数分别建立了HH和HV不同极化方式下的土壤水分反演模型,实现了大范围农田土壤水分的反演,证实建立一种耦合微波和光学遥感数据的土壤水分反演方法具有实际应用价值。

2.3 热惯量法

土壤的热惯量与土壤水分有密切的关系,同时也控制着土壤温度日较差的大小^[81],由于土壤温度日较差可以由遥感影像资料进行获取,由此可间接得到土壤水分的含量大小。土壤热惯量的函数是土壤对其热容量变化的响应,其模型如下:

$$p = (k\rho c)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中, p 为热惯量, k 为土壤热导率, ρ 为土壤密度, c 为土壤的比热容。

3 总结与展望

1) 红外—近红外遥感虽然空间或时间分辨率较高,数据来源也较广,但因为其受天气的影响较为严重,而且难以穿透覆盖在地表上的植被,适用于无植被或植被覆盖较少的农田土壤水分测量。在现阶段的微波遥感技术下,无植被覆盖或者植被覆盖较少的农田地表土壤水分的监测大多以微波遥感数据为基础,引入函数模型反演出研究区域的土壤含水量值。

2) 变化监测法在一般情况下获取的是两个不同时期影像之间的土壤水分相对值,不是一定值,另外这种方法对于时段内土壤粗糙度或者植被覆盖度发生明显变化的区域并不适用。植被指数法是结合植被的水量信息来监测土壤的含水量,不足之处在于植被含水量信息一般都难以实时取得,利用当地多年、多平均的EVI或者其他植被指数值,可代表当时的状况。热惯量法只适合裸地或者作物出苗期,结合植被和土壤表面热信息的方法在植被覆盖较低时效果不错^[82],此外,由于土壤属性对于作物干旱灾害反演结果影响较大,尤其土壤保持水分的能力是重要的影响因子,Fang等^[83]重新定义和遥感反演了土壤持水力指数,可以很好反映不同属性土壤的持水力差异,因此加强改进模型方法研究是遥感反演土壤水分方面一个有益的探索。

3) 目前在反演农田土壤水分时,多以无植被或者植被覆盖较少的区域做野外实验研究,但在作物生长季后期植被覆盖率将会提高,主被动微波遥感的结合对于进一步消除植被的影响起到了很大的作用,而农田地表土壤水分的反演利用遥感数据进行空间高分辨率与时间高分辨率的相互结合,不仅使得作物区的土壤水分信息在空间分布上达到精确,更能快速掌握土壤墒情,为各项农耕活动做好充分的准备,这也是今后土壤水分数据研究的重点和难点。

参考文献

- [1] 张滢,丁建丽,周鹏.干旱区土壤水分微波遥感反演算法综述.干旱区地理,2011,34(4):671-678.
- [2] 杨涛,官辉力,李小娟,等.土壤水分遥感监测研究进展.生态学报,2010,30(22):6264-6277.

- [3] 王明霞, 毋兆鹏. 遥感监测土壤湿度综述. 干旱环境监测, 2013, (4): 163-168.
- [4] 郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1162-1167.
- [5] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 灌溉农田土壤湿度的时空变化特征. 中国农业气象, 2010, 31(3): 423-426.
- [6] 房世波, 阳晶晶, 周广胜. 30年来我国农业气象灾害变化趋势和分布特征. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 69-73.
- [7] 张红梅, 沙晋明. 遥感监测土壤湿度的方法综述. 中国农学通报, 2005, 21(2): 307-307.
- [8] 高学睿, 魏素洁, 李悦, 等. 区域尺度农田土壤湿度研究方法综述与展望. 人民长江, 2013(z1).
- [9] Chen S L, Liu Y B, Wen Z M. Satellite retrieval of soil moisture: an overview. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [10] 王振龙, 高建峰. 实用土壤墒情监测预报技术. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [11] 刘思春, 高亚军, 王永一, 等. 土壤水势测定方法的选择及准确性研究. 干旱地区农业研究, 2011, (4): 189-192.
- [12] 田昌玉, 孙文彦, 林治安, 等. 中子仪测定土壤水分方法的研究进展. 中国农学通报, 2011, (18): 7-11.
- [13] 吴月茹, 王维真, 晋锐, 等. TDR测定土壤含水量的标定研究. 冰川冻土, 2009, (2): 262-267.
- [14] 郭卫华, 李波, 张新时, 等. FDR系统在土壤水分连续动态监测中的应用. 干旱区研究, 2003, (4): 247-251.
- [15] 高峰, 李建平, 王黎黎, 等. 土壤水运动理论研究综述. 湖北农业科学, 2009, (4): 982-986.
- [16] 李明星, 马柱国, 杜继稳. 区域土壤湿度模拟检验和趋势分析——以陕西省为例. 中国科学(地球科学), 2010, (3): 363-379.
- [17] Fasinmirin J T, Olufayo A A, Oguntunde P G. Calibration and validation of a soil water simulation model for field grown *Amaranthus cruentus*. *International Journal of Plant Production*, 2008, 2(11): 269-278.
- [18] 王润冬, 陆垂裕, 孙文怀, 等. 基于MODCYCLE模型的农田降水入渗补给研究. 人民黄河, 2011, (4): 51-53.
- [19] 刘志明, 张柏, 晏明, 等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576-583.
- [20] Bowers S A, Hunko R J. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 1965, 100(2): 130-138.
- [21] Chanzy A. Basic soil surface characteristics derived from active microwave remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 1993, 7(3-4): 303-319.
- [22] Henricksen B L. Reflections on drought: Ethiopia 1983-1984. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 5.
- [23] 张智韬, 陈俊英, 刘俊民, 等. TM6对遥感主成分分析监测土壤含水率的影响. 节水灌溉, 2010, (4): 16-19.
- [24] 徐彬彬, 季耿善. 土壤光谱反射特性研究及其应用. 土壤学进展, 1987, 15(1): 3-11.
- [25] 徐彬彬. 我国土壤光谱线之研究. 遥感学报, 1991, 6(1): 61-71.
- [26] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究. 土壤, 2000, 32(6): 281-287.
- [27] 郭广猛, 赵冰茹. 使用MODIS数据监测土壤湿度. 土壤, 2004, 36(2): 219-221.
- [28] Yu Xianping, He Hongshi. *The Study of Ecology and Environment by Remote Sensing*. Beijing: Science Press, 1990.
- [29] 姚坤, 师庆东, 逢淑女, 等. 遥感反演土壤湿度综述. 楚雄师范学院学报, 2008, 23(6): 89-92.
- [30] Myers V I, Heilman H D. Thermal IR for soil temperature studies. *Photogram metric Engineering and Remote Sensing*, 1969, 35: 1024-1032.
- [31] Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images. *Remote Sensing of Environment*, 1971, (3): 2017-2041.
- [32] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981, 17: 1133-1138.
- [33] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 1988, 9(4): 309-317.
- [34] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J Jr, et al. Normalizing the stress degree day for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24: 45-55.
- [35] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 15.
- [36] 章立玲, 朱俊. 土壤含水量对温度变化规律的实验研究. 科协论坛, 2012(7): 132-133.
- [37] Luo X L, Xue Q, Zhang C H, et al. Drought monitoring using NOAA-AVHRR data in Sichuan province. *Met eological Monthly*, 1996, 22(5): 35-38.
- [38] Li X C, Dong W M. Methods research on monitoring drought by using remote sensing and GIS. *Remote Sensing Technology and Application*, 1996, 11(3): 7-15.
- [39] WMO/GWP Integrated Drought Management Programme (IDMP). *Handbook of Drought Indicators and Indices*. WMO-No. 1173. Geneva/Stockholm: WMO/GWP, 2016.
- [40] Njoku E G, Kong J A. Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture. *J Geophys Res*, 1977, 82(3): 108-3118.
- [41] Shu N. *Principles of Microwave Remote Sensing*. Wuhan: Wuhan University Press, 2001: 67-69.
- [42] Zhong R F, Guo H D, Wang W M. Overview of soil moisture retrieval from passive microwave remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(1): 49-55.
- [43] 张俊荣, 王丽巍, 张德海. 植被和土壤的微波介电常数. 遥感技术与应用, 1995, 10(3): 40-50.
- [44] Chanzy A. Basic soil surface characteristics derived from active microwave remote sensing. *Remote Sensing Review*, 1993, 7: 303-320.
- [45] 李俐, 王荻, 王鹏新, 等. 合成孔径雷达土壤水分反演研究进展. 资源科学, 2015, 37(10): 1929-1940.
- [46] Shoshany M, Svoray T, Curran P J, et al. The relationship between ERS-2 SAR backscatter and soil moisture: generalization from a humid to semi-arid transection. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(11): 2337-2343.
- [47] Srivastava H S, Patel P, Manchanda M L, et al. Use of multiincidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1638-1640.
- [48] Shi J C, Wang J, Hsu A Y. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254-1266.
- [49] De Roo R D, Du Y, Ulaby F T, et al. A semi-empirical backscattering model at L-band and C-band for a soybean canopy with soil moisture inversion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 864-872.
- [50] Lakhankar T, Ghedira H, Khanbilvardi R. Soil Moisture Retrieval from RADARSAT data: a neuro-fuzzy approach. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006.
- [51] Notarnicola C, Angiulli M, Posa F. Soil moisture retrieval from remotely sensed data: Neural network approach versus Bayesian method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 547-557.
- [52] Paloscia S, Santi E, Pettinato S, et al. The use of COSMO-SkyMed images for retrieving snow depth and soil moisture in mountainous areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2014.
- [53] Pierdicca N, Pulvirenti L, Bignami C. Soil moisture estimation over vegetated terrains using multitemporal remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 440-448.
- [54] Rahman M M, Moran M S, Thoma D P, et al. A derivation of roughness correlation length for parameterizing radar backscatter models. *Remote Sensing*, 2007, 28(18): 3995-4012.
- [55] Merzouki A, McNairn H, Pacheco A. Mapping soil moisture using RADARSAT-2 data and local autocorrelation statistics. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(1): 128-137.
- [56] Rodionova N V. A combined use of decomposition and empirical model for soil moisture estimation in vegetated areas from polarimetric SAR data. *Friedrichshafen: Synthetic Aperture Radar(EUSAR)*, 2008.
- [57] Hajnsek I, Jagdhuber T. Potential of estimating soil moisture under vegetation cover by means of polSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 442-454.

- [58] 李杏朝. 微波遥感监测土壤水分的研究初探. 遥感技术与应用, 1995, 10(4): 1-8.
- [59] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. 环境遥感, 1991(02): 89-98, 161.
- [60] Zeng X J, Xing Y Q, Shan W, et al. Soil water content retrieval based on Sentinel-1A and Landsat 8 image for Bei'an-Heihe Expressway. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 118-126.
- [61] 李新武, 郭华东, 李震, 等. 重复轨道SIR-C极化干涉SAR数据植被覆盖区土壤水分反演研究. 遥感学报, 2009, 13(3): 430-436.
- [62] Schmugge T J, Gloersen P, Wilheit T, et al. Remote sensing of soil moisture with microwave radio meters. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(2): 317-323.
- [63] Jackson T J, Schmugge T J, Wang J R. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies. Water Resources Research, 1982, 18(4): 1137-1142.
- [64] Camillo P T, Schmugge T S. Estimating soil moisture storage in the root zone from surface measurements. Soil Science, 1983, 135(4): 245-264.
- [65] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 466-470.
- [66] Zhu Y C, Zheng Y C, Fang S B, et al. Analysis of the brightness temperature features of the lunar surface using 37 GHz channel data from the Chang'E-2 microwave radiometer. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 750-765.
- [67] 郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1162-1167.
- [68] 余凡, 赵英时. 基于主被动遥感数据融合的土壤水分信息提取. 农业工程学报, 2011, 27(6): 187-192.
- [69] Chauhan N S. Soil moisture estimation under a vegetation cover: combined active passive microwave remote sensing approach. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(5): 1079-1097.
- [70] Lakshmi V, Bolten J, Njoku E, et al. Monitoring of large scale soil moisture from air borne PALS sensor observations during SGP99. ProcInt Geosci Remote Sens Symp, Honolulu, HI, 2000.
- [71] 杨立娟, 武胜利, 张钟军. 利用主被动微波遥感结合反演土壤水分的理论模型分析. 国土资源遥感, 2011, (2): 53-58.
- [72] 李震, 郭华东, 施建成. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化. 遥感学报, 2002(6): 481-484, 539.
- [73] 赵天杰, 张立新, 蒋玲梅, 等. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分. 地球科学进展, 2009, 24(7): 769-775.
- [74] 卫炜. 基于主被动微波遥感联合的土壤水分监测研究. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [75] 孙亚勇. 基于C和L波段主被动微波遥感的土壤水分协同反演研究. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [76] 张祥, 陈报章, 赵慧, 等. 基于时序Sentinel-1A数据的农田土壤水分变化检测分析. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 338-345.
- [77] 何连, 秦其明, 任华忠, 等. 利用多时相Sentinel-1 SAR数据反演农田地表土壤水分. 农业工程学报, 2016, 32(3): 142-148.
- [78] 闫峰, 李茂松, 王艳姣, 等. 遥感技术在农业灾害监测中的应用. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 131-136.
- [79] 苏永荣, 官阿都, 吕潇然, 等. 基于改进温度植被干旱指数的农田土壤水分反演方法. 遥感信息, 2015, (6): 96-101.
- [80] 汪倩倩, 汪权方, 王新生, 等. 地面资料稀缺区域的农田土壤水分微波与光学遥感协同反演方法研究. 中国农学通报, 2018, 34(36): 117-123.
- [81] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. 遥感学报, 1997, 1(1): 24-31.
- [82] Song Y, Fang S B, Liang H Y, et al. Comparison and application of agricultural drought indexes based on MODIS data. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(2): 215-220.
- [83] Fang S B, Yu W G, Qi Y. Spectra and vegetation index variations in moss soil crust in different seasons, and in wet and dry conditions. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 261-266.
- (上接16页)
- [35] Chen F, Zhang T, Seim A, et al. A.: Juniper tree-ring data from the Kuramenian Mountains (Republic of Tajikistan), reveals changing summer drought signals in western Central Asia. Clim-Past-Discuss, <https://doi.org/10.5194/cp-2018-44>, in review, 2018.
- [36] Chen F. Comparison of drought signals in tree-ring width records of juniper trees from Central and West Asia during the last four centuries. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(4): 1-10.
- [37] Schweingruber F H. Measurement of densitometric properties of wood. In: Hughes M K, Kelly P M, Pilcher J R, Lamarche J V C (eds). Climate from Tree Rings. Cambridge University Press, New York, 1982: 8-11.
- [38] Schinker M G, Hansen N, Spiecher H. High-frequency densitometry: a new method for the rapid evaluation of wood density variations. International Association of Wood Anatomists, 2003, 24(3): 231-239.
- [39] Sheppard P R, Graumlich L J, Conkey L E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. The Holocene, 1996, 6(1): 62-68.
- [40] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应. 生态学报, 2011b, 31(22): 6743-6752.
- [41] 陈拓, 秦大河, 李江凤, 等. 新疆昭苏云杉树轮纤维素 $\delta^{13}C$ 的气候意义. 冰川冻土, 2000, (4): 347-352.
- [42] 高琳琳, 勾晓华, 邓洋, 等. 西北干旱区树轮气候学研究进展. 海洋地质与第四纪地质, 2013, (4): 25-35.
- [43] Bakhtiyorov Z, Yu R, Monoldorova A, et al. Tree-Ring-Based summer temperature minimum reconstruction for Taboshar, Sogd Province, Tajikistan, Since AD 1840: Linkages to the Oceans. Preprints 2018, 2018060312, doi: 10.20944/preprints201806.0312.v1.
- [44] 陈峰, 王慧琴, 袁玉江, 等. 树轮最大密度记录的吉尔吉斯斯坦天山山区公元1650年以来的7—8月温度变化. 沙漠与绿洲气象, 2014, (4): 1-7.
- [45] Chen F, Yuan Y, Wei W, et al. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for Zajsan Lake area, East Kazakhstan. International Journal of Climatology, 2012, 32(7).
- [46] Zhang T W, Yuan Y J, Hu Y C, et al. Early summer temperature changes in the southern Altai Mountains of Central Asia during the past 300 years. Quaternary International, 2015, 358: 68-76.
- [47] Zubairov B, Balanzategui D, Heussner K, et al. Reconstruction of precipitation based on Schrenk Spruce Tree-Ring width in the Terskey Alatau, Kazakhstan. Berliner Geographische Arbeiten 121. 2018: 87-98.
- [48] Zhang R, Zhang T, Kelgenbayev N, et al. A 189-year tree-ring record of drought for the Dzungarian Alatau, arid Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 2017.
- [49] Zhang R, Shang H, Yu S, et al. Tree-ring-based precipitation reconstruction in southern Kazakhstan, reveals drought variability since A.D. 1770. International Journal of Climatology, 2016.
- [50] Chen F, Mambetov B, Maisupova B, et al. Drought variations in Almaty (Kazakhstan) since AD 1785 based on spruce tree rings. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016.
- [51] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的吉尔吉斯斯坦东部过去百年干湿变化. 干旱区地理, 2013, 36(4): 691-699.
- [52] Zhang T W, Diushen M, Bakytbek E, et al. Tree ring record of annual runoff for Issyk Lake, Central Asia. Journal of Water and Climate Change, 2018.
- [53] Chen F, Chen F, Zhang R B, et al. A 426-year drought history for Western Tian Shan, Central Asia, inferred from tree rings and linkages to the North Atlantic and Indo-West Pacific Oceans. Research Paper, 2013, 23 (8): 1095-1104.
- [54] Wang H Q, Chen F, et al. Comparison of drought-sensitive tree-ring records from the Tien Shan of Kyrgyzstan and Xinjiang (China) during the last six centuries. Advances in Climate Change Research, 2017, 8(1): 18-25.
- [55] 张同文, 袁玉江, 陈向军, 等. 利用树轮宽度资料重建东天山木垒地区降水量. 第四纪研究, 2015, 35(5): 1121-1133.

区域自动气象站校准关键技术研究

陈城¹ 边泽强² 曾涛¹

(1 湖北省信息技术与技术保障中心, 武汉 430074; 2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 区域自动气象站在气象预警、环境监测、气候资源利用、应对气候变化和生态文明建设中发挥了重要作用。为保证区域自动气象站观测数据的准确可靠, 需要对观测仪器进行校准。根据区域自动气象站的原理和特点, 以及区域自动气象站校准的现状, 分析了目前区域自动站校准存在的问题, 然后从区域自动站校准自动化、信息化、标准器比对和远程在线校准等4个方面的关键技术, 详细分析和研究每种关键技术的原理和实现方式。提出的区域自动气象站校准关键技术为区域自动气象站的计量校准提供了较为全面和先进的解决方案, 从而保障区域自动气象站观测数据的准确可靠。

关键词: 区域自动气象站, 自动化, 信息化, 计量比对, 远程校准

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.004

Research on Key Technologies of Regional Automatic Weather Station Calibration

Chen Cheng¹, Bian Zeqiang², Zeng Tao¹

(1 Hubei Meteorological Information and Technical Support Center, Wuhan 430074

2 Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Regional automatic weather stations play an important role in meteorological early warning, environmental monitoring, and utilization of climatic resources, climate change response and ecological civilization construction. Checking and calibrating the observation instruments is crucial to ensuring high accuracy and reliability of the observation data of regional automatic weather stations (AWSs). According to the principles and characteristics of regional AWSs and the status quo of regional AWS calibration, the existing problems of regional AWS calibration are identified. Then, the key technologies of regional AWS calibration automation, informatization, standard comparisons, and remote online calibration are studied in detail in terms of their principles and implementation of key technologies. The key technologies of regional AWS calibration proposed in this paper provide a more comprehensive and advanced solution for the metrological calibration of regional AWS, thus effectively guaranteeing the accuracy and reliability of the observation data from regional AWSs.

Keywords: regional automatic weather station, automation, informatization, comparison, remote calibration

0 引言

气象灾害是严重威胁国家安全和人民生命财产的自然灾害。提高气象灾害预警能力是国家防灾减灾的有效手段。为此, 在国家级自动气象观测站网的基础上, 全国各地先后建设大量区域地面自动气象观测站用于气象加密观测, 截至2017年, 我国已建成区域自动气象观测站约56000个, 这些区域自动气象站在气象预警、预报和气候监测、应对气候变化和生态文明建设中发挥了重要作用。特别是近年来随着清洁能源的大力发展, 区域自动气象站在能源开发利用上起到

了不可或缺的作用。例如在开发风能资源时, 从风能资源评估到拟建场区灾害性天气评估, 气象数据都尤为重要。但由于区域自动气象站通常是无人值守站, 随着时间的推移, 出现了设备老化和各种故障增多等问题, 以及获取的探测数据的可靠性日益下降等现象, 从而造成应用时的偏差, 迫切需要进行校准和维护^[1]。

为了全面保障区域自动气象站观测数据的准确可靠, 中国气象局开展了地市级移动校准维修系统的建设, 目前地市级移动校准维修系统全面建成, 实现全国340个地市级气象部门全覆盖, 为地市级气象部门开展区域自动站的现场校准提供了基础条件, 有效解决了气象观测站由设备原因引起的观测数据不准确、保障不及时等问题。

目前区域自动气象站的现场校准是将各个气象要

收稿日期: 2018年12月3日; 修回日期: 2019年3月14日
第一作者: 陈城(1989—), Email: 252636271@qq.com
资助信息: 湖北省财政项目“湖北省区域气象观测站升级改造(三期)建设项目”

素的便携式标准设备安装在计量工程车上,在区域自动气象站进行现场校准,基本上是各个区域自动站单个分要素进行现场校准,自动化集成度较低,而且没有形成网络化和信息化,各个移动计量车的标准器在计量周期内量值的稳定性和准确性没有有效的保障。

本文从区域自动气象站校准的自动化、信息化、计量比对和远程校准等方面,对区域站校准面临的关键技术进行了研究和分析,目的是提高区域自动气象站校准的效率,提高信息化水平,从而保障区域站观测数据的准确可靠。

1 区域自动气象站的原理

区域自动气象站主要由传感器、采集器、通信接口等电子单元,系统电源,以及机箱、防护罩、避雷装置等安装和配套设施组成^[2],如图1所示。

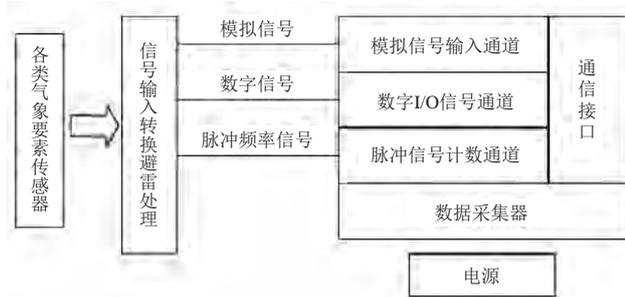


图1 区域自动气象站的工作原理

Fig. 1 The working principle of regional AWS

自动气象站各传感器的感应元件输出的信号产生变化,这种变量被CPU实时控制的数据采集器所采集,经过线性化和定量化处理,实现信号到气象要素量的转换,经过质量控制,对数据进行筛选,得出各个气象要素值,并按一定的格式存储在采集器中。现用自动气象站主要采用集散式和总线式两种体系结构。集散式是通过以CPU为核心集中采集和处理分散配置的各个传感器信号;总线式则是通过总线挂接各种功能模块来采集和处理分散配置的各个传感器信号^[3]。

目前区域自动气象站的校准主要是现场校准,按气象要素进行分类,将单要素观测设备分别与对应的标准装置通过比较法进行现场校准,参照自动气象站检定规程等方法或规范进行判断,及时更换超出最大允许误差的传感器,确保观测数据的准确可靠。

2 区域自动气象站校准的自动化

目前区域自动气象站的校准,通常采用单只传感器独立进行现场校准,由于野外环境等客观因素制约,还达不到自动化和批量化校准。如果将区域自动气象站放在实验室进行校准,可实现批量自动化校准,可以显著提高校准效率,减少检定人员的工作

量,从而实现区域自动站的及时有效的校准,保证区域站观测数据的准确可靠^[4]。

以气压传感器校准为例,气压自动化检定系统主要由气压标准设备与标准器组成,共同完成气压测量仪器的测试和检定,其框图见图2。气压标准设备是提供大气压力测试条件的装置,有压力控制设备,温度系数测试设备和压力-温度测试设备等,用于产生可变、稳定的压力测试条件或被试仪器的试验环境条件,配置多路压力转换器,系统利用计算机进行数据采集与处理,能同时进行10个大气压力传感器的自动检测,并自动输出检定结果。

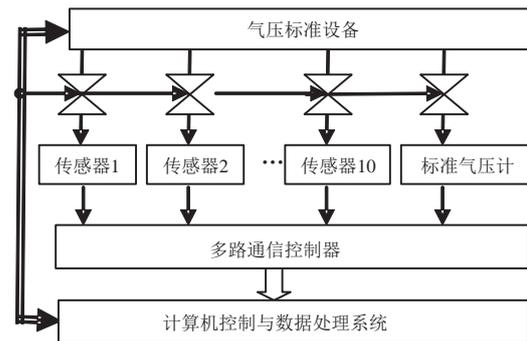


图2 气压自动化检定

Fig. 2 Auto calibration of air pressure

3 区域自动气象站校准的信息化

区域自动气象站校准的信息化是满足省级业务主管部门对区域站各要素观测仪器信息、标准的掌控和分析,包括区域自动气象站移动计量车的基本情况,移动标准器送检情况,区域站仪器检定情况,以及实现校准结果及原始记录查询等。

区域自动气象站校准信息系统结构示意图如图3所示。其业务管理系统软件,主要负责仪器收发、器具

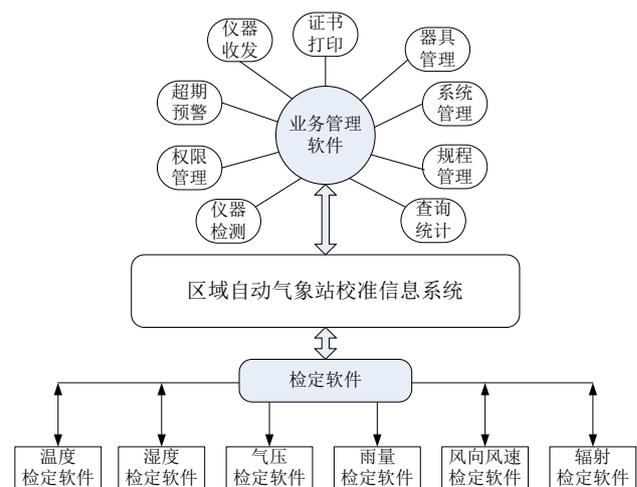


图3 区域自动气象站校准信息系统

Fig. 3 Calibration information system of regional AWS

管理、证书打印、超期预警、查询统计等业务管理。检定业务软件，包括温度检定软件、湿度检定软件、压力检定软件等。

区域自动气象站计量信息网络采用类似B/S架构设计，在省级设置中心服务器，地市级移动计量车的检定信息管理和检定业务通过气象VPN网络实时与中心服务器交互，网络结构如图4所示。

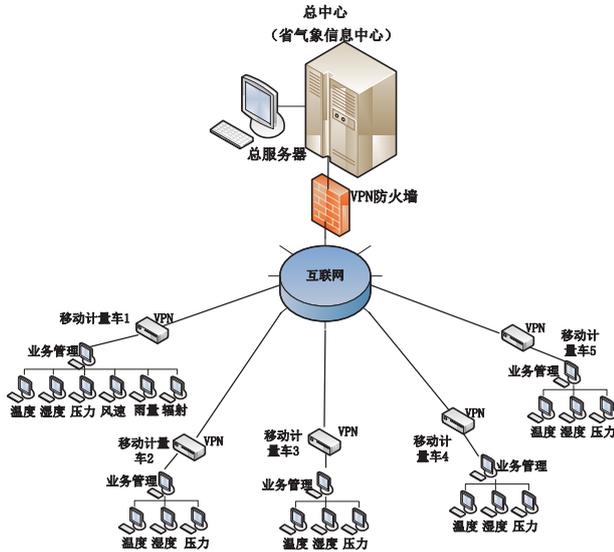


图4 区域自动气象站校准信息网络结构
Fig. 4 The network structure of regional AWS calibration

4 区域自动气象站校准标准的计量比对

为了检验、考察区域自动气象站现场移动校准设备的实际运行情况和移动检定人员水平，确保量值的准确、一致、可靠，组织开展区域自动气象站现场移动标准量值比对工作是非常必要的，同时由于区域自动气象站现场移动标准设备的使用频次高，日常维护和保存环境不尽相同，对现场移动标准设备如何进行量值比对也是需要研究和探讨的课题，因此开展区域自动气象站现场移动校准设备的量值比对工作对现场移动计量标准量值比对具有探索和示范意义^[5]。

移动气象标准计量比对是指两个或两个以上移动气象标准设备，在一定时间范围内，按照预先规定的条件，测量同一个性能稳定的传递标准器，通过分析测量结果的量值，确定量值的一致程度，确定该标准设备的测量结果是否在规定的范围内，从而判断该标准设备量值传递的准确性的活动。

4.1 移动气象标准计量比对的方式

根据比对所选择的传递标准的特性、比对不确定度需求或专业特点，比对方式通常有环式比对、星型式比对和花瓣式比对三种方式（图5~图7）。

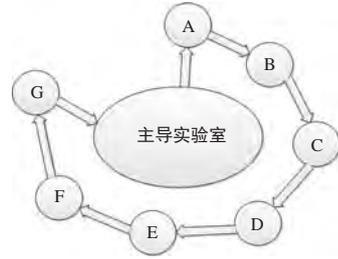


图5 环式比对
Fig. 5 Ring comparison

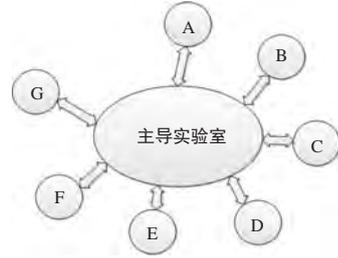


图6 星型比对
Fig. 6 Star comparison

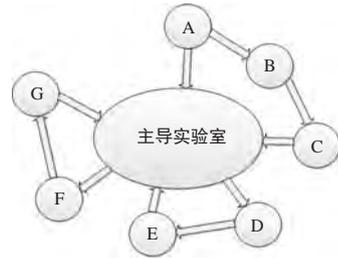


图7 花瓣式比对
Fig. 7 Petal comparison

移动校准维修系统是由各地市气象部门负责维护并开展现场校准工作，计量标准设备相同且互相独立，最后数据汇总到省级气象机构，因此，省内移动气象计量标准最佳的计量比对方式是环式比对。即首先由省级气象计量机构将传递标准在本实验室进行校准，得出校准数据后，将传递标准传送到A市，经A市移动计量车按照比对实施方案规定的程序校准后，将传递标准传送到B市，再经B市的移动计量车校准后，将传递标准传送到C市，依次类推，最后将传递标准返回到省局主导实验室，由主导实验室进行复校，以验证传递标准示值变化是否正常。

4.2 比对结果的评价方法

移动气象标准计量比对属于量值比对方案，根据量值比对通用能力验证评价原则中归一化偏差值 E_n 进行评价，归一化偏差公式如下所示：

$$E_{ni} = \frac{y_i - y_{ri}}{\sqrt{U_i^2 + U_{ri}^2}}, \quad (1)$$

式中， E_{ni} 为第*i*个移动计量车在某个测量点上的 E_n 值；

y_i 为第*i*个移动计量车在某个测量点的测量值； y_{ri} 为第*i*个移动计量车在某个测量点的参考值； U_i^2 为第*i*个移动计量车在某个测量点上的扩展不确定度； U_{ri}^2 为第*i*个移动计量车在某个测量点的参考值的扩展不确定度。

当 $|E_n| \leq 1$ ，则该移动计量车在该测量点的测量结果满意。

当 $|E_n| > 1$ ，则该移动计量车在该测量点的测量结果不满意。

当参考值的扩展不确定度 $U_{ri} \leq \frac{U_i}{3}$ 时， U_{ri} 可以忽略不计。

5 区域自动气象站远程校准的探讨

区域自动气象站远程校准可以让台站观测仪器直接溯源到国家级计量机构或省级气象计量标准，大大缩短了校准时间，观测仪器设备在正常业务工作环境下校准，避免了送校送检带来的不确定度变化，也可以根据量值变化情况适时校准。

目前远程校准主要有两种方式，一是上级计量标准拿到被检仪器现场，在现场进行校准，上级计量实验室实行远程监控；二是测量仪器自带标准器，实行定期在线自校准。其中第一种方式是目前主要的远程校准模式，主要是通过远程控制的方式，实现校准过程的在线控制与操作。第二种方式由于自带标准器本身对环境要求比较苛刻，通常只是在实验室仪器中使用，区域自动站由于环境条件和成本考虑，无法实现自带标准器的实时校准，而且自带标准器本身也需要定期检定，反而会带来工作量的增加。

不管哪种远程校准方式，仍然需要标准设备和被测设备在校准现场连接在一起，能否实现标准器和被测仪器在校准过程中分隔开来，即标准量值在传递，而标准设备与被测仪器相互分离，这样既具有现场校准的优点，又能克服计量标准仪器直接进入校准现场可能出现的准确度下降问题。下面针对区域自动气象站的数据采集器和传感器，讨论远程校准实现方式。

5.1 区域自动站采集器的远程校准

区域自动气象站数据采集器主要包括数字量和模拟量，数字量有脉冲频率等数字信号，模拟量有直流电压、直流电流、电阻等。目前数字量和频率量都可以实现在线远程无损传输，GPS还可以远程实时授时。因此区域自动气象站采集器的时钟和频率量可以完全实现在线的远程校准^[6]。

区域自动气象站数据采集器的模拟信号主要包括直流电压、直流电流、电阻等。通常数据采集器是送到计量实验室进行校准，或者使用便携信号模拟器在

现场进行校准。

依据约瑟夫森效应，可以将电压量值转换成频率量，从而实现直流电压在线传输。约瑟夫森V/变换公式如式(2)所示^[7]：

$$Y_n = \frac{n \cdot f \cdot h}{2e} = \frac{n \cdot f}{K_{J-90}}, \quad (2)$$

式中： h 为普朗克常数； e 为电子电荷； n 为整数； $K_{J-90} = 483\,597.90 \text{ GHz/V}$ 称为约瑟夫森常数； f 为微波辐射频率，一般取值70~76 GHz； Y_n 为第*n*个台阶输出的电压值。

通过约瑟夫森效应，上级计量实验室的标准电压源产生直流电压，经过V/F（电压/频率）变换器将直流电压信号转换成脉冲频率信号进行光纤传输，接收端经过F/V转换器，将脉冲频率信号还原成标准模拟直流电压信号，可用于现场校准。

5.2 区域自动站传感器的远程校准

区域自动气象站的传感器通常是用便携式标准器在现场进行校准，由于自动气象站传感器和相关标准装置的智能化程度不高，无法实现双方数据交互，不能将上级实验室的标准值远程传递到台站现场进行在线校准。但是随着量子技术的发展，在量子纠缠的帮助下，微观上量子态可以“瞬间移动”和“瞬间复制”^[8]。如果能够实现宏观上的“瞬间复制”，那么区域自动气象站传感器的远程校准将变成现实。

6 结论

为了保证区域自动气象站观测数据的准确可靠，需要对观测仪器进行校准。本文从区域自动气象站校准的自动化、信息化、计量比对和远程校准等方面，对区域站校准面临的关键技术进行了研究和分析，目的是提高区域自动气象站校准的效率，提高信息化水平，从而保障区域站观测数据的准确可靠。后续需要针对区域站的自动化批量化检定、全国区域站信息化系统建设、区域站标准设备量值保障方法以及区域站远程校准技术，进行进一步的研究和试验。

参考文献

- [1] 陈裕, 董德保, 陈进, 等. 马鞍山区域气象站常见故障分析及保障建议. 陕西气象, 2017, (6): 41-44.
- [2] 李黄. 自动气象站实用手册. 北京: 气象出版社, 2007.
- [3] 中国气象局. 自动气象站观测规范 (GB/T33703-2017). 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- [4] 敖振浪, 伍光胜, 周钦强, 等. 基于GPRS技术的自动气象站数据采集系统. 广东气象, 2007, 29(4): 1-4.
- [5] 周钦强, 李源鸿, 李建勇, 等. 自动气象站探测网实时监控关键技术. 气象科技, 2011, 39(4): 478-483.
- [6] 曾令儒, 刘民, 王立琼, 等. 远程计量校准技术. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(6): 6-11.
- [7] 刘民, 李继东, 严明, 等. 一种可控约瑟夫森直流电压标准装置. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(10): 9-14.
- [8] 刘世右, 郑凯敏. 单-双模组合压缩热态的纠缠性质及在量子隐形传态中的应用. 物理学报, 2014, 63(14): 140302-140302.

荆门市近十年气象灾害特征分析以及防御对策

王培 王佳丽 李康丽 陈艳梅 王露

(荆门市气象局, 荆门 448000)

摘要: 利用气象灾害资料和荆门市气候影响评价资料, 分析了荆门市2007—2016年的气象灾害变化特征。结果表明: 荆门市主要气象灾害有暴雨、干旱、大风、冰雹、低温雪冻、高温、大雾和霾8种, 暴雨灾害是对荆门影响最大的气象灾害, 其次是干旱; 主汛期6—8月是气象灾害的集中期。气象灾害死亡人数呈明显下降趋势, 从受灾人口、农作物受灾面积、直接经济损失三个方面看, 灾情损失呈现出先减少后增加的趋势, 2016年是气象灾害损失最严重的一年。

关键词: 荆门市, 气象灾害, 暴雨, 干旱

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.005

An Analysis of Meteorological Disasters in Jingmen in Recent Ten Years and the Responsive Measures

Wang Pei, Wang Jiali, Li Kangli, Chen Yanmei, Wang lu

(Jingmen Meteorological Bureau of Hubei, Jingmen 448000)

Abstract: Based on the meteorological disaster data and the climate impact assessment of Jingmen, the variation characteristics of meteorological disasters in Jingmen from 2007 to 2016 are analyzed. The results showed that rainstorm, drought, high wind, hail, snow freezing, high temperature, fog and haze are main types of disasters in Jingmen. The death toll caused by meteorological disasters was downtrend. The damages from disaster people, the disaster area of crops, the direct economic loss reduced first and then increased. The damage in 2016 was the most serious.

Key words: Jingmen, meteorological disasters, rainstorm, drought

0 引言

在全球气候变暖的大背景下, 各类极端天气气候事件呈现出增多增强的趋势, 造成的损失也不断加重, 对人民生活造成严重影响。邓婷等利用高分辨率气候模式对湖北未来气温的模拟与预估, 结果表明2006—2050年湖北日平均气温(T), 日最低气温(T_{\min})和日最高气温(T_{\max})呈上升趋势, 夏季中部平原区 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 相较于其他区域增幅较大^[1]; 荆门市位于湖北省中部, 地处山区、丘陵和平原接合带, 气候多样, 在气候变暖这一背景下, 气象灾害防范形势更为严峻。

2000—2006年在所有灾害造成的直接经济损失中, 干旱灾害的直接经济损失高达11.4亿元, 占直接经济损失总值的60.1%; 但是2007年之后暴雨灾害变成对荆门影响最大的气象灾害。因此为更好的向相关部门灾害风险管理提供决策参考, 本文选取2007—2016年的气象灾情进行分析。本文利用气象灾害数据

统计, 分析研究荆门市近十年来的气象灾害次数、灾情特征, 以期对灾害的强度、造成的损失和影响程度等有进一步的认识, 为更好的开展气象灾害风险预警及气象防灾减灾工作提供科学依据和技术支持^[2-3]。

1 灾情总况

本文以荆门市2007—2016年气象灾情普查为基础数据, 结合荆门市气候影响评价资料等进行数据控制, 包括逐条数据核对、除重等, 得到荆门市气象灾害数据序列。据统计, 荆门市2007—2016年共有暴雨、干旱、大风、冰雹、低温雪冻、高温、大雾和我霾8种气象灾害, 从表1中可以看出2007—2016年有9年出现暴雨, 7年出现干旱、大风, 6年出现高温, 3年出现冰雹、低温雪冻, 10年均有大雾和霾。

2 气象灾害灾次特征

2.1 年分布

2007—2016年荆门市发生暴雨42次、干旱29次(月尺度标准)、高温13次、大风12次、冰雹4次、低温雪冻3次、大雾205次、霾412次。除去大雾和霾, 灾害次数最多的是暴雨和干旱, 平均4.2次/a和2.9

收稿日期: 2018年4月18日; 修回日期: 2018年5月23日
第一作者: 王培(1987—), Email: 421472486@qq.com

表1 2007—2016年荆门气象灾害

Table 1 Jingmen meteorological disasters from 2007 to 2016

年份	灾种
2007	暴雨、大风、大雾、霾
2008	暴雨、干旱、大风、冰雹、低温雪冻、大雾、霾
2009	暴雨、干旱、大风、低温雪冻、高温、大雾、霾
2010	暴雨、干旱、大风、低温雪冻、高温、大雾、霾
2011	暴雨、干旱、大风、大雾、霾
2012	暴雨、干旱、大风、高温、大雾、霾
2013	暴雨、干旱、高温、大雾、霾
2014	干旱、高温、大雾、霾
2015	暴雨、冰雹、大雾、霾
2016	暴雨、大风、冰雹、高温、大雾、霾

次/a; 高温和大风是另外两种出现次数较多的气象灾害, 平均灾次为1.3次/a和1.2次/a。

图1为2007—2016年荆门市气象站灾害灾次的月变化图, 为有较好的图示效果, 图中雾和霾取的是10年平均值。总体来看, 荆门全年各月均有气象灾害发生, 并且每月灾害出现的种类在3种或以上; 雾和霾多集中在秋冬季节, 除去雾和霾, 无论是灾次还是灾种, 都主要集中在出现在主汛期6—8月。灾次以7月最多, 其次是6月和8月; 12月至次年2月次之; 最少的为9月, 其次是4月。出现灾种最多的是6、7、8月, 除了低温雪冻, 其余7种灾种均有出现。6—8月是荆门的主汛期, 是每年



图1 2007—2016年荆门市气象灾害灾次月变化图

Fig. 1 The monthly variation of meteorological disaster frequency in Jingmen from 2007 to 2016

灾害性天气频发期, 暴雨、高温、干旱、强对流为主要灾害, 有的年份还出现旱涝并存^[4-5]。

荆门8种气象灾害的月变化情况差异较大。雾和霾一年中12个月均有发生, 持续时间最长, 但是有季节性, 多发生在10月至次年3月。暴雨灾害出现在4—8月, 6和7月最多, 分别13次和15次。干旱灾害的持续时间也较长, 一年中12个月均有发生的可能, 但7、8月和11月至次年3月出现的可能性最大, 也就是常说的伏旱和秋冬连旱。高温是仅出现在夏季, 且集中在7月和8月, 均为6次。大风和冰雹灾害都属于强对流天气造成的气象灾害, 在时间分布上较为零散, 但多集中在5—8月, 出现最早的强对流灾害是5月的冰雹灾害, 6—8月两种灾害均出现过, 但大风多一些, 冰雹5—8月每月均仅有一次, 大风7月有三次。低温雪冻共出现过三次, 分别在1月、2月和11月。

2.2 年际分布

除去大雾和霾, 统计显示, 2007—2016年, 荆门共发生各类气象灾害102次, 平均每年发生10.2次; 其中2010年出现灾次最多, 有18次, 2015年灾次最少, 有4次, 如图2所示。

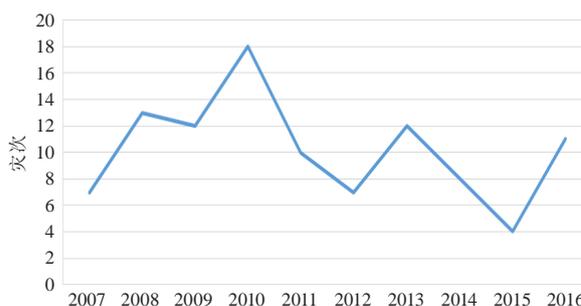


图2 2007—2016年荆门市气象灾害年总次变化图

Fig. 2 2007—2016 variation of meteorological disaster frequency in Jingmen

就单一灾害而言(图3), 暴雨、大风和冰雹灾害总次数是先减少后增加趋势, 2007—2014年为减少趋势, 2014年暴雨、大风和冰雹灾害次数均为0, 2015—2016年又呈增加趋势。干旱次数是先增加后减少趋势, 2007—2014年是逐渐增加的, 2015—2016年无干旱现象。高温次数整体是年际增加趋势, 但是中间也有间歇年。低温雪冻次数是年际减少趋势, 2008—2010年出现灾害, 2011—2016年均无低温雪冻。

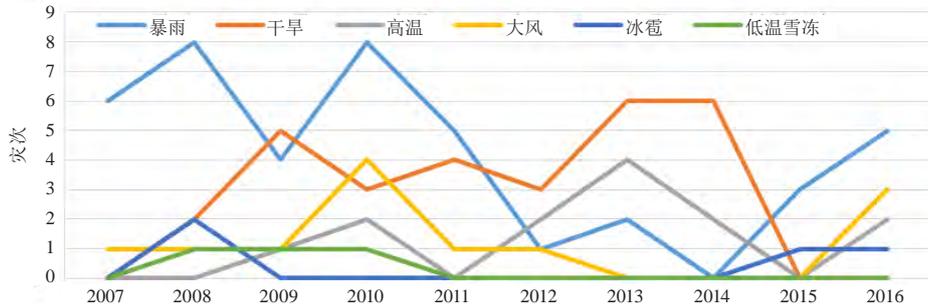


图3 2007—2016年荆门市暴雨、干旱、高温、大风、冰雹、低温雪冻灾次年变化图

Fig. 3 2007 — 2016 annual disaster frequency of rainstorm, drought, high wind, hail, snow freezing, high temperature, fog and haze in Jingmen

3 主要气象灾害灾情特征

由于高温、雾和霾无记录到的灾情数据，本文选取5种主要气象灾害作为灾情特征研究对象，分别是暴雨、干旱、大风、冰雹和低温雪冻。灾情损失评估中比较常用的3项指标分别是人口灾度、农作物灾度和经济灾度，本文选用荆门市气象灾害灾情数据中的受灾人口和死亡人数作为人口灾度指标，农作物受灾面积作为农作物灾度指标，直接经济损失作为经济灾度指标，对灾情特征进行分析。2007—2016年荆门市气象灾害受灾人口有766.693万，死亡21人，农作物受灾面积1936.07万亩，直接经济总损失达72.79亿元^[6]。

从人口灾度指标来看，在所有受灾人口中，暴雨造成的受灾人口最多，占全部受灾人口的66.6%；干旱造成的受灾人口第2位，占全部受灾人口的18.7%；低温雪冻造成的受灾人口第3位，占全部受灾人口的11.3%；冰雹的受灾人口为第4位，占2.4%；大风第5位，占1%。在造成的人员伤亡人数中，因灾有人员死亡的气象灾害只有暴雨，死亡人数一共有21人。从受灾人口的逐年变化（图4a）可以看出，2008—2014年受灾人口是减少趋势，2015—2016年又增加；因灾死亡人数（图4c）呈明显下降趋势。

农作物灾度指标方面，造成农作物损失的主要有暴雨和干旱，各自的农作物受灾面积占全部农作物受灾面积分别为46.3%和41.1%；低温雪冻造成的损失占9.7%。从农作物受灾面积的逐年变化（图4b）可以看出，农作物受灾面积也呈现出先减少后增加趋势。

从经济灾度指标看，在造成的直接经济损失中，暴雨直接经济损失高达61.86亿元，占直接经济损失总值的85%；干旱直接经济损失4.53亿元，占总损失的6.2%；低温雪冻直接经济损失4.02亿元，占总损失的5.5%；冰雹直接经济损失1.89亿元，占总损失的2.6%。从直接经济损失的逐年变化（图4d）可以看出，2008—2014年直接经济损失呈减少趋势，2015—2016年为增加趋势。

2016年的直接经济损失为近十年来最为严重的一年，占10年损失的59.1%；这一年的主要气象灾害有暴雨、大风、冰雹，其中暴雨造成的损失占99.1%。2016年汛期荆门共出现5次暴雨洪涝，其中第五次暴雨最为严重，7月18—20日，全市连续两天出现暴雨到大暴雨、局部特大暴雨天气，沙洋马良累计降水量达880.8 mm，6 h降水量519.9 mm、12 h降水量653.1 mm、32 h降水量874.6 mm均创湖北省内极值。

4 结论及建议

综合气象灾害发生频次、灾情损失来看，暴雨灾害是对荆门影响最大的气象灾害，灾次平均4.2次/a；其次是干旱，灾次平均2.9次/a；大风、冰雹等强对流天气造成的灾害也占重要比例；低温雪冻发生的频次较低但影响大。暴雨、大风、冰雹多集中在汛期；高温主要集中在7—8月；干旱主要发生在盛夏及秋冬季节；低温雪冻出现在冬季；雾和霾一般在秋冬季节出现的较多。

荆门市气象灾害死亡人数呈明显下降趋势，从受灾人口、农作物受灾面积、直接经济损失三个方面看，灾情损失呈现出先减少后增加趋势，2016年是气象灾害损失最严重的一年，直接经济损失占10年总和的59.1%。

除去2016年，2007—2015年受灾人口、农作物受灾面积、直接经济损失是有下降趋势的，除去气象灾害严重程度外，在一定的程度上是因为灾害性天气监测、预报、预警能力明显提升以及气象部门重大灾害性、关键性、转折性天气预报服务工作带来的服务效益较为显著^[7]。

结合以上结论，建议荆门市未来控制灾害风险的方向主要为以下三方面。

1) 重点做好主汛期的防汛工作

荆门境内有汉江、天门河、竹皮河、俐河和新埠河等60条重点河流，还有33座大中型水库。汉江是长

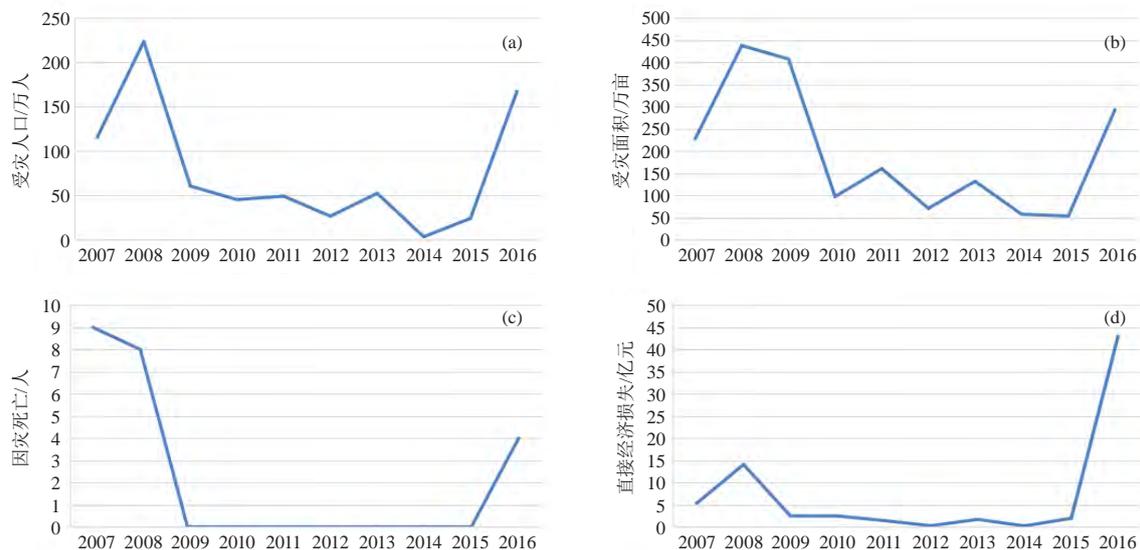


图4 2007—2016年荆门市气象灾害损失年变化图
Fig. 4 2007 — 2016 Meteorological disaster losses in Jingmen

江中游最大支流，丹江口以上为上游，丹江口至钟祥为中游，钟祥以下为下游，两岸筑有堤防，钟祥至沙洋段河道逐渐变窄；此外引江济汉工程地跨荆州、荆门所辖的荆州区和沙阳县，所以沙阳县的防汛形势尤为严峻^[8]。

此外，不仅要关注本地降水量预报，还要关注上游水情和预报情况，气象部门可加强与水务部门合作，实现水库水位、降水量以及气象分析预测结论实时共享，互通汛情、灾情，对巡查重点可进行点对点气象服务，着力加强雨情监测及短临预报。

2) 早期制订灌溉用水计划和调度方案

如果已经出现干旱，且根据气象部门预报干旱仍将持续，就应科学制订灌溉用水计划和调度方案，统筹过境水、自备水，提高水资源配置能力。采取水库放水、涵闸引水、泵站提水以及河湖联调、湖库联调等措施；气象条件允许时，可实施人工增雨作业。

3) 提高公众防灾减灾意识

加强应急管理教育和科普工作，充分发挥政府、

社会、新闻媒体、网络等力量，向人民群众加强气象防灾减灾知识宣传，提高全社会风险防范意识和灾害应对能力；加强公众对灾害背景、灾前征兆、防灾准备的宣传，加强公众的临灾教育，掌握自救互救措施。

参考文献

- [1] 邓婷, 王润, 姜彤. 利用高分辨率气候模式对湖北未来气候变化的模拟与预估. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 937-944.
- [2] 郑伟杰, 黄晓东, 徐碧裕. 荆门市气象灾害特征及影响分析. 广东气象, 2016, 38(2): 46-49.
- [3] 罗生洲, 汪青春, 戴升. 青海省气象灾害的若干气候特征分析. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1380-1387.
- [4] 孙霞, 俞海洋, 孙斌, 等. 河北省主要气象灾害时空变化的统计分析. 干旱气象, 2014, 32(3): 388-392.
- [5] 吴吉东, 傅宇, 张洁, 等. 1949—2013年中国气象灾害灾情变化趋势分析. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1520-1530.
- [6] 蔡新玲, 雷向杰, 王娜, 等. 陕西省气象灾害灾情特征及年景评估. 陕西气象, 2011, (4): 17-20.
- [7] 李志忠, 陈秀玲, 姜修洋, 等. 试论未来极端气候事件发展趋势的不确定性. 亚热带资源与环境学报, 2012, 3(1): 12-20.
- [8] 李玉荣, 张俊, 张潇. 2017年汉江秋季洪水特性及预报调度分析. 人民长江, 2017, 48(24): 1-5.

预报员培训的“复盘”方法

孔海江 田力 王蕊 赵培娟

对前人的研究过程进行复盘，可以给刚刚从事研究工作的年轻人，在开拓研究思路、迅速掌握研究方法、建立创新思维方面提供范例。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.006

提高天气预报、预警的准确率和预报服务能力是气象工作者追求的主要目标之一。预报员是提高预报准确率的核心因素。对预报员持续的培训是科学技术转化为生产力的重要环节。加强预报业务骨干的培养，努力打造一支高素质的预报员队伍，充分发挥预报员的作用是提高天气预报准确率的重要途径之一。在一定条件下，预报员将成为提高预报准确率的关键因素。因此，提高天气预报准确率，应该是建立一支能够预报各种灾害性天气的“预报专家”队伍。

现在天气预报员的培养一般是在气象学或相关专业的学生毕业以后，经过岗位培训、业务实习和在职培训后，通过自己在业务中总结积累经验逐渐成长为一名合格的预报员。高等教育是预报员成才的关键环节，在职教育可以进一步提升预报员的能力和水平，两者相辅相成。而在职学习对预报员的培养又包括预报员在职培训学习和预报员的自我学习两个方面。对预报员来讲，最重要的一条是要善于总结和思考，这是一个预报员尽快建立预报思路的最有效的方法。

预报员在学习成长的过程中，一般会经历三个阶段：首先是天气动力学理论的学习，学习气象学经典的理论，一般在大学阶段完成；其次是天气预报业务实习或跟班学习，这个阶段是新预报员在有预报经验的老师带领下进行预报实习，新预报员通过预报实习，把大学阶段学到的理论在业务实践中得到应用，同时，也让新预报员熟悉独立值班的流程；第三阶段，预报员经过一段时间的业务值班，通过个例分析和统计分析总结预报经验，并在业务中完成应用、检验、再应用、再检验的循环提高过程，这个过程是预报员真正成长或预报经验积累的过程。当然，仅有这三个阶段的学习，也远远不能满足业务需求。在当前全球气候变化的大背景下，极端天气的频繁出现对预报员的预报能力提出严峻考验，新技术、新资料的不断出现也要求广大预报员提高掌握和应用新技术、新资料的能力，特别是数值预报技术的发展和预报能力

的提高，要求预报员更新预报思路，充分发挥数值预报的能力，对数值预报进行解释应用。

对于年轻预报员的培训，气象部门已经做了大量工作，主要包括中国气象局气象干部培训学院及各分院组织的新预报员培训、全国预报员轮训和各单位自己组织的入职教育培训和基层业务锻炼等。预报员轮训注重天气预报（特别是短时临近预报）新知识、新技术和新方法的介绍，注重预报员的专业理论水平，以及新资料的综合能力、主观分析能力和综合预报能力的提高。新任预报员上岗培训则注重刚刚参加工作的预报员的理论与实际的相结合。入职教育培训和基层业务锻炼则是了解基层业务单位的业务工作和流程。上述培训对提高预报员的理论素养和总结分析能力有较大作用。但具体对特定地区的特殊天气的针对性不足，不利于预报员的快速成长。

在中国气象局组织的预报员轮训中，主要采用了理论讲解、案例（个例）教学、个例实习、模拟实训、专家点评、交流讨论等教学方式，让预报员在学习过程中有交流、有反馈、有实际操作，取得了较好的学习效果。但是，由于时间和条件的限制，案例少、时间短，不能完全满足预报员的需求。除了预报员集中培训提高之外，在实际预报业务工作中，有没有方法可以作为集中培训的补充，来满足预报员提高预报准确率的需求呢？

1 “复盘”方法

1.1 什么是复盘

所谓复盘，原是围棋术语，本意是对弈者下完一盘棋之后，重新在棋盘上把对弈过程摆一遍，看看哪些地方下得好，哪些地方下得不好，哪些地方可以有不同甚至更好的下法，等等。这个把对弈过程还原并且进行研讨、分析的过程，就是复盘。通过复盘，棋手可以看到全局以及整个对弈过程，了解棋局的变化，总结出适合自己 and 不同对手的套路，或找到更好

收稿日期：2017年7月24日；修回日期：2018年5月10日

的下法,从而实现自己棋力的提升。围棋顶尖高手一般在大赛后,会多次复盘,总结提高。对于围棋新手来说,如果能得到围棋高手的指导棋(与高手下棋,下完棋后与高手共同复盘),棋力提高会很快。复盘的实质是从经验中学习,中国古语说“吃一堑,长一智”“前事不忘,后事之师”,就是这个道理。我国围棋九段陈祖德先生在介绍自己成才过程时承认,最简单的办法就是下完棋后做简单复盘。

2016年3月进行的谷歌AlphaGo与围棋世界冠军李世石的“人机大战”的结果表明,以深度学习算法为代表的人工智能的应用起了决定性的作用。通过计算机对海量棋谱的学习、复盘,发挥复盘特有的快速迭代的功能,AlphaGo做到了人工智能战胜围棋世界冠军的结果。

美国军队较早采用复盘方法,他们将其称为“事后回顾”(After Action Review, AAR)。AAR在美军中应用最早可追溯到20世纪70年代,受越战失败的打击,美军的士气和战斗力都陷入低谷。军方高层一致认为需要调整训练方法,及时纠正错误和固化成功的做法,以提升战斗力,推动组织学习。通过从过去的经验中学习,建立了AAR的标准程序,为整个美军提供最佳的实践经验。

1.2 目前预报员培养中的问题和解决方案

前面提到预报员培养的三个过程,大部分预报员都有一种体会就是,在学校的理论学习和实习跟自己真正从事天气预报工作完全不同,学校的学习只是一种纯理论的学习,还不能把天气动力学理论与天气预报真正联系起来。只有随着从事天气预报业务的深入,才逐渐能理解大学阶段学习的理论知识。这个过程是一个相对较慢的过程,但也是业务预报能力提高最重要的过程。这三个过程正好契合了向前人(书本)学、向先进(有经验的预报员)学、向自己和团队学(通过复盘,使自己提高)。

1.2.1 预报员培养中存在的问题

在向前人、先进学习和自己经验的总结过程中,预报员能力的提高存在几方面困难。

首先,预报员的预报技术总结主要是对一次预报的成功与失败的总结,多从模式模拟、诊断分析的角度来对天气过程进行分析。很少完全利用当时能得到的资料从重新制作预报的角度,与老预报员一起来进行预报成功或失败的分析。这种情况造成预报员的分析总结只是在事后寻找成功的经验或失败的原因(事后诸葛亮),不能让老预报员的经验得到有效传承。同时也不能让新预报员体验到在面对未知的天气时,怎样建立预报思路、如何才能考虑全面而不顾此失彼。

其次,预报员做的个例分析和某类高影响天气的预报总结,大多是从实况出现某类天气或漏报的角度去总结、提炼该类天气的预报着眼点,很少有人从预报可能出现的角度或空报的角度去分析该类天气没有出现的原因。

第三,独立值班前的跟班学习、短时间的预报员培训以及新预报员在值班过程中有幸能经历到的特殊灾害性天气有限,不能让预报员在较短的时间内经历多种灾害性天气,这就使得预报员的培养变成了一个漫长的过程。另外,新预报员自己在总结经验的过程中,难免受到自身学识、思考方法等的影响,也不能很快地提高。

1.2.2 解决方案——“复盘”方法

“复盘”方法可以克服以上三种弊端。通过对重要天气的“复盘”,建立一个海量的重要天气个例库,这个个例库完全按照实时预报的时间顺序来展示天气图、数值预报产品和卫星、雷达等其他资料。这个系统完全模拟实时预报时的过程,并有“复盘”的结果,也就是参与“复盘”的预报员与旁观者(预报专家)提供的预报此类天气时的预报思路、预报着眼点和预报注意事项。让利用该系统自学的预报员不仅有很强“实战”感,也会同时得到多位专家的经验指导。复盘不仅可以从漏报角度,也可以从空报角度进行。该系统具有大量各种灾害性天气的“复盘”档案,通过对大量各种灾害性天气的模拟预报和“复盘”档案的学习,让年轻预报员在短时间内可以接触到大量发生在本地的灾害性天气个例,快速建立预报思路,找到针对每一种灾害性天气应该重点考虑的问题,避免预报过程中由于考虑不全面而造成的失误。

我们借用“复盘”,利用业务预报中提供的当时资源,再重新做一次预报,看看有没有可能发现,在原来做预报过程中可能遗漏的重要的线索,通过与有经验的预报专家的交流,把预报专家的经验传承下来,从而为以后同类天气的预报提供参考。

1.3 天气预报“复盘”的特点

1) 天气预报制作过程的再现。天气预报复盘相当于数值预报研究中数值模拟的敏感性试验。众所周知,天气一旦发生,将不可重复,但是可以用数值模拟的方法,再现天气的发生过程,并且用敏感性试验的方法去验证某些因子的作用。同样,预报过程的复盘,相当于让预报员在没有压力的情况下,重新经历一次复杂天气过程的预报,在与同事(或有经验的预报专家)的共同研讨中查找实际预报过程中可能出现的思维盲点和自己知识储备的不足。多次重复经历同类型天气个例的预报过程,才能对这种天气个例的预

报经验总结做到尽可能的全面和深入。

2) 年轻预报员能力迅速提升的重要工具。怎样才能较短的时间内让年轻预报员能力迅速提高?把复盘方法用到天气预报总结当中,并且把大量按照灾害性天气分类的复盘档案作为天气预报模拟库,利用“复盘”的多次迭代功能,让年轻预报员可以在较短时间内多次“经历”特殊天气,增加预报工作阅历,积累预报“实战”经验,增强预报能力。

2 天气预报“复盘”的步骤

天气预报中使用“复盘”方法可分为天气个例复盘和日常复盘两种。

2.1 天气个例复盘

天气预报复盘,是针对出现的一次重要的天气过程(灾害性、高影响或转折性天气,或是一次预报失误的天气个例,或是具有典型特征的天气个例),事先有周密的计划和安排,由当时各岗位的预报员参加,按照当时制作预报的顺序,由不同岗位的预报员讲述当时的预报流程、预报思路和事后对这次过程的反思,再由复盘引导人按照复盘计划,针对当时预报中暴露出来的问题展开讨论,提出解决方案。整个复盘过程中需要记录,事后有人引导并整理成复盘档案,最后把复盘个例档案充实到新预报员模拟预报训练的个例库中。

借鉴头脑风暴法的操作程序,天气个例复盘分计划、准备、执行和跟进四个步骤。

1) 计划

组织者应事先确定所要复盘的天气个例,并对所复盘的天气个例进行一定的研究,弄清问题的实质,找到问题的关键,设定复盘所要达到的目标。提前6~8周确定复盘的主要目标、复盘时间和复盘参加人,包括当时各岗位的预报员、培训引导人以及记录员(5~10人为宜)。

2) 准备

通知参加人熟悉所要复盘的天气个例,并做相关发言准备,提出当时预报制作过程中的问题和困惑,并针对这些问题提出解决方案;复盘引导人要根据复盘的主要目标准备相关拓展材料(如该类天气的最新研究进展,新技术、新资料在该类天气预报中的应用等)。

3) 执行

执行过程又分为预报员复盘、讨论问题、畅谈阶段。

开场由复盘引导人宣读复盘的规则和目标。

预报员复盘:由值班预报员按照副班、主班、预报首席的顺序讲述当时的预报流程、预报思路、预报

过程中遇到的问题和困惑、可能的解决方案以及事后对这次过程预报的反思。

讨论问题:复盘引导人根据预报员提出的问题,先由有经验的预报员进行答疑。再针对遇到的问题进行讨论,由引导人确定富有创意的见解或具有启发性的表述,供下一步畅谈时参考。

畅谈阶段:引导人引导大家自由发言、自由想象、自由发挥,使彼此相互启发、相互补充,然后将会议发言记录进行整理。

4) 跟进

复盘结束后的一两天内,引导人应向与会者了解大家会后的新想法和新思路,以此补充会议记录。然后将大家的想法整理并与当时的预报资料一起做成复盘档案,以供后来者自学。

2.2 日常复盘

日常复盘就是将每日天气预报会商中的“前一天预报回顾”改造成天气预报“复盘”。由首席预报员作为主导人,前天主班预报员根据当天预报中遇到的特定问题或者由会商主持人提出前一天预报中的问题,选择一个或两个结合当时的预报流程、预报思路和事后对预报的反思进行介绍,重点介绍自己的预报着眼点和理由。其他当班预报员可以针对主班预报员介绍的预报着眼点和理由进行提问和争论。

复盘记录人要做好记录,复盘参加人认为有值得深入讨论的天气个例,可以建议做天气个例复盘。

日常复盘要改变过去“只会不商”的情况,日常复盘不是向领导汇报,而是不同预报员之间的交流。日常复盘不必太拘泥于形式和步骤,可以简单化复盘流程,但是针对主班预报员的提问和争论以及复盘记录不可省略。

3 “复盘”在预报员培训中的应用

“复盘”方法如何在预报员培训中的应用?可以通过研制预报员“复盘”预报系统来实现。“复盘”预报系统分为“复盘”模块和“实战”模块。

1) “实战”模块。利用事先存储好的资料按照预报制作的时间顺序提供给预报员,让预报员通过分析前期气象实况(地面、高空观测)和数值预报产品来制作未来一段时间的天气预报。提交预报结果后,就可以看到下一个时间节点的天气实况,来验证预报。这个过程与预报员每天制作预报、对比实况的过程一样。

2) “复盘”模块。“实战”演练结束以后,进入“复盘”模块。也是先利用事先存储好的资料按照预报制作的时间顺序提供给预报员,让预报员通过分析前期气象实况(地面、高空观测)和数值预报产品

来制作未来一段时间的天气预报。提交预报结果后, 点击“复盘”按钮, 就可以看到, 在该个例复盘过程中记录的预报过程中的提醒、建议和对该疑难个例的探讨。通过“复盘”模块的学习, 可以帮助预报员建立自己的预报思路, 搞清楚预报成功的经验和预报失败的原因, 避免再犯同样的错误, 消除个人的思维盲区; 同时也能帮助预报员传承老预报员的经验, 提升能力、总结规律、固化流程。

通过“复盘”模块中大量个例的演练可以帮助预报员在较短时间内经历大量典型疑难个例, 快速积累自己的预报经验。通过“复盘”也可以大大节约预报员培养的时间成本, 以达到帮助预报员快速成长的目的。对于单位来讲也可以节约预报员培训的大量资金。

4 “复盘”方法在天气预报中的应用

“复盘”方法除了可以应用对日常工作、生活的反思, 以及前面所述可以将预报会商改造成天气“复盘”之外, 还可以将“复盘”方法用到以下几方面的工作中。

1) 将特殊天气的预报“复盘”固化到预报流程中

针对每一个灾害性、高影响或转折性的天气个例, 通过“复盘”和预报流程改革, 将总结出的预报经验固化到预报流程中, 通过流程的自动提示来提醒预报员制作预报。比如初霜冻的预报漏报的可能性较大, 可以通过初霜冻个例的复盘, 把最早出现初霜冻个例的日期加入业务平台中的每日提醒中, 在最早出现初霜冻日期前一周左右, 提醒预报员根据实际情况来判断有无初霜冻的可能。

2) 建立预报“复盘”个例库的自动训练系统

将整理出来的预报复盘档案作为新预报员的预报个例库, 通过建立预报员自动训练系统, 让新预报员在短时间内去“经历”各种灾害性天气, 再通过认真学习天气个例的预报复盘档案中有经验的预报员的思路, 使得他们能在较短的时间内, 获得多种类型天气个例的预报经验, 把新预报员尽快打造成具有多种灾害性天气预报能力的预报员。

3) 预报科研过程的复盘

在预报科研中, 我们对前人的研究过程进行复盘, 可以给刚刚从事研究工作的年轻人, 在开拓研究思路、迅速掌握研究方法、建立创新思维方面提供范例。通过学习预报科研过程的“复盘”, 提高预报员解决科研问题的能力。比如, 在顾震潮先生前期工作的基础上, 丑纪范院士通过对预报员制作天气预报过程的复盘, 发现预报员制作预报不仅要看最新时次的天气图, 还要看前一天甚至更早时间的天气图, 而

制作数值预报只需要一个初始时刻的资料。他将泛函分析引入数值预报问题中, 通过把微分方程定解问题变为等价的泛函极值问题——变分问题的途径, 推广了微分方程解的概念, 引进新型的“广义解”, 并利用希尔伯特空间的理论, 论证了“广义解”比原来意义下的“正规解”更接近所描述的物理现象的“实况”。这实际上是二十多年后兴起的四维变分同化的理论基础。

4) 超越复盘

从本质看, “复盘”是一种对自己或他人的过去经验学习的方法。虽然通过“试错法”学习是人类学习的基本途径, 但是, 面对气候变化加剧、极端天气频发的今天, 仅靠“复盘”方法是不够的。另外, 通过“复盘”得到的历史个例的预报经验在气候变化背景下可能会遇到挑战, 需要根据新形势下的个例, 通过“复盘”总结出新的经验。

5 小结

通过把提高围棋技艺的“复盘”方法引入到预报员培训中, 让有经验的预报员能通过复盘, 把多年积累的经验通过复盘传授给年轻预报员, 并固化到预报业务流程中, 另外, 通过复盘个例库的建立, 让新预报员在较短的时间内经历大量的疑难个例, 帮助新预报员快速成长。

资助信息: 国家重点研发计划(2017YFC02112402); 国家留学基金(20170533004); 中央引导地方科技发展项目(HN2016-149); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-043); 河南省气象局重点项目(KZ201704)。

深入阅读

- 本书编委会. 2006. 开拓奉献科技楷模——纪念著名大气科学家顾震潮. 北京: 气象出版社: 52-54.
- 丑纪范. 1974. 天气预报中使用过去资料的问题. 中国科学, 17(6): 814-825.
- 郜吉东. 2013. 丑纪范先生关于资料同化的学术思想探讨和回忆——写在丑先生80华诞之际. 气象科技进展, 3(5): 76-80.
- 顾震潮. 1958. 作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变做预报的等值性. 气象学报, 29(2): 93-98.
- 顾震潮. 1958. 天气数值预报中过去资料的使用问题. 气象学报, 29(3): 176-184.
- 漆梁波. 2007. 浅谈如何提高我国的气象预报准确率——法国气象局业务布局的学习体会//第四届全国灾害性天气预报技术研讨会论文集: 70-71.
- 陶建红. 2007. 关于提高预报准确率——如何发挥预报员的作用的思考//第四届全国灾害性天气预报技术研讨会论文集: 68-69.
- 赵宇, 魏建苏, 方艳, 等. 2013. 预报员预报能力和水平提升与预报员岗位设置有关问题的思考. 中国科技博览, (6): 78-79.

(作者单位: 中国气象局河南省农业气象保障重点实验室、河南省大气污染防治与生态安全重点实验室、河南省气象台)

二十四节气内涵的当代解读

■ 杨萍 王邦中 邓京勉

通过对天象的研究，古人在2000年前就已经明白地球绕太阳公转的原理，这比15世纪哥白尼提出的日心说早了一千多年。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.007

二十四节气是中国科学史上一个辉煌成就，是中国传统历法体系及其相关实践活动的重要组成部分。在国际气象界，这种对时间的认知体系被誉为“中国的第五大发明”，并于2016年正式列入联合国教科文组织人类非物质文化遗产代表作名录。

二十四节气形成于中国黄河流域，以观察该区域的天象、气温、降水和物候的时序变化为基准，作为农耕社会的生产生活的时间指南逐步为全国各地所采用，并为多民族所共享。随着现代城市化进程的加快和现代农业气候学发展及农业技术的快速更新，二十四节气的农事指导功能有所减弱，不少人对二十四节气的认知逐渐模糊甚至曲解。事实上，二十四节气鲜明地体现了中国古人先进的科学思想以及适应自然的可持续发展理念，体现了人类与自然和谐相处的智慧和创造力，随着社会的进步和发展，其内涵被赋予了新的价值和含义。

1 二十四节气的建立过程

人们对二十四节气的认识来源于对自然现象运动和变化的长期思考和积累，早在三皇五帝时期，帝王就非常重视天文农时的观测和记录，《尚书·尧典》已经出现“日中、日永、宵中、日短”的记载，对应着现代的二分二至（春分、夏至、秋分、冬至）这四个重要的节气，山西襄汾陶寺古观象台的发现，进一步印证了《尚书·尧典》“历象日月，敬授人时”的记载。公元前7世纪中国古人就开始采用“立竿测影”的方法来判断太阳影子的移动状况，竿影长度的变化是古人测量二十四节气的重要依据，河南登封市遗存的古观象台就是周朝时期周公“垒土为圭，立木为表，测日影，正地中、定四时”的地方，这也进一步证实了古人利用圭表测日影的文字记载。

夏历先书《夏小正》被认为是我国最早记录节

气以及物候变化的里程碑式的文字，所记载的内容和观察的范围是后来二十四节气形成的基础，其中依据天象位置记载的物候变化，与现代七十二候的很多内容相近，该书的出现体现了中国古人对星辰尤其是北斗的变化规律已经达到了非常高的水平；记录周朝大事的《逸周书》一书，明确了中气在每个月中的使用顺序，战国末期《吕氏春秋》除了明确提到冬至、夏至、春分、秋分四个节气，还记载了“四立”（立春、立夏、立秋、立冬），共计八个节气。不难发现，古人早期观察天象、记录自然、创新观测方法的过程为后面二十四节气的产生奠定了科学合理的前期基础。

经过长期积累，汉朝建立后，中国结束了长期战乱局面，西汉淮南王刘安召集大量文人墨客创作《淮南子》，其中有一卷《天文训》，详细列出了二十四节气的名称，这是我国历史上第一次出现的与现代二十四节气完全相同的记录。该书详细地介绍了节气推算的方法和节气的有关内容，论述了天地日月、风雨雷电等自然现象的生成，以及对人类和社会生活秩序与农业生产的影响。公元前104年，由邓平制定的《太初历》，正式把二十四节气定为立法，进一步明确了二十四节气的天文学地位。

2 二十四节气内涵的当代解读

2.1 科学性

二十四节气体现中国古人超前的日地关系认知水平。二十四节气是中国古人在多个领域中科学认识的集中体现，反映了中国古人对气候、天文、农业等领域的认识水平和能力。中国古代的农业在世界上是处于领先地位的，相应地，对气候的认识客观上看在当时也达到了世界领先的水平。因为在人类尚未具备生产力的原始时期，只能够是对气候的本能适应，不

收稿日期：2018年9月13日；修回日期：2019年1月31日

太可能产生对自然现象的科学认识,对气候的认知必然是与农业、畜牧业等密切相关的。中国作为典型的季风区,季节变化是季风区域最重要的气候现象,它决定着农事安排和收获成败。二十四节气中的“二分二至”客观反映出了一年的四季变化,其形成与太阳照射地球的时间长短相关,正是因为古人能够正确地认识季节,才能提出对农业发展具有重要意义的节气概念。此外,中国古人在天文学上的造诣超越了同一时期的古希腊和古罗马,春秋战国时期已经出现各大诸侯国都热衷进行天象研究的热潮,通过对天象的研究,古人在2000年前就已经明白地球绕太阳公转的原理,这比15世纪哥白尼提出的日心说早了一千多年,可以看出中国古人在日地关系的认知上也是远远超出时代的。由此可见,二十四节气体现了中国古人在多个领域上超前的科学认知水平。

二十四节气体现对农业生产的科学指示作用。在农业发展初期,由于人们对气候的认知水平不足,只能利用自然条件最为优越的地方开展农事活动,当农业发展到一定水平后,人们除了能够进一步利用更先进的工具扩大耕地、提高产量,也有力量更深入地认知气候并分析农事活动和气候之间存在的联系。二十四节气中的惊蛰、清明、小满、芒种这四个节气都是与农业生产密切相关的节气。惊蛰说明土地解冻,天气转暖,冬眠生物要开始出土活动;清明是景象清新、草木繁盛的象征,除了“清明前后,种瓜种豆”的农谚外,中国还有踏青扫墓的习俗;小满说明麦类等夏熟作物的籽粒已经开始饱满,在中国的南方,已经进入了夏收夏种的季节;芒种表示大麦、小麦、蚕豌豆等有芒作物已达到成熟期,这个时期也是晚稻插秧和晚谷、黍稷等播种最忙的时候。这些表征物候的节气都说明中国当时的农业已经高度发达,因而农业生产所必需的气候知识也趋向于系统、详细和科学。

二十四节气集中体现了中国古代气候学的发展高度。中国隶属于季风区域,季风变化是中国最重要的气候特征,决定着农业活动的日程和收获成败。从《诗经》开始,已经体现了中国古人对气候的认识和感受,战国时期吕不韦主编的《吕氏春秋》一书中的《十二纪》记录了各个月份正常气候和异常气候适宜的各项活动以及气候对社会可能产生的影响。这些记录和书籍都是二十四节气最后完整提出的前期基础。到汉代,古人已经完全确定了二十四节气的具体名称以及内涵,并沿用至今。二十四节气能够维持长久的生命力,进一步说明了中国古人对气候学认识的高

度和深度,体现了中国古代气候学的发展水平和高度,其科学性不言而喻。

2.2 社会性

二十四节气反映了社会经济基础和发展水平。中国有十分悠久的农业发展历史,最早的农业出现在山区或者高低边沿,体现了人们生产力不足和对自然条件抗争力的不足,随着农业发展水平越来越高,农业开始向平原地区发展,平原土地利用越来越大,游耕农业向定地农业的转变,迫使中国古人不断总结对自然规律的认识,促进农产品的收成,于是开始出现农时。如《诗·豳风·七月》就比较系统地反映了农事历。到了春秋战国时期,农业工具的进步大大促进了生产条件的改善,人们对农事季节有了更多的认识,《吕氏春秋》《淮南子》对二十四节气的记录逐渐成熟和更加准确。此外,古人利用二十四节气进行“测天占候”,总结归纳出的一系列谚语对农事活动进行预警,大大提高了农作物产量,减少了经济损失。可以看到,中国古人对气候、农时、历法的认识伴随着社会进步和发展而不断地提升,也反映出了中国作为农耕大国,在古代是高度发达和具有先进水平的。

二十四节气对社会的影响体现在方方面面。如在建筑领域,二十四节气深刻影响着祭祀建筑领域的设计思路,不同节气的清燥与湿浊程度不同,建筑材料的选取材料也会不同,如《淮南子·天文训》记载:“阴气极,则北至北极,下至黄泉,故不可以凿地穿井,阳气极,以夷丘上屋。”表达了在环境不一样的节气下,所能从事的建筑工程也不同;二十四节气还影响着中国古人的饮食养生理念,唐代在不同节令人们准备不同的饮食,以康健体魄;古代中医也很注重具有转折意义的节气,因为节气更替时对疾病尤其是慢性病影响很大,如二至、二分等可使很多重病患者死亡。此外,在茶道、服装等很多领域,都能够看到二十四节气的影

响。二十四节气的生态观对现代社会仍具启示意义。二十四节气作为对自然规律的总结,充分体现了广大劳动人民对自然生态的重视,折射出他们朴实的生态观。流传至今的大量民谚都能看出中国劳动人民观察自然生态的用心,饱含着中国古代人们敬畏自然的生态意识。除了对自然的敬畏,古人一直尝试和自然融合,和自然对话。以柳树为例,柳能预示清明时节的季节交替,传统习俗“清明插柳”就反映了人们将柳树作为精神寄托和情感寄托,同时也传递着古人与自然对话的愿望,体现了人与自然统一和谐的生态观。两千多年前的荀子提出“天行有常”,主张“制天命

而用之”，表达了人们应该掌握、利用自然规律而加以运用的观念。二十四节气提倡努力观察自然规律，并能够趋利避害、让自然规律为我所用的生态意识，这些对自然生态的理解和认识，对现代社会人们加强生态意识仍具有很多的启示作用。

2.3 文化性

从诗词曲赋看二十四节气的文化底蕴。古代诗词曲赋中与二十四节气相关的作品不胜枚举，这是因为节气的变化更容易引发古代诗人独特的情怀和感悟。形成于春秋时期的《诗经》中《七月》展现了古代农民在一年二十四节气变化过程中的农事活动，如“春日载阳，鸟鸣仓庚”展现了春天万物复苏之景象。自汉代二十四节气完整提出以后，随着其社会影响力和关注度的不断提高，利用二十四节气抒发情怀的各类作品也越来越多。如白居易在“和梦得夏至忆苏州呈卢宾客”中写道“忆在苏州日，常谙夏至筵。粽香筒竹嫩，炙脆子鹅鲜”，其描述丰富而富有情感，展现二十四节气与美好生活的关系。二十四节气在古代中国已不仅仅是指导农事活动的时令口诀，而具有其特定的文学属性。

从传统节日看二十四节气的文化传承。所谓节日，是历法的岁时周期（一年365天）中的一些具有特殊意义和标志性的日子，按照习俗和传统在这些日子里要进行某些特定的民俗活动，赋予时间以特定的节律和周期。中国长期以来处于自给自足的封建农业社会和自然经济中，其传统节日具有浓厚的农业色彩，体现出农耕文明的社会特征，故以节气为代表的农耕历法自古就是节日设置的核心。在古时，夏至、冬至也是重要的节日，被称为“夏节”和“冬节”。古代曾有“冬至大如年”的说法，自汉代起都要举行庆贺仪式，高峰时期放假五天至七天，热闹程度不亚于过年。人们在重要节气时候的庆祝活动所体现出的已不仅仅是对二十四节气的季节变化认知，而是演变成了一种社会性的民俗活动，对这种民俗文化的传承也从侧面展现了二十四节气已成为人们生活中不可缺少的文化符号。

从国际传播看二十四节气的文化交融。二十四节气由于其深刻的科学内涵和对农业生产及相关领域的有效指导，在东亚季风气候区的日本、朝鲜、韩国、越南等国家得到广泛传播。二十四节气在隋唐时期传入日本，至今有1300多年。日语表达二十四节气的48个汉字和汉语完全相同，日本还根据本国气候的实际

特点，增加了一些独特的节气，比如八十八夜、土用、入梅等，被统称为“杂节”。和食文化的源泉即对二十四节气的独特理解和习俗传承。韩国的二十四节气的汉字名称与中国完全相同。古代的朝鲜各个王朝以农业生产为主，按照我国二十四节气来安排生产，《七政算内篇》《七政算外篇》解决了与中国农时的差异。越南至今流传着关于清明的诗歌，在霜降节期间当地依族也会积极参加当地的贸易活动，购买生活用具。正是通过人与人之间的文化与贸易交流，为二十四节气的国际传播提供了可能。

3 小结

经过千百年的传承和发展，二十四节气从黄河流域扩展到中国各个地域，不同地区不同民族的劳动人民根据当地特点，对二十四节气进行地域性改良，使其具有了强大生命力，具有了放之四海而皆准的适应性。从二十四节气的丰富内涵中能够看到，作为中华民族智慧的结晶，二十四节气对现代社会的生产、生活、生态观等多个方面都有很多启示和借鉴意义。因此，对中国传统文化的尊重、敬畏、继承和创新，并与时代发展特点相结合，并合理地加以利用，必然能够更好地推进社会的发展和进步。

资助信息：中国气象局气象干部培训学院科技史专项课题“多维视域下二十四节气研究”

深入阅读

- 陈立浩, 范高庆, 苏鹏程, 2008. 黎族文学概览. 海南: 海南出版社.
崔玉霞, 2009. 二十四节气中的文化底蕴. 农业考古, (3): 162-166.
韩养民, 郭兴文, 1987. 中国古代节日风俗. 西安: 陕西人民出版社.
王修筑, 2013. 中华二十四节气(第二版). 北京: 气象出版社.
王振鸿, 1982. 二十四节气的气候意义. 南京师院学报(自然科学版), (2): 35-44.
吴文瀚, 2016. 中原农耕文明背景下传统仪式与节日文化的现代性表达研究. 学习论坛, (4): 51-55.
吴晓雪, 2016. 从清明插柳看我国传统生态观. 绿色科技, 19(10): 120-122.
徐旺生, 2016. 中国的“二十四节气”正式列入联合国教科文组织人类非物质文化遗产代表作名录. 古今农业, (4): 118-119.
杨琳, 2000. 中国传统节日文化. 北京: 宗教文化出版社.
张勃, 2007. 清明作为独立节日在唐代的兴起. 民俗研究, (1): 169-181.
张苏, 曹幸穗, 2015. 节气与农业: 不知四时, 失国之基. 农村农业农民, (9A): 59-60.
周红, 2015. 二十四节气与现代文明传承的现实意义研究. 吉林化工学院学报, 32(3): 90-96.

(作者单位: 杨萍、邓京勉, 中国气象局气象干部培训学院; 王邦中, 辽宁省气象局)

中华气象历史之探寻

——刘昭民《中华气象学史》读后

■ 李蓓蓓 钱馨平 张改珍

《中华气象学史》强调二十四节气和七十二物候是中国先民所发明创造的，是西方没有的，故笔者著墨甚多，而我国古代天气谚语之丰富，更是古代西人所无法比的，故笔者对这些天气谚语之解释也巨细靡遗。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.008

虽然气象学是一门近现代科学，但是人类对气象的观察与研究可以追溯到考古时期。中国古代文献记录了丰富的天象观测和气象灾害资料，以及对各种天气现象的思考，反映了中国古人对气象的自然认识，蕴含了深厚的东方智慧。中国近代气象学经历了从西方传入到国人自立的过程。现今气象学的发展已经进入到一个新时代，计算机、遥感、卫星和雷达等新技术促使学科进入了气候系统变化和机制机理研究。加强气象研究对人类生产、生活乃至社会可持续发展都具有重要的现实价值。李约瑟在中国古代科技史研究中，对中国古人智慧做了很高评价，形成了中国古代科技史之鸿篇，其中也写到了气象学。日本学者田村专之助于1973—1977年出版了《中国气象学史研究》上、中、下三册。而刘昭民在1980年完成的《中华气象学史》，完整地描述了中国古代以来气象的观察、记录和思考，至近代气象科学的兴起和发展，值得我们认真阅读与思考。

1 背景介绍

作者刘昭民1938年出生于中国台湾省高雄市，硕士毕业于台湾“中国文化大学”地学研究所气象组，现任中国台湾“中央研究院”科学史委员会委员，著有《中华气象学史》《西洋气象学史》《中国历史上气候之变迁》等书，是国内很早一批开展气象科技史研究的学者之一，并且目前仍活跃在中国科技史学界。在近期对刘昭民先生的访谈中，他再次谈及中西古代气象科技发展之比较，认为中国古代至近代的气象科技发展都是辉煌而独特的，可为现代气象学思考源流，为气象文化奠定基蕴。

收稿日期：2018年8月1日；修回日期：2018年11月11日

《中华气象学史》出版于1980年9月，由台湾商务印书馆以繁体字印行出版。该书后又加以修订，增添自序后，2011年仍然由台湾商务印书馆印行出版《中华气象学史》（增修本）。本文对2011年出版版本进行了研读分析。《中华气象学史》（增修本）由刘君璨先生序、作者再版自序、绪论以及十五章正文组成，后附有“中华气象学史大事年表”。刘君璨先生在序中指出“气象”在古代颇有吉凶占卜的味道，与出巡行事息息相关，因此中华的气象科学的观察早在殷商时期便有出现，并且一直延续至今。他认为作者能在浩瀚的历史长河中，将中华观象占候的方法、仪器之创造及古人的气象思想等一一据列，实属不易，更是直接表示“昭民兄搜罗之广，关注之深，更令我佩服不已”。

作者对此书的特色亦总结为：“拙著《中华气象学史》强调二十四节气和七十二物候是中国先民所发明创造的，是西方没有的，故笔者著墨甚多，而我国古代天气谚语之丰富，更是古代西人所无法比的，故笔者对这些天气谚语之解释也巨细靡遗”。同时，该书引用了大量古代文献，这也是作者著书的难点所在，由于原始文献多为古文且没有标点，文字又都是文言文，不易理解，故作者艰苦啃读，查阅了大量中文大辞典和辞海解决疑难，完成此书。

2 《中华气象学史》主要内容

本书的内容涵盖自古至近代民国的中国气象科技发展史。正文部分以绪论开篇，第一章到第十二章按照时间顺序，纵贯各朝代分别阐述了殷商时代、周朝时代、春秋战国时代、秦汉时代、三国及晋朝时代、

南北朝至隋代、唐至五代、宋代、元代、明代、清代、民国时期的气象学术思想和气象观测的发展，并且在一级大标题后面附上了每一个朝代或时期的主要气象进展。

商周时期气象学思想开始萌芽，人们开始对自然界的天气现象加以思考并进行合理的解释；春秋战国时代开始八种风向的区分并且首创云状的分类，对于与农作息息相关的节气和物候的认识也逐渐提高；大一统的秦汉时期确定了二十四节气和七十二物候，汉代开始用相风铜鸟等仪器进行测风；三国魏晋朝时期已能运用各种方法测定湿度、晴雨等天气，理论知识逐渐成型；南北朝至隋代，如《后汉书》《齐民要术》等著作中已能清晰阐述霜的预报方法、降雨降雪等原理；唐朝至五代，最重要的成就便是唐代的李淳风制定了风力等级表，比英国的蒲福风力等级表早1160年；而后宋代作为气象学术蓬勃发展的时代，物候歌谣、气象理论、测雨测雪等方面全面开花，基本奠定了中国古代气象学术的领先地位；元代、明代占候谚语更加丰富，但到明末以后中国气象学术逐渐落后西方；清末民国时期，西方气象学、气象仪器逐渐传入中国，外人在中国设多所气象台以发展气象事业。国人开始苏醒，逐渐收回外人所建设的气象台站，从而力争改变落后西方的局面。第十三章、十四章、十五章作者分别论述中国历史上气候之变迁、余论和中国之气象学术后来停滞不前的原因，可见全书内容的丰富与充实。

3 内容评价

3.1 意义与价值

通读全书，该书有其独特的价值，主要意义体现在如下几个方面，值得读者思考与借鉴。

一是用断代和通史结合的方式，多以文献为佐证，完善细化了中国自古以来的气象学发展史。首先，在此之前的科技史著作涉及中国古代气象学的内容都很简略，即使是1983年出版的洪世年、陈文言合著的《中国气象史》，在古代气象史方面也仅仅是分为春秋以前、战国以来和明清时期三部分的气象发展，笔墨多集中在近现代的气象事业。而本书的笔墨集中在古代气象学思想的发展，对每一个时代气象学思想、气象理论发展、观测仪器的进步都有所涉及，对书中所列出的每一个气象信息或气象思想都能从历朝历代的文献中找到相应证据。可以说，作者几乎将每个朝代所涉及的跟气象有关的著作都罗列在本书中，并将相关的古文摘录下来，附上通俗汉语的解释，让读者感受到自古以来气象学的发展都有迹可

循，而不是泛泛而谈。作者大量阅读原始文献，超然远览、奋其独见、爬梳剔抉、参互考寻，提供了大量第一手古代气象学资料，得出令人信服的新结论，为后来学者的深入研究提供了坚实的基础。其次，由于作者生长在中国台湾，著作中包含了许多台湾地区的相关文献，如《台湾县志》《台湾采访册》等文献。作者搜罗并摘引了其中相关气象谚语，填补了内陆气象史专著对台湾地区气象思想发展认识的不足。

二是将各个朝代气象学术的发展与当时的社会环境联系在一起。每一章节的内容虽然都是用各种文献引出，但是其叙述不是单纯介绍相关文献或相关气象信息，而是将其放在大的时代背景下进行阐述。比如殷商时期气象学思想的萌芽，始于对农业的重视，所以当时的卜辞中记录多为风、雨等与农业丰歉有关的气象知识；秦朝时期因“焚书坑儒”，其间并无有关气象学术新思想的问世；汉代国势强盛，在气象学方面有不少发明创见，比如完成二十四节气和七十二物候的论述，首创风向、雨量、湿度等观测，但常有附会五行思想。再比如宋代外患频发，科技发明则大幅提升，又因航海的需要，气象学术文献对虹、梅雨、舶棹风等解释记载颇多，同时因宋朝时期诗词发达，作者在考据文献的同时，对一些咏释天气现象的诗词也有所关注并分类记载在该书中，这也反映出作者深谙每个历史时期的社会背景，将气象学术的发展回归到当时的背景条件下考虑，且认真细致，力求不漏过每一个跟气象思想有关的资料古籍。

三是全书结构脉络清晰、史料丰富，并在最后三章叙述中国历史气候变迁之规律和作者自己对气象学术发展的剖析，这就使得全书主题升华，把历史气候放到一个大的宏观视角下用科学理性的研究方法去分析，并对此加以思考，使得全书血肉饱满，并上升到规律总结的理论高度。全书图表共76张（图72幅，表4个），有助于读者在阅读古文献之余，能加上感性思维，更生动地理解其相关气象学理论或是气象观测仪器。同时，作者的良苦用心之处还在于对重要的、晦涩难懂的理论内容加以阐释，比如在记叙南宋秦九韶的《数书九章》中的天池测雨、竹器验雪、和圆器测雨、峻绩验雪等方法时，在原文之后，作者阐述了对相关算法的理解，对当时的测雨器形、测雨技术加以评析，并与西方首次使用雨量器的时间做比较，证明秦九韶时代确比西方早400年之久。同时，作者将思维发散到南宋时代大环境气候为寒冷多雪这一背景下，这也正好符合秦九韶所著之竹器验雪和峻绩验雪两篇所述，从而推断出“宋代中国人已经使用

竹制大型筐器以承集降雪，并加以观测，且将之安置在山谷与高原上，秦九韶不但对雪之形体已有所辨认，而且首创推算降雪量之技术和方法”这一结论。从中也能看出作者在最后专门分出一章写中国历史上气候之变迁的意义，旨在希望以古论今、以史为鉴，通过研究中国气象史找出中国历史上气候变迁规律，从而能为现今的全球气候变暖这一课题做出努力。

3.2 不足与反思

全书也有一些考虑不够完善的地方。首先，虽说作者将历朝历代涉及气象学术发展的文献或是气象相关内容一一罗列，解释并分析其所蕴含的气象学术信息，但是读完全书，在脑海中很难形成一个完整框架，以理解相关历史文献。作者没有将文献信息进行分类梳理，比如对物候学谚语、气象学思想、气象观测仪器等分类进行叙述，对气象科技史史料的进一步分析研究尚有很多空间。其次，在近现代气象学史方面的论述较为简略，猜想其原因有二。

一是进入明清以后，因政治、思想等多种因素影响，中国的气象学术逐渐落后于西方，并且差距日趋增大，一些先进的气象学理论均未在中国产生。反观西方，18世纪以来气象学理论研究全面发展，气象学分类逐渐细化，这些都带动了西方气象学实践的创新。所以和作者另一著作《西洋气象学史》中近现代史的显著发展相比较而言，作者对中国近现代的气象学术发展叙述较少，这也侧面反映出中国近现代气象学术发展的停滞。作者在余论中也表示：“将来应加强以动力模式和数值方法来探寻大气之结构，故气象研究之范围尚有无数的前途，而有待中国气象学家们将来的努力。”

二是作者著此书目的是补古代气象学史研究文献的不足，而近现代气象学史部分，在该书第一次出版之后，洪世年、陈文言合著的《中国气象史》已有详细记载，并且陈学溶等学者也对现代气象史部分提出商榷意见，所以作者在增修本中有所删改，使得全书主要篇幅集中在古代气象学史的研究。

4 小结

本书不可磨灭的是作者对数量如此之多古籍的梳理，并能从中挖掘相关气象信息的史料，可见作者的阅读量和坚持性。作者曾对笔者谈及著书过程，当时在台湾省气象学是冷门学科，文献的整理与搜集全靠一点一滴的坚持与长年累月的积累。确实，学问为经验之积累，继往开来是当下学者的责任。《中华气象学史》作为罗列中国从古至今气象学史的著作，值得读者认真学习，并以此为榜样，以史鉴今，融会贯通，创新中国气象学史的学术发展。

资助信息：中国科协2018—2019年学科发展工程项目（XKS1）；中国气象局委托项目（2018h290#）

深入阅读

- 陈学溶, 1985. 气象研究所和气象学会的若干史实——《中华气象学史》读后. 南京气象学院学报, (2): 198-203.
- 李迪, 1984. 介绍《中国气象史》. 大气科学, (2): 232.
- 刘昭民, 2011. 中华气象学史. 台北: 台湾商务印书馆.
- 张改珍, 李蓓蓓, 2018. 西方气象学史研究的成果、新起点和史料来源——《西洋气象学史》评介. 广西民族大学学报(自然科学版), 24(4): 52-54.
- 张改珍, 李慧欣, 2018. 中西古代气象科技发展之比较——刘昭民访谈. 气象科技进展, 8(1): 308-310.

(作者单位: 李蓓蓓、钱馨平: 南京信息工程大学科学技术史研究院; 张改珍, 中国气象局气象干部培训学院)

“云知识探秘科普丛书”之《观云识云》简介

■ 黄海燕



本书介绍了云的基本常识以及气象学分类中全部29类云的基本特征，作者将纷繁复杂的云的名字总结为“记云秘笈”，并从通俗易懂的角度给特征突出的云“贴”了“个性标签”，易学易记。除了用云的相片来展示各类云的基本特征外，作者还拍摄了大量云的

动态视频，读者可以在阅读过程中使用手机扫描书中的二维码，观赏各类云的变幻，清晰了解云的演变过程。

作者戴云伟长期深耕于天气预报研究和科普推广，透过经验积累与对云的了解，完整收集了各种云的图像。经由分辨云的特征，带领读者从云中探索隐藏在其中的天气密码，了解云的喜怒哀乐，更从云之欣赏中，将科学、美学融入生活。

(作者单位: 气象出版社)

民国时期的中山大学天文台和广州市气象台

何溪澄 冯颖竹

如果不计香港天文台的话，广州市气象台是抗日战争前我国华南地区最大的气象专业机构，当时广州市气象台的主要业务有地面观测、施放测风气球、观测资料整编出版、收发气象报文、天气预报、公众服务、航空服务等事项。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.009

中山大学天文台（图1）是我国早期自主建立的天文气象机构之一，自1929年始开展业务性的气象观测，并为1935年广州市气象台的成立运行提供了技术人才储备。



图1 1930年的中山大学天文台^①

1 中山大学天文台的创建

1924年孙中山倡办了广东大学，创办时有文、理、法、农四科，其中理科有数学、物理、化学、生物、地质5系。1925年3月孙中山病逝。为纪念中山先生，1926年8月广东大学改名为“国立中山大学”，学校同时进行了一系列调整，数学系改成了数学天文学系，成为国内首个开设天文学科的高校，聘请

了留学法国获天文学博士学位的张云（图2）为该系教授。



图2 中山大学天文台台长张云^②

张云在教学中意识到天文学作为一门观测的科学，没有天文台以供实习而仅依理论讲述，难以取得好的教学效果，于是他开始积极筹建天文台。

最初，张云建议在越秀山五层楼附近建立一个“国立广东天文台”兼气象观测所，因当时广州国民政府忙于北伐，该建议未获批准。经张云多次争取，学校同意在当时中大文理学院校园内建设一个规模较小的天文台，以供天文专业的教学。1927年2月，中大校办天文台建筑开始开工建设，1929年3月落成（今广州市越秀中路广东科技报社办公楼），启用时间比南京北极阁的气象研究所晚3个月，比紫金山天文台早5年。

中大天文系和天文台的建立，在国内天文学界有

收稿日期：2017年9月21日；修回日期：2018年11月30日

^① 取自<https://baike.baidu.com/item/中山大学天文台旧址>。

^② 取自<http://news2.sysu.edu.cn/news03/149238.htm>。

很大影响。在1935年“中央研究院”评议会首届评议员的选举中，张云成为天文气象组4位评议员之一。中山大学也为我国培养了一批天文科技人才，中国第一个女天文学家邹仪新，中国科学院院士叶叔华、席宗泽，天文学家洪斯溢、郭权世、贺天健、万籁等人先后毕业于中大天文学系。1952年大学院系调整时，中山大学天文学系和齐鲁大学天文算学系的天文部分合并转建成为南京大学天文系。

2 中大天文台的气象工作

中大天文台从教学需要出发，购置了15 cm的赤道仪和6 cm的子午仪两具主要仪器，修筑了专门的赤道仪室和子午仪室。天文台还购置了一台20 cm口径反射望远镜，这是中国人拥有的第一台实用天文望远镜。台里的天文仪器还有天体摄影机、分光仪、六分仪等。此外，天文台建成时学校将本校物理系学生实习用的气象仪器并入天文台，包括温度计、气压计、湿度计、雨量计、日照、地温、蒸发计、地震仪等，百叶箱摆放在天文台楼附近（图3）。

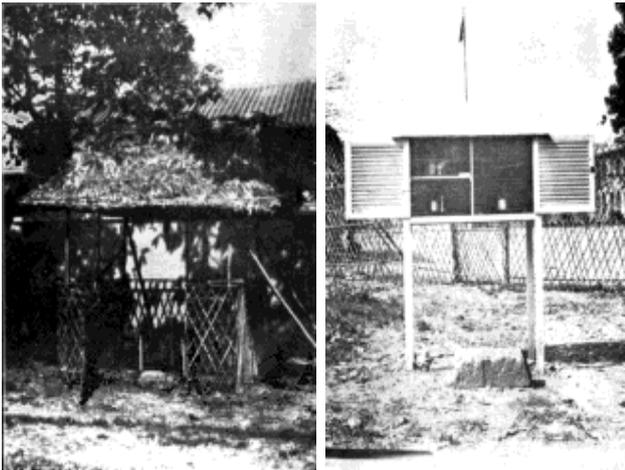


图3 中山大学天文台的气象观测设备

中大数天系在教学上分数学和天文学两个组，在大二开设了气象学选修课，6个学分，气象学课程由张云主讲。

中大天文台在原物理系气象仪器的基础上，添置补齐了一些气象设备，从1929年6月开始进行业务气象观测，每天观测3次，后改为每天观测4次，分别为06时、10时、14时和18时，观测结果由广州市政府播音台对外发布。同时，中大天文台职员还将气象观测报告整理登载于《“国立中山大学”天文台两月刊》（图4），报告分逐月的天气状况总结和逐日的观测记录两类，主要项目包括雨量、气温、湿度、气压、风向、风速、蒸发、地温、云状、云量、天气现象等，这些报告为了解当时广州地区的天气状况提供

了重要的参考资料。



图4 中山大学天文台两月刊

天文台分别于1933年和1935年编著了《中国气象谚语集》（图5）和《广州市二十年来平均气象图说》两本专业书籍，为当时的气象工作提供参考。

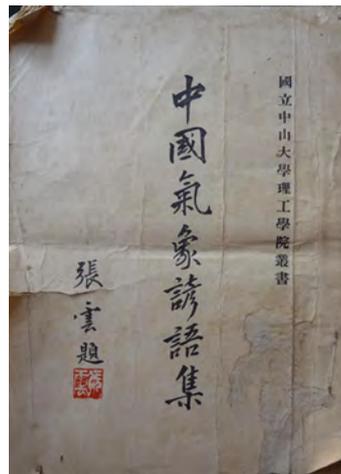


图5 中国气象谚语集

中大天文台是我国早期自主建立的天文气象机构之一。对照民国行政院下发的《全国气象观测实施规程》中提出的五级测候机构分类（表1），可见，中大天文台的气象观测要素已超过三等测候所的要求。中大天文台建成后，在天文、测候两领域都得到稳定发展，并为日后广州市气象台的成立运行提供了技术人才储备。

表1 全国气象观测实施规程中提出的五级测候机构

名称	观测要素	观测频次
头等测候所	雨量、气温、湿度、气压、风向、风速、蒸发、日照、云	每日24次
二等测候所	雨量、气温、湿度、气压、风向、风速、蒸发、日照、云	每日9次
三等测候所	雨量、气温、湿度、气压、风向、蒸发	每日4次
四等测候所	雨量、气温	每日2次
雨量站	雨量	每日1次

另外，张云还长期兼任广州航校气象学教员，因此与广东空军将领熟悉。1936年6月，广东军阀陈济棠与广西桂系联合举兵反对蒋介石，史称“两广事变”，他参与策动广东空军的飞机北飞投蒋，使陈济棠兵力大大削弱，最终两广事变和平解决，张云由此获得民国政府授予的云麾勋章。

3 广州市气象台的筹建

中大天文台在气象方面更大的贡献是孕育了专业的广州市气象台，广州市气象台的主要技术人员全部来自中大天文台。1930年4月首届全国气象会议在南京召开，会上讨论了增设全国测候机构的议案。1932年春，民国行政院下发了由竺可桢建议并亲自参与起草的《全国气象观测实施规程》，要求各省会城市建立三等及以上的测候所，各市县建立四等及以上的测候所。

广东省政府收到行政院的来文后，省建设厅农林局会同中山大学起草了《筹设广东气象台意见书》，提出“‘中央气象研究所’邀请各省速自筹设气象台以为测候之用，查各省之已遵办者计有江苏、湖北、山东等省且已实行通报，今吾粤所处地理上之位置如是其重要，事业之需要如是共急切，是气象台之筹设实刻不容缓也”，意见书建议设立广州气象总台及海口、汕头、北海、曲江、台山、和平、德庆、茂名、汕尾一等测候所。1933年1月，民国广东省政府第六届委员会第153次会议议决：“照办。总台由市政府办理；分台经费由建设厅制定筹款办法。”于是，广州市政府聘请张云为广州市气象台筹备主任，正式开展筹建工作。为便于保障航空安全，地址选在离西南航空公司的机场不远处（今天河公园附近）。

与此同时，中大天文台一直保持与“中研院”气象所的通信联系，请求寄赠专业刊物，询问气象仪器，并通过气象所取得与全国其他气象台站的联系。

这时中大天文台的气象观测工作仍在继续，但计划在中大搬迁到石牌新校区时分立出去，在白云山上另择合适地点以开展高山气象观测。

4 广州市气象台成立后开展的工作

1935年3月12日，在孙中山先生逝世十周年纪念日，广州市气象台（图6）举行隆重的揭幕典礼。市长刘纪文、教育局长陆幼刚、财政局长刘秉刚、工务局长文树声、农林局长冯锐等各界来宾几百人出席了典礼，张云在刘纪文市长的监督下宣誓就职广州市气象台台长。

广州市气象台成立后，立即展开了观测和预报服务。观测设备有：气压计、气温计、最高最低温度



图6 广州市气象台远景

表、风向风速仪、雨量计、湿度计、蒸发计、日照计、地温计、测云仪等，还有少量监测地震的仪器，并从国外购置了直流发电机和无线器材。

气象台每天都制作广州市天气预报，当时广州市政府播音台于日间12时55分至13时播出东亚天气概述和本地天气预报，晚间再播出一次天气报告。除公共气象服务外，气象台另外一项重要任务是为当时总部设在广州的西南航空公司提供专业气象服务。

1936年2月10日，广州至河内直达无线电路开通，以传递广东与越南往来报务，实时交换气象信息，便于广州市气象台为西南航空公司提供广州至河内航线的气象服务。

广州市气象台成立后就创办了《广州市气象台气象月刊》，月刊内容包括每月广州天气气候概况，逐日06时、14时、21时的气象观测数据，逐日气象要素平均值等，月刊分送给省市有关部门及与外地气象机构进行期刊交换。

1937年1月，张云以广州市气象台台长身份参加了在香港召开的远东气象会议。

1937年4月2日，第三届全国气象会议在南京召开，竺可桢为会议主席，张云出席了会议并在开幕式上做了简短的致辞。张云在会上提出了两个议案，一是请气象研究所继续派员检定各测候所仪器，议案写道：“各国制造之测候仪器，精良者固多，而欠缺者也常有。且仪器使用日久，差误自大，即就事实而言，吾人倘每日在天气图上考查国内各地报告，其气象要素，仍不少出乎常规之外，以致绘图预报，均感困难。因此续请气象研究所派员检定各测候所仪器，实为势所必要。查第二次全国测候机关联席会议，已有此类议决案，然只限于检定各上级测候机关，其附属机关，则由上级检定，并限至少每两年一次。此种办法，本极妥善，惟至今未见实效，最好请气象研究所考查各地报告，如认为欠缺者，宜继续派员检定，

或委托其附近之高级测候所负责。”

另一个议案是请军事委员会令国内各航空主要站，增设高空气象观测，以利航空，议案写道：“查高空气象状况，对于航空之安全，关系最切。现全国测候所，以测高空气象者为数无多。且其结果，不能即时获得。至于测风气球之施放，则又仅限于高空之风向及风速两项。高空气象状况，既不洞悉，航空安全，难期保障。兹转请军事委员会令国内各航空主要站，除每日上下午于特定时间同时施放测风气球，测定高空气流外，并指定测候飞机及飞行员具备仪器，专职驾驶，以测定高空气压气温及湿度等要素，随时用电报拍发，以资高空气象之研究，而利空航。”

1937年5月31日，竺可桢在致航空委员会公函中写道：“本所自四月一日起，每日上午十时实行高空广播，计已报告测风气球施放结果者有北平、青岛、西安、广州等处。”

第三届全国气象会议上还有一个重要议题是关于分区预报，鉴于我国幅员辽阔，气象研究所等单位提出了《天气预报工作须否分区办理案》，建议分区设立中心气象台，经会议讨论，议决“广播中心兼为预告中心原则通过；由会函请西安测候所，武汉测候所，广州市气象台，华北水利委员会测候所从事筹备。”

以上表明，如果不计香港天文台的话，广州市气象台是抗日战争前我国华南地区最大的气象专业机构，当时广州市气象台的主要业务有地面观测、施放测风气球、观测资料整编出版、收发气象报文、天气预报、公众服务、航空服务等事项。

第三届全国气象会议召开后不久，就发生了“七七卢沟桥事变”，抗日战争全面爆发，气象会议的许多议决案都未能得到执行。

1938年10月，日本军队侵占广州，运行了近4年的广州市气象台自行解散了（算上中山大学天文台的气象观测则为10年），张云和部分员工跟随中山大学西迁到云南澄江。之后，张云主要从事中山大学的行政管理和天文学研究等工作，未再打理过广东气象事务。

5 中大天文台和广州市气象台的遗产

对气象史的研究，不仅是为了记录历史，也是为了文化传承和服务当代。民国时期的中大天文台和广州市气象台虽随时间远去，但还是留下了一些历史痕迹，除了上述提及的期刊、书籍和图片外，两台的遗

产还表现在建筑和路名上。

5.1 中山大学天文台旧址

“国立中山大学”天文台旧址（广州市越秀中路125号大院内，图3），位于“国立中山大学”老校园，所在地原为清代广东贡院，天文台西南面即为贡院的明远楼。随着岁月的变迁，“国立中山大学”老校区的大部分建筑已不存。尚存的建筑物，除了贡院的明远楼和作为全国重点文物保护单位的国民党“一大”旧址（钟楼）外，另一处就是广东省文物保护单位的天文台旧址，该建筑在功能布局、建筑造型、装饰装修艺术上都具有当时西方建筑的特征，是广州现存1920年代的代表性建筑之一。

1937年“国立中山大学”迁往石牌新校区，天文台也迁到新校园（今华南农业大学内），原天文台建筑改为它用，其后经历了多次改造和用途变更。2009—2011年，现使用单位广东科技报社在省财政的支持下对其进行了全面保护性修缮，基本恢复了原貌，并在旧址前竖立了一座张云的雕像，雕像下面的石块上刻着“归来：纪念中国近现代天文学教育先驱国立中山大学教授张云”（图7）。



图7 中山大学天文台旧址^①

5.2 广州市气象台建筑设计

1938年日军侵占广州后，广州市气象台大楼被作为军用仓库的办公楼使用。抗日胜利后，该仓库被国民党军队接管，1949年广州市气象台旧址因弹械库爆炸而焚毁。

虽然气象台旧址已不存在，但查到在1934年10月广州市政府印发的《广州市政府新署落成纪念专刊》

^① 取自http://www.sohu.com/a/164342171_407309。

上有一篇名为《在筹备中之重要工作》的文章。文中说道广州市气象台采用钢筋混合土结构，并附有岭南著名建筑师林克明设计的正立面图和一层、二层平面图。林克明推崇现代建筑风格，认为建筑必须“以艺术的简洁和实用的价值，写出最高之美”（图8），喜好对称、跌级的大平台、水平的金属栏杆、实墙与玻璃的强烈对比等手法，这些在广州市气象台的设计中都得到了充分体现。鉴于此，广州市气象台的建筑风格在今日岭南建筑史研究的文章中还常被提及。

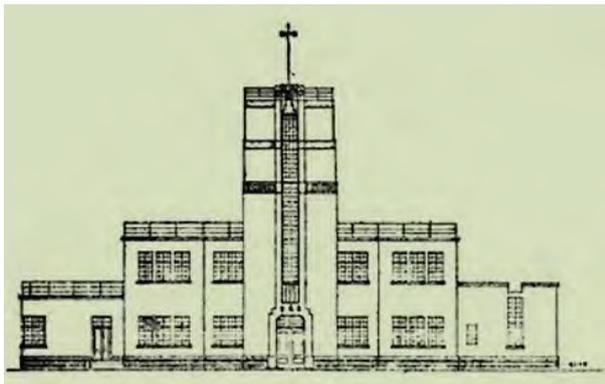


图8 广州市气象台正立面图

5.3 天文台旧铁路支线名称

日本军队侵占广州后将广州市气象台大楼及其周边作为一个军用仓库。为便于军用物资的运输，1939年由侵华日军强征当地农民修建了一条铁路支线，从广九铁路的石牌站向西南出岔通向该仓库。当时，社会上多将气象台与天文台混为一谈，并且受香港天文台名称的影响，天文台的知名度更大。日军为掩人耳目，用天文台作为军用仓库对外的幌子，并将该铁路支线称为天文台支线（图9）。于是，天文台支线的名称一直沿用至今。

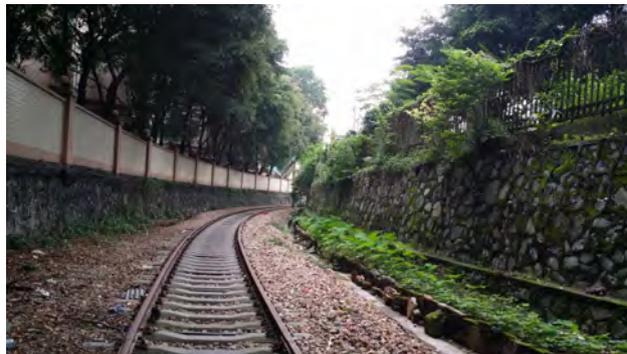


图9 广州旧铁路天文台支线现况

中华人民共和国成立后，广州市政府将天文台支线进一步延伸到天河员村的罐头厂、绢麻厂、玻璃厂。2004年天文台支线员村段因城市道路扩建而拆除，目前红专厂创意园（原罐头厂）里仍保留一个完好的铁路站台、一段铁轨和两节火车车厢，每天前来站台和铁轨拍照的人络绎不绝。

虽然长达3 km的天文台支线已经停止使用，但废弃的路基、铁轨等都较完好地保存着。天文台支线承载着广州市科技、工业发展记忆并具有爱国主义教育元素，在城市面貌焕然一新的今天，如何在广州旧铁路沿线改造中留住这些历史记忆还待更多人的关注和研究。

深入阅读

广东省地方志编纂委员会，1996. 广东省志 铁路志. 广州: 广东人民出版社.
广州市地方志编纂委员会，1999. 广州市志. 卷一. 广州: 广州出版社.
刘心霁, 吕凌峰, 2015. 中山大学天文台的创建、发展与历史贡献. 中国科技史杂志, (1): 13-27.
竺可桢. 竺可桢文集 第2卷. 上海: 上海科技教育出版社, 2004.

(作者单位: 何溪澄, 广州市气象局; 冯颖竹, 广州科技职业技术学院)

勘 误

本刊 2018 年第 5 期, 第 34—35 页《气候变化对洪湖湿地的影响研究》一文修改后的作者姓名、作者排序和责任机构为“梁益同¹, 蔡晓斌², 陈伟亮³ (1 武汉区域气候中心; 2 中国科学院测量与地球物理研究所; 3 荆州市气象局)”; 文中 (35 页右栏第 16 行) 文字应为“导致的洲滩增加面积达 109 km²”。

作者特此更正, 并向与广大读者致歉!

进展报告2019：新能源气象



支持机构：湖北省气象服务中心
湖北省气象能源技术开发中心

进 2019 展 报 告 新 能 源 气 象

2019年4月/9卷2期



进展报告2019

特约专家

姜海如 (中国气象局发展研究中心)

周 海 (中国电力科学院)

陈 玲 (中南电力设计院)

李 丹 (中国气象报)

俞文政 (南京信息工程大学)

李桂红 (咸宁市气象局)

申彦波 (中国气象局公共气象服务中心)

特约编辑

陈正洪 (湖北省气象服务中心)

崔 杨 (湖北省气象服务中心)

绿色能源,或称为新能源,是指不产生或极少产生放污染物、能够直接用于生产生活的能源,其中太阳能、风能就是绿色能源中最重的组成。截止到2018年底,我国风能太阳能发电装机容量占全部装机容量的20%左右,发电量站全部发电量的9%,我国风电、光伏发电已迈上替代能源的新台阶,并将逐步成为未来能源消费的主要角色。风能、太阳能开发利用全产业链均与气象因素及其变化密切相关,我国气象部门及相关行业技术人员开展了大量卓有成效的工作,已逐渐形成了应用气象学的一个分支学科——新能源气象学。

近些年来,湖北新能源气象服务取得了长足发展,在全国率先成立了省级气象能源技术开发中心,全力开展风能、太阳能资源监测、评估、预报、服务业务等系列研发,先后完成了面向电力应用的“风功率预测预报系统”与“光伏发电功率预测预报系统”的研制与开发,在全国多省份推广应用,并形成了具有特色的研发与应用体系。

为促进新能源气象服务实践交流和学科发展,在湖北省气象服务中心、湖北省气象能源技术开发中心的支持下,中国气象局风能太阳能资源中心、湖北省气象服务中心与《气象科技进展》杂志编辑部,通过向全国同行公开征集论文,遴选出其中10篇优秀论文形成以“新能源气象”为主题的“进展报告”。希望通过专刊的出版,能为我国风能、太阳能开发利用与保护提供借鉴和增益,并为新能源气象学科建设提供新参考。

姜海如 陈正洪



目 录

研究进展

- 49 曾琦,陈正洪:近年来气象灾害对风电场影响的研究进展
- 56 张雪婷,李金鑫,陈正洪,何飞,崔杨:我国大别山区风电场群对局地气候影响研究初探——以湖北大悟为例
- 62 孙朋杰,王彬滨,陈正洪,张雪婷,许杨,孟丹:测风塔风速插补对风功率密度误差的影响分析
- 66 金燕,王学锋,范立张:两个新参数在云南山地风电场风能资源评估中的适用性分析
- 71 李芬,杨勇,赵晋斌,陈正洪,高晓清,申彦波:光伏电站建设运行对气候环境的能量影响
- 78 郭鹏,申彦波,陈峰,赵晓栋:光伏发电潜力分析——以山西省为例
- 84 顾正强,朱玲,沈历都,龚强,赵春雨,晁华,徐红,蔺娜:辽宁省追踪式与最佳倾角斜面总辐射的推算与分析
- 90 康慨,孙振宇,张超,张云龙,李慧:实际环境下光储离网发电系统优化设计研究
- 95 张文波,闫晓敏,王亚同,邸燕君,王琦:甘肃省风能太阳能气象服务业务平台开发及应用
- 100 刘银秀,熊守权:靠近迭代法获取湿球温度初探



近年来气象灾害对风电场影响的研究进展

曾琦¹ 陈正洪²

(1 中国地质大学(武汉), 武汉 430074; 2 湖北省气象服务中心, 武汉 430205)

摘要: 随着风电场的大量兴建, 气象灾害对于风电场安全的影响问题受到越来越多的关注, 气象灾害会使风电场内设备受损, 发电效益降低。主要论述的气象灾害包括: 台风、雷电、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温等相关灾害, 简单分析气象灾害对风电场各划分单元(风电机组、集电线路、升压站、建筑、道路)的影响程度和分类。通过近十几年来国内外气象灾害对风电场影响相关文献的综述, 分析发现台风大风对风电场造成较大的机械破坏; 雷电造成风机和电网损坏; 低温冰冻引发设备覆冰、机械故障及发电量损失; 暴雨诱发山洪, 冲毁风电场内建筑和道路, 引发内涝淹没地面设备; 沙尘暴主要影响在于大风破坏和沙尘撞击叶片等敏感设备; 高温引起电器设备温度升高, 引发火灾爆炸; 台风、暴雨引起的滑坡泥石流、高温干旱引发山林草原火灾等次生灾害危害风电场。

关键词: 风电场, 气象灾害, 台风, 雷电, 低温冰冻, 沙尘暴, 暴雨

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010

A Review of the Effect of Meteorological Disasters on Wind Farms in Recent Years

Zeng Qi¹, Chen Zhenghong²

(1 China University of Geosciences, Wuhan 430074 2 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205)

Abstract: With the large-scale construction of wind farms, more and more attention has been paid to the influence of meteorological disasters on the safety of wind farms. Meteorological disasters can damage the equipment in wind farms and reduce the efficiency of power generation. The meteorological disasters discussed in this paper mainly include: typhoon, thunderstorm and lightning, icing, rainstorm, sandstorm, high temperature, and other related disasters. We simply analyze the impact degree and classification of meteorological disasters on various divisions of wind farms (e.g., wind turbines, collectors, boosters, buildings, and roads). Based on the domestic and global literature, this paper comprehensively discusses the research on the influence of meteorological disasters on wind farms in recent decades. It is found that typhoon causes great mechanical damage to wind farm; Lightning could damage wind turbines and power grids; Icing causes equipment icing, mechanical failure and power generation loss; Rainstorm induces mountain torrents, which wash away buildings and roads in the wind farm and cause waterlogging and inundation of ground equipment; The main influence of sandstorm lies in the damage of wind and the impact of sand and dust on the blades and other sensitive equipment. High temperature causes the temperature of electrical equipment to rise, causing fire and explosion. Attention should be paid to secondary disasters such as typhoons, landslides and mudslides caused by rainstorms, fires in forests and grasslands caused by high temperature and drought.

Keywords: wind farm, meteorological disaster, typhoon, thunderstorm, extreme low temperature and icing, sandstorm, heavy rain

0 引言

当今世界各国正在积极开发清洁的可再生能源, 其中风能作为一种清洁高效的能源日益受到各国重视。据全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)估计, 到2020年, 全球风电总装

机容量可能会增加到7.92亿 kW, 2030年风力发电量将占全球总发电量的20%以上^[1]。根据《风电发展“十三五”发展规划》, 2020年中国风电累计并网容量将达到2.1亿 kW以上, 其中海上风电并网装机容量达到0.5亿 kW以上, 风电发电量达到4200亿 kW·h, 占全国总发电量的6%^[2]。随着风电场的兴建, 风电机组的安全运行问题受到越来越多的关注, 极端气象灾害对风电场的安全运行会造成不同程度的损害, 致使风电场内设备受损, 发电效益降低。

气象灾害一般包括天气、气候灾害和气象次生、衍生灾害。风电场一般建设在空旷的自然环境中, 各种气象灾害都会或多或少危害风电场和内部人员安

收稿日期: 2018年10月11日; 修回日期: 2019年1月9日
第一作者: 曾琦(1995—); Email: 1816456717@qq.com
通信作者: 陈正洪(1964—); Email: 447183633@qq.com
资助信息: 国家重点研发计划(2018YFB1502801); 中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程2019年建设项目; 华中区域气象中心科技精湛基金(QY-Y4-201403)

全, 本文选择风电场易受到且影响较为严重的台风、大风、雷电、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温以及气象次生灾害^[3]展开论述。其中涉及台风、雷电、低温冰冻的相关研究较多。例如, Manwell等^[4]分析气象灾害(台风)引起的极端事件对美国近海风电场的影响; 宋丽莉等^[5]分析热带气旋对我国风力发电的影响; Rodrigues等^[6]研究雷电对风机的直接和间接影响; Makkonen等^[7]构建一种风机覆冰模型。而暴雨、沙尘暴、高温以及次生灾害对风电场影响的相关研究较少。

国内外关于风电场受气象灾害影响的系统性研究比较晚, 相关研究自20世纪90年代逐渐增多, 主要集中在美国、日本、欧洲(西班牙、德国、意大利、瑞典、葡萄牙等)以及加拿大, 研究内容主要是从定性的角度分析风电场开发建设过程中遇到的气象灾害风险, 其中部分研究试图对风电场遇到的气象灾害风险进行定量测量。Spencer等^[8]定量分析美国飓风对还防水风电场造成的风险。我国早期主要研究单一气象灾害对风电场的影响, 分析某个风电场受灾情况, 至2010年该领域深入研究增多。郑有飞等^[9]对影响江苏省风电开发的主要气象灾害进行分析及评估。可以看出, 气象灾害对风电场的影响研究是一个新兴的领域, 需要研究人员深入探索。希望通过这篇文献综述, 让更多人了解该领域研究内容, 激发更多相关研究, 科学指导风能发电。

风电场可以划分为风电机组(风电机、箱式变压器)、集电线路(架空、地埋)、升压站、建筑(监控室、生活区)、道路这5个单元。下面结合风电场划分单元从台风、大风、雷电、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温和次生灾害这几个方面分别论述气象灾害对风电场的影响, 总结气象灾害对风电场的影响类型。

1 台风、大风

风机利用风能将其转化为电能, 持续大风天气可以使风机处于较长时间的“满发”状态, 充分利用风力资源。但是, 当风速过大时风机及其附属设施也可能遭到损坏。2006年台风“桑美”袭击浙江苍南风电场造成惨重的损失, 28台风电机组全部受损, 其中5台倒塌^[10]。除了台风影响, 一些内陆风电场还会受到大风灾害的不利影响。2015年8月, 加拿大德芙琳地区发生强烈的龙卷风, 当地配网电线断裂, 造成风电场线路跳闸断电, 大量房屋受损, 当地30多人受伤^[11]。

台风和大风对整个风电场, 即风电机组、集电线路、升压站、道路和房屋所有单元的安全都有威胁。

1.1 台风

热带气旋是发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋, 是一种强大而深厚的热带天气系统, 其中最大风力达到12级的称为台风。王帅^[12]认为台风对风力发电机组的破坏机理主要体现在对设备结构施加的静载荷和动载荷叠加效应。风电设备所受风压静载荷与空气密度和风速有关, 与风速的平方成正比。台风风速可高达70 m/s, 空气密度很大, 极易超过设计载荷极限, 破坏风机设备。风压动载荷主要由湍流引起, 湍流强度越大, 对风机的破坏性越强, 湍流对设备结构形成周期性激荡, Han等^[13]认为若湍流产生的周期恰好与风机固有振动周期相同, 设备结构就产生横向的共振, 导致风机被毁。湍流强度突变也会影响风机正常运行。

张礼达等^[14]总结台风对风电机组的主要破坏有: 叶片出现裂纹或被撕裂, 偏航系统受损, 风向仪、尾翼等设备被吹毁等。在高风速的情况下(大于25 m/s), 机械制动器会使涡轮机停止旋转以减少负荷。Hong等^[15]研究发现, 若机械制动失效, 叶片转速达到超速度时, 叶片结构无法承受极端负荷, 最终导致叶片弯曲、损坏或脱落。台风可直接造成偏航系统的机械损害, 也可能破坏风电场电网系统从而使偏航系统故障。偏航系统可以根据风速风向控制轮毂和叶片的角度, 它可以使转子远离突出的风向以减少负荷。台风期间会出现持续几个大风方向作用在风电机组的情况, 当偏航系统失效, 风机将无法调整对风, 台风风速超过设计极限时, 会发生叶片损毁甚至风机倒塌等事故。吴远伟^[16]指出叶片在强风作用下产生极大扭转力矩, 超出高速轴刹车盘与刹车片摩擦承载能力, 刹车盘强行转动, 产生持续高温, 产生火花引燃高速盘侧易燃物引起火灾。

除了风电机组, 台风也会对风电场其他单元造成极大破坏, 可能造成门窗破损、塔架变形、房屋和架空线路倒塌等一系列危害。台风还往往伴随暴雨、风暴潮, 可能会冲毁风电场, 甚至引发内涝淹没风电场, 破坏升压站等地面设备、地下电缆、道路交通, 造成严重的灾害。

Manwell等^[4]研究指出, 风和海浪是影响海上风电场最重要的两个因素, 风主要影响风机和塔, 海浪影响地基。在台风期间, 风和海浪对海上风力发电场的相互作用仍然是一个需要研究的问题, Kumar等^[17]研究发现, 在热带气旋中波高与极端风速之间有良好的相关性。大风带来大浪, 台风带来的狂风、巨浪, 对风力涡轮机、塔和地基造成巨大破坏。

1.2 大风

测站出现瞬时风速达到或超过17 m/s, 或目测风力达到或超过8级的风为大风, 一日出现过大风, 作为一个大风日^[18]。产生大风的天气系统很多, 如冷锋、雷暴、飏线和气旋等, 特殊地形会形成局地大风。下面主要论述飏线大风、龙卷风、寒潮大风、峡谷大风等大风灾害对风电场造成的一定程度的破坏。

飏线是强对流天气的一种, 沿着飏线可出现雷暴、暴雨、大风、冰雹和龙卷等剧烈的天气现象。飏线大风相比龙卷风持续时间更长, 破坏范围更大, 强风冰雹破坏风机组设备, 使线路跳闸停电^[19]。龙卷风风速极高, 对风电场内设备造成巨大冲击, 其内外气压差可能将建筑屋顶直接吸走, 另外龙卷风裹挟的树枝、砖块等风致碎片会撞击下游其他物体造成破坏^[20]。寒潮是大规模强冷空气活动的过程, 造成剧烈降温, 伴随大风、冰雹、降雪等灾害性天气现象^[19]。受地形狭管作用影响, 当气流由开阔地带流入地形构成的峡谷时, 由于空气质量不能大量堆积, 空气加速流过峡谷, 风速增大形成峡谷大风, 大风风力可达到10级以上, 强风会破坏风电场。这些大风灾害会造成风电机组、集电线路、升压站、房屋建筑损毁, 影响道路交通。极端大风事件不仅会影响风机的安全运行, 还会威胁周边的公共安全, 伴随的暴雨冰雹将进一步危害风电场的安全运营。

2 雷电

雷电是一种伴有雷击和闪电的局地对流性天气, 是一种在积雨云中、云间或云地之间产生的放电现象, 雷暴发生时伴有冰雹、大风、暴雨等多种极端天气现象^[3]。雷暴对风电场的危害十分严重。Victor^[21]研究发现, 风机的有利位置往往与雷暴活动的区域重合。对于建立在空旷地带的风电场, 当它处于雷雨云形成的大气电场中时, 风机相对于周围环境成为突出的目标, 容易发生尖端放电被雷击中^[22]。对于建立在高海拔区(例如1000 m)或在山脊、山顶的风电场, 风机更是直接暴露在了雷电之中^[23]。Rodrigues等^[6]研究调查显示, 每年有4%~8%的欧洲风力发电机被雷电损坏, 其中德国风力发电机的雷击毁坏率高达8%, 日本沿海的风机因雷电导致损害占有总事故的30%左右。2013年3月, 广西多地出现雷电, 其中资源县某风电场受雷电影响, 4台风机的箱式变压器损坏, 直接经济损失91万元^[24]。

雷电主要影响对象是风电场内的风电机组、集电线路、升压站以及建筑设施。危害可以分为直接危害和间接危害。直接危害主要表现为雷电引起的热效应、机械效应和冲击波造成的危害。间接危害主要表

现为电磁感应效应和电涌过电压效应等^[25]。以下从这两个方面论述雷电对风电场的危害。

2.1 雷电对风电场的直接危害

风电机组遭受雷击的过程实际上就是带电雷云与风电机组之间的放电过程。雷电直接击中风电机组时, 电流产生热效应和机械效应。机械效应主要表现为在电动力作用下, 部件直接被击毁, 例如雷击使得塔筒变形甚至折断。热效应主要表现为雷击点周围, 局部金属熔化, 例如使输电线路直接熔断。热效应和机械效应一般同时出现。对于叶片, 被击中时, 雷电释放的巨大能量使叶片温度急剧升高, 物体内部水分迅速蒸发、汽化, 快速膨胀, 压力上升造成叶尖前后粘接部分爆裂破坏。直击雷击中风机叶片后, 电流沿着叶片传至风电机的主轴部分, 电流流动时, 机舱内部金属间隙会产生电火花, 可能引发火灾爆炸。电流经过轴承时, 产生极大热量, 损坏轴承内的滚子和套圈, 影响轴承运行的流畅性和设备的可靠性。雷击往往不会使电机运行立即失效, 但它使运行摩擦加大, 日积月累, 最后使整个轴承内部遭到严重损坏并发生运行故障^[25-27]。

2.2 雷电对风电场的间接危害

风电机组雷击暂态效应会使电位抬高, 使得风机叶片尖端与塔筒底部产生较大电位差, 当不同构件之间电位差达到一定数值时, 风机内部结构之间的空气被击穿, 破坏风机内部设备。雷电击中风机时会在风机塔筒内产生强电磁脉冲^[27], 对塔筒内部的风机控制系统和主电源装置造成直接辐射危害。电磁脉冲会在塔筒内部各种信号、电源导线内部产生感应电流, 形成过电流和过电压波侵入电子设备, 这些过电压会损坏集电线路和升压站设备, 造成风机设备工作失灵或者永久性损坏。雷电流由散流装置入地过程中形成的电位梯度过大, 附近区域人员可能受到接触电压和跨步电压的危害。

3 低温冰冻

根据IEC 61400-1标准^[22]规定, 风电机组的运行温度为-20℃, 生存温度为-30℃, 极端低温环境会影响风电场的正常运行。积冰是一种各种降水或雾滴与地面或空中冷却物体碰撞后冻结在其表面上的现象。Neil等^[28]指出在世界上的许多地方, 大部分利于开发的风能可用点已经被利用, 这迫使风电场开发商去寻找更复杂的地点, 并带来额外的风险或不确定性, 比如近海、山林和寒冷的气候地区。根据欧洲新能源咨询公司(BTM)评估, 到2012年底, 寒冷气候地区的装机容量达到69 GW, 2017年将增加50 GW^[29]。湖北

仙居顶风电场2010—2013年受低温冰冻影响,年平均损失电量600~800 kW·h。

低温冰冻主要影响对象是风电场内的风电机组和集电线路设备,也会影响道路房屋。

Oloufemi等^[30]指出低温冰冻对风电场最直接的危害就是停机所造成的经济损失,若低温天气持续时间较长,叶片长时间覆冰,风电场往往会停机几周甚至数月。2005年德国一项调查研究发现,停机是低温冰冻事件的最大危害,影响占比近90%^[31]。除了停机,低温冰冻还伴随3方面的问题:叶片、输电线等其他构件覆冰问题;低温使润滑油黏稠流动性差引发的机械故障问题;低温使得部分电子元件传感器失灵的问题。下面重点从叶片、导线覆冰、机械故障、周边安全问题这4个方面具体展开论述。

3.1 叶片覆冰

叶片覆冰使得叶片质量分布不均,叶片结构和形状改变,降低风能利用系数;增大叶片粗糙度,降低机翼启动性;叶片负载增大,风电机组机翼的空气动力损失增大^[32]。Hu等^[33]研究得到,叶根到叶尖,冰的质量和厚度近似呈线性增加;叶尖结冰率大于叶根结冰率,在防/除冰时应注意叶尖区域;无论是不对称覆冰(叶片一面覆冰,一面未覆冰)还是对称覆冰都能减小叶片动力,但不对称覆冰会使叶片附加不对称剪力,对风机危害更大。孙鹏等^[34]指出低温会使叶片阻尼等结构特性发生变化,叶片自身频率变化,引发共振,使得寿命缩短,大风低温时的刹车动作可能引起叶片折断。

3.2 导线覆冰

当导线覆冰厚度超过设计的抗冰厚度时,覆冰后质量、风压面积增加会导致输电线路发生机械和电气方面的事故,可能造成金具损坏、导线断股、杆塔折损倒塌、绝缘子串翻转和撞裂等机械损害;也可能使弧垂增大,造成闪络和烧伤、烧断导线等电气问题^[35]。

李兴凯等^[36]研究华北地区导线覆冰问题发现,若相邻的导线覆冰不均匀或一条线路中导线不同期脱冰,导线会产生张力差,从而损坏金具、导线和绝缘子,使得导线电气间隙减小,发生闪络,也有可能破坏杆塔。在风的作用下,质量分布不均的导线会产生自激振荡和低频率的舞动,从而造成金具损坏、导线断股、断线和杆塔倾斜或倒塌等事故。

3.3 其他机械故障

低温条件下,风机中润滑油黏稠度增加,流动性降低,风机液压系统无法正常工作。对于刹车液压系统,它使得刹车时间增长、振动增大,影响风机安全运行。润滑效果减弱,摩擦增大,齿轮箱系统和偏航

系统内部运行阻力增大,旋转、摩擦产生的热量无法正常释放,这会使得齿轮磨损、系统受损^[34]。

低温条件下,部分电子、电气元件无法工作,出现异常反应,传感器异常会影响风电场信号采集。升压站、监控室以及其他电气设备都会受到影响。

3.4 安全问题

Tammelinen^[37]研究指出风电场自身就有噪声污染的问题,低温冰冻条件下,风机运行受阻,噪声污染增强。温度升高后,风机和输电线路上的覆冰、冰柱会脱落,周围居民应注意安全,避免砸伤。道路结冰会影响风电场内交通安全。

4 暴雨

根据规定,24 h降水量 ≥ 50 mm的强降雨称为“暴雨”。暴雨主要影响对象是风电场内的风电机组和道路房屋。暴雨对风电场的危害主要来自两个方面,一是暴雨引发洪水、滑坡、泥石流等灾害;二是雨水对风机性能的影响。

暴雨引发的洪水、泥石流是危害风电场的主要原因,整个风电场都会受到极大破坏。受地形影响,若风电场建设在地势较低的区域,或是风电场内排水、防洪措施不到位,风电场内易形成内涝,靠近地面的变压器、升压站等设备易被淹没损坏。山区里,暴雨引发山洪,可能会冲毁风电场中风机、房屋、道路等设施,甚至一些风电场在建设过程中遭到山洪破坏,损失惨重。2017年7月14—15日,宜昌市五峰县出现了较大范围的强降雨,导致山洪暴发并诱发多处滑坡泥石流,对当地的房屋、道路、电力和通信等设施产生较为严重的危害,在五峰和湾潭两镇建设的北风垭风电场,受到此次强降雨诱发的山洪地质灾害的影响,使得2017年9月底首台风机并网发电的计划推迟^[38]。

目前,关于雨水对风机叶片动力影响研究还比较少,相关研究集中在航空领域,研究雨水对机翼的影响。这些研究发现:雨水使机翼升力减少,阻力增加;在雨中,层流翼的性能损失比紊流的翼片更严重;当雨滴撞击机翼时,部分雨滴被加速溅回空气中,剩余雨滴在机翼表面形成了一层薄薄的水膜,这层水膜受之后的雨滴影响,表面形成“弹坑”,成为了一张不均匀的薄膜,机翼表面改变,增加了阻力^[39]。与航空研究中得出的结论相似,Cai等^[40]分析了一台在雨天使用的水平涡轮机机翼的性能,发现在大多数AOAs(攻角)引入降雨时,升力会减少,阻力增加,导致升阻比降低。Alessio等^[41]研究指出,如果叶片不受保护,风机叶片将会遭受雨蚀,尤其是酸雨的损坏,将会降低空气动力性能,从而降低动力的产生。Wu等^[39]利用NACA 0015 VAWT翼型研究发现,

降雨条件下风机叶片升力系数和切向系数减小（图1、图2）。

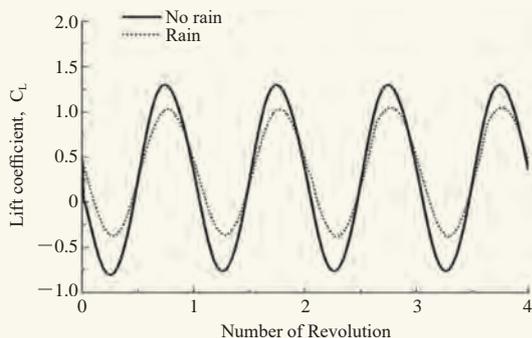


图1 NACA 0015翼型振荡运动状态晴天雨天升力系数比较^[39]
Fig. 1 Lift coefficient comparison between the dry and rain conditions for NACA 0015 airfoil with oscillating motion

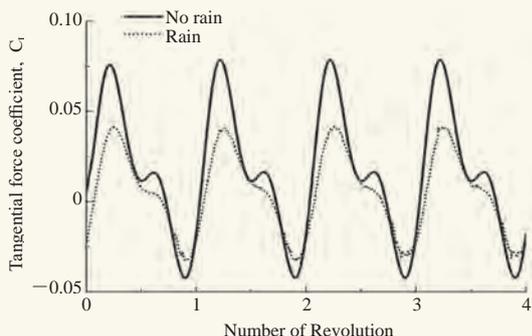


图2 NACA 0015翼型振荡运动状态晴天雨天切向力系数比较^[39]
Fig. 2 Tangential force coefficient comparison between the dry and rain conditions for NACA 0015 airfoil with oscillating motion

5 沙尘暴

沙尘暴是指强风扬起地面沙尘，使空气混浊，水平能见度小于1000 m的风沙天气现象。

沙尘暴破坏范围大，造成的受灾面积广，对风电场内各单元都有影响，其危害主要表现在以下几个方面。

5.1 沙尘暴伴随大风

强沙尘暴发生时风力往往达8级以上，有时甚至可达12级，相当于台风登陆的风力，强风可能会吹倒或拔起大树、电杆，刮断输电线路，或是发生高压线路短路和跳闸事故，毁坏建筑物和地面设施，造成人畜伤亡，破坏力极大。

根据2014年一篇相关报道^[42]，沙尘暴会对土壤造成不同程度的刮蚀，每次的风蚀深度可达1~10 cm；当遇到背风凹洼的地形或障碍物时，随风而至的大量沙尘又会造成沙埋，严重的沙埋深度可达1 m以上。若风电场建在迎风坡或地势较高的地区，沙尘暴来袭对土地的刮蚀，影响塔基稳定，在背风坡或地势低洼的地区，其沙埋作用又可使塔架的高度发生变化，影

响风能吸收和转换。

5.2 沙尘暴扬起沙尘

大风夹带的砂砾不仅会使叶片表面严重磨损，甚至会造成叶面凹凸不平，破坏叶片的强度和韧性，影响风电机组运行^[32]。若砂砾较大，还会直接破坏风机和房屋设备；大量沙尘使能见度降低，不利于交通安全；高尘沙浓度、强风沙流速的沙尘可能引起电力设备外绝缘闪络，应提前做好防护措施。

风机叶片上的沙尘应及时清理，除了沙尘暴侵袭，日常的扬尘积灰对风机叶片正常运行也有影响。研究表明，由于沙尘积累，叶片阻力增大，升力减小，降低风机的功率输出。

G. Khalfallah等^[43]在2007年利用Nordtank 300 kW风力机，研究在1 d、1周、1个月、3个月、6个月、9个月不同工况下粉尘对功率曲线的影响（图3），在不清洗叶片的情况下，随着运行周期的增加，风电机组输出功率的损失也随之增大。扬尘还会危害场内工作人员的健康。

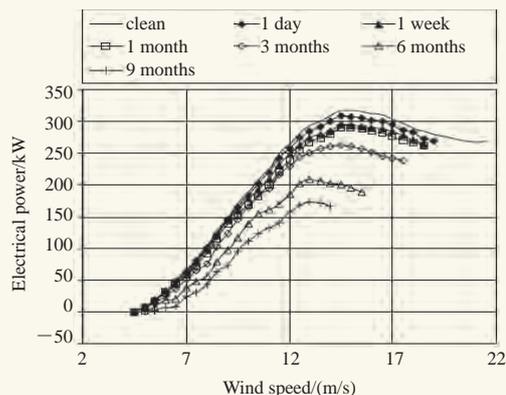


图3 在不同运行周期条件下粉尘对风机输出功率的影响^[43]
Fig. 3 Effect of dust for various operation periods on the power curve of turbine

6 高温

气象上将日最高气温 $>35^{\circ}\text{C}$ 定义为高温日，将日最高气温 $>38^{\circ}\text{C}$ 称为酷热日。中国把连续数天（3 d以上）的高温天气过程称之为高温热浪。高温主要影响风电机组、集电线路、升压站这几个涉及电力系统的单元。

高温会使电力线路超负荷，电力线路过载将威胁到电网的安全平稳运行。线路可能频繁跳闸，甚至造成变压器过热烧坏、损毁，引发主电力设备过载等故障，长时间处于高温环境也会影响风机中各组件寿命。霍林等^[44]研究发现，如果遇到高温天气且电力线路超负荷而线路又老化，而电器设备又长期处于高温运行状态，易引发电力故障，甚至引发火灾。

根据叶杭治^[45]研究, 风电机组保持较高功率运行时, 齿轮箱、发电机、变压器、变频器等机械和电气部件产生较大热量, 而发电机、齿轮箱、IGBT等主要部件又处于相对封闭的狭小的机舱内或塔底平台上, 产生的热量不能顺利排出, 使机舱内温度升高, 加之环境温度较高, 部件过热可能出现故障。高温影响到风电机组部件运行的安全性, 所以风电机组只能限功率运行, 甚至停机, 影响到风电场投资的经济性。目前风电场针对高温灾害设计出一些抗高温型机组, 例如任朝阳等^[46]通过改善风机的通风系统和散热性能, 设计了出了满足外界温度45℃, 机舱内部不超过50℃的抗高温型机组。

7 气象次生灾害

气象次生、衍生灾害, 是指因气象因素引起的山体滑坡、泥石流、风暴潮、火灾、酸雨、空气污染等灾害。下文论述台风、暴雨、高温这些气象灾害引发的滑坡、泥石流、火灾次生灾害。

7.1 滑坡泥石流

风电场所遭受的次生灾害主要是由台风、暴雨天气带来的。风电场内设施受到洪水长时间的冲刷、浸泡, 待台风、洪水退去后, 发生房屋、桥梁坍塌或者诱发山体滑坡、泥石流, 造成破坏, 这是台风带来的次生灾害。在山区, 暴雨天气可能引发滑坡、泥石流等次生灾害。

以泥石流为例。泥石流的发生有主要条件: 物源条件, 物源区土石体的分布、类型、结构等, 它与当地地层岩性相关; 水源条件, 水是泥石流的组成部分, 也是松散固体物质的搬运介质, 雨水往往是主要来源; 地形地貌条件, 它能为泥石流的发生、发展提供位(势)能及汇聚足够的水和土石^[47-48]。台风或是暴雨天气发生后物源变得松散, 提供水源, 有时甚至改变地貌(侵蚀掏空), 从而诱发泥石流这一次生灾害发生。滑坡、泥石流冲毁房屋、破坏交通, 对风电场安全运营带来危害。

7.2 山林草原火灾

长期的高温干旱天气会引发山林或草原火灾。修建在山区、草原的风电场应注意防火。一般风力发电机组安装检修场地均采取了平整措施, 安装检修场地上无植被, 升压站周围有水泥硬化道路, 可起到阻火作用。但若后期运行维护不当, 可能会有灌木、杂草等生长, 周边山林发生山火就可以蔓延到风力发电机组处, 威胁风力发电机组、箱式变压器的安全; 若火势较大可能影响升压站内的设备设施, 威胁运行人员人身安全, 破坏当地生态。

8 气象灾害对风电场各划分单元影响程度和类型

总结上文论述, 分析得到气象灾害在风电场内的重点破坏单元, 各气象灾害对风电场的危害程度, 见表1(打勾说明该单元会受到对应气象灾害破坏)。可以发现, 台风、大风、沙尘暴、低温冰冻、暴雨、次生灾害这些气象灾害破坏范围大, 影响时间长, 对风电场各单元安全都有威胁; 雷电对道路影响较小, 对其他单元, 特别是电力设备危害较大; 高温对风电场的影响相对较小, 主要损害风电机组、集电线路和升压站。不同地区风电场受到的气象灾害不同, 同一气象灾害, 灾害大小亦有不同, 后期将继续调查研究, 提供更加准确的影响分析。

表1 气象灾害对风电场内各划分单元影响情况
Table 1 The influence of meteorological disaster on each partition unit in wind farm

风电场划分单元	台风、大风	雷电	低温冰冻	沙尘暴	暴雨	高温	次生灾害
风电机组	√	√	√	√	√	√	√
集电线路	√	√	√	√	√	√	√
升压站	√	√	√	√	√	√	√
建筑	√	√	√	√	√		√
道路	√		√	√	√		√

气象灾害对风电场的影响可以分成安全类影响、效益类影响、生态类影响这3类。

安全类影响指该气象灾害对风电场人员安全危害和设备故障损毁。例如风机倒塌、输电线路折断、升压站设备故障、建筑道路毁坏、工作人员受伤等, 本文论述的气象灾害对风电场均会产生安全类影响。

效益类影响指设备不会大面积损毁, 但工作效率降低。覆冰、沙尘、雨水会使风机输出功率降低, 高温天气为保证设备安全低功率运行。

生态类影响指气象灾害破坏风电场周围生态环境。台风、雷电、高温可能引发火灾, 暴雨、次生灾害(滑坡、泥石流)会造成水土流失。

9 小结

随着全球对新能源, 特别是风能的需求日益增加, 在风电场的选址、建设、运营各个阶段都需要考虑气象灾害问题。本文主要讨论台风、大风、雷暴、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温以及诱发的次生灾害对风电场的影响。台风主要考虑叶片出现裂纹或被撕裂, 风向仪、尾翼等设备被吹毁, 偏航系统受损等机械破坏问题, 除了台风, 其他大风灾害(龙卷风、寒潮大风等)也会危害风电场安全; 雷电主要是直击雷引起的热效应、机械效应和冲击波对叶片和内部结构造成的危害, 电磁感应、电磁脉冲造成的间接危害,

电火花可能引发火灾；低温冰冻导致长时间停机造成发电量损失，覆冰对风电场表现在可能对叶片、导线等其他设备造成危害，低温使润滑油黏稠影响设备运行，影响电子元件性能，积冰掉落引发安全问题；暴雨诱发山洪，冲毁风电场内建筑和道路，引发内涝淹没地面设备，雨水会侵蚀叶片、阻碍叶片运行；沙尘暴主要影响在于大风破坏和沙尘撞击叶片等敏感设备，沙尘积累在叶片，使得风机功率输出降低；高温要注意电子设备安全，防止产生火灾、爆炸，注意工作人员安全。一次灾害发生后还要继续关注次生灾害的发生，注意台风、暴雨引起的滑坡、泥石流，以及高温干旱引发山林草原火灾等次生灾害危害风电场。

结合表1可以得到气象灾害对风电场内各划分单元影响情况，雷电和高温灾害对风电场内建筑、道路这两个单元影响较小，其他气象灾害对风电场内各划分单元都有影响，影响程度与风电场自身建设和灾害具体情况有关，需要进一步研究。

气象灾害对风电场均会产生安全类影响；低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温会产生效益类影响；台风、雷电、暴雨、气象次生灾害会产生生态类影响。

参考文献

[1] GMEC. Global Wind Report: 2018. GMEC, 2018.
 [2] 杨光俊. 我国风电绿色发展前景分析和政策建议. 环境保护, 2018, 46(2): 17-19.
 [3] 柳艳香, 袁春红, 朱玲, 等. 近12年来影响风电场安全运行的气象灾害因子分布特征. 风能, 2013(5): 70-74.
 [4] Manwell J F, Elkinton C N, Rogers A L, et al. Review of design conditions applicable to offshore wind energy systems in the United States. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(2): 210-234.
 [5] 宋丽莉, 毛慧琴, 钱光明, 等. 热带气旋对风力发电的影响分析. 太阳能学报, 2006(9): 961-965.
 [6] Rodrigues R B, Mendes V M F, Catalão J P S. Protection of interconnected wind turbines against lightning effects: overvoltages and electromagnetic transients study. Renewable Energy, 2012(46): 232-240.
 [7] Makkonen L, Laakso T, Marjaniemi M. Modeling and prevention of ice accretion on wind turbines. Wind Engineering, 2001, 25(1): 3-21.
 [8] Spencer H, Andrew T M, Sanjay R A, et al. Hurricane risk assessment of offshore wind turbines. Renewable Energy, 2018, 2.
 [9] 郑有飞, 林子涵, 吴荣军, 等. 江苏省风电场的气象灾害风险评估. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 145-151.
 [10] 王力雨, 许移庆. 台风对风电场破坏及台风特性初探. 风能, 2012(5): 74-79.
 [11] 钱贺. 龙源电力“走出去”纪实: “一带一路”好时机, 风起扬帆正当时. 新华网, 2018-06-29.
 [12] 王帅. 自然环境对风力发电机组安全运行的影响分析. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(6): 214-218.
 [13] Han T, McCann G, Mücke T A, et al. How can a wind turbine survive in tropical cyclone? Renewable Energy, 2014(70): 3-10.
 [14] 张礼达, 任腊春. 恶劣气候条件对风电机组的影响分析. 水力发电, 2007, (10): 67-69.
 [15] Hong L X, Møller B. An economic assessment of tropical cyclone risk on offshore wind farms. Renewable Energy, 2012, (44): 180-192.
 [16] 吴远伟. 台风对沿海风电机组的危害及对策. 风能, 2015, (2): 88-93.
 [17] Kumar V S, Mandal S, Kumar K A. Estimation of wind speed and wave height during cyclones. Ocean Engineering, 2003, 30(17): 2239-2253.
 [18] 葛珊珊, 张轶. 全球气候变化背景下灾害性天气变化及对海上风电的影响. 中国工程科学, 2010, 12(11): 71-77.

[19] 刘长青, 祁永辉, 曹荣泰, 等. 青海地区输电线路风灾原因分析. 电力勘测设计, 2016, (S2): 146-150.
 [20] 高榕. 中国龙卷风特性统计分析及灾后建筑物调查研究. 北京交通大学, 2018.
 [21] Victor M. Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms. Electric Power Systems Research, 2017.
 [22] IEC. IEC 64100-1:2005. Wind turbines part1: Design requirements. IEC, 2005.
 [23] Yokoyama S. Lightning protection of wind turbine generation systems//Lightning (APL), 2011 7th Asia-Pacific International Conference on. IEEE, 2011: 941-947.
 [24] 李兆华, 刘平英. 风电场雷击风险分析及防护措施研究: 以云南某风电场为例. 灾害学, 2015, 30(1): 120-123.
 [25] 李强. 风力发电机雷电损害分析及风险评估方法研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
 [26] 付国振. 沿海风电场雷电危害的特点及防护措施. 中国气象学会. S13 第十届防雷减灾论坛: 雷电灾害与风险评估. 中国气象学会: 中国气象学会, 2012: 5.
 [27] 王晓辉. 风力发电机组雷电暂态效应的研究. 北京: 北京交通大学, 2010.
 [28] Neil D, Andre N H, Niels-Erik C. Forecast of icing events at a wind farm in Sweden. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012(53): 262-281.
 [29] BTM. BTM World Market Update 2012. Navigant Research, 2013.
 [30] Oloufemi F, Zoé F, Hussein I. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis. Renewable and Sustainable Energy Review, 2016(65): 662-675.
 [31] Durstwitz M. A statistical evaluation of icing failures in Germanys 250 MW Wind-Programme (update 2003). BOREAS VI, Pyhäunturi: 9-11.04; 2003.
 [32] 张礼达, 张彦南. 气象灾害对风电场的影响分析. 电力科学与工程, 2009, 25(11): 28-30.
 [33] Hu L Q, Zhu X C, Hu C X, et al. Wind turbines ice distribution and load response under icing conditions. Renewable Energy, 2017.
 [34] 孙鹏, 王峰, 康智俊. 低温对风力发电机组运行影响分析. 内蒙古电力技术, 2008, 26(5): 8-10.
 [35] 苑吉河, 蒋兴良, 易辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状. 高电压技术2004 (1): 6-9.
 [36] 李兴凯, 曹秋会, 李文林. 华北地区山区风电场导线覆冰特点研究. 电力勘测设计, 2016(S2): 165-167.
 [37] Tammelin B, et al. Icing effect on power production of wind turbines. In Pro-ceeding of the BOREAS IV Conference, 1998.
 [38] 孙朋杰, 陈正洪, 万黎明, 张荣. 湖北五峰2017年“7.15”、2016年“7.19”暴雨特征及对地质灾害影响分析. 湖北农业科学, 2019, 58(10), 待发表.
 [39] Wu Z L, Cao Y H, Nie S, et al. Effects of rain on vertical axis wind turbine performance. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2017(170): 128-140.
 [40] Cai M, Abbasi E, Arastoopour H. Analysis of the performance of a wind-turbine airfoil under heavy-rain conditions using a multiphase computational fluid dynamics approach. Industrial and Engineering Chemistry Research. 2012, 52 (9): 3266-3275.
 [41] Alessio C, Alessandro C, Franco R. Computational analysis of wind-turbine blade rain erosion. Computers and Fluids, 2016.
 [42] 陈女士. 灾难频发气候作怪? 谁“祸害”了我们的风电场. 北极星电力网新闻中心, 2014-08-14.
 [43] Khalfallah M G, Koliub A M. Effect of dust on the performance of wind turbines. Science Direct, 2007(209): 209-220
 [44] 霍林, 谭萍, 张婷婷, 等. 电力气象灾害时空分布特征及其影响分析. 南方农业, 2017, 11(20): 83-84.
 [45] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术. 北京: 电子工业出版社, 2006.
 [46] 任朝阳, 陈棋, 崔峰, 等. 风电机组的抗高温设计. 能源工程, 2015(1): 44-47.
 [47] 林国才. 粤北山区风电场工程场地常见地质灾害调查研究. 城市建设理论研究: 电子版, 2018(16): 2.
 [48] 赵彬, 王新贺. 宁夏固原寨科风电场地质灾害危险性调查评估及防治措施建议. 中国水运, 2011, 11(12): 163-164.

我国大别山区风电场群对局地气候影响研究初探 ——以湖北大悟为例

张雪婷^{1,2} 李金鑫³ 陈正洪^{1,2} 何飞^{1,2} 崔杨^{1,2}

(1 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 2 湖北省气象能源技术开发中心, 武汉 430205;

3 中广核新能源投资(深圳)有限公司湖北分公司, 武汉 430205)

摘要: 选取大悟县风电场群及其周边地区3个气象站1993—2016年气温、风速、降水观测资料, 采用可能受影响区和非受影响区气温差值、风速比值、降水比值法, 分别对风电场群建设前后的各气象要素进行了对比分析, 讨论了大悟县风电场群对当地气温、风速、降水的可能影响。结果表明: 风电场群建设和运行对大悟县局地气温和风速有一定影响, 其中气温明显上升, 风速有所减小, 但其影响程度小于年代际变化, 降水量则未见显著影响。由于大悟县风电场群建成时间较短, 且气象站的观测受到多种因素的影响, 因此风电场群运行造成的局地气候效应有待更长时间观测统计分析及更多研究方法的验证。

关键词: 局地气候影响, 风电场群, 气温, 风速, 降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.011

A Preliminary Exploration on the Influence of Wind Farms on Local Climate in Dabie Mountainous Areas in China: A Case Study of Dawu in Hubei Province

Zhang Xueting^{1,2}, Li Jinxin³, Chen Zhenghong^{1,2}, He Fei^{1,2}, Cui Yang^{1,2}

(1 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205

2 Meteorological Energy Development Center of Hubei Province, Wuhan 430205

3 CGN New Energy Investments (Shenzhen) Company Limited Hubei Branch, Wuhan 430205)

Abstract: Data of observed temperature, wind speed and precipitation from three meteorological stations in and around the Dawu wind farms from 1993 to 2016 were selected, and the temperature, wind speed and precipitation changes since the wind farms started producing energy were analyzed. The temperature, wind speed and precipitation before wind farms were operational were compared with those same factors after the wind farm became operational. The effect of the wind farm operations on regional climate was analyzed by temperature difference, wind speed ration, and precipitation ration between areas affected and unaffected by wind farm operation. The analysis showed that the local climate changed as a result of running the Dawu wind farms: temperature increased and wind speed decreased. However, the degree of influence is less than natural interdecadal variation in climate, and the wind farm operation had no significant effects on precipitation. Because the wind farms have only been operational for a short period of time, and observations from meteorological stations are subject to the impact of many factors, the local climatic effect caused by the construction of wind farms needs to be verified with observation statistics and analysis over a longer time.

Key words: local climate impact, wind farms, temperature, wind speed, precipitation

0 引言

风能是一种绿色的可再生能源, 风力发电更起到了节能减排的作用, 因此被誉为“气候变化的卫

士”^[1], 近年来在世界范围内得到规模化发展。风电开发和运行在带来积极环境效应的同时, 对生态环境甚至气候的一些不利影响越来越受到关注, 国内外也开始有了这方面的研究。

虽然风力发电不会像火力发电一样产生温室气体和其他污染气体, 但是由于风机涡轮振动、风能转化为电能, 改变了自然界原有的能源循环模式, 同时风电场的建设会改变地面的粗糙度, 从而改变陆表和大气热交换过程, 导致风电场对局地气候可能产生

收稿日期: 2018年9月20日; 修回日期: 2019年1月3日
第一作者: 张雪婷(1984—), Email: zhangxt_l_w@163.com
通信作者: 陈正洪(1964—), Email: chenzh64@126.com
资助项目: 国家重点研发计划(2018YFB1502801);
湖北省气象科技发展基金(2018Q10)

影响^[2]。大量建立在观测和数值模拟基础上的研究表明，风电场的建立和运行对局地下游气候会有明显影响，主要是造成下游风速明显减弱；同时对下游气温也有明显影响，其变暖或变冷效应取决于局地近地层大气稳定度特征^[3]。以2003—2011年期间的卫星遥感数据为基础，研究大型风电场的地表气温变化特征。与无风电场区域相比，有风电场区域的气温有一个较明显的增温趋势，且增温现象在夜间尤为显著^[4]。而风速通过风场区域后减小，存在风速损失，尤其对高空的风速影响明显，这种影响至少延伸到下风向的10 km之外^[5-6]。对于降水来说，风电场主要影响季节性降雨量，对平均降雨量的影响不显著^[7]。另外，风电场的运行通过昼夜循环还增加了空气、地表及土壤温度，且风机群形成的局地气候影响在温度和绝对湿度方面随着与风电场距离的增大成对数性减少^[8]。

湖北省地处我国中部，从2013年开始风电场数量迅速增多，截至2017年底已建成、在建、待建的风电场装机容量已达1000万 kW，并形成北部桐柏山大别山一线（随州至麻城）、中部襄荆通道（襄阳至荆门）、西南利川齐岳山高山、鄂东低山丘陵湖区（黄冈东部、黄石、咸宁）等风电场群，各自总装机容量已（将）超百万千瓦。以地处北部丘陵山区的大悟县为例，恰好位于我国中、高纬度南北气流通道中，风能资源丰富，近年风电场数量和风机台数快速增加，已建成风电场9个、投运风机231台，这些风电场对局地气候影响如何，各方均高度关注，当地居民质疑是否由于风电场的大量开发导致极端高温、暴雨山洪灾害加重。研究大悟县风电场群对气候的可能影响在我国中南部丘陵山区具有较好代表性。因此本研究旨在通过可能受影响区（后简称影响区）和非受影响区（后简称非影响区）风电场群建成前后气象参数差（比）值的进一步对比和分析，揭示风电场群对局地气候的可能影响，满足当地居民、政府以及企业等的强烈需求，并为今后提出趋利避害措施提供科学依据。

1 资料与方法

本文采用了大悟县风电场群周边3个国家气象站，即大悟、红安、黄陂气象站的气温、风速、降水资料进行分析（图1、表1）。其中红安、黄陂气象站周边没有建成的风电场，且上述地区的主导风向为偏北风，综合考虑位置和风向，上述两站未受到大悟县风电场群的影响，因此将红安、黄陂两地作为非影响区，而大悟周边尤其是北边逐步建成多个风电场，因此将其作为影响区。大悟已建成风电场基本情况如表2所

示。其中黄陂站距离大悟稍远，作为参考站。3个气象站点的基本情况如下：大悟气象站建站以来，迁站2次，分别在1978、2017年，其观测环境发生了较大变化（超高建筑），导致平均风速呈显著减小趋势，特别是2007年。红安气象站分别在1959、1980年迁过2次站，2005年之后，由于建筑遮挡，风速下降严重。黄陂气象站建站至今未曾迁站，观测环境较好，测风资料比较完整。

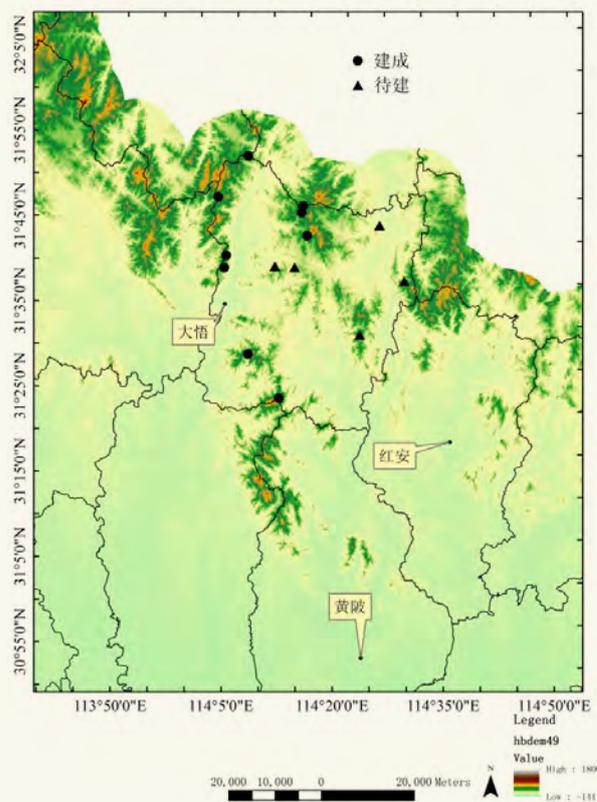


图1 风电场及周边气象站位置示意图

Fig.1 Map of meteorological stations around the Dawu wind farms

表1 大悟县风电场群周边国家气象站分布情况

Table 1 The distribution of meteorological stations around the Dawu wind farms

站名	纬度/°N	经度/°E	高度/m	与风电场群相对位置
红安	31°17'	114°37'	74.3	30.4~75.7 km, 位于风电场群东南边
黄陂	30°52'	114°24'	31.4	58.3~111.9 km, 位于风电场群东南偏南边
大悟	31°34'	114°07'	74.9	8.5~32.5 km, 位于风电场群之间

计算影响区与非影响区各自代表气象站同年的气温差值 (ΔT_1)、风速比值 (rV_1)、降水量比值 (rR_1)，再分别求取风电场建成后 (3 a、2 a) 与前 (20 a、10 a、5 a) ΔT_1 的差值 (ΔT_{2-3a} 、 ΔT_{2-2a})、 rV_1 的比值 (rV_{2-3a} 、 rV_{2-2a})、 rR_1 的比值 (rR_{2-3a} 、 rR_{2-2a})，从而剔除了大气候背景下气温、风速、降水量波动或

表2 大悟、红安、黄陂风电场建设情况 (含建成、在建、待建风电场)

Table 2 Construction of wind farms in Dawu, Hongan and Huangpi (including wind farms which are built, currently being built, or to be built)

所属地区	风电场名称	当前状态	装机容量/ 万kW	并网发电 时间	风机 台数	面积 /km ²	风机轮毂 高度/m
大悟县	风电场1	建成	2.2	2015.05	11	10	80/85
	风电场2	建成	3.0	2009.12	40	20.3	60
	风电场3	建成	9.6	2016.05	48	30	85
	风电场4	建成	4.8	2014.12	24	14.7	80
	风电场5	建成	2.2	2014.12	11		80
	风电场6	建成	3.6	2015.10	18	15	80
	风电场7	建成	4.8	2014.05	24	26.7	80
	风电场8	建成	4.8	2013.12	24	11	80
	风电场9	建成	4.96	2013.06	31	15	80
	风电场10	待建	6.4	/	/	/	/
	风电场11	待建	3.6	/	/	/	/
	风电场12	待建	3	/	/	/	/
	风电场13	待建	5	/	/	/	/
	风电场14	待建	7	/	/	/	/
红安县	风电场15	在建	4.6	/	/	/	/
黄陂区	风电场16	待建	4.95	/	/	/	/

趋势变化,可揭示出大悟县风电场群对当地气温、风速、降水的可能影响。

其中,

$$\Delta T_1 = T_{\text{大悟}} - T_{\text{红安}}, \quad (1)$$

$$rV_1 = V_{\text{大悟}} / V_{\text{黄陂}}, \quad (2)$$

$$rR_1 = R_{\text{大悟}} / R_{\text{红安}}, \quad (3)$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_{1\text{后}} - \Delta T_{1\text{前}}, \quad (4)$$

$$rV_2 = rV_{1\text{后}} / rV_{1\text{前}}, \quad (5)$$

$$rR_2 = rR_{1\text{后}} / rR_{1\text{前}}, \quad (6)$$

式中, T 为平均气温, V 为平均风速, R 为降水量, 后为2014—2016年(3 a)或2015—2016年(2 a), 前为1993—2012年(20 a)或2003—2012年(10 a)或2008—2012年(5 a)。

由于各站点资料时间长度不同,因此年际变化的分析采用1993—2016年的资料,近20、10、5年平均分别采用1993—2012、2003—2012、2008—2012年的资料,风电场陆续建成对局地气候影响的分析分别采用2014—2016年(建成后3年)、2015—2016年(建成后2年)资料同近20、10、5年平均值作对比。其中,大悟县风电场集中式的建设于2013年开始,同年共有2个风电场开始运行,并网发电时间分别为6、12月,因此不能确定2013年是否受到风电场群的影响,所以分析时暂不采用2013年的资料。

最后采用滑动 t -检验来判断气温差值、风速和降水比值序列的突变点,验证大悟县风电场群对当地气

温、风速、降水影响程度的显著性。

2 风电场群对气温的影响研究

2.1 风电场群周边气温变化特征

影响区(大悟站)、非影响区(红安站)1993—2016年累年平均气温分别为16.2、16.4℃,其中,影响区平均气温在15.1(1993年)~17.0℃(2016年)变化,非影响区平均气温在15.2(1993年)~17.2℃(2007年)变化。1993—2016年影响、非影响区平均气温年际变化均略有上升,上升速率分别为0.43、0.35℃/10 a。其中风电场群建成前(20 a),影响区与非影响区平均气温的年际变化基本一致,且均呈上升趋势,上升速率均为0.3℃/10 a。除2014—2016年外,非影响区的平均气温均大于影响区(图2)。

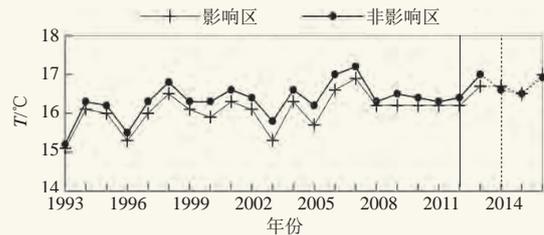


图2 影响、非影响区(1993—2016年)平均气温年际变化
Fig. 2 Interannual change in temperature average at the affected and unaffected areas during 1993—2016

计算影响与非影响两个区域的气温差值,即 ΔT_1 ,其历年变化曲线如图3所示。可以看出, ΔT_1 在2014年以后突然增大,由1993—2013年的负值变为正值,平均 ΔT_1 为0.06℃,比1993—2012年的 ΔT_1 (-0.27℃)增大了0.33℃。由于气温差值已经排除了大气候背景下气温受气候变化的影响,可以近似认为这种影响与非影响区平均气温差值突然增大是由于风机涡轮作用混合了上下层空气导致的风电场局地气候效应造成的^[9],总体表现为增温。

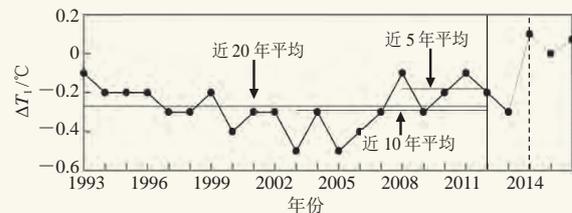


图3 影响、非影响区(1993—2016年)平均气温差值年际变化
Fig. 3 Interannual variation of ΔT_1 between the affected and unaffected areas during 1993—2016

2.2 风电场群建成后气温的变化特征

为了讨论风电场群对近3年和近2年周边气温的影

响, 将2014—2016、2015—2016年气温与常年气温进行对比分析。表3分别计算了近20、10、5年四季及年的 ΔT_1 与近3、2年四季及年的 ΔT_1 。

表3 影响区与非影响区气温差值比较 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Table 3 Comparison of ΔT_1 between the affected and unaffected areas (unit: $^{\circ}\text{C}$)

时段	1993—2012年	2003—2012年	2008—2012年	2014—2016年	2015—2016年	
ΔT_1	春	-0.04	-0.01	0.00	0.20	0.05
	夏	-0.19	-0.29	-0.19	0.10	0.06
	秋	-0.46	-0.46	-0.30	-0.15	-0.08
	冬	-0.38	-0.36	-0.25	0.05	0.06
	年	-0.27	-0.29	-0.18	0.06	0.04
ΔT_{2-3a}	春	0.24	0.21	0.20		
	夏	0.30	0.39	0.30		
	秋	0.31	0.31	0.15		
	冬	0.43	0.41	0.30		
	年	0.33	0.35	0.24		
ΔT_{2-2a}	春	0.09	0.06	0.05		
	夏	0.25	0.34	0.25		
	秋	0.38	0.38	0.22		
	冬	0.44	0.42	0.31		
	年	0.31	0.33	0.22		

计算结果显示, 常年四季及年的 ΔT_1 基本为负值, 在 $-0.46 \sim 0.00$ $^{\circ}\text{C}$, 近3年四季及年的 ΔT_1 在 $-0.15 \sim 0.20$ $^{\circ}\text{C}$, 比常年增大 $0.15 \sim 0.43$ $^{\circ}\text{C}$ 。其中, 夏季和冬季增大 0.30 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 春季和秋季增大 0.15 $^{\circ}\text{C}$ 以上。近2年四季及年的 ΔT_1 在 $-0.08 \sim 0.06$ $^{\circ}\text{C}$, 比常年增大 $0.05 \sim 0.44$ $^{\circ}\text{C}$ 。其中, 冬季增大 0.31 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 春季未超过 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。可见, 建风电场后, 四季及年的 ΔT_1 比建风电场前有所增大, 春季增大较少, 冬季增大较多, 且近2年的春夏气温变化较近3年的春夏气温变化略微偏小, 秋季略微偏大, 但从全年来看两者区别不大。

3 风电场群对风速的影响研究

3.1 大悟站平均风速的订正

调查表明, 20世纪80年代末以来, 全国城市化加剧, 至90年代初中期, 许多气象站所在地由原来的远郊区变为近郊区, 四周盖起了楼房, 一些观测场环境遭到严重破坏, 观测到的风速逐步甚至急剧减小。其中, 大悟气象站(影响区)建站以来, 观测环境发生了较大变化, 导致平均风速呈现显著减小趋势, 特别是2007年, 观测场周围有住户强行超高建房, 进一步破坏了探测环境(年平均风速已经由60年代的 $3 \sim 4$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至2007—2011年的 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下)。红安气象站(非影响区)于2005年修建了新的办公楼, 观测站受到遮挡, 导致2005年之后风速明显下降。而同为非影响区的黄

陂气象站建站至今未曾迁站, 观测场环境较好, 因此在风的分析中采用黄陂作为非影响区。而为了撇除地面观测站受周边环境等变化而造成的风速减少, 我们对大悟站进行订正(由于大悟站1978年迁站, 因此1978年之前的风速不采用)。

由于黄陂气象站周围环境变化不大, 且年平均风速变化比较平缓, 因此认为黄陂气象站风速的变化为自然变化, 以此对大悟气象站由于测风环境引起的风速减小进行订正。大悟和黄陂气象站年平均风速1990—2006年比2007—2016年分别减少 0.70 、 0.07 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。黄陂和大悟气象站地理位置较为接近, 因此可初步认为在大气背景风速受气候变化影响的变量是相等的, 1990—2006年两站环境均无明显变化, 因此以此时间段为基准, 将两站1990—2006年较2007—2016年的平均年平均风速变化做差值, 即 $0.70 - 0.07 = 0.63$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 可认为该值排除了自然因素(气候变化), 为2007—2016年间人为因素的影响量, 将 0.63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加到大悟气象站2007—2016年逐年平均风速实测值上便得到了自然条件下的逐年平均风速值。订正后的1990—2016年逐年平均风速变化曲线见图4。

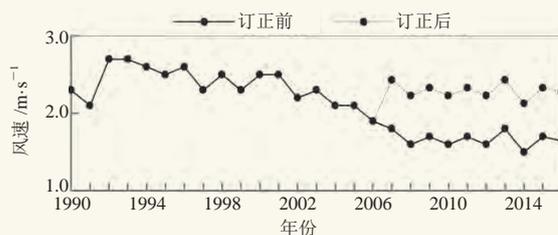


图4 大悟气象站(1990—2016年)平均风速年际变化
Fig. 4 Interannual changes in mean wind velocity of Dawu Meteorological Station during 1990—2016

3.2 风电场群周边风速变化特征

影响区、非影响区1993—2016年累年平均风速分别为 2.3 、 1.9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中, 影响区平均风速在 1.9 (2006年) ~ 2.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1993年)变化, 非影响区平均风速在 $1.7 \sim 2.1$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化。1993—2016年影响、非影响区平均风速年际变化均呈下降趋势, 下降速率分别为 0.143 、 0.067 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/10$ a。其中风电场群建成前(20 a), 影响区与非影响区平均风速的年际变化基本一致, 且均呈下降趋势, 下降速率均为 0.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/10$ a (图5)。

图6给出影响区与非影响区的年平均风速比值(rV_1)历年变化曲线。可以看出, rV_1 呈波动性变化, 各年在 $1.1 \sim 1.5$, 2014—2016年的 rV_1 值在1993—2016年所有值中偏小, 但总体来看其变化还是位于年

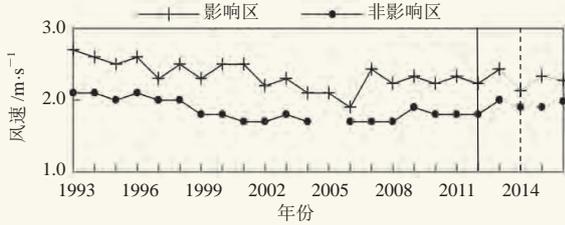


图5 影响、非影响区 (1993—2016年) 平均风速年际变化
Fig. 5 Interannual changes in mean wind velocity at affected and unaffected areas during 1993—2016

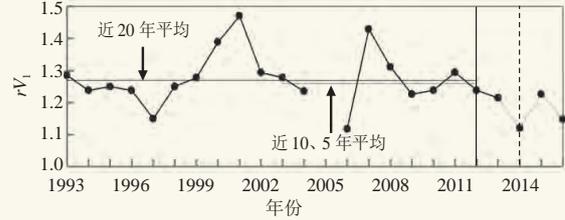


图6 影响、非影响区 (1993—2016年) 平均风速比值年际变化
Fig. 6 Interannual change of rV_1 between the affected and unaffected areas during 1993—2016

际变化周期中。其中，2005年黄陂站风速缺测。

3.3 风电场群建成后风速的变化特征

表4分别计算了近20、10、5年的 rV_1 与2014—2016、2015—2016年的 rV_1 ，并进行了对比。

表4 影响区与非影响区风速比值比较

Table 4 Compare of rV_1 between the affected area and non-affected area

时段	rV_1	rV_{2-3a}	rV_{2-2a}
1993—2012年	1.27	0.91	0.93
2003—2012年	1.26	0.92	0.94
2008—2012年	1.26	0.92	0.94
2014—2016年	1.16		
2015—2016年	1.19		

计算结果显示，常年 rV_1 在1.26~1.27，近3年的 rV_1 为1.16，近2年的 rV_1 为1.19。而 rV_{2-3a} 和 rV_{2-2a} 分别在0.91~0.92和0.93~0.94。可见， rV_1 在大悟县风电场群并网发电前后有略微差异，风速比建风电场前减小，且近2年的风速变化较近3年的风速变化略微偏小。

4 风电场群对降水的影响研究

4.1 风电场群周边气温变化特征

影响区、非影响区1993—2016年累年平均降水量分别为1091.6、1174.5 mm。其中，影响区平均降水量在567.6 (2011年)~1744.7 mm (2016年)变化，非影响区平均降水量在694.7 (2011年)~1857.6 mm (2016年)变化。风电场群建成前 (20 a)，影响区与非影响区降水量的年际变化基本一致，且均呈下降趋势。2014—2016年影响、非影响区平均降水量年际变化呈上升趋势，且影响区2016年降水量为1961年以来最大值 (图7)。

图8给出影响区与非影响区的年降水量比值 (rR_1) 的历年变化曲线。可以看出， rR_1 总体上有微弱的下降趋势，2014—2016年的 rR_1 值均小于1，但与前期相比，该段比值的变化的仍位于年际变化周期中。由于降水量比值已经排除了大气候背景下降水受气候变化的影响，可以近似认为大悟县风电场群对降水的

影响不大。

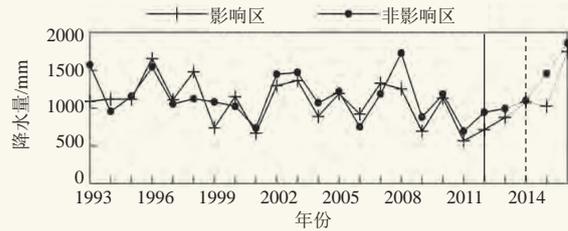


图7 影响、非影响区 (1993—2016年) 降水量年际变化
Fig. 7 Interannual change of precipitation at affected and unaffected areas during 1993—2016

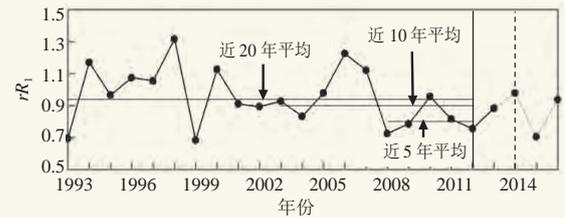


图8 影响、非影响区 (1993—2016年) 平均降水量比值年际变化
Fig. 8 Interannual change of rR_1 between the affected and unaffected areas during 1993—2016

4.2 风电场群建成后降水的变化特征

表5分别计算了近20、10、5年的 rR_1 与2014—2016、2015—2016年的 rR_1 ，并进行了比较分析。

计算结果显示，常年 rR_1 在0.80~0.94，近3年 rR_1 为0.87，近2年 rR_1 为0.84。可见，近3年及近2年的降水量比值均在常年降水量比值范围内， rR_{2-3a} 和 rR_{2-2a} 分别在0.93~1.09和0.89~1.04，且在1上下浮动。可见， rR_1 在大悟县风电场群并网发电前后仅有略微差异，风

表5 影响区与非影响区降水量比值比较

Table 5 Comparison of rR_1 between the affected and unaffected areas

时段	rR_1	rR_{2-3a}	rR_{2-2a}
1993—2012年	0.94	0.93	0.89
2003—2012年	0.90	0.97	0.93
2008—2012年	0.80	1.09	1.04
2014—2016年	0.87		
2015—2016年	0.84		

电场群形成的局地气候对降水量的影响并不明显。

5 突变检验

为了验证大悟县风电场群对当地气温、风速、降水影响程度的显著性。采用滑动 t -检验来判断气温差值、风速和降水比值序列的突变点。

经过计算发现,气温差值序列于2013年通过0.001显著性水平,可见气温差值在2013年后发生了明显的突变。风速比值序列于2012年通过0.05显著性水平,可见风速比值在2012年后发生了突变。而大悟县风电场群从2009年开始建设,并于2014年大规模建成,因此风电场群的运行对当地气温的影响明显,对风速也有较小影响。而降水比值序列在2009年之后并未发生突变,说明风电场群的运行对降水的影响不太明显。

6 结论与讨论

本文以大悟县风电场群为研究对象,对比分析了风电场群影响区和非影响区的站点在风电场群运行前后气温、降水、风速要素的变化,具体结果如下。

1) 大悟县风电场群形成的局地气候对气温造成了影响,总体表现为增温。其中, ΔT_1 序列从2014年突然增大,比常年 ΔT_1 增大0.24℃以上,可见大悟县风电场陆续投入运行后,影响区气温明显升高,春季增温较小,冬季增温较大,且近2年的春夏气温变化较近3年的春夏气温变化略微偏小,秋季略微偏大,但从全年来看两者区别不大。

2) 大悟县风电场群形成的局地气候对风速有一定影响,总体表现为风速减小。其中, rV_1 序列在2014年以后略有减小,与常年 rV_1 的比值,即 rV_2 在0.91~0.94,可见大悟县风电场陆续投入运行后,影响区风速有略微减小趋势。但是,风速在风电场群影响期(后3年)的波动未超出其年代际变化。

3) 大悟县风电场群形成的局地气候对降水量的影响不大。近3、2年 rR_1 与常年 rR_1 的比值,即 rR_2 在0.89~1.09,且近3、2年的 rR_1 在常年 rR_1 的范围内,可见风电场群影响期的变化位于年际变化周期中,因此风电场群的运行对其影响不太明显。

与目前国内外相关的研究(主要采用数值模拟或

在现场进行观测的方法)相比,本文采用了国家气象站资料进行分析,其研究地点仅涉及单点,造成了一定局限性。如涉及风电场附近有实际观测的研究,其研究时间多为风电场运行后五至几十年,本文仅采用大悟县风电场群运行后3年时间的观测资料与历史气候值作对比分析,时间略短。另外,气象站的观测还受到多种因素的影响,尤其是周边环境及仪器设备的维护和更换,分析方法也较为简单,因此对风电场群建设造成的局地气候效应有待更长时间观测统计分析 & 更多研究方法的验证。

由于大悟县的主要产业是农林牧渔业,受到城市化的影响较小,因此文章未考虑排放、城市化等因素的影响。未来随着城市的逐渐发展应适当考虑这些因素的影响。

参考文献

- [1] Leung D Y C, Yang Y. Wind energy development and its environmental impact: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): 1031-1039.
- [2] Xia G, Zhou L M, Freedman J M, et al. A case study of effects of atmospheric boundary layer turbulence, wind speed, and stability on wind farm induced temperature changes using observations from a field campaign. *Climate Dynamics*, 2016, 46: 2179-2196.
- [3] 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 风电场对气候变化影响研究进展. *气候变化研究进展*, 2011, 7(6): 400-406.
- [3] Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y. Advances in assessment on impacts of wind farms upon climate change. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(6): 400-406.
- [4] Zhou L M, Tian Y H, Roy S B. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2012: 539-543.
- [5] 刘磊, 高晓清, 陈伯龙, 等. 大规模风电场建成后对风能资源影响的研究. *高原气象*, 2012, 31(4): 1139-1144.
- [5] Liu L, Gao X Q, Chen B L, et al. Preliminary estimates of wind energy resources deficit in large wind farm. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(4): 1139-1144.
- [6] Frandsen S T, Jorgensen H E, Barthelmie R, et al. The making of a second generation wind farm efficiency model complex. *Wind Energy*, 2009, 12: 445-458.
- [7] Fiedler B H, Bukovsky M S. The effect of a giant wind farm on precipitation in a regional climate model. *Environmental Research Letters*, 2011, 6: 1-6.
- [8] Armstrong A, Burton R R, Lee S E, et al. Ground-level climate at a peatland wind farm in Scotland is affected by wind turbine operation. *Environmental Research Letters*, 2016, 11 (4): 044024.
- [9] Roy S B, Traiteur J J. Impacts of wind farms on surface air temperature. *PNAS*, 2010, 107 (42): 17899-17904.

测风塔风速插补对风功率密度误差的影响分析

孙朋杰¹ 王彬滨² 陈正洪¹ 张雪婷¹ 许杨¹ 孟丹¹

(1 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 2 中国电力建设集团四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610016)

摘要: 在风资源评估过程中, 针对缺测风速, 一般采用数理统计方法(比值法、线性回归等)进行插补, 使之达到要求, 而与之对应的风功率密度, 目前未进行检验。为验证风速插补后对应的风功率精度, 选取湖北省内2座测风塔观测资料分别代表风速观测“大风年”(2013年)及“小风年”(2014年)状况, 利用线性回归方法及比值法, 将测风塔有观测数据的8月作为缺测时段进行插补, 结果发现: 风速实测值与推算值变化趋势一致且达到要求。而与风速对应的风功率密度, 1#测风塔实测值与推算值的平均绝对百分比误差(MAPE)超过150%, 相对均方根误差(rRMSE)超过90%, 平均偏差(MBE)在 $-15.5 \sim -10 \text{ W/m}^2$, 模拟值较实测值明显偏小, 2#测风塔风功率密度实测值与推算值的MAPE超过100%, rRMSE超过70%, MBE在 $1.9 \sim 6.3 \text{ W/m}^2$ 。因此, 在对风速缺测插补过程中, 会造成平均风速拟合误差较大, 而风功率密度差异较大的现象, 且在“大风年”插补风速对应的风功率密度较实测值偏小, “小风年”插补风速对应的风功率密度较实测值偏大。

关键词: 比值法, 线性回归, 风速, 风功率密度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.012

Analysis of the Influence of Wind Speed Interpolation on Wind Power Density Error from Wind Tower Data

Sun Pengjie¹, Wang Binbin², Chen Zhenghong¹, Zhang Xueting¹, Xu Yang¹, Meng Dan¹

(1 Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430205

2 Sichuan Electric Power Design Consulting Co., Ltd., Power Construction Corporation of China, Chengdu 610016)

Abstract: Wind assessments are conducted using mathematical statistics (ratio method, linear regression, etc.) that carry out interpolation corrections and test the effects to achieve the revised requirements. However, wind power density is not presently tested. Without wind density, the wind power assessment may impact the modelled relationships between windspeed and wind power. In order to verify the situation, we selected two wind towers within the Hubei Province, and used observation data of wind speed from a “high wind speed year” (2013) and a “low wind speed year” (2014). Data from missing periods was filled using interpolation, linear regression and ratio methods. The wind speed data from August was analyzed. The results showed that for the changes in wind speed trends, measured and calculated values were consistent with the interpolation correction. The measured wind power density and wind speed was in agreement with the calculated values. The mean absolute percentage error (MAPE) of the measured values from the tower 1 was greater than 150%; the relative root mean square error (rRMSE) was more than 90%; the average deviation (MBE) was $-15.5 \sim -10 \text{ W/m}^2$, indicating that the simulated value was smaller than the measured value. The MAPE, rRMSE and MBE of the measured values from the tower 2 were 100%, 70% and $1.9 \sim 6.3 \text{ W/m}^2$, respectively, indicating that the simulated value was larger than the measured value.

Keywords: ratio method, linear regression, wind speed, wind power density

0 引言

在对风电场风能资源评价过程中, 依据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)^[1]规定, 要求测风塔整理出至少连续一年完整的风场逐小时测

风数据才能进行风能资源评估(有效数据完整率应达到90%以上)。由于测风塔本身仪器故障, 或是由于测风塔倒塔、覆冰等现象, 会造成观测数据缺失。特别是在冬季的南方内陆地区, 由于复杂山地微地形的影响, 测风塔覆冰现象较为严重, 测风塔风杯和测风仪由于冰冻无法正常运转, 造成观测数据缺失几天甚至十几天的事件经常发生。因此, 对缺失的测风数据必须经过插补才能满足国家标准。

利用附近测风塔或气象站的测风数据, 通过线性回归、比值法等方法对测风塔缺测数据进行插补是目

收稿日期: 2018年6月4日; 修回日期: 2018年12月27日
第一作者: 孙朋杰(1985—), Email: pjws@163.com
通信作者: 陈正洪(1964—), Email: chenzh64@126.com
资助信息: 湖北省气象局科技发展基金(QY-Y-201403);
湖北省气象科技发展基金(2016Q11)

前普遍采用的方法^[2-5]。运用这些方法,均能对缺测风速进行插补,经过验证,插补的平均风速拟合效果较好,但是涉及风功率密度的拟合效果评估方面的研究较少。

由于测风塔观测时间较短(大多只有一年甚至不足一年的观测),因为风的随机性,风速的年际变率非常大^[6],有“大风年”“小风年”“平均年”之分,湖北省已投产风电场运行结果显示:2013年为风速偏大年景,即“大风年”,2014年为“小风年”。因此,本文通过选取湖北省内2013、2014年2座测风塔风速观测资料,利用线性回归方法及比值法对风速进行模拟,进而对风速、风功率密度参数进行对比分析,对插补结果进行评估,寻找“大风年”“小风年”插补风速、对应风功率密度和实际值之间的关系,为风电企业在风电场评估、建设过程中的决策提供一定的参考。

1 资料与方法

1.1 测风塔资料概况

选取的2座测风塔分别位于湖北省大冶、随州两地,其中大冶的测风塔观测期主要在2013年,代表大风年风况,编号为1#测风塔。随州的测风塔观测期主要在2014年,代表小风年风况,编号为2#测风塔。同时,分别选取2座测风塔周边距离较近且与测风塔同期风速相关较好的测风塔作为缺失资料插补的参考塔,测风塔及参考塔详细信息见表1。

表1 选定的2座测风塔及参考塔信息

Table 1 The information for the selected two wind towers and the reference towers

风塔编号	所处区域	测风时段	仪器型号	塔高/m	海拔高度/m
1#	大冶	2013.01.01—2013.12.31	NRG	70	692
1#参考塔		2013.01.01—2013.12.31	NRG	80	677
2#	随州	2014.01.16—2015.01.15	NRG	70	381
2#参考塔		2014.01.16—2015.01.15	NRG	70	349

1.2 风功率密度计算方法

平均风功率密度是单位时间内气流通过与气流垂直的单位面积的风能。根据《风电场风能资源评估方法》平均风功率密度计算公式为:

$$\bar{W} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho_z V_i^3, \quad (1)$$

式中, \bar{W} 为设定时段的平均风功率密度 (W/m^2); n 为设定时段内的记录数; V_i 为第 i 记录风速 (m/s) 值, ρ 为空气密度。

1.3 缺测资料插补方法

1.3.1 数据质量控制

依据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)及《风电场气象观测及资料审核、订

正技术规范》(QX/T 74—2007)^[7],首先对测风塔的原始数据进行合理性检验,包括范围检验、相关性检验、变化趋势检验,具体检验指标见表2。对不符合合理性检验标准的可疑数据,在分析该时次前后风速的变化趋势后,对风速较其他各层变化明显偏大,并且剔除前后变化趋势明显不一致的数据;如果该时次前后各高度同步变化,应属于合理数据,予以保留;对风速长时间显示为静风,或风速风向长时间固定的数据,一律删除。

表2 测风塔资料合理性检验项目及参数一览表

Table 2 Wind tower data rationality test project and parameter list

项目类别	主要参数	指标范围
范围	平均风速/(m/s)	$0 \leq u < 40$
	风向/ $^\circ$	$0 \leq w < 360$
相关性	60 m/40 m高度小时平均风速差值/(m/s)	< 4
	60 m/10 m高度小时平均风速差值/(m/s)	< 8
	60 m/40 m高度风向差值/ $^\circ$	< 22.5
变化趋势	1 h平均风速变化/(m/s)	< 6
	1 h平均温度变化/ $^\circ C$	< 5
	3 h平均气压变化/kPa	< 1

1.3.2 相关系数

在对测风塔资料进行数据质量控制后,需要用邻近的测风塔或气象站对缺测和无效数据进行插补,计算观测塔各高度风速与参考站同期风速之间的相关系数,采用相关系数最高的参考站为最终参证塔(站)。

1.3.3 线性回归法

用 y_i 表示测风塔为 n 的风速缺测因变量, \hat{y}_i 为缺测风速的拟合值。用 x_i 表示 y_i 对应的参考塔风速值(自变量), y_i 与 x_i 之间的一元线性回归方程为:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

式中, a 为回归常数, b 为回归系数(即倾向值)。

1.3.4 比值法

认为相邻的测风塔,风速等要素的比值是稳定的,近于一个常数,可用比值稳定性来获取订正公式:

$$y_i = kx_i, \quad (3)$$

式中, k 为两序列平均值的比值。

1.3.5 误差检验方法

评估风速及风功率密度插补订正效果,采用下列指标作为效果指标:

1) 平均绝对百分比误差

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{ij} - x_i|}{x_i} \times 100\%。 \quad (4)$$

2) 相对均方根误差

$$rRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_i)^2 / x_i} \times 100\%。 \quad (5)$$

3) 平均偏差

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_{ij} - x_i] \quad (6)$$

2 插补结果比较

为了对风速及风功率密度的插补结果进行比较, 选取2座测风塔最高层风速(1#测风塔、2#测风塔70 m 高度)有观测数据的8月1—31日逐小时观测资料作为缺测值进行插补。

在进行插补之前, 首先分析了各测风塔与参考塔的同期风速观测资料相关性, 两测风塔最高层风速与参考塔风速相关系数见表3。从表中可以看到, 各测风塔与参考塔的同期风速相关系数均达到极显著水平, 故可以用参考塔进行插补, 运用线性回归法及比值法进行推算。

表3 两测风塔与对应参考塔的同期风速相关
Table 3 The correlation of wind speed between the two towers

风塔编号	风速观测高度/m	同期风速相关系数	显著性检验
1#	80	0.911	0.001
1#参考塔	70		
2#	70	0.887	0.001
2#参考塔	70		

利用1#测风塔2013年8月1—31日与2#测风塔2014年8月1—31日的实测值与推算值进行对比分析, 结果见图1、图2。

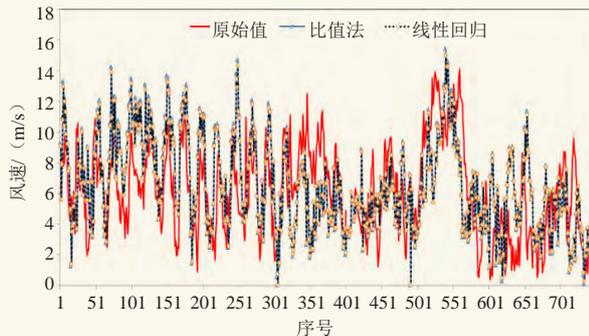


图1 1#测风塔2013年8月1—31日实测值与模拟值对比
Fig. 1 The comparison of measured and simulated values for wind tower #1 during 1—31 August 2013

可以看到, 逐时平均风速实测值与推算值变化趋势一致且大部分情况下风速值比较接近, 对比了风速模拟效果(表4), 无论是比值法还是线性回归法, 两种方法可以达到插补的要求。

进而对两测风塔插补风速与原始风速对应的风功率密度进行比较, 结果见表5。

从对比结果可以看到, 利用周边测风塔将目标测风塔缺测资料插补后, 尽管两者风速相关较好、误差较小, 但是推算风速对应风功率密度与实测值差异较

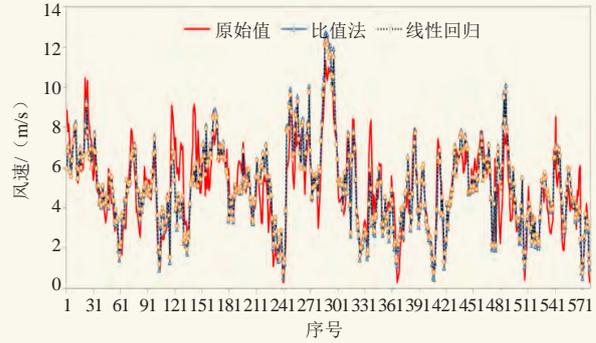


图2 2#测风塔2014年8月1—31日实测值与模拟值对比
Fig. 2 The comparison of measured and simulated values for wind tower #2 during 1—31 August 2014

表4 两测风塔风速模拟效果比较
Table 4 Comparison of wind speed simulation effects for the two towers

测风塔	插补方法	MAPE/%	rRMSE/%	MBE/(m/s)
1#测风塔	比值法	21.3	21.8	-0.08
	线性回归	21.2	21.9	-0.06
2#测风塔	比值法	21.3	22.0	0.08
	线性回归	22.6	21.5	0.11

表5 两测风塔模拟风速对应的风功率密度比较
Table 5 Comparison of wind power density corresponding to wind speed simulation effects for the two towers

测风塔	插补方法	MAPE/%	rRMSE/%	MBE/(W/m ²)
1#测风塔	比值法	160.2	92.7	-15.5
	线性回归	154.1	96.1	-10.4
2#测风塔	比值法	102.2	77.6	6.3
	线性回归	139.0	71.0	1.9

大。在“大风年”(2013年), 插补风功率密度较实测值偏小(1#测风塔), “小风年”(2014年), 插补风功率密度较实测值偏大(2#测风塔)。

对比两测风塔风速频率分布(图3、表6), 发现在“大风年”(2013年), 风速频率分布整体“偏右”, 即大风频率较大, 统计了1#测风塔在6 m/s以上的风速段频率占50.7%, 而在风速偏小年景(2014年), 小风频率占比较大, 2#测风塔在5 m/s以下的风速段频率占52.3%。

因此, 统计1#测风塔大风情况下、2#测风塔小风情况下推算风功率密度与实际风功率密度的差异。选定1#测风塔风速段在>6 m/s的风速段情况, 可以看到: 无论是用比值法还是线性回归法, 除个别值外, 拟合的风速对应的风功率密度大多数情况下明显小于实际风功率密度。而2#测风塔风速段在<5 m/s情况下的拟合风速对应的风功率密度较实测值明显偏大。

由此可知, 在运用比值法及线性回归法对缺测资料插补过程中, 会造成实际情况下的大风速拟合

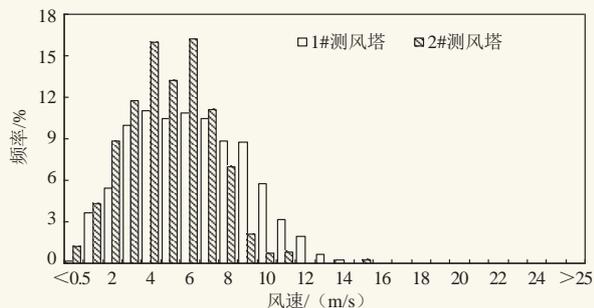


图3 两测风塔8月实测风速频率分布
Fig. 3 Wind speed frequency distribution in August for the two wind towers

表6 两测风塔8月实测风速段频率统计 (单位: %)
Table 6 The wind frequency statistics of the two wind towers in August (unit: %)

测风塔	≤5 m/s	5 m/s<风速<10 m/s	≥10 m/s
1#	38.0	51.4	10.6
2#	52.3	45.8	1.8

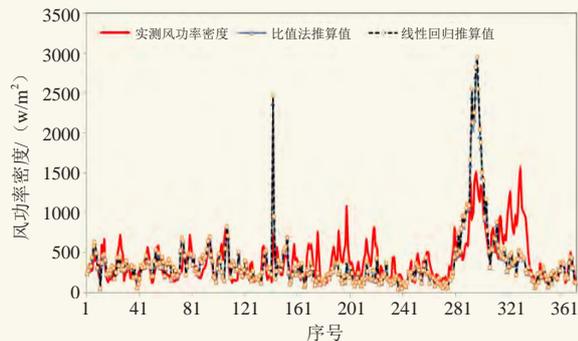


图4 1#测风塔大于6 m/s风速段实测与模拟风功率密度对比
Fig.4 Comparison of measured and simulated wind (> 6 m/s) power density for wind tower #1

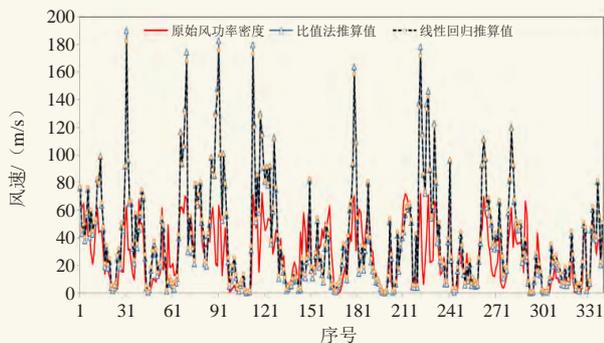


图5 2#测风塔小于5 m/s风速段实测与推算风功率密度对比
Fig.5 Comparison of measured and simulated wind (<5 m/s) power density for wind tower #2

偏小, 而小风速值拟合偏大的状况, 由于风功率密度与风速的三次方成正比, 上述情况下, 虽然平均风速拟合误差不大, 而风功率密度差异较大。在“大风年”, 大风频率较大, 会造成插补风速对应的风功率密度较实测值偏小, “小风年”小风频率较大, 插补

风速对应的风功率密度较实测值偏大。

3 结论与讨论

通过选取湖北省内2013、2014年2座测风塔观测资料分别代表“大风年”及“小风年”风速观测, 为了对风速及风功率密度的插补结果进行比较。选取2座测风塔最高层风速(两测风塔70 m高度)有观测数据的8月1—31日逐小时观测资料作为缺测, 利用线性回归方法及比值法进行插补, 结果显示:

1) 1#测风塔、2#测风塔与对应的参考塔同期风速相关系数分别为0.911、0.887, 均达到极显著水平, 可用参考塔资料对缺测值进行插补。

2) 无论是线性回归法还是比值法, 逐时平均风速实测值与推算值变化趋势一致且大部分情况下比较接近, 1#测风塔和2#测风塔的MAPE和rRMSE均在20%左右, MBE在-0.08~0.11 W/m², 达到插补的要求。

3) 1#测风塔风功率密度实测值与推算值的MAPE超过150%, rRMSE超过90%, MBE在-15.5~-10 W/m², 模拟值较实测值偏小, 2#测风塔风功率密度实测值与推算值的MAPE超过100%, rRMSE超过70%, MBE在1.9~6.3 W/m², 模拟值较实测值偏大; 1#测风塔在6 m/s以上的风速段范围内, 拟合风速明显小于风速实际值, 2#测风塔在5 m/s以下的风速段范围内, 拟合风速明显小于实际风速。

通过对插补的风速及对应的风功率密度进行对比分析, 发现通过比值法及线性回归法对风速进行插补后, 需要对插补的风功率密度进行进一步订正。发现在“大风年”, 大风频率较大, 会造成插补风速对应的风功率密度较实测值偏小, “小风年”小风频率较大, 插补风速对应的风功率密度较实测值偏大。本文仅选取了一个大风年和一个风年一个月进行了验证, 所得结论可能有一定的偶然性, 后期应收集多个大风年和小风年的不同样本来进一步论证所得结论。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 18710—2002风电场风能资源评估方法. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 张雪婷, 陈正洪, 许杨, 等. 复杂山地下测风塔缺测风数据插补订正方法的比较分析. 风能, 2015, 1: 82-86.
- [3] 程艳伟. 风电场风速订正方法的回归检验和误差分析. 内蒙古电力技术, 2016, 34(2): 39-42.
- [4] 翁笃鸣. 山区气候考察资料的订正方法和分析方法. 气象, 1985, 10: 39-43.
- [5] 甘启娣. 山区风电场测风数据订正分析. 云南水电技术, 2011(1): 55-59.
- [6] 许遐祯. 江苏省风能资源评估及开发利用的若干问题研究. 南京信息工程大学, 2011: 33-34.
- [7] 中国气象局. QX/T 74—2007风电场气象观测及资料审核、订正技术规范. 北京: 气象出版社, 2007.

两个新参数在云南山地风电场风能资源评估中的适用性分析

金燕 王学锋 范立张
(云南省气候中心, 昆明 650034)

摘要: 利用2011—2013年云南杨梅山风电场两个测风塔逐10 min风速资料, 计算了相当风速、有功风功率密度两个风能资源评估新参数, 并与平均风速、平均风功率密度进行对比分析, 结果表明相当风速较实测风速偏小, 风速频率分布较为集中, 能量指标更趋于实际; 有功风功率密度较平均风功率密度偏小, 其表示被风机直接利用风能密度的大小。综合分析表明, 两个新参数在云南山地风电场风能资源评估中具有较好的应用价值。

关键词: 相当风速, 有功风功率密度, 山地风电场, 云南

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.013

Applicability Analysis of Two New Concepts for Wind Energy Assessment of Wind Farms in the Yunnan Mountainous Region

Jin Yan, Wang Xuefeng, Fan Lizhang
(Yunnan Climate Center, Kunming 650034)

Abstract: Using 10-minute wind speed data from two wind towers located at the Yangmei Mountain wind farms in Yunnan from 2011 to 2013, we calculated two new parameters for wind energy resource assessment: equivalent wind speed and available wind power density. These parameters were put forward by Yang Zhen-bin. The two new parameters were compared to the average wind speed and the average wind power density respectively. The results showed that the equivalent wind speed was smaller than the average wind speed. The wind speed frequency distribution was relatively concentrated and its energy index tended to the fact. The available wind power density was relatively smaller than the average wind power density used by a wind turbine. Our analysis showed that the two new parameters have application value in the Yunnan wind farm for wind energy resource assessments.

Keywords: equivalent wind speed, available wind power density, wind farm in mountainous region, Yunnan Province

0 引言

风能资源评估主要包括点评估和区域评估, 前者是指利用测风塔(站)观测数据, 采用数理统计方法对风能资源各项参数进行直接计算评估; 后者针对区域, 主要依赖大气数值模拟技术, 即基于大气动力学和热力学基本原理来描述近地层大气的运动过程以及地形、地貌对大气运动的影响^[1]。

随着风能资源开发利用的快速推进, 区域风能资源评估技术得到了迅速发展^[2-4], 风电场风能资源数值

模拟技术由一些商业软件提供技术支持^[5-6]。而在风电场工程的风能资源评估中, 基础参数的选择主要还是依据国家标准^[7], 其对风能资源的能量指标评判主要参数是实测风速和风功率密度。杨振斌等^[8]考虑到空气密度、风速频率分布是影响风能大小的两个重要因子, 提出了相当风速、有功风功率密度两个新参数, 旨在为准确进行风能资源评价提供更恰当的评价指标, 并进行了试验性分析。

由于云南风电场位于山地^[9], 风能资源分布极为复杂, 一些新技术和新方法在投入应用时, 相关工程技术人员进行了一些探索, 例如在风电场选址方法^[10]、针对区域风能资源模拟^[11]、对山地风电场风能资源模拟软件的验证^[12]等, 都做了一些工作。但对于基础参数, 相当风速和有功风功率密度两个新参数是

收稿日期: 2018年7月26日; 修回日期: 2019年1月7日
第一作者: 金燕(1978—), Email: apple_jjy25@163.com
通信作者: 王学锋(1962—), Email: wxf_yncc@126.com
资助信息: 中国气象局关键技术集成与应用项目
(CMAGJ2014M43)

否适用，需要进行探索和试验研究。因此，以云南山地风电场测风塔观测数据为基础，对两个新参数与实测风速和功率密度进行对比分析，以探索其在山地风电场中的适用性，为山地风电场资源评价提供更有意义的参考依据。

1 资料及方法

1.1 资料

本文选取位于云南东部典型山地、丘陵地带的杨梅山风电场两个观测年限较长、资料相对完整的测风塔风速观测资料作为基础研究数据，测风塔基本情况见表1。

表1 测风塔基本情况

Table 1 Basic information about the wind towers

测风塔	海拔/m	经度	纬度	观测时段
1#	2292	103°50'E	25°5'N	2010.09.01—2014.06.30
2#	2241	103°49'E	25°5'N	2010.08.08—2014.07.09

观测设备采用NRG系统，观测参数及取样情况见表2，由于风机轮毂高度距离地面均在60 m以上，本文选取65 m高度逐10 min平均风速作为风速的基础数据。

表2 研究数据基本情况

Table 2 Basic information about the research data

测风塔	风速		气温 观测层/m	气压 观测层/m	观测时间 间隔/min	取样时段
	观测层/m	取样层/m				
1#	65\55\40\25\10	65	10	7	10	2011.01.01
						2013.12.31
2#	65\55\40\25\10	65	10	7	10	2011.01.01
						2013.12.31

针对风速、气温和气压资料的完整性检验、关系检验及缺测数据的处理，根据文献[13]的数据检验和数据插补相关要求。

1.2 计算方法

根据杨振斌等^[8]提出的既兼顾空气密度又考虑风速频率分布的风能资源丰歉的直观判断参数相当风速和有功功率密度的计算公式，对2011年1月1日—2013年12月31日间的两个风速仪所记录的逐10 min平均风速，计算相当风速 \bar{V}_e 和有功功率密度 \bar{W}_e ，计算公式分别为：

$$\bar{V}_e = \left(\frac{\frac{1}{2n} \rho \sum_{i=1}^n V_i^3}{0.955 \times 1.225} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

式中， $V_i(i=1, \dots, n)$ 为实测风速，就本文而言，即风速仪所记录的逐10 min平均风速。

$$\bar{W}_e = \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{2} \rho v^3 p(v) dv, \quad (2)$$

式中， v_1 为启动风速； v_2 为切出风速； $p(v)$ 为风速概率分布密度函数，不同型号风机都具有各自的“启动风速”，“切出风速”（切出风速指风力发电机组并网发电的最大风速，超过此风速机组将切出电网，就是风机会停机，停止发电），只有处于这两个风速区间的能量才能被风机部分地转换为电能，所以常常将“启动风速”和“切出风速”之间的风速称为“有效风速”。为不失一般性，本文“启动风速”和“切出风速”分别取3.5和25.4 m/s。

两个公式计算中所涉及的平均空气密度 $\bar{\rho}$ 通过公式 $\rho = \frac{P}{RT}$ 推算。

2 平均风速与相当风速的对比分析

2.1 风速年变化

图1给出了1#和2#测风塔65 m高度实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 年变化，从逐日的实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 来看，两个序列的相关系数均在0.999以上，通过了0.01的显著性检验。由图可知，两个测风塔65 m高度风速和相当风速在一年中的变化趋势一致，1—5月较大，7—9月较小，均呈现出明显的冬春季大、夏秋季小的全年两季风特征，这与云南其他山地风电场风速年变化特征一致。

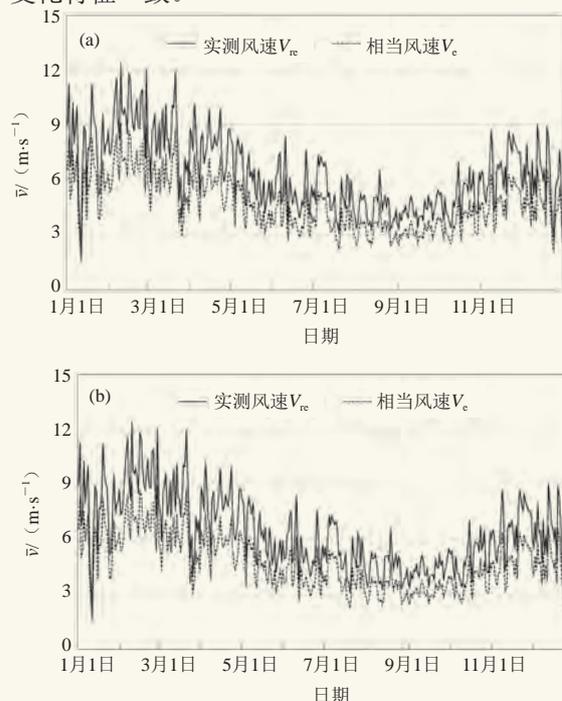


图1 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 年变化
Fig. 1 The annual change of V_{re} and V_e about tower No.1 (a) and No. 2 (b)

进一步分析两个观测点年均逐日实测风速与相当风速之间的差值变化。从图2可知两者之间的差值在年内呈现冬春季偏大，夏秋季偏小的特征，与风速的年变化规律一致。

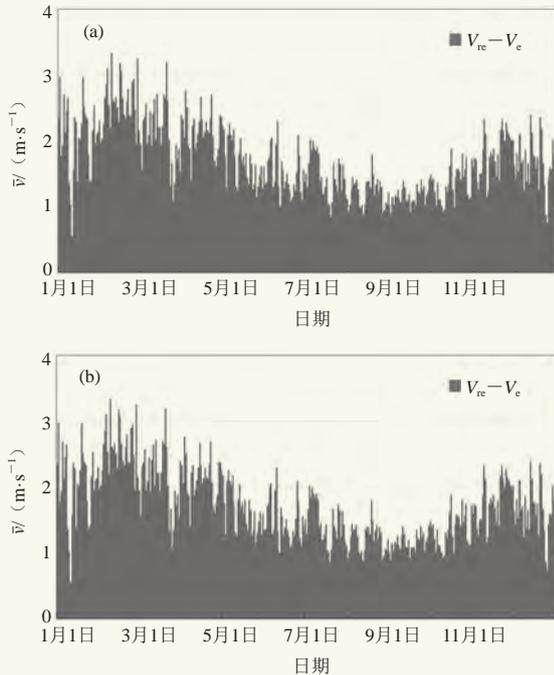


图2 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 差值年变化
Fig.2 Annual changes in the differences in V_{re} and V_e from towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

云南山地风场的海拔一般均在2000 m以上，年平均气温不高于12 °C，根据平均空气密度公式推算得出两个测风塔空气密度大致在0.90附近，由此分析也可以印证相当风速小于实测风速。

从表3可以看出，1#和2#测风塔在观测时段内年平均实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 差值分别为1.7和1.9 $m \cdot s^{-1}$ ，两个变量间的差值季节性变化较为一致，即在夏秋季差值较小，一般小于2.0 $m \cdot s^{-1}$ ，在冬春季差值偏大，一般大于2.0 $m \cdot s^{-1}$ 。

表3 1#测风塔和2#测风塔实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 差值季节变化 (单位: $m \cdot s^{-1}$)
Table 3 Seasonal variation in the differences between V_{re} and V_e for towers No. 1 (a) and No. 2 (b) (unit: $m \cdot s^{-1}$)

测风塔	春季 (3—5月)	夏季 (6—8月)	秋季 (9—11月)	冬季 (12月一次年2月)
1#测风塔	2.0	1.4	1.4	2.1
2#测风塔	2.2	1.6	1.7	2.1

由于相当风速是从能量的角度出发来阐述风速对风能大小影响的一个量纲的参量，在某种意义上已

经摒弃了不做功的小风速和大风速，在年变化上相对平稳。平均风速在大风季偏大，小风季偏小，所以导致两者的差值在年变化中呈现与平均风速相同的变化趋势。

同时，考虑到相当风速是将某一平均风速系列，折算到标准大气下，服从瑞利分布的且具有相同能量的量纲参量，这样就使得在不同下垫面、不同海拔条件下风电场风能资源的比较成为了可能，这才是在风能资源评估中运用相当风速概念的真正价值所在。

2.2 风速频率

图3为两个观测点平均风速 V_{re} 与相当风速 V_e 的风速频率分布。由图可见实测风速较相当风速更趋向于正态分布，相当风速的风频在小风速段所占比例较高，同时大风速段所占比例减小。结合相当风速推导公式来看，相当风速是折算为标准大气压下的实际用来做功的那部分风速，同时还考虑了空气密度这一物理量。由于山地风电场多数建在山地高处，空气受到地形的抬升与挤压作用，在山脊处的风速明显高于山脚处，同时考虑空气密度随海拔的直减率，在山地高海拔地区空气密度明显低于平原。如果仅用实测风速

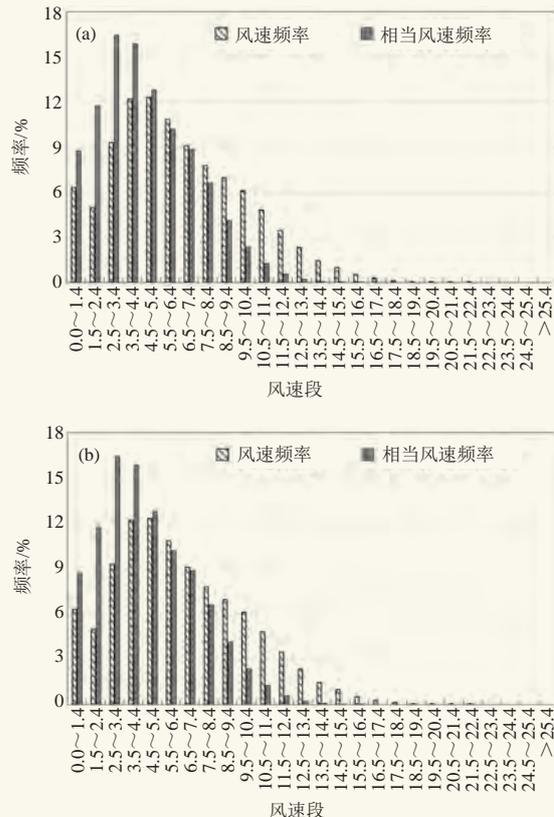


图3 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 风速频率分布
Fig. 3 The wind speed frequency distribution of V_{re} and V_e from towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

来衡量做功的大小，则与实际做功之间势必会存在较大偏差，而选用相当风速来代替实测风速对山地风电场进行资源评估，则能避免这一偏差的出现，能量指标更趋于实际，也更直观。这也从侧面印证了相当风速与平均风速的差值存在大风季大，小风季小的变化特征。

3 平均风功率密度与有功风功率密度对比

图4为两个观测点平均风功率密度与有功风功率密度的年均逐日分布图，从逐日的平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 来看，两个序列的相关系数均在0.999以上，通过了0.01的显著性检验。由图可知平均风功率密度与有功风功率密度全年的变化规律较为一致，即12月一次年4月风功率密度偏大，6—10月风功率密度偏小。

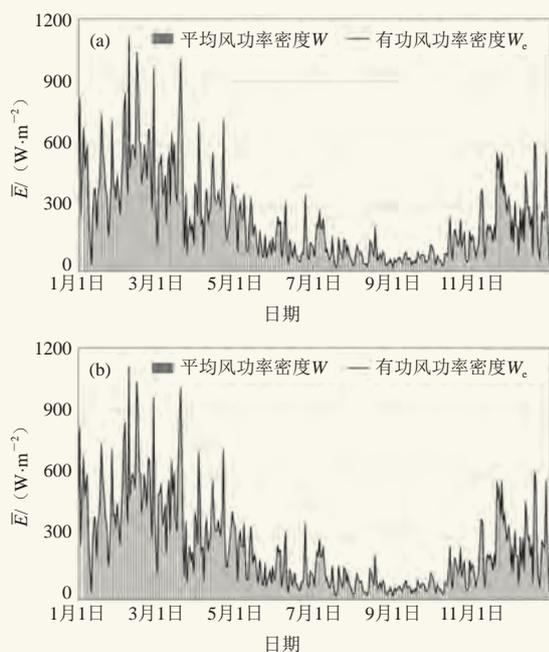


图4 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 年变化
Fig. 4 Annual changes in W and W_e from towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

从两者的差值变化来看（图5），两个观测点的有功风功率密度较平均风功率密度偏小，全年中，冬春季两者的差值偏小，夏秋季差值偏大，与风速差值的年变化规律刚好相反。从公式来看，平均风功率密度为平均风速在整个统计时段内所做的贡献，而有功风功率密度是有效风速在整个统计时段内所做的贡献，所以有功风功率密度较平均风功率密度偏小。从两者的差值来看，由于云南在冬春季风速偏大，风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就

大，所以两者的差值偏小；而在夏秋季风速普遍偏小，风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就小，所以两者的差值偏大。

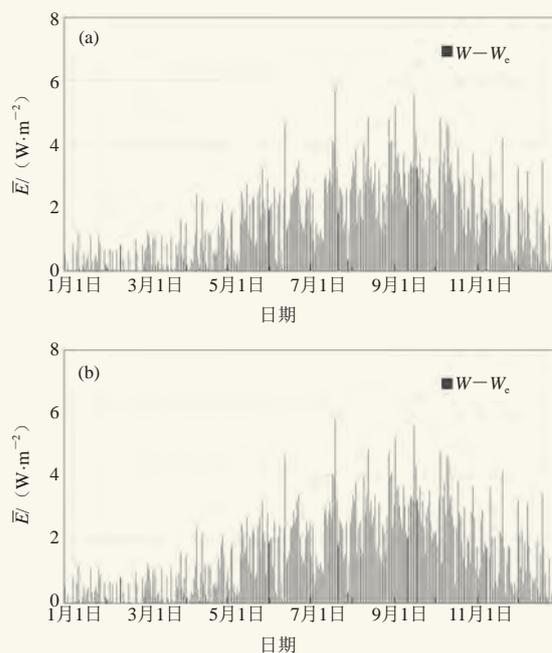


图5 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 差值年变化
Fig. 5 Annual change in the difference of W and W_e from tower No. 1 (a) and No. 2 (b)

从表4可以看出，1#和2#测风塔在观测时段内年平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 分别为1.6和1.2 $W \cdot m^{-2}$ ，两个变量间的差值季节性变化较为一致，即在夏秋季差值偏大，一般在2.0~3.0 $W \cdot m^{-2}$ ，在冬春季差值偏小，一般小于1.0 $W \cdot m^{-2}$ 。

表4 1#测风塔和2#测风塔实平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 差值季节变化（单位： $W \cdot m^{-2}$ ）
Table 4 The seasonal variation in the difference of W and W_e for towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

测风塔	春季 (3—5月)	夏季 (6—8月)	秋季 (9—11月)	冬季 (12月—次年2月)
1#测风塔	1.0	2.3	2.4	0.6
2#测风塔	0.8	1.8	1.6	0.6

4 结论

1) 风速和相当风速的年内变化一致，即冬春季大，夏秋季小；相当风速较实测风速偏小，两者之间的差值在年内变化与风速变化规律也基本一致，即在夏秋季差值较小，一般小于2.0 $m \cdot s^{-1}$ ，在冬春季差值偏大，一般大于2.0 $m \cdot s^{-1}$ 。

2) 从风速频率分布来看，相当风速分布更为集中，摒弃了实测风速对风能不实际做功的部分，让能

量指标更趋于实际,也更客观准确。

3) 平均风功率密度与有功风功率密度的年内变化一致,即冬春季大,夏秋季小;有功风功率密度较平均风功率密度偏小,两者之间的差值在全年中呈现冬春季偏小,夏秋季偏大的特征,即夏秋季差值一般在 $2.0\sim 3.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,冬春季差值一般小于 $1.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,这主要由于云南在冬春季风速偏大,风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就大,所以两者的差值偏小;而在夏秋季风速普遍偏小,风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就小,所以两者的差值偏大。

4) 综合分析表明,对于云南山地风电场而言,相当风速和有功风功率密度对于风能资源的表征较实测风速和风功率密度更接近资源的实际,使得在不同下垫面、不同海拔条件下风电场的风能资源的简单比较成为了可能,作为一种资源评价指标加以应用是有实际意义的。

参考文献

- [1] 宋丽莉,周荣卫,杨振斌,等.风能资源开发利用的气象技术应用和发展.中国科学,2012,14(9):96-101.
- [2] 杨振斌,薛析,桑建国.复杂地形风能资源评估研究初探.太阳能学报,2004,25(6):744-749.
- [3] 李泽椿,朱蓉,何晓凤.风能资源评估技术方法研究.气象学报,2007,65(5):708-717.
- [4] 龚强,袁国恩,张云秋,等.MM5模式在风能资源普查中的应用试验.资源科学,2006,28(1):145-150.
- [5] 冯长青,杜燕军,包紫光,等.风能资源评估软件WAsP和WT的适用性.中国电力,2010,43(1):61-65.
- [6] 韩春福,南明君.基于WAsP的风电场风能资源评估的应用及分析.能源工程,2009(4):26-30.
- [7] 施鹏飞,朱瑞兆,姜慧英,等.风电场风能资源评估方法,GB/T 18710-2001.北京:中国气象出版社.
- [8] 杨振斌,朱瑞兆,薛析.风电场风能资源评价两个新参数.太阳能学报,2007,28(3):248-251.
- [9] 朱勇,王学锋,范立张,等.云南风能资源及其开发利用.北京:气象出版社,2013.
- [10] 洪祖兰.云南山区风电场选址的方法问题.云南水力发电,2007,23(3):8-12.
- [11] 杨晓鹏,杨鹏武.基于数值模拟的云南风能资源分布研究.云南大学学报:自然科学版,2012,34(6):684-688.
- [12] 王学锋,杨鹏武,朱勇.基于WAsP模拟云南复杂地形风电场的风能资源.云南气象,2014,34(2):64-67.
- [13] 王学锋,范立张,朱勇,等.风电场风能资源测量数据处理及评估技术规范:DB53/T470-2013.昆明:云南省质量技术监督局,2013.

中关村高企协气象科技专业委员会正式运行

■ 岳婷

2019年4月9日,中关村高新技术企业协会气象科技专业委员会第一次全体委员大会暨2019第一季度工作会在北京召开。中国气象局原副局长许小峰,全国政协委员、科学传播专家朱定真,海淀区投促局副局长杜嘉宁,中关村高新技术企业协会常务副会长兼秘书长曹毅,中关村高新技术企业协会联合党委书记吴春明,以及专委会技术委员会委员、专委会全体成员代表等社会各界领导及嘉宾近50人出席会议。

在会议主题报告阶段,许小峰研究员围绕气象事业的需求与目标、进步与差距、机遇与空间展开演讲,从我国气象事业自身发展进步、与国际水平的比较两个维度,分析了我国气象事业发展的成就、差距和进一步发展的空间以及给企业发展带来的机遇。他指出,中国目前已成为世界气象中心,初步具备全球监测、全球预报、全球服务的业务能力,气象服务已逐渐融入经济社会各个领域,潜在机遇将越来越多、越来越广泛。专委会技术委员会主任朱定真就转型过程中气象经济面临的问题与对策进行深入剖析。朱定真委员指出,我国现阶段的气象事业发展较快,但气象产业发展还处于起步阶段,与发达国家相比差距较大,这一产业的潜在市场规模巨大,仍需所



图 许小峰研究员做主题报告

有气象人共同奋进,推动气象产业创新发展。

会议最后,由主任单位富景天策总经理张勇主持审议通过了气象专委会管理办法和专委会2019年工作计划。气象专委会将与《气象科技进展》深度合作,通过开辟专栏和专刊的方式,为社会化的气象科技企业提供一个交流的园地和窗口。

(作者单位:富景天策科技集团)

光伏电站建设运行对气候环境的能量影响

李芬¹ 杨勇¹ 赵晋斌¹ 陈正洪² 高晓清³ 申彦波⁴

(1 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2 湖北省气象服务中心, 武汉 430205;
3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000;
4 中国气象局风能太阳能资源中心, 北京 100081)

摘要: 大规模太阳能资源开发对于缓解能源和环境危机、应对全球气候变化具有重要的意义。目前全球光伏发电进入大规模、高速发展阶段, 对国内外大规模光伏电站气候环境影响相关工作进行总结, 并主要讨论了光伏电站相关能量回收与碳排放的现状与发展趋势、光伏电站近地辐射效应及热效应、局部气候效应及整体气候效应研究的相关问题。结论表明: 光伏电站对碳排放与地表能量收支平衡有一定的影响, 对相关地区地表辐射水平、温度状况具有调节作用, 对荒漠地区的生态环境具有潜在的正面促进作用。当前国内相关研究不具备系统性, 相关工作仍然需要进一步深入探索。

关键词: 光伏电站, 气候影响, 碳排放, 生态环境

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.014

Review on Energy Impact of Photovoltaic Power Station Construction and Operation on Climate and Environment

Li Fen¹, Yang Yong¹, Zhao Jinbin¹, Chen Zhenghong², Gao Xiaoqing³, Shen Yanbo⁴

(1 School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090; 2 Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430205; 3 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 4 Center for Wind and Solar Energy Resource Assessment, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Photovoltaic power plants are effective in reducing carbon emissions and alleviating global warming. Global photovoltaic power plants have been entering into a large-scale and high-speed period. So the climate-related and environmental impacts caused by photovoltaic power plants should be given more attentions. This paper summarizes the related work on climate and environmental impacts of photovoltaic power plants in China and abroad. Specifically, we discuss the current situation and development trend of energy recovery and carbon emissions related to large-scale photovoltaic power plants, near-earth radiation effects and thermal effects of large-scale photovoltaic power plants, local climate effects, and overall climate effects. The results show that photovoltaic power plants have certain effects on carbon emissions and balance of surface energy budget. They can be used to regulate the surface radiation level and temperature in relevant areas. Potentially, they have positive effects on the ecological environment in desert areas. Currently, relevant researches in China are not systematic, and relevant work still needs further exploration.

Keywords: photovoltaic power plant, climate impact, carbon emissions, ecological environment

0 引言

能源是经济与社会可持续发展的基础, 是人类生产与生活不可缺少的动力保障^[1]。随着能源安全、生态环境、气候变化等问题日益突出, 加快发展新能源已经成为国际社会推动能源转型发展、应对全球气候

变化的普遍共识和一致行动^[2-4]。根据国家能源局公布的数据, 2017年我国光伏新增装机5306万 kW, 其中, 光伏电站3362万 kW, 同比增加11%; 分布式光伏1944万 kW, 同比增长3.7倍。全国累计光伏装机达到1.3亿 kW, 提前完成“十三五”目标, 其中, 光伏电站10059万 kW, 分布式光伏2966万 kW。近年来, 我国每年新增光伏装机容量均超过风电, 累计装机容量未来几年会超过风电装机容量。在当前发展形势下, 大规模光伏电站开发利用可能造成的生态与气候环境影响, 应当引起更加广泛的关注。

收稿日期: 2018年8月9日; 修回日期: 2019年1月10日
第一作者: 李芬(1984—), Email: beckyhust@163.com
资助信息: 国家重点研发计划(2018YFB1502802); 上海市高校教师培养资助计划(CXYsdl18012)

国外关于大规模电站的相关研究已经从光伏电站建设、运行中的能量控制与循环拓展到光伏电站对所在地水土、植被、生物群落、气候等的影响。其中,大部分研究集中在光伏电站建设运行中的能量循环与回收以及碳排放领域,部分研究考虑了光伏电站建成运行中的有害物质排放、土地使用、水资源需求、生物群落的影响、太阳辐射作用、地表能量改变及地-气系统的辐射收支影响等。

国内对于大规模光伏电站的研究主要集中在电力工业相关方向,关注高效光伏电池技术、高效逆变器技术、并网与高效运行控制技术、光伏出力不确定性对电力系统稳定性的影响、电能质量及电能消纳等相关问题,目前还没有大规模光伏电站气候生态环境影响的系统性研究。近几年,清华大学、兰州大学、中科院等高校院所开始对大规模光伏电站的局地环境效益进行研究,采用结合现场观测和理论建模等手段,分析了我国部分地区光伏电站对局部环境的作用^[5-8]。

虽然大规模光伏电站相关的气候环境问题尚未凸显,但对大规模光伏电站发展与环境之间的影响机理进行透彻研究,有助于科学合理地应对全球气候变化,推动能源转型的平稳开展,实现我国能源的可持续发展。本文从能量流动及其对相关环境因素影响角度出发,对大规模光伏电站的气候环境影响及研究现状进行整理总结,从其碳排放、能量回收、近地面辐射及热效应、局部及整体的气候作用展开讨论,希望能够对下一步研究探索有所帮助。

1 光伏电站对气候环境的影响因素

1.1 光伏电站对气候环境影响方式分类

光伏电站对气候影响方式是多样的。光伏电站生命周期的不同阶段对气候环境的影响方式不同。从光伏电站的基础建设到前期准备与建设过程中,光伏组件的制备是整个制造环节的基础,也是高耗能与高污染部分。光伏组件的制备过程中,需要使用大量的化学工艺,光伏电站建设过程中其他配套设备的制造、基础设置建设、施工设备的使用等,这类影响与其他工业过程对能耗需求与对环境的影响类似。

大规模光伏电站的运行过程中,通过光伏效应进行发电。到达光伏组件表面的太阳辐射,一部分参与到光伏效应中,一部分被光伏组件本身吸收为内能,剩下一部分被反射至大气中。同时,光伏组件的存在阻碍了大地向上的长波辐射及大气向下长波辐射的路径。这一阶段的光伏电站基本不会对环境造成污染影响,但是改变了地表原有的能量平衡方式,大规模、大面积的光伏电站对局部气候及全球气候可能会造成一定的影响。

光伏电站对气候环境的影响方式主要分为建设前与建设后。光伏电站建设前,其对环境的影响与其他工业制造过程类似;光伏电站建成投产后通过吸收辐射能量进行发电,这一过程改变了地表原有的辐射系统结构,改变地表能量流动方式,借此影响地表其他环境要素。

1.2 光伏电站建设工业制造过程中对环境的影响

光伏电站建设前期的工业制造过程中,最主要的高耗能部分为光伏组件的制备。其过程耗能较高、污染相对较重,光伏电站生命周期内对环境的负面影响程度最高。光伏电站生命周期中的负面影响,大都通过光伏组件的制备过程体现。

光伏电站建设及投产后的工业过程中,可通过多种方式对地表环境产生影响。光伏电站建成后,大面积的光伏组件阵列对地面形成遮蔽,改变了原有的地貌结构可能会对当地植被及生物群落带来影响^[8]。大规模光伏电站建设运行过程中对植被及生物群落的影响问题很难量化分析。并且复杂的相互影响也为量化分析理论的建立造成困难。国外对大规模光伏电站植被影响及生物群落影响环境问题的关注与研究很早就开展^[12]。我国目前此方向研究较少。另外,受政策法规的影响,我国相关问题的现状与国外可能有所差别。我国国家林业局发布第50号令,宣布《在国家级自然保护区修筑设置审批管理暂行办法》(以下简称《办法》)。《办法》第三条明确表示:禁止在国家级自然保护区修筑光伏发电、风力发电、火力发电等项目的设施。

1.3 光伏系统近地能量影响机理

光伏电站通过光伏效应进行发电。到达光伏组件表面的太阳辐射,一部分参与到光伏效应中,一部分被光伏组件本身吸收为内能,剩下一部分被反射至大气中。同时,光伏组件的存在阻碍了大地向上的长波辐射及大气向下长波辐射的路径。这一阶段的光伏电站基本不会对环境造成污染影响,但是改变了地表原有的能量平衡方式,大规模、大面积的光伏电站对局部气候及全球气候可能会造成一定的影响。

大规模光伏电站对气候的影响,最开始都应该是从光伏电站本身性质考虑。光伏电站的特点可以概括如下:

- 1) 光伏组件在其下垫面上形成遮蔽,阻碍了部分下垫面的热量吸收;
- 2) 光伏组件本身厚度较低,比热容较小,但是光伏组件在发电时会有电流热效应及能量吸收、散发行为,在向上、向下两个方向均会辐射热量(长波);
- 3) 建设过程中光伏电站内植被被移除或遭到改变,改变了地面能量吸收及反射情况;

4) 光伏电站通过光伏组件的光伏效应发电, 吸收了部分太阳辐射(短波), 反射很小;

5) 光伏组件吸收或反射地表的长波辐射, 在夜晚削弱了地表的冷却过程。

图1为相关对象的影响关系。

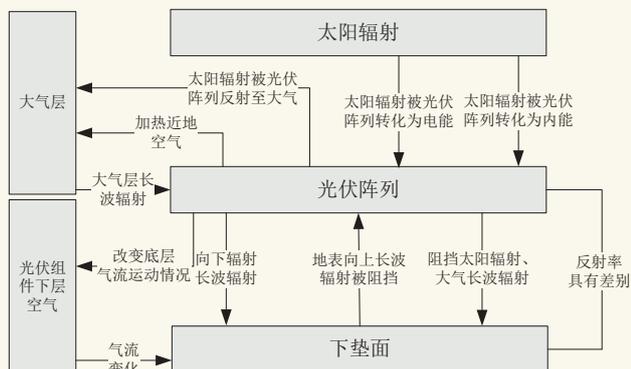


图1 光伏阵列对地表辐射环境的影响

Fig.1 The influence of photovoltaic array on the surface radiation

大规模光伏电站对气候环境的影响机理, 应当在上述五种作用下通过规模效应体现。

光伏电站本身观测数据很少对外公布, 并且由于数据采集持续时间、数据分辨率等限制, 对大规模光伏电站整体气候影响的研究主要集中在模型模拟计算。通过建立光伏电站的温场、辐射场等模型, 研究大规模光伏电站对近地表辐射、温度影响与大气层稳定影响。这类模型结论大多缺乏实际数据支撑, 往往误差较大。利用卫星遥感数据对气候变化进行大空间尺度分析研究不失为一种好方法, 风电场相关环境研究中已有部分学者采用这种方式^[13], 但是在光伏电站气候环境分析中, 目前在我国鲜有相关报道。

相对于全球气候的影响, 大规模光伏电站的局部气候影响研究较为常见^[5-8], 常见的局部气候研究手段主要是现场观测, 通过对光伏电站所在地实际温度、辐射、植被状况进行数据采集, 对比周边环境差异, 分析大规模光伏电站对局部地区的能量作用。也有对光伏电站周围植被、生物群落变化进行分析, 侧面反映光伏电站的存在对环境作用^[14-16]

2 碳排放与能量回收

2.1 光伏电站的碳排放相关研究方法

自从低碳经济概念提出以后, 国内外学术界纷纷展开相关研究, 在碳排放的测算方法研究中获得了不少研究成果。肖宏伟^[18]在总结国内相关研究后, 认为碳排放的测算方法可以划分为模型估算法和物料衡算法。模型估算法需要构建估算模型, 物料衡算法以质量守恒定律为基本原则, 对生产过程中使用的物料进

行定量分析。表1为相关方法分类及研究方式。

表1 碳排放测算方法分类及其研究方式

Table 1 Classification of carbon emission measurement methods and their research methods

划分类别	定义	研究方式
模型估算法	在宏观和微观层面上进行碳排放情景分析和政策模拟时, 通过构建数学模型进行研究	能源排放模型 ^[19] 能源系统模型 ^[20] 系统动力学模型 ^[21] 生命周期模型 ^[22] 投入产出模型 ^[23]
物料衡算法	以生产过程中的投入产出遵循质量守恒定律为基本原则, 对生产过程中所使用的物料进行定量分析	以详细技术分类 ^[24] 以详细燃料分类 ^[24]

光伏电站作为一个系统性工程, 其建设与运行过程中均会对环境产生相关影响。大部分针对光伏电站碳排放采用的研究方式为生命周期评估(Life Cycle Assessment (LCA) framework), Fthenakis^[25]在2011年对光伏发电中的LCA研究方法做了相对详细的总结。目前一些评价指标可用于光伏系统生命周期评估^[25], 见表2。

表2 光伏系统生命周期内部分评价指标

Table 2 Part of the metrics used in LCA of PV system

指标名称	描述
碳排放 (Greenhouse gases, GHG)	光伏发电系统整个生命周期中碳排放总量与其总发电量比值
累计能量需求 (Cumulated energy demand, CED)	光伏发电系统整个生命周期中需要的各类能量
酸化潜力 (Acidification potential, AP)	对土壤酸化的能力
臭氧层分解潜力 (Ozone depletion)	稀释、分解臭氧层的能力
生态毒性 (Ecotoxicity)	对生物圈的毒害能力
水资源与土地占用 (Land use and water use)	对土地的占用与水资源的使用情况
能量回收期 (Energy payback time, EPBT)	光伏发电系统发电量达到其生命周期中总耗能的年限
能源投入回报率 (Energy return on investment, EROI)	光伏发电系统生命时长与能量回收期的比值, 表示光伏发电系统生命周期内的经济效益
减排潜力 (Impact mitigation potentials, IMP)	减缓温室效应的潜力

在上述各种评价指标中, 常用的有GHG与EPBT。

$$GHG_{r-rate} = \frac{GHG_{e-total}}{E_{LCA-output}} = \frac{GHG_{PV} + GHG_{BOS}}{E_{LCA-output}}, \quad (1)$$

式中, GHG_{r-rate} 表示光伏发电系统每产生一单位电量时等价排放的碳量, 其单位为 $gCO_2-eq/(kW \cdot h)$; $GHG_{e-total}$ 表示光伏发电系统整个生命周期中碳排放总量, 其单位为 gCO_2-eq ; $E_{LCA-output}$ 是光伏发电系统生命周期中总发电量, 单位为 $kW \cdot h$ 。

$$EPBT = \frac{E_{input} + E_{BOS,E}}{E_{output}}, \quad (2)$$

式中, E_{input} 表示光伏组件生命周期中所需的所有能量, 包括光伏组件的制造、安装运行、维护、回收处理等所需要外部输入的全部能量, 单位为MJ。 $E_{BOS,E}$ 表示光伏发电系统中能量平衡设备 (Balance of

system, BOS) (指基础设施建设、电缆、逆变器、变压器、蓄电池等光伏组件外的其他设备) 需要的所有能量, 其单位为MJ。 E_{output} 表示光伏发电系统生命周期中年平均发电量, 单位为MJ。

2.2 光伏发电系统能量循环分析

当前较为常见的光伏组件原材料包括: 单晶硅(mono-Si)、多晶硅(multi-Si)、非晶硅(a-Si)、碲化镉薄膜(CdTe)、铜铟硒薄膜(CIS)等。目前已经有不少关于不同材料组成的光伏发电系统之间碳排放对比研究^[26-27]。

部分学者通过数据搜集与分析整理, 计算了基于mono-Si、multi-Si、a-Si、CdTe、CIS这5种不同组件的光伏发电系统的能量回收时间及碳排放指标^[27]。并推算出5种不同光伏组件组成的光伏发电系统生命周期中耗能需求, 发现CdTe的EPBT与GHG两个指标表现最优, 这是因为其有相对较低的能源需求与相对较高的光电转化效率。另外, 由于单晶硅生产过程中高能耗的特点, 使用单晶硅的光伏发电系统EPBT与GHG两个指标相对最差。Pacca等^[27]进行了多晶硅与非晶硅发电系统的比较研究, 利用密歇根大学33 kWp的屋顶光伏开展相关工作。研究发现, 多晶硅碳排放量为72.4 gCO₂-eq/(kW·h), 非晶硅碳排放量为34.3 gCO₂-eq/(kW·h)。但是其他学者采用了不同的测算标准, 获得的碳排放情况与Pacca等结论有较大出入^[28]。也有学者在研究光伏电站生命周期碳排放时考虑了经济问题, 比如国际贸易对光伏组件进口国与出口国带来的碳足迹的改变^[30]。

光伏电站整个生命周期中的能量回收时间, 是光伏电站大规模推广后应当着重考虑的问题, 整个生命周期中的经济效益决定了大规模光伏电站推广的可行性。考虑到光伏电站经济效益与国情有关, 各国研究具有较大差别^[31]。国内相关研究没有普及, 部分研究者进行了初步探讨, 主要集中的研究方向为不同安装方式下能量输出和生产流程各个阶段能量消耗的对比。不同研究结果见表3。

表3 国内部分学者关于光伏电站生命周期内能量回收研究结果
Table 3 Domestic research results of energy recovery in the life cycle of photovoltaic plants

研究对象	结论
北京地区1 kWp屋顶光伏 ^[32]	生命周期中总耗能为4339 (kW·h)/kWp, 能量回收期为3.14年
天津地区多个1 kWp建筑并网光伏系统 ^[33]	能量回收期为3~6年。全生命周期产能为消耗能源的4~8倍。建筑并网光伏系统与燃煤发电相比在能源耗竭和生态系统影响等方面具有较大优势。安装并网光伏系统能够满足70%的居民非采暖用电负荷
上海某1 MW并网光伏电站 ^[34]	分析了不同回收处理情形下的能量回收时间、温室气体排放量, 并进行了生命周期影响评价。发电的能量代价为1810.8 kJ/(kW·h), 碳排放水平为0.0984 kg/(kW·h)

2.3 光伏发电系统碳排放研究特点

不同研究机构关于碳排放及能量回收的研究得出的结论差异显著, 产生这一现象的原因有多种。首先, 针对光伏电站采用的LCA研究方法, 少有考虑环境代价。例如, 部分LCA研究结果显示^[35-38], 光伏电站生命周期中, 碳排放量为16~40 g CO₂/(kW·h), 但是这些数据没有考虑到光伏电站建设地环境变化带来的隐形碳排放量改变。特别是大规模光伏电站的建设, 对地表环境的改变作用非常显著, 因此, 在评价大规模光伏电站对环境的影响, 需要考虑地形特征以及地貌改变造成的隐形影响。在确定地形特点后, 再考虑土地利用情况、人体影响及人类生活环境影响、野生物种及其栖息地影响、水资源影响、气候及碳排放影响^[39]。文献[40]在5种影响分类基础上, 将大规模光伏电站的环境影响细分为32种, 通过对比传统能源形式, 分析这32种影响的正面性与负面性。最终得出结论, 所考虑的32种影响中, 22种影响相比于传统化石能源, 是大规模光伏电站的优势, 剩余的10项影响中, 4项为中性, 6项需要经过进一步研究评估才能得出结果。另外, 早期的研究方法最初都不是针对光伏发电系统提出的^[41], 光伏发电系统与其他耗能型系统具有本质的区别, 其生命周期中的能量消耗主要集中在制造和建设环节, 而其他耗能型系统, 则需通过某种方式获得持续的能量供给。因此, 针对光伏发电系统的LCA研究应当更加精确地界定系统型别及边界。为此, Zhou等^[41]引入了物理系统边界的时间扩展概念(Temporal expansion of the physical system boundaries), 来区分系统主要成分和次要成分。这能够用于准确、透明和一致地描述系统和边界条件, 且与以往研究方法的基本原则相一致。

光伏发电系统的建造及应用场地的差异, 也会引起碳排放及能量回收相关研究结论的差异。根据EPBF和GHG定义可以看出, 碳排放及能量回收不仅与光伏系统建造过程中消耗的能量及排放的温室气体有关, 还与实际投放场合有关。生产过程可以标准化控制, 但是建站地区太阳辐射资源总量及分布形式的差异, 也会不可避免地带来碳排放及能量回收相关结论的巨大差异。区分光伏电站生命周期中碳排放影响因子权重特点, 合理区分生命周期边界条件, 及时更新最新制造技术信息以及市场需求特点, 对光伏电站碳排放研究具有重要推进作用。

3 近地表辐射效应及热效应

3.1 荒漠地区内光伏电站的辐射效应及其附带影响

国内关于大规模光伏电站气候影响相关研究才刚刚起步, 少数学者依托大型光伏电站, 采集气象参

数,对光伏电站内外环境参数变化进行比对,分析大规模光伏电站对环境产生的影响。我国大规模光伏电站集中于中西部地区,相关的气候、环境研究也集中于中西部地区。主要的研究内容为大规模光伏电站对当地辐射、空气温湿度、地表温度、土壤温度、地表能量收支变化等影响。

高晓清等针对光伏电站在荒漠地区的气候影响进行了持续的研究,其主要研究地点是位于柴达木盆地南侧边缘地带的110 MWp光伏电站^[5]。高晓清等从辐射场、土壤温度、空气温湿度3个方面分析光伏电站对当地气候环境的影响^[5-7]。常蕊等^[8]也对光伏电站内辐射、气温等变化情况进行了研究,相关研究地点为龙羊峡水光互补电站I期,装机容量为320 MWp;常蕊等对实验地的太阳短波辐射、长波辐射、净辐射、2 m气温、光伏组件表面温度等进行了测量。中国科学院吴治永等^[15]对我国宁夏中卫市某聚光热发电电站(CSP)对土壤侵蚀和土壤温度等影响进行了定量研究。上述学者的研究均集中于我国中西部地区干旱或沙漠地区,研究结论有相似之处,但是也存在一些差别,分析如下。

光伏电站吸收了一部分短波辐射,自身向外辐射长波辐射的同时也对地表辐射特征产生影响。关于光伏电站对辐射场的影响,杨丽薇等^[5]研究认为光伏电站夜间有保温效应,白天有降温效应;光伏电站内外反照率差异明显;站内与站外辐射各分量年内变化特征明显,站内年均向上短波辐射明显低于站外;光伏电站是一个能量汇聚点,因光伏组件将部分辐射能转换为电能输出,导致站内地表温度低于站外。Chang等^[8]同样认为光伏组件表面短波辐射分量的变化使得光伏组件在一年中都起到了能量源的作用,并且光伏组件阵列表面温度的升高,使得其周围空气温度上升,可能产生光伏热岛效应。

光伏电站的运行使地表原有能量状态发生变化,同时,光伏组件的大面积铺设,对地表产生了遮蔽作用,也对地表的气流产生影响。综合作用造成了地表土壤温度的变化。关于光伏电站对荒漠地区土壤温度的影响,高晓晴等研究结果表明^[6],在土壤浅层(5~10 cm),光伏电站内外土壤温度日变化差异明显,5 cm层土壤温度日最大值相差9.7 °C。土壤浅层,土壤温度日较差站内明显低于站外,表明光伏装置具有绝热保温作用。夏季站内外各层土壤温差不明显;冬季,站外各层土壤温度均明显高于站内,光伏电站是冷源。常蕊等认为光伏电站地面的冷却作用与光伏组件阵列形成的阴影有关^[8]。但是吴治永等研究结论与高晓清等结果略有差异,吴治永等的研究结

果表明,电站内土壤温度相较于站外有0.5~4 °C的变化,冬季站内温度明显高于站外,夏季相反^[15]。吴治永等与高晓清等研究结论的差异可能是光伏电站类型差异造成的,因此,不同类型光伏电站的气候环境影响,可能需要在后续工作中展开研究。

关于空气温湿度影响,高晓清等结果显示:对2 m气温而言,冬季白天站内外基本相同;春、夏、秋季白天站内明显高于站外,夏季差异达最大,这与光伏组件发热、加热空气的效应大于光伏组件的遮阳冷却效应有关;而在夜间,站内2 m气温值均高于站外,这可能与光伏组件对近地面层的保温作用有关。而10 m气温,四季白天站内均低于站外,这主要是由于白天站内下垫面将部分接收的太阳辐射转换成电能输出,使得站内下垫面吸收及反射获得的能量低于站外所致;其秋、冬季相差较大,夏季相差最小,这可能因为夏季气温较高,光伏组件光电转化效率降低^[45],进而造成吸收太阳辐射较小的缘故。在年内变化中,站内2 m气温月均值均高于站外,而站内10 m气温月均值均低于站外。在10 m高度处,夜间站内相对湿度大于站外。

光伏电站的辐射与温湿度效应会带来气流影响。部分研究表明,当大气层处于中性层结构下,近地面层风速与高度呈现对数变化规律,近地层风速廓线与热力层有关^[42]。赵鹏宇等^[43]依托乌兰布和沙漠东北边缘的光伏电站,研究了沙漠地区光伏电站的气流影响。结果表明,由于光伏电站的存在以及其对地区温度影响,相关地域内风速较旷野处有明显变化。光伏阵列行道间、光伏组件前檐与后檐风速明显降低,光伏板前檐10~100 cm与200~250 cm高度处风速加强,光伏电站内10~20 cm与200~250 cm处风速变化缓慢,20~200 cm处风速变化剧烈。这一性质可以为荒漠地区防风固沙工作带来新思路^[44]。

综上所述,荒漠地区大规模光伏电站的存在,对当地的地表气候环境带来影响,改变地表的反照率与局部温度情况,并改变地表粗糙度状态,影响风速的变化。上述关于荒漠地区研究均基于实地测量与现场分析,能够反映特定地区光伏电站的环境影响情况,但是不具备推广到一般性结论的条件。光伏电站的电池组件直接减少了地表反照率,带来局部地表风速下降效果,造成最低温度与最高温度水平的显著变化,并且最低温度变化高于最高温度变化。这种不对称的温度冲击,可能会造成区域夜晚时段内垂直的空气对流,增加当地湿度,增加降水概率。降水带来了植被覆盖率的提高,进一步降低地表反照率,从而形成反照率—降水—植被这种正向循环结果。上述猜想需建

立基于动态植被变化的气候模型进行验证。

3.2 光伏电站区域热效应及总体气候影响

国内大规模光伏电站气候环境影响相关研究主要集中在我国西北地区，但当前分布式光伏电站已经大规模在我国中东部地区发展。光伏电站在人口密集地域的网渗透率不断提升，应当引起思考：大规模光伏电站是否会引起热岛效应？城市内光伏电站的建立是否会加剧城市热岛效应？目前我国还少有类似研究，但国外已有学者展开了相关工作，并获得了一些初步结论^[13]。

环境地形特点对光伏电站热岛效应的形成可能具有显著影响，城市、沙漠、草地等地域地形特点各异，相关影响可能差别较大。城市内土地资源宝贵，光伏电站存在形式主要为建筑光伏。Genchi 等^[49]研究东京地区屋顶光伏组件大面积铺设对城市热岛效应的影响，其对大面积屋顶光伏的城市热岛效应问题进行了数值模拟，计算结果表明大规模安装光伏组件阵列对城市冠层温度没有明显影响，且由于光伏组件阵列的遮阴效果，城市中楼房的制冷能耗可能会降低2%~10%左右。草地表面存在较为茂密的低矮植被，对光伏电站的热效应有一定抑制作用^[47]，地面安装的光伏阵列表面反射率与安装处地表草地的反射率相似。部分学者通过简单的模型计算进行了相关验证，同时也证明安装在草地上的光伏组件基本不会产生热岛效应^[47]。荒漠地区具有辐射强烈、降水少、湿度低等特点。针对荒漠地区环境，一些学者建立了大型光伏电站内气流扰动、能量循环的3D模型，评估大规模光伏电站潜在的热岛效应，并与北美洲某1 MWp光伏电站实测数据进行对比^[13]。结果表明在2.5 m高度，白天光伏电站气温比周围气温高出1.9 °C，温差在到达5~18 m的高度后消失。Fthenakis 等^[13]分析了光伏电站内18个月的数据，表明光伏电站在夜晚基本完全冷却，与热岛效应的特性有较大差别。

由目前的研究来看，大规模光伏电站的存在与热岛效应的形成并没有强正相关性。但大多的工作基于理论模型的分析研究，模型的可靠性、适应性等有待验证。不同条件、不同考虑方式下的研究可能会得到不同的结论。如果从能量平衡变换的角度进行光伏电站热场分析，建立了热量吸收发散模型，考虑了下垫面水汽、植被在热传导过程中的作用，可能会得出了与上述研究相反的结论。不同学者在不同情况下得出了相悖的结论，原因可能存在于评价环境与标准没有得到统一。大规模光伏电站能否产生热岛效应，与其能量流失与吸收的水平有直接关系。不同地域气候、

地形、环境各有差异，需要细致区分不同地域影响因素特点，结合实际特征分析讨论。

3.3 光伏电站辐射效应及其影响研究特点

光伏电站的整体气候影响，需要结合全球气候耦合模式进行讨论，但目前国内外相关研究并不多见。大规模光伏电站对全球气候的影响是一个多因素耦合作用。一些研究从不同角度进行了初步分析^[46]。计算发现，光伏电站大面积的建设所产生的地表反射辐射变化对地球温度的影响程度，远不及相应碳变化带来的影响。为了模拟大规模铺设降温型屋顶及安装光伏发电系统给区域气候带来的影响，一种完全耦合的数值天气预报模式（Weather research and forecasting）^[50]被用于研究地表反射率、地表温度、降水和云层覆盖之间的相互作用。美国国家大气研究中心胡爱学等^[51]采用气候系统模式CCSM4，通过修正地表反照率来模拟大规模光伏装机对可能的局地 and 全球气候影响，发现与对全球气候的平均作用相比，对局地降水的影响可能更大。

当前关于光伏电站在地表附近产生的辐射效应及热效应相关问题，并没有形成系统的理论。局部地区相关研究可采用对比测量、模型分析等手段，全球效应分析一般采用模型分析法。相关模型具有多变量高耦合的性质，提取关键影响因子、厘清影响机理及重点影响方式，应当是下一步工作的重心。

4 结论

目前，针对大规模电站建设带来的碳排放及能量回收问题已经有了较多的研究。通过对光伏产业链生命周期内不同方面的研究评价，绝大多数学者研究结论认为，大规模光伏电站具有经济效益，能够在一定时间内进行能量回收，并获得环境效益。目前相关研究仍存在需要完善之处，制造工艺及相关技术的进步，使得光伏产业链中上下游多处碳排放情况发生变化，需要重新确定产业链中不同环节的碳排放情况。另外，需要更加科学地划分光伏电站生命周期内的不同阶段，将可控阶段与不可控阶段区分，减小不同条件给研究带来的偏差。

国内关于大规模电站建成后的气候影响研究并没有得到足够的重视，当前的研究也仅仅局限于小范围。相比于国外，我国目前相关研究还较为落后，大部分研究集中于我国中西部地区光伏电站对局部地区的温湿度、辐射、植被等影响，研究手段局限于现场观测。对于大规模光伏电站的热岛效应作用以及可能存在的全球气候的影响，缺乏明确、精准的论证与解释。

大规模光伏电站对碳排放与地表能量收支平衡有一定的影响,对相关地区地表辐射水平、温度状况具有调节作用,对荒漠地区的生态环境具有潜在的正面促进作用。当前国内相关研究不具备系统性,相关工作仍然需要进一步深入探索。后续的研究中,需要寻找主要的影响因子、构建合理精确的理论模型;同时需要进一步展开实测研究,修正并验证模型。大规模光伏电站对气候环境的影响是个缓慢变化的过程,需要长期持续的观察研究。

参考文献

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 电气科学与工程学科发展战略研究报告(2006—2020年). 科学出版社, 2017.
- [3] 李泽椿,朱蓉,何晓凤,等. 风能资源评估技术方法研究. 气象学报, 2007, 65(5): 708-717.
- [4] 丁一汇,王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [5] 杨丽薇,高晓清,吕芳,等. 光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2160-2166.
- [6] 高晓清,杨丽薇,吕芳,等. 光伏电站对格尔木荒漠地区土壤温度的影响研究. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1439-1445.
- [7] 高晓清,杨丽薇,吕芳,等. 光伏电站对格尔木荒漠地区空气温湿度影响的观测研究. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2909-2915.
- [8] Chang R, Shen Y, Luo Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. Renewable Energy, 2018, 118: 131-137.
- [9] 杜慧,孙芳. 初步研究光伏电站运营期对植被的影响. 环境与发展, 2017, 29(8): 30-31.
- [10] 苑森朋,张振师,党廷辉,等. 毛乌素沙地光伏电站3种植物措施生长发育状况及其生态功能比较. 水土保持研究, 2018(2): 235-239.
- [11] 王涛,王得祥,郭廷栋,等. 光伏电站建设对土壤和植被的影响. 水土保持研究, 2016, 23(3): 90-94.
- [12] Fthenakis V, Blunden J, Green T, et al. Large photovoltaic power plants: wildlife impacts and benefits. Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, 2011: 2011-2016.
- [13] Fthenakis V, Yu Y. Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms. Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, 2014: 3362-3366.
- [14] 刘世增,常兆丰,朱淑娟,等. 沙漠戈壁光伏电站的生态学意义. 生态经济: 中文版, 2016, 32(2): 177-181.
- [15] Wu Z, Hou A, Chang C, et al. Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. Environ Sci Process Impacts, 2014, 16(10): 2432-2441.
- [16] 张焕平,张占峰,汪青春. 格尔木地区总辐射、反射辐射的变化特征. 南京信息工程大学学报, 2013, 5(5): 449-454.
- [17] 李丽珍,刘辉,史雪峰,等. 浅析光伏电站对环境的影响. 科技信息, 2012(12): 91.
- [18] 肖宏伟. 中国碳排放测算方法研究. 阅江学刊, 2013(5): 48-57.
- [19] 胡秀莲. 减排对策分析: AIM/能源排放模型. 中国能源, 1998(11): 17-22.
- [20] 陈文颖,吴宗鑫. 用MARKAL模型研究中国未来可持续能源发展战略. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(12): 103-106.
- [21] 秦钟,张佳恩,骆世明,等. 我国能源消费与CO₂排放的系统动力学预测. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 1043-1047.
- [22] 徐健,赵柳榕,王济干. 能源结构的Logistic模型及其预测. 安徽农业科学, 2008, 36(31): 13477-13478.
- [23] 刘兰翠. 我国二氧化碳减排问题的政策建模与实证研究. 中国科学技术大学, 2006.
- [24] Kruger D, Galbally I, Hiraishi T, et al. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. IPCC National Greenhouse Cost Inventories programme, Technical Support Unit, 2000.
- [25] Fthenakis V, Frischknecht R, Raugi M, et al. Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity Executive Summary. 2011.
- [26] Peng J, Lu L, Yang H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19(1): 255-274.
- [27] Pacca S, Sivaraman D, Keolelian G A. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. Energy Policy, 2007, 35(6): 3316-3326.
- [28] Stoppato A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. Energy, 2008, 33(2): 224-232.
- [29] Sumper A, Robledo-García M, Villafafila-Robles R, et al. Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(8): 3888-3896.
- [30] Yang D, Liu J, Yang J, et al. Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade. Journal of Cleaner Production, 2015, 94(1): 35-45.
- [31] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究. 太阳能, 2009, (1): 9-14.
- [32] 梁佳. 建筑并网光伏系统生命周期环境影响研究. 天津大学, 2012.
- [33] 李鹤,于随然. 中国光伏系统的生命周期评价. 环境工程, 2014, 32(10): 119-124.
- [34] 翁琳,陈剑波. 光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析. 上海理工大学学报, 2017, 39(3): 282-288.
- [35] Dones R, Frischknecht R. Life-cycle assessment of photovoltaic systems: results of Swiss studies on energy chains. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 1998, 6 (2): 117-125.
- [36] Fthenakis V M, Kim H C, Alsema E A, et al. emissions from photovoltaic life cycles. Environmental Science and Technology, 2008, 42(6): 2168-2174.
- [37] Mason J E, Fthenakis V M, Hansen T, et al. Energy payback and life-cycle CO₂ emissions of the BOS in an optimized 3.5 MW PV installation. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2006, 14(2): 179-190.
- [38] Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. Energy, 2005, 30(11): 2042-2056.
- [39] Alsema E A, Wild-Scholten M J D. The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacturers data. Inproceedings, 2005.
- [40] Turney D, Fthenakis V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(6): 3261-3270.
- [41] Zhou L, Tian Y, Roy S B, et al. Impacts of wind farms on land surface temperature. Nature Climate Change, 2012, 2(7): 539-543.
- [42] 周秀骥. 高等大气物理学. 北京: 气象出版社, 1991.
- [43] 赵鹏宇. 光伏电板对地表土壤颗粒及小气候的影响. 内蒙古农业大学, 2016.
- [44] Chang R, Shen Y, Luo Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. Renewable Energy, 2018, 118: 131-137.
- [45] 张曦,康重庆,张宁,等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.
- [46] Nemet G F. Net radiative forcing from widespread deployment of photovoltaics. Environmental Science & Technology, 2009, 43(6): 2173-2178.
- [47] M. Donovan, "Memorandum: impact of PV systems on local temperature," SunPower, July 6, 2010. http://www.rurdev.usda.gov/SupportDocuments/EA_5_17_13_RUS_PartA.pdf
- [48] Barronafford G A, Minor R L, Allen N A, et al. The photovoltaic heat island effect: larger solar power plants increase local temperatures. Scientific Reports, 2016, 6.
- [49] Genchi Y, Ishisaki M, Ohashi Y, et al. Impacts of large-scale photovoltaic panel installation on the heat island effect in Tokyo. 2003.
- [50] Millstein D, Menon S. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment. Environmental Research Letters, 2011, 49123(6): 98-204.
- [51] Hu A, Levis S, Meehl G A, et al. Impact of solar panels on global climate. Nature Climate Change, 2016, 6(3): 290-294.

光伏发电潜力分析——以山西省为例

郭鹏^{1, 2, 3} 申彦波^{2, 3} 陈峰⁴ 赵晓栋^{2, 3}

(1 华风气象传媒集团有限责任公司, 北京 100081; 2 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081;

3 中国气象局风能太阳能资源中心, 北京 100081; 4 北京市规划和自然资源委员会东城分局, 北京 100013)

摘要: 科学、合理的光伏发电潜力评价一方面需要精确的量化, 另一方面需要与电力应用场景结合, 这样的成果无论对政府政策制定, 还是企业投资决策都非常有价值。本文以山西省为例, 围绕光伏发电年等效利用小时数、理论装机容量、土地利用效率、理论发电量几个关键指标, 利用空间分析和空间统计方法, 考虑地理条件约束, 建立了一套光伏发电潜力评价方案。结果表明: 山西省中部和北部地区光伏发电条件较好, 年等效利用小时数优于或约等于山西省近年光伏发电平均利用小时数; 全省光伏发电土地利用效率一般, 在3%~9%, 电站宏观选址需要在丘陵地区“精挑细选”; 北部地区光伏发电潜力很大, 如进行充分开发, 其光伏年总发电量可达到全省2017年总用电量的1.2倍。

关键词: 光伏, 发电潜力, 山西, 理论发电量

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.015

The Analysis of PV Electricity Generation Potential —A Case Study in Shanxi

Guo Peng^{1,2,3}, Shen Yanbo^{2,3}, Chen Feng⁴, Zhao Xiaodong³

(1 Huafeng Meteorological Media Group, Beijing 100081

2 Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Wind and Solar Energy Resources Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 Dongcheng Branch of Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, Beijing 100013)

Abstract: Scientific and reasonable evaluation of potential photovoltaic (PV) electricity generation needs to be quantified and combined with application for it to be useful for the creation of government policy and enterprise investment decisions. Using Shanxi Province as an example, and focusing on PV availability hours, technical PV capacity, land utilization rate and theoretical electricity generation, and considering geographical constraints, this paper establishes a method to evaluate PV electricity generation potential using spatial statistics and analysis. The results show that the conditions of PV electricity generation in central and northern of Shanxi are better than in other areas in the province, and the PV availability hours of these places are equal or better than the actual PV generation hours in Shanxi of recent years. The results also showed the land utilization rate of PV in the Shanxi is generally between 3% and 9%, and the macro site requires careful selection in hilly areas. We found that the northern region of Shanxi has great potential for PV electricity generation and if fully utilized, the annual electricity generation could reach 1.2 times the total power consumption of the Shanxi in 2017.

Keywords: photovoltaic (PV), electricity generation potential, Shanxi Province, theoretical power generation

0 引言

截至2017年底, 中国光伏发电累计装机达到了130 GW, 但因为中国太阳能资源与用电负荷极为不均, 导致消纳问题始终存在, 对此国家针对性地出台了多项政策措施, 鼓励中东部地区开发分布式电站。中东部地区光伏建设用地相对紧张, 如何根据太阳能资源, 考虑地形、地貌及用地性质的制约, 综合评价

光伏发电潜力, 对于政府产业政策指定, 以及市场投资行为都将有很大的实际意义。

关于光伏发电潜力, 国内已有一些研究, 周扬等^[1]分析了江苏省太阳能资源的时空分布特征, 估算了江苏省屋顶可装机面积, 并通过资源丰富度、稳定性等方面分析了江苏省太阳能资源潜力; 闫加海等^[2]分析了山西省太阳能资源的时空分布特征, 通过太阳能可利用天数、稳定度、最佳利用时段等方面分析了山西省太阳能资源潜力; 梁玉莲等^[3]分析了华南地区太阳能资源的时空分布特征、资源丰富度、稳定性, 并探讨了不同地形及下垫面下太阳能开发适宜性; 李

收稿日期: 2018年10月16日; 修回日期: 2018年12月24日

第一作者: 郭鹏(1989—), Email: guopeng@cma.gov.cn

资助项目: 公服中心风云四号科研试验星专业气象服务应用示范项目; 公服中心业务基金(M2017021)

珂等^[4]选取太阳能总辐射、日照时数和有效日照天数3个因子,利用多指标评分法分析了中国陆地太阳能资源潜力;王利珍等^[5]通过分析上海地区不同辐照度下单晶硅组件转换效率,计算了全国光伏理论年发电量空间分布;谢国辉等^[6]介绍了光伏电站基地开发潜力评估系统相关情况;Marcel等^[7]利用PVGIS数据集对欧盟各成员国光伏系统年发电量进行了估算,并分析了光伏潜力与各国电力负荷的关系。对于光伏发电潜力,上述研究工作在不同领域有所涉及,但内容上仍存在针对性不强或考虑因素不够全面等问题,因此探讨全面的量化评价方法很有意义。

影响可再生能源发电潜力的因素众多,美国能源局提出了可再生能源发电潜力四层模型:资源潜力、技术潜力、经济潜力和市场潜力,以光伏开发为例,资源潜力讨论太阳能资源情况,技术潜力进一步将地理及工程技术约束纳入考虑,经济潜力和市场潜力则更进一步考虑经济和政策因素。参考这一分析框架,在资源潜力和技术潜力的层面,本文选取山西省作为研究区域,尝试以光伏发电年等效利用小时数、理论装机量、土地利用效率、理论发电量4个指标为落脚点,通过模拟太阳能资源,量化地理条件对光伏开发的约束,形成了一套光伏发电潜力的量化分析方法。

1 区域介绍、数据和方法

1.1 区域介绍

山西省地处华北西部的黄土高原东翼,总体上属于山地高原,整个轮廓略呈由东北斜向西南的平行四边形。山西总的地势是“两山夹一川”,东西两侧为山地和丘陵隆起,中部为一列串珠式盆地沉陷,平原分布其间。山西省属于温带大陆性季风气候,具有四季分明、雨热同步、光照充足、南北气候差异显著、冬夏气温悬殊、昼夜温差大的特点。

1.2 数据

气象数据:山西省109个国家级气象站近30年(1987—2016年)逐年、逐月日照时数、日照百分率数据,其中大同、太原、侯马3个气象站逐年、逐月辐射数据,资料来自国家气象信息中心。

数字高程数据:采用SRTM3数据,该数据主要由美国航空航天局(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量,SRTM的全称Shuttle Radar Topography Mission,即航天飞机雷达地形测绘使命,SRTM3分辨率为90 m。

土地利用数据:采用GlobeLand30-2010数据,该数据为2010基准年的30 m全球地表覆盖遥感制图数据产品,是“全球地表覆盖遥感制图与关键技术研究”

的成果,数据来自国家基础地理信息中心。

1.3 方法

1.3.1 太阳能资源

1) 水平面总辐射年总量

根据《太阳能资源评估方法》(QX/T 89—2018),采用气候学方法计算水平面总辐射、水平面直接辐射和水平面散射辐射的月值和年值。该方法通过气候学原理,利用日照百分率间接计算到达地面的太阳辐射,水平面总辐射、水平面直接辐射和散射辐射的计算公式如下:

$$Q_g = Q_0(a_1s + b_1), \quad (1)$$

$$D_b = Q_0(a_2s_2 + b_2s), \quad (2)$$

$$S_{\text{dif}} = Q_g - D_b, \quad (3)$$

式中, Q_g 、 D_b 和 S_{dif} 分别为水平面总辐射、水平面直接辐射和散射辐射; Q_0 表示天文辐射; s 为日照百分率; a_1 、 b_1 和 a_2 、 b_2 是经验系数。中国气象局风能太阳能资源中心利用全国122个辐射站(包括曾将开展过辐射观测的站点)自开展辐射观测以来的逐月观测数据,建立水平面总辐射与日照百分率,以及水平面直接辐射与日照百分率的回归方程,得到经验系数 a_1 、 b_1 和 a_2 、 b_2 ,将其在全国进行空间插值,获得任意站点的经验系数,进而利用该站点实测的日照百分率推算逐月水平面总辐射和水平面直接辐射,再将两者相减得到散射辐射。

2) 最佳斜面总辐射年总量

本文采用Klein-Hay模型计算倾斜面总辐射,该方法由国家标准《光伏发电站设计规范》(GB 50797—2012)所推荐,其中斜面散射考虑各向异性,包含环日辐射和各向同性散射两部分,主要计算公式如下:

斜面上接收到的太阳总辐射量 Q_s 由直接辐射量 D_s 、天空散射辐射量 S_s 及地面反射辐射量 R_s 三部分组成,即

$$Q_s = D_s + S_s + R_s, \quad (4)$$

$$D_s = D_H R_b, \quad (5)$$

$$S_s = S_H \left[\frac{D_H}{Q_H} R_b + \left(1 - \frac{D_H}{Q_H} \right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right], \quad (6)$$

$$R_s = Q_H \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho, \quad (7)$$

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \frac{\pi}{180} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega + \frac{\pi}{180} \omega \sin \varphi \sin \delta}. \quad (8)$$

式中, Q_s 、 D_s 、 S_s 、 R_s 分别是倾斜面上的总辐射、直接辐射、散射辐射和反射辐射月辐照量; Q_H 、 D_H 、 S_H 分别是水平面上的总辐射、直接辐射和散射辐射月辐

照量； R_0 是方位角为正南时，倾斜面与水平面上的日太阳直接辐射之比的月平均值； φ 是纬度， β 是倾斜面与水平面之间的夹角（倾角）， δ 是各月代表日的太阳赤纬， ω 是各月代表日的日落时角，这四个量的单位均为角度（°）； δ 和 ω 根据天文公式计算得到； ρ 是月平均地表反照率，统一取0.2。

1.3.2 光伏发电潜力分析

光伏发电潜力的分析将以太阳能资源模拟为基础，采用空间分析和空间统计方法，通过计算年等效利用小时数、理论装机量、土地利用效率、理论发电量4个指标，量化光伏发电潜力。其中年等效利用小时数直接代表了不同地区的光伏发电效率，是电站选址的首要因素；理论装机量和土地利用效率代表了不同地区的装机潜力和开发效率，是指导区域开发的宏观指标；理论发电量则直接量化了区域的光伏发电潜力。

1) 年等效利用小时数

由于水平面总辐射无法完全代表光伏系统所接收到的太阳能资源，而年等效利用小时数因为考虑了电池板倾角及系统能量损耗，因此作为一项资源潜力的指标更为合适。年等效利用小时数表示光伏电站发电量按照额定功率满发所计算的小时数，本文按照固定式斜面光伏进行评估，斜面倾角取当地最佳倾角，计算公式如下：

$$H = \frac{E}{P} = \frac{H_p \cdot P \cdot r}{P} = \frac{G \cdot P \cdot r}{P \cdot 1(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2})} = G \cdot r, \quad (9)$$

式中， E 为年发电量， P 为光伏电站标称功率， H_p 为年峰值日照时数，通常用斜面总辐射年总量除以标准测试条件下的辐照度（1 kW/m²）得到， G 为最佳斜面总辐射年总量， r 为光伏电站系统效率，与电池效率、逆变器效率、辐射损耗等因素有关，一般介于0.7~0.9，本文取0.8。

2) 理论装机量

理论装机量，表示在考虑地形地貌对光伏装机的约束后，一定区域光伏电站的可装机量，公式如下：

$$P_s = \sum P_0 \cdot R_s, \quad (10)$$

式中， P_0 为不考虑任何约束条件，理想状况单位面积的光伏装机量，根据实际工程经验，一般在40~50 MW/km²，本文取45 MW/km²。

R_s 为土地利用效率或装机折减系数，代表单位面积可用于光伏开发的土地比例，由地形和下垫面决定，取值在0~1，主要考虑因素如下：

① 坡度大于10°且坡向为北（315°<坡向<45°）的区域不可开发。

② 坡度>30°区域不可开发。

③ 坡度和下垫面不同，其土地利用系数不同

表1、表2和表3分别给出了不同坡向、坡度、下垫面下土地利用系数，土地利用效率 R_s 取其中的最小值。其中，表1和表2依据山地光伏的施工经验，主要考虑施工成本和难度；表3依据光伏开发中土地审批政策及工程经验，主要从限制开发用地和可开发用地进行考虑。

表1 不同坡向土地利用效率

Table 1 Land availability in different slope directions

坡向类型	土地利用效率
(315°<坡向<45°) 和 (坡度>10°)	0
其他坡向	1

表2 不同坡度下土地利用效率

Table 2 Land availability in different slopes

坡度	土地利用效率
[0, 10)	1
[10, 20)	0.8
[20, 30)	0.6
[30, 90)	0

表3 不同下垫面土地利用效率

Table 3 Land availability in different land cover

下垫面类型	土地利用效率
湿地、森林、水体等	0
耕地、人造地表	0.05
灌木	0.1
草地	0.2
裸地	1

3) 理论发电量

理论发电量表示在单位面积下，考虑光伏开发的地形地貌约束条件，一年的总发电量，计算公式如下：

$$E_s = H \cdot P_s, \quad (11)$$

式中， H 为年等效利用小时数， P_s 为理论装机量。

2 结果分析

按照1.3.2节中提出的光伏发电潜力分析方法，本文依次从太阳能资源、理论装机量、光伏发电潜力3个层面进行了分析。

2.1 山西省太阳能资源及光伏发电年等效利用小时数

从山西省水平面总辐射年总量的空间分布（图1a）来看，总体呈由南向北逐渐递增规律，其中低值区在全省南部，包括运城、临汾大部、长治大部、晋城大部、晋中西南部，此外还有太原中部、吕梁东南部等部分地区，值一般在1400 kW·h/m²以下；

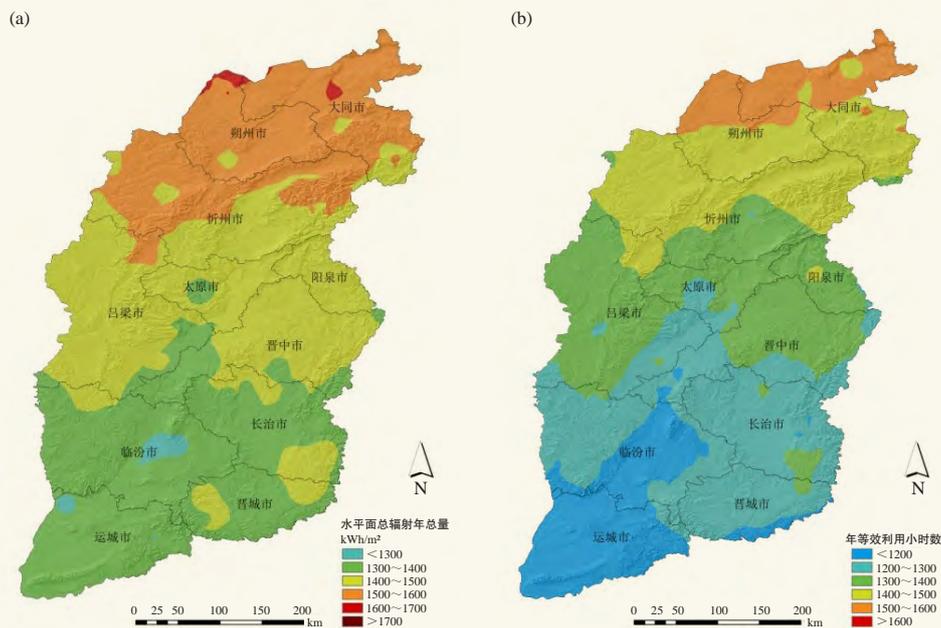


图1 山西省光伏发电太阳能资源：(a) 为水平面总辐射年总量，(b) 为年等效利用小时数
Fig. 1 Solar energy resources of PV power generation in Shanxi Province (Figure a is the total annual radiation of the horizontal plane, and Figure b is the annual equivalent utilization hours)

中值区多数位于山西中部，包括吕梁大部、太原大部、晋中大部、阳泉、忻州东南部，此外还有长治东南部、大同东南部等部分地区，年辐射值一般在 $1400 \sim 1500 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ；总辐射高值区集中于山西北部，包括忻州西部及北部、朔州、大同大部，年总辐射值一般在 $1500 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 以上。根据《太阳能资源等级 总辐射》(GB/T 31155—2014)^[8]，山西省中部及北部属于我国太阳能资源B类区（很丰富），南部属于C类区（丰富）。

山西省固定式光伏发电年等效利用小时数与水平面总辐射的空间分布总体一致，局部存在差异。如图1b所示，南部地区在 1300 h 以下，中部地区在 $1300 \sim 1400 \text{ h}$ ，北部地区在 1400 h 以上，其中朔州市北部、大同市北部可以达到 1500 h 以上。表4进一步给出了各市年等效利用小时数的统计结果，从极值分布来看，全省最大值为 1576 h ，出现在朔州市，最小值为 1111 h ，出现在临汾市。从平均情况来看，年等效利用小时数最高为朔州市，达到 1492 h ，最低为晋城市，为 1242 h 。2017年山西全省光伏发电平均利用小时数为 1371 h ，如果以此为基准，朔州、大同、忻州光伏发电条件超过了平均水平，临汾市和运城市则发电条件较差。

2.2 山西省光伏发电理论装机量及土地利用效率

理论装机量和土地利用效率代表了不同地区的装

表4 山西省各市光伏发电年等效利用小时数
Table 4 The annual equivalent utilization hours of PV power generation in Shanxi Province

名称	最小	最大	平均
朔州市	1410	1576	1492
大同市	1378	1574	1491
忻州市	1291	1506	1417
阳泉市	1278	1414	1361
吕梁市	1204	1444	1337
太原市	1251	1406	1325
晋中市	1178	1385	1301
长治市	1187	1347	1259
晋城市	1143	1317	1242
临汾市	1111	1316	1211
运城市	1117	1234	1167

机潜力和开发效率，考虑地理环境约束，山西省光伏理论装机量空间分布如图2所示，图中值代表了单位面积可装机量。从图中可以看到，大部分地区单位面积理论装机量在 $10 \text{ MW}/\text{km}^2$ 以下，其中吕梁山、太行山、五台山、中条山等山区不具备开发条件，大同盆地、忻定盆地、太原盆地、临汾盆地、运城盆地等盆地地区因为多农用地，单位面积理论装机量一般在 $5 \text{ MW}/\text{km}^2$ 以下，其余丘陵地带在 $5 \sim 10 \text{ MW}/\text{km}^2$ 。总体上讲，山西省光伏建设条件一般，可用地较分散，电站宏观选址需要在丘陵地区“精挑细选”，挑选不



图2 理论装机量格点分布图

Fig. 2 Spatial distribution of theoretical installed capacity

宜耕作的土地进行开发。

表5进一步给出了各市光伏发电理论装机量和土地平均利用率的统计结果，前者反映了该地区光伏发电的总装机潜力，后者反映可用于光伏建设的土地平均利用率。从理论装机量来看，各市面积是决定因素，忻州、吕梁、临汾因为面积较大，理论装机量排在前三，阳泉、晋城、太原排在最后三位。较高的平均利用率意味着开发用地相对集中，建设成本更低，从统计结果来看，各市土地利用率差距不大，在3%~9%，其中土地利用率较高的地区为忻州、吕梁、晋中、太原、大同、朔州，在6%以上；忻州多丘陵地带，利用率最高，为8.2%，运城以相对平坦的农用地为主，利用率最低，为3.9%，这也印证了山西省

表5 山西省各市理论装机量及土地利用率
Table 5 The theoretical installed capacity and land availability of PV power generation in Shanxi Province

名称	理论装机量/GW	土地利用率/%
忻州市	93	8.2
吕梁市	65	6.9
临汾市	53	5.8
晋中市	46	6.3
大同市	43	6.7
长治市	35	5.6
朔州市	32	6.6
运城市	25	3.9
太原市	20	6.6
晋城市	19	4.5
阳泉市	9	4.5

电站宏观选址需要在丘陵地区“精挑细选”，挑选不宜耕作的土地进行开发的结论。

2.3 山西省光伏发电潜力

从2.2节的结论可以看到山西省施工建设条件差别不大，各市土地利用率在3%~9%，从光伏电站开发收益的角度，优先选择年等效利用小时数高的地区进行开发，参考近年山西省实际光伏利用小时数（约1400 h）。本文将山西省分为3个区域：北部为I类区，包括朔州、大同、忻州，年等效利用小时数超过1400 h，为光伏开发最优区域；中部为II类区，包括阳泉、吕梁、太原、晋中，年等效利用小时数在1300~1400 h，为光伏开发的次优区域；南部为III类区，包括长治、晋城、临汾、运城，年等效利用小时数在1100~1300 h，为光伏开发的一般区域，图3不同颜色代表了各地区年等效利用小时数的差异，并标出了理论装机量和年发电量数值。



图3 山西省光伏发电潜力

Fig. 3 Potential of PV power generation in Shanxi Province

表6按照3类分区统计了山西省光伏发电潜力，根据相关资料，2017年山西省全年全社会用电量为1991亿kW·h，以此为标尺，如果将I类地区宜于光伏电站建设的土地进行开发，其光伏发电量将达到全省总用电量的1.2倍；将I类、II类地区进行开发，其光伏发电量将达到全省总用电量的2.2倍；将3类地区全部进行开发，其光伏发电量将达到全省总用电量的3倍。

表6 山西省光伏发电潜力
Table 6 The potential PV power generation in Shanxi Province

类型	名称	光伏发电潜力/亿 kW·h	
I (最优)	朔州市	473	2437
	大同市	639	
	忻州市	1325	
II (次优)	阳泉市	125	1869
	吕梁市	874	
	太原市	269	
	晋中市	600	
III (一般)	长治市	444	1616
	晋城市	239	
	临汾市	640	
	运城市	294	
	总	5922	

3 结论

对于光伏发电潜力的分析,仅考虑水平面太阳能资源,或是粗略估算装机量、发电量等指标,都存在不全面和指导性不强的问题。基于此,本文通过模拟太阳能资源,分析地形地貌对光伏开发的约束,针对年等效利用小时数、理论装机量、土地利用效率、理论发电量4个指标进行了精确量化,形成了一套光伏发电潜力分析方法。本文以山西省为例,对其光伏发电潜力分析的结论如下。

1) 山西省北部地区(朔州、大同、忻州)固定式斜面光伏发电年等效利用小时数在1400 h以上,宜于优先发展,中部地区(阳泉、吕梁、太原、晋

中)次之,南部地区(长治、晋城、临汾、运城)再次之。

2) 全省光伏发电土地利用效率一般,在3%~9%,中北部地区,除阳泉外土地利用效率相对较高,在6%以上,该地的地形地貌条件决定了电站宏观选址需要在丘陵地区“精挑细选”。

3) 如果将北部地区宜于光伏电站建设的土地进行开发,其年总发电量将达到全省2017年总用电量的1.2倍;如果对全省适宜土地进行开发,发电量将达到全省2017年总用电量的3倍。

光伏发电潜力影响因素众多,更全面和精确的量化分析仍值得进一步探讨,如对光伏系统效率、开发的经济性等方面的考虑,这些将是下一步研究的方向。

参考文献

- [1] 周扬,吴文祥,胡莹,等.江苏省可用太阳能资源潜力评估.可再生能源,2010,28(6):10-13.
- [2] 闫加海,张冬峰,安炜,等.山西省太阳能资源时空分布特征及利用潜力评估.干旱气象,2014,32(5):712-718.
- [3] 梁玉莲,申彦波,白龙,等.华南地区太阳能资源评估与开发潜力.应用气象学报,2017,28(4):481-492.
- [4] 李柯,何凡能.中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析.地理科学进展,2010,29(9):1049-1054.
- [5] 王利珍,谭洪卫,庄智,等.基于GIS平台的我国太阳能光伏发电潜力研究.上海理工大学学报,2014,36(5):491-496.
- [6] 谢国辉,李娜娜,汪晓露,等.全球大型光伏电站基地开发潜力分析.智慧电力,2018,46(4):1-5.
- [7] Marcel Š, Thomas A H, Ewan D D, et al. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar Energy, 2006, 81(10): 1295-1305.
- [8] 申彦波,赵宗慈,石广玉.地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能气候效应的最新研究进展.地球科学进展,2008,23(9):915-923.

辽宁省追踪式与最佳倾角斜面总辐射的推算与分析

顾正强 朱玲 沈历都 龚强 赵春雨 晁华 徐红 蔺娜

(沈阳区域气候中心, 沈阳 110166)

摘要: 利用辽宁省1993—2016年61个气象站的日照百分率逐月数据、6个太阳辐射观测气象站的逐时太阳总辐射数据, 采用太阳辐射的气候学计算方法、Klein各向异性散射模型和Hay各向异性散射模型分别推算各站水平面、最佳倾角斜面和追踪式斜面的太阳总辐射的推算值并进行了对比与分析。同时利用1993—2016年日平均总云量数据, 得到各站的累年平均晴天日数, 并分析辽宁省太阳总辐射空间分布差异的原因。结果表明: 全省最佳倾角角度为 $36^{\circ} \sim 41^{\circ}$, 最小出现在金州, 最大分别出现在康平、昌图、法库和西丰; 最佳倾角斜面太阳总辐射在辽宁西部和北部地区明显偏多, 其中, 朝阳北部和阜新西部部分地区最多; 追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射的增加量和提升百分比的幅度均较大, 分别达到约 $700 \sim 2300 \text{ MJ/m}^2$ 和 $13\% \sim 41\%$, 且存在较明显的呈区域性分布特征, 其中, 太阳总辐射的增加量在辽宁西部更明显, 而太阳总辐射的提升百分比则以沿海地区的幅度更大, 超过 37% , 大连南部更是超过 39% ; 晴天日数或云量是影响辽宁省太阳能总辐射的空间分布差异的主要因素。

关键词: 追踪式斜面, 最佳倾角斜面, 总辐射

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.016

Analysis and Comparison of the Tracking and Fixed Angle Bevel Solar Radiation in Liaoning

Gu Zhengqiang, Zhu Ling, Shen Lidu, Gong Qiang, Zhao Chunyu, Chao Hua, Xu Hong, Lin Na

(Regional Climate Center of Shenyang, Shenyang 110166)

Abstract: In this paper, monthly percentage of sunshine from 61 meteorological stations (1993-2016) and hourly global solar radiation from six solar radiation observation stations were used to calculate and compare the level, optimal bevel and bevel tracking of global solar radiation for each station. This was completed using solar radiation climatological calculations Klein anisotropic scattering model and Hay anisotropic scattering model. The annual average number of clear days were derived from the daily average total cloud cover from 1993-2016 to determine if they could explain spatial variation in total solar radiation between the stations in Liaoning. We found that the optimal tilt angle lay in the range of $36^{\circ} \sim 41^{\circ}$, with the minimum angle in Jinzhou and maximum angle in Kangping, Changtu, Faku and Xifeng, and the optimal bevel solar radiation in west, central and north Liaoning were greater than that of the other areas, with the greatest solar radiation in north Chaoyang and west Fuxin. The results also showed the annual tracking bevel global solar radiation in the central, west and north Liaoning were greater, and the increase of tracking optimal bevel solar radiation could reach $700 \sim 2300 \text{ MJ/m}^2$ ($13.0\% \sim 41.0\%$), and showed significant regional distribution. Lastly, we showed the increase of the total solar radiation was greater in west Liaoning, but the largest increase of percentage is in the coastal regions ($>37\%$, and even $>39\%$ in south Dalian). Thus, the number of clear days or days with cloud cover could be the main reason for the spatial variation of total solar radiation in Liaoning.

Keywords: the tracking optimal bevel, the optimal bevel, solar radiation

0 引言

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的绿色环保可再生能源。为了更好地利用太阳能资源, 学者们从没停止过研究的脚步, 由最初集中在太阳辐射的气候学计算与分析^[1-7], 到基于气象站观测资料对部分省市太阳能资源的时空分布及区划的研究分析^[8-18], 所得成

果为太阳能光伏发电提供了重要的科学依据, 然而在太阳能资源一定的情况下, 如何高效地将太阳能转化为电能, 即提升发电量, 对太阳能资源开发利用显得极为关键。

目前, 太阳能光伏发电主流方式是利用太阳能光伏板对太阳能的转化, 且太阳能光伏板的安装方式多采用固定倾角式(固定式)和旋转追踪式(追踪式)。关于固定式太阳能光伏板最佳倾角设计以及斜面上太阳辐射的估算等研究相对较多, 韩斐等^[19]研究表明根据季节调整倾角的光伏板接收的年辐射能, 与

收稿日期: 2018年9月28日; 修回日期: 2018年12月25日

第一作者: 顾正强(1984—), Email: 393558873@qq.com

通信作者: 龚强, Email: isgq@sina.com

水平和年最佳倾角放置的光伏板相比，分别提高了11.5%和4.1%，水平光伏板辐射能的理论值与实验值误差在5%以内，完全能满足一般太阳能工程研究的需要；杨金焕^[20]的研究表明：在确定固定式光伏方阵的最佳倾角时应综合考虑方阵面上太阳辐射量的连续性、均匀性和极大性。杨金焕等^[21]根据天空散射辐射各向异性的Hay模型，计算倾斜面上辐射量，推导得到了冬半年朝向赤道倾斜面最佳倾角的数学表达式以及对我国一些地区不同方位角的倾斜面上月平均日辐射量及最佳倾角进行了计算和分析；申政等^[22]研究表明气候条件对最佳倾角的选择影响较大，以当地纬度为基础的估算误差较大，与全年定倾角的接收面相比，按月调整倾角，全年接收的辐射量可增加3%~15%；李卫军等^[23]研究表明追踪式电池板发电量比相同情况下的固定式光伏电池板提高40%左右；成驰等^[24]和李潇潇等^[25]均表示在设计光伏发电系统时，为了提高光伏电站运行效率，增加发电量，首先需要计算并确定发电站光伏阵列安装的倾角，以及在该过程中对辅助设计软件进行了对比和实验。

而关于旋转追踪式（追踪式）斜面上太阳辐射的估算等研究相对较少，且对比两种安装方式所接收到的太阳能辐射，结合安装成本及经济效益，选择合理的安装方式对太阳能光伏发电十分重要。对于同一地区太阳能光伏板的不同安装方式所获得的太阳能辐射量差异较大。为此，本文以辽宁省为例，对两种安装方式的太阳辐射接收量进行对比分析，进而为辽宁省太阳能光伏发电提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文所使用资料均来源于辽宁省气象档案馆，使用的资料为辽宁省61个气象站，1993—2016年日照百分率逐月数据；1987—2016年日平均总云量数据，且定义日平均总云量<2成为晴天；6个太阳辐射观测气象站（简称为辐射站）的逐时太阳总辐射数据，其中3个为长期观测气象站（沈阳、朝阳和大连），沈阳站是辽宁省唯一的全辐射观测气象站，其余55个气象站简称为非辐射站（表1）。

1.2 研究方法

1.2.1 水平面上太阳总辐射的推算

采用了较为常见的推算无辐射观测地区太阳总辐射的计算公式（统计反演法）^[23-24]，

$$Q = Q_0(a + bS), \quad (1)$$

式中， Q 为推算出的太阳总辐射， Q_0 为天文总辐射， S 为月日照百分率， a 、 b 为经验系数。

表1 辽宁省6个太阳辐射观测气象站基本信息表
Table 1 Overview of the six solar radiation observation stations in Liaoning

站名	经度	纬度	海拔高度/m	逐时观测时间	逐时辐射观测项目
沈阳	123°31'E	41°44'N	49.0	1993.01	水平面太阳总辐射、散射辐射、直接辐射、净辐射、反射辐射
朝阳	120°26'E	41°33'N	175.3	1993.01	水平面太阳总辐射
大连	121°38'E	38°54'N	91.5	1993.01	水平面太阳总辐射
新民	122°51'E	41°58'N	30.9	2005.01	水平面太阳总辐射
兴城	120°45'E	40°36'N	20.5	2005.01	水平面太阳总辐射
宽甸	124°47'E	40°43'N	260.1	2005.01	水平面太阳总辐射

1.2.2 最佳倾角和最佳倾角面太阳总辐射的研究方法

倾斜面上接收到的太阳辐射包括直接辐射、散射辐射和反射辐射，通常采用Klein各向异性散射模型，倾斜面上辐射量计算公式如下^[19]：

$$H_T = H_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} + H_d \left[\frac{H_b \cos \theta}{H_0 \cos \theta_0} + 0.5 \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right] + \rho (H_b + H_d) \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (2)$$

式中， H_T 为倾斜面辐射量（MJ/m²）， H_b 为水平面上接收到的直接辐射， H_d 为水平上接收到的散射辐射， θ_0 为水平面的太阳光入射角， θ 为斜面上的太阳光入射角， β 为倾斜面与水平面的夹角， ρ 为地面反射率（表2），本文取0.2。 H_0 为大气层外水平面太阳辐射量。

表2 地面反射率
Table 2 Surface albedo ρ

类型	干燥黑土	湿黑土	干灰色地面	湿灰色地面	草地	干砂地
ρ	0.14	0.08	0.27	0.11	0.2	0.18

1.2.3 追踪式斜面太阳总辐射的推算

采用Hay各向异性散射模型，认为斜面上天空散射辐射量（ H_{dt} ）是由太阳光盘的辐射量和其余天空穹顶均匀分布的散射辐射量两部分组成^[18]，可表达为

$$H_{dt} = H_d \left[\frac{H_b}{H_0} R_b + 0.5 \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right], \quad (3)$$

式中， R_b 为倾斜面与水平面上直接辐射比，又因为倾斜面与光线垂直， R_b 亦可表示为 $\frac{1}{\cos \beta}$ 。

因为追踪式斜面始终与太阳光线垂直，则 β 为太阳高度角 h 的余角，即

$$\cos \beta = \sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau,$$

式中， φ 为当地纬度， δ 为太阳赤纬角，计算公式如下：

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \sin \alpha + 0.1149 \sin 2\alpha - 0.1712 \sin 3\alpha - 0.758 \cos \alpha + 0.3656 \cos 2\alpha + 0.0201 \cos 3\alpha, \quad (4)$$

式中, α 为日角, 即 $\alpha = \frac{2\pi(N - N_0)}{365.2422}$, N 为积日, 就是日期在年内的顺序号,

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422(\text{年份} - 1985) - \text{INT}\left[\frac{\text{年份} - 1985}{4}\right] \quad (5)$$

τ 为当时的太阳时角(取整时次前半小时的真太阳时对应的太阳时角), $\tau = \left(S_0 + \frac{F_0}{60} - 12\right) \times 15^\circ$, S_0 和分 F_0 均表示真太阳时, 由北京时间转为真太阳时需要先转为地方时 S_d , 然后进行时差订正,

$$S_0 = S_d + \frac{E_t}{60} = S + \left\{ F - \left[120^\circ - \left(JD + \frac{JF}{60} \right) \right] \times 4 \right\} / 60 + \frac{E_t}{60} \quad (6)$$

S 和 F 分别为北京时间的时和分, JD 和 JF 分别表示当地的经度和经分, E_t 为时差。

$$E_t = 0.0028 - 1.9857 \sin \alpha + 9.9059 \sin 2\alpha - 7.0924 \cos \alpha - 0.6882 \cos 2\alpha'$$

式中 α 为日角, 计算方法同前。

具体计算方法参见《太阳辐射计算讲座》第一讲^[25]。

$H_0 = E_{sc} \times E_r \times \sin h$, 式中 E_{sc} 为太阳常数, 世界气象组织(WMO)1981年的推荐为 1367 W/m^2 , E_t 为当日地距离订正系数, h 为太阳高度角。

$$E_r = 1.000423 + 0.032359 \sin \alpha + 0.000086 \sin 2\alpha - 0.008349 \cos \alpha + 0.000115 \cos 2\alpha \quad (7)$$

追踪式斜面始终垂直于太阳光线, 因此追踪式斜面上的太阳辐射量的公式为

$$H_T = H_b R_b + H_{dt} + 0.5 \rho H (1 - \cos \beta) \quad (8)$$

式中, H 为水平面上太阳总辐射量; ρ 为地表反射率。

一般情况下, 最后一项地面反射辐射量很小, 只占 H_T 的百分之几。

1.2.4 辽宁省追踪式斜面太阳总辐射的推算流程

根据沈阳站逐时全辐射资料得到逐时水平面上的直接辐射, 以及水平面上直接辐射、散射辐射和反射辐射占水平总辐射的比例, 并视为同日同时次的其他5个辐射站的逐时各辐射所占水平面总辐射的比例 R_b , 结合兴城、宽甸、新民、朝阳和大连站的逐时水平面太阳总辐射资料, 并利用式(3)和式(8)得到兴城、宽甸、新民、朝阳和大连站追踪式斜面的逐时太阳总辐射, 进一步计算得到追踪式斜面年太阳总辐射。从而得到兴城、宽甸、新民、沈阳、大连和朝阳气象站的追踪式斜面年平均太阳总辐射与年平均水平面总辐射的比值。

考虑到各站的天气情况, 采用55个非辐射站的日

照百分率分别与6个辐射站同期的日照百分率进行相关性计算(相关系数均通过0.01的显著性检验), 取相关性最高辐射站的追踪式斜面年平均太阳总辐射与年平均水平面总辐射的比值, 并乘以该非辐射站的年平均水平面总辐射——由式(1)推算, 最终得到该站的年平均追踪式斜面总辐射。流程图见图1。

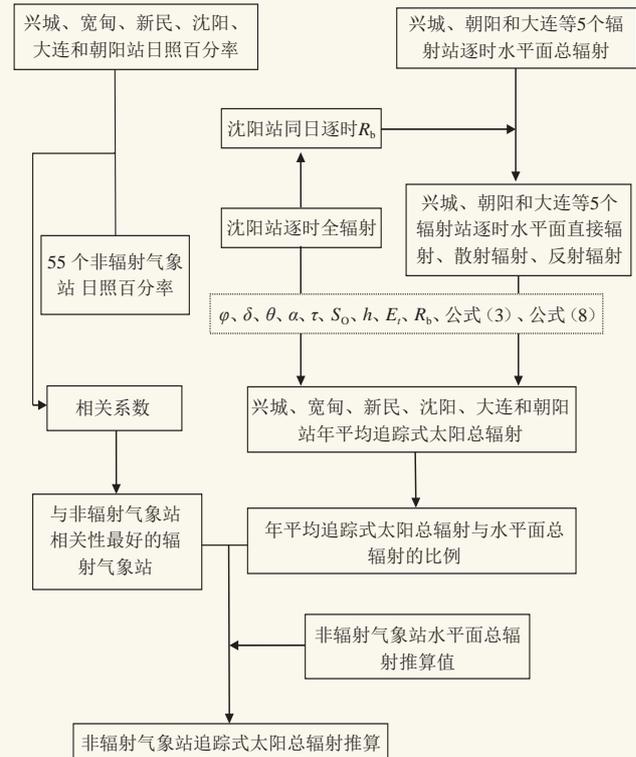


图1 追踪式太阳总辐射的推算

Fig. 1 Flow chart of the calculation of tracking global solar radiation

1.2.5 相似系数

为了定量地表示两个要素场分布的相似程度, 采用相似系数进行分析^[26], 公式为:

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (9)$$

式中, n 为站点数, 本文 $n=61$; $\cos \theta$ 为两幅图相似程度的定量指标; x_i 、 y_i 分别为第 i 站(空间点)在两幅图中的要素值。相似系数数值为 $-1.0 \sim 1.0$, 等于 1.0 时表示完全相同, 等于 -1.0 时表示完全相反, 等于 0.0 时表示完全不相似, 正值越大表示图形越相似, 负值越大表示图形越相反。

2 水平面太阳总辐射

2.1 水平面太阳总辐射推算

利用朝阳、大连和沈阳站分别进行长期太阳辐

射和日照百分率的拟合,得到上述3站的经验系数 a 、 b ,将3个站的经验系数进行全省范围的插值(反距离权重),从而得到辽宁省各气象站的经验系数 a 、 b 。采用式(1)得到各站的水平面年平均总辐射,并采用反距离权重进行插值,得到全省的水平面年平均总辐射。

辽宁省水平面年平均总辐射(图2)总体呈现自西北向东南逐渐减少的趋势,辽宁西部的朝阳市、兴城地区和锦州部分地区明显偏多,水平面年平均总辐射达到5100 MJ/m²以上,中部辽河平原一带水平面年平均总辐射为4800~5100 MJ/m²,东部明显偏少,年平均总辐射在4413~4800 MJ/m²。

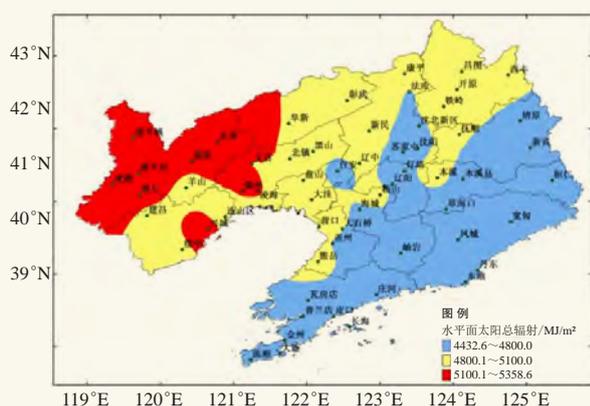


图2 辽宁省水平面年平均太阳总辐射分布图

Fig. 2 Contours of the annual level global solar radiation in Liaoning

2.2 推算结果的合理性分析

将辽宁省6个太阳辐射观测站同期(表1)的水平面年平均太阳总辐量与推算值进行对比,详见表3。可见,除兴城和大连相对误差的绝对值为5.0%~5.6%,相对较大,其余4个站的相对误差的绝对值在0.3%~3.7%。总体而言,水平面太阳总辐射的推算值是比较可信的。

表3 水平面太阳总辐射的推算值与实测值对比

Table 3 Comparisons of the calculated and observed level global solar radiations

年平均	站名	新民	兴城	宽甸	沈阳	朝阳	大连
推算值		4908.4	5206.5	4599.9	4746.0	5131.1	4728.5
观测值		5004.1	4930.2	4537.0	4925.9	5146.7	4979.5
相对误差/%		-1.9	5.6	1.4	-3.7	-0.3	-5.0

3 最佳倾角太阳总辐射

3.1 沈阳水平面上太阳直接辐射占总辐射比例

沈阳是唯一具有全辐射观测的气象站,利用其水平面上太阳直接辐射占总辐射比例代替其他站点的该比例,结合推算得到的水平面太阳总辐射计算得到各

站点水平直接辐射和散射辐射,采用最佳倾角公式计算得到其他气象站月和年最佳倾角,以及对应的年太阳总辐射。

表4 沈阳气象站水平面上太阳直接辐射占总辐射比例(单位:%)

Table 4 Ratios of the level direction solar radiation to the global solar radiation in Shenyang (unit: %)

时段	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
1993—2016年	52.3	55.6	57.6	53.5	54.0	46.8	39.8	48.5	58.5	60.3	56.9	52.1	52.3

3.2 最佳倾角斜面太阳辐射推算

辽宁省最佳倾角角度为36°~41°,最小出现在金州,最大分别出现在康平、昌图、法库和西丰。最佳倾角斜面的太阳总辐射自西北向东南逐渐减少,辽宁西部和北部地区明显偏多,达到5500.1 MJ/m²以上,其中,朝阳北部和阜新西部部分地区最多,达到6000.1~6225.3 MJ/m²,辽宁东部和南部地区明显偏少,年总辐射量介于5051.9~5500.0 MJ/m²。

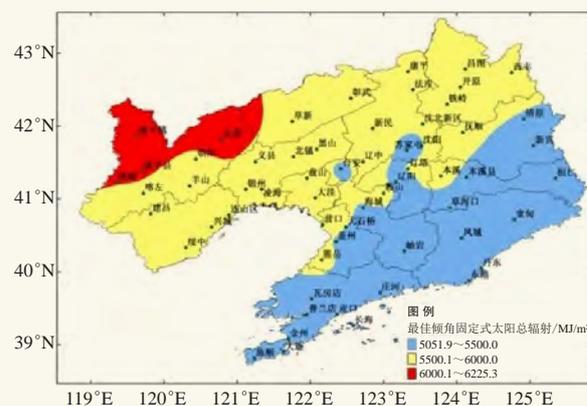


图3 辽宁省最佳倾角斜面太阳总辐射分布图

Fig. 3 Contours of the fixed angle bevel global solar radiation in Liaoning

4 追踪式斜面太阳总辐射

4.1 追踪式斜面太阳总辐射推算结果

辽宁省追踪式斜面年平均总辐射与水平面年平均总辐射的空间分布基本一致,自西北向东南逐渐减少,辽宁西部、中部和北部地区偏多,达到7500.1 MJ/m²以上,其中,朝阳、葫芦岛、锦州西部和阜新西部地区最多,达到8000.0 MJ/m²以上,辽宁东南部地区的年总辐射量偏少,介于5825~7500.0 MJ/m²,皮口地区最少,不足7000 MJ/m²(见图4)。

4.2 追踪式斜面与最佳倾角斜面太阳总辐射推算结果对比

由图5和图6可知追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射偏多约700~2300 MJ/m²,总辐射提升13.0%~41.0%。其中,辽宁省大部分地区太阳总辐射

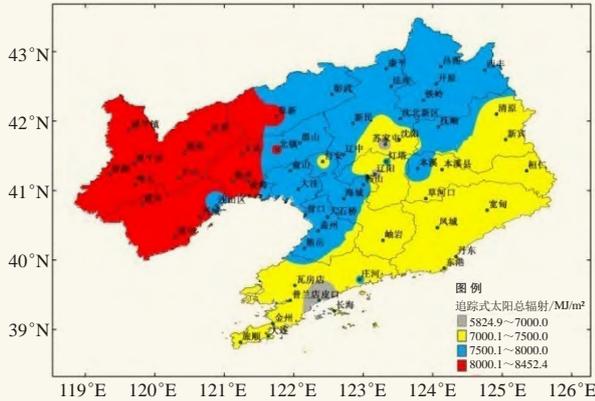


图4 辽宁省追踪式斜面太阳总辐射分布图
Fig. 4 Contours of the tracking of bevel global solar radiation in Liaoning

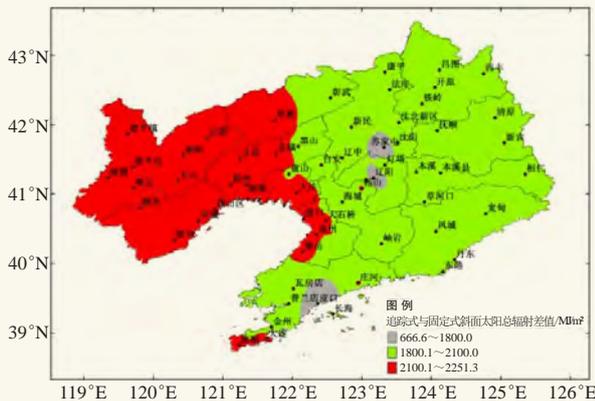


图5 辽宁省追踪式与固定式斜面年总辐射量差值分布图
Fig.5 Deviation of the tracking and fixed angle bevel annual global solar radiation in Liaoning

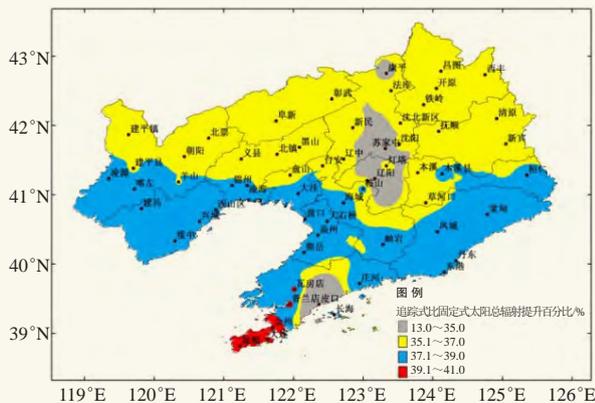


图6 辽宁省追踪式比固定式斜面年总辐射量提升百分比的分布图
Fig. 6 Contours of the relative increase of tracking bevel annual global solar radiation to that of the fixed angle in Liaoning (in percentage)

增加量均达到1800 MJ/m²以上, 辽宁西部和大连南部(旅顺周边地区)更为明显, 达到2100 MJ/m²以上; 辽宁沿海地区(除大连中部)总辐射的提升明显, 达

到37%以上; 辽宁中部部分地区和大连中部地区总辐射的总辐射增加量(688~1800 MJ/m²)和提升百分比(13%~35%)均为最少地区, 皮口站偏少的最为突出。

总体而言, 追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射的增加量和提升百分比的幅度均较大, 且存在较明显的区域性分布, 除部分地区外, 辽宁大部分地区的太阳总辐射的增加量均达到1800 MJ/m²以上, 辽宁西部更加明显, 提升百分比则以沿海地区的幅度更大, 达到37%以上, 大连南部提升百分比最大, 达到39%以上。

5 辽宁省太阳总辐射空间分布差异的分析

5.2 太阳总辐射空间分布差异的原因

考虑到到达地表的太阳总辐射受到包括天文因子(日地距离、太阳赤纬、时角等)、地理因子(经度、海拔高度等)、气象因子(日照百分率、天空云量等)等因素的影响^[25]。那么哪个因子是影响辽宁省太阳总辐射空间分布差异的主要因素呢, 下面进行逐一筛选。

辽宁省地势为自东、西、北三面向中部和南部倾斜, 东西两侧为丘陵山地, 中部为自东北向西南倾斜的长方形辽河平原, 结合本省太阳能资源分布, 可以发现辽宁东部与西部的太阳总辐射差异明显, 且考虑到两侧丘陵山地的海拔高度相近, 因此地理因子不是影响本省太阳能分布的主要因素。由于辽宁省纬度跨度较小, 且本省太阳总辐射的分布差异主要体现在东西部, 可知天文因子亦不是影响本省太阳能分布的主要因素。所以, 基本可以断定气象因子才是影响本省太阳能发布的主要因素。

对于同一个地点同一时间, 达到地面的太阳辐射的多与少一般取决于天空的云量, 云量多, 则对太阳辐射的吸收、反射、散射作用强, 达到地面太阳辐射就少, 反之晴天状况下达到地面的太阳辐射量就多。由图7可知, 辽宁省1993—2016年年平均晴天日数的空间分布呈自西北向东南逐渐减少的变化, 与辽宁省太阳总辐射空间分布(图2、图3、图4)比较相符, 且图7与图2、图3和图4的相似系数^[26]均高达0.9932以上, 说明晴天日数空间分布与水平面、最佳倾角斜面和追踪式斜面太阳总辐射极其的相似。

根据上述分析并结合辽宁省太阳能总辐射月变化特征及雨季所处月份, 能够更好地说明晴天日数或云量是辽宁省太阳能总辐射的空间分布差异的主要因素。

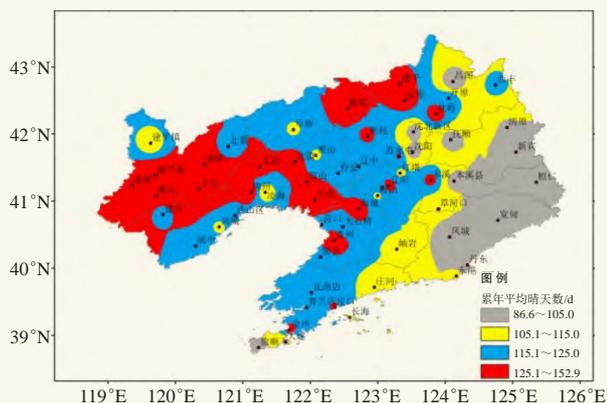


图7 辽宁省1993—2016年年平均晴天日数的空间分布
Fig. 7 Contours of the annual average number of clear days during 1993—2016 in Liaoning

6 结论

1) 辽宁省水平面年平均总辐射总体呈现自西北向东南逐渐减少,且推算值的相对误差在沿海地区(兴城、大连)表现偏大,与沿海地区的天气形势复杂,降雨偏多有关。

2) 辽宁省最佳倾角斜面的太阳总辐射自西北向东南逐渐减少,辽宁西部和北部地区明显偏多,达到5500.1 MJ/m²以上,其中,朝阳北部和阜新西部部分地区最多,达到6000.1~6225.3 MJ/m²。全省最佳倾角角度为36°~41°,最小出现在金州,最大分别出现在康平、昌图、法库和西丰。

3) 辽宁省追踪式斜面年平均总辐射自西北向东南逐渐减少。辽宁西部、中部和北部地区偏多,其中,朝阳、葫芦岛、锦州西部和阜新西部地区最多,达到8000.0 MJ/m²以上,辽宁东南部地区的年总辐射量偏少,皮口地区最少,不足7000 MJ/m²。

4) 辽宁省追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射的增加量和提升百分比的幅度均较大,分别达到约700~2300 MJ/m²和13.0%~41.0%,且存在较明显的区域性分布,除部分地区外,辽宁大部分地区的太阳总辐射的增加量均达到1800 MJ/m²以上,辽宁西部更加明显,提升百分比则以沿海地区的幅度更大,达到37%以上,大连南部提升百分比最大,达到39%以上。

5) 晴天日数或云量是影响辽宁省太阳能总辐射的空间分布差异的主要因素,且追踪式斜面太阳总辐射受夏季多雨天气的影响更显著。

参考文献

- [1] 左大康,王勃贤,陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. 气象学报,1963,33(1): 78-96.
- [2] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报,1964,34(3): 304-314.
- [3] 王炳忠,邹怀松,殷志强. 我国太阳能辐射资源. 太阳能,1998,(4): 19.
- [4] 王炳忠. 中国太阳能资源利用区划. 太阳能学报,1983,(3): 221-228.
- [5] 祝昌汉. 我国散射辐射的计算方法及其分布. 太阳能学报,1984,(3): 242-249.
- [6] 祝昌汉. 我国直接辐射的计算方法及分布特征. 太阳能学报,1985,(1): 1-11.
- [7] 何洪林,于贵瑞,牛栋. 复杂地形条件下的太阳能资源辐射计算方法研究. 资源科学,2003,(1): 78-85.
- [8] 李晓文,李维亮,周秀骥. 中国近30年太阳辐射状况研究. 应用气象学报,1998,9(1): 24-31.
- [9] 桑建人,刘玉兰,林莉. 宁夏太阳辐射特征及太阳能利用潜力综合评价. 中国沙漠,2006,(1): 122-125.
- [10] 刘可群,陈正洪,夏智宏. 湖北省太阳能资源时空分布特征及区划研究. 华中农业大学学报,2007,(6): 888-893.
- [11] 刘佳,何清,刘蕊,等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况. 干旱气象,2008,(4): 61-66.
- [12] 于华深,蔺娜,于杨. 辽宁省太阳能资源分布及区划初探. 气象与环境学报,2008,(2): 18-22.
- [13] 龚强,于华深,蔺娜,等. 辽宁省风能、太阳能资源时空分布特征及其初步区划. 资源科学,2008,(5): 654-661.
- [14] 吴林荣,江志红,鲁渊平,等. 陕西太阳总辐射的计算及分布特征. 气象科学,2009,(2): 2187-2191.
- [15] 赵利勇,胡明辅,杨贞妮. 太阳能利用技术及发展. 能源与环境,2007,(4): 55-57.
- [16] 袁小康,谷晓平,王济. 中国太阳能资源评估研究进展. 贵州气象,2011,(5): 1-4.
- [17] 申彦波. 我国太阳能资源评估方法研究进展. 气象科技进展,2017,7(1): 77-84.
- [18] 王炳忠. 太阳辐射计算讲座第一讲太阳能中天文参数的计算. 太阳能,1999(2)
- [19] 韩斐,潘玉良,苏忠贤. 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究. 工程设计学报,2009,(5): 348-353.
- [20] 杨金焱. 固定式光伏方阵最佳倾角的分析. 太阳能学报,1992,(1): 86-92.
- [21] 杨金焱,毛家俊,陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算. 上海交通大学学报,2002,(7): 1032-1036.
- [22] 申政,吕建,杨洪兴,等. 太阳辐射接受面最佳倾角的计算与分析. 天津城市建设学院学报,2009,(1): 61-64.
- [23] 李卫军,冯春详,周世勃,等. 基于二维自由度的双轴跟踪太阳光伏发电系统设计. 太阳能,2013,(10): 54-59.
- [24] 成驰,陈正洪,孙鹏杰. 光伏阵列最佳倾角计算方法的进展. 气象科技进展,2017,7(4): 60-65.
- [25] 李潇潇,赵争鸣,田春宁,等. 基于统计分析的光伏并网发电系统最佳倾角的计算与实验研究. 电气技术,2018,(8): 1-6.
- [26] 黄嘉佑,李庆祥. 气象数据统计分析方法. 北京:气象出版社,2014.

实际环境下光储离网型发电系统优化设计研究

康慨 孙振宇 张超 张云龙 李慧
(湖北省电力勘测设计院有限公司, 武汉 430040)

摘要: 偏远和无电地区远离电网, 采用含光储离网型发电系统是解决当地电力缺失的重要手段。为充分利用可再生能源及解决偏远和无电区的经济性供电问题, 提出了以系统负载满足率、全寿命成本为主要约束因子, 从用户负荷特性、太阳能资源分析、光伏组件的实际环境发电特性、储能特性、电能匹配特性等角度研究光储离网型发电系统的优化设计方法。通过对非洲某地区的供电需求分析, 光储离网型发电系统较经济地满足了当地的基本供电问题。

关键词: 光储, 电力短缺, 预期负荷率, 全寿命成本

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.017

Study on Optimal Design Method for Stand-Alone Solar-Battery Hybrid Power System in a Practical Environment

Kang Kai, Sun Zhenyu, Zhang Chao, Zhang Yunlong, Li Hui
(Power China Hubei Electric Engineering Corporation Limited, Wuhan 430040)

Abstract: Remote areas and areas without electricity are usually unable to access the power grid. An off-grid solar-battery system is a good way to decrease local power shortages. To make full use of renewable energy and economically provide power to remote areas and areas without electricity, some additional information regarding influencing variables is needed. We need to identify the expected load rate and life cycle cost, load characteristic, solar resource analysis, actual environment characteristics of photovoltaic modules, energy storage, and power matching characteristics. We used these factors to optimize the design of an off-grid solar-battery system. The results show that the optimal storage of an off-grid solar-battery system can satisfy the local basic power supply economically in a region of Africa.

Keywords: solar-battery, power shortage, expected load rate, life cycle cost

0 引言

随着全球化的深入, 人类社会发展提速, 经济发展和生活质量的提高与电能的发展越来越紧密, 但根据《2018年离网太阳能市场趋势报告》, 全球仍有超过10亿人生活在无电地区, 其中近50%人居住在撒哈拉以南非洲地区, 近30%人居住在南亚, 能源缺乏严重限制了上述地区的经济发展。而化石能源的利用将使全球变暖的趋势和对大气的污染加剧, 发展可再生清洁能源的电力供应受到了全球的高度关注, 其中光储离网型发电系统具有易实施、经济性好、可扩展化、易维护等特点, 受到了广泛的研究和运用。

目前, 国内外学者针对离网型互补系统进行了一定的研究。张涛^[1]介绍了离网型风光互补发电系统设计的构成机理、基本模式和设计要点。李丹等^[2]提出了基于NASA资源数据以风力发电机为基础的风光

互补发电系统设计计算模型, 开发了用于风光互补发电系统配置的计算程序。李品等^[3]提出了一种基于全年负载缺电率和全寿命周期成本为优化目标的风光储互补发电系统优化设计方法。高峰等^[4]提出了以电源总成本、负荷缺电率、电能浪费率、风/光输出功率波动率 4 个指标最小为目标函数, 并采用具有自适应交叉和变异操作的改进遗传算法进行求解容量优化配置。上述文献中, 有的未对总成本进行优化; 有的虽然以总成本、负荷缺电率进行多目标优化, 但忽略了系统中光伏的实际环境运行特性和全寿命周期负荷匹配性^[5], 且未给出工程实际的计算方法; 有的采用了 HOMER 和 Hybrid2 软件进行校验, 忽略了软件控制策略对实际光储离网型发电系统的适用性^[6-7]。本文根据系统实际运行特性, 以系统负载满足率、寿命周期成本为主要约束因子, 从用户负荷特性、太阳能资源分析、光伏组件实际环境发电特性、储能特性、电能匹配特性等角度分析, 给出了光储离网型发电系统的

收稿日期: 2018 年 9 月 19 日; 修回日期: 2018 年 12 月 25 日
第一作者: 康慨 (1987—), Email: kkangkai@163.com

① HOMER Software. Available: <http://www.homerenergy.com>.

优化设计方法，并通过实例进行了分析及运用。

1 光储离网型发电系统概述

光储离网型发电系统如图1所示，主要包括光伏组件、光储一体机、储能单元、负荷以及监控及计量系统。光伏组件将太阳能转换为电能，通过汇流箱和光伏控制器将电能存储在储能单元或者经过逆变器转换为交流电，是光伏系统的能源生产单元，也是系统投资较大的部分；储能单元主要用来储存系统过剩的电能，并在光伏发电功率不足时、晚上以及阴雨天时，将储存的直流电能经逆变器输出供给负荷使用，也是系统投资较大的部分；光储一体机是将直流电转化为交流电的设备，通常和控制器集成在一起，兼顾逆变和控制功能，其作用是将直流电转变为满足一定要求的交流电能；监控系统用于集中记录并显示光伏组件运行情况、系统运行参数及电能输出情况，以及用户用电量等数据，便于运行维护人员实时掌握系统运行状况。

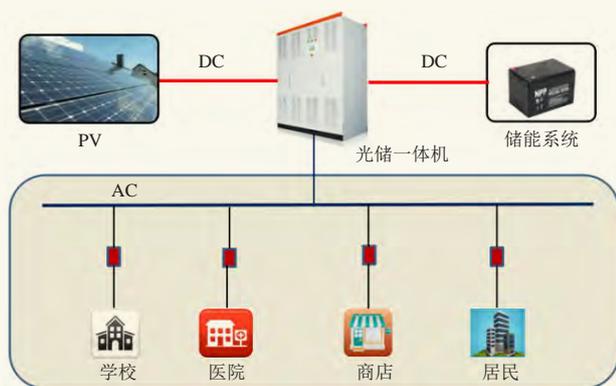


图1 光储离网型发电系统供电原理图

Fig. 1 Power supply schematic diagram of off-grid solar-battery power system

2 系统优化设计方法

2.1 负荷分析及典型负荷的提取

电力用户的负荷变化是一个非稳态的随机过程，与用电习惯和负荷特性有很大关系。根据负荷曲线时间尺度的不同，可分为年度、季度、月度以及周典型日负荷曲线等，考虑到偏远区和无电区用户的实际用电时间、习惯、负荷特性及用户数据资料搜集的难度，本文以月度典型日负荷进行分析。典型负荷曲线提取方法主要有最大日负荷、均值法、加权平均法、聚类算法等^[8-10]，考虑到系统的经济性和负荷满足率问题，本文以加权平均法作为提取方法。

1) 负荷的分析

由于偏远或无电区域大多未安装电能计量表，负荷数据搜集较为困难，目前通用的做法是进行现场季

节性调研。在调研过程中对负荷类型进行分类统计，需着重对居民、政府机构、军营、职高中、小初中、医院、卫生所、教堂、清真寺、工业厂、商户、路灯等公共用电负荷和用户负荷的用电时间、负荷类型、用电习惯以及同时率问题进行调查分析，并整理出相应的负荷分析表，如表1所示。

表1 负荷分析
Table 1 Load analysis

类型	负荷/kW	同时率	备注
居民	0.08	0.7	用户考虑5人/户，按LED灯考虑，一般LED灯为20 W左右，每户考虑一个电器100 W
政府	8	0.9	10个房间，考虑空调或电扇，空调2.5 kW/台，照明250 W/间
军营	20.4	0.8	主要考虑照明，少量办公负荷，按10间办公室考虑，其中4间空调及照明共2.6 kW，6间电扇及照明共60W，200间宿舍，每间照明0.05 kW
初中	5.7	0.7	2间办公室空调及照明共2.6 kW，教室10间，每间照明及电扇0.05 kW
小学	3.1	0.7	1间办公室空调及照明共2.6 kW，教室10间，每间照明及电扇0.05 kW
医院	46	0.8	办公室10间，每间空调及照明共2.6 kW，病房20间，每间照明及医用设备共1 kW
卫生所	13.2	0.8	办公室2间，每间空调及照明共2.6 kW，病房10间，每间照明及医用设备0.8 kW
教堂	1	0.9	照明1 kW，约50盏灯
寺庙	1	0.9	照明1 kW，约50盏灯
商户	1.3	0.8	冰箱2 kW（30%），空调2.5kW（20%），照明及其他
路灯	0.02	1	20 W/盏，LED灯，平均间距50 m

2) 典型负荷的提取

将日发电量作为月度典型负荷曲线中该日的权值，对月度负荷数据进行加权平均得到月度典型负荷曲线^[10]，根据该月度每天的发电量和总发电量，计算该月度第*j*时点的典型负荷 \bar{p}_j 为：

$$\bar{p}_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i,j} \Delta t}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i,j} \Delta t} p_{i,j} \quad (1)$$

式中， Δt 为负荷采样时间，一般取1 h，与此同时*n*取值为24；*m*根据月度天数来取值； $p_{i,j}$ 为该月度第*i*天第*j*时的负荷。

2.2 光伏系统优化设计

对于光储离网型发电系统来说，光伏组件发电的能量来源于太阳，光伏阵列所接收的太阳辐射量与倾角有关，光伏阵面上所获得的辐射量决定了系统整体的发电量和正常运行，因此系统优化设计的前提是做好光资源分析、光伏阵列的倾角设计、组串设计以及容量设计。

目前在大多数系统设计时未详细分析各月的辐射量，而直接以全年月均辐射量为设计依据，且以年

均辐射量最大的倾角作为设计的倾角，忽略了每月典型日辐射量的变化特性、环境温度对光伏出力的影响以及负荷需求匹配性^[11]，从而导致了系统运行过程中负荷满足率低、初始投入成本高的缺点。下面以非洲某地区（14.4°E，14.3°N）实际的光资源分析为基础进行分析说明。对国际主流的太阳能资源评估数据源Meteonorm、SolarGIS和NASA进行数据分析比较，通过PVsyst得到该区域的不同倾角光伏斜面的辐射量，如表2所示。

表2 不同倾角光伏斜面太阳辐射（单位：(kW·h)/(m²·d)）
Table 2 Solar irradiation of photovoltaic inclined planes at different angles (unit: (kW·h)/(m²·d))

月份	温度/℃	0°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°
1	23.4	173	187	191	195	199	203	206	210	213	216	218
2	26.8	168	176	179	182	184	186	188	190	191	193	194
3	31	193	198	199	201	202	202	203	203	203	203	203
4	33.8	201	201	201	200	199	198	197	196	194	193	191
5	33.9	217	213	211	209	206	204	202	198	196	193	189
6	30.9	198	193	191	188	186	183	180	177	174	171	167
7	28.8	185	181	179	177	175	173	170	167	165	162	159
8	27	198	196	195	194	193	191	189	188	186	183	181
9	28.1	175	178	179	179	179	179	179	179	178	177	176
10	29.8	192	200	203	205	207	209	210	212	213	214	215
11	27.4	177	191	194	198	202	205	208	211	214	217	219
12	24.7	169	184	189	193	197	202	205	209	212	215	219
总计		2246	2298	2311	2321	2329	2335	2338	2339	2339	2336	2330

由表2可知，该区域斜面上辐射量最大的倾角为18°~20°，而在18°~20°时，7月斜面辐射量值很低，如果按照该角度进行光储系统设计，为了满足负荷需求，需增加光伏组件的装机容量，这样就会在10月一次年1月有大量的弃光产生，同时增加系统的总成本（组件超装和支架成本）。为了保证既能较好地满足负荷需求又不产生过量的弃光，需降低斜面倾角。当斜面倾角在8°~12°时，能较好地满足负荷满足率、弃光率低和总成本低的需求，另外，在设计过程中需考虑光伏出力与温度之间的关系，光伏组件随温度的功率效率如式（2）所示：

$$\eta = 1 - \alpha_p \times \left[\left(G_T \times \frac{T_{\text{NOCT}} - T_{\text{a,NOCT}}}{G_{\text{NOCT}}} + T_a \right) - 25 \right], \quad (2)$$

式中， α_p 为功率温度系数； G_T 为斜面辐照度； G_{NOCT} 为工作辐照度，一般取800 W/m²； T_{NOCT} 为一般组件温度； $T_{\text{a,NOCT}}$ 为NOCT对应的环境温度； T_a 为环境温度。

在考虑斜面倾角时还需考虑光伏月典型日的出力曲线与负荷的匹配情况，实际环境下光伏出力与负荷变化趋势、负荷满足率、弃光率低、总成本低等因素。在做光伏系统设计时，光伏组件串联数量的设计

也尤为重要，组串数量主要考虑温度、MPPT跟踪电压范围以及允许的最大直流电压，具体设计时可参考文献[12]，同时也需满足储能直流侧电压的范围。

2.3 系统容量优化设计

目前光储离网型发电系统应用区域通常具有白天用电量少、晚上用电量多的特点，且主要是居民用电。因此光储离网发电系统需满足白天用电，同时通过储能单元将白天剩余的电能存储起来，在光伏发电功率不足时、晚上以及阴雨天时，将储存的直流电能经逆变器输出供给负荷使用。在进行光伏系统容量设计时，考虑到光伏直接逆变和经储能然后再逆变后供应负荷时的效率不一样，在光伏系统设计时需综合光伏直接逆变供应的负荷、储能单元转换并逆变供应的负荷，也可粗略归类为有日照时的白天负荷、夜晚负荷以及阴雨天自给天数总负荷，则光伏系统设计容量可按式（3）考虑：

$$P_{\text{pv}} = \frac{\frac{Q_d \times (1+i)^n}{\eta_1} + \frac{Q_i \times (1+i)^n}{\eta_2}}{h_{\text{peak}} \times (1-\varphi_n)} \times \lambda, \quad (3)$$

式中， Q_d 为光伏直接逆变供应的电能； Q_i 为经储能逆变后供应的电能； i 为负荷增长率； h_{peak} 为日辐照峰值等效小时数； φ_n 为第 n 年的光伏衰减率； λ 为保证系统可靠系数，一般大于等于1； η_1 为光伏直接逆变时的效率，一般可取82%； η_2 为光伏经储能逆变后的效率，一般可取75%。

在进行储能系统的容量设计时，需考虑环境温度、放电深度、充放电效率、逆变效率、当地负荷特性以及阴雨天自给天数，储能容量的设计如式（4）：

$$S_d = \frac{(Q_0 + m \times Q_{\text{all}}) \times (1+i)^n}{\text{DOD} \times \eta_r \times \eta_{\text{DC}} \times \eta_{\text{inv}}}, \quad (4)$$

式中， m 为阴雨天自给天数； Q_{all} 为全天负荷需求电量；当 $m=0$ 时， Q_0 包含白天部分光伏瞬时功率不足以支撑的剩余负荷、夜间负荷、光资源大于典型日代表值时剩余的光伏发电量（如考虑经济性，此值也可不考虑）；当 $m \geq 1$ 时， Q_0 包含白天部分光伏瞬时功率不足以支撑的剩余负荷、夜间负荷； i 为负荷增长率； n 为第 n 年；DOD为最大放电深度； η_r 为温度修正系数； η_{DC} 为储能单元转换效率； η_{inv} 为逆变器效率。

3 实例分析与计算

非洲区域整体电力发展缓慢，大部分村庄至今尚未通电，但太阳能资源十分丰富，采取光储离网型发电系统可发挥太阳能资源优势，让能源与环境结合发展，改变此类区域边远地区民众无电可用的状态，缓解供电压力，下面以非洲某地区（14.4°E，14.3°N）

为案例进行分析与计算。

非洲某区域村庄有250户家庭，每个家庭负荷有照明、收音机，多个家庭才有1台电视机、电风扇；公共负荷有1个学校，1个活动中心，1个卫生所，2个寺庙，1个基站和40个路灯，该区域的光伏资源情况如表2所示。针对负荷情况和光资源情况，根据第2节中负荷的提取和分析方法、光伏系统优化方法，考虑到0.7的负荷同时率，得到非洲该区域典型的负荷曲线与8°、10°、12°倾角下光伏出力，如表3、图2—图4所示。

表3 考虑温度后不同倾角太阳辐照和实时负荷
Table 3 Solar irradiation of photovoltaic inclined planes at different angles considering temperature and hourly loads

时间	8°斜面辐射量/ (W/m ²)	10°斜面辐射量/ (W/m ²)	12°斜面辐射量/ (W/m ²)	负荷/kW
0.5	0	0	0	0.0
1.5	0	0	0	0.0
2.5	0	0	0	0.0
3.5	0	0	0	0.0
4.5	0	0	0	0.0
5.5	0	0	0	0.0
6.5	85	84	83	0.0
7.5	245	242	240	0.0
8.5	411	406	402	0.0
9.5	549	543	537	0.0
10.5	652	644	638	0.5
11.5	681	672	665	0.0
12.5	682	673	666	10.9
13.5	640	632	625	11.5
14.5	534	527	522	7.8
15.5	408	403	399	3.7
16.5	269	266	263	0.0
17.5	114	112	111	0.0
18.5	4	4	4	15.5
19.5	0	0	0	15.5
20.5	0	0	0	26.4
21.5	0	0	0	16.6
22.5	0	0	0	0.0
23.5	0	0	0	0.0

综合考虑满足斜面上实际环境下光伏出力与负荷变化趋势、负荷满足率、弃光率低、总成本低等因素，当斜面倾角为10°时为最优角度。

在进行光伏系统容量设计时，光伏组件10年后功率衰减为91%，20年后功率衰减为15%；根据需求项目仅考虑系统5年内年2%的负荷增长率，后期再进行扩建电源以满足增长符合的需求；为保证系统20年期间负荷需求电力， $(1+i)^n \times \lambda / (1-\varphi_n)$ 取值为1.2。根据负荷日典型曲线图可以看出，18时以前负荷均小于光



图2 考虑温度后8°斜面辐射量与负荷关系图

Fig. 2 Relationship between 8° angle radiation and load by considering temperature

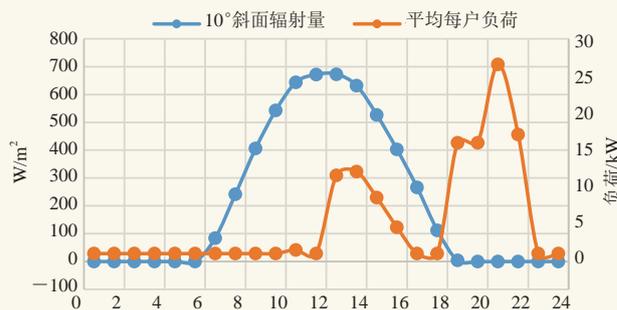


图3 考虑温度后10°斜面辐射量与负荷关系图

Fig. 3 Relationship between 10° angle radiation and load by considering temperature

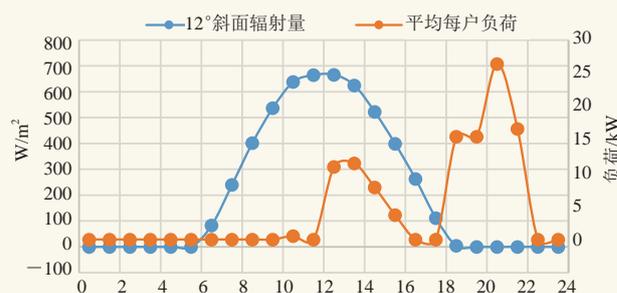


图4 考虑温度后12°斜面辐射量与负荷关系图

Fig. 4 Relationship between 12° angle radiation and load by considering temperature

伏出力，18时以后负荷出力大于光伏出力，因此白天光伏直接的供电量为34.43 kW·h，其他多余电能储存起来，晚上储能的供电量为74.02 kW·h，根据式(3)可得光伏的总装机容量为31.2 kW，考虑到光伏的组串组成，若采用315 W光伏板，装机容量为31.5 kW。

在进行储能容量设计时，为保持系统的经济性，仅考虑日照时当天备用，不考虑连续阴雨天供电，即m取值为0；DOD最大取值为0.7，温度修正系数暂取值为1，储能转换和逆变器逆变综合效率取值为0.92，根据该区域负荷特性，白天不存在负荷大于光伏出力，仅考虑晚上供电量的满足情况，因此可得储能的装机容量为126 kW·h，可采用158节2 V 400 Ah铅酸电

池组, 标称容量为126.4 kW·h。

采用如上系统配置后, 考虑到光伏、储能以及负荷用电, 第1年、第5年和第20年的典型日系统剩余电量累计图如图5所示, 可以看出, 第20年系统刚刚够满足负荷总体需求, 第21年由于光伏组件持续的年衰减, 系统发电量不足以支撑负荷用电, 也同时说明了本优化方案的合理性。

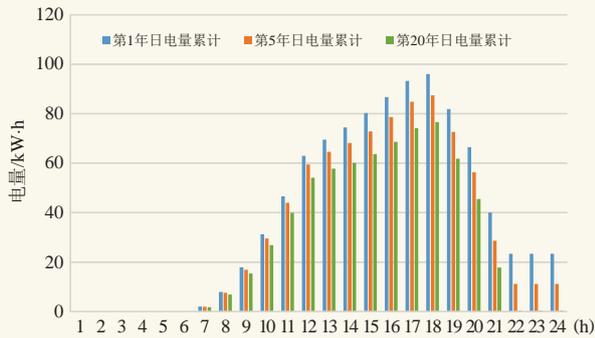


图5 第1、第5、第20年典型日电量剩余累计图

Fig. 5 Typical daily electricity residual accumulation in the 1st, 5th, and 20th years

4 结论

光储离网型发电系统利用当地的太阳能资源, 较经济地满足了偏远区和无电区人民的用电问题, 克服了传统采用柴油机发电带来的污染和高耗能问题。本

文从负荷分析、典型负荷提取、基于实际环境下光资源与负荷综合分析、容量优化设计等几个方面对光储离网型发电系统进行了优化设计, 并通过实际的案例进行了分析说明, 较好地满足了当地的供电需求, 也为后续为偏远区和无电区区域供电提供了参考。

参考文献

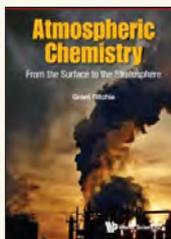
- [1] 张涛. 巴基斯坦50kW离网型风光互补发电系统设计. 太阳能, 2018, 4: 50-52.
- [2] 李丹, 彭军, 余岳峰. 离网型风光互补发电系统匹配方法优化研究. 广东电力, 2008, 36(3): 86-90.
- [3] 李品, 刘永前, 郭伟钊. 离网型风光储互补发电系统优化设计方法研究. 现代电力, 2010, 27(6): 51-57.
- [4] 高峰, 闫涛, 唐巍, 等. 独立风/光/储混合微电网多目标电源容量优化配置. 智能电网, 2016, 4(8): 802-810.
- [5] 连乾钧, 石磊, 康钦一, 等. 实用环境下光伏组件发电效率评价方法研究. 太阳能学报, 2018, 36(6): 1595-1599.
- [6] 余贻鑫, 孙冰, 马健. 计及用户停电损失的离网光伏与储能系统优化规划. 天津大学学报, 2016, 49(5): 443-449.
- [7] 刘冠群, 袁越, 王敏, 等. 考虑经济成本的光伏电站储能容量配置. 可再生能源, 2014, 32(1): 1-5.
- [8] 李翔, 顾洁. 运用聚类算法预测地区电网典型日负荷曲线. 电力与能源, 2013, 34(1): 47-50.
- [9] 李萌, 程浩忠, 杨宗麟, 等. 采用分形插值的典型日负荷曲线改进预测方法. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 36-41.
- [10] 修晓青, 唐巍, 马健. 用于储能容量配置的典型负荷曲线提取方法. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2234-2242.
- [11] 邓少平, 康慨, 别叶健, 等. 屋顶分布式光伏发电项目经济容量研究. 太阳能, 2017, 11: 18-24.
- [12] 邓芷欣, 康慨. 基于WRF模式的光伏电站系统优化设计研究. 电气应用, 2018, 37(11): 80-85.

新书架

NEW BOOK

编辑: 张萌

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Atmospheric Chemistry: from the Surface to the Stratosphere
《大气化学: 从地表到平流层》

编著者: Grant Ritchie
出版者: World Scientific Europe Ltd
出版年: 2016



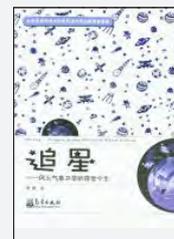
Remote Sensing Techniques and GIS Applications in Earth and Environmental Studies
《遥感技术和GIS在地球环境研究中的应用》

编著者: Abhisek Santra等
出版者: IGI Global
出版年: 2017



Hailstorms: Prediction, Control and Damage Assessment
《雹暴: 预测、防雹和灾害评估》

编著者: P. Kumar
出版者: CRC Press
出版年: 2017



《追星: 风云气象卫星的前世今生》

编著者: 曹静
出版者: 气象出版社
出版年: 2018

甘肃省风能太阳能气象服务业务平台开发及应用

张文波 闫晓敏 王亚同 邸燕君 王琦

(甘肃省气象服务中心, 兰州 730020)

摘要: 气象条件对风光电场功率预测及安全生产有着显著的影响, 开展新能源气象服务针对性研究具有重要意义。甘肃省气象服务中心以服务需求为导向, 开发风能太阳能气象服务业务平台, 实现了基础数据库、实时气象监测、数值预报与数据分析、发电功率预测及业务管理显示等功能。业务应用结果表明, 系统运行稳定, 体现了气象部门在数值天气预报方面的技术优势和风光电场的业务运行特点, 提高了新能源气象服务效率和质量, 在省级区域具有一定的应用推广价值。

关键词: 风能太阳能, 平台开发, 模型训练, 风光发电预测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.018

Development and Application of Wind Energy Solar Meteorological Service Business Platform in Gansu Province

Zhang Wenbo, Yan Xiaomin, Wang Yatong, Di Yanjun, Wang Qi

(Gansu Provincial Meteorological Service Center, Lanzhou 730020)

Abstract: Meteorological conditions have a significant impact on wind power field power forecasting and safe production. Therefore, it is important to carry out targeted research on new energy meteorological services. The Gansu Meteorological Service Center is guided by service demand and has developed a wind energy solar meteorological service business platform. This platform includes basic databases, real-time weather monitoring, numerical forecasting and data analysis, power generation power forecasting and displays business management. The results of this business application show that the system runs stably. The platform provides technical advantages to meteorological departments for numerical weather forecasting, can improve operation of wind farms, and improves the efficiency and quality of new energy meteorological services. It has concrete application and promotional value in some provincial areas.

Keywords: wind energy and solar energy, platform development, model training, wind and solar power generation forecast

0 引言

风能太阳能作为重要的清洁能源拥有巨大的发展前景^[1-4]。甘肃是我国风能太阳能资源最为丰富的省份之一, 为首批建成的千万千瓦级新能源基地。由于风能和太阳能随机性和波动性的特点, 风光电大规模接入将对电力系统产生巨大影响, 再加上清洁能源装机增长与用电能力增长反差不断加大, 自身消纳市场培育不足等因素, 甘肃成为全国弃风弃光最为严重的地区之一。开展风、光发电功率预测, 不仅可为发电企业提供检修和电量交易的依据, 也可以减轻风光电对电网的不利影响, 进一步提高风能太阳能的利用效率。

由于风能、太阳能发电及相关设备数量庞大、分

布广泛, 开展风、光发电功率预测, 需要对风电场、光伏电站日常工作过程中大量数据进行采集、存储和分析, 并对数据进行有效管理和监控。甘肃省气象服务中心在新能源服务过程中, 气象服务信息缺乏统一存储和管理, 业务流程自动化、集约化水平较低, 制约了新能源气象服务业务的发展。2017年, 甘肃省气象局通过“丝绸之路经济带西北五省区公路交通和风光太阳能气象保障服务工程”项目, 着手研发风能太阳能气象服务业务平台, 并于2018年10月, 初步完成平台的研发工作。

1 国内外研究现状

欧美风电大国在风电场端和电网调度端都建立了风电功率预测系统, 并制定了相应的管理制度。西班牙、爱尔兰等国家(地区)电网公司以及美国新墨西哥电力公司(PNM)和美国德克萨斯州电力可靠度委员会(ERCOT)对风电场功率预测提出强制性

收稿日期: 2018年11月9日; 修回日期: 2018年12月27日
第一作者: 张文波(1989—), Email: 894645529@qq.com

要求。同时，国外一些学者已经就如何提高风电功率预测准确率方面做了大量研究工作^[5-7]。美国国家大气研究中心（NCAR）的风能太阳能临近和短期预报系统和可视化平台，综合了四维实时资料同化、集合数值预报、变分多普勒雷达风矢量反演以及云飘移的卫星探测等现代天气预报技术，可以提供时间尺度15 min~5 d的发电功率预报以及结冰和电力负荷预测预警等；法国电力集团基于欧洲中期预报中心（ECMWF）气候系统模式回算和美国国家环境预报中心（NCEP）数值天气预报再分析资料，开展了月尺度和季节尺度水电预测业务试验。

国内气象部门为电力部门主要提供专业气象服务，并为电力公司或电力企业研发了服务系统^[8-10]，如青海省气象局2015年建立了青海省光伏电站气象信息服务集成系统，服务产品包括24 h逐时辐射量预报、候辐射量预报、周辐射量预报、旬辐射量预报、月辐射量预报、季辐射量预报和年太阳辐射量预报。同时也有高校、气象部门或公司为电力部门提供更加精细化的新能源气象服务，研发的服务系统有电网端和电场端的风、光伏发电功率预测系统等，为电力调度部门和风光电场提供未来72 h的短期功率预测和未来4 h的超短期功率预测^[11-15]。

2011年，国家能源局下发的国能新能[2011]177号文件（《风电场功率预测管理暂行办法的通知》）要求，2012年1月1日前所有风电场经营企业须按照文件要求提供风电功率日预报和实时预报。为了拓展专业气象服务领域，甘肃省气象服务中心引进中国气象局公共气象服务中心风功率预测系统，并在华电甘肃分公司5家风电场投入业务运行；2013年，甘肃省气象服务中心引进湖北省气象服务中心光伏、风电功率预测系统，先后在甘肃省20余家风电场和光伏电站投入业务应用。系统的引进和应用为甘肃省气象服务中心拓展专业气象服务领域、新能源气象服务技术研发提供了支持和帮助。2016—2018年，因市场需求和业务需要，甘肃省气象服务中心在之前开展新能源气象服务业务的基础上，依托项目完成了光功率预测系统、风功率预测系统、风能太阳能气象服务业务平台的研发。

2 系统设计与实现

2.1 总体设计

风能太阳能气象服务业务平台主要业务模块为风能太阳能基础数据库、风能太阳能气象数据监测、风能太阳能数据分析、风能太阳能区域功率预测、风能太阳能气象服务业务管理显示五大模块（图1）。

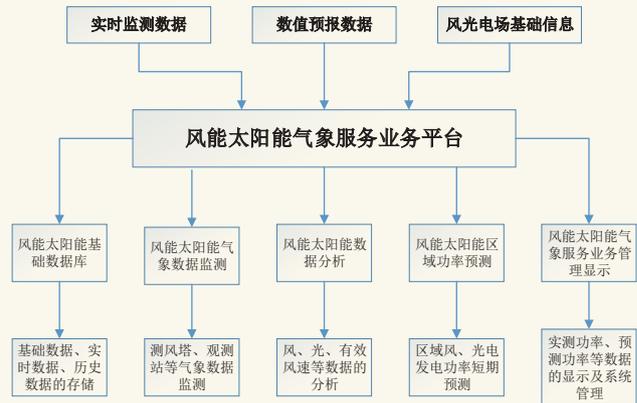


图1 风能太阳能气象服务业务平台设计结构
Fig. 1 Design structure of wind energy solar weather service business platform

2.2 主要功能

1) 风能太阳能基础数据库：实现风光电场风机位置等基础地理信息的存储和读取；实现风光电场装机总量、风机型号、逆变器型号、风机参数、逆变器参数等业务基本信息的存储和读取；实现风光电场历史数值预报、实况监测等功率预测相关信息的存储和读取。

2) 风能太阳能气象数据监测：实现区域内全部测风塔、太阳辐射实时观测数据的监测显示。

3) 风能太阳能数据分析：实现风光观测信息、实时发电功率、预测发电功率等数据的统计分析，实现有效风速、数值预报风速分布、数值预报平均风速、机头风速、有效辐射等数据的计算分析。

4) 风能太阳能发电功率预测：针对区域内风能资源、光能资源进行短期预报，实现电网区域内发电功率预测。

5) 风能太阳能气象服务业务管理显示：实现风、光电场的设置，风机型号设置，风机信息设置，测风塔信息设置，逆变器信息设置，辐射观测站信息设置，用户管理等功能；实现西北五省区单个、区域风光电场展示功能；实现各类风能太阳能数据显示功能。

2.3 关键技术

2.3.1 功率预测

1) 单场功率预测

单场功率预测是以风光电场的历史气象要素、历史功率、地形地貌、数值天气预报、机组运行状态等数据建立风光电场输出功率的预测模型，预测风光电场的未来72 h逐15 min的短期功率和未来4 h逐15 min的超短期功率。风功率预测主要方法有原理



图2 风电场风速功率对比案例

Fig. 2 Comparison of wind and speed power at wind farm



图4 光伏电站辐射功率对比

Fig. 4 Comparison of radiation power at the photovoltaic power station

法、统计法、自适应偏最小二乘回归方法等，光功率预测的主要方法有原理法、统计法、误差订正法等（图2—图5）。

2) 区域功率预测

考虑到同一区域内电场规模、地理位置、风光状

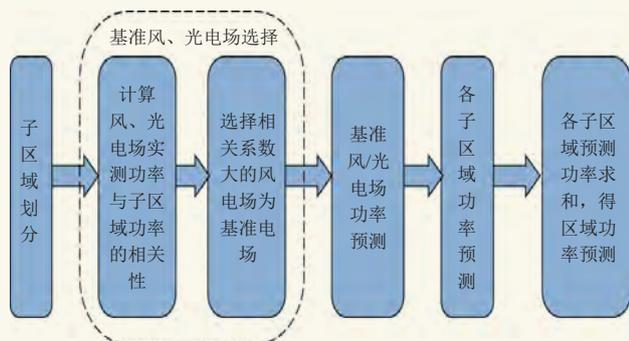


图6 区域功率预测思路

Fig. 6 Regional power prediction

素预报，同时结合区域内风、光电装机总量、机组参数等信息，实现各省（区、市）区域风、光未来7天总功率预测，也可任意选择某段电网线路区域，实现区域内未来7天的功率预测。

单场功率预测采用风电场或光伏电站的历史数据、实时数据以及机组运行工况对风光电场的功率进

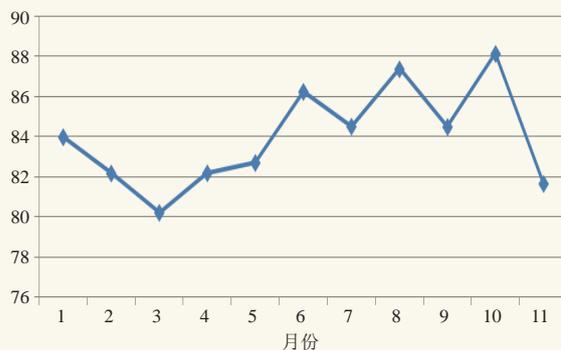


图3 风电场月准确率统计

Fig. 3 Wind farm monthly accuracy rate statistics

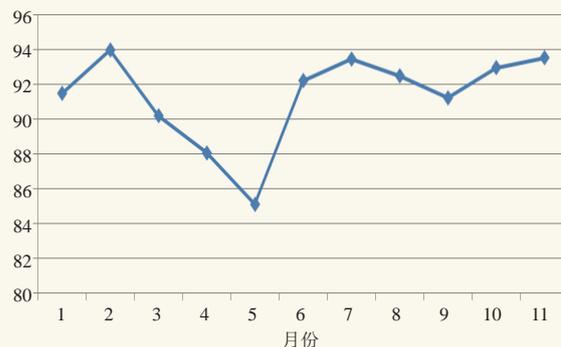


图5 光伏电站月准确率统计

Fig. 5 Monthly accuracy statistics at the photovoltaic power station

况等的差异，以及各个电场预测误差的不同，采用区域功率预测能够平滑各个电场的预测误差，使整个区域内的预测精度更为准确，更有利于调度安排运行方式和备用（图6、图7）。平台主要采用时空分布特性的区域功率预测方法^[16]，根据风速、辐射2种气象要

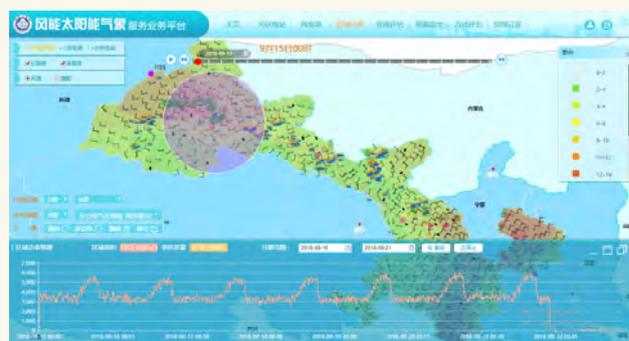


图7 区域功率预测案例

Fig. 7 A case of regional power prediction

行预测，主要应用于发电企业下属的风电场、光伏电站。而区域功率预测需要结合预测区域内风光电场的装机、机组参数等信息对该区域的功率进行预测，主要服务于当地电网公司的调度部门。

2.3.2 资源评估

风光资源评估主要根据自建自动站、区域站、测

风塔、测光站数据，实现对各省（区、市）风光能资源逐年、逐月、逐季的评估，评估要素有平均风速、平均温度、最大风速、总辐射、直接辐射、平均风功率密度、平均有效利用小时数（图8）。

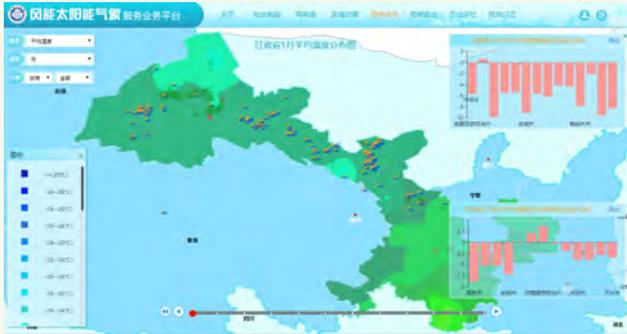


图8 资源评估图案例

Fig. 8 An example of resource evaluation pattern

2.3.3 模型训练

模型训练主要采用递归的方法对风光电预测模型中可调的参数进行多次训练，得出最优值（图9）。通过对风电功率预测模型（原理法、统计法等）和光电功率预测模型（原理法、误差订正法等）的训练，获得最优的模型参数，实现对预测模型的训练改进。同时可对各类风光电数值预报源进行检验，主要通过预报准确率、均方根误差、平均绝对误差及相关性系数4项指标进行分析，最终获得适宜电场的数值预报源。

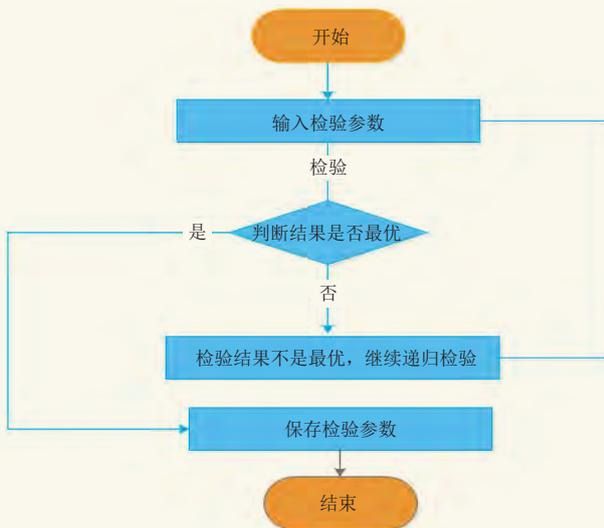


图9 模递归调用流程图

Fig. 9 Flow chart of modular recursive call

2.3.4 数据的统计分析

风能太阳能数据统计分析主要实现历史功率数据统计分析，包括数据完整性、分布特性、变化率统计分析等。实现历史测风数据、测光数据、数值天气预

报数据的统计分析，包括完整性、风速分布、风向分布、辐照度频率分布、日照时数统计分析等。实现历史数值天气预报数据统计分析，包括畅通率统计、误差频率分布统计等。

2.3.5 数据库的建设

数据库的建设主要包括数据的管理存储及接入。数据的管理存储主要采用分布式大数据存储技术，具有较高的可扩展性（可扩展新增业务数据的采集、监控、显示等功能）和可移植性。数据的接入主要采用人工录入（基础业务数据）、实时采集入库（数值天气预报数据）、批量备份、增量式备份导入数据文件（电场历史数据）的方式接入数据。

3 系统应用与效果检验

3.1 系统应用

风能太阳能气象服务平台已在甘肃省气象服务中心完成本地化部署，并投入业务使用。应用结果表明，系统运行稳定、功能齐全、信息丰富，很大程度地提高了气象部门新能源气象服务的效率和电力部门的经济效益。同时该系统即将在陕西、宁夏、青海、新疆四省（区）进行安装试运行。系统的应用界面如图10。



图10 系统的应用界面

Fig. 10 System application interface

3.2 效果检验

自风能太阳能气象服务业务平台投入业务运行以来，甘肃省气象服务中心加强了对数值预报的传输监控和校验订正，数值预报月传输率为100%。同时定期采用风电场的历史资料对风光电转换模型进行训练，及时对模型进行优化。2018年9—11月，9家风电场短期功率预测准确率较之前平均提升4个百分点左右，超短期功率预测准确率较之前平均提升3个百分点左右，其中大部分风电场短期和超短期预报准确率满足电力调度部门的要求；18家光电短期和超短期功率预测准确率较之前平均各提升2个百分点左右，所有光伏电站短期和超短期预报准确率均能满足电力调度部门的要求（表1）。

表1 平台应用前后风电场月平均短期准确率对比
Table 1 Comparison of monthly average short-term accuracy of wind farms before and after the platform application

风电场	应用前准确率/%	应用后准确率/%	平均提高幅度/%
AKS	63.87	72.90	9.03
JYXQ	78.72	84.92	6.20
HYZ	88.58	89.61	1.03
MCS	84.82	87.33	2.51
HTXNY	83.33	83.38	0.05
DTWW	64.01	68.64	4.63
ZDTTY	75.59	80.21	4.62
YHBL	83.51	85.70	2.19
HNYG	80.71	84.84	4.13

4 结论与讨论

风能太阳能气象服务业务平台自项目开发、部署工作完成后，通过业务检验，平台运行稳定，可操作性强，反映了相关技术的相对成熟。平台具有以下特点：

- 1) 实现了风光电场数据、气象数据和GIS地图(地理信息)的有效叠加显示；
- 2) 系统数据信息传输稳定准确，专业性强；
- 3) 数据访问接口耦合性低、移植性高，便于推广应用。

将该系统应用于新能源气象服务业务中，能够帮助业务人员快速、精确地掌握天气条件，实现对风光电数值预报的订正、风光电转换模型的优化，有

效提升了风光电场短期功率预测准确率，提高了风光电场的经济效益。因此，该系统具有良好的应用推广价值。

参考文献

- [1] 韩自奋. 风电功率预测研究. 武汉大学, 2012.
- [2] 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等. 中国风能资源贮量估算. 太阳能学报, 2001, 22(2): 167-170.
- [3] 中国气象局. 中国风能资源评估报告. 北京: 气象出版社, 2007.
- [4] 王勇, 李照荣, 李晓霞, 等. 风电功率预报方法研究进展. 干旱气象, 2011, 29(2): 156-160.
- [5] Connor G J. Statistical short-term forecasting technique for wind and temperature in a coastal tropical location (Townsville). Australian Meteorological Magazine, 1997, 46: 257-265.
- [6] Kristin A L, Tilmann G. Advanced short-range wind energy forecasting technologies-challenges, solutions and validation. Rreprint of flieconference "Global Wind power", Chicago, March 2004, 28-31.
- [7] Caren M, Gregory J S. A neural network for damaging wind prediction. Weather and Forecasting, 1998, 13: 151-163.
- [8] 李华伟, 周照. 电力气象服务平台研究. 气象研究与应用, 2012, 33(S1): 291-293.
- [9] 于万荣. 山西省电力气象服务系统研究. 电子科技大学, 2012.
- [10] 张静, 郭广, 保广裕. 青海电力专业气象预报服务产品制作及发布集成系统的开发. 青海电力, 2015, 34(4): 11-14, 36.
- [11] 赵宪刚. 一种面向能源互联网的集中式风功率预测的系统设计. 天津大学, 2017.
- [12] 陈正洪, 许杨, 许沛华, 等. 风电功率预测预报技术原理及其业务系统. 北京: 气象出版社, 2013: 1-47.
- [13] 邓隰北, 黄仁珠. 光伏发电功率的短期预测系统的开发与应用. 电源世界, 2017(11): 50-53.
- [14] 臧芳. 风功率预测系统设计与实现. 山东大学, 2016.
- [15] 王知嘉, 崔方, 程序. 光伏电站功率预测系统开发与与设计. 智能电网, 2016, 4(2): 203-208.
- [16] 李伟花. 考虑时空分布特性的区域风电功率预测方法. 华北电力大学, 2015.

新书架

NEW BOOK

编辑: 张萌

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



《释放气象资源活力: 中国气象服务产业发展报告(2017)》

编著者: 中国气象服务协会
出版者: 气象出版社
出版年: 2018



《珠穆朗玛峰地区气候环境变化评估》

编著者: 康世昌
出版者: 气象出版社
出版年: 2018



《自动放球系统技术指南(试行)》

编著者: 中国气象局气象探测中心
出版者: 气象出版社
出版年: 2018



《云南气象研究概览》

编著者: 解明恩 张万诚
出版者: 云南科技出版社
出版年: 2018

靠近迭代法获取湿球温度初探

刘银秀¹ 熊守权²

(1 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074; 2 湖北省气象服务中心, 武汉 430205)

摘要: 主要探讨了通过靠近查询、迭代求算获取自动气象站湿球温度的方法。以戈夫-格雷奇 (Goff-Gratch) 公式为基础, 编制了湿球未结冰条件下, 气温 t 位于 $0 \sim 48 \text{ }^\circ\text{C}$, 间隔为 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的小型湿度查算表, 其中包含: 每个 t 值对应湿球温度 t_w 、水汽压 e 、相对湿度 U 、气压订正参数 n 。它可帮助满足自动气象站资料已知 t_1 、 e_1 , 批量求算 t_{w1} 的工作。首先将 t_1 、 e_1 表与小型湿度查算表进行联表靠近查询, 再以 t 、 e 、 t_w 为基础, e 不变, 对 t_w 进行步长为正负 0.1 的迭代计算。迭代过程中, t 随着 t_w 的值不断变化。令变化中的湿球温度为 t'_w , 相应的气温为 t' , 当 $|t' - t_1|$ 为最小值时, t'_w 便是所求的湿球温度 t_{w1} , 为提高精度, 也可对 t_{w1} 进行适当订正。

关键词: 湿球温度, 靠近查询, 迭代求算

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.019

Preliminary Study on Calculating Wet Ball Temperature Using a Near Iterative Method

Liu Yinxiu¹, Xiong Shouquan²

(1 Hubei Meteorological Information and Technology Security Center, Wuhan 430074

2 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205)

Abstract: This paper mainly discusses the method of obtaining the wet ball temperature of automatic weather station by close query and iterative calculation. Based on the Goff-Gratch formula, a small humidity check scale with temperature at $0 \sim 48 \text{ }^\circ\text{C}$ and intervals of $3 \text{ }^\circ\text{C}$ under unfrozen conditions is prepared. This check scale includes wet ball temperature t_w , vapor pressure e , relative humidity U , and pressure correction parameter n at each t value. The small humidity checklist can enable the calculation of t_{w1} in batch using automatic weather station data such as t_1 and e_1 . First, the t_1 and e_1 tables are linked to the small humidity checklist to make a close query. Secondly, an iterative calculation of t_w with a step length of ± 0.1 is performed using t , e , and t_w values while keep e value unchanged. During this iteration, t changes with the value of t_w . Assume that the temperature of the changing wet ball is t'_w and the corresponding air temperature is t' . The t'_w is the solution of wet ball temperature t_{w1} when $|t' - t_1|$ reaches the minimum value. In order to improve the accuracy, t_{w1} can be adjusted appropriately.

Keywords: wet ball temperature, close to query, iterative calculation

0 引言

湿球温度是表征大气物理状态的一个要素。是气象台站曾经的最基本测定项目之一。进入21世纪后, 由于我国地面气象观测系统的自动化, 相对湿度值由仪器自动测定, 各气象台站基本停止了湿球温度要素观测, 但在实际气象服务中, 有时还要用到湿球温度: 如核电厂冷却塔设计中, 确定最终热阱系统的容量时, 必须规定设计基准气象参数, 首先确认了内陆核电站最终热阱关键气象参数之一为空气湿球温度^[1]; 再如大容量火电机组凉水塔效率的计算^[2]; 还

有湿热地区城市热环境评价^[3]等。如何获取新时期湿球温度的历史资料, 不少学者进行了诸多探索。王海军^[4]为解决无湿球温度资料给工程设计带来的问题, 分别设计了逼近法 (实际上就是迭代法) 和多元回归法估计湿球温度, 指出采用逼近法估计湿球温度误差很小; 湿球结冰对湿球温度的估计影响不大。目前国内很多学者多以气象学公式为基础, 运用迭代法来完成湿球温度的插补^[5-8]。朱业玉等^[9]根据气压分布型特点和分段函数, 提出利用干球温度和相对湿度来计算湿球温度的新方法。

魏华兵等^[6]利用湿球温度的经验公式计算初始值, 采用Excel电子表格完成湿球温度的迭代计算自动气象站湿球温度, 并指出“迭代法进行推算时, 要先

收稿日期: 2018年8月22日; 修回日期: 2019年1月10日

第一作者: 刘银秀, (1962—), Email: lyxqsq@163.com

通信作者: 熊守权, (1961—), Email: 2697789280@qq.com

给迭代变量赋予一个初始值，而初始值的选用对迭代过程的计算至关重要”。并根据指定气象站实测的气温和相对湿度资料用泰勒多项展开式对参数进行求算初始值，其初始值结果是“只有在气温为10~20℃，相对湿度为80%~90%时，计算误差稳定，而其他情况下，误差很不稳定，误差有时超过10%”。另外，其初始值资料不具备普适性。

朱业玉等^[9]、魏华兵^[6]在湿球温度求算过程中均使用了相对湿度。在《湿球温度查算表（甲种本）》中，相对湿度的分布情况比较宽泛：在气温相同的情况下，一个相对湿度可以对应3~6个湿球温度值。如 $t=48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $U=1\%$ 时，对应了6个湿球温度值； $t=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $U=15\%$ 时，对应了4个湿球温度值； $t=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $U=13\%$ 时，对应了3个湿球温度值。程智等^[5]指出，“从干球温度以下15℃的范围内选取湿球温度的估计值，每次将湿球温度估计值递增0.01℃（根据实际经验，15℃的范围是足够宽的），因此可以得到 $m+1$ 个估计值”迭代次数1500次。

在实际气象资料服务中，作者感觉上述方法实现起来不够简捷，试图利用湖北省70多个站的近50万条包含湿球温度的历史记录，通过SQL Server数据库查询手段，采用气温、水汽压相等或约等的方法，对近年的资料进行关联查询获取湿球温度，以满足客户所需。但出现了要么找不到匹配值，要么找到了多个相互差异较大的值。受人工从《湿球温度查算表（甲种本）》中反查湿球温度过程的启发，盟生了建立“小型湿度查算表”，以水汽压不变、气温逼近的原理进行迭代计算的思路。

1 资料来源与方法

本文使用实际观测数据作为测试数据，为湖北气象档案室提供的区站号57476、57482两个站1981—1991年5—9月的定时观测数据，含定时气温、定时水汽压、定时相对湿度、定时气压、定时湿球温度等多个要素，共计11780条实测记录（剔除不明记录后）。

1.1 基本原理

《湿度查算表（甲种本）》中，湿度查算表是以戈夫-格雷奇（Goff-Gratch）公式为基础编制的。考虑到实际应用，如核电厂冷却塔设计中，所需资料均是相对高温的情况，故本文只进行了湿球未结冰（纯水）状态下湿球温度的计算方法探讨。

（Goff-Gratch）公式中，纯水饱和水汽压

$$\lg e_w = 10.79574 \left(1 - \frac{T_1}{T} \right) - 5.02800 \lg \left(\frac{T}{T_1} \right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{T_1} - 1 \right)} \right] + 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_1}{T} \right)} - 1 \right] + 0.78614$$

式中，纯水饱和水汽压 e_w （单位：hPa，温度范围：-49.9~49.9℃）； $T_1=273.16\text{ K}$ （水的三相点温度）； $T(\text{K})=273.15+t\text{ }^{\circ}\text{C}$ （绝对温度）。

干、湿球温度求空气中水汽压的计算公式

$$e = e_{t_w} - AP(t - t_w) \quad (2)$$

t 为干球温度， t_w 为湿球温度，单位℃； e_{t_w} 为湿球温度 t_w 所对应的纯水饱和水汽压， A 为干湿表系数。

湿度查算表中，取 $P=1000\text{ hPa}$ ；在湿球未结冰时， $A=0.667 \times 10^{-3}\text{ } (^{\circ}\text{C}^{-1})$

由式（2）推导

$$t = \frac{e_{t_w} - e}{AP} + t_w \quad (3)$$

在式（3）中，变化的 e_{t_w} 和 t_w 对应变化的 t ，故推出公式（4）

$$t' = \frac{e'_{t_w} - e}{AP} + t'_w \quad (4)$$

另外，《湿球温度查算表（甲种本）》湿球温度气压订正值 Δt_w （℃）的公式为

$$\Delta t_w = \frac{n}{10} \times \frac{AP_0 - A_i P}{500A} \quad (5)$$

P 为实测本站气压； $P_0=1000\text{ hPa}$ ； A 的意义和取值同上，百叶箱通风干湿表 $A=A_i$ 。

1.2 靠近迭代法实现步骤

靠近迭代法实现中，主要借助了SQL Server数据库、VBA两个工具。

首先需要建立一个纯水饱和水汽压函数。利用式（1），通过自变量气温 t 可以直接获取对应的纯水饱和水汽压 e_w 。湿球温度 t_w 所对应的纯水饱和水汽压 e_{t_w} 需要也通过此函数获得；其次建立小型湿度查算表：应用饱和水汽压函数和上述原理，构建从0~48℃，步长为3℃的小型湿度查算表（下称“小型湿度查算表”，示例见表1）。共包含0℃、3℃、6℃、9℃……直到39℃、42℃、45℃、48℃共17个气温对应的湿度查算表，总计2844条记录。每条记录含5个字段： t 、 t_w 、 U 、 e 、 n 分别表示气温（干球温度）、湿球温度、相对湿度、水汽压、对湿球温度进行气压订正时的订正参数。

被计算对象（实际观测数据）的对应数据入库，

表1 小型湿度查算表示例
Table 1 Example of a small humidity checklist

t	t_w	U	e	n	t	t_w	U	e	n
30	10.9	1	0.3	41	39	16.0	4	2.8	42
30	11.0	1	0.4	41	39	16.1	4	3	41
30	11.1	1	0.6	41	39	16.2	5	3.2	41
30	11.2	2	0.8	40	39	16.3	5	3.4	41
30	11.3	2	0.9	40	39	16.4	5	3.6	40
30	12.4	6	2.7	36	42	16.7	3	2.1	45
30	12.5	7	2.8	36	42	16.8	3	2.3	44
30	12.6	7	3	35	42	16.9	3	2.5	44
30	12.7	7	3.1	35	42	17.0	3	2.7	44
30	12.8	8	3.3	35	42	17.1	4	2.9	43
30	12.9	8	3.5	35	42	17.2	4	3.1	43
30	13.0	8	3.6	34	42	17.3	4	3.3	43
30	13.1	9	3.8	34	42	17.4	4	3.5	42
30	13.7	11	4.8	32	45	17.8	2	2.2	46
33	29.1	75	37.7	4	45	17.9	3	2.4	46
33	29.2	76	38	4	45	18.0	3	2.6	45
33	29.6	78	39.2	4	45	18.4	4	3.4	44
33	29.7	79	39.5	4	48	19.4	3	3.4	46
36	33.9	87	51.5	2	48	19.5	3	3.6	45
36	34.0	87	51.9	2	48	19.6	3	3.9	45
36	34.1	88	52.2	2	48	19.7	4	4.1	45
36	34.2	89	52.6	2	48	19.8	4	4.3	44
36	34.3	89	53	2	48	19.9	4	4.5	44
36	34.4	90	53.3	1	48	20.0	4	4.7	44
36	34.5	90	53.7	1	48	20.1	4	4.9	43

含区站号、时间、 t_1 、 p_1 、 e_1 等信息；在入库时，要加上一个“序号”字段，为后期的各项处理，提供一个纽带。先用结构查询语言联接查询，查询条件为 $|e_1 - e| \leq 0.2$ ， $|t_1 - t| \geq -3$ 和 $|t_1 - t| \leq 10$ ，然后对查询结果进行迭代。

1.2.1 靠近迭代法整个流程变量说明

t 、 e 、 t_w 分别为从“小型湿度查算表”获取的气温、水汽压及对应的湿球温度； t_1 、 e_1 、 t_{w1} 分别为观测值气温、水汽压及对应的需要求取的湿球温度； t' 、 t'_w 分别为迭代时的临时气温值、迭代时的临时湿球温度，二者均随迭代的推进持续变化。 $\Delta t_w = \pm 0.1$ ，为 t'_w 的迭代步长。 $\text{dif}_t = |t_1 - t'|$ 为迭代时的临时气温值与观测值气温的差值绝对值，是控制迭代终点的关键变量。 k 代表迭代次数。

1.2.2 迭代方法与经验

靠近迭代法是指利用式(4)，以 t 所对应的湿球温度 t_w 为基础，当 $t_1 < t$ 时， $\Delta t_w = -0.1$ ，称为负向迭代；反之，当 $t_1 > t$ 时， $\Delta t_w = 0.1$ ，称为正向迭代。在正常迭代过程中， dif_t 会渐渐由大变小，到达谷点（通常低于0.5）以后，再开始渐渐由小变大（见图1）。

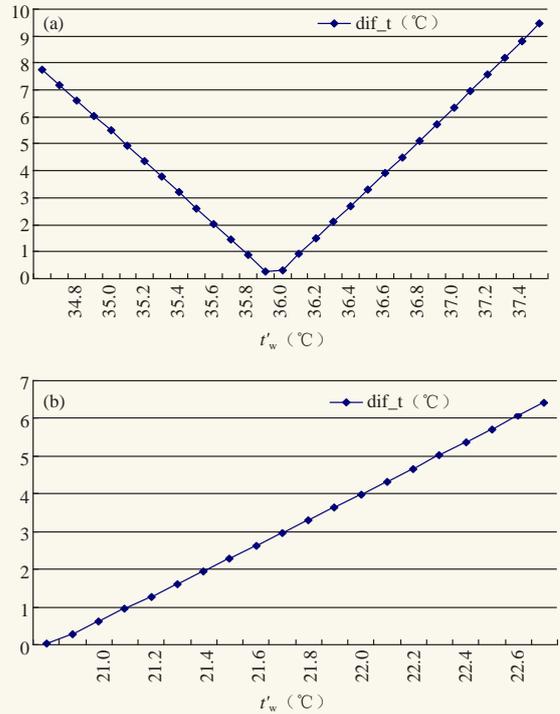


图1 dif_t随 t'_w 的变化图
Fig. 1 The change of dif_t with t'_w

dif_t 的谷点，所对应的临时 t'_w 便是迭代所求的湿球温度。

图1a为 $t=40$ ， $e=51.6$ ， $t_w=34.7$ ， $t_1=48$ 时， dif_t 随 t'_w 的变化图。图中，谷点 $t_{w1}=36.0$ ， $\text{dif}_t=0.278427$ 。

根据作者迭代经验，运用本迭代法时需要注意如下几点：

- 1) 迭代起点为 $t'_w = t_w$ 。当 dif_t 单调上升时， t_{w1} 会在起点。例如图1b： $t=24$ ， $e=22.6$ ， $t_w=20.9$ ， $t_1=24.1$ 时， $t_{w1}=20.9$ 。
- 2) 取迭代结果时，需满足 $t_{w1} < t_1$ 。
- 3) 迭代次数的上限设为100次足以满足迭代需求。
- 4) dif_t 的谷点上限值设为0.5 °C。

2 结果与分析

作者共进行了两种数据测试：在实际观测数据测试的基础上，为了考察靠近迭代法在各个数据段湿球温度结果的准确度，又进行了典型数据测试。

2.1 实际观测数据测试

选取江汉平原西部荆州和北部的孝感（区站号分别为57476、57482）两个站1981—1991年5—9月的定时观测数据，含定时气温、定时水汽压、定时相对湿度、定时气压、定时湿球温度等多个要素，共计11780条实测记录（剔除不明记录后）。通过与“小型湿度查算表”联合查询共查出60838条记录。实测

记录每条对应1~21条查询结果(表2)。

表2 实测记录数对应查询结果数分布情况表(单位:条)
Table 2 The number of measured records corresponding to the distribution of query results (unit: record)

查询结果数	1	2	3	4~8	9~13	14~18	20	21	合计
实测记录数	67	1716	1040	7709	1158	88	1	1	11780

60838条记录迭代次数分布情况:迭代次数出现次数最少1次,最多52次,87.2%的记录迭代次数在15次以内;92.9%的记录迭代次数在20次以内;98.5%的记录迭代次数在30次以内;迭代次数在35次以上的只有0.5%的记录。

设 t'_{w1} 为测试对象历史资料中已有的与 t_1 、 e_1 对应的湿球温度。 t''_{w1} 为 t_1 、 e_1 人工查算纸质《湿球温度查算表(甲种本)》得到的湿球温度。

计算湿球温度结果与实际观测结果的差值绝对值,共有53416条记录(占总数的87.8%) $|t'_{w1}-t_{w1}| \leq 0.2$,共有57277条记录(占总数的94%) $|t'_{w1}-t_{w1}| \leq 0.3$ 。对剩余的3561条 $|t'_{w1}-t_{w1}| > 0.3$ 的记录,在《湿球温度查算表(甲种本)》中,逐条通过实测气温、实测水汽压反查湿球温度:求算湿球温度结果与反查结果的差值绝对值,3373条 $|t''_{w1}-t_{w1}| \leq 0.1$,只有186条 $|t''_{w1}-t_{w1}| = 0.2$ 。

因此,求算湿球温度结果与实际观测结果的差值绝对值均 ≤ 0.3 ,其中共有56977条记录(占总数93.7%) ≤ 0.2 。因此,当一条实测记录对应多条查询结果时,选取其中任一条结果均是可行的。

2.2 典型数据测试

选择0、5、10、15、20、25、30、35、40、45℃共10个 t 值,每个 t 值对应5个相对湿度值, U 值分别为10%(或者5%)、30%、50%、70%、95%,合计50条记录。计算50条记录各自对应的 e 值,通过查《湿度查算表(甲种本)》获取相应的 t_w 值。

50条记录,每条分别人为相应设置2组 t_1 、 e_1 值($|e_1-e|=0.2$),整个典型数据测试共100条数据:一组 $t_1 < t$,另一组 $t_1 > t$,两组中 $|t_1-t|$ 接近5℃。当 $t_1 < t$ 时,二者差距要小一点。因为差距大了会超出极限情况:如 $t=0$, $e=5.8$,取 $t_1=-0.3$ 。若 $t_1=-3$,对应的饱和水汽压仅为4.9,以上数值为基础负向迭代时, $e=5.8$ 就超出了极限,这种情况在实际中基本不会出现。迭代结果见表3(因表格太大,省略了5、15、25、30、35、45℃等 t 值)。

设 t''_{w0} 为 t_1 、 e 人工查算纸质《湿球温度查算表(甲种本)》得到的湿球温度, t'_{w1} 为 t_1 、 e_1 人工查算纸质《湿球温度查算表(甲种本)》得到的湿球温度。

从表3可见,最大迭代次数 < 30 ; $|t''_{w0}-t_{w1}| \leq 0.1$,其中96%的结果为0.0,表明迭代法的迭代精度在0.1以内; $|t'_{w1}-t_{w1}| \leq 0.2$,其中18%的结果为0.2,误差稍大,如果通过后文所述 $e-e_1$ 的水汽压差值订正,湿球温度订正后的误差均在0.1以内。

2.3 相关问题分析

2.3.1 水汽压相差0.2对湿球温度的影响

选取气温为0℃、6℃、12℃、21℃、30℃、45℃,相对湿度为5%、50%、95%时,从“小型湿度查算表”查询统计湿球温度每增加0.1℃时水汽压的变化值。

从表4可见,高温高湿的条件下,水汽压随湿球温度的变化大。在气温 ≤ 30 ℃,无论相对湿度多少(或者温度低于36℃,且相对湿度低于50%)的前提下,当 $\Delta e = e - e_1 = 0.2$ 时,如果对迭代的湿球温度结果减去0.1;当 $\Delta e = e - e_1 = -0.2$ 时,如果对迭代的湿球温度结果加上0.1,湿球温度结果将更精确。一般湿度情况下,气温高于30℃时,水汽压的变化值0.2 hPa对湿球温度的精度影响在0.1℃以内,即使不结合 $e - e_1$,对迭代的湿球温度进行上述订正,所得湿球温度的误差 ≤ 0.2 。

典型数据测试中,通过 $e - e_1$ 的水汽压差值对湿球温度 t_{w1} 结果订正,订正后的湿球温度与查《湿球温度查算表(甲种本)》的结果相差均在0.1以内(表3)。

实际观测数据测试中186条 $|t''_{w1}-t_{w1}| = 0.2$ 的记录,对应实测气温为15~30℃,其中的182条 $\Delta e = 0.2$ 或 $\Delta e = -0.2$,按上述规则进行了0.1℃的湿球温度 t_{w1} 结果订正,进一步地提高了湿球温度求算结果的精度。

2.3.2 关于气压订正

整理式(5)得

$$\Delta t_w = \frac{n}{10} \times \frac{1000 - P}{500} \quad (6)$$

因为 $n > 0$,故 $|\Delta t_w|$ 与 $|1000 - P|$ 成正比。当 n 一定时, $|1000 - P|$ 越大, $|\Delta t_w|$ 越大。 $|\Delta t_w|$ 与 $|1000 - P|$ 同号:当 $P > 1000$ 时, $\Delta t_w < 0$;当 $P < 1000$ 时, $\Delta t_w > 0$ 。利用式(6)计算,得湿球未结冰时的“百叶箱通风干湿度表湿球温度气压订正值表”(表5)。

湖北省非山区站,全年极端最高气压约为1040 hPa,极端最低气压约为980 hPa,最小相对湿度一般大于10%。当相对湿度 $> 10\%$ 时,利用“小型湿度查算表”查询, n 值的最大值为34。从表5中可知,不进行气压订正,靠近迭代法所求湿球温度的误差绝

表3 不同温湿度段典型个例迭代情况表
Table 3 Typical case of iterations of at different temperature and humidity sections

序号	t	e	t_w	U	t_1	e_1	t'_{w1}	t'_{w0}	计算 t_{w1}	迭代次数 k	$e-e_1$	订正后的 t_{w1}	订正后的误差
1	0	0.6	-5.3	10	-0.5	0.8	-5.4	-5.6	-5.6	4	-0.2	-5.5	0.1
2	0	0.6	-5.3	10	2.4	0.4	-3.9	-3.7	-3.7	17	0.2	-3.8	-0.1
3	0	1.8	-4.1	30	-1	1.6	-4.9	-4.7	-4.7	7	0.2	-4.8	-0.1
4	0	1.8	-4.1	30	1.9	2	-2.6	-2.8	-2.8	14	-0.2	-2.7	0.1
5	0	3.1	-2.8	50	-2	3.3	-3.9	-4.1	-4.1	14	-0.2	-4	0.1
6	0	3.1	-2.8	50	2.5	2.9	-1.4	-1.2	-1.2	17	0.2	-1.3	-0.1
7	0	4.3	-1.7	70	-3	4.5	-3.4	-3.6	-3.6	20	-0.2	-3.5	0.1
8	0	4.3	-1.7	70	4	4.1	0.6	0.8	0.8	26	0.2	0.7	-0.1
9	0	5.8	-0.3	95	-0.3	5.6	-0.6	-0.5	-0.5	3	0.2	-0.6	0
10	0	5.8	-0.3	95	4	5.6	1.9	2.1	2.1	25	0.2	2	-0.1
21	10	1.2	1.6	10	6	1.4	-0.6	-0.8	-0.8	25	-0.2	-0.7	0.1
22	10	1.2	1.6	10	14	1	3.6	3.8	3.8	23	0.2	3.7	-0.1
23	10	3.7	3.7	30	6	3.9	1.6	1.4	1.4	24	-0.2	1.5	0.1
24	10	3.7	3.7	30	14	3.5	5.6	5.8	5.8	22	0.2	5.7	-0.1
25	10	6.1	5.6	50	6	6.3	3.6	3.4	3.4	23	-0.2	3.5	0.1
26	10	6.1	5.6	50	14	5.9	7.4	7.6	7.6	21	0.2	7.5	-0.1
27	10	8.6	7.4	70	6	8.4	5.3	5.4	5.4	21	0.2	5.3	0
28	10	8.6	7.4	70	14	8.8	9.5	9.3	9.3	20	-0.2	9.4	0.1
29	10	11.7	9.6	95	9.8	11.9	9.7	9.5	9.5	2	-0.2	9.6	0.1
30	10	11.7	9.6	95	14	11.5	11.3	11.4	11.4	19	0.2	11.3	0
41	20	1.2	6.9	5	15	1	4.2	4.2	4.3	27	0.2	4.2	0
42	20	1.2	6.9	5	25	1.4	9.4	9.3	9.3	25	-0.2	9.4	0
43	20	7	10.9	30	15	7.2	8.8	8.7	8.7	23	-0.2	8.8	0
44	20	7	10.9	30	25	6.8	12.9	13	13	22	0.2	12.9	0
45	20	11.7	13.9	50	15	11.5	11.7	11.8	11.8	22	0.2	11.7	0
46	20	11.7	13.9	50	25	11.9	15.9	15.8	15.7	19	-0.2	15.8	0.1
47	20	16.4	16.5	70	15	16.2	14.5	14.7	14.6	20	0.2	14.5	0
48	20	16.4	16.5	70	25	16.6	18.3	18.2	18.2	18	-0.2	18.3	0
49	20	22.2	19.5	95	19.5	22	19.2	19.3	19.3	3	0.2	19.2	0
50	20	22.2	19.5	95	25	22.4	21.1	21	21	16	-0.2	21.1	0
91	45	4.8	19.1	5	40	4.6	17.3	17.4	17.4	18	0.2	17.3	0
92	45	4.8	19.1	5	49	5	20.5	20.4	20.4	14	-0.2	20.5	0
93	45	28.8	28.8	30	40	29	27.7	27.7	27.7	12	-0.2	27.8	-0.1
94	45	28.8	28.8	30	49	28.6	29.6	29.7	29.7	10	0.2	29.6	0
95	45	47.9	34.6	50	40	47.7	33.6	33.6	33.6	11	0.2	33.5	0.1
96	45	47.9	34.6	50	49	48.1	35.3	35.3	35.3	8	-0.2	35.4	-0.1
97	45	67.1	39.3	70	40	66.9	38.5	38.5	38.5	9	0.2	38.4	0.1
98	45	67.1	39.3	70	49	67.3	39.9	39.9	39.9	7	-0.2	40	-0.1
99	45	91.1	44.1	95	44.4	91.3	44.1	44.1	44.1	1	-0.2	44.2	-0.1
100	45	91.1	44.1	95	49	90.9	44.6	44.6	44.6	6	0.2	44.5	0.1

对值不超过0.2℃。

对于特殊条件下，有特殊需求时，亦可依据表5对 t_{w1} 进行 n 值订正。

3 结论与讨论

本文探讨了气温在-5~49.9℃，水汽压已知，湿球未结冰条件下的自动气象站湿球温度求算方法。以建立饱和水汽压函数为基础，构建了步长为3℃的

“小型湿度查算表”，是解决湿球温度迭代计算初始值难题的新尝试；经人工抽查校对，“小型湿度查算表”与《湿球温度查算表（甲种本）》相关内容几乎完全一致，更符合传统的气象标准；王海军、魏华兵、程智均是以气温不变，水汽压逼近的原理进行迭代计算的，而本文中靠近迭代法，是以水汽压不变，气温逼近的原理进行迭代计算，是不同于众学者方法

表4 不同温湿条件下 $\Delta t_w=0.1$ 时 Δe 值表
Table 4 Δe value for different temperature and humidity
($\Delta t_w=0.1$)

气温/°C	相对湿度/%	$\Delta e/hPa$	气温/°C	相对湿度/%	$\Delta e/hPa$
0	5	0.1	21	95	0.2~0.3
0	50	0.1	30	5	0.1~0.2
0	95	0.1	30	50	0.2~0.3
6	5	0.1	30	95	0.3
6	50	0.1~0.2	36	5	0.1~0.2
6	95	0.1~0.2	36	50	0.2~0.3
12	5	0.1~0.2	36	95	0.3~0.4
12	50	0.1~0.2	45	5	0.2~0.3
12	95	0.1~0.2	45	50	0.3~0.4
21	5	0.1~0.2	45	95	0.5~0.6
21	50	0.2			

的一种新的尝试；迭代过程试验最大值52次，控制在100次以内即可，节省了迭代时间。

典型数据测试所得湿球温度与查《湿球温度查算表（甲种本）》的结果误差均在0.1或以内；历史数据测试误差93.7%在0.2或以内，所有误差在0.3或以内（其中不排除历史资料自身问题）。靠近查询、迭代求算获取自动气象站湿球温度的方法测试效果良好。

如果想进一步提高计算精度，不妨建立步长为2℃甚至1℃的小型湿度查算表，其记录数在10000条以内。用以上思路，得到小时甚至分钟的湿球温度记录也很容易。如因特殊需求，湿球结冰条件下的湿球温度求算方法也可以依本文思路进行探求。

表5 百叶箱通风干湿表湿球温度气压订正值表
Table 5 Corrected value of air pressure from louver box
ventilation dry and wet table wet bulb temperature

P	Δt_w	n	P	Δt_w	n
920	0.1	6	920	0.2	13
930	0.1	7	930	0.2	14
940	0.1	8	940	0.2	17
950	0.1	10	950	0.2	20
960	0.1	13	960	0.2	25
970	0.1	17	970	0.2	34
980	0.1	25	980	0.2	50
990	0.1	50	990	0.2	100
1000	0	0	1000	0	0
1010	-0.1	50	1010	-0.2	100
1020	-0.1	25	1020	-0.2	50
1030	-0.1	17	1030	-0.2	34
1040	-0.1	13	1040	-0.2	25

参考文献

- [1] 袁业畅, 陈正洪. 大畈核电站拟址空气湿球温度推算. 气象, 2008, 34(11): 69-73.
- [2] 王春亮, 王滨. 330 MW 机组凉水塔综合节能改造. 华电技术, 2013, 35(11): 93.
- [3] 张磊, 孟庆林, 赵立华, 等. 湿热地区城市热环境评价指标的简化计算方法. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 96.
- [4] 王海军. 两种湿球温度估计方法比较及误差分析. 气象, 2011, 37(4): 497-502.
- [5] 程智, 吴必文, 朱保林, 等. 湿球温度循环迭代算法及其应用. 气象, 2011, 37(1): 112-115.
- [6] 魏华兵, 郭江峰. 自动气象站湿球温度快速计算方法. 气象, 2011, 37(8): 1038-1041.
- [7] 赵永胜, 刘德平, 胡长权. 无资料地区湿球温度计算方法研究. 电力勘测设计, 2009(5): 32-35.
- [8] 胡进宝. 西北无资料地区湿球温度计算方法研究. 电力勘测设计, 2011(4): 21-23.
- [9] 朱业玉, 陈辉, 姬兴杰. 基于分段函数法计算湿球温度研究. 气象, 2011, 37(4): 497-502.



进 2019 展报告 新能源气象

<http://cmalibrary.cn/amst/201902/>

高被引论文选编

编辑：侯美亭 张萌

“新能源”主题被引频次最高的前10篇论文

来源数据库：SCI-E和CAJD（气象与大气科学领域），检索时段：2017—2019年

通过天气类型进行空间配置，平衡欧洲风力发电量——Balancing Europe's wind-power output through spatial deployment informed by weather regimes. *Nature Climate Change*, 2017, Vol. 7, No. 8.

由于风能和太阳能在欧洲电力中所占的份额越来越大，理解和适应它们在多个时间尺度上的变化仍然是一个关键问题。在每周的时间尺度上，风能的变化与长期的天气状况（即天气类型）有关，这可能导致邻国风力发电的中断。苏黎世联邦理工学院的Grams等展示了天气类型为欧洲风力发电的多日波动提供了一种气象解释，并可以帮助指导新的部署路径，将这种变化最小化。目前不同天气类型下的平均发电量从22 GW到44 GW不等，按照目前的规划策略，预计到2030年将增长两倍。然而，平衡各地区未来的风力发电能力，并对比各国政府间的行为——特别是在巴尔干半岛而不是北海部署——将几乎消除这些产量差异，维持平均发电量。太阳能光伏发电可以平衡局地的风力条件不足状况，但只能通过将目前的容量扩大十倍的手段。基于对大陆尺度风力状况的理解和泛欧洲合作的新部署战略，可以在最大程度上减少风力发电量变化的负面影响。

1.5 °C目标的替代途径减少了对负排放技术的需求——Alternative pathways to the 1.5 degrees C target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change*, 2018, Vol. 8, No. 5.

实现《巴黎协定》所列宏伟目标的减缓通常依赖于温室气体减排和大气净二氧化碳去除（CDR），主要通

过大规模应用生物能源、碳捕获和储存以及植树造林来实现。然而，CDR战略面临着一些困难，例如依赖地下二氧化碳储存、和耕地以及用于生物多样性保护的土地区域存在竞争。因此，一个关键问题是是否存在替代的深层缓解途径。为此，荷兰环境评估署（PBL）的van Vuuren等使用一个综合评估模型，探讨了其他途径的影响，包括生活方式的改变、额外减少非二氧化碳温室气体，以及基于可再生能源的能源需求更快地电气化。虽然这些替代方案也面临特定的困难，但它们可以显著减少对CDR的需要，尽管不能完全消除CDR。替代方案为实现《巴黎协定》的目标提供了多样化的过渡途径，同时也有利于其他可持续发展目标。

2014年4月4日撒哈拉沙尘暴对德国光伏发电的影响——Impact of the 4 April 2014 Saharan dust outbreak on the photovoltaic power generation in Germany. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, No. 21.

准确预测太阳辐射的重要性正在迅速增加，特别是对那些在光伏（PV）发电中所占份额越来越大的国家来说。太阳辐射预测的可靠性主要取决于云和气溶胶粒子对吸收和散射辐射的表征。特别是在极端气溶胶条件下，数值天气预报在太阳辐射预报中存在系统偏差。这是由于数值天气预报模式本身的设计造成的，该模式通常使用气候学平均值来解释气溶胶粒子对辐射的直接影响，以及假设气溶胶浓度在空间和时间上均为均匀的情况下对云层形成的影响。在极端气溶胶条件下，这些模式的缺陷会导致重大的经济损失。对德国来说，撒

哈拉沙尘每年暴发5~15次，每次持续数天，在这种情况下，数值天气预报难以充分预测太阳辐射。2014年4月4日，在撒哈拉沙尘暴期间，德国卡尔斯鲁厄理工学院的Rieger等利用ICON-ART研究了矿物粉尘对PV发电的影响。ICON-ART是目前德国的数值天气预报模式，由包含微量物质和相关反馈过程的模块扩展而成。研究发现，德国65%的辐射监测站点的PV功率预测总体上有所改善。在预报与实测差异较大的9个台站中，有8个台站有改善。此外，还量化了矿物粉尘的直接辐射效应和间接辐射效应，直接效应占64%，间接效应占20%，协同效应占16%，其中包括矿尘辐射效应和忽略矿尘预测的差异。

水力与灌溉：全球格局分析——Hydropower versus irrigation: an analysis of global patterns. *Environmental Research Letters*, 2017, Vol. 12, No. 3.

世界各地众多的水库提供多种流量调节功能，其中的关键是水力发电和灌溉用水。这些职能有助于国家、区域和全球各级的能源和粮食安全。虽然水力发电的水库作业可能支持灌溉，但众所周知，水力发电可能减少了用于灌溉粮食生产的水的供应。美国伊利诺伊大学的Zeng等使用机器学习技术和多源数据集在全球范围内评估了这些关系，发现54%的全球水电装机容量（约507万 MW）与灌溉竞争。存在这种竞争的地区包括美国中部、北欧、印度、中亚和大洋洲。另一方面，全球8%的水电装机容量（约79000 MW）是灌溉的补充，尤其是在中国的黄河和长江流域、美国东海岸和西海岸以及东南亚、加拿大和俄罗斯的大多数流域。在世界其他地区没有发现明显的关系。进一步分析气候变量对水电与灌溉关系的影响，发现在降水增加的情况下，水库的防洪功能似乎限制了美国、中国南方以及欧洲和大洋洲大多数流域的水力发电。另一方面，由于潜在蒸发量

的提高, 水库蒸发损失的增加和灌溉需求的增加, 可能导致灌溉和水力发电之间的权衡增加, 因为在气候较暖的地区, 如印度、华南和美国南部, 水的可用性降低。如今, 大多数水库都是为多种目的而建, 因此, 政策制定者必须理解并计划如何在关键功能之间进行权衡。因为减缓气候变化要求增加可再生能源, 而气候变化、人口和经济增长以及相关饮食变化的农业水文影响增加了世界许多地区粮食生产的灌溉需求。

(以上由侯美亭选编)

基于相似时刻的光伏出力概率分布估计方法——《电网技术》2017年第2期

程泽等针对光伏发电可预测性低的问题, 提出了一种综合使用通径分析 (path analysis, PA)、k近邻算法 (k-Nearest Neighbor, KNN)、神经网络分位数回归 (quantile regression neural network, QRNN) 和核密度估计 (kernel density estimator, KDE) 的光伏出力概率分布估计方法, 构造出未来1 d任意时刻的光伏出力概率密度函数, 可以得到比点预测和区间预测更多的有用信息。首先由通径分析对气象因素进行约减, 在降低模型输入维数的基础上减小变量间的耦合作用。然后通过K-means算法按天气类型对历史样本进行聚类, 进一步提高相似样本的筛选效果。最后利用神经网络分位数回归和核密度估计对光伏出力的概率分布进行估计。实验结果表明, 相比于核密度估计和传统的正态分布估计方法, 采用所提方法估计出的概率分布的可靠性和锐度更高。

基于相似日和CAPSO-SNN的光伏发电功率预测——《电力自动化设备》2017年第3期

针对光伏发电功率预测精度不高的问题, 陈通等提出了一种基于相似日和云自适应粒子群优化 (CAPSO) 算法优化Spiking神经网络 (SNN) 的发电功率预测模型。考虑到季节

类型、天气类型和气象等主要影响因素, 提出以综合相似度指标进行相似日选取; 以SNN强大的计算能力和其善于处理时间序列问题的特点为基础, 结合CAPSO算法搜索的随机性和稳定性优化SNN的多突触连接权值, 减少对权值的约束, 提高算法的收敛精度。根据某光伏电站的实测功率数据对所提模型进行测试和评估, 结果表明, 该模型比传统预测模型具有更高的预测精度和更好的适用性。

基于多时段综合相似日的光伏发电功率预测——《电源技术》2017年第1期

由于历史数据和天气因素对光伏出力预测的影响较大, 卢舟鑫等提出了一种日特征相似度与形状相似度相结合的方法, 分时段地预测光伏发电功率。该方法首先采用欧式距离法对气象类型进行细分, 然后在不同时间段中分别利用两种相似日选取算法选取历史相似日, 再利用其对应时段的历史功率值及气象数据, 采用BP神经网络对预测日相应时段的功率进行预测, 结果表明该方法的预测精度有明显提高。

基于PCA-BPNN的并网光伏电站发电量预测模型研究——《可再生能源》2017年第5期

针对目前光伏电站发电量预测模型中输入气象维数较多、预测精度低等问题, 李芬等提出基于主成分分析 (PCA) 和BP神经网络 (BPNN) 相结合的光伏电站发电量预测模型。利用PCA对水平面太阳总辐射、日照时数、气温日较差等多个气象变量进行解耦降维处理, 形成相互正交、相互独立的公因子变量。将这些公因子变量作为BPNN模型的输入变量, 并进行训练拟合建模, 从而实现对光伏电站发电量进行预测。文章利用我国华中地区某屋顶并网光伏电站的实测数据, 对PCA-BPNN模型进行检验。通过研究结果可知, 与常见的预测模型相比, PCA-BPNN模型大大降低了气象变量的输入维数, 该模型预测结果的准确性较高。

基于多维气象数据和PCA-BP神经网络的光伏发电功率预测——《电网与清洁能源》2017年第1期

太阳能光伏发电受很多随机因素的影响, 这使得光伏系统输出功率具有不确定性的特点。光伏系统输出功率的精确预测对电力系统的未来规划、调度管理和运行控制有着重要意义。刘俊等通过多个渠道搜集多维数的历史气象数据, 同时将天气类型分为无云、有云、多云和雨天4类; 然后基于反向传播 (back propagation, BP) 神经网络建立不同气象条件下的光伏发电功率预测模型; 最后利用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 对原始气象特征数据进行降维分析和处理, 提高计算速度和精度。仿真算例结果验证了所建立的光伏发电功率预测模型的有效性, 而且PCA降维能够降低训练, 减少预测的计算时间, 并提高预测精度, 这表明PCA能适用于未来海量气象大数据下光伏电站短期、超短期的分钟级实时功率预测。

基于密度峰值层次聚类的短期光伏发电功率预测模型——《高电压技术》2017年第4期

程启明等针对传统聚类算法不易选取初始聚类中心、对噪声值较敏感、收敛速度慢及易陷入局部最优等问题, 提出一种基于密度峰值的层次聚类算法对天气类型进行聚类。首先确定气象数据的密度峰值参数, 采用分层聚类算法将气象数据划分为不同类别, 然后利用支持向量机 (SVM) 对未知天气类型进行识别, 最终采用径向基 (RBF) 神经网络建立光伏发电短期功率预测模型。仿真结果表明, 该方法能有效提高气象类型的分类精度、加快寻优速度, 提高离群样本点分离的鲁棒性, 证明了其在小样本的情况下具有较高的精度, 且在天气波动较大时仍能较好地实现功率值的预测。

(以上由张萌选编)

编辑选编

编辑：张萌 侯美亭

VIIRS深蓝陆地气溶胶产品：延续EOS长期气溶胶数据记录——VIIRS Deep Blue aerosol products over land: Extending the EOS long-term aerosol data records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, in press.

NASA“深蓝”(Deep Blue, DB)项目的一个主要目标是使用多种卫星仪器创建长期一致的气溶胶数据记录, 这些记录适用于气候研究。为了将地球观测系统(EOS)时代的气溶胶产品延续到联合极轨卫星系统(JPSS)时代, NASA Goddard空间飞行中心的Hsu等成功地移植了DB算法来处理可见光-红外成像辐射计(VIIRS)的数据。虽然VIIRS算法的基本原理类似于中分辨率成像光谱仪(MODIS), 但与MODIS Collection 6(C6)版本相比, 已有许多改进。大多数也在最新的MODIS Collection 6.1(C6.1)中实现。例如, 根据测量的反射率的光谱曲线, 开发了一种新的烟雾掩膜, 用于区分燃烧的生物质烟雾和吸收能力较弱的城市/工业气溶胶。因此, 在VIIRS DB数据集中加入了一个新的气溶胶类型标志。此外, 还开发了新的粉尘模型来解释矿物粉尘的非球形特征。在北非和大西洋边界附近的MODIS C6产品中发现的撒哈拉沙尘羽的气溶胶光学深度(AOD)的不连续已经大大减少。研究还根据地面气溶胶观测网(AERONET)数据对VIIRS和MODIS Terra/Aqua C6.1 AOD进行了评估。VIIRS和MODIS反演数据展示了与AERONET较好的一致性, 说明DB可以提供一致的跨历史EOS时代和现在JPSS时代的AOD数据。

印度热带流域的土壤湿度时空分析及土壤湿度区域尺度评估的最优取样设计——Spatiotemporal analysis of soil moisture and optimal sampling

design for regional-scale soil moisture estimation in a tropical watershed of India. *Water Resources Research*, 2019, in press.

土壤湿度区域尺度评估对一些水文应用和基于遥感的土壤湿度数据的验证非常重要。土壤湿度区域尺度变化特征需要简化站点尺度的监测方案来平衡代表性和最小化监测费用。印度理工学院布巴内斯瓦尔分校的Singh等研究了土壤湿度的最优取样点设计, 旨在捕捉流域尺度土壤湿度的时空变化特征。研究区域位于印度的一个热带流域, 该流域涵盖了从非常湿润(季风季节)到非常干旱(干热的夏季)的极端季节变化。面积大约为500 km²的农业流域内有83个土壤湿度监测站点, 一年内(2016年6月20日—2017年7月12日)观测了56天, 共获取41832个田间试验数据。利用这些数据, 发现评估流域平均土壤湿度最多需要30个站点, 且精度可达到±2%。另外, 发现随机选择5个监测站点足够捕捉流域平均土壤湿度的时间变化特征, 精度达到±3%。此外, 5个通过稳定性分析的代表性站点可以提供初步的流域平均土壤湿度, 精度为±2%。可进一步利用土壤性质和土壤地形作为显著的物理参数, 用来控制流域内土壤湿度的时空持续性和变化。这些发现表明通过选取少量代表性站点可以为优化短期土壤湿度试验方案提供有用的参考。

冬季地面温度升高, 导致东北永冻土地区兴安落叶松生长加快——Warmer winter ground temperatures trigger rapid growth of dahurian larch in the permafrost forests of northeast China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, in press.

兴安落叶松是我国大兴安岭地区冻土沼泽地带的主要优势树种。由于冻土环境的限制, 兴安落叶松的生长极其缓慢。近年来, 变暖导致冻土的融化, 冻土融化可能会影响到落叶松的生长。通过在冻土区域进行大范围的落叶松采样, 沈阳农业大学的张

先亮等发现兴安落叶松的生长在近10年呈现异速生长。土壤温度是落叶松生长的主要限制因子。10年前, 夏季地温是落叶松生长的主要限制因子, 随着逐渐变暖, 冬季地温在近10年成为落叶松生长的主要限制因子。可能的原因是夏季地温决定冻土的融化深度, 而冬季地温决定冻土的冻层深度。没有剧烈变暖时, 落叶松的根系受到深厚冻土的影响, 而决定生长快慢的夏季可利用水分主要来源于冻土融化, 因此, 此时夏季地温是落叶松生长的主要限制因子。随着变暖, 冻土融化深度增加, 夏季水分不再成为限制因素。然而由于冬季地温决定着冻层深度, 影响着落叶松根系生存。因此, 冬季地温升高导致了落叶松近年来的异速生长, 在冻土冻层深度越浅薄的地方, 落叶松生长越快。

灾害事件报告可以用来推动遥感应用吗? 拉丁美洲天气指数保险案例研究——Can disaster events reporting be used to drive remote sensing applications? A Latin America weather index insurance case study. *Meteorological Applications*, 2019, in press.

巴西国家空间研究院下属的巴西天气预报和气候研究中心开发的拉丁美洲日降水格点数据集(LatAmPrec)是一套新的结合卫星和站点数据的拉丁美洲降水数据集, 提供了一种高分辨率、近实时、基于站点观测和TRMM卫星实时数据(3B42-RT)的拉丁美洲降水分析新方法。LatAmPrec的目标是支持各种社会经济活动的决策, 特别是气候保险产品的决策。为了了解该数据集在天气指数保险方面的优点和局限性, 美国哥伦比亚大学的Brahm等研究采用了两种不同的验证方法进行了分析。第一个是利用交叉相关方法, 研究新的器测-卫星融合数据集的准确性和改进特征。第二个是为了评估该数据集在保险损失方面的技巧, 研究使用了logistic回归来评估新数据集对损失事件的预测能力, 该方法以前应用于乡村

一级，本研究应用于区域一级，并通过对农民进行访谈和国家级灾害数据库执行。两种验证方法的结果都表明，与其他数据源相比，LatAmPrec性能良好，能够较好地反映现场的与保险相关的损失。与天气指数保险行业现有产品相比，新产品的优势之一是高空间分辨率和高时效性。

(以上由侯美亭选编)

全球冰冻圈灾害高风险区：影响与态势 ——《科学通报》2019年第64卷第9期

20世纪70年代以来，全球增温显著，冰冻圈快速变化事件发生频率在增加，由此引发和即将引发的冰冻圈灾害危害巨大。冰冻圈不同灾种成灾机理、承灾体及其孕灾环境各异，灾害分布具有明显的空间分异特征。王世金等基于已有研究成果，较系统地阐述了冰冻圈灾害成灾机理，梳理了冰冻圈灾害类型、时间尺度、空间分异及其类型区划。在此基础上，揭示了全球冰冻圈灾害高风险区的综合影响及其态势。冰冻圈变化—冰冻圈灾害风险—冰冻圈风险管控链条关系紧密，亟需加强冰冻圈变化对社会经济系统的综合风险分析、评估和理解，以期针对性地调整未来冰冻圈灾害高风险区经济社会活动轨迹，有差别地制定冰冻圈灾害高风险区防灾减灾规划，以降低冰冻圈灾害风险和可持续能力。

区域气候动力降尺度方法研究综述 ——《中国科学（地球科学）》2019年第49卷第3期

徐忠峰等指出，传统意义上的动力降尺度是指利用全球模式的模拟结果直接驱动区域模式，从而获得高分辨率气候信息的方法。由于该方法具有坚实的物理基础并可以获得全套气候变化信息，已经成为获取未来区域高分辨率气候信息的重要手段之一。然而，由于受模式系统误差的影响，传统动力降尺度的模拟结果往往会出

现较大的偏差，这又在一定程度上限制了该方法在气候变化影响评估中的应用。为了提高动力降尺度的效果，近年来国内外发展了一系列改进的动力降尺度方法。目前的动力降尺度方法大体可分为四类：传统的动力降尺度方法、伪全球增暖方法、考虑全球模式误差订正的降尺度方法以及同时考虑全球模式和区域模式误差订正的降尺度方法。文章归纳总结了近年来动力降尺度方法的主要研究进展，分析了不同方法的优点和不足，阐述了动力降尺度研究面临的问题与挑战，最后提出了未来动力降尺度方法研究的潜在发展方向。

地形重力波举力效应对台风路径偏转的影响 ——《地球物理学报》2019年第62卷第3期

举力效应是指方向性切变气流经过地形激发的重力波能够使平均气流发生水平旋转。唐滢等首先根据日本气象厅台风数据集统计了2006—2015年登陆台湾的台风个例，分析台风路径的偏转情况。然后利用二维傅里叶变换对欧洲中期天气预报中心的再分析数据进行滤波，得到台风的环境大气层结和水平风场。最后根据台风环境风场以及台湾地形计算地形重力波举力，分析举力对台风路径偏转的可能贡献。结果表明，近十年共有20个台风登陆台湾，其中2006—2008年有10个。除去5个路径较为复杂的台风，文章对15个台风的地形重力波举力进行分析，发现有14个台风的路径偏转方向与举力方向一致。对于路径偏转最为明显的6个台风（偏转角度大于 30° ），地形重力波举力对台风路径偏转的贡献可达10%，部分解释了台风经过台湾地形时发生的路径偏转。

全球变暖停滞的研究进展回顾 ——《地球科学进展》2019年第34卷第2期

1998—2012年，全球平均地面

增温速率较之前明显趋缓，出现全球变暖停滞现象，该现象的成因与机制是当前气候变化研究的一个热点领域。主要从外部强迫和内部变率2个角度回顾全球变暖停滞产生机制的研究进展。从气候系统外部强迫影响来说，全球变暖停滞主要受到太阳活动、火山爆发、气溶胶以及平流层水汽等的影响。从气候系统内部调控作用来看，全球增温速率减缓主要受到太平洋、大西洋、印度洋和南大洋自然变率以及相应的热量再分配过程的影响。全球变暖停滞期间气候系统内部能量并没有减少，其中一部分能量被转移并储存在了海洋中深层，从而对全球增温减缓产生影响。同时，重点回顾了针对部分耦合强迫作用的“起搏器”试验，该类试验是研究全球变暖停滞的特征、成因及机制的有力手段。此外，也总结了全球变暖停滞现象对气候系统能量收支平衡、资料、模拟以及相关政策制定等方面带来的挑战，展望了未来的研究重点。

大气非绝热加热作用的研究进展与展望 ——《气象》2019年第45卷第1期

区域大气非绝热加热与天气系统的发生发展有密切联系，与降水等天气过程密不可分，非绝热加热在大气运动中有着至关重要的作用。对非绝热加热的研究和理解，有助于改进数值预报模式，增强数值天气预报模式的预报能力。姚秀萍等系统梳理了大气非绝热加热的基本内容，近几十年非绝热加热及其作用的研究成果，主要包括非绝热加热的概念及其表征、非绝热加热的时空分布特征、非绝热加热与季风、天气系统（如西太平洋副热带高压、热带气旋、温带气旋和急流）和降水之间的关系，以及非绝热加热在数值模式中的表征，进而指出有待于进一步研究的方面。

(以上由张萌选编)

《《涓流细语》》 编辑：贾朋群

“We've been working with many small-to medium-sized European companies within this new part of the space sector. Our projects aim to fly promising new technologies in space at low cost, and rapid pace, which our partner companies can then exploit commercially. We've set up a standardised lean project approach, by tailoring existing European Coordination for Space Standardization regulations specifically for CubeSats—the European rulebook for mission development.”

“我们一直与欧洲的小型到中型公司在这一空间新领域合作。我们的目标瞄准发射低成本、高速度的前途看好的空间新技术，我们的伙伴公司可以后期探索商业应用。我们已经建立了标准化的倾斜项目评估方法，通过定制已有的欧洲空间标准协调规范，得到适用于立方体卫星的章程——欧洲项目开发规则手册。”

——欧空局于2019年4月成立了专注于被称为“立方体卫星”的纳米卫星的标准化工作的专门机构。该机构（CubeSat Systems Unit）的负责人Roger Walker的解释表明，ESA很早就与企业界合作开展小卫星研发，而新机构的成立则强化了标准的战略意义。

“This satellite mission is certainly a challenging one, but I'm very happy to say that we are now formally out of the commissioning phase, which encompasses the first four months of a mission's life in orbit when we do all the checks and tweaks. We still have some work to do to make sure Aeolus delivers on its promise as we have to improve on the way the data is processed taking into account the peculiarities of its instrument. And, we must remember that this is a completely new type of mission, so we are learning all the time. We also have field campaigns going on all over the world to help with the process of calibration and validation. This means measurements of the wind are being taken from the ground, from balloons and from aircraft to compare with measurements we are getting from space. At this stage, the results are expected to be announced in March.”

“这个卫星项目当然是一个挑战，但是我很高兴现在正式完成了试运行阶段，该阶段是卫星发射后的前4个月，我们完成了调试。我们还将确信风神卫星如我们承诺的那样，用其仪器的独特性改进处理中的数据。而且，我们的外场试验还在全球各地进行，帮助完成标定和验证。这意味着从地面、气球和飞机得到的风观测，可以与我们从太空获得的数据进行比较。在这个阶段，结果可望在3月给出。”

——欧空局（ESA）的风神卫星（Aeolus）在完成最初4个月的测试后，进入了数据校验阶段，该项目主任Anders Elfving对卫星可以获得世界上第一份完整的卫星风场观测数据充满信心。

“The cubesat industry is just now, I believe, starting to take off, and the data that they're providing, particularly with the GPS radio occultation data, is incredibly valued.”

“立方体卫星业目前只是，我相信，开始起飞，其提供的数据，特别是GPS无线电掩星数据，是极具价值的。”

——在2019年2月26日举行的美国众议院听证会上，NOAA执行局长Neil Jacobs表达了对于购买商业数据的积极

态度。据悉，NOAA继2016年购买了2家公司的无线电掩星数据，但评估数据质量没有达到预期之后，并没有停止购买商业卫星数据的步伐，于2018年第二轮又购买了3家公司的数据。购买方表示，这次购买的数据，与之前NOAA的COSMIC项目数据质量同样优良，因此NOAA负责人，如上所说，预见到了未来商业卫星数据的前景，表示了今后NOAA通过政府认购数据服务而常规化。

“In the next 10 years with so many new satellites under development, we will need to tackle the issue of extracting information from their observations and making use of it in terms of an ever-growing variety of applications and services. This is where AI is fundamental and offers a crucial opportunity not to be missed to solve these problems.”

“未来10年如此多的新卫星在研发，我们将要解决从这些观测中提取信息问题并应用于空前的各种应用和服务中。这就是AI的基础性意义并带来的不容错过的解决这些问题的机会。”

——地球观测卫星产生了海量数据，如何更好地解决地球科学问题的同时，让更多领域受益是各国空间部门共同面临的问题。欧空局（ESA）提出利用AI技术是解决这些问题的最后机会。海量卫星地球观测大数据遇见AI会发生什么，ESA地球观测官员Pierluigi Silvestrin的上述阐述或许能让人茅塞顿开。

“We work in partnership with the EU and Eumetsat to achieve an Earth observation system unlike anywhere else in the world. ESA delivers scientific and technological excellence through the satellite missions we develop, which are exploited by Eumetsat for weather forecasting and by Copernicus for information services on climate, the environment and public security. This together creates socio-economic benefits through public services all over Europe. And, in turn, supports businesses, entrepreneurs and start-ups with easy access to vital data for new business ventures and high-tech jobs in Europe's digital economy.”

“我们与欧盟和欧洲气象卫星组织合作得到的地球观测系统不同于世界上的其他系统。ESA通过开发卫星项目传递卓越的科学和技术，被欧洲气象卫星组织用于天气预报，被哥白尼项目用于气候信息服务和环境及公共安全。这些通过面向整个欧洲的公共服务创造了社会-经济价值。而且，反过来，支持了经济、企业，借助关键数据利于创建新企业和创造欧洲数字经济高技术岗位。”

——欧空局在地球观测方面利用其技术优势，增加了与欧洲气象卫星组织的技术合作，提出了新观测新经济的理念。推出的哥白尼项目估计在未来20年将使得欧洲经济量增加920亿~1910亿欧元。此外，欧洲每年天气预报的社会经济效益估计为150亿~610亿欧元，在2020—2040年，新的天气卫星预计让经济进一步增加160亿~630亿欧元。对于这些估计，信心满满的ESA地球观测项目主任Josef Aschbacher如是说。

“Launched in late 2016, the spacecraft have provided round-the-clock surface wind speed measurements to help improve intensity forecasting of tropical cyclones. The extended mission opens the door for many new science opportunities, in addition to continuing the primary mission objectives. We are making some engineering and operational changes to enable new types of science while maximizing science returns in this second phase.”

“2016年下半年升空，该天基系统提供全天候地表风速观测帮助改进热带气旋强度预报。项目的延长，除了继续

支持主要科学目标之外，还为更多科学研究打开了门。我们正在进行工程和业务上的调整，使得项目在接下来的第二阶段科学反馈最大化。”

——2016年12月15日发射的CYGNSS (the Cyclone Global Navigation Satellite System, 气旋全球导航卫星系统)在完成既定的2年运行后，经过评估，该系统包含的8颗小卫星及子系统状态良好，NASA因此宣布该项目延长1.5年。研发该系统的西南研究所CYGNSS业务运行工程师William Wells如是说。

“Right now, forecasts are generally not accounting for what happens to a raindrop after it is picked up by radar. Evaporation has a substantial impact on the amount of rainfall that actually reaches the ground. By measuring that impact, we can produce more accurate forecasts that give farmers, agriculture specialists and the public the information they need.”

“目前，预报一般不考虑雨滴被雷达捕获后发生了什么。蒸发对实际到达地面的降水量有重要影响。通过测量这一影响，我们能够制作更准确的预报，提供给农民、农业专家和公众他们所需要的信息。”

——美国密苏里大学的学者依据雨滴的大小对蒸发和下沉速率产生的影响，开发了新的降水预报方法。因为雨滴越小蒸发越快而在下沉中遇到的空气阻力也较小，学者利用双极化雷达获得雨滴的大小，并将其融合进预报中。研究者之一，自然资源学院大气科学副教授Neil Fox针对这一创新成果进行了如上解释。

“In our modern, rapidly changing world, there are many things that serve to divide us. Science should not be among them.”

“在我们现代、快速变化的世界上，有很多服务于我们个人的东西。科学不应属于其中。”

——2019年美国科学促进会(AAAS)年会的主题是“科学超越边界”，AAAS主席Margaret Hamburg女士在AAAS主办的《科学》杂志上，以“超越边界”为题撰写社论，阐述了年会的主题思想，她用上面的话提示大众，尤其是学者要尊重科学本身的属性。

“We have maintained our commitment to continuity, today and into the future, and earned our position as the trusted source of environmental data. The U.S. no longer faces the grim prospect of satellite data gaps in the polar orbit, which looked like a real possibility in 2011 because of projected cost overruns and launch uncertainty.”

“我们恪守连续性承诺，今天和未来都是如此，从而赢得环境数据信得过来源的声誉。美国不再面对极轨卫星数据糟糕的预期，这一在2011年时因为预计超支和发生不确定性存在，看起来存在真实的可能性。”

——美国审计总署在最新报告中，将美国天气卫星项目从高风险目录中删除。据悉，美国极地轨道气象卫星因为存在卫星发射不利或导致数据不连续，于2013年被列入这份联邦

高风险名单，在这份报告中，GAO认为NOAA和美国国防部(DOD)采取了措施，缓解了极地气象卫星数据可能存在中断风险。两家机构(分别负责上午和下午极轨卫星)在国会的支持下2017年以来取得了重要进步，其中NOAA于2017年11月成功发射NOAA-20卫星并业务化运行。对于这样的结果，NOAA卫星信息局局长Steven Volz如是说。

“We must be ready to respond to new transportation technologies with improvements in weather research and technology. That will require additional investments to assure mobility and safety. Upgrades to infrastructure are necessary. The technology that can benefit us by making roads safer will likely require additional funding. That may be the biggest challenge to full implementation of connected and autonomous vehicles.”

“我们必须用改进的天气研究和技术对新交通技术做出反应。这需要额外的投入以确保机动性和安全性。升级基础设施是必须的。让我们受益的让道路更安全的技术看来需要增加资助，这可能是完全实现相互连接和自动的车辆面临的最大挑战。”

——2019年4月初，UCAR理事会召开以“提前预报路况”为主题的新闻发布会，会议瞄准改进道路安全和机动性，以及为自动驾驶技术提起做好转变两个目标。会议表明，改进路况预报对于正在出现的自动驾驶车辆尤其重要，因为这些车辆依靠的传感器和其他技术会受到降雪、雾和其他恶劣天气的影响。会议专家成员就这次会议的主旨，从不同角度表达了上述看法：即目前条件无法满足自动驾驶需求，需要增加投入完善基础设施。

“Getting our data into the hands of renowned climate scientists to help measure essential climate variables furthers our mission of providing timely, global imagery and analytics to empower informed, deliberate and meaningful stewardship of our planet.”

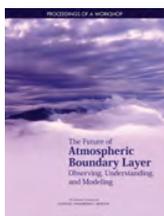
Schlinger, currently Planet's chief strategist, said in a statement.

“将我们的数据交到著名的气候科学家的手中帮助测量核心气候变量，能够推进我们的使命，能及时提供从全球图像和分析到对我们星球管理有力的信息化、详尽和有益信息。”

——近日，NASA与Planet公司签订价值670万美元合同，购买用于气候研究的地球图像。据悉，Planet公司拥有大约140颗卫星组成的星座，每日收集地球图像。这些卫星包括了Dove立方体卫星和更大些的Rapid-Eye和SkySat卫星。通过签订这样的购买合同，NASA不仅可以获取该公司最新图像，还能访问公司最近10年的图像库，这也是NASA对商业图像产生兴趣的一个信号。另外，公司的几位合伙人都曾经在NASA小卫星项目中任职，这一合同也是某种意义上“返回主场”。公司目前的首席战略学家Schlinger评价了NASA这一决定如何实现了公司的价值使命。

TPOS 2020 2019年1月

热带太平洋观测系统（TPOS）是全球观测中的重中之重，这不仅是因为太平洋是世界上最大的海洋，而温室气体导致地球气候变化的主要能量被海洋吸纳，而且全球主要的季节尺度的气候变化信号来自太平洋。这篇评估版的报告，描述了太平洋观测系统已经带给我们的知识，以及到2020年该系统将发生的变化。



《大气边界层的未来：观测、认识和模拟》 2019年3月

2017年10月，美国科学院主持召开了探索未来边界层观测及其在改进模拟和预报能力方面的作用研讨会。会后，针对参会专家的学术报告形成了该报告，瞄准改进大气边界层观测以及与海洋、陆地和冰面相互作用，从而改进强风暴和空气质量等预报水平。报告按照会议结构，分概述、边界层观测的科学和应用引擎、观测新技术、未来观测战略和思考等几个部分。

《自然-气候变化》 2018年11月

雪是气候系统中的关键组分，也是本期的焦点内容。人为气候变暖正在导致雪发生巨大变化。本期以评论、综述、观点和原创研究等方式，阐述雪在气候系统中的关键作用，以及这种作用如何受到气候变化的影响。封面图为显微镜观察到的雪。



《森林健康和生物技术》 2019年1月

地球上的森林是呵护人类生存环境的重要组成部分，美国科学院推出的这份报告，从生物技术的角度探讨了森林保护的潜在可能。报告认为，很多认识上的欠缺，例如树木遗传学、树木对环境的影响以及公众对技术的认识等依旧存在。

媒体扫描 贾朋群 编辑

MEDIA SCAN

《发现ESA》 2019年2月

欧空局（ESA）在2019年世界气象日来临时发表的这个小子，从观测地球、联系世界、全球导航、空间安全、促进新科学、探索空间等几个方面，用图文并茂方式介绍了本机构的创新历程。



《2019年发展报告》 2019年2月

世界银行这份每年都选择一个主题的年度报告，2019年聚焦工作性质的变革。在技术创造就业岗位章节，这份报告列举了加纳农民在线、肯尼亚“安全农业”等非洲新技术企业，把农民与地方气候站联系起来，在农业服务、保险和太阳能开发等方面取得的成就

《推进地理科学转化研究》 2019年2月

美国科学院的这份特别报告，分为什么是转化研究、地理科学近期转化创新、目前状况和推进今年的转化研究等章节，阐述了转化研究对地理科学的重要性。



《NOAA科学报告 2018》 2019年2月

NOAA最新发表的这份年度报告，依然从科研亮点研究和文献计量两个方面，对该机构过去一年的科研活动进行了概述。

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang

Xiao Ziniu

Zhai Panmao

Yu Yubin

Li Weijing

Hu Yongyun

Tan Zhemin

Sun Jian

Fei Jianfang

Zhao Licheng

Zhang Peng

Guan Zhaoyong

He Jianxin

Huang Jianping

Liao Xiaohan

Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Luo Yunfeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Huaigang, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin, Cui Xiaojun

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

http://cmalibrary.cn/amst

http://weibo.com/2115232930/profile

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

(Special Issue: Green Energy)

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Wang Yi, Zhou Qingliang, Dai Kan, Zhang Xiaomei, Liu Xiangwen/ Development and Outlook of Global Data-Processing and Forecasting System
- 11 Liu Rui, Zhang Tongwen, Chen Feng, Shang Huaming, Yu Shulong, Zhang Ruibo, Wang Yonghui/ Advance in Dendroclimatology in Central Asia
- 17 Xu Jiaxin, Li Xuan, Zhu Yongchao, Fang Shibo, Wu Dong, Wu Yingjie/ Progress of the Methods of Remote Sensing Monitoring the Soil Moisture
- 24 Chen Cheng, Bian Zeqiang, Zeng Tao/ Research on Key Technologies of Regional Automatic Weather Station Calibration
- 28 Wang Pei, Wang Jiali, Li Kangli, Chen Yanmei, Wang lu/ An Analysis of Meteorological Disasters in Jingmen in Recent Ten Years and the Responsive Measures
- 49 Zeng Qi, Chen Zhenghong/ A Review of the Effect of Meteorological Disasters on Wind Farms in Recent Years
- 56 Zhang Xueting, Li Jinxin, Chen Zhenghong, He Fei, Cui Yang/ A Preliminary Exploration on the Influence of Wind Farms on Local Climate in Dabie Mountainous Areas in China: A Case Study of Dawu in Hubei Province
- 62 Sun Pengjie, Wang Binbin, Chen Zhenghong, Zhang Xueting, Xu Yang, Meng Dan/ Analysis of the Influence of Wind Speed Interpolation on Wind Power Density Error from Wind Tower Data
- 66 Jin Yan, Wang Xuefeng, Fan Lizhang/ Applicability Analysis of Two New Concepts for Wind Energy Assessment of Wind Farms in the Yunnan Mountainous Region
- 71 Li Fen, Yang Yong, Zhao Jinbin, Chen Zhenghong, Gao Xiaoqing, Shen Yanbo/ Review on Energy Impact of Photovoltaic Power Station Construction and Operation on Climate and Environment
- 78 Guo Peng, Shen Yanbo, Chen Feng, Zhao Xiaodong/ The Analysis of PV Electricity Generation Potential—A Case Study in Shanxi
- 84 Gu Zhengqiang, Zhu Ling, Shen Lidu, Gong Qiang, Zhao Chunyu, Chao Hua, Xu Hong, Lin Na/ Analysis and Comparison of the Tracking and Fixed Angle Bevel Solar Radiation in Liaoning
- 90 Kang Kai, Sun Zhenyu, Zhang Chao, Zhang Yunlong, Li Hui/ Study on Optimal Design Method for Stand-Alone Solar-Battery Hybrid Power System in a Practical Environment
- 95 Zhang Wenbo, Yan Xiaomin, Wang Yatong, Di Yanjun, Wang Qi/ Development and Application of Wind Energy Solar Meteorological Service Business Platform in Gansu Province
- 100 Liu Yinxiu, Xiong Shouquan/ Preliminary Study on Calculating Wet Ball Temperature Using a Near Iterative Method

Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

Forum

- 32 Kong Haijiang, Tian Li, Wang Rui, Zhao Peijuan / “Fupan” Method in Weather Forecaster Training
- 36 Yang Ping, Wang Bangzhong, Deng Jingmian/ Contemporary Interpretation of the 24 Solar Terms

History

Station

42 He Xicheng, Feng Yingzhu/ Two Observatories in Guangzhou During the Period of the Republic of China

Reading

Book Review

39 Li Beibei, Qian Xinping, Zhang Gaizhen/ Exploration of Chinese Meteorological History ——Liu Zhaomin’s “History of Chinese Meteorology”

Information

107 Selected Papers