

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

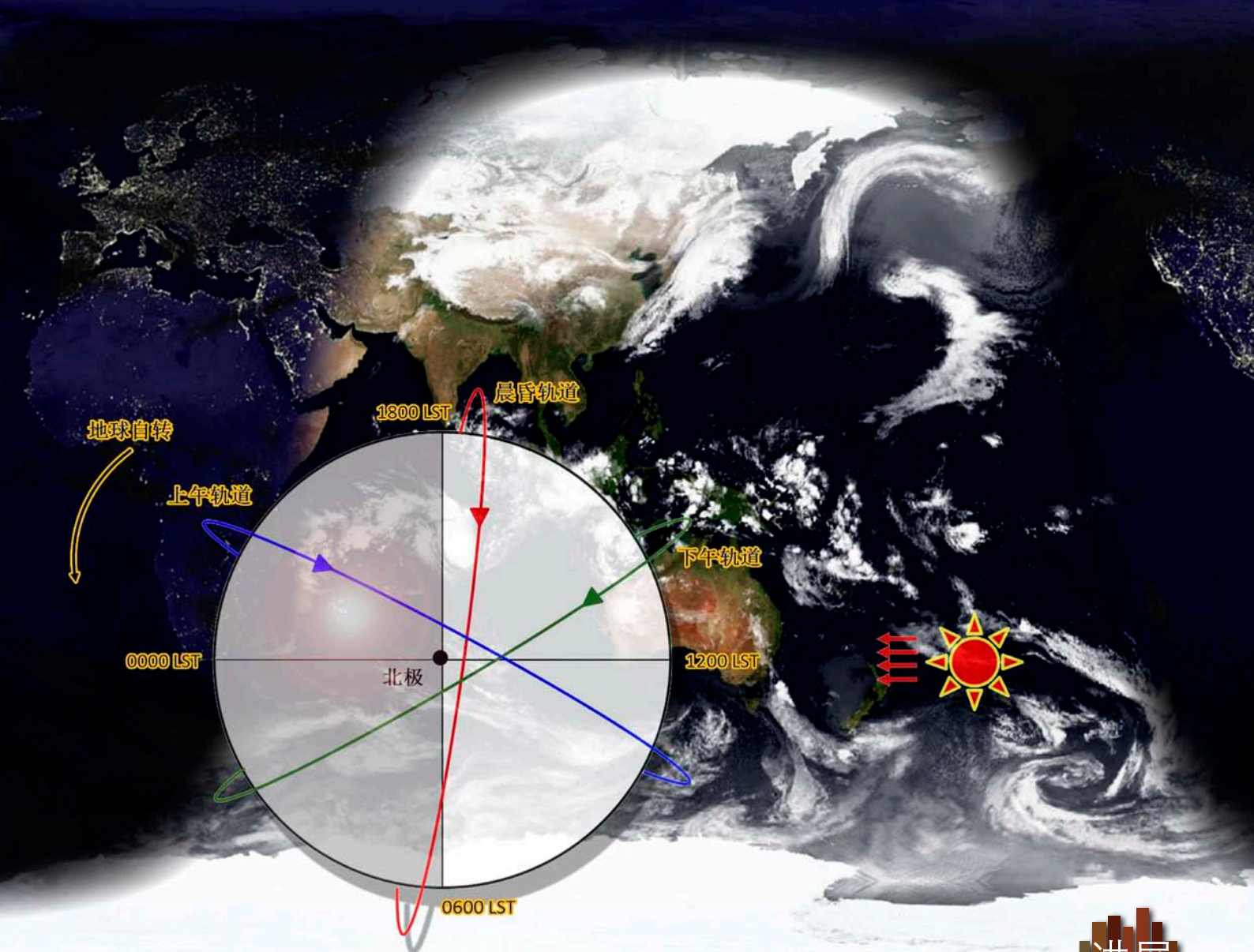
ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.2

2015年4月
第5卷 第2期

极轨气象卫星应用研究



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

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
罗云峰 中国气象局
王会军 中国科学院大气物理研究所
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
费建芳 解放军理工大学
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程学院
黄建平 兰州大学
廖小罕 国家遥感中心
吕世华 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
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	郭学良	李 柏
李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉	任小波
沈文海	王卫丹	武炳义	杨修群	俞小鼎
张朝林	张 鹏	张庆云	赵 平	

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈云峰	陈振林	崔春光	崔讲学
董文杰	封国林	郭 虎	何金海	何 清
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	雷小途
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	李跃清
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨 崧	杨昭明
姚学祥	伊 兰	翟武全	张 华	张立祥
张小玲	张跃堂	赵广忠	周定文	周凌晔
周显信	朱定真	朱小祥	祝燕德	邹立尧

海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 陈忠美

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) 68409927/68409933

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://library.cma.gov.cn/amst>

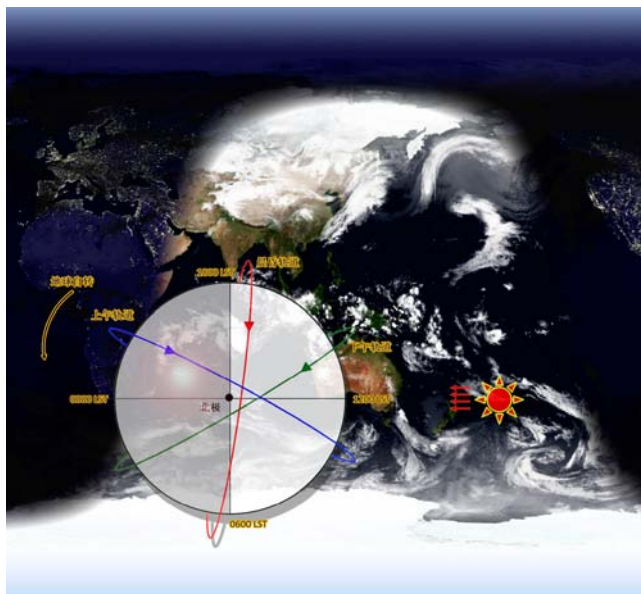
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>

印刷: 北京宝昌彩色印刷有限公司

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

定价: 30元



本刊已被万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录,相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

目 次

第5卷 第2期 2015年4月

1 许小峰: 主编语

研究论文

封面报道

- 6 张鹏, 杨磊, 谷松岩, 胡秀清, 吴晓京, 吴荣华, 毕研盟, 刘诚: 晨昏轨道卫星的气象应用需求分析

研究进展

- 13 张广俊, 蔡鸣, 胡爱学: 城市能量消耗对全球气候影响的模拟研究
18 雷小途, 余晖: WMO登陆台风预报示范项目研究进展
24 赵俊虎, 杨杰, 龚志强, 封国林: 2013年中国夏季降水水动力—统计气候预测及检验分析探讨
29 李良福, 覃彬全, 杨磊, 糜翔, 刘青松: 缆索承重桥的缆索防雷技术研究

“卫星资料应用”专题系列

- 35 邹晓蕾, 翁富忠, 田小旭: AMSR2仪器上新增设的C波段通道对陆地无线电频率干扰的有效缓解

专题 水文气象

- 42 包红军, 王莉莉, 梁莉: 对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的优化与改进

主编语

自1960年代开始,极轨气象卫星加入到了大气探测行列,如今已成为全球气象观测体系中最重要的重要组成部分。相继投入业务使用的美国、欧洲和中国的极轨气象卫星系列在共同承担全球大气探测的任务中起到了互补作用。然而,虽然三家卫星在空间上可以做到覆盖全球,但在时间配置上则尚未达到最佳,所有极轨卫星都集中在上午星轨道和下午星轨道。本期主打文章(P6)介绍了晨昏轨道极轨气象卫星,这一轨道配置能够有效补充上午和下午卫星在数值天气预报每6h同化窗内卫星观测资料的空白,对卫星资料的有效应用和提高预报水平将会做出积极贡献。若在我国FY-3后续卫星中发展晨昏卫星,将完善和丰富我国现有的现代气象业务观测体系,并使FY-3极轨卫星资料具有自己的特色,在业务上形成同欧美卫星的等价互补之势。目前,国际上极轨卫星及其搭载的传感器的更新换代也颇为迅速,例如,用于土壤湿度观测的第二代先进微波辐射成像仪(AMSR2)已经升空近3年(P35),而如何应用好通过这些传感器获取的信息,则需要对接收的资料进行细致的分析,掌握其在不同地区和频率条件下的特征。

广义上,城市热岛效应指在城市发生的更加密集的人类活动带来的能量消耗,最终都会转化为热量影响大气变化,从而进一步影响到区域乃至全球天气气候。城市能量消耗对全球平均气候的影响可能微不足道,可它对正常的大气环流和区域气候产生的影响却不容忽视(P13)。而在可预见的未来,人类的能量消耗仍会维持在一个高水平上,加入城市能量消耗可能会修正气候模拟相对于实际观测的误差。

2010年上海世博会已经过去了将近5年,而为了办好这次活动,中国气象局华东区域气象中心向世界气象组织(WMO)提议设立了“WMO登陆台风预报示范项目(WMO-TLFD)”项目(P18)自

2010年立项至今,已建成一个集当今世界主流台风主、客观预报产品及其性能评估的业务平台。自立项起,WMO-TLFD也与THORPEX建立了密切的联系,并开展了台风路径和强度集合预报的评估和应用技术研究,有效推进了先进台风预报技术在台风预报业务中的展示和应用。

作为气象学与水文学的交叉学科,水文气象学主要关注地表水与空中水的相互作用。例如,暴雨引起的城市内涝问题(P63)就属于该交叉学科的研究范围。在中国气象局公共气象服务中心的支持下,本期开始推出了“水文气象”专题,本期该专题的三篇文章分别讨论了对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的改进(P42)、陆—气双向反馈模式降水在洪水预报中的检验(P48)、流域河网信息自动提取(P53)等问题,其研究成果可用于防洪防涝、水资源的开发利用等等。

著名气象学家周晓平先生于今年初离开了我们,本期选登了他的几位学生追述其学术成就的论文(P59)。斯人已去,我们和读者一起在阅读中怀念,学习、认识和理解他对气象科技发展所做的贡献。

提供气象科技进展信息是本刊的重要办刊理念之一,本期试推出“涓流细雨”栏目(P78),该栏目选择了一些全球科学家、决策者和各方精英谈到的与气象相关的话题,在各种场合针对一些事件发出的声音和观点(一些摘录者本身可能并非属于或仅属于气象界)。这些看法虽然并不代表本刊,却希冀能够借此引发读者进行更多的深层思考,促进学科不断创新和发展。借助该栏目的设立,意在增强“阅读”板块的可读性,通过点点滴滴的信息线索,扩展我们的视野。

许小峰

48 王莉莉,陈德辉:基于GRAPES的陆—气双向反馈模式降水在洪水预报中的检验

53 刘永和,张万昌:基于DEM的流域河网信息自动提取算法

专题 纪念论文

59 蔡鸣,张大林,许秦:从地形罗斯贝波到非静力中尺度动力学:重温周晓平先生经典著作

论坛

63 刘俊,鞠永茂,杨弘:气候变化背景下的城市暴雨内涝问题探析

科学观察

2 读图 数字 榜单

特写

66 李婧华:从2014年国际顶级期刊论文看世界大气科学领域华人学者的高影响研究活动

68 李婧华,吴灿:“极轨卫星”主题文献计量分析



P5

阅读

会评

70 戴洋:气候变化综合评估模式研究:任重道远

书评

73 王邦中:并不遥远的全球气候治理过程

信息

23 简咏梅,梁炳新:新版“奇台气象”微信公众平台开发完成

34 新书架

72 吴灿:气候“门外汉”接任美国总统气候及能源政策高级顾问

74 编辑选编

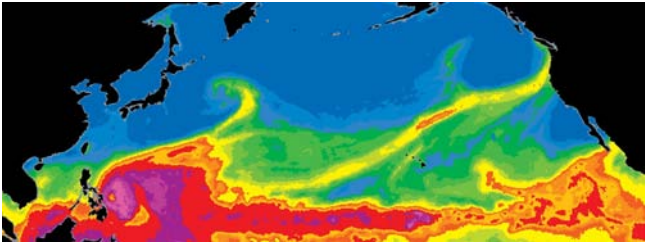
78 涓流细雨

80 第80页评刊

封3 媒体扫描



封3



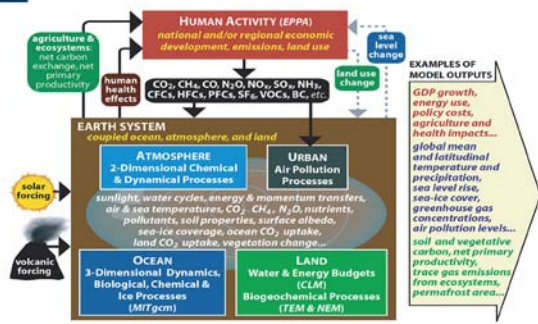
“加州水2015”能告诉我们什么？

在这张跨越太平洋的卫星图像上，水汽高密度区域（黄色）勾勒出横跨大洋的大气河流。在美国加州，这种河流被称为菠萝快车：即始于夏威夷跨太平洋拉链式的天气形态，带来的不是篮子里的各色热带水果，而是雨和雪。目前，预算1000万美元的“加州水2015（CalWater 2015）”外场试验项目在紧锣密鼓准备中，目标是全面认识加州海岸这条可以带来洪水和干旱的大气河流。

来源：Nature



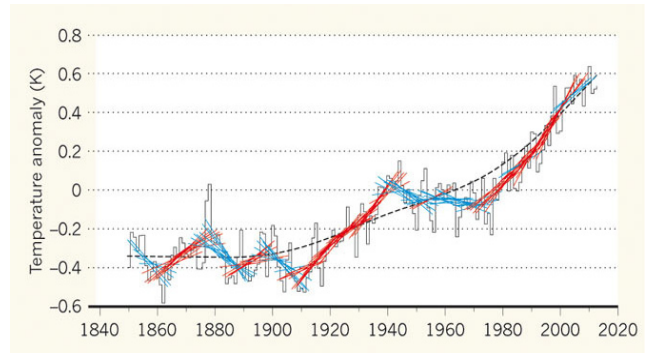
Modelling science-policy interface



模拟科学-政策的界面

在2015年初降低灾害风险国家研究会议上，世界气象组织的代表在会议高层论坛的发言中，提出了模拟科学-政策的界面理念。这个界面的基础是以耦合的海洋、大气和陆地为特征的地球系统和太阳及火山驱动两个外部因子。模式输出的多领域要素，以及人类活动通过各种机制与地球系统互动，构成了促进人与自然和谐共处政策的科学基础。

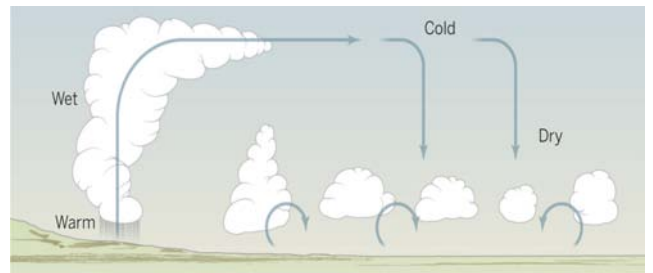
来源：WMO



15年：全球温度变化节奏中的自然步长？

德国和英国学者最新的一项研究，利用模拟和观测数据将19世纪中期以来全球温度距平变化曲线划分为1850—1864年，1851—1865年，……，1999—2013年等每15年的时段，计算了每15年的温度变化趋势。图中红线表示该时间段温度上升的趋势快于长期平均的趋势，蓝线则表示趋势更慢。研究者认为，这些15年的趋势是由自然变化主导的，温度变化结果是自然的变化“嫁接”到长期变暖变率之上的结果。这一认识将有助于气候预测，但无法评估驱动改变的敏感性。

来源：Nature



大气卡诺热机循环可能被弱化

1824年提出和建立的卡诺热机机制，其在大气中的适用已经被广泛接受，即所谓好天气机制：当对流层高层的干空气下沉并和地表附近的湿空气混合时，阳光天气出现。加拿大、英国和瑞典学者利用再分析观测数据，计算出该机制的输出端情形，并对比气候模式对人为驱动的模拟结果，获得的一项最新研究结果表明，这样的混合机制能够弱化大气的卡诺循环，即使得大气热引擎减弱。

来源：Nature

数字

26% 国家能源局发布的2014年风电产业监测数据显示，2014年我国全年新增装机容量达到1981万千瓦。目前，我国累计风电并网装机容量已经达到9637万千瓦，占全球风电装机总量的26%。

6374座 加拿大大学者主持的一项研究，计算了全球1930—2030年间已经建成的6374座，以及设计中的3377座水坝对河流的影响，该计算模式能帮助工程师减少新水坝的环境影响。

1.3~2.2℃ 加拿大大学者利用9个气候模式模拟1913—2012年气候演化发现，有降温作用的气溶胶抵消的北极温室气体导致变暖幅度达到1.3~2.2℃，使得该地变暖的实测值仅为1.2℃。



低碳投入需要政策孵化

*Nature*发表评论呼吁为了应对气候变化而支持低碳资金的投入。统计表明,在清洁能源投入方面,过去十年全球在可再生能源、能源存储和输送方面的投入增加了5倍以上。评论认为,如果有适宜的政策出台,私人金融的投入可以推进实现全球减排目标所需的能源转化。

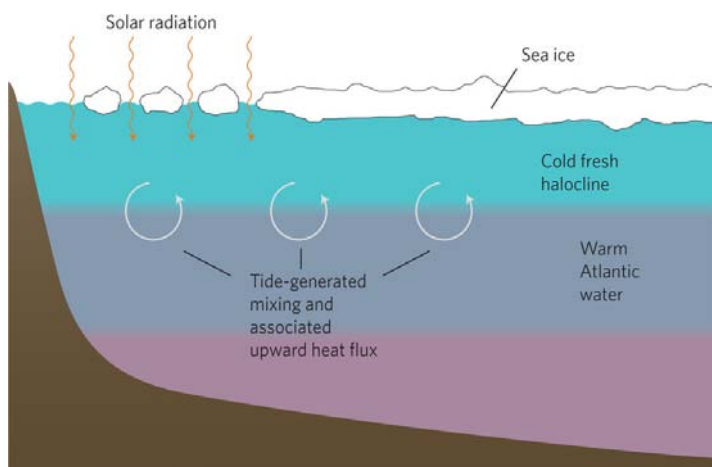
来源: *Nature*

国际“极轨卫星”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源出版物	被引频次
1	Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product	Husar, RB	Journal of Geophysical Research-Atmospheres,1997,102(D14)	485
2	SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum	Rahman, H	International Journal of Remote Sensing,1994,15(1)	416
3	Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990	Tucker, CJ	Science,1991,253(5017)	339
4	Satellite remote-sensing of surface-energy balance - success, failures, and unresolved issues in FIFE	Hall, FG	Journal of Geophysical Research-Atmospheres,1992,97(D17)	281
5	Global oceanic precipitation from the MSU during 1979-91 and comparisons to other climatologies	Spencer, RW	Journal of Climate,1993,6(7)	279
6	A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing	Anderson, MC	Remote Sensing of Environment,1997,60(2)	249
7	Evaluation of the atmospheric moisture and hydrological cycle in the NCEP/NCAR reanalyses	Trenberth, KE	Climate Dynamics,1998,14(3)	246
8	A new global water vapor dataset	Randel, DL	Bulletin of the American Meteorological Society,1996,77(6)	239
9	AIRS: improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases	Chahine, MT	Bulletin of the American Meteorological Society,2006,87(7)	235
10	An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations	Saunders, R	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1999,125(556)	233

来源: ISI数据库, 检索时间: 2015年3月30日

李婧华 提供



北极海冰: 危险来自下方

英国和挪威科学家针对北极海冰的一项研究,揭示了使得北冰洋海洋表面海冰因下方加热融化的潮汐生成湍流混合(tide-generated turbulent mixing)机制。北极海洋中的淡水层将海冰与来自大西洋的温暖盐水隔离,而该机制带来的垂直混合造成了向上的可以达到 $50\text{W}/\text{m}^2$ 的热通量,这较原来估计仅为 $0.05\sim 0.3\text{W}/\text{m}^2$ 的弱热通量大很多的热传输,是导致海冰融化的主要原因。他们的研究还表明,这种加热机制的运转,看来与海洋表面是否有海冰并没有干系。

来源: *Nature Geoscience*

111

《2014年中国海平面公报》

表明,2014年我国沿海海平面较常年(1975—1993年)高111mm,较2013年高16mm,居1980年以来第二高位。

2~3

倍 美国学者通过对波士顿市甲烷排放检测发现,该市天然气管道系统泄漏了2.7%左右气体,是以前估计的2~3倍,该市60%~100%的甲烷排放来自天然气管道系统。

1.2

mm 最新一项针对检潮仪的研究表明,1901—1990年间,全球海平面每年上升了1.2mm,而非之前2011年计算得到的每年上升1.5mm。研究还发现,1993—2010年间海平面每年上升3mm。

84

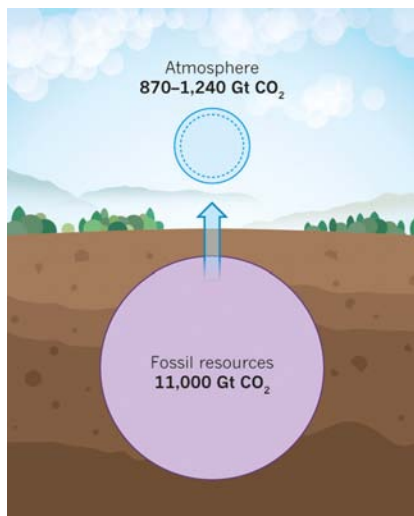
分 美国用户满意指数(ACSI)机构2015年初公布了2014年联邦机构的指数值,美国气象局以84分,高于联邦部门中值(64.4分)近20分的成绩名列前茅。



中国布设3套南极海洋观测浮标

2015年3月初，中国南极考察队成功布放了3套锚系潜标。其中第3套布设地点在68°31'S、79°30'E，该地位于普里兹湾埃默里冰架前缘西侧的麦肯齐湾内，是埃默里冰架下海洋出流的主要地方，在冬季也存在风生冰间湖。潜标主要针对上述两个过程，在200~500m之间安装了温度和盐度传感器，以观测冰架出流水和冰间湖内水体的季节变化过程。其他两套潜标分别主要由数个温度盐度采集器和浮球组等设备组成，并搭载了沉积物捕获器，主要对布设区域海水的温度、盐度、流速等数据进行长期观测，并分析普里兹湾深层水的交换是否对湾西侧底层水的形成具有贡献，以及获得为期一年的沉降颗粒物通量数据，用于发展极区海洋重要界面碳通量观测与估算技术。

来源：中国海洋报



地球上还有多少化石燃料供人类开采？

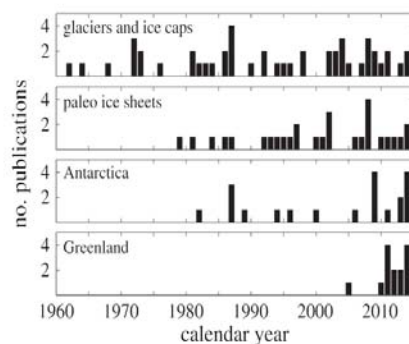
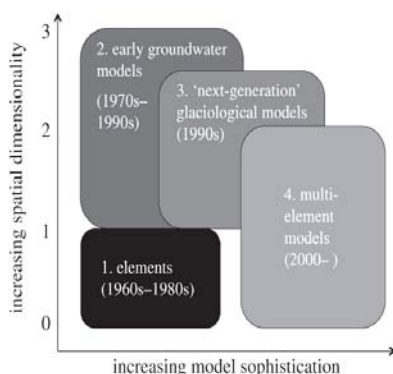
人类活动排放温室气体的主要机制，是化石燃料的消耗，那么，工业革命以来人类消费的和地球上尚有的可供人类消费的化石燃料各有多少呢？英国伦敦大学学院的学者最近的一项研究回答了这个问题。他们用化石燃料中的碳解读了化石燃料与大气中二氧化碳之间的关系，即地球化石燃料的存量约等于11000Gt CO₂，研究者认为，如果全球变暖幅度要限制在高于工业化前2℃以内，那么，2011—2050年累计排放量要小于870~1240Gt CO₂，这意味着有力的气候政策必须让大部分化石燃料存量不被开发。

来源：Nature

冰下水系模拟：进入多要素模拟

全球的冰川和冰架不仅是气候变化最脆弱的环境要素，也是很多河流的发源地。加拿大学者最近在英国皇家学会期刊上发表的一篇综述文章中，阐述了针对冰下水系模拟研究的进展，即模拟获得始于1960年代的要素模拟，一直到2000年代开始的多要素模式等4个阶段（左图）。模拟研究的对象，也从最初的冰川冰盖逐步扩大到极地冰盖、南极和近年来的格陵兰（右图，每年论文数量）。

来源：Proceedings of the Royal Society A



数字

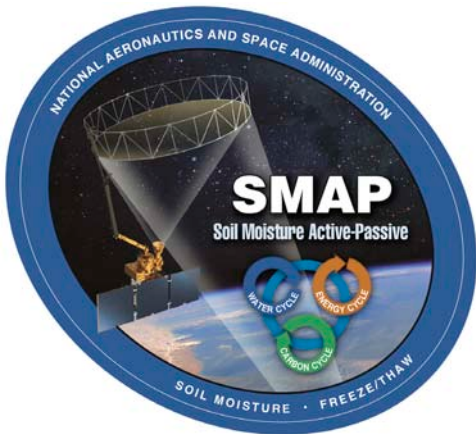
86页 一份86页的气候草稿在经过6天的讨论后，2月初被提交作为2015年底联合国巴黎气候大会谈判的草拟文本。这份预期在2020年生效的协议的目标是保持全球平均气温升高在2℃以内。

1.1 ± 0.5K

英国科学家通过一项研究首次量化确定了全球变暖和碳排放之间的关系，即对大气—海洋系统并考虑陆地碳吸收因素，每1000Pg碳排放将导致地球变暖1.1 ± 0.5K。

60亿美元

美国总统在其提出的意在加大研究投入的2016财年预算中，NOAA预算首次接近60亿美元，从上一财年的54亿美元，提高到59.83亿美元，其中三分之一以上，大约24亿美元将用于天气气候探测项目。



SMAP将带来什么

2015年1月31日，NASA将造价9.16亿美元的SMAP（土壤水分主动—被动探测器）送入太空。SMAP计划在3年时间里，每2~3天对全球的土壤（表层5cm）湿度进行一次观测，其价值在于改进天气预报准确性、干旱预测。SMAP的特别之处在于其荷载的仪器中，既有高空间分辨率但对土壤湿度不敏感的主动遥感仪器——雷达，也有能提供较高土壤湿度准确率但空间分辨率不高的被动遥感仪器——辐射计。主动和被动两种遥感资料共同处理，可获得空间分辨率分别为10km和3km的土壤湿度和土地融化状态资料。

来源：NASA

中国“极轨卫星”主题被引频次最高的前20篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用	陈维英	环境遥感, 1994/03	223
2	中国新一代极轨气象卫星——风云三号	杨军	气象学报, 2009/04	85
3	用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果	方宗义	第四纪研究, 2001/01	82
4	昆明市热岛效应卫星监测研究	赵红旭	国土资源遥感, 1999/04	61
5	气象卫星遥感在干旱监测中的应用	居为民	灾害学, 1996/04	56
6	沈阳等6城市热岛效应卫星监测研究	纪瑞鹏	辽宁气象, 2000/04	45
7	利用TIROS-N卫星云图对1979年夏季青藏高原云量分布的研究	周允华	高原气象, 1983/01	41
8	风云三号气象卫星的特点和作用	范天锡	气象科技, 2002/06	39
9	气象卫星亚像元火点面积和亮温估算方法	刘诚	应用气象学报, 2004/06	38
10	Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiances to typhoon track prediction	张华	Advances in Atmospheric Sciences, 2004/02	38
11	地空基GPS探测应用研究进展	曹云昌	南京气象学院学报, 2004/08	38
12	区域极轨卫星ATOVS辐射偏差订正方法研究	刘志权	气象学报, 2007/01	36
13	利用FY-1C资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径	刘健	红外与毫米波学报, 2003/06	36
14	北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究	何晖	大气科学, 2009/06	34
15	基于能量平衡的蒸散发遥感反演模型研究	庞治国	水科学进展, 2004/03	34
16	中国地区冬季积雪遥感监测方法改进	郑照军	应用气象学报, 2004/S1	34
17	冬小麦冻害遥感监测应用研究	张雪芬	南京气象学院学报, 2006/01	33
18	利用风云-1C气象卫星监测南疆沙尘暴研究	郑新江	中国沙漠, 2000/03	29
19	福建省海岸带泥沙分布的气象卫星遥感监测	张春桂	国土资源遥感, 1999/06	25
20	AMSU资料揭示的不同强度热带气旋热力结构特征	王瑾	应用气象学报, 2005/02	23

来源：CAJD数据库，检索时间：2015年3月30日

李婧华提供

Ocean-driven temperature variability



冷暖的韵律

全球温度演化过程中，两大洋（太平洋和大西洋）的偏冷趋势似乎和全球温度升高的趋势不一致。美国学者基于目前气候模拟和观测温度记录，对海洋偏冷的现象给出了自然海洋变率的解释。图中给出过去130年两大洋冷暖期的自然变化时段。

来源：Science

1.5:1 瑞士日内瓦大学分析了欧洲30个气候站最近60年的记录指出，每年高于温度记录的日数与低于温度记录的天数之比，从1950年代的大约1:1，提高到2013年的接近1.5:1，表明欧洲更暖。

37% 美国科学促进会(AAAS)和皮尤研究中心最新发表的调查报告表明，面对气候变化主要是人类活动造成的提问，50%的公众回答是，而AAAS会员回答是的比例为87%，二者相差37个百分点。

0.8m 2014年8月19日升空的高分二号卫星是迄今我国空间分辨率最高的遥感卫星。在轨测试结果表明，高分二号卫星成功实现了全色0.8m、多光谱3.2m的空间分辨率，以及优于45km的观测幅宽，综合性能达到世界先进水平。

晨昏轨道卫星的气象应用需求分析

张鹏 杨磊 谷松岩 胡秀清 吴晓京 吴荣华 毕研盟 刘诚

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 晨昏卫星(晨昏轨道极轨气象卫星, 也简称晨昏轨道卫星)是指太阳同步近极地轨道卫星中轨道降交点地方时间(Equator Cross Time, ETC)在6:00左右的卫星, 观测地方时间总在凌晨和傍晚。在介绍晨昏卫星的基础上, 分析了晨昏卫星的平台特征、观测特点和潜在应用。对轨道模拟仿真和多国观测系统试验(observing system experiments, OSE)的分析表明: 晨昏卫星同上午卫星和下午卫星共同构成极轨气象卫星业务观测系统, 可以每6h提供一次无缝隙的全球大气探测资料, 改进NWP的初始场, 对南北半球预报和行星尺度的区域预报均有积极的贡献。利用FY-1D卫星观测资料的分析表明: 晨昏卫星对气候和环境监测也具有独特的作用。根据现有风云气象卫星的发展规划, 还讨论了发展晨昏卫星的可能途径。

关键词: 晨昏卫星, 数值天气预报, 气候监测, 环境监测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.001

Meteorological Requirements for the Early-Morning-Orbit Satellite

Zhang Peng, Yang Lei, Gu Songyan, Hu Xiuqing, Wu Xiaojing, Wu Ronghua, Bi Yanmeng, Liu Cheng

(National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The early-morning-orbit satellite is one of the polar orbiting satellites whose local time of the descending node is around 6:00 A.M. The observing time is close to dawn and dusk. After the conceptual introduction, this paper analysed the characteristics of the satellite platform, the observing geometrical conditions of the early-morning-orbit satellite, and its potential applications as well. The results from the orbit simulation and the observing system experiments (OSE) indicate that the early-morning-orbit satellite together with the morning-orbit satellite and the afternoon-orbit satellite can provide the initial meteorological field for the numerical weather prediction (NWP) model without any blank left on the global scale every 6 hours so that the forecast period and the forecast accuracy can be improved for both the hemispheric and the regional scales. The images from FY-1D also show unique applications of the early-morning-orbit satellite on the climate and environmental monitoring. According the existing Fengyun satellite programme, the paper discussed the possible way of developing Chinese Fengyun early-morning-orbit satellite.

Keywords: early-morning-orbit satellite, numerical weather prediction(NWP), climate monitoring, environmental monitoring

0 引言

极轨气象卫星是全球气象观测体系的重要组成部分, 它提供多光谱谱段、多探测通道的全球观测资料, 用于数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)、全球气候要素和环境灾害监测^[1]。

根据观测地方时间, 极轨气象卫星主要有上午卫星和下午卫星两种类型。上午卫星的轨道降交点地方时间(Equator Cross Time, ETC)在10:00左右,

观测地方时间白天在上午、夜间在前半夜; 下午卫星的轨道升交点地方时间在14:00左右, 观测地方时间白天在下午、夜间在后半夜。目前, 气象业务中常用的上午卫星主要有我国的FY-3A卫星、欧洲气象卫星组织(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)的Metop-A和Metop-B卫星, 下午卫星主要有我国的FY-3B卫星、美国国家海洋大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的NOAA-15至NOAA-19卫星和新一代极轨环境卫星系统先导计划(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System Preparatory Project, NPP)中的Suomi NPP卫星^[2]。此外, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的科

收稿日期: 2013年8月28日; 修回日期: 2013年12月13日
第一作者: 张鹏(1970—), Email:zhangp@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项“风云三号晨昏轨道卫星资料处理和应用关键技术研究”; 风云三号气象卫星地面应用系统工程

学研究卫星EOS系列中的上午卫星Terra、下午卫星Aqua、Aura、PARASOL、CloudSat和CALIPSO等以其先进的探测技术、稳定的观测质量和优异的测量精度，在气象业务中也被广泛使用^[3]。

极轨气象卫星的首要任务是为NWP提供满足时间和空间要求的全球观测资料，改善初始场，提高NWP的预报时效和精度。目前，欧洲和美国业务极轨气象卫星采用欧洲Metop卫星负责上午轨道，美国NOAA和Suomi NPP卫星负责下午轨道，双边全球资料业务交换和共享的协作组网观测模式。我国的FY-3A卫星轨道接近欧洲的Metop卫星，FY-3B卫星轨道接近美国的Suomi NPP卫星。上述卫星观测时间要么集中在10:00左右，要么集中在14:00左右，从NWP同化要求来看，每6h观测同化时间窗内全球总有2~3条轨道的卫星观测空白区，无法提供全球覆盖的初始观测^[4-5]。为了满足NWP观测需求，世界气象组织（WMO）在《2025年全球观测系统展望》报告中提出了建立上午、下午和晨昏轨道三颗卫星组网观测的概念^[6]。

在介绍晨昏卫星的基础上，本文分析了晨昏轨道卫星的平台特征和观测特点。利用轨道仿真模拟、国外观测系统试验（observing system experiments, OSE）和FY-1D的实际观测资料，本文讨论了晨昏卫星对NWP的影响及对气候和环境监测的独特作用。最后，根据现有风云气象卫星发展规划，分析了研发风云晨昏卫星的可能性。

1 晨昏卫星介绍

晨昏轨道极轨气象卫星，简称晨昏轨道卫星或者晨昏卫星，是指轨道降交点地方时间在06:00左右的卫星，观测地方时间总在凌晨和傍晚（图1）。相比上午轨道和下午轨道，晨昏轨道卫星的观测视场几何条件、太阳对卫星平台的光照特点不同，因此需要对卫星平台、遥感仪器配置和遥感仪器具体技术指标开展针对性的设计。

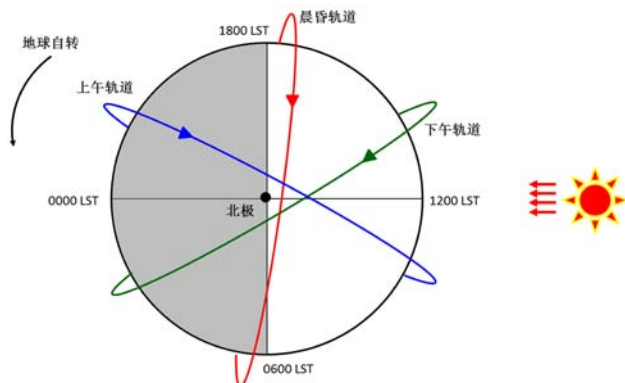


图1 极轨卫星晨昏轨道、上午轨道和下午轨道示意图

1.1 太阳对晨昏卫星平台的光照特点

晨昏卫星沿观测地方的晨昏圈运行（图1），卫星始终受到太阳光的照射并在卫星平台上形成稳定的明暗边界，卫星一侧始终背阳，另一侧始终向阳，两侧温度差异大，造成星上温度梯度大。为了保障星上遥感仪器的工作状态和工作寿命，需要对卫星平台进行针对性的热补偿和热平衡设计，消除温度梯度的影响。此外，还需要对星上遥感仪器进行严格的遮光设计，避免观测信号受到太阳杂散光的影响，同时为星上定标系统提供稳定、可靠的工作环境。

晨昏卫星轨道平面法线总是指向太阳方向，卫星太阳能帆板电池阵可以固定安装，其扰动性对星体的影响较小，利于侧摆机动控制和快速稳定。此外，太阳能帆板电池阵始终朝向太阳，卫星可以持续获得能源补充。相对上午卫星和下午卫星，晨昏卫星平台可以提供更为充足的能源，有利于平台上配置大功耗的主动和被动遥感仪器，如SAR、散射计和降水雷达等。

1.2 晨昏卫星的观测视场几何条件

晨昏卫星观测地方时间总在凌晨和傍晚，对地观测时太阳高度角较小。图2是降交点地方时06:00，高度830km的太阳同步轨道在2012年春分、夏至、秋分和冬至四天的第一条轨道数据及星下点太阳高度角分布情况。如图2所示，轨道约有半数区域太阳高度角为负，表明晨昏卫星观测区域处于夜间，这些区域不能获取传统的可见光图像。在夏季半球（夏至的北半球、冬至的南半球）的高纬区域，太阳高度角为正，其中，北半球高度角最大值出现在夏至这天，达到 32° ，地点在轨道最南端附近；南半球高度角最大值出现在冬至这天，达到 15° ，地点在轨道最北端附近。对于太阳高度角为正的区城，可以获取可见光图像，但相对于上午卫星和下午卫星，太阳高度角依然较低，斜长的大气路径衰减了太阳入射能量，光照条件不好。对于利用反射太阳波段能量开展定量遥感的算法要求较高的太阳高度角，因此很难利用传统的反演算法定量处理晨昏卫星的可见光观测资料。

卫星红外和微波大气探测，例如风云三号（FY-3）的红外分光计（InfraRed Atmospheric Sounder, IRAS）、微波温度计（MicroWave Temperature Sounder, MWTS）和微波湿度计（MicroWave Humidity Sounder, MWHS），利用地球发射的红外和微波辐射反演大气的温度和湿度廓线^[7]。红外和微波观测不受太阳光照条件的影响，因此晨昏卫星装载的气象遥感仪器首选红外和微波大气

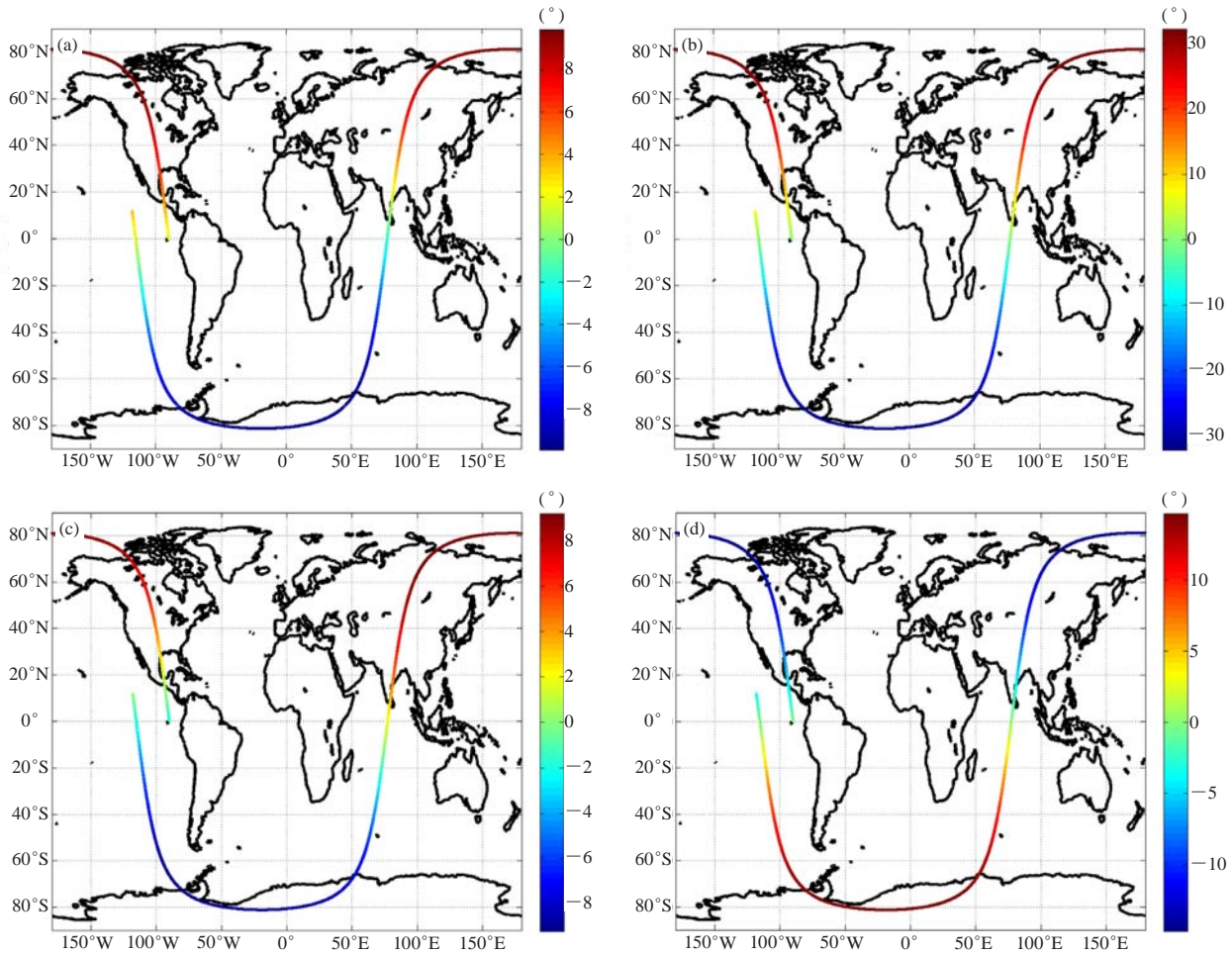


图2 晨昏卫星太阳高度角示意图
(a)春分; (b)夏至; (c)秋分; (d)冬至

探测类仪器、主动遥感仪器，其次是具有微光夜视功能的可见光成像仪器。

2 晨昏卫星的应用需求分析

2.1 三星组网在 6h 同化窗内的全球资料覆盖度分析

图3a~3e分别给出了上午卫星、下午卫星、晨昏卫星、上午和下午卫星双星组网、三星组网观测后，极轨气象卫星在6h同化窗内观测资料的全球覆盖度。单星6h可以观测全球45%左右的区域，双星6h可以观测全球85%左右的区域，三星6h可以观测全球的全部区域。对比图3d和3e可以看到，晨昏卫星观测主要补充了太平洋和大西洋上空的观测资料，海洋上空是常规气象观测缺乏的区域，这些观测资料的补充对改进和提高NWP的预报精度和预报时效将产生积极的影响。

2.2 三星组网对 NWP 预报的影响

英国气象局Eyre等^[8]系统地回顾了已有的OSE和观测系统模拟试验（Observing System Simulation Experiments, OSSE），指出晨昏卫星观测有效补充

了上午卫星和下午卫星在NWP每6h同化窗内卫星观测资料的空白，对南北半球预报和行星尺度的区域预报均有积极的贡献。Eyre等^[8]使用了欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的Jean-Noel Thepaut和Graeme Kelly利用美国NOAA系列的NOAA-15（07:30 am）、NOAA-16（13:30 pm）和NOAA-17（10:00 am）三星组网观测资料对NWP预报的影响评估结果（图4），试验中，控制试验使用了NOAA-15和NOAA-16两颗卫星的资料，影响试验使用了NOAA-15、NOAA-16和NOAA-17三颗卫星的资料。同双星观测资料的预报相比，对南、北半球预报，三星组网的观测资料对7d的预报（图4a和4b）有不同程度的改进，其中北半球的改进程度更为明显；对欧洲和北美洲的区域预报，三星组网观测资料对欧洲4d之内的预报有所改进，对北美洲7d之内的预报有大幅提升。对区域预报改进的程度主要与资料同化时间窗内观测资料的补充区域和资料质量有关，我国的天气系统受印度洋、太平洋上空大气环流的影响，同北美洲的天气预报有类似可比

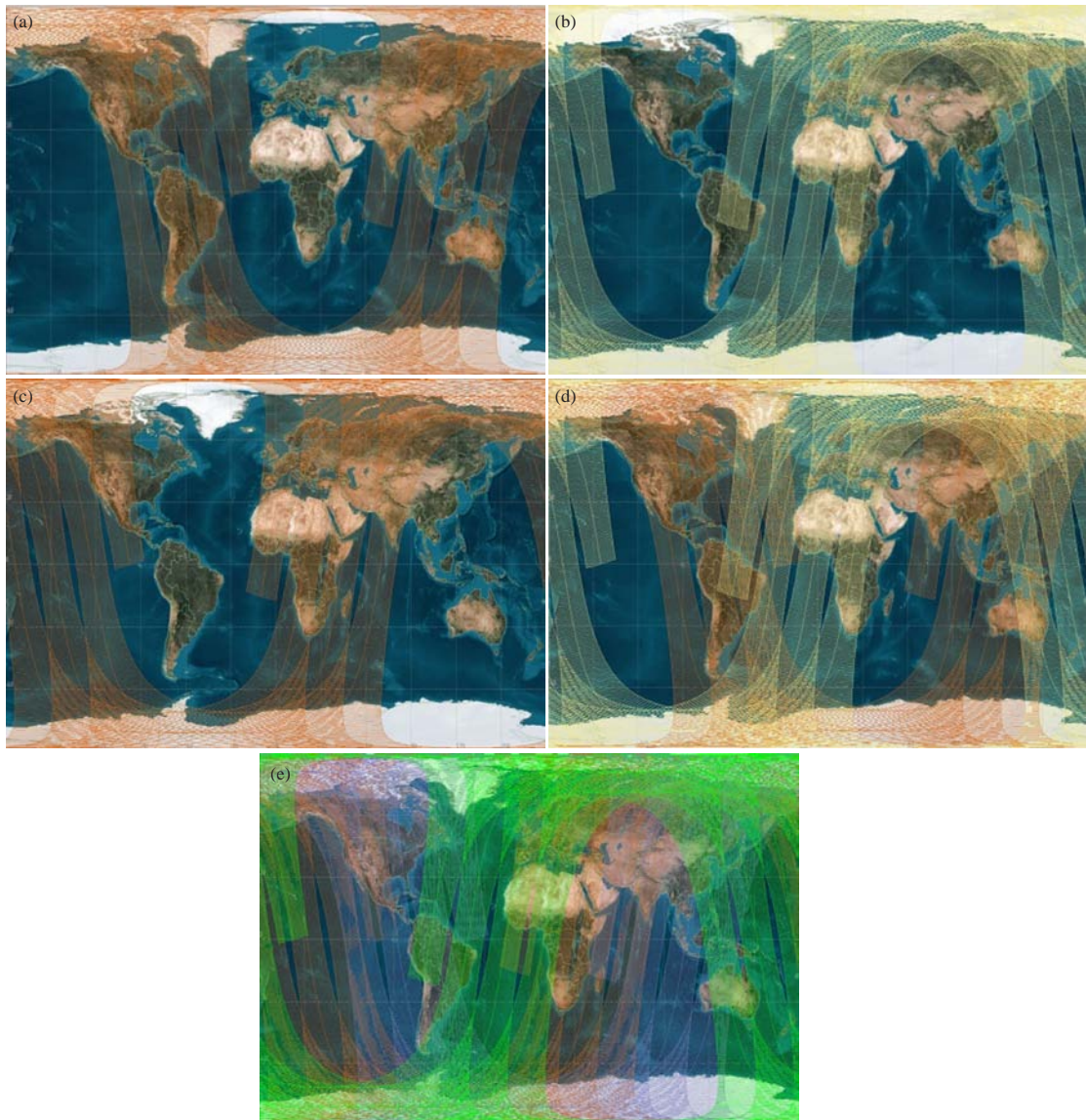


图3 极轨卫星6h观测间隔内的全球资料覆盖度
 (a) 上午卫星观测区域; (b) 下午卫星观测区域; (c) 晨昏卫星观测区域; (d) 上午和下午卫星组网观测区域;
 (e) 上午、下午、晨昏三星组网观测区域

之处，因此可以估计，晨昏卫星的资料对包括中国在内的东亚地区天气预报会有较大的提升和改进。

2.3 晨昏卫星的光学图像应用分析

受凌晨、傍晚光照条件差的影响，晨昏卫星的光学图像应用能力受到限制。尽管如此，高纬度地区在适当的光照条件下仍然具有一定的光学成像能力。同上午卫星和下午卫星相比，晨昏卫星观测时太阳高度角低，地形和云顶高度的几何特征更为明显，利用晨昏卫星光学图像的这种特征可以在晨雾、台风、强对流的监测和分析中开展独特的应用。

FY-1D是第一代风云极轨气象卫星的最后一颗卫星，成功发射于2002年，随着卫星轨道的飘移，目前

的轨道降交点地方时在5:30左右，尽管受到寿命期内仪器性能衰减的影响，其观测数据仍可较好地展示晨昏卫星光学图像的一些独特应用。

图5是利用FY-1D（晨昏卫星）、FY-3A（上午卫星）和FY-3B（下午卫星）的扫描辐射计（Visible and Infrared Radiometer, VIRR）制作的高纬度春季的三通道彩色合成图，其中红通道利用通道6（短波红外 $1.6\mu\text{m}$ ）、绿通道利用通道2（近红外）、蓝通道利用通道1（可见光）的数据。RGB彩色合成图中，白色为水云、青灰色为积雪或者冰晶云、绿色为植被，三张RGB彩色合成图均能提供水云、冰云/积雪、植被的信息。对比上午图像5b和下午图像5c，从图5a中可以

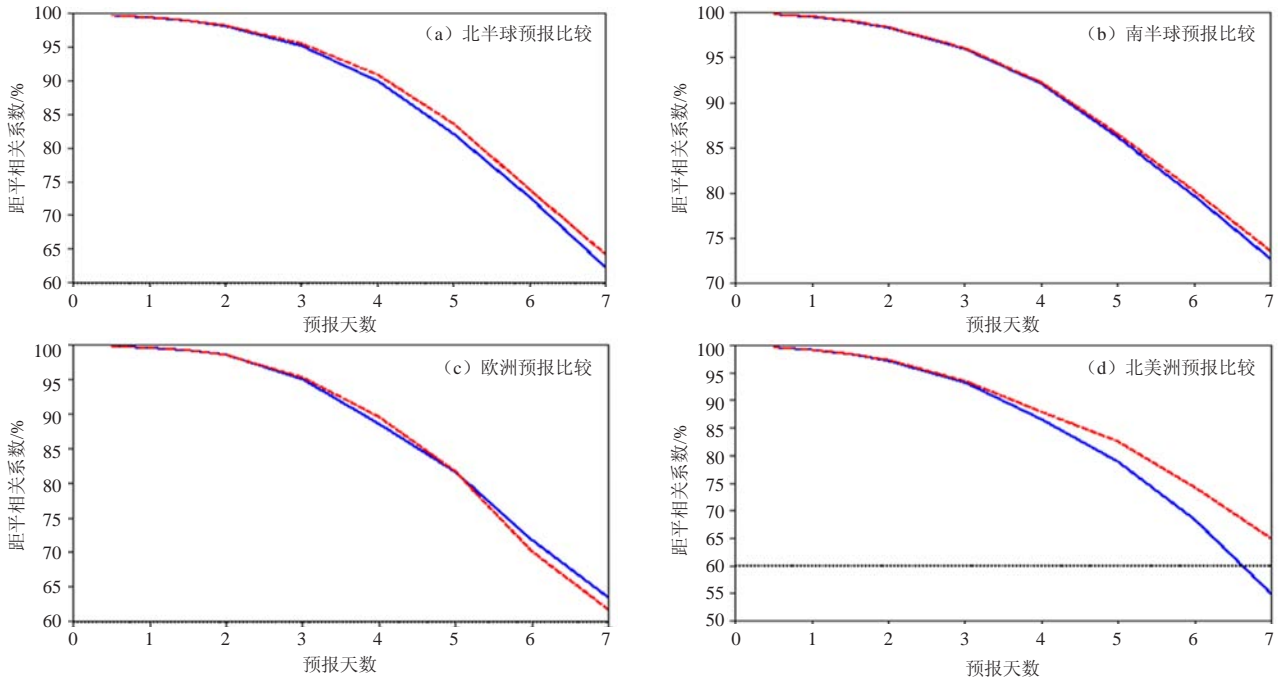


图4 三星组网同两星组网对NWP预报的比较试验结果^[6] (图中蓝线为控制试验结果, 红线为影响试验结果)

看到云在地球表面投射形成的暗长阴影区, 利用云的投射阴影可以推导获得云顶高度。根据云高信息, 可以识别光学图像中的对流云团和对流活跃区域, 为天气分析提供参考信息。

由于大雾天气易出现于凌晨, 晨昏轨道卫星适合对大雾等灾害性天气的监测。图6是FY-1D和FY-3A扫描辐射计VIRR监测的黑龙江北部雾区效果图, FY-1D

图像(图6a)中大片的灰白色区域是夜间长波辐射冷却作用在地表生成稳定逆温层中所形成的雾, 图中的雾有清晰的地表特征结构, 靠近地表水体处, 有与地形等高线匹配的枝杈状结构; FY-3A图像(图6b)反映出, 10:00以后, 由于太阳升起地面逆温层被破坏, 雾逐渐消散。所以, 晨昏卫星能够有效观测到每日凌晨开始形成并于清晨达到最强状态的雾现象。

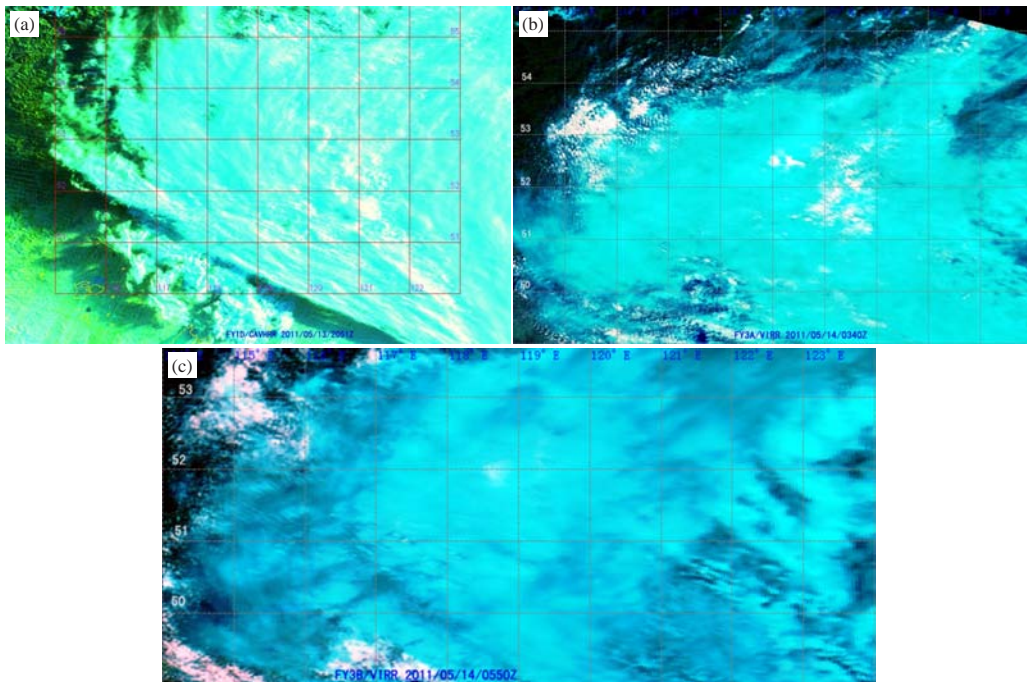


图5 FY-1D (a)、FY-3A (b) 和FY-3B (c) 扫描辐射计VIRR的RGB彩色合成图

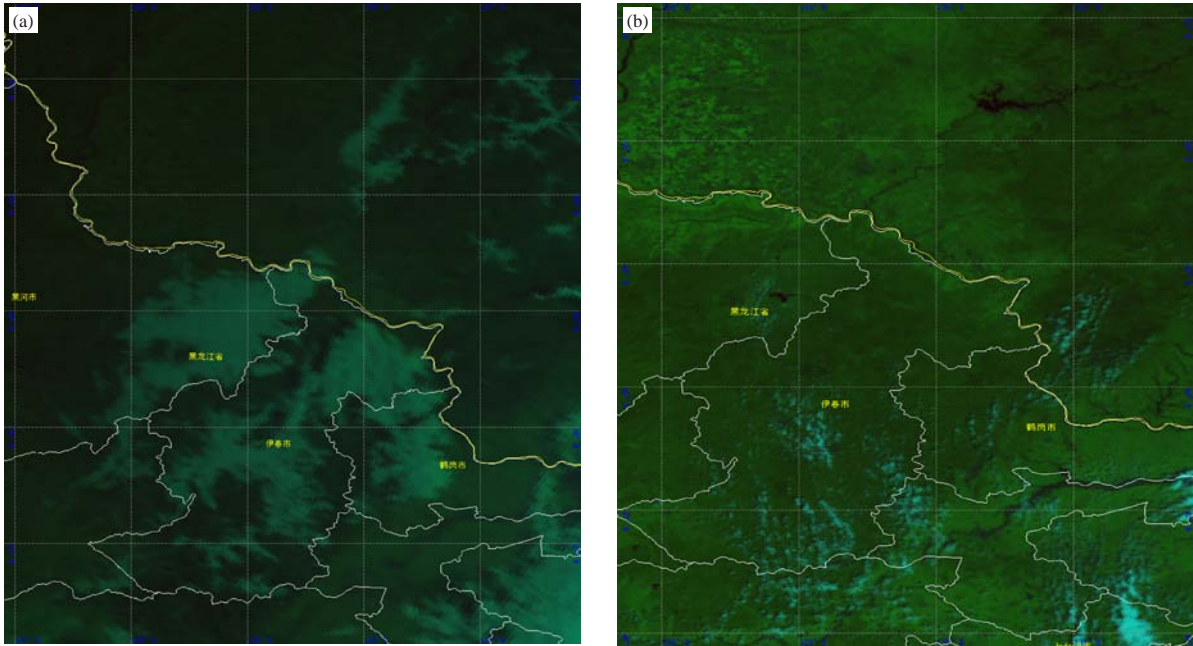


图6 FY-1D (a) 和FY-3A (b) 扫描辐射计VIRR监测的黑龙江北部雾区效果图

2.4 晨昏卫星观测的其他可能应用

很多国家和地区的天气预报机构会在每天上班的开始时刻进行例行的天气简报，一般是在08:00地区的天气预报。晨昏卫星观测可以使会商人员拿到时次最接近、资料最新的卫星图像和产品，对预报员的天气预报提供有益的信息。

对气候研究而言，地表温度、大气温度、大气湿度和降水等要素的日变化完整样本非常重要。晨昏轨道卫星将补充现有的上午和下午轨道系统的数据，并实现全球大部分地区在红外和微波波段的每天六次测量，三星组网后可以显著提升极轨气象卫星的气候监测能力。

在空气质量监测方面，由于晨昏卫星的太阳仰角较低，因此不适宜开展紫外遥感观测。但晨昏卫星观测时段，地表温度和大气边界层温度差异最大，有助于利用红外发射原理开展对大气中的CO和O₃等痕量气体的遥感观测。此外，清晨时一般云量较少，绝对湿度较低，这也有利于空气质量的监测。其他的一些应用，可以参见WMO专门为晨昏卫星观测组织的专家论证报告^[9]。

3 发展风云极轨晨昏卫星的可行性

我国第二代极轨气象卫星FY-3A和FY-3B已分别于2008年5月和2010年11月成功发射，在遥感能力上实现了从单一遥感成像到地球环境综合探测、从光学遥感到微波遥感、从千米级分辨率到百米级分辨率，

以及从国内接收到极地接收的四大技术突破，完成了我国极轨气象卫星的升级换代和组网观测，并在全球观测体系中发挥着日益重要的作用^[10-12]。

FY-3卫星的数据质量已经经过欧美数值模式检验并公认具有稳定优良的卫星资料质量^[13-14]，但是由于FY-3A和FY-3B卫星同欧洲的Metop卫星、美国的NPP卫星观测时间和区域重复，在欧美的全球数值天气预报模式中仅作为业务同化资料的备份。与国外同期卫星Metop和NPP相比，FY-3卫星的全球观测资料价值没有得到充分的体现，业务地位有必要进一步提升。

在2011—2020年我国风云气象卫星发展规划中^[15]，还将发射五颗FY-3卫星，如表1所示。原有规划中，FY-3后续卫星为上午卫星和下午卫星交替配置，没有考虑晨昏卫星的设计。如需发展风云极轨晨昏卫星，需要对原有的卫星规划进行适当调整，同时

表1 2011—2020年我国气象卫星发射计划

年份	静止系列		极轨系列
	FY-2	FY-4	FY-3
2011	业务星		
2012			
2013	业务星		业务星（上午星）
2014			业务星（下午星）
2015	业务星		
2016			业务星（上午星）
2017		光学业务星	
2018			业务星（下午星）
2019		光学业务星	降水测量业务星
2020			业务星（上午星）

也需对原有卫星平台设计和星上遥感仪器配置进行技术调整。考虑到卫星的工业研发周期，将原定2016年发射的风三上午卫星调整为风三晨昏卫星，技术风险相对较小，工程可实现性高。

4 结论

晨昏卫星观测有效补充了6h同化窗内卫星观测资料的空白，对南北半球预报和行星尺度的区域预报有积极的贡献。晨昏卫星弥补了全球观测资料的不足，上午卫星（10:00左右）、下午卫星（14:00左右）、晨昏卫星三星组网观测可以使6h同化窗内卫星资料100%全球覆盖，对4~7d 500hPa位势高度的预报半球尺度（北半球）提高2%~3%，区域尺度（北美洲）提高2%~10%。此外，晨昏卫星观测将完善极轨气象卫星观测体系，对天气会商、气候监测、环境灾害监测、空气质量监测、太阳常数和空间天气监测等均具有积极的作用。

如果在我国FY-3后续卫星中发展晨昏卫星，将完善和丰富我国现有的现代气象业务观测体系，并使FY-3极轨卫星资料具有自己的特色，在业务上形成同欧美卫星的等价互补之势。如果将2016年发射的上午卫星FY-3E调整至晨昏轨道，可能面临没有上午卫星观测资料的风险，特别影响了原有上午卫星的紫外观测和光学成像能力。但权衡利弊，晨昏卫星的应用效益和国际影响大于技术改动引起的风险。

将预计2016年发射的上午卫星FY-3E调整至晨昏轨道，并对部分有效载荷进行技术调整，研制风险小，工程可实现性高。考虑到卫星的研制周期，需要及早推动和开展风云卫星规划调整、极轨晨昏轨道卫星立项论证和研制工作。

参考文献

- [1] Rao P K, Holmes S J, Anderson P K, et al. 气象卫星——系统、资料及其在环境中的应用. 许健民, 方宗义, 徐建平, 等译. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] 国家卫星气象中心. 风云卫星发展研究年度报告. 北京: 国家卫星气象中心, 2013.
- [3] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] Eyre J R, English S J. Impact studies with satellite data at the Met Office. Proceedings of 4th WMO Workshop on “The impact of various observing systems on NWP”. Geneva: WMO, 2008. http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Reports/NWP-4_Geneva2008_index.html.
- [5] Di Tomasi E, Bormann N. Assimilation of ATOVS radiances at ECMWF: EUMETSAT/ECMWF Fellowship Progress Report No.22. Darmstadt: EUMETSAT, 2011.
- [6] WMO. The Vision for the GOS in 2025. Geneva: WMO, 2009. <http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/gos-vision.html>.
- [7] 董超华, 李俊, 张鹏. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] Eyre J R. Status and results of OSEs: Observing system experiments on the impact of AMSU data from 3 satellites. Geneva: WMO, 2003. <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Meetings/...6/Doc6-1.doc>.
- [9] WMO. Assessment of the benefits of a satellite mission in an early morning orbit. Geneva: WMO, 2003. http://www.wmo.int/pages/prog/sat/documents/CGMS_LEO_TigerTeam-Final-Report-April-2013.pdf.
- [10] 杨军. 我国“风云”气象卫星及其应用的回顾与展望. 航天器工程, 2008, 17(3): 23-28.
- [11] 杨军, 董超华. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] Yang J, Zhang P, Lu N M, et al. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond. International Journal of Digital Earth, 2012, 5(3): 251-265.
- [13] 陆其峰. 风云三号 A 星大气探测资料数据在欧洲中期天气预报中心的初步评价与同化研究. 中国科学 (D辑: 地球科学), 2011, 41(7): 890-894.
- [14] Zou, X L, Wang X, Weng F Z, et al. Assessments of Chinese Fengyun Microwave Temperature Sounder (MWTS) Measurements for Weather and Climate Applications. J Atmos Oceanic Technol, 2011, 28, 1206-1227.
- [15] 国家卫星气象中心. 2011—2020年我国气象卫星及应用发展规划. 北京: 国家卫星气象中心, 2010.

城市能量消耗对全球气候影响的模拟研究

张广俊¹ 蔡鸣² 胡爱学³

(1 加州大学圣地亚哥分校斯克里普斯海洋研究所, La Jolla, California 92093, USA; 2 佛罗里达州立大学地球、海洋和大气科学系, Tallahassee, Florida 32306, USA; 3 美国国家大气研究中心, Boulder, Colorado 80307, USA)

摘要: 2006年世界总能量消耗大约是 1.58×10^{13} W。这一能量消耗主要集中于人口稠密的地区。尽管这一能量消耗仅占自然界大气和海洋环流从低纬向高纬能量输送的0.3%，但当这一能量释放到大气中后有可能对正常的大气环流产生一定的影响，从而影响本地及下游地区的气温。本文使用全球气候模式对这一人类能量消耗潜在的气候影响进行了研究。结果表明，当把全球能量消耗超过0.4W的86个网格点加入数值模拟时，在北美和欧亚大陆的中高纬地区的冬季和秋季增温可达到1℃。这些增温地区恰恰是20世纪使用自然和人类强迫的气候模拟相较于实际观测有偏差的区域。因此，研究认为加入人类能量消耗可能会修正气候模拟相对于实际观测的误差。

关键词: 人类能量消耗，气候变化响应，北半球中高纬增温，全球数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.002

Simulation of the Impact of Energy Consumption on Global Climate

Zhang Guangjun¹, Cai Ming², Hu Aixue³

(1 Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, La Jolla, California 92093, USA;

2 Department of Earth, Ocean, and Atmospheric Science, Florida State University, Tallahassee, Florida 32306, USA;

3 Climate Change Research, CGD/NCAR, Boulder, Colorado 80307, USA)

Abstract: The worldwide energy consumption in 2006 was close to 15.8 terawatts in populated regions. Although this energy consumption is only about 0.3% of the total energy transport to the extratropics by atmospheric and oceanic circulations, this anthropogenic heating could disrupt the normal atmospheric circulation pattern and produce a far-reaching effect on surface air temperature. This study identifies the plausible climate impacts of energy consumption by using a global climate model. Results show that the inclusion of energy use at 86 model grid points where it exceeds 0.4 W/m^2 can lead to remote surface temperature changes by as much as 1 K in mid- and high latitudes in winter and autumn over the most part of North America and Eurasia. These regions correspond well to areas with large differences in surface temperature trends between observations and global warming simulations forced by all natural and anthropogenic forcings. It is concluded that energy consumption is likely to be a missing forcing for the additional winter warming trends in observations.

Keywords: energy consumption, climate response, NH mid- and high-latitude warming, global numerical simulation

0 引言

工业革命以来，人类对能源的需求一直在增加。尽管人们努力使能源的来源多样化，但是到目前为止，人类使用的能源还是主要来自矿物燃料。矿物燃料的使用使得大气中CO₂的含量大大增加，从而影响地球的辐射平衡，进而影响全球气候。与此同时，全球人口从20世纪50年代的约25亿增加到现在的约70

亿。而农业技术的进步，使得农业人口不断减少，从而促使全球的城市化进程快速进行。城市化使得人口密度在大城市中急速增加。城市化本身改变了原有的地貌，也改变了地表对太阳辐射的反射率，建筑物和柏油马路可吸收更多的太阳辐射，从而改变城市区域的地表能量平衡和区域水循环，造成城市温度一般会比郊区高一些的现象，这是传统（或狭义）的城市热岛效应。其实，城市化还有另一个被早期研究所忽略的重要效应——大量人口聚居于大城市使得大城市的能量消耗显著地高于相邻地区。这些能量消耗主要来自对室内的供暖或制冷、驱动公共和私人交通工具、工厂生产、室内外的照明及各种家电等。所有这些能量的消耗最终都会转化为热量散发到大气中去，从而

收稿日期：2013年5月30日；修回日期：2013年7月1日
 第一作者：张广俊（1960—），Email: zhangguangjun1960@gmail.com
 资助信息：美国国家科学基金（ATM-0833001, ATM-0832915）；
 美国能源部项目（DE-SC0004974, DE-SC000080, DE-FC02-97ER62402）；NOAA项目（NA10OAR4310168）

影响区域乃至全球气候（广义的城市热岛效应）。例如，有研究^[1]指出日本东京冬天晨间上班高峰，散发到大气中的这种能量可高达 $1590\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

2013年1月，*Nature Climate Change*在线发表的一篇学术论文^[2]对此进行了专门的研究，这项研究是由美国Scripps海洋研究所的张广俊研究员、佛罗里达州立大学的蔡鸣教授和美国国家大气科学研究中心（NCAR）的胡爱学研究员共同完成的。在这项研究中，他们首先指出人类能量消耗对气候的影响明显有别于传统的城市热岛效应。这一能量本身不是由于人类活动对自然地形地貌的改变而产生的，它是由于人类大规模能量消耗，尤其是对千百方年前贮存于地下的矿物燃料的使用而产生的。这一能量对气候的影响也不同于温室气体和大气气溶胶的作用。后者对气候的影响是通过改变地球气候系统与外太空，以及地球气候系统内部的自然的能量交换而改变地球气候。人类能量消耗对气候系统来说是一种直接的外部强迫源，它可直接对城市及其周边地区的大气进行加热，使得城市的热岛效应更强^[1,3-4]。然而，人类能源消耗产生的热能与自然界中的能量传输相比还是微不足道的。比如，这种热能的总消耗量（在2006年大约是150亿 $\text{kW}^{[5]}$ ）仅仅相当于自然界中由大气和海洋环流在 43°N 从热带副热带向高纬地区输送的能量的0.3%^[6]。早期研究曾推测这种热能或许会对大气环流及气候产生一定的影响^[7-8]。后续的全球气候模式研究发现它对短期气候（比如季节变化）的影响与模式中自然变化对短期气候的影响相当^[9-10]。由于这些研究局限于只对模式进行了短期积分（例如几个月），因此这一热能是否会对气候有长期的影响仍然是一个前沿的研究课题。

基于此，张广俊等的研究团队使用了NCAR的大气模式（CAM3）^[11]及其全球耦合气候系统模式（CCSM4）^[12]对人类能源消耗是否影响区域及其全球气候的长期变化进行了系统的研究。

1 模式、资料处理和模拟试验

1.1 模式

CAM3是一个谱模式。垂直方向有26层，水平分辨率是 2.8° （T42）^[11]。CCSM4是一个NCAR全球海气耦合气候系统模式的新版本^[12]。它包含大气环流模式（CAM4）、海洋环流模式（POP2）、海冰模式（CICE4），以及陆面过程模式（CLM4）。CAM4是一个有限体模式，垂直方向也是26层，但水平分辨率是 1° ；POP2是一个差分模式，垂直方向是60层，水平分辨率也是 1° 。

1.2 资料处理

首先，对全球能量消耗分布进行分析，发现全球主要能源消耗集中在北美东西两岸、欧洲、中国东部及日本、韩国等地区。2006年世界总能耗大约是150亿 $\text{kW}^{[5]}$ 。根据美国能源部统计的每个国家人均能量消耗资料，其考虑了能耗最大的86个模式网格点（图1），在这86个模式格点上，每个格点的平均能量消耗必须大于或等于 $0.4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；加入模式的总能量大约占世界总能耗的42%。在模式积分过程中，这一能量不随时间变化（既无季节变化，又无年际变化）。

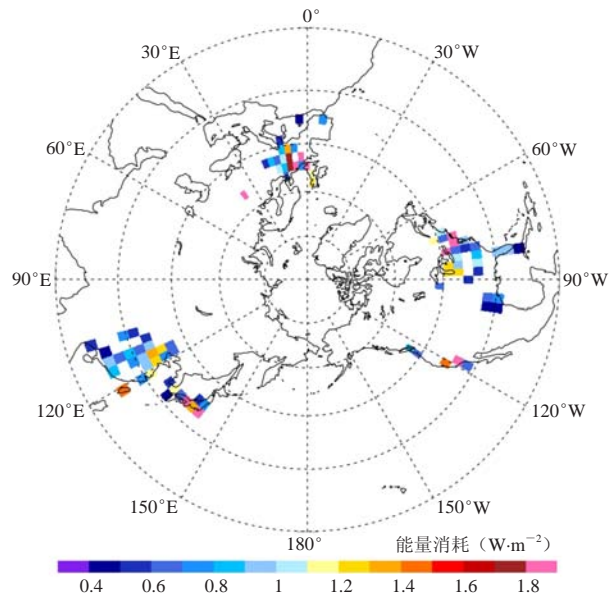


图1 在扰动试验中加入模式的人类能量消耗的模式网格点的地理位置和能量消耗在每个模式网格点的平均值（平均值根据观测资料估计的该模式网格点的能量消耗除以该网格点的面积而得）

另外，在这项研究中，也使用了英国气象局Hadley研究中心的格点化的地面温度观测资料——HadCRUTv3。这一资料使用了全球4500个陆地观测站资料，而海洋上的船舶观测和浮标观测资料来自国际综合海洋一大气资料集（ICOADS）^[13-14]。CRU对这些资料进行了同化、质量控制和月平均，然后插值到全球 $5^\circ\times 5^\circ$ 的网格上，这里只采用了1956—2005年的陆面资料（更详尽的资料请参阅Brohan等^[15]的文章）。

1.3 模拟试验

在这项研究中，一共做了六个试验。第一个为控制试验，包括太阳辐射的日变化和季节变化强迫，同时使用了通过观测得到的气候平均的海温和海冰场的季节变化，将其作为模式的下垫面。这些观测资料取自1981—2000年的月平均。控制试验一共积分了100年，最后的95年资料用于建构控制试验的年周期。第

二至六个试验是集合扰动试验。他们与控制试验的差别在于这些扰动试验中考虑了人类的能量消耗。这些扰动试验的初始条件是从不同时段的控制试验中得来的。每个扰动试验的积分也是100年，但只采用最后95年的资料。因此，总计475年独立的扰动试验年资料作为循环资料。为得到扰动试验相对于控制试验的偏差，扰动试验的每个年循环减去控制试验的平均年循环，从而可得475个独立的年循环样本。

为了与耦合模式结果进行比较，他们使用了NCAR的CCSM4 20世纪的模拟结果。NCAR一共有五个20世纪的模拟试验，初始条件取自同一个以1850年为气候背景的控制试验的不同时段。这些试验加入了所有已知的随时间变化的外部强迫，例如，太阳辐射变化、温室气体和大气气溶胶等，从而再现20世纪观测到的全球气候变化。当然，由于各种各样的模式的不确定性和观测的不连续性等原因，模拟的气候与观测的气候并不完全一样。

2 模式结果

从全球平均的角度考虑，他们加入模式中的由人

类能量消耗而引起的外部能量强迫仅仅是 $0.05\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，远远小于温室气体和气溶胶产生的外部能量强迫（大约 $1.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）^[16-17]。但在局部城市区域，热强迫可达到数百瓦每平方米，但反映到模式格点则仅可到 $4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这是因为模式每个格点面积大约是 $280\text{km}\times 280\text{km}$ 。因此人类能源消耗对全球平均温度的影响非常有限。在模式结果中它对全球表面年平均温度的贡献小于 0.01°C ，对冬季的全球平均气温的影响稍大一些（ 0.02°C ）。但是，作为对人类能源消耗的响应，在中高纬度会出现统计上显著的洲际尺度的气温增暖或变冷可达到 1°C （图2）。在欧亚大陆，最强的增暖出现北亚地区。中国大陆的东部增温达到大约 0.5°C 。在北美大陆，美国东北部和加拿大南部增温也比较明显，加拿大大草原地区的增温可达到 0.8°C 。另一方面，尽管加入模式的人类能量消耗并不随季节变化，但是大气对这一能量强迫的响应却存在着明显的季节变化。例如，北半球冬季的响应最强，其次是秋季和春季，最后是夏季。并且，由此引起的在加拿大西北部、中国东部、俄罗斯北极地区和美国东北部

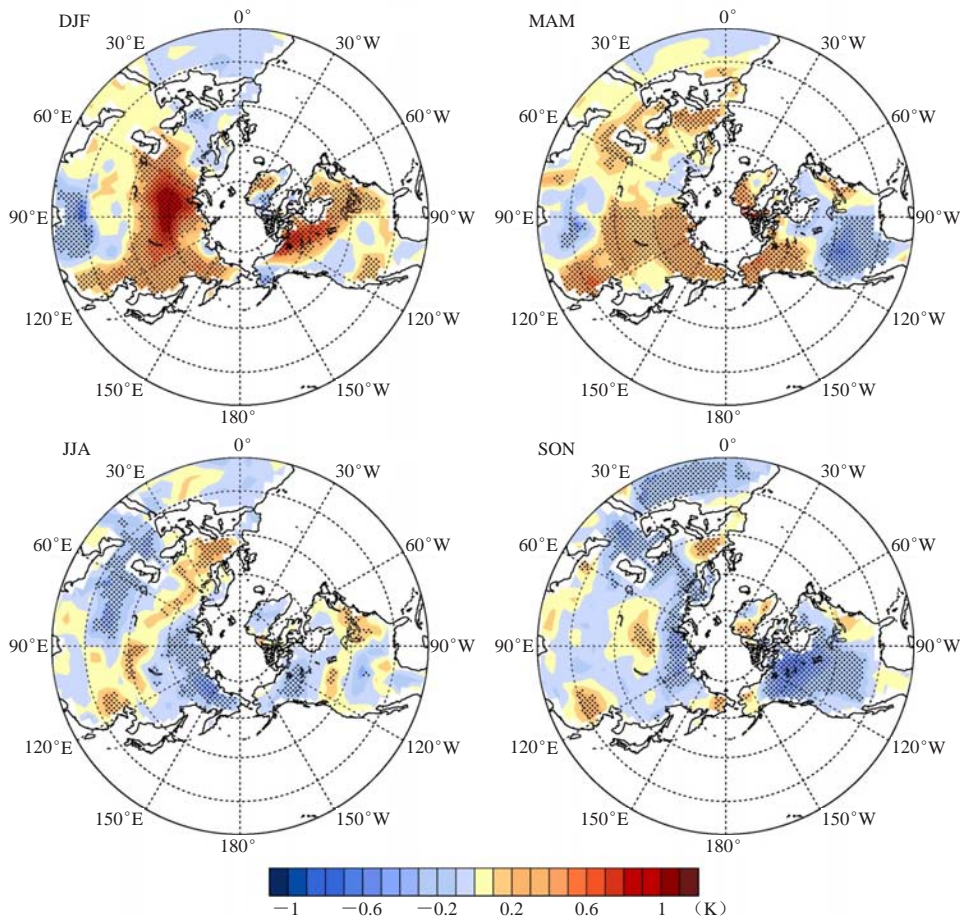


图2 扰动试验相对于控制试验的季节平均地表气温的偏差（黑点区代表通过0.01显著性水平检验的区域）

的冬季增温均持续到春季，而欧洲的冬季降温却演变成春季的增温。到了秋季，除去个别地区，北半球大部分地区对人类能量消耗的反应是降温。在张广俊等^[2]的研究中，没有进一步细致地解释造成大气环流对定常的人类能量消耗强迫的反应会有明显的季节变化的原因，这一现象还有待于进一步的研究。

为了验证CAM3模拟的大气及地表温度对人类能源消耗的反应是否如实地反映了观测结果，他们把CAM3模拟的地表气候变化的形势与CCSM4耦合模式的20世纪试验与实际观测资料进行了比较。CCSM4一共进行了六个20世纪的模拟试验，每个试验均从工业化前气候背景（1850年）的控制试验中不同时间开始积分。在每个试验中，所有已知观测的外部强迫时间序列都纳入到这些试验中，例如，CO₂，CH₄，黑碳、火山爆发产生的气溶胶，太阳辐射的变化等。这些模拟试验的积分是从1850—2005年。观测的地表气温资料来自HADCRUT格点化全球5°×5°的资料。首先，他们计算了CCSM4模拟的20世纪末至21世纪

初的表面气温的变化趋势相对于同年代观测的表面气温变化趋势的偏差的地理分布（1981—2005年的平均减去1956—1980年的平均）。这一偏差的地理分布与CAM3模拟的表面温度对人类能源消耗的反应的地理分布相当一致，尤其是在冬季和秋季（图3）。他们之间的相关系数在冬季和秋季分别达到了0.52和0.6。这一结果表明，CCSM4模拟的20世纪后期冬季和秋季表面温度变化趋势相对于观测的偏差很可能是由CCSM4没有包括人类能源消耗的强迫而造成的。换句话说，以前这一偏差普遍被认为是由于模式产生的气候系统内部的变化与实际观测中的气候系统内部变化不一致而引起的，但最新结果指出以前的观点可能是不正确的。

研究还发现，人类能源消耗不仅对表面温度的区域分布产生影响，还会对高层大气环流有一定的影响。例如，冬季中纬度的西风急流由于人类能源消耗的强迫有向赤道移动的趋势，从而使得西风在20°N加强，但在40°N变弱。另外，对流层上部的西风在60°N

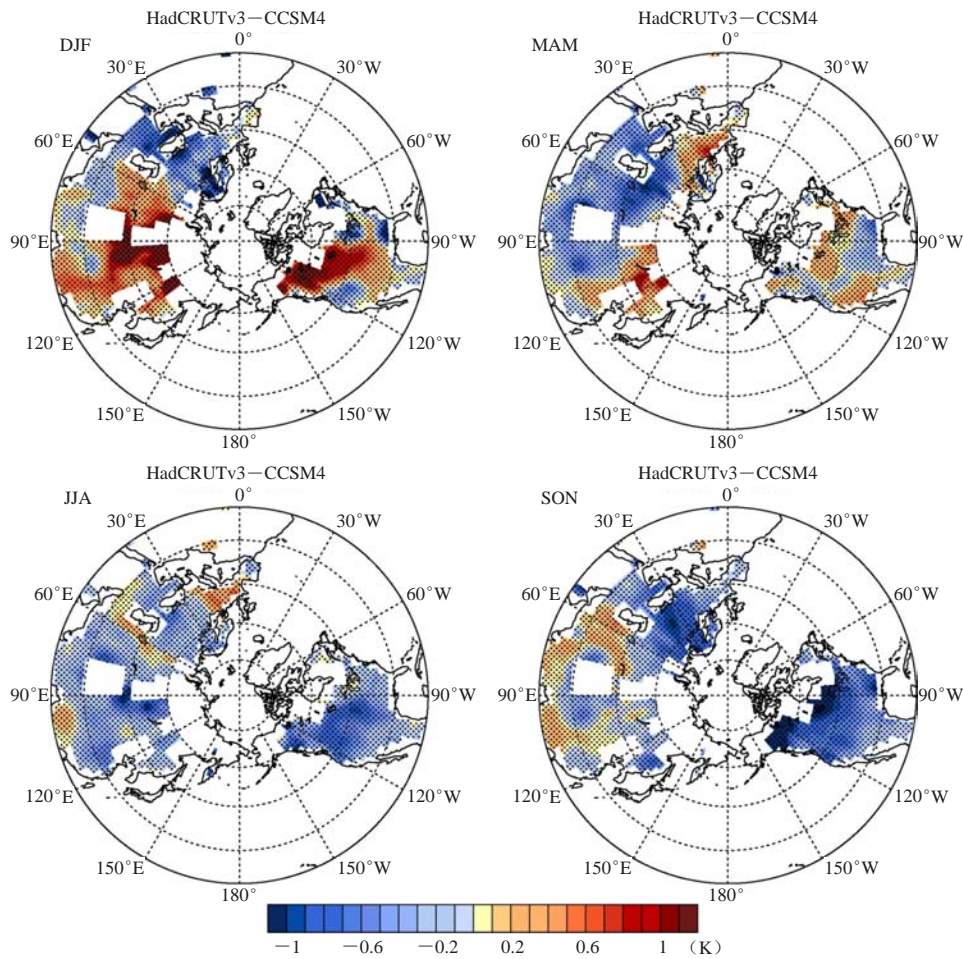


图3 HadCRUTv3观测的陆地上的年代际表面气温变化趋势与NCAR CCSM4集合模拟的20世纪年代际表面气温变化趋势间的偏差（年代际变化趋势与参考文献[1]类似；陆地上的白色区域代表缺乏足够的观测资料，海洋上的资料均省略；黑点区代表通过0.01显著性水平检验的区域）

也获得了加强。这些变化与热成风原理是一致的,比如中高纬的增暖和 40°N 以南的变冷。需要注意的是,由于人类能源消耗主要集中在中纬度地区,试验中的中纬度平均纬向风对这一强迫的响应与以前理想试验中中纬度纬向风对中纬度加热的响应是一致的^[18]。

人类能源消耗对大气的加热影响了大气的气压场,从而改变了冬季正常的大气环流。这一冬季大气环流的变化导致了洲际尺度的冬季中高纬度表面温度的变化。他们的研究显示俄罗斯北极地区的异常低压和中亚的异常高压造成了 $50^{\circ}\text{--}70^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{E}$ 区域的南风明显增强。这一增强的南风把暖空气从南方输送到这里,从而引起了这一地区的明显增温。同理,加拿大大草原和西北地区的增温是由于异常的西风和西南风把暖空气从东北太平洋传递到那里。加拿大东北极区、巴芬湾和格陵兰西北部的变冷则是由坐落于格陵兰的异常低压引起的北风增强所导致的。

与其他由人类活动所引起的对大气环流的强迫相比较,人类能源消耗对大气的强迫相对比较小。例如,根据政府间气候变化委员会对未来强迫的估计, CO_2 的加倍导致局部地区的增温可达到 6°C ,而森林砍伐引起的植被变化可产生 2°C 的局地气温变化。相比之下,大气环流对人类能源消耗的响应可导致欧亚大陆高纬地区最多 1°C 的增温,导致北美高纬地区大约 0.6°C 的增温。他们指出,这些结果只来自一个模式,其他模式是否也能得到相同结果尚不清楚。

3 结论及展望

这项研究表明,尽管人类能源消耗对全球平均气候的影响是微不足道的,可它对大气环流和区域气候产生的影响却不容忽视。与当前的气候模式模拟的20世纪后半叶气候变化趋势与观测的偏差相比较,大气环流和区域气候对人类能源消耗响应的形势与这些偏差十分相似,尤其是在冬季和秋季。显示这些偏差很可能是由于当前的气候模式没有加入人类能源消耗这一外部气候系统的强迫所造成的。当然,这项研究仅仅使用了一个气候模式,如果要进一步证实这一研究结果,类似的试验也应使用其他模式进行比较。另外需要指出的是,目前这项研究仅仅使用了相对粗网格的大气环流模式,未来的试验应使用海气海冰陆面耦合模式并尽可能地使用高分辨率的耦合模式。高分辨率的耦合模式可以更为精确地描述人类能量消耗的地理分布。

最后值得指出的是,由于人类整体生活水平的不断提高,人类的能量消耗在可预见的未来仍会维持在一个高水平上。即便我们更广泛地使用可再生能源,

大量地减少温室气体的排放量,进而减缓或消除全球气候变暖,但是人类能源消耗产生的废热并不会明显减少。这是因为人类的总体能量消耗预计并不会减少,只是从依赖于矿物燃料转而依赖于可再生能源。所以,这项研究再次警醒世人,无论你居住在地球的哪一个角落,人类都(通过大气)紧密地联系在一起。

参考文献

- [1] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmos Environ*, 1999, 33: 3897-3909.
- [2] Zhang G J, Cai M, Hu A. Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America. *Nature Climate Change*, 2013, 3, 466-470, doi: 10.1038/NCLIMATE1803.
- [3] Kusaka H, Kimura F. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. *J Applied Met*, 2004, 43: 1899.
- [4] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *Int J Climatol*, 2010, doi: 10.1002/joc.2201.
- [5] International Energy Agency. World Energy Demand and Economic Outlook. *International Energy Outlook 2009*, 2009, 7-20.
- [6] Trenberth K E, Caron J M. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *J Climate*, 2001, 14: 3433-3443.
- [7] Budyko M, Drosdov I O A, Yudin M I. Influence of economic activity on climate. *Modern Problems of Climatology (Collection of Articles)*, FTD-HT-23-1338-67, Foreign Tech Div, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1966, 484-500.
- [8] Sellers W D. Global climatic model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system. *J App Met*, 1969, 8: 392-400.
- [9] Washington W M. Numerical climate-change experiments: The effect of man's production of thermal energy. *J Appl Meteorol*, 1972, 11: 769-772.
- [10] Washington W M, Chervin R M. Regional climatic effects of large-scale thermal pollution simulation studies with the NCAR general circulation model. *J Appl Meteorol*, 1979, 18: 1501-1511.
- [11] Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3 (CAM3). *J Clim*, 2006, 19: 2144-2161.
- [12] Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. The Community Climate System Model version 4. *J Climate*, 2011, 24: 4973-4991, doi: 10.1175/2011JCLI4083.1.
- [13] Manabe T. The Kobe collection: Newly digitized Japanese historical surface marine meteorological observations, in *Advances in the Applications of Marine Climatology—The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD 1081. Geneva: World Meteorol Organ, 2003, 246.
- [14] Woodruff S D, Worley S J, Arnott J A, et al. COADS updates and the blend with the U.K. Met Office Marine Data Bank, in *Advances in the Applications of Marine Climatology—The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD1081. Geneva: World Meteorol Organ, 2003, 246.
- [15] Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *J Geophys Res*, 2006, 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548 (2006).
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge Univ Press, 2007.
- [17] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *J Geophys Res*, 1997, 102: 6831-6864, doi:10.1029/96JD03436.
- [18] Ring M J, Plumb R A. The response of a simplified GCM to axisymmetric forcings: Applicability of the fluctuation-dissipation theorem. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 3880-3898.

WMO登陆台风预报示范项目研究进展

雷小途 余晖

(中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘要: WMO登陆台风预报示范项目(2010—2015年)自2010年立项至今,已建成一个集当今世界主流台风主、客观预报产品及其性能评估的业务平台。项目通过开展台风预报评估,分析了当前世界上多类先进预报技术的台风路径、强度和降水预报能力,加深了对台风预报可信度的认识,并在台风预报检验新技术和台风集成预报新技术的研发、应用等方面取得了突破性进展,初步建立了涵盖确定性和集合预报的台风路径、强度和风雨预报性能评估技术体系,有效地推进了先进台风预报技术在台风预报业务中的展示和应用。

关键词: 台风, 预报, 评估, 示范

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.003

The Progress of WMO Typhoon Landfall Forecast Demonstration Project

Lei Xiaotu, Yu Hui

(Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030)

Abstract: The “WMO Typhoon Landfall Forecast Demonstration Project (WMO-TLFDP)” was started in May 2010, with an aim to improve the typhoon landfall forecast service for World Expo 2010 and enhance the ability of forecasters and decision-makers to effectively use products of the most advanced typhoon forecasting techniques in the world. The project continued after the World Expo 2010 and will end in 2015. Up to now, the project has set up a platform integrating the most advanced typhoon forecasting guidance in the world. The forecast guidance for typhoon track, intensity, and precipitation has been evaluated in both real-time and post-season manners, which helps in understanding the reliability of typhoon forecasts. Breakthroughs have been made in terms of new verification techniques for typhoon forecast and new consensus forecast techniques based on available guidance. An evaluation index system has been proposed covering the indices for both the deterministic and probabilistic typhoon forecasts. These efforts have effectively demonstrated and promoted the application of advanced typhoon forecasting techniques in operation.

Keywords: Typhoon, Forecast Demonstration, Forecast Evaluation, World EXPO 2010

0 项目简介

2010年5—10月,上海世博会成功举办。为了向此次活动提供世界上先进的登陆台风预报和预警服务,提升预报员和决策者有效使用先进台风预报技术和产品的能力,中国气象局华东区域气象中心于2009年10月向世界气象组织(WMO)提议设立“WMO登陆台风预报示范项目(WMO-TLFDP)”。该项建议于2009年11月得到正式采纳。

WMO-TLFDP由WMO世界天气研究计划(WWRP)、热带气旋计划(TCP)和公共天气服务计划(PWS)联合支持和指导,是WMO“上海多灾

种早期预警项目”的一个组成部分,牵头机构是中国气象局上海台风研究所、华东区域气象中心和WMO东京区域台风中心,参加机构有十个,包括中国气象局国家气象中心、广州热带海洋气象研究所、香港天文台、韩国气象厅等。

WMO-TLFDP旨在增强分析和认识登陆台风预报可信度的能力,评估先进的登陆台风预报技术对提高预报和服务能力的贡献及其社会和经济效益,增强上海多灾种早期预警系统的登陆台风预报能力,展示世界上先进的登陆台风预报技术,推进先进的登陆台风预报技术在WMO成员的业务转化和应用。自立项起,WMO-TLFDP就与THORPEX建立了密切的联系,并开展了台风路径和强度集合预报的评估和应用技术研究。

WMO-TLFDP的主要任务包括:(1)建立多机构登陆台风预报结果的实时收集和显示系统,包括台风路径、强度、风雨分布等;(2)研制和集成台风

收稿日期:2014年1月29日;修回日期:2014年9月15日
第一作者:雷小途(1968—), Email: leixt@mail.typhoon.gov.cn
资助信息:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006008, GYHY201406010);国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452806)

登陆地点和时间、风雨分布的预报评估技术，并开展预报性能的评估；（3）对登陆台风预报进行综合分析，评估预报的可信度；（4）评估登陆台风预报的社会和经济效益。

WMO-TLFDLP立项之初确定的研究周期是3年（2010—2012），WMO在评估其效果后于2012年决定再延续3年（2013—2015）。以下逐一介绍项目在培训研讨、资料收集与存储、台风预报评估、台风集成预报新技术、项目网站和效益评估等方面取得的进展。

1 培训研讨

WMO-TLFDLP项目分别于2010和2012年各举办了一次台风预报培训研讨会，会议地点均在上海。第一次培训研讨会于2010年5月24—28日举行，旨在帮助华东区域的预报员熟悉计划在上海世博会期间引进的台风预报技术和产品。来自中国气象局、欧洲中期天气预报中心、香港天文台、日本气象厅、美国国家飓风中心等8个机构的11位专家给20多位培训学员进行了授课。第二次培训研讨会于2012年6月12—14日举行，来自WMO、日本气象厅、美国国家大气研究中心、中国香港天文台、国家气象中心、上海中心气象台和上海台风研究所等境内外机构的知名专家和各省局气象预报员共计70余名专家学者出席了会议。与会专家就WMO-TLFDLP的应用与实践、上海台风早期预警系统及台风路径、强度、降水预报检验分析和效益评估等进行了介绍交流，探讨了针对路径突变集合预报产品的检验和诊断应用、集合离散度及概率预报等不确定性预报技术分析应用和如何为决策者提供基于集合预报信息的“解决方案”组合等关键科学问题。

2 资料收集与存储

项目收集的预报产品有：确定性的台风路径、强度和大风半径预报，路径和强度的集合预报，大风概率预报，风雨格点预报和模式预报的三维格点场。所涉及的预报方法既有综合预报，也有数值模式和统计预报，详细内容参见文献[1]。来自13家机构，包括欧洲中期天气预报中心、香港天文台、日本气象厅、美国联合台风警报中心、韩国气象厅、加拿大气象局、美国国家环境预报中心、美国国家飓风中心、WMO东京台风中心以及中国气象局国家气象中心、华东区域气象中心、广州热带海洋气象研究所和上海台风研究所。自2010年5月至今，西北太平洋所有台风的预报产品均存储在华东区域气象中心。

3 台风预报评估

2012年，项目开展了一次关于亚太区域台风预报评估业务现状的电子邮件调查^[2]，调查对象是亚太

台风委员会各成员、WMO东京区域台风中心和美国联合台风警报中心。调查结果表明，该区域各业务预报中心开展了大量台风预报评估工作，有些是独立实施，有些是通过国际合作开展，关注的重点是路径和强度的确定性预报。预报评估产品以多种形式提供给预报员参考，既有实时的也有季后的。概率预报的评估产品不多，台风风雨预报的评估也尚未受到足够的重视。

项目开展的台风预报评估工作包括实时和季后两大部分。实时评估的对象是确定性的台风路径和强度预报以及上海台风研究所区域模式WRF ADAS Real-time Modeling System (SMB-WARMS)的格点预报。路径预报的评估指标是距离误差、移向误差和移速误差，强度预报的评估指标是绝对误差和相对误差。项目引进了美国国家大气研究中心研发的模式评估系统MET对SMB-WARMS进行实时评估，评估内容包括降水、温度、风、位势高度、相对湿度等，评估指标除传统的命中率、误报率、均方根误差、相关系数、TS评分等之外，还应用了面向对象的诊断评估方法MODE。

季后的台风预报评估工作在路径、强度、登陆点和降水预报四个方面均取得了显著进展。

3.1 台风路径预报评估

对所有参加项目的综合预报、全球模式、区域模式、集成预报方法和集合预报系统的台风路径预报进行了评估，分析了距离误差的概率分布、区域分布、与台风初始状态和环境流等的关系等，并提出了相对误差比指标来分析不同方法台风移速和移向预报的相对能力^[3-5]。图1是两个全球模式ECMWF-IFS和NCEP-GFS在2010—2012年的预报距离误差分布^[6]，清楚地体现了NCEP-GFS在近几年的显著进步。系统性误差的分析表明，不少模式的预报位置较实况明显偏西。分析距离误差的区域分布特征，发现我国南海、台风生成区域以及台风转向后进入的高纬度区域的预报难度较大。项目引进了在我国台风预报评估业务中使用多年的综合评定指标AI^[7]，并在此基础上提出了一个新的台风路径预报评估指标—路径预报整体偏差TFID^[8]。试验表明，将TFID与常用的距离误差结合使用可以更加准确地识别好与不好的预报路径。

3.2 台风强度预报评估

研究^[9-12]提出了等级评分等新的台风强度预报评估指标，并从相对误差分布、预报技巧、等级评分、趋势一致率、排序分析等多个方面评估了业务常用方法的强度预报能力。结果表明，大多数方法存在低估

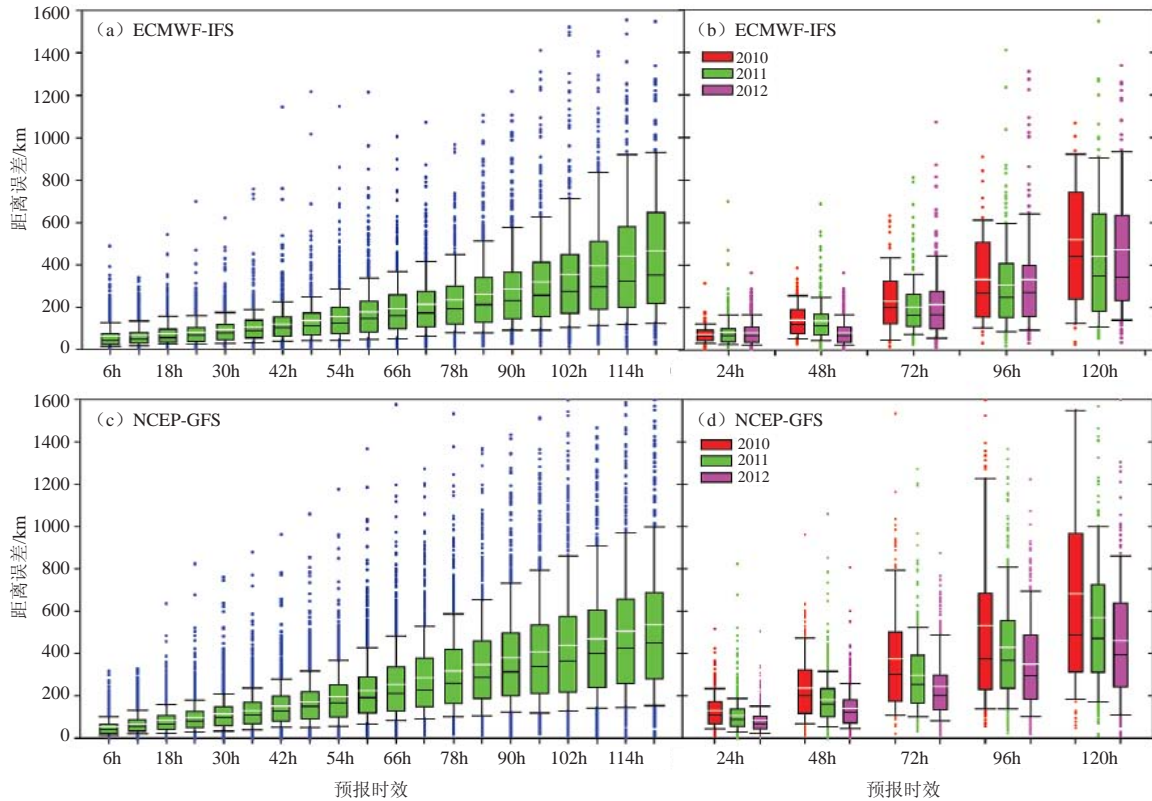


图1 2010—2012年全球模式ECMWF-IFS和NCEP-GFS的距离误差分布图^[6]
(a, c) 3年的总体误差分布; (b, d) 逐年的误差分布

台风强度的问题，所有方法对台风快速增强都没有预报能力，部分方法能够对快速减弱做出准确的预报；中国气象局、日本气象厅、欧洲中期天气预报中心等的气象模式已具备一定的台风强度预报能力，特别是对变化趋势和强度等级的预报在24h或36h以上时效要优于气候持续性方法；对不同初始强度的台风，各模式在不同时效的误差特性有所不同，且模式预报误差与初始强度误差呈显著正相关关系（图2）。对8个集合预报系统（NMC/CMA、STI/CMA、KMA、ECMWF、CMC、NCEP、JMA、TEPS、JMA_WEPS）的台风强度预报能力也进行了

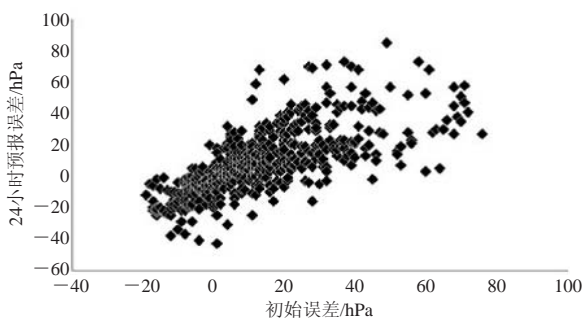


图2 日本气象厅全球模式台风中心最低气压的初始误差与24小时预报误差散点图^[12]。样本数为602

评估^[13]，发现尽管存在分辨率普遍较低的问题，大部分系统对强度变化都有一定的预报能力，依据初始强度误差对预报结果进行简单的线性平移订正可明显改善集合预报在短时效的预报技巧（图3）。

3.3 登陆点预报评估

对台风登陆点预报的评估表明，2012年大部分综合预报方法的24h登陆点预报命中率达100%，且有20h以上的预报时效^[5]，较2010和2011年有显著进步^[3-4]。对登陆位置的24h预报，不同台风间差异很大，最小仅几千米，最大可达几百千米。

3.4 台风降水预报评估

对2010—2012年中国气象局、日本气象厅、欧洲中期天气预报中心等的气象模式进行了评估，评估指标包括均方根误差、平均误差、平均绝对误差、常用评分指标TS、ETS、POD、FAR和面向对象的诊断评估方法MODE^[14]等，分析对象是影响华东的台风。根据影响台风降水的环境系统差异进行了分类统计，包括西风槽型、季风环流型、复杂地形型等，并对2010年“圆规”、2012年“海葵”和2013年“菲特”3个台风进行了个例分析。结果表明，业务全球模式可较好地把握天气尺度的降水

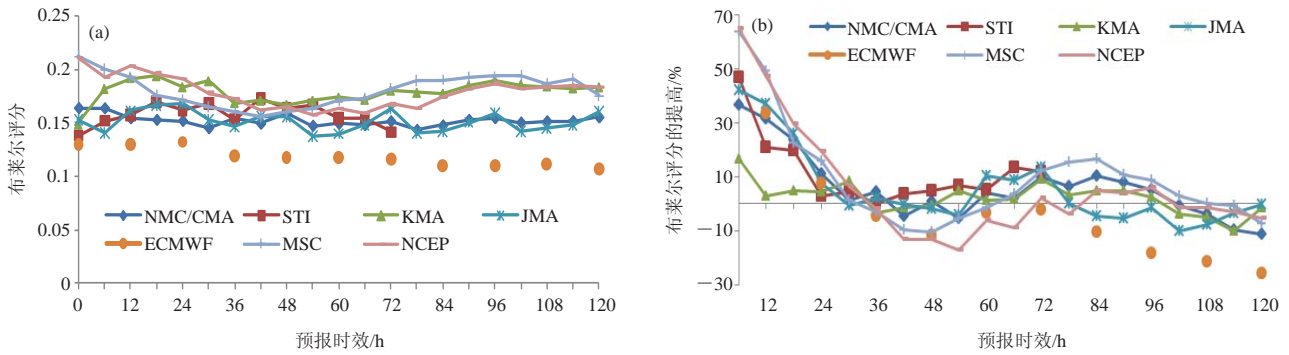


图3 (a) TIGGE集合预报系统台风强度预报的布莱尔评分; (b) 依据初始强度误差对预报结果进行线性平移订正后的布莱尔评分相对(a)的技巧(%)^[13]

过程, 尽管对降水的确切位置和量值的预报仍不十分准确, 例如“圆规”与其西侧冷空气之间的辐合所致降水^[15]。对于小尺度的极端降水过程, 全球模式目前几乎没有预报能力, 高分辨率区域模式的预报结果则具有一定的参考价值, 例如“圆规”与“狮子山”倒槽相互作用、“菲特”残余环流在上海引发的特大暴雨过程。图4是区域模式SMB-WARMS在2010年8月31日08时(北京时)起报的24h降水预报的MODE评估结果^[16], 此次降水过程是“圆规”台风与其西侧冷空气、南侧“狮子山”台风倒槽相互作用所致, 可见预

报降水的范围较观测明显偏大, 但预报降水区的走向与观测很一致。

通过以上调查分析和预报评估研究, 增进了我们对台风预报评估业务及研究现状的认识, 较为全面地展示了当今世界主流预报技术的台风预报能力和薄弱环节。项目以此为基础, 初步建立了涵盖确定性和集合预报的台风路径、强度和风雨预报性能评估技术体系, 并自2012年起据此进行亚太地区台风预报性能评估, 有关分析报告已成为ESCAP/WMO台风委员会确定年度工作计划的重要技术参考材料。

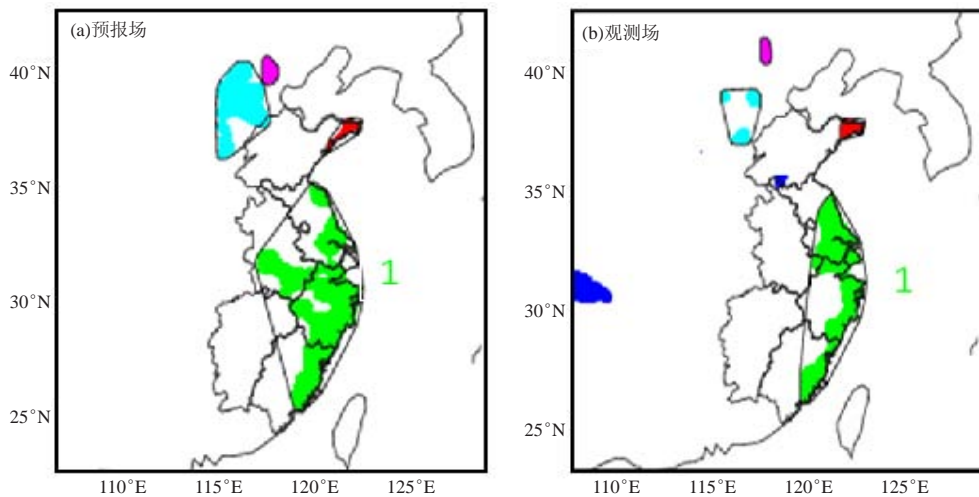


图4 区域模式SMB-WARMS在2010年8月31日08时(北京时)起报的24h降水预报的MODE评估结果 (黑色实线标出的是降水超过10mm的区域; 不同颜色表示不同的降水目标体, 降水目标体1的预报与观测面积比是1.49, 二者的质心距离是70km, 两区域走向的夹角是5.7°)^[16]

4 台风集成预报新技术

众所周知, 集成预报是提高天气预报准确率的一个有效手段, 在全球各台风业务中心的路径预报中已得到广泛应用^[2]。项目在这方面也做了一些有益的尝试, 创新性地提出了基于集合预报短时效误差的台风

路径选择集成预报技术和基于误差预估的台风强度多模式集成预报技术, 切实推动了集合预报产品在我国台风业务预报中的定量应用。

4.1 基于集合预报的台风路径选择集成预报技术

通过对集合预报成员的短时效预报误差进行评

估，从中挑选出表现较好的成员进行长时效的预报集成（图5），提出了基于集合预报的台风路径选择集成预报方法^[17]。对4个全球集合预报系统进行应用试验的结果表明，如将该方法应用于ECMWF集合预报系统产品，所得台风路径预报的性能明显提高（72h误差从原来集合平均的230km缩小为207km），表现出很好的应用价值。该方法所提出的集合预报应用思路已自2012年起在中央气象台投入业务应用，为我国近两年台风路径预报准确率提高做出了重要贡献。需要注意的是，当模式预报的短时效误差趋势与长时效误差趋势不一致时，该项技术无法表现出对模式集合平均的优势。影响这种趋势一致性的因素主要包括：台风陆地相互作用、台风变性、台风路径突变、台风移速缓慢、台风初始强度弱且结构松散等。因此，集合预报产品在提升台风路径预报能力方面的作用仍有待进一步挖掘。

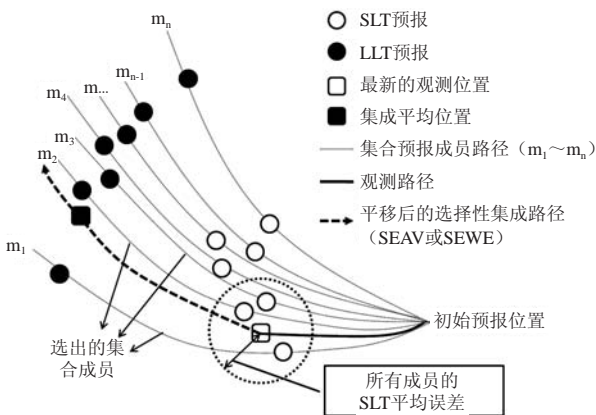


图5 基于集合预报的台风路径选择集成预报方法示意图^[17]

4.2 基于误差预估的台风强度多模式集成预报技术

常用的台风强度客观预报方法包括外推、统计和统计动力预报方法，或是以这些方法为基础的集成预报^[18]。项目对中国气象局、日本气象厅、欧洲中期天气预报中心等的多个业务数值模式的台风强度预报进行了分析，发现预报误差与台风及其所处环境的初始状况有密切关系，包括台风初始强度、尺度、移速、环境气压、环境风切变、洋面温度等。总体而言，模式对较弱的台风、尺度较大台风的预报性能相对强台风、小台风要好，环境气压强、洋面温度高时预报性能相对较差。利用这些因子建立了各模式强度预报误差的预估模型，并在此基础上建立了多模式集成预报方案^[12, 19]。独立样本检验表明，该方案具有相对气候持续性预报方法以及我国中央气象台综合预报的正技巧（图6）。这提出了一个模式台风强度预报的业务应用新思路，有望为提升台风强度预报能力提供有价

值的参考依据。

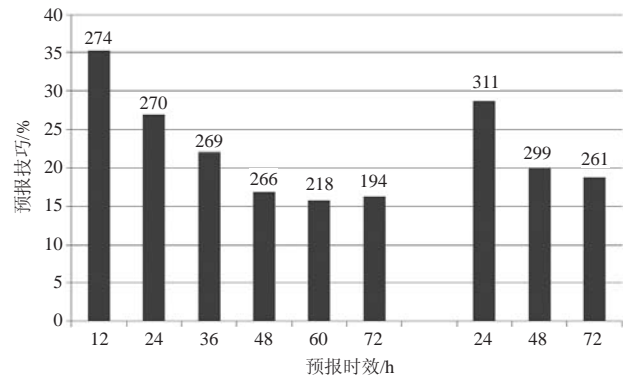


图6 多模式集成预报方案相对气候持续性预报方法（左）以及我国中央气象台综合预报（右）的预报技巧。立柱上方为2011年独立检验样本数

5 项目网站和效益评估

WMO-TLFD项目收集的台风预报资料和产品在2010年上海世博会期间通过华东区域气象中心的业务网站提供给预报员使用，英文版的项目网站则于2011年7月正式开通，网址是<http://tlfdp.typhoon.gov.cn>。该网站向公众提供项目基本信息，并向注册用户提供服务项目收集或制作的台风预报资料和产品，包括实时监测信息、路径、强度和风雨预报信息、模式格点预报场、路径和强度实时评估结果等。

WMO-TLFD项目的实施为2010年上海世博会期间气象服务的顺利开展提供了强有力的支撑。为定量评估项目效益，更好地了解用户需求，在2012年4—6月期间对公众、专业用户和预报员开展了书面问卷调查。对调查问卷的统计表明^[20]，台风预警信息的公众关注度相当高，有超过80%的公众认为天气预报和台风预警是准确并且在进步的，大多数用户（70%）希望得到确定性预报而非概率预报。调查还表明用户对影响预报的需求很高。这些调查结果在一定程度上为台风预报和服务指出了未来可能的发展方向。

6 结语

WMO-TLFD项目（2010—2015年）自2010年实施至今，已建立了集当今世界主流台风客观预报产品及其预报性能的业务平台。项目通过开展台风预报评估，分析了当前世界上多类先进预报技术的台风路径、强度和降水预报能力，加深了对台风预报可信度的认识，并在台风预报检验新技术和台风集成预报新技术的研发、应用等方面取得了突破性进展，项目所取得的成果已开始在我国日常业务预报和服务工作中发挥重要作用，有效地推进了先进台风预报技术在台风预报业务中的展示和应用。

项目初步建立的涵盖确定性和集合预报的台风预报性能评估技术体系, 及据此进行的亚太地区台风预报性能分析评估和撰写的分析报告, 自2012年起成为ESCAP/WMO台风委员会确定年度工作计划的重要技术参考材料, 推动该区域的台风预报性能评估业务踏上了一个新台阶。项目将继续与WMO相关的技术专家组和示范项目合作, 进一步完善台风路径、强度和风雨分布预报性能评估技术体系, 研发台风生成、变性和台风大风半径等结构特征量预报的性能评估技术, 以期更有效地推进亚太地区台风客观预报技术的改进和成果的业务转化。

鉴于目前实时预报中的海量预报信息及其性能相对优劣的不确定性, 项目还将在性能评估的基础上, 研发基于可预报性和不确定性分析的预报可信度预估技术, 以为预报员和决策者提供“最佳选择”依据。

参考文献

- [1] Tang X, Lei X T, Yu H, et al. Progress report of the WMO Typhoon Landfall Forecast Demonstration Project (WMO-TLFDP). WMO Workshop and Training Course on Operational Tropical Cyclone Forecast, Shanghai, China. 12-14 June, 2012.
- [2] Yu H, Chan S T, Brown B, et al. Operational tropical cyclone forecast verification practice in the western North Pacific region. Tropical Cyclone Res Rev, 2012, 1(3): 361-372.
- [3] 汤杰, 陈国民, 余晖. 2010年西北太平洋台风预报精度评定及分析. 气象, 2011, 37(10): 1320-1328.
- [4] 陈国民, 汤杰, 曾智华. 2011年西北太平洋台风预报精度评定及分析. 气象, 2012, 38(10): 1196-1204.
- [5] 陈国民, 余晖, 曹庆. 2012年西北太平洋台风预报精度评定及分析. 气象, 2013, 38(10): 1350-1358.
- [6] Chen G M, Yu H, Cao Q, et al. The performance of global models in TC track forecasting over the western North Pacific from 2010 to 2012. Tropical Cyclone Res Rev, 2013, 2(3): 149-158.
- [7] 李建平, 史久恩. 热带气旋路径预报评估方法研究-II. 多因子综合评价方法. 大气科学研究与应用, 1997, 12(1): 1-7.
- [8] Yu H, Chen G M, Brown B. A new verification measure for tropical cyclone track forecasts and its experimental application. Tropical Cyclone Res Rev, 2013, 2(4): 185-195.
- [9] Chen C Z, Yu J H, Li Q Q. Western North Pacific tropical cyclone intensity guidance evaluations using an alternative verification technique. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2011, 4(3): 151-156.
- [10] Chen C Z, Li Q Q, Yu J H. Evaluating the performance of western North Pacific tropical cyclone intensity guidance. Part I: Basic characteristics. Tropical Cyclone Res Rev, 2012, 1(3): 340-352.
- [11] Li Q Q, Chen C Z, Yu J H. Evaluating the performance of western North Pacific tropical cyclone intensity guidance. Part II: Intensity forecast accuracy in different life stages. Tropical Cyclone Res Rev, 2012, 1(4): 458-468.
- [12] Yu H, Chen P Y, Li Q Q, et al. Current capability of operational numerical models in predicting tropical cyclone intensity in Western North Pacific. Wea Forecasting, 2013, 28: 353-367.
- [13] Chen P Y, Yu H, Li Q Q, et al. Current capability of operational numerical models in tropical cyclone intensity predictions over the Western North Pacific. WMO Workshop and Training Course on Operational Tropical Cyclone Forecast, Shanghai, China. 12-14 June, 2012.
- [14] Davis C, Brown B G, Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methods and application to mesoscale rain areas. Mon Wea Rev, 2006, 134: 1772-1784.
- [15] 漆梁波, 曹晓岗. 双台风形势下上海地区一次暴雨过程的预报分析和对比. 热带气象学报, 2013, 29(2): 177-188.
- [16] Tang X, Lei X T, Yu H. WMO Typhoon Landfall Forecast Demonstration Project (WMO-TLFDP) - concept and progress. Tropical Cyclone Res Rev, 2012, 1: 89-96.
- [17] Qi L B, Yu H, Chen P Y. Selective ensemble mean technique for tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems. Quart J Royal Meteorol Soc, 2014, 140: 805.
- [18] 陈联寿, 端义宏, 宋丽莉, 等. 台风预报及其灾害. 北京: 气象出版社, 2012.
- [19] 余晖, 陈国民, 万日金. 数值模式的热带气旋强度预报订正及其集成应用. 气象学报, 2015. 待刊.
- [20] Xu M, Mi W H. The progress of the benefit assessment. WMO Workshop and Training Course on Operational Tropical Cyclone Forecast, Shanghai, China. 12-14 June, 2012.

新版“奇台气象”微信公众平台开发完成

■ 简咏梅 梁炳新



农业气象模块主界面

2014年5月, 新疆奇台县气象局开通“奇台气象”微信公众号, 并于当年11月完成新版微信互动平台的开发, 为公众提供了方便快捷的气象服务。该平台包含“天气”、“预报”、“农业气象”三个模块。其中, 在“天气”模块中可以查看最新的天气实况、指数预报, 自动气象站温度、风向风速、降水数据; “预报”模块可以查看未来三天天气预报、天气预警; “农业气象”模块可以查看农气预报、农气建议、三农资讯、气象科普知识、天气雷达图、卫星云图, 还可以上报灾情、发布供求信息。用户只要关注该微信公众账号, 就可以接收到持续更新的文字、图片、语音和视频等多种形式的权威气象服务产品。

奇台作为农业大县, 不仅为当地群众提供了基本气象信息, 也为农业用户、气象专业人士设计了专业、高端的气象服务产品模块, 有力提升了奇台县公共气象的服务能力。

(奇台县气象局)

2013年中国夏季降水动力—统计 气候预测及检验分析探讨

赵俊虎¹ 杨杰² 龚志强¹ 封国林¹

(1 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 江苏省气象局气候中心, 南京 210008)

摘要: 2013年夏季(6—8月), 中国降水呈北多南少的异常分布, 东北、华北、四川盆地东部及西北大部降水偏多, 而淮河流域至江南大范围地区及青藏高原等地降水偏少。动力—统计预测和动力统计—诊断预测两种方法对夏季北方多雨和长江少雨的总体形势预测基本正确, 预测评分(PS)分别为71分和74分, 空间距平相关系数(ACC)分别为0.09和0.20。对西太平洋副热带高压、欧亚阻塞高压和东北冷涡区500hPa高度距平场的动力—统计预测结果也较理想, 为夏季旱涝分布的诊断预测提供了依据。指出了目前动力—统计预测可能存在的问题, 如预测结果对模式预测能力依赖性强, 采用多因子选取相似年时, 部分因子与降水之间的物理机制不清晰, 等等; 并指出了可能的解决途径, 如通过多模式评估和集合预报来克服预测结果对模式的依赖性, 通过深入分析因子对降水的影响机制、因子与降水之间年际关系的年代际变化等来解决因子的筛选问题。

关键词: 夏季降水, 高度距平场, 动力—统计预测, 动力统计—诊断预测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.004

Analysis of and Discussion about Dynamic-Statistical Climate Prediction for Summer Rainfall of 2013 in China

Zhao Junhu¹, Yang Jie², Gong Zhiqiang¹, Feng Guolin¹

(1 National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Jiangsu Provincial Climate Center, Nanjing 210008)

Abstract: The precipitation anomaly distribution over China in the summer of 2013 was seen by the phenomenon of flooding in north and drought in south. More rainfall occurred in northeast China, north China, the eastern Sichuan basin and the most of the northwest China, while less rainfall occurred from the Huaihe river basin to the south of the lower reaches of the Yangtze River, and it also occurred over Tibetan Plateau. Both the dynamic-statistical prediction (DSP) and dynamic statistical-diagnostic prediction (DSDP) have made the approximately correct forecast for the situation of the flood in north and drought in the Yangtze River. The predictive score (PS) is 71 and 74 respectively, while the anomaly correlation coefficient (ACC) is 0.09 and 0.20 respectively. The DSP results of 500hPa height anomalies field in the areas of western Pacific subtropical high, Eurasian blocking high and northeast China cold vortex are ideal, which provided the basis for diagnostic prediction of the summer drought and flood distribution. Finally, the existing problems of DSP were discussed and we pointed out the possible solutions.

Keywords: summer Rainfall, height anomalies field, dynamic-statistical prediction, dynamic statistical-diagnostic prediction

0 引言

夏季(6—8月)降水预测是短期气候预测的重要内容,也是气候预测的难点问题^[1]。近几十年来,气象学者对中国夏季降水的统计规律、影响机制及预测方法等进行了研究^[2-7],其中预测方法主要有两

类,即统计方法和数值模式的动力学方法,二者各有优缺点,目前普遍的共识是:统计学方法与动力学方法要相互借鉴,融合发展^[8]。研究表明,动力和统计相结合是提高短期气候预测准确率的有效途径之一。围绕两者如何有效结合的问题,国内外开展了广泛的研究^[9-12],其中在气候模式预报基础上结合数理统计方法,利用历史资料信息对模式误差进行预报是引人注目的研究方向。早在1958年,顾震潮^[13]就提出将数值预报从初值问题改为演变问题,并指出了数值天气预报中使用历史资料的重要性和可行性^[14]。丑纪范从理论上探讨了在长期预报中动力和统计如何结合的问题

收稿日期:2013年12月14日;修回日期:2014年4月17日

第一作者:赵俊虎(1985—),E-mail:zhaojh@cma.gov.cn

资助信息:气象关键技术集成与应用重点项目(CMAGJ2014Z09);

公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306021);

国家重点基础研究发展计划(2013CB430204)

题^[15-17]。在此基础上,众多气象学者从不同的角度建立相似—动力模式^[18-22],发展了适用于动力季节预测的相似误差订正方法,并进行了预测试验,其结果显示这些方法能有效提高热带降水和环流的预报技巧^[23-25]。2008年以来,一些研究发展了利用相似年的模式误差信息,实现对预报年气候模式预报误差预报的季节降水动力—统计预测(DSP)方法^[26-33],该方法在中国气象局国家气候中心(NCC)的2009—2012年夏季降水预测中实现了业务应用,4年预测评分(PS)平均为73分,空间距平相关系数(ACC)平均为0.16^[34],体现了较高的预报技巧。

本文回顾了2013年中国夏季降水实况、DSP和动力统计—诊断(DSDP)两种方法的预测结果,以及西太平洋副高、欧亚阻塞高压及东北冷涡活动区500hPa高度场距平的DSP及检验,最后指出了目前DSP中存在的一些问题,为进一步完善和细化DSP的理论和技術提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文采用CMAP的1983—2013年夏季总降水量作为夏季降水实况资料,以NCEP/NCAR再分析月平均位势高度场作为高度场的观测资料,模式资料为NCC_CGCM生成的1983—2013年共31年回报和预报的逐月降水场和高度场资料(以上资料水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)。此外,还采用了NCC气候系统诊断预测室提供的74项月环流特征量资料和NOAA的40项月气候指数(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>),时段均为1951年1月—2013年2月。本文取1981—2010年平均值作为气候态。

1.2 预测和检验方法

预测方法主要有DSP和DSDP两种方法。DSP方法在文献[26]和[34]中均有详细介绍,具体思路和步骤简要概述如下:以2013年夏季降水为例,针对不同气候区域(将全国分为8个区域),进行单因子相似误差订正1983—2012年交叉检验的30年平均ACC从大到小排序,将其中ACC最大值因子作为组合的首选因子,通过逐步增加因子个数得到不同因子个数下(因子数为10个时,ACC较高且稳定)预报年前期历史交叉检验ACC评分最高的因子组合,对因子组采用EOF分解提取累积方差贡献达80%的主分量,通过计算欧氏距离得到因子组合选取的4个相似年,进而选取相似误差场,结合模式结果得到2013年汛期降水预测图。

在DSP方法的基础上,进行了DSDP,其方法简要概述如下^[32-33]:首先针对不同气候区域,进行单因

子相似误差订正交叉检验的平均ACC从大到小排序,获取关键预报因子集;对上述各区所选因子与区域夏季平均降水量进行相关性检验,剔除相关性较差的因子(未通过95%的信度检验),并考虑剩余因子潜在的物理意义和合理性,对预测因子进行诊断分析,剔除伪相关因子;对剩余因子不足10个的区域添加部分前期异常因子,如海温、大气遥相关型等;最后利用获取的新的因子组合,按照DSP方法进行预测。

降水的检验方法主要为PS评分和ACC,具体计算方法参见文献[35]。

2 2013年夏季降水实况及预测

2.1 2013年夏季降水实况

2013年夏季我国降水整体略偏多,且呈北多南少的分布,降水异常偏多的区域主要位于东北、华北、四川盆地东部及西北大部,降水偏多两成以上,四川盆地东部和华南沿海降水也偏多;降水异常偏少的区域主要位于黄淮南部地区、江淮地区和云贵高原至江南一带地区,青藏高原中东部和河套西北部降水也偏少(图1)。夏季东北局部地区出现了涝灾,7月下旬至8月中旬江南出现了罕见的大范围持续高温天气。

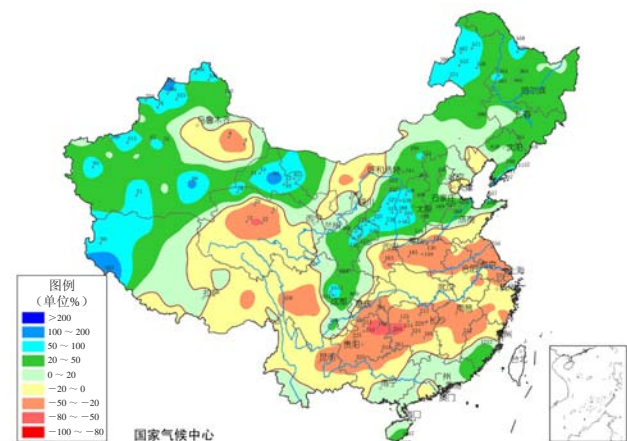


图1 2013年夏季降水距平百分率分布

2.2 预测结果及检验

图2a为DSP方法预测的2013年汛期降水距平百分率图。预测主雨带位于华北南部,东北大部、华南至江南东部、青藏高原东部等地降水偏多,西北和内蒙古大部、西南地区南部、长江中下游地区降水偏少;其中华北南部和东北大部、华南南部降水偏多预测正确,西南南部和长江中下游地区降水偏少预测正确;淮河流域和青藏高原东部地区降水预测偏多,西北和内蒙古大部降水预测偏少,预测错误。预测结果PS评分为71分,ACC为0.09。

此外,利用DSDP方法对2013年夏季降水进行了

预测(图2b), 预测主雨带位于西藏东部至华北南部一带, 内蒙古东部和东北东部、新疆大部、江南东部降水偏多, 而西藏西部至青海西部、内蒙古中西部、华北北部至东北西南部、西南大部、华南西部、长江中下游地区降水偏少。其中对主雨带的预测接近实

况, 华北南部、东北北部和东部、新疆大部偏多, 长江流域、西南大部降水偏少预报正确; 华北北部至东北西南部、华南南部预测降水偏少, 江南东部等地预测降水偏多, 与实况不符。预测结果PS评分为74分, ACC为0.20。

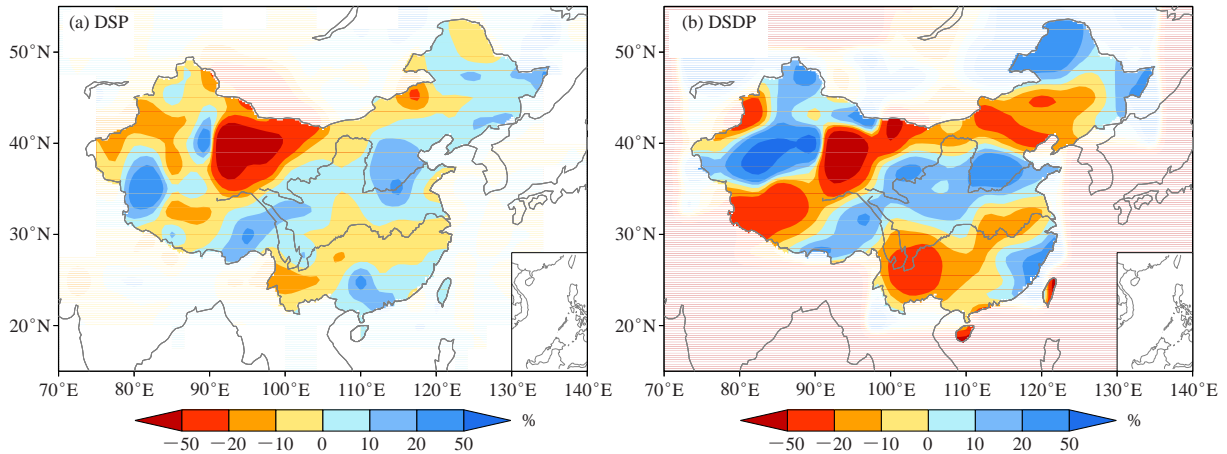


图2 2013年夏季降水距平百分率分布

DSDP方法是在DSP方法的基础之上, 对各区域因子进行诊断分析之后(8个区域, 每个区域10个因子), 再通过选取相似年提取其误差, 叠加到模式预测结果之上获得夏季降水预测结果。赵俊虎等^[33]以2011年长江中下游地区为例, 对比了两种预测方法选取因子的差异, 指出通过对因子进行诊断筛选后再进行DSP, 可以进一步提高预测水平。

3 关键区域高度场的动力—统计预测

环流异常是降水异常的直接原因。对中国夏季降水而言, 东亚夏季风系统是最主要的影响因素, 东亚夏季风与中高纬系统的配置形势等又会造成相同气候背景下不同区域的旱涝分布^[36]。对关键区域环流的预测可以为夏季旱涝的大体分布趋势预测提供参考。赵俊虎等^[37]对欧亚中高纬阻塞高压关键区高度场进行了动力—统计跨季度预测试验, 其方法主要概况如下:

(1) 分别从NCEP和CGCM的多年回报数据中提取夏季平均500hPa高度场观测资料和模式结果, 并求取高度场的预报误差场, 提取气候因子的逐年冬季季节平均指数; (2) 分别计算前冬气候因子与关键区域夏季区域平均的高度场和模式误差场的相关系数, 获取关键因子, 利用预测年关键因子与历史因子之间的欧式距离选取历史相似年, 将相似年的误差叠加到预报年的模式结果之上, 形成预报结果; (3) 通过多年独立样本回报结果, 确定关键因子和相似年个数, 形成最终预报方案。将此方法分别应用到2013年夏季副

高区、欧亚中高纬阻塞高压区和东北冷涡区500hPa高度距平场的跨季度预测。图3给出了2013年夏季副高(5880gpm等值线)的观测和预测情况。由图可见, 2013年副高偏强偏西, 副高西北部北翘; 模式系统订正结果接近气候态, DSP方法预测副高偏强偏西, 与实况接近, 但面积较实况偏大, 副高体西部位置也有所差异。

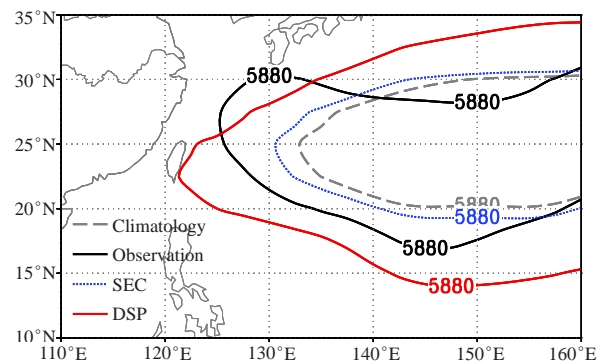


图3 2013年夏季副高(黑色实线为观测, 灰色短线为气候态, 蓝色点线为系统订正, 红色实线为DSP)

乌拉尔山(40°—50°N, 40°—70°E)、贝加尔湖(50°—60°N, 80°—110°E)和鄂霍次克海(50°—60°N, 120°—150°E)三个区域是欧亚中高纬阻塞高压发生频次最高的地区, 这三个地区夏季有无阻塞高压建立和维持, 对中国夏季旱涝分布有较大的影响^[38]。图4给出了2013年夏季三个区域500hPa高度距平场的观测和DSP方法预测的情况。由图4a—4c

可见, 2013年夏季乌拉尔山至鄂霍次克海西部为负距平控制, 不利于阻塞高压活动。DSP方法预测 (图

4d—4f) 除贝加尔湖西部地区外, 其余地区均为负距平, 即欧亚中高纬阻塞形势较弱, 以纬向环流为主。

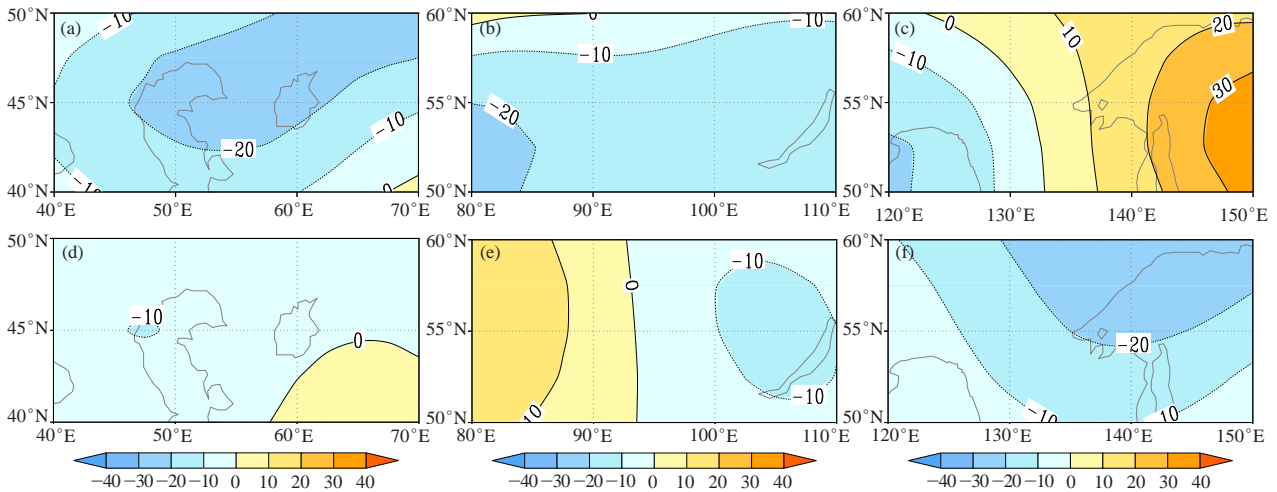


图4 2013年夏季欧亚中高纬阻塞高压区500hPa高度距平场 (gpm)

(a、b、c为观测; d、e、f为DSP预测; a、d为乌拉尔山区域; b、e为贝加尔湖区域; c、f为鄂霍次克海区域)

夏季中国东北冷涡的活动对北方降水也有较大影响^[39]。图5给出了2013年夏季东北冷涡活动区域500hPa高度距平场的观测和预测情况。由图5a可见, 2013年夏季东北冷涡活动区中西部为负距平控制, 利于冷涡活动; DSP方法预测均为负距平 (图5b)。由

NCC对夏季欧亚中高纬阻塞高压和东北冷涡二者季节内活动的检测 (图略) 可见, 夏季欧亚中高纬阻塞形势较弱, 东北冷涡活跃, 中高纬以纬向环流为主, 不利于冷空气南下。

根据夏季副高、欧亚阻塞高压及东北冷涡的趋

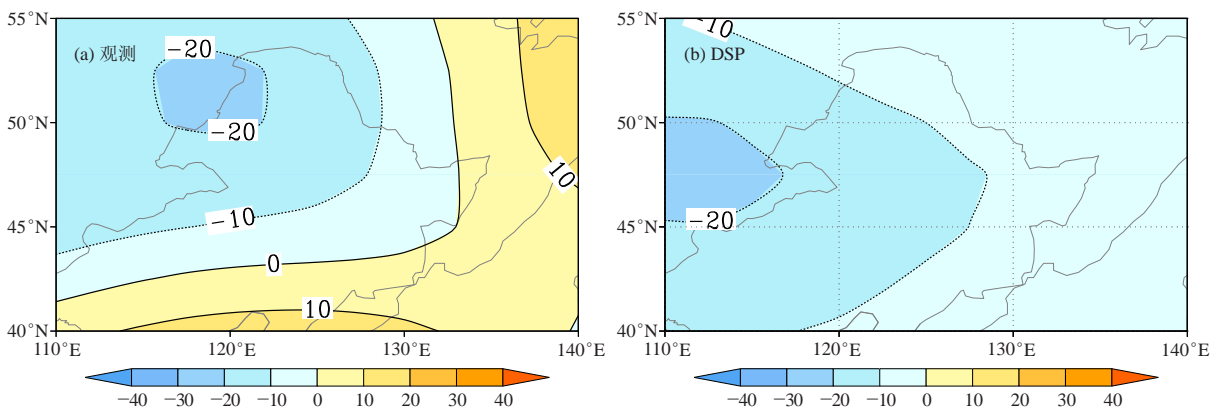


图5 2013年夏季东北冷涡区500hPa高度距平场 (gpm)

势预测结果, 进而预测夏季华北和东北多雨、长江少雨。DSP方法预测结果较好地把握了夏季副高、欧亚阻塞高压和东北冷涡的主要趋势, 为夏季旱涝分布的趋势预测提供了诊断依据。

4 动力—统计预测存在问题的探讨

众所周知, 目前短期气候预测是一个世界性的难题, 随着全球气候变暖, 极端气候事件频发, 区域气候也发生了变化, 影响我国气候变化的因素也随之变化, 增大了短期气候预测的困难。近年来动力—统

计预测方法在解决夏季降水预测这一难题上取得了一定进展, 该方法在近5年的全国夏季降水预测中表现出了较高的预报技巧, 体现了动力—统计相结合的短期气候预测思路的正确性。该方法利用历史资料弥补了模式预报误差, 虽然提高了短期气候预测准确率, 但也存在一些问题, 如预测结果对模式预测能力依赖性强, 若模式结果较差, 动力—统计预测的提升空间也有限; 采用多因子选取相似年时, 部分因子与降水之间的物理机制不清晰; 目前只是对季节尺度气候

进行了预测,而对季节内异常气候过程无能为力;等等。针对以上一些问题,提出以下可能的解决途径:

1) 加强传统影响因素(ENSO、东亚夏季风、副高、欧亚阻塞高压及遥相关等)和新的影响因素(平流层大气环流、北极海冰和印度洋海温等)在新的年代际气候背景下与中国短期气候,尤其是夏季降水之间关系及其年代际变化的理解和认识。例如,柳艳香等^[40]指出,在最近10年,东亚中高纬阻塞高压出现的频率增大,但多雨带位置并没有出现在长江及以南地区。这可能与东亚夏季风的年代际恢复性增强有关。此外,以往研究多注重单个系统与夏季降水的关系,在新的气候背景下,更应注重系统之间的配置及综合作用。

2) 对DSP而言,首先考虑到模式原始预测结果对动力—统计预测结果有重要的影响,因此可在评估多个气候模式预测结果的基础上,择优选取若干模式进行预测试验,并进行集合预测;其次需考虑不同气候异常情景下预测方案的选取,如在ENSO年和非ENSO年分别用什么预测方案较适合;将动力—统计相结合的思想应用到月、延伸期预报之中,解决异常气候过程的预测问题;环流异常是气候异常的直接因素,因此需加强对环流的动力—统计预测,再降尺度到降水等要素。NCC近年研发的第二代气候系统模式(BCC_CSM)对环流场有较好的预测技巧^[41],这为提高短期气候预测水平提供了新的条件。

对以上问题的探索和研究,将有利于提高短期气候预测的水平,促进我国短期气候预测业务的发展。

参考文献

[1] 丑纪范,徐明.短期气候数值预测的进展和前景.科学通报,2001,46:890-894.
 [2] 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.
 [3] 李维京,张培群,李清泉,等.动力气候模式预测系统业务化及其应用.应用气象学报,2005,16(增刊):1-11.
 [4] 贾小龙,陈丽娟,高辉,等.我国短期气候预测技术进展.应用气象学报,2013,24(6):641-655.
 [5] 封国林,杨涵洧,张世轩,等.2011年春末夏初长江中下游地区早涝急转成因初探.大气科学,2012,36(5):1009-1026.
 [6] 郑志海.月动力延伸预报研究进展回顾.气象科技进展,2013,3(1):25-30.
 [7] 龚志强,侯威,封国林.赤道中东太平洋海温关联指数及其与ENSO弱作用年相关的研究.气象学报,2012,70(5):1074-1083.
 [8] 丑纪范.为什么要动力-统计相结合?—兼论如何结合.高原气象,1986,5(4):367-372.
 [9] Feddersen H, Andersen U. A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions. Tellus A, 2005, 57: 398-408.
 [10] 丁一汇.季节气候预测的进展和前景.气象科技进展,2011,1(3):14-27.

[11] 魏凤英,黄嘉佑.我国东部夏季降水量统计降尺度的可预测性研究.热带气象学报,2010,26(4):483-488.
 [12] 陈丽娟,李维京,张培群,等.降尺度技术在月降水预报中的应用.应用气象学报,2003,14(6):648-655.
 [13] 顾震潮.作为初值问题的天气形势预报与地面天气历史演变作预报的等值性.气象学报,1958,29:93-98.
 [14] 顾震潮.天气数值预报中过去资料的使用问题.气象学报,1958,29(3):176-184.
 [15] 丑纪范.短期气候预测的现状、问题与出路(一).新疆气象,2003a,26(1):1-4.
 [16] 丑纪范.短期气候预测的现状、问题与出路(二).新疆气象,2003b,26(2):1-5.
 [17] 丑纪范.天气数值预报中使用过去资料的问题.中国科学,1974,(6):635-644.
 [18] 黄建平,丑纪范,衣育红.500hPa月平均距平场演变的宏观描述.气象学报,1989,47(4):483-487.
 [19] 黄建平,丑纪范.海气耦合系统相似韵律现象的研究.中国科学(B辑),1989,19(9):1001-1008.
 [20] Huang J, Yi Y, Wang S, et al. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution. QJ Meteorol Soc, 1993, 119: 547-565.
 [21] Huang J, Wang S. The experiment of seasonal prediction using the analogy-dynamical model. Science in China (B), 1992, 35: 207-216.
 [22] 龚建东,丑纪范.论过去资料在数值天气预报中使用的理论和方法.高原气象,1999,18(3):392-399.
 [23] 任宏利,丑纪范.统计-动力相结合的相似误差订正法.气象学报,2005,63(6):988-993.
 [24] 任宏利,丑纪范.动力相似预报的策略和方法研究.中国科学D辑(地球科学),2007,37(8):1101-1109.
 [25] 郑志海,任宏利,黄建平.基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值试验.物理学报,2009,58(10):7359-7367.
 [26] 王启光,封国林,郑志海,等.长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量化预测研究.大气科学,2011,35(2):287-297.
 [27] 王启光,封国林,支蓉,等.长江中下游汛期降水数值预报业务模式误差场预报研究.气象学报,2012,70(4):789-796.
 [28] Xiong K G, Feng G L, Huang J P, et al. Analogue-dynamical prediction of monsoon precipitation in Northeast China based on changeable configuration of optimal multi-predictor. Acta Meteor Sin, 2011, 25(3): 316-326.
 [29] 熊开国,赵俊虎,封国林,等.汛期降水相似动力预报-模式误差主分量相似预报方法.物理学报,2012,61(14):149204.
 [30] 杨杰,王启光,支蓉,等.动态最优多因子组合的华北汛期降水模式误差估计及预报.物理学报,2011,60(2):029204.
 [31] 杨杰,赵俊虎,郑志海,等.华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验.大气科学,2012,36(1):11-22.
 [32] 赵俊虎,封国林,王启光,等.2010年我国夏季降水异常气候成因分析及预测.大气科学,2011,35(6):1069-1078.
 [33] 赵俊虎,杨杰,封国林,等.2011年我国夏季降水动力统计预测与异常成因.应用气象学报,2013,24(1):43-54.
 [34] 封国林,赵俊虎,支蓉,等.动力-统计客观定量化汛期降水预测研究新进展.应用气象学报,2013,24(6):656-665.
 [35] 陈桂英,赵振国.短期气候预测评估方法和业务初估.应用气象学报,1998,9(2):178-185.
 [36] 贾小龙,陈丽娟,龚振淞,等.2010年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响.气象,2011,37(4):446-453.
 [37] 赵俊虎,杨杰,龚志强,等.欧亚中高纬阻塞高压关键区高度场动力-统计跨季度预测试验.物理学报,2013,62(9):099206.
 [38] 赵振国.中国夏季早涝及环境场.北京:气象出版社,1999.
 [39] 孙力,安刚,廉毅,等.夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析.气象学报,2000,8(6):704-714.
 [40] 柳艳香,王凌,赵振国,等.2006年中国夏季降水预测回顾.气候变化研究进展,2007,3(4):243-245.
 [41] 朱春子,李清泉,王兰宁,等.基于T106L26全球大气环流模式的夏季集合预报.大气科学学报,2013,36(2):192-201.

缆索承重桥的缆索防雷技术研究

李良福^{1,2} 覃彬全^{1,3} 杨磊^{1,3} 糜翔^{1,3} 刘青松^{1,3}

(1 重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心, 重庆 401147; 2 重庆市气象局, 重庆 401147;

3 重庆市防雷中心, 重庆 401147)

摘要: 随着经济社会发展, 缆索承重桥的应用越来越普遍, 缆索是缆索承重桥受力核心构件, 其特殊布置容易被雷击。然而根据现行防雷技术规范, 桥梁设计和施工中通常只着重考虑索塔、主缆的防雷设计与施工, 使斜拉索、吊索存在较大雷击风险, 从而危及桥梁结构安全。为了避免斜拉索、吊索遭受雷击而损坏, 确保缆索承重桥防雷安全, 首先应用滚球法分析计算缆索承重桥遭受雷击的可能性, 计算表明缆索易遭受天面和侧面的雷击; 然后通过国家标准推荐的短时雷击和长时间雷击两种雷击试验波形对三个桥梁缆索样品进行了多次冲击试验, 表明短时雷击对缆索使用寿命影响不显著, 长时间雷击是影响缆索使用寿命的主要因素, 甚至可能导致缆索断裂; 进而提出缆索承重桥缆索的防雷措施。

关键词: 缆索承重桥, 缆索, 防雷

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.005

Research on Cable Lightning Protection Technology of Cable Supported Bridge

Li Liangfu^{1,2}, Qin Binquan^{1,3}, Yang Lei^{1,3}, Mi Xiang^{1,3}, Liu Qingsong^{1,4}

(1 Chongqing Engineering Research Centre for Lightning Disaster Identification and Prevention, Chongqing 401147

2 Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147

3 Chongqing Lightning Protection Centre, Chongqing 401147)

Abstract: With the economic and social development, the application of cable supported bridges is becoming more and more common. Cables are the core loaded members of cable supported bridges, due to their special location and features. Cables are vulnerable to lightning strokes. However, under existing lightning protection technical specification, and in the design and construction of bridges attention is usually only paid to the lightning protection design and construction of cable bent tower and main cable which can sustain the lightning strokes and sling in a high risk of lightning strike, thus endangering the safety of bridge structures. In order to protect stay cable and sling from lightning strike and ensure the lightning protection of cable supported bridges, calculations of the possibilities of lightning stroke on the cable supported bridges should be calculated by using the analysis of the rolling sphere method. Results show that cables are vulnerable to roof and side lightning strokes. Through multiple shock tests on three bridge cable samples relying on short-time and long-time lightning stroke test waveforms recommended by the national standard, it is shown that short-time lightning strokes have an indistinctive influence on the service life of cables while long-time lightning strokes are major factors influencing the service life of cables and even result in the rupture of cables. Therefore, lightning protection measures are taken and suggested for the cables used for cable supported bridges.

Keywords: cable supported bridge, cable, lightning protection

0 引言

桥梁按其受力构件的力学特征可分为梁式桥、拱桥、钢架桥和缆索承重桥, 而缆索承重桥是现代大跨度桥梁的重要结构形式, 尤其在跨越峡谷、海湾、大江、大河等不易修筑桥墩处架设大跨径特大桥梁时, 往往都选择缆索承重桥型。缆索承重桥可分为斜拉桥和悬索桥两种, 斜拉桥受力特点为外荷载从梁传递到

斜拉索, 再到索塔; 悬索桥受力特点为外荷载从梁经过吊索传递到主缆, 再到两端锚碇。因此斜拉索及主缆和吊索分别是斜拉桥和悬索桥受力核心构件(图1), 所以缆索承重桥的缆索是指斜拉索及主缆和吊索。然而根据现行防雷技术规范, 桥梁设计和施工中通常只着重考虑索塔、主缆的防雷设计与施工^[1], 使斜拉索、吊索存在较大雷击风险, 从而危及桥梁结构安全^[2-3]。为了避免斜拉索、吊索遭受雷击造成损坏, 确保缆索承重桥防雷安全, 有必要对缆索承重桥的缆索防雷措施进行研究。

收稿日期: 2013年7月31日; 修回日期: 2013年12月13日

第一作者: 李良福(1963—), Email: lilf@cma.gov.cn

资助信息: 重庆市科技平台与基地建设项目(cstc2013pt-gc00001)

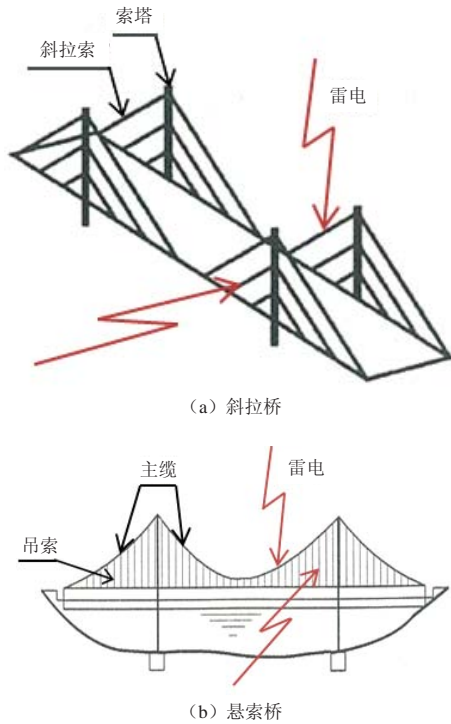


图1 缆索承重桥受力构件示意图

1 缆索遭受雷击可能性分析

由于目前缆索承重桥梁设计和施工中通常只重点考虑索塔和主缆的防雷，因此不时有缆索承重桥梁的缆索遭受雷击的报道。例如，2009年检修人员在对广东省番禺某大桥的斜拉索进行检修时，发现大桥顶部一根斜拉索因雷击导致斜拉索的钢拉丝及高密度聚乙烯保护层损坏的现象；2005年世界上最长斜拉桥之一的希腊跨海大桥发生了因雷击导致一根斜拉索断裂事故。缆索承重桥梁按照《建筑物防雷设计规范》（GB5007—2010）规定属于第二类防雷建筑物^[4]，应采用45m滚球确定其索塔接闪器的保护范围。因此，悬索桥的主缆和斜拉桥的斜拉索容易遭受从桥梁上空方向而来的雷电的直击雷击；同时悬索桥的吊索和斜拉桥的斜拉索也易遭受从桥梁侧面方向而来的雷电的侧击雷击，其易遭侧击雷击的高度（ H ，单位：m）可根据以下两种情况计算。

1.1 索面垂直于桥面的计算公式

垂直于桥面的斜拉索面或吊索面防侧击雷击保护范围如图2，其防侧击雷击保护范围通过式（1）确定：

$$H = \sqrt{h_r^2 - (h_r - b)^2} + h \quad (1)$$

式中， H 为雷电侧击高度（单位：m）。 A 、 B 点分别为滚球（半径为45m）与桥面灯杆（或栏杆）和索面的切点。 h_r 为桥梁滚球半径（45m）。 b 为索面距桥面

外侧灯杆或栏杆 C 、 D 点之间的宽度（单位：m），悬索桥的吊索面的 b 一般为0；而斜拉桥的斜拉索面的 b 可为0，也可不为0。 h 为桥面外侧灯杆或栏杆 B 、 C 点之间的高度（单位：m）。

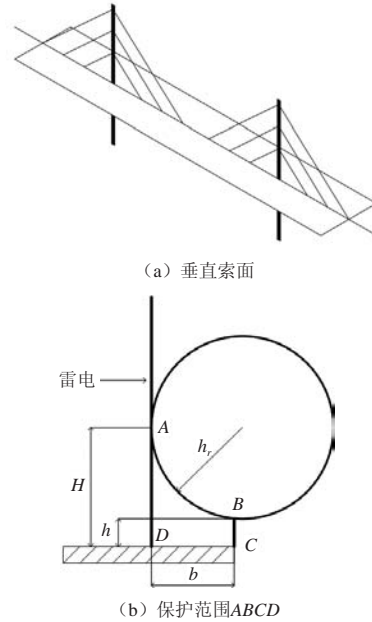


图2 垂直于桥面防侧击雷保护范围示意图

1.2 索面不垂直于桥面的计算公式

不垂直于桥面的斜拉索面或吊索面防侧击雷击保护范围如图3，其防侧击雷击保护范围根据式（2）确定：

$$H = \sqrt{h_r^2 - [h_r - \sin(\pi - \theta - \arctg \frac{h}{b}) \sqrt{b^2 + h^2}]^2} + \cos(\pi - \theta - \arctg \frac{h}{b}) \sqrt{b^2 + h^2} \quad (2)$$

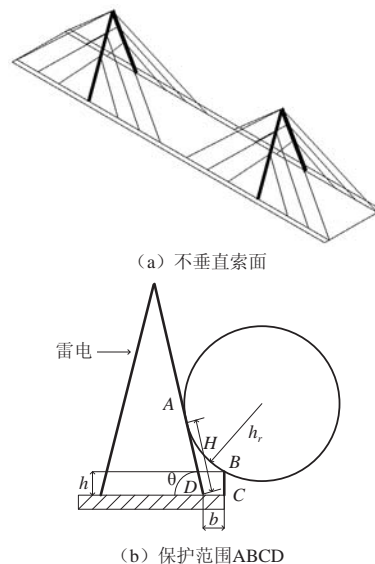


图3 不垂直于桥面防侧击雷保护范围示意图

式中, H 为闪电侧击高度(单位: m), A 、 B 点分别为滚球(半径为45m)与桥面灯杆(或栏杆)和索面的切点; h_r 为桥梁滚球半径(45m); θ 为桥面与索面夹角(单位: $^\circ$); h 为桥面外侧灯杆或栏杆 B 、 C 点之间的高度(单位: m); b 为索面外侧灯杆或栏杆 C 、 D 点之间的宽度(单位: m)。

上述分析表明缆索承重桥的斜拉索和主缆、吊索容易遭受天面和侧面的雷击,须采取相应的防直击和侧击措施。

2 缆索遭受雷击危害性分析

根据有关技术标准的规定^[5-8],斜拉桥的斜拉索由若干根 $\Phi 5$ 或 $\Phi 7$ 的桥梁缆索用热镀锌钢丝平行集束构成,斜拉索钢丝束外包高密度聚乙烯为防腐保护层(图4)。悬索桥的主缆和吊索有两种方式构成索体,一是采用若干根 $\Phi 5$ 或 $\Phi 7$ 的桥梁缆索用热镀锌钢丝平行集束为索体;二是吊索采用优质钢芯钢丝绳为索体,而主缆采用钢绞线为索体。索体防腐保护层是依据委托方要求,可采用环氧树脂、聚氨酯、沥青、橡胶、聚乙烯或高密度聚乙烯等为防腐保护层(图5)。

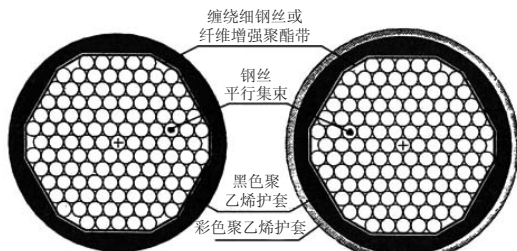


图4 斜拉桥的斜拉索断面结构示意图

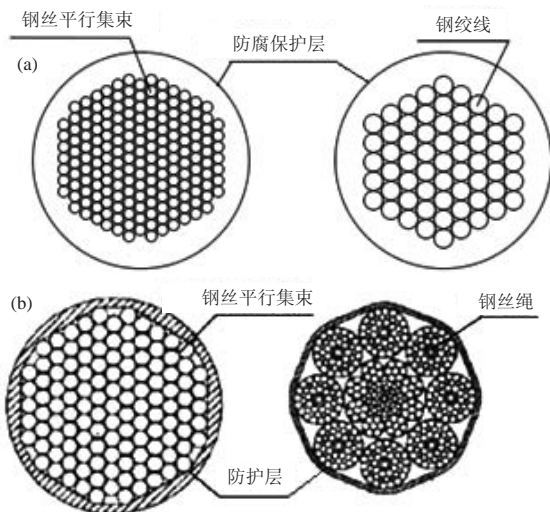


图5 悬索桥的主缆(a)和吊索(b)断面结构示意图

由于自然界可能出现的雷击有短时首次雷击、首次以后短时后续雷击、长时间雷击三种方式,其雷击参数的定义应符合图6的规定^[4],因此分析缆索遭受雷

击危害性,主要是分析短时雷击和长时间雷击的雷击参数对缆索的影响。

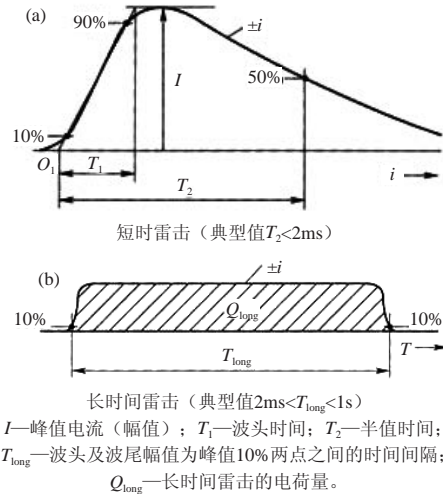


图6 短时雷击(a)和长时间雷击(b)的参数定义

根据图6规定的雷电流波形,对桥梁用的高强度钢丝进行了模拟雷击试验分析(图7)。试验对象为:(1)桥梁用高强度钢丝样品A($\Phi=5.1\text{mm}$), (2)包裹2mm厚高密度聚乙烯保护层的斜拉索样品B(内部7股高强度钢丝,每股 $\Phi=5.1\text{mm}$), (3)包裹7mm厚高密度聚乙烯保护层的斜拉索样品C(内部55股高强度钢丝,每股 $\Phi=5.1\text{mm}$)。采用重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心的冲击电流发生系统作为实验装置,其最大可产生幅值为200kA的8/20 μs 波形短时雷电流以及电荷量200C左右的长时间雷电流。试验方案为:分别对试验样品施加短时及长时间雷电流。短时雷电流雷击试验时,分别对样品施加1次、连续5次、连续10次、连续18次等短时雷电流,

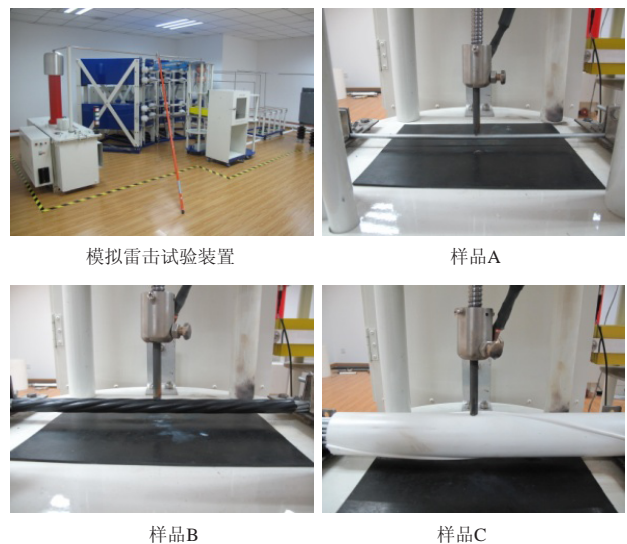


图7 桥梁拉索模拟雷电冲击试验

经过红外测温仪测量，每次冲击试验后试样冷却到常温大概在10min左右，为使试样在每次试验后能冷却到常温以便进行下一次试验，两次连续施加短时雷电流试验的时间间隔为30min；长时间雷电流雷击试验时，通过改变试验电荷量对样品分别进行试验，试验电荷量由小到大依次增加，观察记录试验样品表面受损情况，并对试验后受损的样品进行抗拉强度试验，与试验前完好样品的抗拉强度进行对比分析，以判定长时间雷电流对高强度钢丝抗拉强度的影响情况。

模拟雷击试验结果：一是对比不同峰值短时雷电

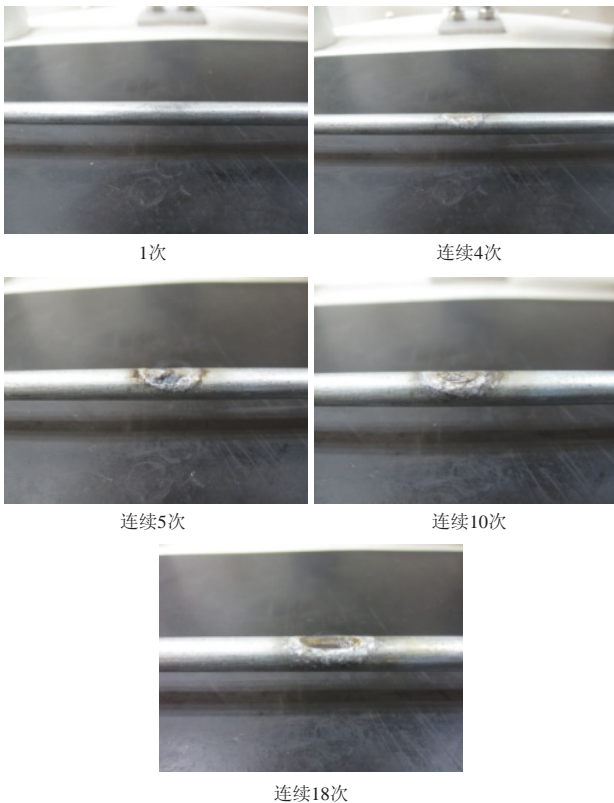


图8 不同次数峰值40kA雷电流短时雷击试验痕迹图片

保护层对高强度钢丝起到了保护作用。

同时也对严重烧蚀的样品A进行抗拉强度试验和微观分析（图10），其试验结果证实了长时间雷击使

流雷击样品A、B、C时，样品B、C无任何变化，而样品A仅仅出现雷击的痕迹，即使是连续18次对同一样品A的同一位置进行模拟雷击试验，其直接损害仅限于样品A的镀锌层（已熔化）内，对样品A的钢材部分无任何影响（图8）；二是对比不同峰值长时间雷电流雷击样品A、B、C时，当长时间雷击电荷量达到39.84C时，样品A出现雷击痕迹，并随着长时间雷击转移电荷量的增加，样品A出现严重烧蚀现象，其镀锌层熔化并且样品A的钢材部分损毁严重，而样品B、C无任何变化（图9），即包裹着的高密度聚乙烯

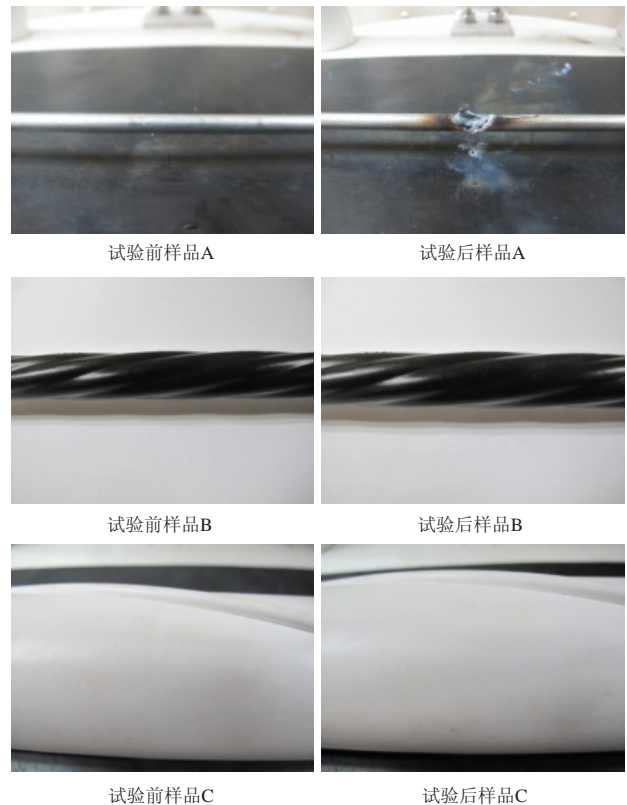


图9 不同样品在电流336A转移电荷176.7C持续526ms的长时间雷击下的试验痕迹图片

得样品A在雷击点形成电弧坑的金属熔化后的凝固区存在电弧气孔、电弧裂纹，并且由于电弧坑、气孔、裂纹等三种电弧侵蚀的耦合效应导致实验后样品A

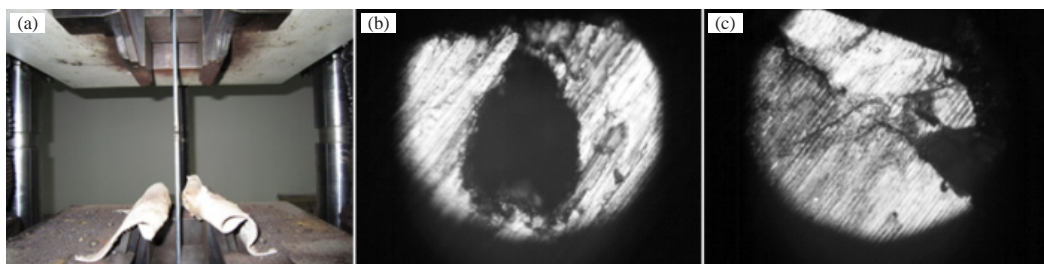


图10 对实验后的样品A进行抗拉强度实验（a）及电弧坑凝固区中的电弧气孔（b）、电弧裂纹（c）

的抗拉强度仅为试验前的44.4%，使其抗拉强度不合格。上述试验结论与Sales等^[9]的研究“短时雷击不会对光缆造成损坏，长时间雷击对光缆造成损害最大，转移电荷量越大，对光缆的损害也越大，并且当167C转移电荷量时，OPGW（88A26z）光缆抗拉强度仅为试验前40%”的结论完全一致；并且还和胡毅等^[10]的研究客观事实一致——对OPGW光缆雷击断股事现场取回的OPGW雷击断股样品进行了微观检测，在研究其机理时发现的OPGW雷击断股样品断口处有大量气孔、熔坑和熔渣。因此长时间雷击对高强度钢丝的抗拉强度的影响显著。根据Rousseau等^[3]在各国实验室

对桥梁缆索样品进行的长时间雷击试验表明：只有长时间持续电流转移电荷大于500C的雷击，才有可能使缆索样品的高密度聚乙烯保护层被引燃（图11）。一旦保护层的火花大到足够自燃，热量就会传递给桥梁缆索保护层内的钢丝平行集束，将导致钢丝平行集束在接连不断的高温和张力的双重效应下发生断裂。另有关研究^[11-12]表明，雷电长时间雷击转移电荷量大于40C的地闪累积概率在20%~30%，大于350C地闪累积概率小于5%，而2005年希腊跨海大桥雷击事件表明自然界的确存在长时间雷击转移电荷大于500C的雷击事件。

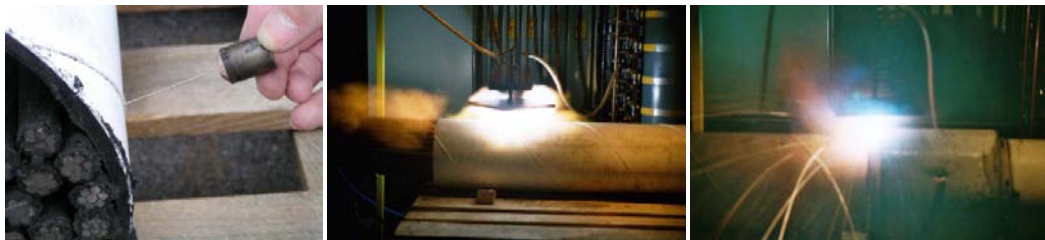


图11 Rousseau等^[3]对桥梁缆索样品进行的长时间雷击试验

上述试验结果分析表明：1) 雷电短时雷击的能量不足以击穿桥梁缆索高密度聚乙烯管道保护层，即使雷击到无高密度聚乙烯管道保护层的桥梁高强度钢丝，由于雷电脉冲能量通过接地被转移，不会对桥梁高强度钢丝性能造成严重影响；2) 雷电长时间雷击的能量对无保护层的裸体桥梁高强度钢丝有20%~30%概率产生严重烧蚀的电弧放电现象，导致桥梁高强度钢丝受到严重损坏，但可以通过绝缘阻燃的高密度聚乙烯管道保护层进行防护；3) 当出现概率小于5%的长时间且转移电荷量大于500C的雷击时，会导致桥梁缆索的高密度聚乙烯管道保护层被引燃，使得桥梁缆索在接连不断的高温和张力的双重效应下发生断裂，因此需在悬索桥主缆和斜拉桥外缘斜拉索明敷接闪带，并在桥面横向外侧面沿斜拉索、吊索平行或垂直方向明敷接闪带，以减少桥梁缆索雷击概率。综上所述：长时间雷击是影响缆索承重桥的缆索使用寿命的主要因素，有时甚至导致缆索承重桥的缆索断裂。

3 缆索防雷措施

1) 缆索承重桥的斜拉索、主缆与吊索的高强度钢丝应防雷接地并设置阻燃、绝缘的高密度聚乙烯护套保护层（厚度应符合GB/T 18365—2001^[5]的要求），以防止20%~30%雷电直接击到斜拉索、主缆与吊索的高强度钢丝，使其抗拉强度降低，影响桥梁防雷安全。

2) 悬索桥主缆和斜拉桥外缘斜拉索应明敷接闪带，以防从桥梁上空方向而来的直击雷击。接闪带安装方法：斜拉桥外缘斜拉索应每间隔2m设置抱箍形式接闪带支持架，接闪带两端应分别与索塔和桥面防雷装置可靠电气连接，同时应考虑接闪带与斜拉索之间膨胀系数差异的影响；悬索桥可利用通过螺栓或焊接连接形成电气连通的主缆检修通道两侧金属护栏作为接闪带。

3) 在缆索承重桥的桥面横向外侧面沿斜拉索、吊索平行或垂直方向明敷接闪带，以防从桥梁侧面而来的侧击雷击。接闪带间距不应大于10m，并应考虑接闪带与主缆、斜拉索之间膨胀系数差异的影响；其安装方法同斜拉桥外缘斜拉索接闪带安装方法。

4 结论

1) 缆索承重桥的斜拉索和主缆、吊索容易遭受天面和侧面的雷击，须采取相应的防直击和侧击措施。

2) 雷电短时雷击能量对缆索承重桥缆索使用寿命影响不显著；而长时间雷击能量是影响缆索承重桥的缆索使用寿命的主要因素，有时甚至导致缆索承重桥的缆索断裂。

3) 缆索承重桥的斜拉索、主缆与吊索的高强度钢丝必须防雷接地并设置绝缘阻燃的高密度聚乙烯护套保护层，确保桥梁安全。

4) 缆索承重桥的斜拉索、主缆与吊索应采取防范措施从桥梁上空方向而来的雷电直击和从桥梁侧面

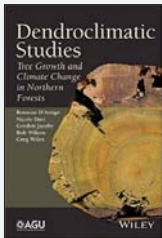
而来的雷电侧击，以防概率小于5%的长时间且转移电荷量大于500C的雷击危害。

参考文献

- [1] 徐鑫,周红. 东海大桥综合防雷工程的设计. 低压电器, 2006(10): 28-30, 38.
- [2] 彭锦荣,郭志勇,张健波,等. 斜拉索桥梁中拉索的防雷设计要点. 气象研究与应用, 2010, 31(S2): 161-175.
- [3] Rousseau A, Boutillon L, Huynh A. Lightning protection of a cable-stayed bridge. 28th International Conference on Lightning Protection, 2006.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50057—2010 建筑物防雷设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18365—2001斜拉桥热挤聚乙烯高强度钢丝拉索技术条件. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [6] 中华人民共和国交通部. JT/T395—1999悬索桥预制主缆丝股技术条件. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化化管理委员会. GB/T17101—2008桥梁缆索用热镀锌钢丝. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [8] 中华人民共和国交通部. JT/T 449—2001公路悬索桥吊索. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [9] Sales L R, Martin J, Ginocchio A. 光纤复合架空地线(OPGW)雷击试验及分析. 电力系统通信, 2004, (5): 1-5.
- [10] 胡毅, 叶廷路, 汪峰, 等. OPGW断股的微观检测及机理分析. 高电压技术, 2005, 31(10): 6-8, 26.
- [11] 孙景群. 大气电学基础. 北京: 气象出版社, 1987.
- [12] Golge R H. 雷电(上卷). 周诗健, 孙景群, 译. 北京: 电力工业出版社, 1982.

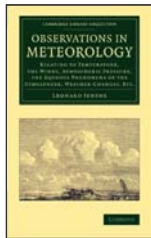
新书架
NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



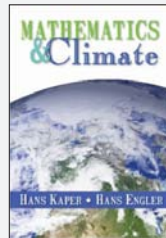
Dendroclimatic Studies: Tree Growth and Climate Change in Northern Forests
《年轻气候学研究：北方森林树木生长与气候变化》

编著者: Rosanne D'Arrigo等
出版者: American Geophysical Union
出版年: 2014



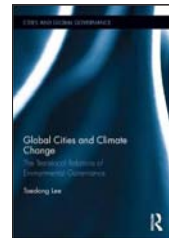
Observations in Meteorology: Relating to Temperature, the Winds, Atmospheric Pressure, the Aqueous Phenomena of the Atmosphere, Weather-Changes, etc.
《气象学观测：关于温度、风、气压、水汽和天气变化等》

编著者: Leonard Jenyns
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2014



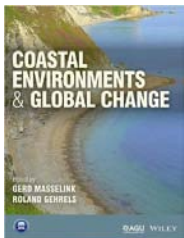
Mathematics and Climate
《数学与气候》

编著者: Hans Kaper等
出版者: Society for Industrial & Applied Mathematics, U.S
出版年: 2013



Global Cities and Climate Change: The Translocal Relations of Environmental Governance
《全球城市与气候变化：环境治理跨地域关系》

编著者: Taedong Lee
出版者: Routledge
出版年: 2014



Coastal Environments and Global Change
《沿海环境与全球变化》

编著者: Gerd Masselink等
出版者: Wiley-Blackwell
出版年: 2014



《大气组成变化及其影响与对策研究》

编著者: 石广玉等
出版者: 气象出版社
出版年: 2014



《低频天气图延伸期过程预报方法》

编著者: 孙国武等
出版者: 中国环境出版社
出版年: 2014



《地面气象观测》

编著者: 闫瑛等
出版者: 气象出版社
出版年: 2014

AMSR2仪器上新增设的C波段通道对陆地无线电频率干扰的有效缓解

邹晓蕾¹ 翁富忠² 田小旭¹

(1美国马里兰大学地球系统多学科中心, Maryland University, College Park, USA;

2美国国家海洋和大气管理局国家环境卫星数据与信息服务中心, Washington D. C., USA)

搭载着第二代先进微波辐射成像仪 (AMSR2) 的“第一轮卫星计划之全球水圈变化观测卫星” (GCOM-W1) 于2012年7月4日成功发射并进入极轨^[1]。该卫星由日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 进行地面操控。AMSR-E是AMSR2的前身, 与前身相比, AMSR2增设了频率为7.3GHz的两个通道, 目的是通过缓解C波段无线电频率间的干扰, 使AMSR2在大部分陆地区域上空观测资料时免受无线电频率干扰^[2-6], 从而可通过反演算法得到可靠的土壤湿度分布^[7]。

在完成数据起始订正操作的基础上^①, JAXA于2013年1月25日开始发布AMSR2亮温观测资料。本研究通过对AMSR2仪器C波段通道无线电频率干扰 (radio frequency interference, RFI) 特征的分析, 检验RFI在美国与中美地区的空间分布, 并以此评估新增设的两个通道对RFI的缓解作用。文中的第一节简单介绍了AMSR2的通道属性以及波谱差法, 第二节讨论了计算结果, 第三节为小结和结论。

1 数据特征描述及方法论

1.1 AMSR2 仪器特征

AMSR2是一种先进的圆锥式扫描微波辐射成像仪。它的14个亮温观测通道分布于7个不同的中心频率: 6.925, 7.3, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5和89.0GHz^[8]。AMSR2在距离地面700km的高空轨道上运行, 以观测点当地为参照的观测入射角为55°。AMSR2的天线反射器直径为2.0m, 比AMSR-E的要大, 这样可以增加观测资料的空间分辨率。确切地说, AMSR2瞬时视场 (instantaneous field of view,

IFOV) 的空间分辨率随着频率的升高而降低。AMSR2的瞬时视场在沿轨道及横跨轨道方向上的空间分辨率为: 在6.925和7.3GHz通道是62km×35km; 10.65GHz通道是42km×24km; 18.7GHz通道是22km×14km; 23.8GHz通道是26km×15km; 36.5GHz通道是12km×7km; 89.0GHz通道是5km×3km。其中, 89.0GHz通道的取样间隔为5km, 其他通道的取样间隔为10km。

1.2 波谱差法

一般来说, 地表的发射性随波频的上升而增强, 因此10.65GHz通道的亮温要比6.925GHz的高, 即 $T_{B_{6v}} < T_{B_{10v}}$ 。此外, 诸如洪水或湿地此类的自然现象会使亮温进一步降低, 这个规律在低频通道尤为明显。因此, 根据低频通道的亮温可以得到土壤湿度的反演产品。然而, RFI的存在使得6.925GHz通道的低频段亮温升高, 从而造成相反的波谱梯度, 即 $T_{B_{6v}} > T_{B_{10v}}$ ^[9]。通过检验对RFI敏感的波谱差 $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}}$ 和/或 $T_{B_{6h}} - T_{B_{10h}}$ 不均等的空间分布 (也就是在一个给定的极化状态下, 在两个不同频率通道中测得亮温的差), RFI造成的干扰信号可以被识别出来。RFI一般来源于范围较广且一致的点源, 它们通常具有方向性并且处于较窄的波段内, 导致其在空间上具有孤立性、时间上具有持续性的分布特点。

2 计算结果

在没有冰雪覆盖的地表, 6.925GHz通道的亮温比10.65GHz通道的亮温低, 即 $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}} < 0$ 。原因是陆地表面在低频通道的发射率要低于其在高频通道的发射率。6.925GHz通道RFI的存在使得该通道亮温异常升高, 造成了相反符号的波谱梯度, 体现为 $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}} > 0$ 。在6.925或者7.3GHz (图1) 通道被RFI干扰的资料可以通过寻找它们与10.65GHz通道亮温间波谱的大量正差值进行辨别。图2给出了2012年12月11日经过北美大陆的一条AMSR2的降轨

收稿日期: 2014年9月11日; 修回日期: 2014年11月1日

第一作者: 邹晓蕾 (1960—), Email: xzou1@umd.edu

资助信息: 国家重大科学研究计划项目 (2010CB951600); NOAA 联合极地卫星系统 (JPSS)

轨道上波谱差 $TB_{6h} - TB_{10h}$, $TB_{6v} - TB_{10v}$, $TB_{7h} - TB_{10h}$ 和 $TB_{7v} - TB_{10v}$ 的空间分布。波谱差异异常大值区体现了RFI信号具有典型的孤立特性。6.925GHz通道中的RFI

在美国陆地上分布较密集, 7.3GHz通道中的RFI仅出现在墨西哥、华盛顿和纽约, 其他观测日的结果相似(图略)。

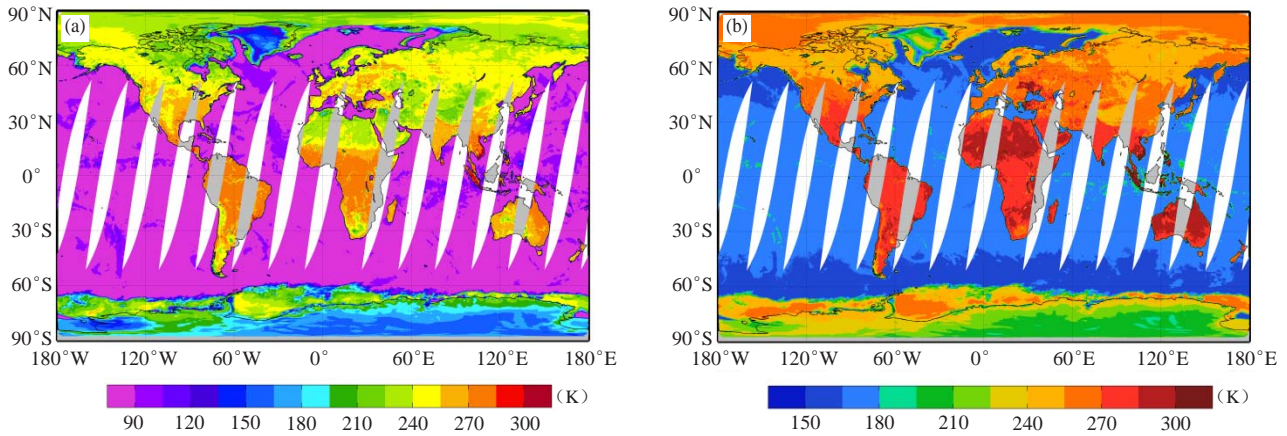


图1 2012年12月2日, 搭载在GCOM-W1上的AMSR2所观测到的7.3GHz频率水平 (a) 和垂直 (b) 极化通道亮温的全球分布
Fig. 1 Global distributions of AMSR-2 brightness temperature at 7.3 GHz with (a) horizontal and (b) vertical polarization states from GCOM-W1 descending nodes on December 2, 2012

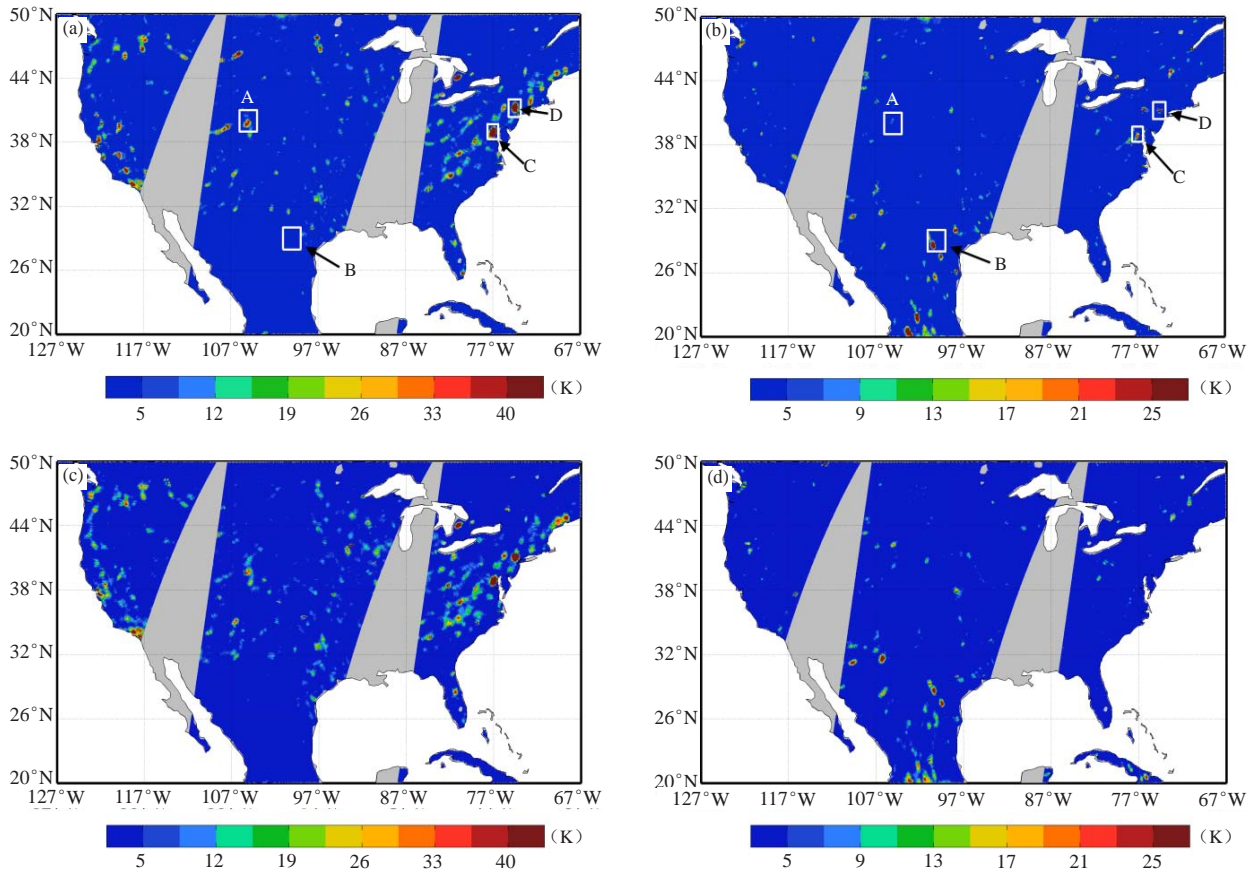


图2 2012年12月2日, 使用波谱差法计算出的AMSR2仪器一条降轨轨道在6.925GHz (a和c) 和7.3GHz (b和d) 的水平极化 (a和b) 和垂直极化 (c和d) 通道数据中RFI信号的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of AMSR-2 RFI signals in descending nodes at (a) 6.925 GHz (left panels) and 7.3 GHz (right panels) at (a)–(b) horizontal and (c)–(d) vertical polarization using the spectral difference approach over North America on December 2, 2012

为了给6.925和7.3GHz两个通道RFI信号间的关系提供数量上的度量,图3给出了 $TB_{6h}-TB_{10h}$ 相对于 $TB_{7h}-TB_{10h}$ (图3a)和 $TB_{6v}-TB_{10v}$ 相对于 $TB_{7v}-TB_{10v}$ (图3b)的散点图。从图3中可以看出除了强RFI信号的情况以外(图3a和3b),在一个给定的 $TB_{6h}-TB_{10h}$

间隔之内,7.3GHz通道的亮温随着6.925GHz通道亮温的增加而线性增加。只有一小部分数据点在6.925和7.3 GHz两个水平极化通道同时存在RFI信号(图3a)。RFI不会在两个低频频率的垂直极化通道同时出现(图3b)。

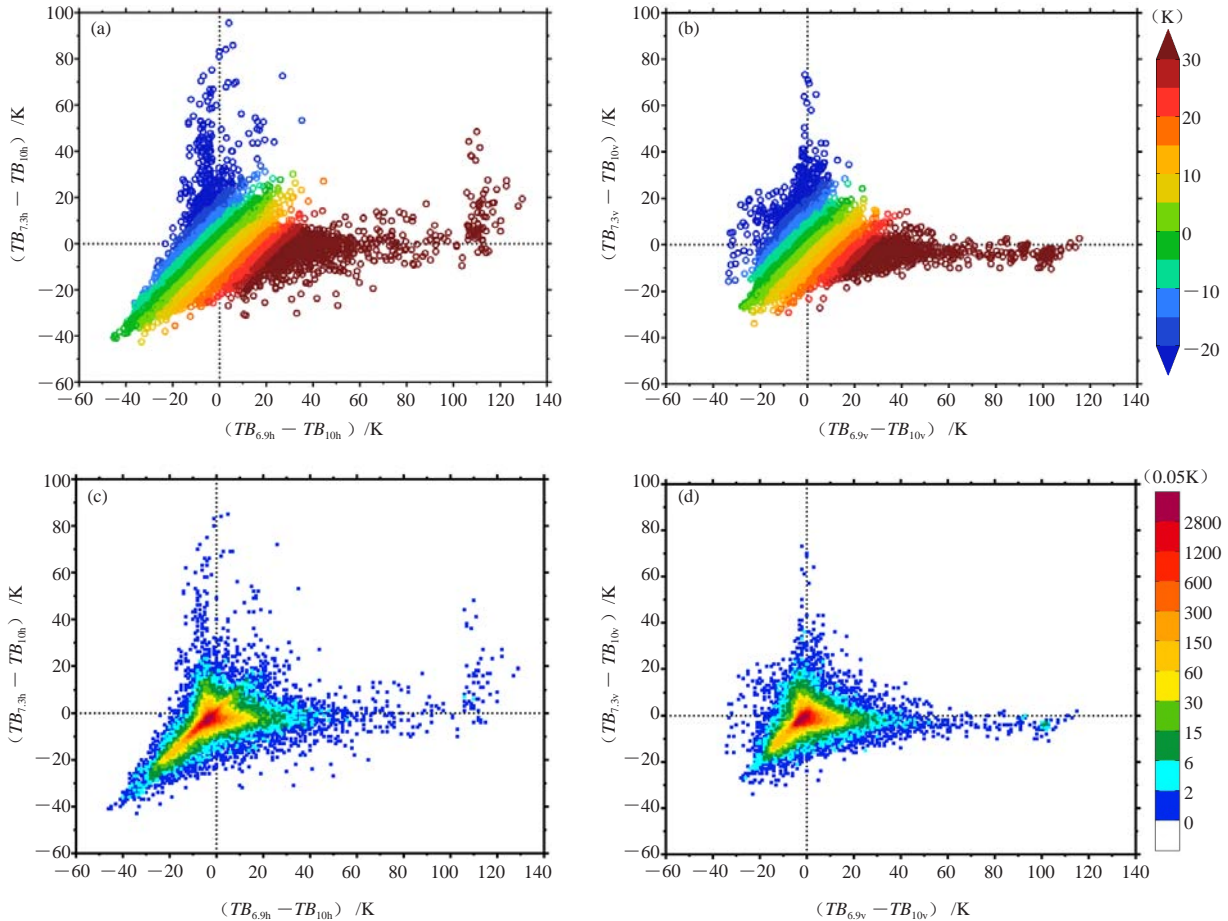


图3 水平极化 (a, c) 和垂直极化 (b, d) 亮温波谱差散点图

(横轴轴代表6.925和10.65GHz 通道亮温间的差,纵轴轴代表7.3和10.65GHz通道亮温间的差;图3a与图3b中点的颜色分别表示6.925和7.3GHz 通道亮温间的差,即 $\Delta TB_h = TB_{6.9h} - TB_{7.3h}$ 和 $\Delta TB_v = TB_{6.9v} - TB_{7.3v}$;图3c和3d分别对应图3a和3b以0.05K为间隔的数据量(彩色阴影))

Fig. 3 (a)–(b) Scatter plots of spectral differences of brightness temperatures between 6.925 GHz and 10.65 GHz (x-axis) and those between 7.3 GHz and 10.65 GHz (y-axis) at (a) horizontal and (b) vertical polarization. The differences of brightness temperature between 6.925 GHz and 7.3 GHz, i.e., $\Delta TB_h = TB_{6.9h} - TB_{7.3h}$ and $\Delta TB_v = TB_{6.9v} - TB_{7.3v}$ are indicated in (a) and (b), respectively. (c)–(d) Data counts at an interval of 0.05 K (color) corresponding to (a) and (b), respectively.

图4和图5给出了AMSR2在丹佛、墨西哥、华盛顿和纽约4个区域内观测亮温散点图。在丹佛附近,中心频率为6.925GHz的水平极化(图4a)和垂直极化(图4b)通道受RFI信号干扰的数据对应高亮温离群点。在墨西哥附近区域内,中心频率为7.3GHz的水平极化(图4c)和垂直极化(图4d)通道被RFI信号影响的数据点也均为亮温具有异常暖值的离群点。图4中同样可以看出在未受RFI影响的数据点中,7.3GHz

通道的亮温随着6.925GHz亮温的增长而呈线性增长。

在华盛顿和纽约地区,6.925GHz(图5a)和7.3GHz(图5c)的水平极化通道可同时受到RFI信号干扰,AMSR2的两个低频频率通道受RFI信号干扰的数据点比未受RFI影响的数据点的亮温更高。对于垂直极化通道来说,在华盛顿和纽约只有6.925GHz频率的通道出现RFI(图5b),7.3GHz频率的通道在这两个地区未受RFI干扰(图5d)。

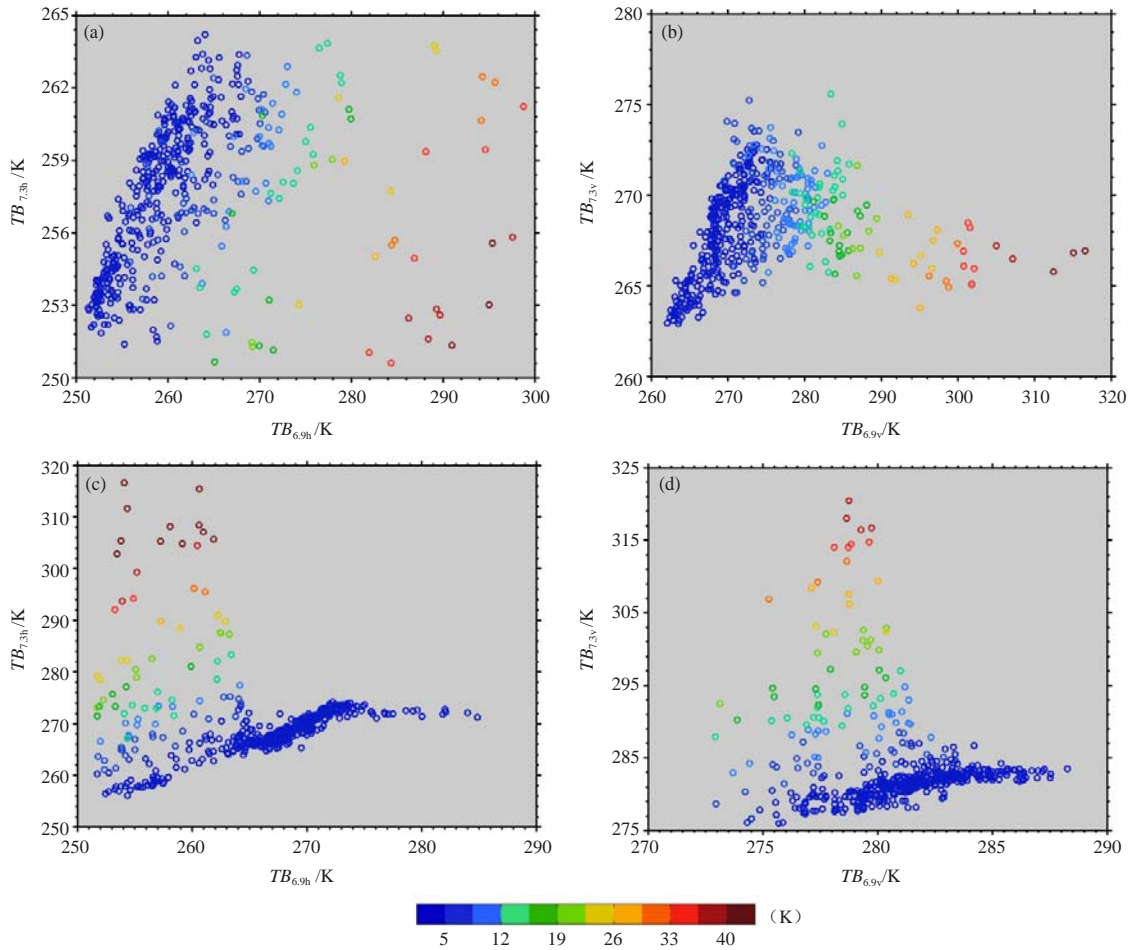


图4 丹佛附近区域 (图2中A所示) 在水平 (a) 和垂直 (b) 极化状态下6.925和10.65GHz通道亮温间波谱差 (彩色点) 随6.925和7.3GHz通道亮温的变化, 墨西哥区域 (图2中B所示) 在水平 (c) 和垂直 (d) 极化状态下7.3和10.65GHz 通道亮温间波谱差

Fig. 4 (a)–(b) Spectral differences of brightness temperatures between 6.925 GHz and 10.65 GHz at (a) horizontal and (b) vertical polarization over Denver (box A in Fig. 2a) as a function of brightness temperatures at 6.925 and 7.3 GHz. (c)–(d) Spectral differences of brightness temperatures between 7.3 GHz and 10.65 GHz at (c) horizontal and (d) vertical polarization over Mexico (box B in Fig. 2a).

3 小结

在运用AMSR2辐射量数据反演如土壤湿度等此类地理变量之前, 必须识别和剔除受 (RFI) 的数据。为了缓解RFI对C波段通道造成的影响, AMSR2相对于它的前身AMSR-E增设了两个中心频率为7.3GHz的C波段通道。本研究利用波谱差法对北美和中美地区AMSR2数据中无线电频率干扰情况进行了评估。

分析结果表明, 北美地区中心频率为6.925GHz的水平和垂直极化通道都存在较强的RFI信号, RFI信号一般都出现在美国的大都市及其邻近地区, 而在墨

西哥地区, 6.925GHz的两个水平和垂直极化通道均未受RFI影响。然而, 除墨西哥、华盛顿及纽约以外, AMSR2新增设的中心频率为7.3GHz的C波段通道基本未受RFI影响。AMSR2两个C波段低频频率通道均受RFI影响的资料仅出现在华盛顿和纽约附近。由此可知, AMSR2新增设的中心频率为7.3GHz的两个C波段通道对缓解北美地区RFI的影响是成功的。

鸣谢及免责声明: 文中观点不代表NOAA官方意见。再次感谢JAXA提供的AMSR2数据。

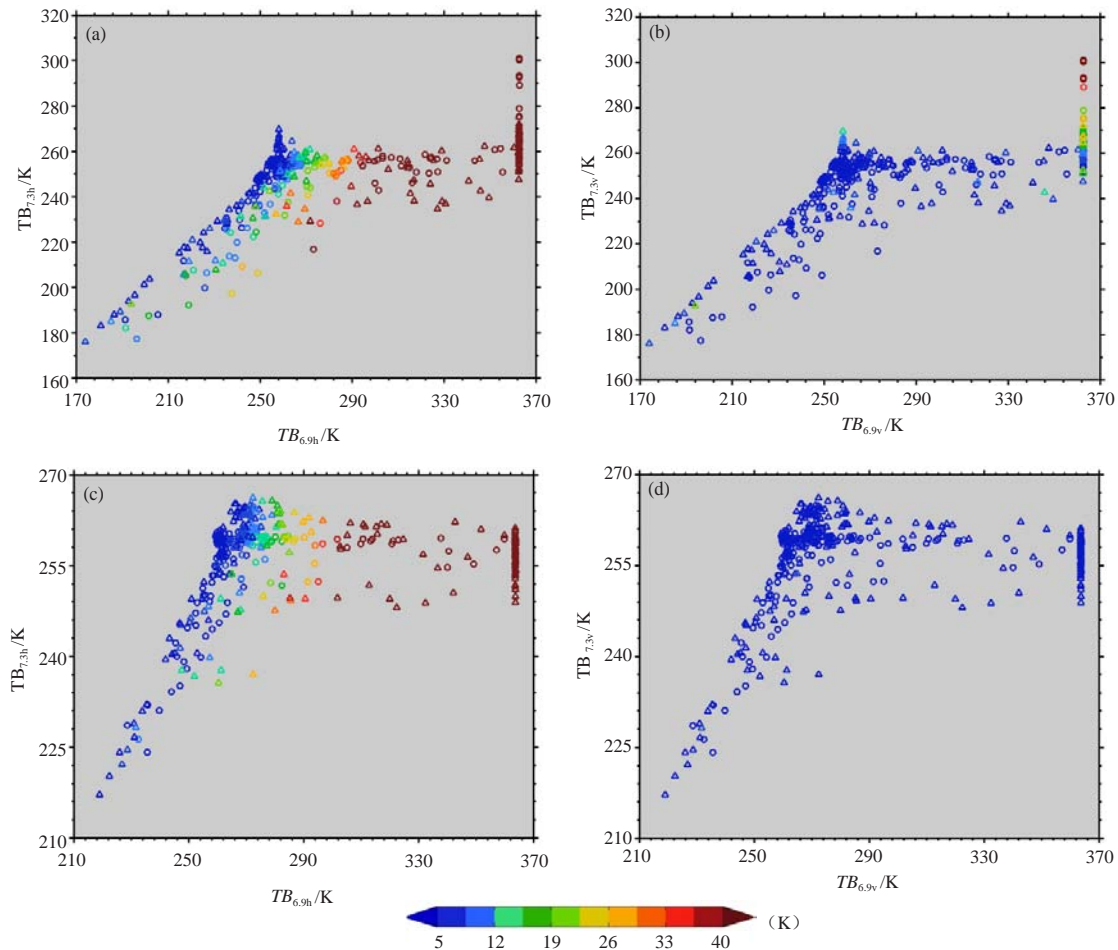


图5 频率为6.925与10.65GH的水平极化 (a) 和垂直极化 (b) 通道亮温间波谱差, 7.3与10.65GHz通道亮温间波谱差 (彩色点) 6.925和7.3GHz通道亮温的变化 (图中三角形代表华盛顿特区 (图2a中C所示) 范围内的数据, 圆圈代表纽约 (图2a中D所示) 范围内的数据)

Fig. 5 Spectral differences of brightness temperatures (a)–(b) between 6.925 GHz and 10.65 GHz and (c)–(d) between 7.3 GHz and 10.65 GHz at horizontal (left panels) and vertical (right panels) polarization over Washington DC (triangle, box C in Fig. 2a) and New York (circle, box D in Fig. 2a) as a function of brightness temperatures at 6.925 and 7.3 GHz.

Serial of Applications of Satellite Observations

An Effective Mitigation of Radio Frequency Interference over Land by Adding a New C-Band on AMSR2

Zou Xiaolei¹, Weng Fuzhong², Tian Xiaoxu¹

(1 Earth System Science Interdisciplinary Center, Department of Atmospheric & Oceanic Science, Maryland University, College Park, USA 2 National Environmental Satellite, Data & Information Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington D. C., USA)

The Global Change Observation Mission 1st – Water (GCOM-W1) satellite was successfully launched into a polar-orbit on July 4, 2012, carrying the Advanced Microwave Scanning Radiometer-2 (AMSR-2)^[1]. The

GCOM-W1 satellite is operated by the Japan Aerospace Exploration Agency (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA). Compared with its predecessor heritage Advanced Microwave Scanning Radiometer for the EOS

(AMSR-E) on board EOS Aqua satellite, AMSR-2 has two additional 7.3 GHz channels for mitigating radio-frequency interference^[2-6] so that the soil moisture content^[7] can be reliably retrieved over most of land conditions.

Having completed an initial calibration operation^①, the JAXA started to provide AMSR-2 brightness temperature observations to the public on January 25, 2013. In this study, the radio frequency interference (RFI) characteristics at two AMSR-2 C-band frequencies are analyzed and their distributions over United States and central American continents are examined for an initial evaluation of the RFI mitigation by the newly added channels. In Section 1, AMSR-2 channel characteristics and spectral difference method are briefly presented. Numerical results are presented in Section 2. Section 3 provides a summary and conclusions.

1 Data Description and Methodology

1.1 AMSR-2 Instrument Characteristics

AMSR-2 is a conical-scanning microwave imager with fourteen channels at the following seven frequencies: 6.925, 7.3, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, and 89.0GHz^[8]. It has a local incident angle of 55° from an orbit at 700km above the surface. The AMSR-2 antenna reflector size is 2.0m, which is larger than that of AMSR-E and therefore provides a better spatial resolution. Specifically, the across-track and along-track spatial resolutions of the individual ground instantaneous field-of-view (IFOV) measurements are $62\text{km} \times 35\text{km}$ at both 6.925 and 7.3GHz, $42\text{km} \times 24\text{km}$ at 10.65GHz, $22\text{km} \times 14\text{km}$ at 18.7GHz, $26\text{km} \times 15\text{km}$ at 23.8GHz, $12\text{km} \times 7\text{km}$ at 36.5GHz and $5\text{km} \times 3\text{km}$ at 89.0GHz, respectively. The sampling interval is 10km except for the 89GHz channels, whose sample interval is 5km.

1.2 The Spectral Difference Method

In general, the land surface emissivity increases with frequency, resulting higher brightness temperatures at 10.65GHz (channels 3-4) than those at 6.925GHz, i.e., $T_{B_{6v}} < T_{B_{10v}}$. The natural phenomenon such as flooding and wet surface further decreases the brightness temperatures, especially at lower microwave frequencies. The measured brightness temperatures at low frequencies can thus be used for retrieving soil moisture content.

The presence of RFI at 6.925GHz however increases the brightness temperature at lower frequency, resulting in a reversed spectral gradient, i.e., $T_{B_{6v}} > T_{B_{10v}}$ ^[9]. By examining the spatial distributions of the inequality about RFI-sensitive spectral difference indices $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}}$ and/or $T_{B_{6h}} - T_{B_{10h}}$ (e.g., differences between brightness temperatures at two different frequencies for a given polarization), RFI contaminated data can be identified. Since RFI signals typically originate from a wide variety of coherent point target sources and are often directional and narrow-banded, they are often isolated in space and persistent in time.

2 Numerical Results

For a surface condition without snow, brightness temperatures at 6.925GHz (channels 3-4) are smaller than those at 10.65GHz, i.e., $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}} < 0$, since the surface emissivity over land at lower frequency is smaller than that at higher frequency. The presence of RFI at 6.925GHz increases the brightness temperature at this frequency, reversing the sign of the spectral gradient, i.e., $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}} > 0$. RFI contaminated data at 6.925 or 7.3 GHz (Fig. 1) could be identified by their excessively positive values of the spectral differences with 10.65GHz. Figure 2 presents spatial distributions of the spectral differences $T_{B_{6h}} - T_{B_{10h}}$ (Fig. 2a), $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}}$ (Fig. 2b), $T_{B_{7h}} - T_{B_{10h}}$ (Fig. 2c) and $T_{B_{7v}} - T_{B_{10v}}$ (Fig. 2d) for AMSR-2 data from descending nodes over North America on December 11, 2012. The typical isolated features of RFI signals characterized by large positive spectral differences of brightness temperatures at 6.925GHz (Fig. 2a and 2b) are found in many places over the United States, while RFI signals at 7.3GHz seem to occur only in Mexico, Washington D. C. and New York. Similar patterns are obtained at other days examined (picture omitted).

In order to provide a quantitative examination of the relationship of the RFI signals at 6.925 and 7.3GHz channels, we show in Fig. 3 the scatter plots of $T_{B_{6h}} - T_{B_{10h}}$ versus $T_{B_{7h}} - T_{B_{10h}}$ (Fig. 3a), as well as $T_{B_{6v}} - T_{B_{10v}}$ versus $T_{B_{7v}} - T_{B_{10v}}$ (Fig. 3b). The differences of brightness temperatures between 6.925 and 7.3GHz channels are indicated in color. Data counts at an interval of spectral difference of 0.05 are shown in Fig. 3c and

① http://www.jaxa.jp/press/2013/01/20130125_shizuku_e.html

3d. It is seen that the brightness temperatures at 7.3GHz increase linearly with the brightness temperatures at 6.925GHz within a fixed interval of $TB_{6h} - TB_{10h}$ except when the RFI signals are strong (Fig. 3a and 3b). There exists a very small portion of data points with RFI occurring at both 6.925 and 7.3GHz frequencies for horizontally polarized channels (Fig. 3a). The RFI does not occur simultaneously at both 6.925 and 7.3GHz frequencies for vertically polarized channels (Fig. 3b).

The AMSR-2 measured brightness temperatures over four characteristic regions over Denver, Mexico, Washington DC and New York, indicated by boxes A, B, C and D in Fig. 2a, respectively, are shown in Fig. 4 and Fig. 5. As expected, RFI signals at 6.925GHz horizontally polarized (Fig. 4a) and vertically polarized (Fig. 4b) channels over Denver are characterized as outliers with excessively large values of brightness temperatures at 6.925GHz. RFI signals at horizontally polarized (Fig. 4c) and vertically polarized (Fig. 4d) channels at 7.3GHz over Mexico are characterized as outliers with excessively large values of brightness temperatures at 7.3GHz. It is also pointed out that brightness temperatures at 7.3GHz increase linearly with brightness temperatures at 6.925GHz for RFI-free data.

RFI signals over Washington DC and New York are detected for horizontally polarized channels at both 6.925GHz (Fig. 5a) and 7.3GHz (Fig. 5c), and are characterized by higher brightness temperatures at both frequencies than those RFI-free data. For vertically polarized channels, RFI signals appear only in 6.925GHz channel over Washington D. C. and New York (Fig. 5b). The 7.3GHz vertically polarized channel is RFI-free over both Washington D. C. and New York (Fig. 5d).

3 Summary and Conclusions

RFI signal in satellite microwave imager radiances over land must be detected and removed from the contaminated data before the radiance data are used for retrieving geophysical parameters such as soil moisture content. In order to mitigate the RFI in C-band channels, two new C-band channels centered at 7.3GHz are added to AMSR-2. In this paper, we evaluated the results of a spectral difference method for detecting RFI signals in

AMSR-2 data over North and Central Americas.

For the study cases of AMSR-2 data, a strong RFI is detected at the AMSR-2 C-band channels at 6.925GHz at both horizontal and vertical polarization over North America. The RFI signals are populated near the metropolitans of the United States. However, the newly added C-band channels at 7.3GHz are mostly RFI-free except in Mexico, Washington D. C. and New York. There are no RFI over Mexico at 6.925GHz for both polarization states. The only places where RFI occur at both C-bands of AMSR-2 are Washington D. C. and New York for the horizontal polarization state. It is thus concluded that a successful mitigation of RFI is achieved in AMSR-2 observations over North America.

注释

- ① http://www.jaxa.jp/press/2013/01/20130125_shizuku_e.html

参考文献

- [1] Kachi M, Imaoka K, Fujii H, et al. Long-term observations of water and climate by AMSR-E and GCOM-W//Meynard R, Neeck S P, Shimoda H, eds. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII. Proc of SPIE, 2009, 7474, doi: 10.1117/12.831253.
- [2] Li L, Njoku E, Im E, et al. A preliminary survey of radio-frequency interference over the U.S. in Aqua AMSR-E data. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2004, 42(2): 380-390, doi:10.1109/TGRS.2003.817195.
- [3] Li L, P. Gaiser W, Bettenhausen M H, et al. WindSat radio-frequency interference signature and its identification over land and ocean. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 43(3): 530-539, doi: 10.1109/TGRS.2005.862503.
- [4] Njoku E G, Ashcroft P, Chan T K, et al. Global survey and statistics of radio-frequency interference in AMSR-E land observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(5): 938-947, doi:10.1109/TGRS.2004.837507.
- [5] Kidd C. Radio frequency interference at passive microwave earth observation frequencies. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(18):3853-3865, doi: 10.1080/01431160600702400.
- [6] Lacava T, Coviello I, Faruolo M, et al. A long-term investigation of AMSR-E radio frequency interference. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): Proceedings, 2012, 7149-7152, doi:10.1109/IGARSS6352014.
- [7] Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2003, 41(2): 215-229, doi: 10.1109/TGRS.2002.808243.
- [8] Kawanishi T, Sezai T, Ito Y, et al. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2003, 41(2): 184-194, doi: 10.1109/TGRS.2002.808331.
- [9] Wu Y, Weng F. Detection and correction of AMSR-E Radio-Frequency Interference (RFI). Acta Meteor Sinica, 2011, 25(5), doi: 10.1007/s13351-011-0.

对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的优化与改进

包红军^{1, 2} 王莉莉¹ 梁莉²

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

摘要: 目前的国家级渍涝风险气象预报预警业务是以VIC (Variable Infiltration Capacity) 水文模型与渍涝发布标准为技术基础制作发布的。基于USGS提供的30'分辨率的DEM订正流域数字水系, 基于流域物理特征建立Mukingum-Cunge汇流模型的参数自动优选方案, 利用虚拟线性水库技术解决西部高海拔地区误报情况, 基于ECMWF细网格预报实现未来72小时的渍涝风险气象预报预警, 以提高渍涝风险气象预报预警模型精度与预见期。以2014年3月与5月珠江流域两次强降水引发渍涝为试验个例进行验证, 改进的模型预报预警效果好于原业务模型。

关键词: 渍涝风险气象预报预警, 数字水系, 参数自动优选, 线性水库, 珠江流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.007

Optimization and Improvement of Water Logging & Water Logged Risk Meteorological Forecast and Warning Operational Technology of China

Bao Hongjun^{1, 2}, Wang Lili¹, Liang Li²

(1 National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081
2 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081)

Abstract: National meteorological operation of water logging & water logged meteorological forecast and warning is based on VIC (Variable Infiltration Capacity) hydrological model and its release criteria. In this study, digital watershed is corrected with high resolution DEM data of USGS, Mukingum-Cunge routing model automatic parameters optimization is based on watershed physical characteristic linear reservoir method, and virtual linear reservoir method is used to correct the false alarm cases in high altitude of China West. In order to increase alarm lead time, the high resolution 72 hours forecasts of ECMWF are applied for water logging & water logged meteorological forecast and warning operational service. Taking the water logging & water logged event of the Pearl River in Mar.28 to 31, 2014 as the test case, the result shows the improved model performs better than the original model.

Keywords: water logging & water logged risk meteorological forecast and warning, digital watershed, automatic parameters optimization, linear reservoir, the Pearl River

0 引言

降水引起的渍涝是一种气象灾害, 是由降水过多导致土壤过度浸泡、地面受淹而造成的一种自然灾害^[1-4]。渍强调由于地面径流、排水和土壤透水能力

不足, 使土壤过度浸泡, 植物根部有毒气体聚集、营养成分减少、缺氧, 而导致植物的损害; 涝强调地面受淹导致的直接灾害, 包括城市渍(内)涝和农田渍涝。渍涝灾害还引起土壤盐碱化、土壤结构退化、水污染和疫病等一系列问题。

国内外渍涝预报主要依赖于流域水文水动力学模型的应用^[5-14]。例如, 美国针对城市渍涝(内涝), 采用基于动态降雨径流的城市暴雨雨水管理模式(Storm Water Management Model, SWMM)的预报思路^[15-21]; 在国内, 天津市气象局基于水动力学模型进行城市渍涝(内涝)径流过程模拟^[22], 辽宁省采用基于SCS曲线与汇流模型的降雨径流预报方案进行渍涝预报^[23-24]。

收稿日期: 2014年7月16日; 修回日期: 2014年9月2日
第一作者: 包红军(1980—), Email: baohongjun@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M72); 国家自然科学基金项目(41105068); 中国气象局首届青年英才计划(2014—2017); 中国气象局公共气象服务中心2012年青年英才计划项目“流域洪涝临界雨量阈值确定技术研究”; 中国气象局公共气象服务中心业务基金项目(M2014006)

2005年,中央气象台建立了全国渍涝风险气象预报预警业务,并于2006年7月5日正式对公众发布“渍涝风险气象预报预警”的气象服务产品。目前,渍涝风险气象预报预警业务已经成为中国气象局最重要的水文气象业务之一。

国家级渍涝风险气象预报预警业务模型是以VIC-3L水文模型^[25]与渍涝发布标准为技术基础进行制作发布的。以VIC-3L水文模型实时预报的全国 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格点上的径流深度和三层土壤湿度作为渍涝风险气象预报预警发布标准的依据,分一至五级(发生渍涝风险等级的很低、低、较高、高、很高)进行产品的制作与发布。经过近十年的业务发展,渍涝风险气象预报预警模型在预报服务方面仍存在问题:

(1)模型使用的流域水系拓扑结构与实际的水系有一定的偏差;(2)汇流模型参数需要重新率定以适应流域下垫面变化;(3)模型在西部高原地区难于考虑凹地对径流的影响,致使预报预警常于误报。

本研究基于USGS提供的 $30''\times 30''$ 分辨率的DEM订正流域数字水系,基于流域物理特征建立Muskingum-Cunge汇流模型的参数自动优选方案,利用虚拟线性水库技术解决西部高海拔地区误报情况,基于ECMWF细网格预报实现未来72h的渍涝风险气象预报预警,以提高渍涝风险气象预报预警模型精度与预见期。

1 对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的改进

1.1 国家级渍涝风险气象预报预警技术

1.1.1 渍涝业务中使用的VIC-3L模型概述

VIC(可变下渗能力)水文模型是一个基于空间

分布(网格化)的分布式水文模型,参数的网格化特性便于与气候模式和水资源模型嵌套以评价气候变化对水资源的影响。VIC模型最初由Wood等^[26]根据一层土壤变化的入渗能力提出,Liang等^[27]在此基础上将其发展为两层土壤的VIC-2L模型,在一个计算网格内分别考虑裸土及不同的植被覆盖类型,并同时考虑陆—气间水分收支和能量收支过程;后来模型中又增加了一个10cm左右的薄土层,变成三层土壤的VIC-3L模型。Liang等^[28-29]最近发展了其地表径流机制,同时考虑了蓄满产流和超渗产流机制以及土壤性质的次网格非均匀性对产流的影响,并将地下水位的动态表示问题归结为运动边界问题,利用有限元集中质量法数值计算方案,建立了地下水位的动态表示并用于VIC-3L。

VIC模型将发生在地—气界面占主导的水文过程参数化,计算每个网格内植被和土壤结构的水汽通量、热通量等传输过程。

1.1.2 渍涝风险气象预报预警等级发布标准

以VIC-3L水文模型实时预报的全国 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格点上的径流深度和三层土壤湿度作为全国渍涝风险气象预报预警发布标准的依据,分一至五级(发生渍涝风险等级的很低、低、较高、高、很高)进行产品的制作与发布(表1)。

1.2 渍涝风险气象预报预警技术的改进

1.2.1 基于精细化DEM技术的流域数字水系订正

在大尺度陆面水文模型中,GIS技术是一个重要的技术支撑平台,DEM是构成GIS的基础数据,利用DEM可以提取流域的重要水文特征参数,如坡度、坡向、水沙运移方向、汇流网络、流域界线等。对于大尺度汇流模型来说,由于空间尺度大,很少有详尽的

表1 渍涝风险气象预报预警发布标准

级别	名称	发布标准	物理意义	风险等级计算标准
1	无影响	发生渍涝风险的等级很低	降水强度小、持续时间短,土壤湿润	JLL=0mm
2	轻度渍害	发生渍涝风险的等级低	土壤水分大于田间持水量,开始补给地下水(或形成土壤上层滞水),无地表径流	TS1=50%~100% TS2=45%~85% TS3=20%~50% R0>10mm, R5>25mm
3	严重渍害	发生渍涝风险的等级较高	逐步抬高地下水位直至地表(土壤饱和),并填满耕地表面所有坑洼(地表残积水),有小的地表径流	JLL=0~10mm TS1=70%~100% TS2=55%~100% TS3=20%~100% R0>25mm, R5>50mm
4	轻度涝灾	发生渍涝风险的等级高	当降雨强度大于土壤入渗速度,能产生更大的地表径流,一般称其为超渗产流	JLL=10~20mm TS1=70%~100% TS2=50%~70% TS3=20%~50% R0>50mm, R5>100mm
5	严重涝灾	发生渍涝风险的等级很高	径流量大,就会冲刷土壤,冲毁作物,形成水土流失;沟河顶托冒溢,淹没低洼耕地,使作物减产、绝产且破坏耕地	JLL=20mm以上 TS1=70%~100% TS2=50%~100% TS3=20%~100% R0>100mm, R5>200mm

注:JLL为径流量,TS1为第一层土壤湿度,TS2为第二层土壤湿度,TS3为第三层土壤湿度,R0为24h预报降水量,R5为过去5日累积降水量。

资料, 因此从DEM提取得到汇流网络在目前看来可以说是进行流域汇流的必要途径^[30-31]。

在本业务中, 从大尺度陆面水文模型尺度出发, 仅考虑网格DEM高程数据。这种方法由于所采用的DEM数据只代表了网格中心点高程或网格平均高程, 因此所提取的河网往往与实际差别较大, 主要集中在河网不连续、DEM中洼地的处理以及平坦区平行河网的处理等方面。比如, 业务应用的珠江流域数字水系图(图1a)。

因此, 需要考虑所有可利用的地理信息, 特别是精细化的DEM数据提取河网。这样所得的河网精确度较高, 但往往需要耗费大量计算资源, 同时也要求很详尽的地理信息资料。本次研究基于USGS提供的30"×30"分辨率的DEM数据订正流域数字水系, 以保证水系河网连续, 与实际流域更相近(图1b)。

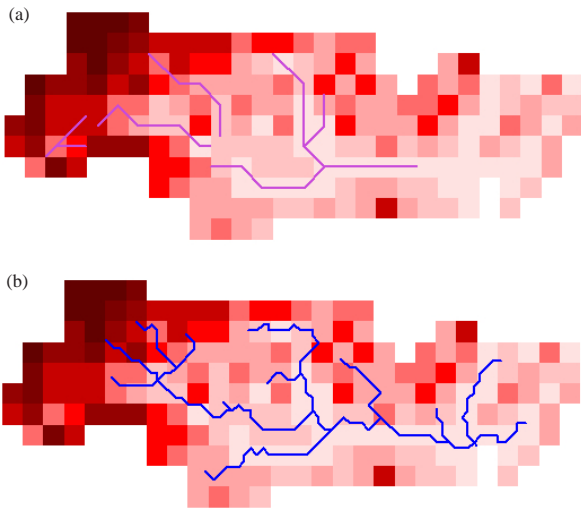


图1 业务使用(a)和订正后(b)的珠江流域数字水系图

1.2.2 渍涝业务中汇流模型的改进

渍涝业务中是采用单位线汇流方法来考虑网格内的坡面汇流, 并认为汇流后的流量沿流域主干河道均匀分布, 然后采用考虑均匀旁侧入流的Muskingum-Cunge进行河道汇流, 最终得到该流域出口网格的径流过程。

汇流模型采用考虑旁侧入流的Muskingum-Cunge方法^[32]进行河道演算。Muskingum-Cunge河道演算中的主要参数包括洪水波在河段长为 Δl 中的传播时间 k 、Muskingum-Cunge法的权重系数 x 。其估算公式如下:

$$k = \frac{\Delta l}{C} \quad (1)$$

$$x = \frac{1}{2} - \frac{D}{C \cdot \Delta l} \quad (2)$$

式中, C 为洪水波波速, D 为洪水波扩散系数, Δl 为河段长度。一般简化认为 $C=1\text{m/s}$, $D=1000\text{m}^2/\text{s}$ 。

实际上, Muskingum-Cunge的参数是河道物理特征相关的^[33]。但在气象部门实际应用中, 由于缺少大量的河道断面资料, 往往采用经验推求 k 和 x 。

k 计算公式为^[34]:

$$k = \frac{\Delta l}{V_w} \quad (3)$$

式中, V_w 为波速。

对于某个抛物线型断面, 波速和断面平均流速的关系如下, 其他如三角断面、矩形断面参见表2所示:

$$V_w = \frac{11}{9} V_{av} \quad (4)$$

表2 不同河道断面形状的波速经验关系

河段断面形状	曼宁公式
矩形	$5/3 V_{av}$
三角形	$4/3 V_{av}$
抛物线形	$11/9 V_{av}$

平均流速 V_{av} 可以由曼宁公式得到:

$$V_{av} = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (5)$$

式中, n 为曼宁糙率系数, R 为水力半径; S 为水面比降。可见, 只要能够确定出水力半径 R , 就可以得到断面平均流速。上式可写为

$$AR^{2/3} = \frac{Q_0 n}{\sqrt{S}} \quad (6)$$

式中, A 为过水断面面积。对于参照流量(Reference Discharge) Q_0 的求法, 国内外学者常用的方法为: 对于一场洪水过程, 可取 Q_0 为^[35]:

$$Q_0 = I_b + 0.5(I_p - I_b) \quad (7)$$

式中, Q_0 为参考流量, I_b 为最小流量, I_p 为洪峰流量。

Punmia等^[36]在1981年研究得出在自然流域中湿周与流量的经验关系, 公式如下:

$$P = c \sqrt{Q_0} \quad (8)$$

式中, P 为湿周, c 为系数, 值域在4.71~4.81。宽浅河道时, 可认为湿周 P 等于过水断面的水面宽 W 。抛物线型断面面积可近似按下述公式计算:

$$A = \frac{2yW}{3} \quad (9)$$

式中, y 为水深, W 为水面宽。对于抛物线型断面水力半径可以等于平均水深(表3):

$$R \approx d = \frac{2}{3} y \quad (10)$$

式中, d 为平均水深。

表3 水力半径(R)与水深(y)经验关系

断面形状	水力半径
抛物线型	$\frac{2}{3} y$
矩形	y
三角形	$\frac{1}{2} y$

将公式(9)和(8)代入(6)中,可以得到:

$$AR^{2/3} = \left(\frac{2yW}{2}\right) \times \left(\frac{2y}{3}\right)^{2/3} = \frac{Q_0 n}{\sqrt{S}} \quad (11)$$

因为湿周 P 在宽浅河道可以近似的等于水面宽 W ,所以抛物线型断面的水深 y 的推求公式为:

$$y = \left(\frac{Q_0 n}{0.508 P \sqrt{S}}\right)^{3/5} \quad (12)$$

同理,可得到矩形断面的水深 y 的推求公式为:

$$y = \left(\frac{Q_0 n}{P \sqrt{S}}\right)^{3/5} \quad (13)$$

以及三角形断面的水深 y 的推求公式为:

$$y = \left(\frac{Q_0 n}{0.315 P \sqrt{S}}\right)^{3/5} \quad (14)$$

根据表3可得到各种河道断面形状的水力半径 R ,代入公式(4)求得 V_{av} ,同时也得出 V_{av} 是坡度 S 单调增函数,随着 S 的增加而增加。进而根据河段长度由公式(3)确定参数 k 的值。

Muskingum法参数 x 根据1993年Fread^[34]提出的公式来计算:

$$x = \frac{1}{2} - \frac{Q_0}{2SPV_w \Delta L} \quad (15)$$

另外,渍涝业务VIC模型由于空间尺度较大($0.5^\circ \times 0.5^\circ$),致使网格内洼地、凹地等对水流的截流作用无法考虑,常常导致在我国西部高原或者海拔较高地区易出现一定程度的空报现象。本研究中,采用在该流域的网格出流流出网格前,通过一虚拟线性水库调蓄^[37-38]。

1.2.3 基于ECMWF细网格预报的全国渍涝风险气象预报预警

目前的渍涝业务只提供未来24h的全国渍涝风险气象预报预警结果。为了更好地服务于防汛减灾,提高水文气象服务能力,延长渍涝风险气象预报的预见期,本研究采用ECMWF细网格预报($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)代替现已经业务停止使用的T213预报,并将预报时效延长至72h。

2 个例验证

2.1 2014年3月28—31日珠江部分流域渍涝

受高空槽和西南气流共同影响,2014年3月28日以来珠江流域中东部出现大范围强降雨过程,3月30日珠江入汛。截至3月31日8时,珠江累积降雨量超过50mm的面积约21.4万 km^2 。其中,黔江、浔江、柳江、桂江下游、贺江、北江中游、东江中游、粤东沿海等地累积降雨量50~100mm,西江下游、北江下游、东江下游、珠江三角洲达100~250mm,较大累积雨量有:广西岑溪市诚谏站261mm、广东龙门县上坪站252mm。受降雨影响,西江支流北流河、长行水发生超警洪水。其中北流河金鸡站3月30日12时水位超警,成为当年珠江首个超警站点。

采用ECMWF细网格预报驱动改进后的渍涝风险气象预报预警模型进行预报预警,预报结果见图2—3。

从上述结果可以看出,改进后的模型能够很好地预报出珠江流域在此次强降水过程出现的流域东部出现农田渍涝,并将预报的预见期延长至72h。根据渍涝风险气象等级为2~3级,与中国气象局决策服务共享平台信息吻合度比原模型更高,原模型预报级别偏低。

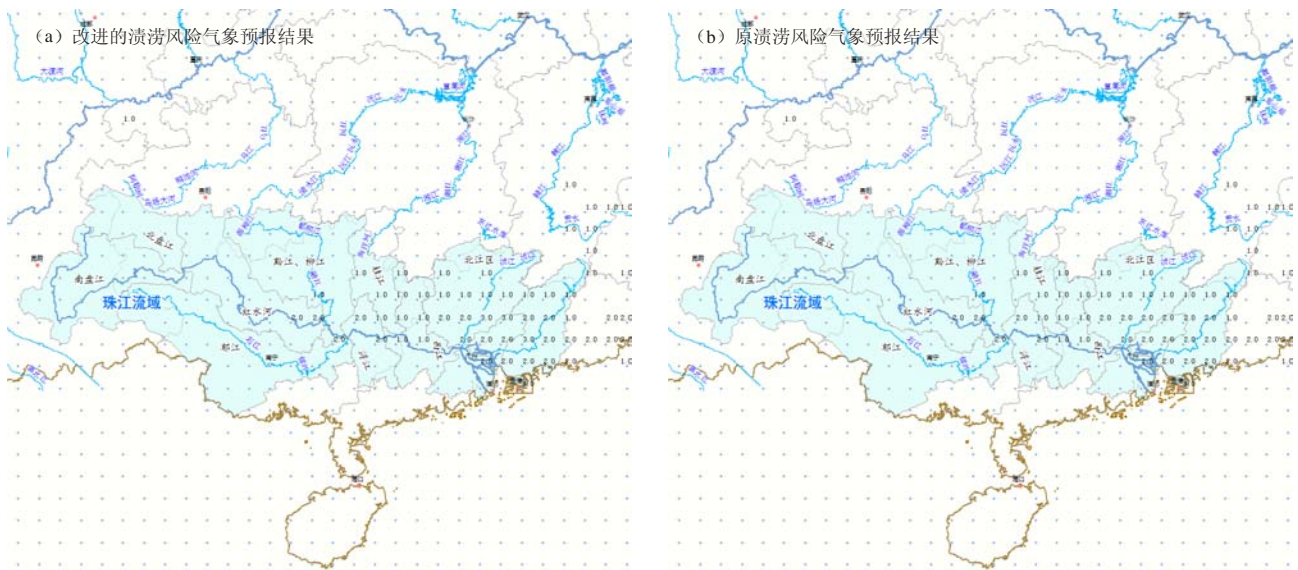


图2 预报时效为24h的渍涝风险预警图(图中数字代表风险级别,后同)

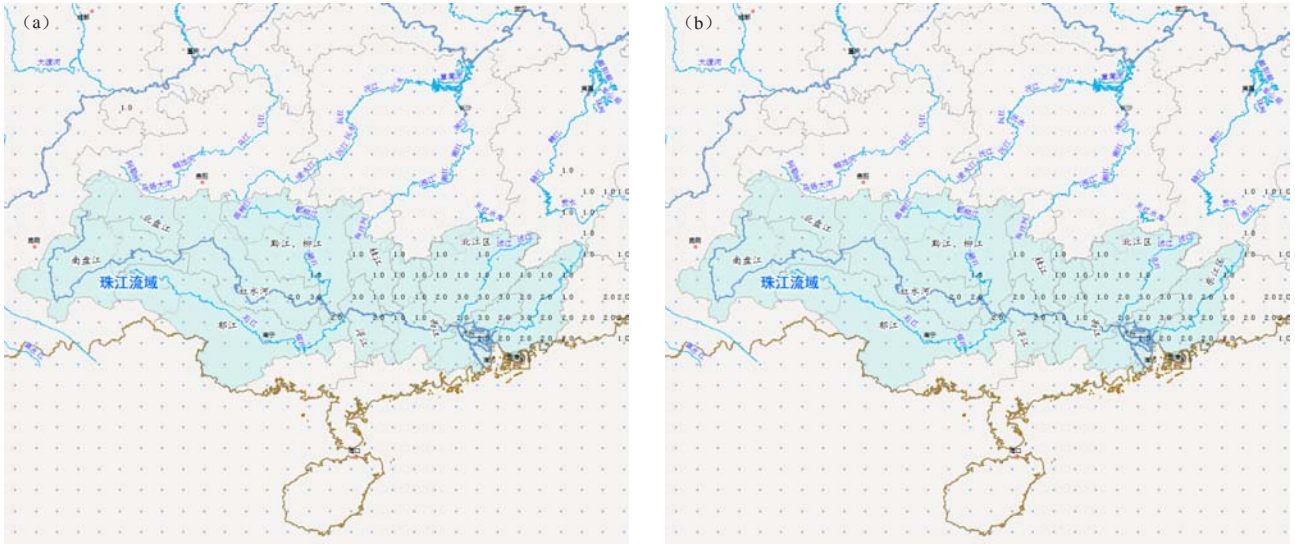


图3 预报时效为48h (a) 和72h (b) 的渍涝风险预警图

2.2 2014年5月8—11日珠江部分流域渍涝

2014年5月8—11日,我国中东部出现强降雨天气过程。其中,安徽西南部、湖北东部、江西中北部、湖南中北部、贵州局地、广西东部、广东西北部和南部降雨100~200mm,广东中部沿海部分地区及湖南、广西东北部局地250~350mm,广东深圳、中山、珠海、江门和阳江局地400~600mm,江门台山市端芬镇达834mm。

据中国气象局灾情直报系统截至5月12前不完全统计,本次降水造成巨大的损失,特别是在珠江流域中东部造成严重的农田渍涝。

采用ECWMF细网格预报驱动改进后的渍涝风险气象预报预警模型进行渍涝风险气象预报预警。预报结果见图4,可以看出,改进后的模型能够很好地预报出珠江流域在此次强降雨过程出现的流域东部出现农田渍涝,并将预报的预见期延长至72h。24h、48h预报时效预报预警,根据渍涝风险气象等级为3~4级,与表4灾情信息吻合度很高;72h预报时效结果由于ECMWF没能准确预报出珠江流域降水,导致该区域72h预报时效渍涝风险气象预报预警出现漏报。

3 结论

降水引发的自然灾害一直是国内外业务与科研部门的研究热点与难点,在防灾减灾工作中占有重要位置。本研究基于30"×30"分辨率的高精度DEM订正流域数字水系,建立Mukingum-Cunge汇流模型参数自动优选方案。为了解决渍涝风险气象预报预警模型在我国西部高海拔地区误报情况,在模型网格径流推求过程中增加虚拟线性水库技术,并将模型的预报时效延

长至72h。选择了2014年珠江流域的个例进行验证,模型很好地提高了渍涝风险气象预报预警模型的精度与预见期的延长。

参考文献

- [1] Bruce J P, Clark R H. Introduction to Hydrometeorology. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [2] Kevin S. Hydrometeorology: forecasting and applications. London, New York: Springer, 2009.
- [3] 矫梅燕. 现代天气业务. 北京: 气象出版社, 2010.
- [4] 胡明思, 骆承政. 中国历史大洪水. 北京: 中国书店, 1992.
- [5] Maidment D R. Hydrology Handbook. New York: McCraw-Hill, 1993.
- [6] Anderson M G, Burt T P. Hydrological Forecasting. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [7] Bao H J, Zhao L N. Development and application of an atmospheric-hydrologic-hydraulic flood forecasting model driven by TIGGE ensemble forecasts. Acta Meteor. Sinica, 2012, 26(1): 93-102.
- [8] Bao H J. Hydraulic model with roughness coefficient updating method based on Kalman filter for channel flood forecast. Water Science and Engineering, 2011, 4(1):13-23.
- [9] Bao H J, Zhao L N, He Y, et al. Coupling Ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjiang model for flood forecast. Advances in Geosciences, 2011, 29: 61-67.
- [10] Yu Z. Assessing the response of subgrid hydrologic processes to atmospheric forcing with a hydrologic model system. Global and Planetary Change, 2000, 25(1-2): 1-17.
- [11] Wang L L. Application of developed grid-GA distributed hydrologic model in semi-humid and semi-arid basin. Transactions of Tianjin University, 2010, 16(3), 209-215.
- [12] 王莉莉, 陈德辉. GRAPES Noah-LSM陆面模式水文过程的改进及试验研究. 大气科学, 2013, 37(6): 1179-1186.
- [13] 包红军. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究. 水利学报, 2012, 43(2): 216-224.
- [14] 包红军. 基于Kalman滤波糙率反演模型的河道洪水实时预报研究. 水力发电学报, 2012, 31(3): 59-64.
- [15] Metcalf and Eddy, Water Resources Engineers, and University of Florida 1971. Storm Water Management Model, US EPA, Washington, D.C. Vol. I - Final Report, 11024DOC 7/71. Vol. II - Verification and Testing, 11024DOC 8/71. Vol. III - User's Manual, 11024DOC 9/71. Vol. IV - Program Listing, 11024DOC 10/71.

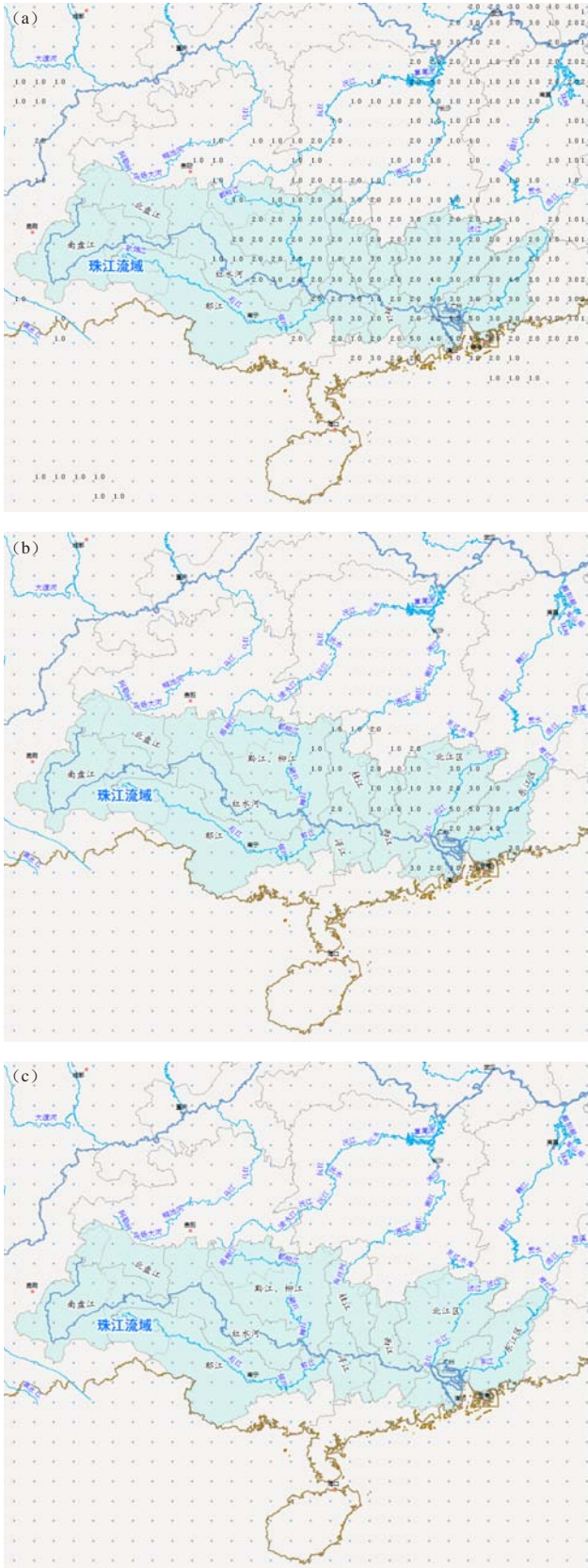


图4 预报时效为24h (a)、48h (b) 和72h (c) 的渍涝风险预警图

- [16] Huber W C, Heaney J P, Medina M A, et al. Storm water management model user's manual, version II. U S Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 1975.
- [17] Huber W C, Heaney J P, Nix S J, et al. Storm water management model user's manual version III. U S Environmental Protection Agency, 1981.
- [18] Huber W C, Dickinson R E. Storm water management model. user's manual version IV. U S Environmental Protection Agency, 1988.
- [19] Roesner L A, Dickinson R E, Aldrich J A. Storm water management model - version 4: user's manual - Addendum 1 EXTRAN; Cooperative Agreement CR-811607; EPA; Athens, Georgia, 1988.
- [20] Rossman L A. Storm water management model user's manual, EPA/600/R-05/040, U S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 2007.
- [21] Rossman L A. Storm water management model quality assurance report, dynamic wave flow routing, EPA/600/R-06/097, 2006.
- [22] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-490.
- [23] 陆忠艳, 袁子鹏, 陈艳秋, 等. 基于DEM的辽宁乡镇渍涝预报. 中国农业气象, 2008, 29(4): 463-466.
- [24] 王扬锋, 陆忠艳, 马雁军. 东北地区渍涝风险气象等级预报. 江西农业大学学报, 2009, 31(5): 957-961.
- [25] 林建, 谢正辉, 陈峰, 等. 2006年汛期VIC水文模型模拟结果分析. 气象, 2008, 34(3): 69-77.
- [26] Wood E F, Lettenmier D P, Zaitarian V G. A land-surface hydrology parameterization with sub-grid variability for general circulation models. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D3): 2717-2728.
- [27] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F. One-dimensional statistical dynamic representation of sub-grid spatial variability of precipitation in the two-layer Variable Infiltration Capacity Model. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D16): 21403-21422.
- [28] Liang X, Xie Z H. A new surface runoff parameterization with sub-grid scale soil heterogeneity for land surface models. Advances in Water Resources, 2001, 24(9-10): 1173-1192.
- [29] 谢正辉, 梁旭, 曾庆存. 陆面过程模式中地下水位的参数化及初步应用. 大气科学, 2004, 28(3): 374-384.
- [30] 李致家. 水文模型的应用与研究. 南京: 河海大学出版社, 2008.
- [31] 王莉莉. GRAPES气象-水文模式在一次洪水预报中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(3): 274-284.
- [32] Cunge J A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). J Hydraul Res, 1969, 7: 205-230.
- [33] 包红军. 基于EPS的水文与水力学相结合的洪水预报研究. 南京: 河海大学博士学位论文, 2009.
- [34] Anderson M G, Burt T P. Hydrological Forecasting. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [35] Wilson B N, Ruffini J R. Comparison of physically-based Muskingum methods. Transactions of the ASAE. 1988, 31(1) : 91-97.
- [36] Punmia B C, Pande B B L. Irrigation and Water Power Engineering. Delhi: Standard Publishers Distributors, 1981.
- [37] Bao H J. Hydraulic model with roughness coefficient updating method based on Kalman filter for channel flood forecast. Water Science and Engineering, 2011, 4(1): 13-23.
- [38] 包红军. 淮河具有行蓄洪区河系洪水预报水力学模型研究. 湖泊科学, 2011, 23(4): 635-641.

基于GRAPES的陆—气双向反馈模式降水 在洪水预报中的检验

王莉莉 陈德辉

(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 选取前期已构建的基于GRAPES的陆—气双向反馈模式和陆—气单向反馈模式, 尝试在洪水预报中利用流域水文模型对数值预报模式降水分布进行检验。流域水文模型选取的是在我国洪水预报中已经得到广泛应用的新安江水文模型。将双向反馈模式的预报降水驱动水文模型, 进行洪水预报试验, 与单向反馈模式预报结果进行比较。结果表明, 双向反馈模式对10cm土壤含水量模拟精度高于原模式, 对降水的模拟也略好于原模式, 而且利用水文模型对降水分布进行检验的方法可以推广到站点稀疏或无资料地区。

关键词: 降水检验, GRAPES模式, 双向反馈, 单向反馈, 水文模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.008

Verification of Precipitation Prediction by Feedback Model Between Land Surface and Atmosphere Based on GRAPES in Flood Forecasting

Wang Lili, Chen Dehui

(National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: To verify the distribution of precipitation by flood forecast based on hydrological model, the feedback model between land surface and atmosphere based on GRAPES and GRAPES Meteorological-Hydrological coupled Model developed by the author's meteorological model are used. Xin'anjiang model which is used in this paper has already been widely applied in flood forecasting and hydrological simulation in China for a long term. The result of hydrological model driven by forecast datasets of GRAPES feedback model for flood forecasting is compared with the result of GRAPES Meteorological-Hydrological coupled Model. The experiment results show that the hydrological model can be used for verification of precipitation prediction. This method can be used in the ungauged region and the region with sparse meteorological stations.

Keywords: precipitation verification, GRAPES, feedback, coupling, hydrological model

0 引言

气象模式和水文模型的耦合有单向和双向耦合两种方法。单向耦合, 是将气象模式的预报降水直接驱动水文模型, 气象模式和水文模型之间没有反馈作用^[1-4]。而双向耦合模型, 能够模拟陆面模式中水文过程, 并使气象模式和水文模型共享下垫面因子的变化, 特别是对于土壤水分的变化。在气象模式的边界层中, 陆面是唯一的物理下边界, 随着气象模式的分辨率不断提高, 对下边界, 特别是陆面过程的模拟要求也随之增加。如果忽视了模式中水文过程, 特别对

于区域模式, 可能会导致对土壤水分模拟的误差, 反过来影响大气模式对边界层结构的输出^[5], 最终将可能影响到降水的模拟^[6]。绝大多数陆面模式对水循环的描述都是不完整的, 例如GRAPES模式中的Noah陆面模式^[7], 对水循环的描述仅限于垂直方向的水分运动, 缺少了水平二维方向的运动。这种在流域尺度上的缺陷, 忽略水平方向的水分运动, 会使土壤水分、感热通量和潜热通量的模拟不符合实际。这种不完整的水循环可以借助水文模型的理论, 将其补充完整, 这样的双向反馈的气象模式从理论上才是完整的, 也是符合客观事实的。

检验预报降水的方法一般采用的是基于实况降水的降水评分法, 如TS评分等。但是当试验区域内降水观测站点过少或无降水观测站点时, 往往无法进行基

收稿日期: 2014年7月11日; 修回日期: 2014年9月28日
第一作者: 王莉莉(1982—), Email: wangll@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目(41105068)

于实况站点观测降水的降水评分。目前,单纯的雷达测雨与卫星反演降水精度与实况降水仍存在较大的误差,如何准确的对稀疏降水观测站点的区域降水预报评分是气象部门面对的一个难题。

本研究认为,如果区域内存在水文站,可以利用水文站观测的流量过程资料,选取水文模型,对区域内的降水进行检验。在检验前,首先要利用多年流量资料对水文模型的参数进行率定,以尽量减小模型本身的不确定性。本文基于GRAPES的陆一气双向反馈模式^[5]模拟的土壤含水量和降水驱动水文模型,与基于GRAPES的陆一气单向反馈模式^[1]预报降水驱动水文模型结果进行对比研究,尝试利用水文模型对特定试验区域内的气象模式预报降水分布进行检验。

1 模式介绍

基于GRAPES的陆一气双向反馈模式对GRAPES的Noah陆面模式(以下简称为, Noah LSM)进行了改进:改进产流方案, Noah LSM中加入蓄水容量曲线,以“面产流”概念替代“点产流”概念;嵌入汇流模式, Noah LSM中缺少对汇流部分的描述,嵌入汇流模块,完整模式对陆面水循环的描述^[1]。基于GRAPES的陆一气单向反馈模式是将GRAPES降水预报场驱动水文模型进行单向耦合^[1]。水文模型选取的是在我国已经广泛应用于洪水预报的新安江模型,是一个分散参数的概念性水文模型^[7]。

1.1 Noah LSM 的改进

1.1.1 Noah LSM 产流方案的改进

改进的陆面模式产流方案利用蓄水容量曲线描述单元网格内产流面积的变化。蓄水容量面积分配曲线是指部分产流面积随蓄水容量而变化的累计频率曲线^[7]。应用蓄水容量面积分配曲线可以确定降雨空间分布均匀情况下蓄满产流的总径流量。实践表明,对于闭合流域,流域蓄水容量面积分配曲线采用抛物线型为宜,其线型为:

$$f/F = 1 - (1 - W'/W_{MM})^B \quad (1)$$

式中, f 为产流面积, F 为全流域面积, W' 为流域单点的蓄水量; W_{MM} 为流域单点最大蓄水量; B 为蓄水容量面积曲线的指数。

根据流域蓄水容量面积分配曲线及其与降雨径流相互转换关系,改进后的产流方案为:

若 $P - E + A < W_{MM}$, 即局部产流时:

$$R = P - E - (W_M - W_0) + W_M \times (1 - (P - E + A)/W_{MM})^{(1+B)} \quad (2)$$

若 $P - E + A \geq W_{MM}$, 即全网格产流时:

$$R = P - E - (W_M - W_0) \quad (3)$$

式中, W_0 为流域初始土壤蓄水量; W_M 为流域平均最

大蓄水容量; R 为总径流量。

地下产流方案与原Noah LSM方案相同。

1.1.2 Noan LSM 增加的汇流方案

降雨所产生的地表径流会随地形进行汇流运动,如果缺少汇流过程的描述,就无法考虑坡面径流在水平二维方向的水量再分配,不能较精确地刻画陆面及浅地表水循环,会使所产生的径流在其所生成的网格内继续蓄积,从而违背了重力作用,不符合真实的流域情况。在陆面模式中,地表径流影响着陆一气反馈的重要要素(感热通量和潜热通量)。通过加入汇流模式后, Noah LSM中加入对水平二维地表径流的描述,更加符合真实的流域汇流。

Noan LSM中增加的汇流方案选取Muskingum汇流方法^[8]。在Muskingum法中,采用逐栅格的Muskingum汇流方法将地表径流演算至流域出口。以地表径流为例, a、b、c三个栅格的流量分别为 Q_a 、 Q_b 、 Q_c 。 Q'_a 、 Q'_b 、 Q'_c 可以通过Muskingum计算得到:

$$Q'_{i+1} = C_1 Q'_i + C_2 Q'_i + C_3 Q'_{i+1} \quad (4)$$

式中,

$$C_1 = (0.5\Delta t - x_e k_e) / ((1 - x_e) k_e + 0.5\Delta t) \quad (5)$$

$$C_2 = (0.5\Delta t + x_e k_e) / ((1 - x_e) k_e + 0.5\Delta t) \quad (6)$$

$$C_3 = ((1 - x_e) k_e - 0.5\Delta t) / ((1 - x_e) k_e + 0.5\Delta t) \quad (7)$$

式中, x_e 和 k_e 为Muskingum-Cunge法的两个参数。关于参数 x_e 和 k_e 的具体求解推导过程请参见文献[9]中的Muskingum的经验求解方法。

在 t 时刻, 栅格d的出流可表示为:

$$Q'_d = Q'_a + Q'_b + Q'_c + Q'_d \quad (8)$$

2 应用试验

2.1 淮河王家坝以上流域简介

王家坝站以上流域为淮河上游, 集水面积为30672km²。其中, 五沟营、板桥、薄山、宿鸭湖、南湾以及泼河6个子流域为淮河上游的大中型水库控制面积。根据流域内水文站的布设和自然流域的边界, 将水库出流作为下游子流域洪水预报的入流, 对于每个子流域, 根据其下垫面和水文特性以及雨量站分布, 将其根据泰森多边形法划分若干块, 进行产汇流计算, 逐子流域演算至流域出口断面。

2.2 试验设计

由于资料的限制, 本研究选取2008年8月13日08时—19日08时、2008年8月28日08时—9月1日08时和2009年8月29日08时—14时三次降水进行模拟试验, 预报时长为48h, 输出时间间隔为6h, 以每日08时和20时进行滚动预报。试验覆盖区域为15°—64.5°N、

70°—145.3°E。基于GRAPES的陆—气单向和双向反馈模式均以分辨率为1°×1°的美国NCEP全球再分析场作为初始场和侧边界条件，驱动15km的GRAPES和基于GRAPES的双向反馈模式。

2.3 流量模拟

本节选取的三场洪水过程均为汛期洪水：第一场洪水时间是2008年8月13日08时—8月24日14时的洪水过程，最大洪峰为4390m/s，峰现时间为8月18日14时；第二场洪水时间是2008年8月28日08时—9月10日14时，最大洪峰为2730m/s，峰现时间为9月1日08时；第三场洪水时间是2009年8月28日08时—9月9日14时，最大洪峰为2220m/s，峰现时间为8月31日20时。

图1和图2分别是2008年8月和9月月平均24h降水图，从图中可以看出，原模式与改进后模式模拟的降水分布相差不大。陆面水循环首先引起了土壤湿度的改变，选取南充和临汾两个站点10cm的土壤含水量进行对比。其中，南充站观测土壤含水量起始时间是8月10日08时（图3a），原GRAPES模式模拟的土壤含水量与观测值相比偏小，基于GRAPES陆—气双向反馈模式模拟的土壤含水量比观测值偏大，但与原GRAPES模拟结果相比更接近。临汾站点观测的10cm土壤含水量起始时间为8月1日08时，站点的土壤含水量从3日08时开始就达到饱和，并一直持续到9月30日08时（图3b），原GRAPES模拟结果明显偏小，双向反馈模式模拟结果与实测值较为接近。

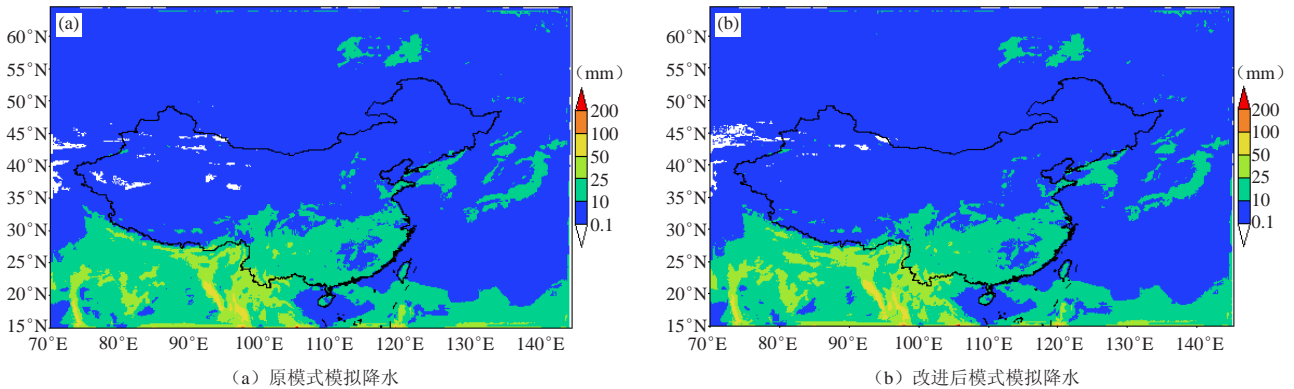


图1 2008年8月月平均24h模拟降水量分布图

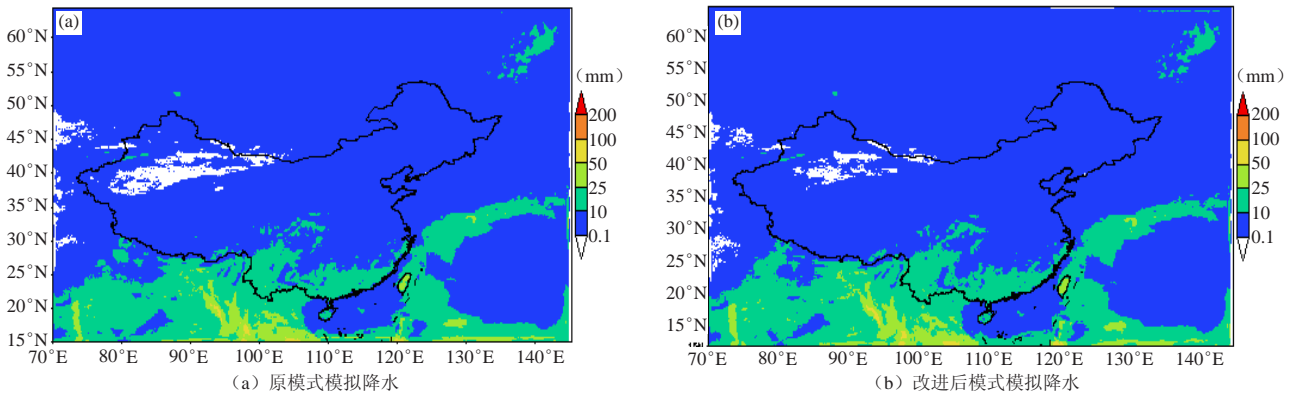


图2 2008年9月月平均24h模拟降水量分布

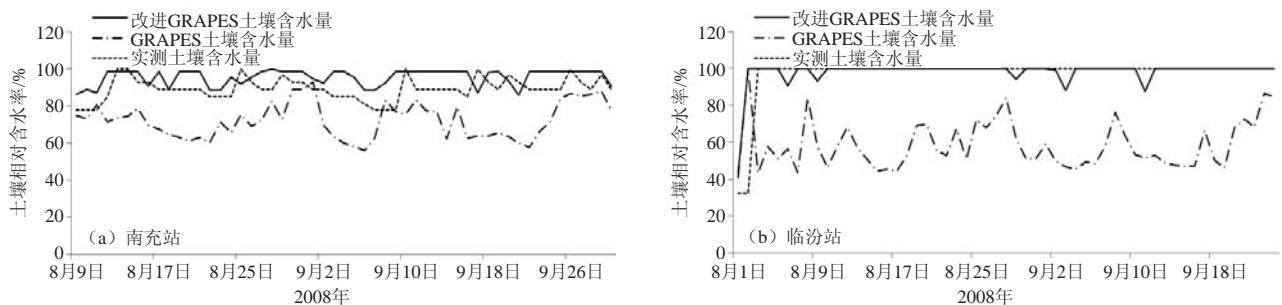
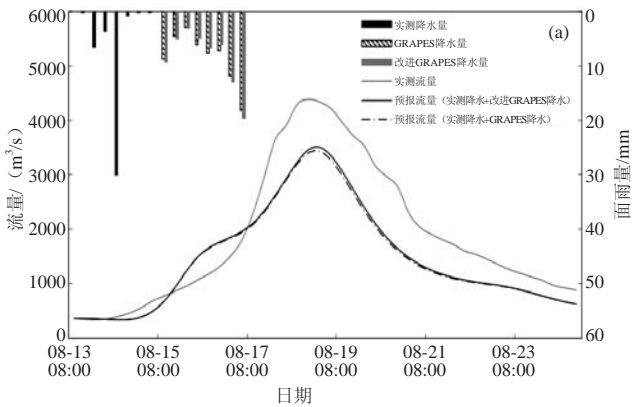


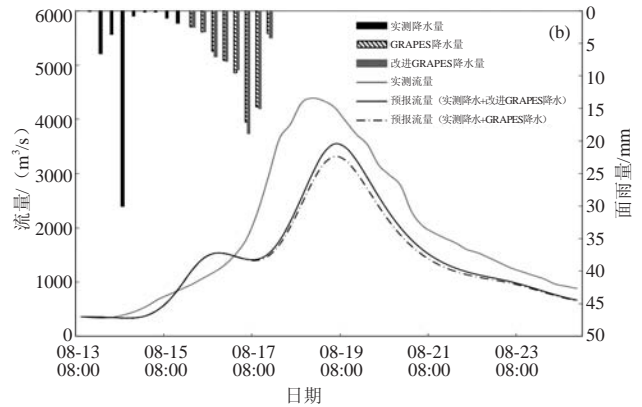
图3 10cm土壤含水量

图4是2008年8月13日08时洪水的模拟过程线。图4a的起始预报时间为2008年8月15日08时，从图中可以看出，双向反馈模式驱动水文模型模拟的过程线与单向反馈模式模拟过程线几乎吻合。图4b的起始预报时间为2008年8月15日20时，双向反馈模式模拟的洪峰值与单向反馈模式模拟结果相比，更接近实测洪峰。从表1中15日和16日的模拟特征值对比也可以看出，双向反馈模式预报降水驱动水文模型模拟结果略好于单向反馈模

式模拟结果。13日和14日起始预报时间模拟结果较差，是由于本次试验气象模式的预报时长是48h，在13日和14日起始预报没有模拟出完整的降水过程，所以水文模型模拟的结果稍差一些，但到了15日之后，气象模式可以模拟出完整的降水过程，水文模型模拟的结果就比较好了。由表1统计结果可以看出来，双向反馈模式驱动水文模型模拟的洪水过程从洪峰相对误差、洪量相对误差、峰现时间误差略好于单向反馈模式的结果。



(a) 起始预报时间：2008年8月15日08时



(b) 起始预报时间：2008年8月15日20时

图4 2008年8月13日08时—8月24日14时模拟洪水过程线

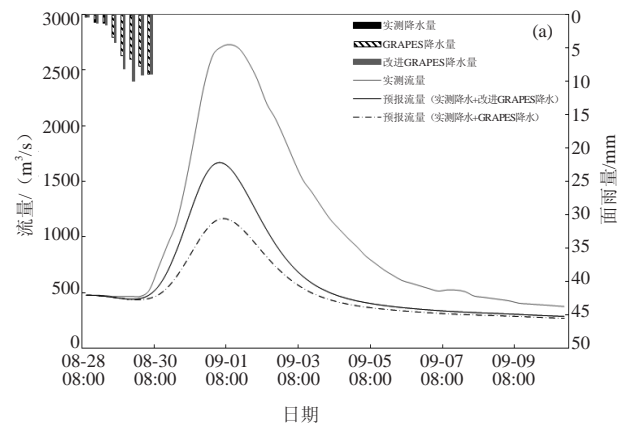
表1 2008年8月13日洪水新安江模型模拟结果统计

模式起报时间	洪量相对误差/%		洪峰相对误差/%		峰现时间误差/h		确定性系数	
	IM	G	IM	G	IM	G	IM	G
13日 08时	71.79	70.73	79.00	77.60	8	7	-1.12	-1.07
13日 20时	77.44	77.92	86.60	87.10	9	9	-1.36	-1.38
14日 08时	69.44	70.79	78.90	79.80	7	8	-0.96	-1.04
14日 20时	53.81	53.65	59.10	59.70	8	8	-0.46	-0.44
15日 08时	21.43	22.55	20.10	21.80	-1	-1	0.76	0.74
15日 20时	22.72	25.97	19.20	24.40	-2	-2	0.71	0.65
16日 08时	18.28	19.55	22.60	24.30	-3	-3	0.74	0.73
16日 20时	5.03	5.54	-9.60	-8.70	-1	-1	0.94	0.94

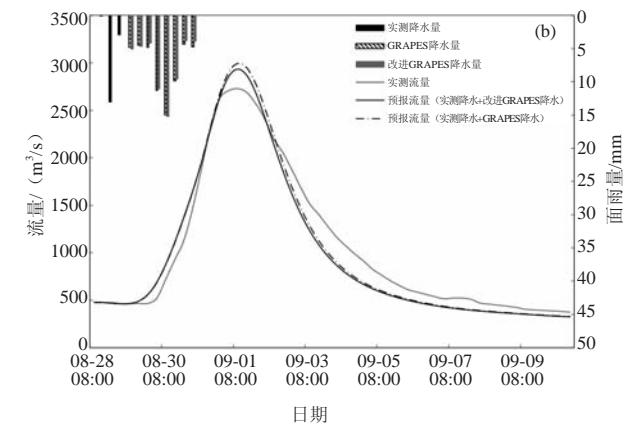
注：“IM”表示改进陆面模式的GRAPES预报降水驱动水文模型；“G”表示原GRAPES预报降水驱动水文模型。

图5a和图5b是起始预报时间分别为2008年8月28日08时和20时的洪水模拟过程线，从图中可以看出双向反馈模式预报降水驱动水文模型模拟的峰值更接近实测值。从表2的特征值对比也可以看出，双向反馈模式驱动水文模型模拟结果稍好一些。

图6是2009年8月28日08时洪水的模拟过程线，从图中以及表3的特征值对比可以看出，对这一场洪水，利用双向反馈模式驱动水文模型和单向反馈模式模拟过程线非常接近。



(a) 起始预报时间：2008年8月15日08时



(b) 起始预报时间：2008年8月15日20时

图5 2008年8月28日08时—九月10日14时模拟洪水过程线

表2 2008年8月28日洪水新安江模型模拟结果统计

模式起报时间	洪量相对误差/%		洪峰相对误差/%		峰现时间误差/h		确定性系数	
	IM	G	IM	G	IM	G	IM	G
28日 08时	40.19	50.94	38.90	57.20	1	1	0.42	0.04
28日 20时	24.84	22.16	16.30	11.40	0	0	0.79	0.84
29日 08时	5.77	3.75	-7.60	-9.80	0	0	0.95	0.96
29日 20时	6.55	7.39	-10.20	-8.60	0	0	0.93	0.93

说明：同表1。

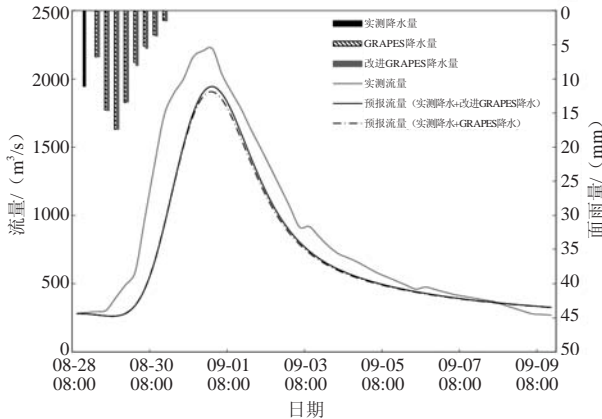


图6 2009年8月28日08时—9月9日14时模拟洪水过程线

表3 2009年8月28日洪水新安江模型模拟结果统计

模式起报时间	洪量相对误差/%		洪峰相对误差/%		峰现时间误差/h		确定性系数	
	IM	G	IM	G	IM	G	IM	G
28日 08时	28.94	24.25	29.60	22.00	0	0	0.65	0.75
28日 20时	17.42	18.56	12.40	14.10	0	0	0.84	0.83
29日 08时	34.30	34.02	39.20	39.10	1	1	0.54	0.55
29日 20时	-9.06	-8.82	-20.10	-20.00	1	1	0.89	0.89
30日 08时	-11.79	-11.88	-20.70	-20.70	1	1	0.88	0.88
30日 20时	-8.28	-9.06	-20.50	-20.50	1	1	0.90	0.90

说明：同表2

3 结论与讨论

本文选取三场降水，对基于GRAPES的陆—气双向反馈模式驱动水文模型模拟的流量过程和基于GRAPES的陆—气单向反馈模式模拟流量过程进行比较，尝试用气象模式对水文模型提供初始场，并利用水文模型对特定区域降水分布进行检验。

从试验结果可以看出，对于2008年8月的降水，所选取的淮河上游王家坝试验流域，双向反馈模式在试验区域内对10cm土壤含水量模拟精度高于原GRAPES模式模拟结果。双向反馈模式驱动水文模型模拟的两次洪水过程，从整体上略好于单向反馈模式模拟的结果，表明基于GRAPES的陆—气双向反馈模式能够模拟完整的陆面水文循环，使得土壤湿度更加合理，并通过感热和潜热通量，最终影响到了降水落区的变化。

本次试验证明，对于无资料或缺资料地区，水文模型可以利用气象模式提供的初始场，进行流量模拟和洪水预报，同时检验某特定试验区域的预报降水。除了采用降水评分方法，也可利用水文模型模拟流量过程与观测的流量进行对比，检验流域内降水分布的变化，这种方法可以推广到无降水站点区域或是降水站点稀疏区域。

参考文献

- 王莉莉, 陈德辉. GRAPES Noah-LSM陆面模式水文过程的改进及试验研究. 大气科学, 2013, 37 (6): 1179-1186.
- Evans J. Improving the characteristics of streamflow modeled by regional climate models. J Hydrol, 2003, 284: 211-227.
- Anderson M L, Chen Z Q, Kavvas M L, et al. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. J Hydrol Eng, 2002, 7(4): 312-318.
- Collischonna W, Haasb R, Andreolli I, et al. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather—prediction model. J Hydrol, 2005, 305: 87-98.
- Braun P, Maurer B, Müller G, et al. An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements. Meteor Atmos Phys, 2001, 76: 83-105.
- 王莉莉, 陈德辉, 赵琳娜. GRAPES气象-水文模式在一次洪水预报中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(3): 274-284.
- Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface—hydrology model with the Penn State—NCAR MM5 modeling system. part I: model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review, 2001, 129: 569-585.
- 赵人俊. 新安江模型的根据及参数与自然条件的关系. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- Bates P D, De Roo A. A simple raster-based model for flood inundation simulation. Journal of Hydrology, 2000, 236: 54-77.

基于DEM的流域河网信息自动提取算法

刘永和¹ 张万昌²

(1 河南理工大学资环学院, 焦作 454000; 2 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要: 分布式陆面水文过程的模拟, 除了经典水文模型所必需的流域气象、水文信息外, 还需要研究流域的详细地形、水系信息, 方可实现流域内产流和汇流的时空演算。以往通常需要借助商业软件在研究区DEM上提取这些水系信息, 不仅耗时、操作不便, 还使得模型结构松散。在自主研发的一种分布式水文模型的基础上, 开发了一套用于提取水系信息的模块, 并与该水文模型以同一种语言紧密耦合, 程序完全采用面向对象的方式自主编写, 大部分数据交换均在内存中直接进行, 而无需占用磁盘空间, 运行速度快, 易于今后不断完善和扩展。详细介绍了模块中填洼与平坦区域处理、流向与累积流向矩阵生成、Strahler河道等级的确定、子流域生成、汇流次序和流程长度信息的生成等多种流域河网信息提取的具体算法及程序实现。本模型系统完全采用自主方式开发, 克服了以往使用商业软件提取河网信息时的限制, 使得分布式水文模式的流域模拟及分析功能更强大齐全和今后进一步完善和扩展。

关键词: 分布式水文模型, 数字高程模型, 水系提取, 耦合模块

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.009

A DEM Based Drainage Networks Extraction Module Seamlessly Integrated in a Distributed Hydrological Model

Liu Yonghe¹, Zhang Wanchang²

(1 Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000

2 Institute of Remote Sensing and Digital Earth (RADI), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract: For simulation of the hydrology in a watershed by distributed hydrological models, besides the meteorological and hydrological data needed, the detailed information such as topography and watershed networks is also necessary. Traditionally, the drainage networks were derived from digital elevation models (DEM) using commercial software, which is time consuming and inconvenient for operation in hydrological modeling. Based on a distributed hydrological model (DHM) developed by us, an automatic watershed information extraction module was developed which is able to be integrated into the DHM seamlessly using the same computer language of C#. Therefore, most of the data transferring can be finished in memory with no occupation on hard disks, so it is highly efficient when running. The algorithms for the watershed information extraction were introduced, such as the algorithms of removing of depression and flatten areas, generation of flow direction and accumulating flow direction, obtaining Strahler river order, dividing of sub watershed and calculation the sequence of flow order and water-drainage length. This system overcomes the limitations of using commercial software for extracting watershed information, and also favors the modeling system for convenience of modifying and extending the model easily in the future.

Keywords: distributed hydrological models, digital elevation models, drainage networks extraction, coupled module

0 引言

模拟河流和土壤中水流的分布式水文模型被广泛应用于水利工程及环境影响评价^[1-5]。分布式模型可用于估计与水流有关属性的空间变化, 如化学物质迁移、土壤侵蚀、水分循环的陆面过程以及洪水状况。

由于流域水文状况受天气和气候条件影响, 人们期望在实现数值天气预报和气候变化预估的同时, 能够实现流域的水文预报或未来水文条件预估。由于水流严格地受制于流域的地形特征, 只有预先提取出流域的水系信息, 才能实现分布式模拟计算地表径流和壤中流的汇流。基于数字高程模型 (DEM) 提取流域水系是目前一种较为高效且可靠的手段。目前通过现代雷达测量手段已能获得高精度的地面高程信息, 如美国地质调查局发布的SRTM DEM的精度已达到90m的水平分辨率, 利用该数据能够较为精准地提取水系河网信息。因此, 从DEM中由计算机自动提取汇水网络成

收稿日期: 2013年12月12日; 修回日期: 2014年3月11日

第一作者: 刘永和 (1976—), Email: sucksis@163.com

资助信息: 国家自然科学基金项目 (41105074 和 41275108);

中科院数字地球重点实验室开放基金项目

(2011LDE010); 河南理工大学博士基金 (B2011-038)

为水文模拟研究中广泛应用的手段^[6]。

通常由DEM提取的水系信息包括像元间的流向、河段以及对应的子流域^[7-8]。有关的研究已有很多文献发表^[3, 7, 9-13]。基于矩形规则格网的DEM是流域提取时应用最多的数据^[7]，但在一些文献中也会基于不规则三角网（TIN）DEM^[14-15]。本文主要指基于规则格网结构的DEM。采用D8算法提取水系已经接近成熟，具体细节见文献^[6, 16]。目前在一些成熟的商业软件中已集成了有关基于D8方法的水系提取工具，如ArcGIS中的空间分析工具、ENVI软件的插件River Tools等。然而基于商业软件的水系提取工具其源代码不公开，人们无法知道其算法是否足够高效且健壮，更重要的是商业软件仅能作为一种数据处理工具，用户无法对其处理过程和结果数据进行自由操控，限制了它在自主开发的分布式水文模型中的应用。分布式水文模型通常表现为一种执行水文计算任务的计算机程序，由于缺少良好的人机交互界面而难以使用。目前一些重要的分布式水文模型（如SWAT）总是被集成于ArcGIS、GRASS等GIS软件工具中，以充分借助GIS软件所具有的DEM空间分析和可视化功能，增强其易用性。然而这种软件集成方法对于分布式水文模型的研究者而言难度较大，影响了分布式水文模型的应用。因此，开发一套专门的水系信息提取工具，以解决当分布式水文模型应用中存在的问题和不足具有一定的实际意义。

基于上述原因，我们针对分布式水文模型自主开发了一套用于提供水系信息的耦合模块。由于所建的分布式水文模型及水系提取模块采用基于同一种语言（C#）的紧密耦合方式，大部分数据交换均在内存中直接进行，而无需占用磁盘空间，且运行速度快；程序完全采用面向对象的方式自主编写，便于建立批量处理执行任务，易于不断完善和扩展。

1 耦合系统的功能与耦合方案

1.1 系统的功能

本文所述的流域河网信息自动提取系统及其与分布式水文模型的耦合系统具有以下三类功能：

1) 类似于GIS软件中各种位图和简单矢量图显示与漫游等可视化的功能。考虑到水文模型的主要任务是进行流域水文模拟，本系统既具有可显示单幅DEM或其他地理资料矩阵的功能，也可任意打开并显示用ARCIS里所指定的ASCII二维数据格式或其他用ASCII码矩阵方式存储的二维数据。当光标在地图上移动时，系统可自动计算并显示当前光标处像元的值、行列号、经纬度、UTM坐标值。本系统可以作为

查看任意兼容格式数据内容的基本工具，如查看分布式水文模拟的降水、蒸发、径流的空间分布状况。为使显示的DEM底图或其他属性图像与矢量地图相联系，该系统还提供了设置和显示点类型和线类型矢量图的功能。矢量图显示的数据源为ARCIS软件导出的文本矢量格式。

2) 自动提取大量流域河网信息的功能。本系统中的流域河网提取模块具有计算流向矩阵、累积流向矩阵、水系与河道等级矩阵、流域边界、子流域划分、汇流等级矩阵及汇流次序表、流程长度矩阵和汇流时间矩阵等功能，为分布式水文模拟提供必要的信息。

3) 分布式水文模型的模拟功能。本系统还具有按逐日和逐时进行径流和洪水模拟的功能，可按马斯京根法实现河道洪水演算以及按等流时线滞时方法进行汇流。

1.2 系统的耦合方案

水文模型在运行过程中所需要的气象、土壤、植被、地形等空间分布数据均采用与所用DEM完全一致的分辨率。为方便使用该系统，在运行过程中系统将以程序配置文件中所记录的河流出口断面所在的像元位置（行号和列号）作为运行起始点，一次性完成所有河道信息提取过程。水文模拟过程中所需的所有河道信息以公用数据结构变量的形式保存在内存中，供水文模型中的产汇流模块使用。

2 流域河网信息提取的算法

文中对流域河道信息的提取采用基于D8方法的思想。在每个DEM栅格上，待提取的信息包括流向、累积流向、水系与河道等级、流域边界、子流域信息、汇流次序、汇流时间、流程长度矩阵。在计算流向前，需要对DEM进行填洼（depression filling）和处理平坦区域，以便能够使DEM每个像元通过流向与主河道连接起来。

2.1 填洼和平坦区域的处理

DEM中的洼地是指局部位置的像元高程低于外围所有像元，使计算出的流向呈内流现象，即流向链条不能与外围的主河道相连接。DEM上的洼地可能是地表上真实的洼地，如小的湖泊，也可能是由于测量误差以及分辨率较低所造成的假性洼地。在水文研究中，无论流域中真实存在的局部洼地，还是假洼地，都被视作流域中排水网络的组成部分，即必须通过流向将这些区域与水系主河道相连接。填洼曾经是DEM水系提取中最难解决的问题，有关处理该问题的算法较少，用传统的一些算法（如Janson等^[11]在1988年提

出的方法)对一幅1000行×1000列的DEM进行填注需花费数小时的时间,且因易出现错误而使运行不稳定,但Planchon等2002年提出的快速算法已解决了该问题^[12],本文使用了这种新算法,一般仅需数秒的时间即能完成,且运行稳定。

平坦区域中,由于所有像元的高程都相等,不存在任何流向,阻碍了水系的生成。目前常用做法是用不同程度的低于分辨率微小数值抬高平坦区域中像元的高程,使抬高的像元与其邻接像元存在高程差,便于计算流向,并通过流向与外侧水系相连接。

2.2 水系生成与河道等级的确定

生成水系时需要完成流向计算、流向累积矩阵计算和确定河道等级。

在本系统中,我们采用一种新的邻域位置编码方法(图1)。在这种编码方法中,编码值排列为三行。从左到右,第一行中的编码设为0、1、2,第二行中的编码设为3、4、5,第三行的编码设为6、7、8。需要注意的是,在被设为4的3×3的编码窗口中心的编码不代表任何邻域位置,而是代表了当前指定像元的位置。由这些方向编码很容易算出当前指定像元的邻域像元的行列号。假定当前像元的位置为 (i, j) ,该像元处的水流流向编码为 m ,则其下游邻接像元的行列号为 $(i+m/3-1, j+m\%3-1)$,其中符号%表示取余运算。如果一个流向编码为 n 的邻域像元的流向指向本像元,则其流向编码应为 $8-n$ 。可见,这种流向编码方法非常有用,且很直接,这是因为当前感兴趣像元的流出和流入像元的位置能够高效计算出来。

0	1	2
3	4	5
6	7	8

图1 本文提出的D8流向编码

本系统中采用单流向算法来计算流向,算法步骤是:(1)首先对DEM边界上像素的流向设为指向DEM外部;(2)对除边界外的所有内部像素,比较其与周围8个邻接像元的高程差构成的梯度,选择高程低于当前像素且梯度最大的邻接像元所在的方向作为流向。这里的梯度是以当前像元与邻接像元的高程差除以像元距离 D 来计算。对上左下右四个紧邻像元,像元距离 D 为1,而对角线上的四个像元,像元距离 D 为 $\sqrt{2}$ 。

流向累积矩阵中每个像元上的累积流向值被定义为流过该像元的所有上游像元的总数,它代表了流过

指定像元的水系汇水面积。常用的统计当前像元累积流向的方法有两种,一种是递归找出当前像元的水系上游像元,统计这些找到的像元总数,即为累积流向值。另一种方法是逐个遍历DEM中的每个像元,当遍历到某个像元时,该像元的所有下游像元的累积流向值加1。当DEM中的像元全部遍历一遍时,便得到了累积流向矩阵。

在得到流向矩阵和累积流向矩阵的基础上,可进一步对河流进行基于Strahler分级方法^[17]的水系分级,即把位于顶端的不再有分支的河流称为第1级河流,由两个以上的同级河流汇合组成更高一级河流,如果多条河流同时汇聚,但最高级别的支流只有一条,则汇合后的河流级别与其最高级别的支流的级别相同。文献[18]对Strahler河流分级方法进行了较详细的描述,采用从最上游的像素开始向下游搜索,较为可行,但可能有一定的搜索难度。而本文则提出了另一种不需要从最上游像素开始搜索的方法。具体步骤如下:

1) 给定一个累积流向(汇流面积)阈值,认为大于该阈值的像元位于河流上,不大于该阈值的不属于河流;

2) 在DEM中找出所有累积流向值(汇流面积)大于指定阈值的所有像元,即找出所有位于河网上的像元。为便于快速检索,将这些河网像元放入一个以行号和列号为关键字的字典集合中;

3) 对字典集合中的所有河网像元逐个遍历,对找到的每个像元执行第(4)~(8)步操作;

4) 若当前像元(用 C_1 表示)已被分配子流域标志,则返回第(3)步,即跳过当前像元,对遍历到的下一个像元进行处理;

5) 从当前像元的8个邻接像元中找出属于 C_1 上游的所有像元,若没有找到这样的像元,则将 C_1 的河流级别设为1(属初级河流)并返回第(3)步执行下一趟循环。若找到了这样的像元,执行后续步骤;

6) 对 C_1 的上游像元,统计最大河流级别值 m ,以及拥有最大河流级别值的像元个数 n ,并判断是否 C_1 的全部上游像元已被标记过河流级别,如果已被标记则执行后续步骤,否则返回第(3)步执行下一趟循环;

7) 如果在前面已找出的 C_1 的上游像元个数为1时,则 C_1 的河流级别设为与其上游像元相同的值;如果 C_1 的上游像元多于1个时,且有两个或更多像元级别具有相同的上游最大级别 m 时, C_1 的河流级别设为 $m+1$;如果 C_1 的上游像元多于1个,但只有一个上游像元具有最大级别 m ,则 C_1 的河流级别设为 m ;

8) 返回第(3)步;

9) 如果第(2)~(8)步中没有任何像元被标记过, 则退出; 否则从字典集合中删除已标记过的像素记录, 并返回第(2)步继续执行;

10) 结束后退出。

2.3 子流域划分

子流域一般是指流域面积超过一定面积的分支流域。文献[19]中提出了一种子流域划分方法, 但算法不够具体。文献[20]中提出了具体的算法, 但略显复杂。本文采用思路与文献[20]基本一样, 但采用下面的算法来完成:

1) 生成一个空队列 Q , 将代表河流出口处的像元设为子流域最低编号(如0或1), 并将该像元的记录加入队列;

2) 若队列不空, 从队列中推出一个像元 C_1 , 执行后续步骤, 否则退出执行;

3) 从像元 C_1 的8个邻接方向中逐个查找 C_1 的上游像元;

4) 若找到 C_1 的一个上游像元为 C_2 , 将 C_2 加入队列;

5) 判断 C_2 的累积流向(流域面积)值大于给定阈值, 且 C_2 与 C_1 之间的累积流向值之差也大于给定阈值的条件是否成立, 若成立则将 C_2 标记为新子流域(其标记值为 C_1 的标记值加1), 若不成立, 则 C_2 的标记与 C_1 相同;

6) 返回第(2)步继续执行。

上面算法第(5)步中的条件十分关键。 C_2 作为 C_1 的上游像元, 其上游流域面积必须大于阈值才能成为一个子流域。另外, 还需要保证 C_1 存在除 C_2 外的较大分支才能使 C_2 成为新子流域的像元, 这是因为, 如果除 C_2 外的其他分支的汇流面积过小, 小分支无法独立成为子流域, 而与 C_2 、 C_1 属同一子流域。步骤(5)中的条件“ C_2 与 C_1 之间的累积流向值之差也大于给定阈值”正是为了保证 C_1 存在除 C_2 外的较大分支。

2.4 汇流等级矩阵、汇流次序表、流程长度与汇流时间矩阵的生成

在分布式水文模型的洪水模拟中, 需要根据流域中每个像元间的流向关系从上游向下游采用马斯京根方法进行河道汇流。仅仅根据流向矩阵无法得出正确的汇流结果, 仍需要根据汇流路径的远近对所有栅格划分汇流顺序, 从而得到整个流域或子流域的汇流等级矩阵和汇流次序表。对于同样属最低级别的河流像元, 模拟时距离流域出口像元远的像元应该先计算, 距离流域出口近的像元应后计算。汇流等级矩阵中的元素值为理论上根据到流域出口的距离来确定的汇流

次序, 等级值小的像元要先计算汇流, 相同汇流等级的多个像元应同时计算汇流。但从实际计算的角度来看, 汇流等级相同的多个像元仍是分别来计算汇流的, 但计算顺序可是任意的。为方便, 一般要导出汇流次序表, 用以代替汇流等级矩阵。汇流次序表以汇流的实际计算次序存放流域中所有的像元的行列号, 而不是采用矩阵形式存放。

流程长度矩阵是与流域DEM完全对应的二维矩阵(数组), 其每个元素存放流域中对应像元通过流向拓扑关系确定的通向流域出口的空间距离。汇流时间矩阵与流程长度矩阵类似, 只是其每个元素存放的是对应像元的“水流”流往流域出口所花费的时间。汇流时间矩阵可以通过将流程长度矩阵直接除以平均流速粗略得到, 也可以通过将各个像元的水流流速与相邻上下游像元间的梯度建立关系来精确导出。

汇流次序表可以通过汇流等级矩阵或流向矩阵导出。从流向矩阵导出的方法是从河流出口逆向上溯的方法搜索。由于流程长度矩阵的计算以及通过梯度精确计算汇流时间矩阵时也需要采用同样的逆向上溯方法来计算, 可将三个计算任务用同一个算法来完成。算法仍借助队列来实现, 具体步骤如下:

1) 将流域出口像元入队列 Q , 并往汇流次序表中添加该像元, 对应该像元的流程长度矩阵设为1(对汇流时间矩阵可采用类似的方法赋值);

2) 当队列不空时, 从中推出一个像元 C , 否则跳到第(6)步执行;

3) 从8个邻接像元中查找属于 C 的上游流入像元;

4) 对找到的所有上游流入像元的流程长度值进行赋值, 对斜对角方向的流入像元, 流程长度值为 C 的流程长度加1.414, 对上下左右四方向的流入像元, 流程长度值为 C 的流程长度加1。用类似的方法可对汇流时间矩阵进行赋值。把找到的上游流入像元按任意顺序添加入汇流次序表的末尾;

5) 返回第(2)步执行;

6) 将汇流次序表反转; 退出。

3 其他地面信息的生成

除与水系有关的信息外, 分布式水文模型仍需要借助地面坡度和坡向信息来计算汇流速度和水分蒸发量。计算坡度和坡向的方法可参见文献[21]。

为使流域位置上DEM的地形状况更加直观, 可生成漫反射光照明暗图。在计算机图形学中, 漫反射光照采用Lambert余弦定理来实现^[22]。Lambert余弦定理是根据入射光向量与反射面的法向来计算的, 因此先要计算出DEM中的每个像元所处位置上的法向。

由几何学知道，空间中的平面法向为通过平面内的任意两个向量的向量积。显然，只要已知平面中的三点，就能确定该平面的法向，因此三角形是最适于光照处理的面片。而规则格网DEM中每相邻四个像元都能拼成两个三角形（图2）。需要指出的是，在拼三角形时需要保证三角形的顶点顺序都为逆时针或都为顺时针。设三角形的三个顶点分别为 $v_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $v_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $v_3(x_3, y_3, z_3)$ ，则三角形某两边上的矢量 v_1v_2 和 v_1v_3 为：

$$v_1v_2 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$$

$$v_1v_3 = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)$$

v_1v_2 和 v_1v_3 的叉积 $n = v_1v_2 \times v_1v_3$ 即为三角形的法向，即：

$$n = (y_{r1} \times z_{r2} - z_{r1} \times y_{r2}, z_{r1} \times x_{r2} - x_{r1} \times z_{r2}, x_{r1} \times y_{r2} - y_{r1} \times x_{r2})$$

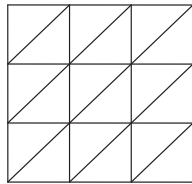


图2 基于格网DEM的三角形划分

当每个DEM像元的三角形法向被算出后，再给定一束来自无穷远处的虚拟入射光，即可算出像元上的光强。

4 流域河网信息提取实例

本文截取了山东省境内的沂河流域范围的DEM数据，分辨率为240m，在此基础上生成水文模拟时所用的各种与流域和河网有关的信息。图3显示的是系统的主窗体，其主要工作区中显示了DEM图像以及该区域内的河流、县界及水文测站的矢量信息。图4显示了DEM原图及由其导出的Strahler河流等级、子流域分区、流程长度、汇流次序等信息的图像。图4b显示的由DEM导出的河网与现有的矢量主河道基本一致，这表明流域河网信息提取模块中的填洼及计算累积流向的算法是较为可靠的。图4c显示了以沂河流域内临沂水文站为出口点的面积阈值超过2000像素的子流域划分，由图可见，划分的子流域基本合理，但仍存在不同子流域面积差别较大的问题。图4d显示了由DEM导出的沂河流域内各像素至河流出口处的流程长度，图4e显示了由DEM导出的各像元的汇流次序，这两幅图表明对应的算法计算结果是正确的。图4f显示了由DEM直接生成的虚拟化光照明暗图，该图能够反映研究区域地形起伏的状况。

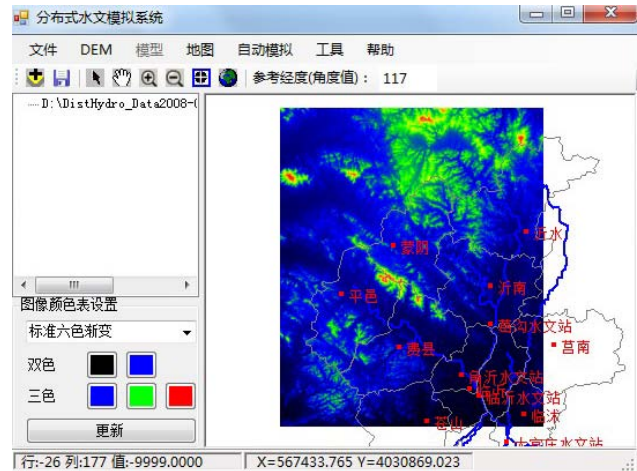


图3 系统主窗体及沂沭河流域DEM图像

5 结语

本文介绍了在分布式水文模型中基于DEM提取流域河网信息的耦合模块的算法设计以及耦合系统的功能和耦合方案，对水系生成和河道等级的确定、子流域生成、汇流次序及流程长度信息的生成以及光照明暗图的生成等算法进行了详细介绍。耦合模块采用基于内部数据结构的紧密耦合方式与分布式水文模型耦合成一体化系统，对水文模型所需的各种流域河网信息采用自动批量式生成，节省了对磁盘空间的占用，提高了运行速度，同时也简化了对水文模拟时流域信息的准备过程，能够较大幅度的提高使用效率。耦合模块中的各种算法结果基本合理或正确，运行速度快，十分稳定。

本水文模型系统的开发完全采用自主方式，完全避免了使用商业GIS软件在基于DEM准备各种河网信息时的限制和不足，更有利于今后的进一步完善和扩展。

参考文献

- [1] Yang X J. Use of LIDAR elevation data to construct a high-resolution digital terrain model for an estuarine marsh area. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(23): 5163-5166.
- [2] Gumbo B, Munyamba N, Sithole G, et al. Coupling of digital elevation model and rainfall-runoff model in storm drainage network design. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27(11-22): 755-764.
- [3] Wang X H, Yin Z Y. A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1-4): 221-241.
- [4] Wolock D M, McCabe G J. Differences in topographic characteristics computed from 100-and 1000-m resolution digital elevation model data. *Hydrological Processes*, 2000, 14(6): 987-1002.
- [5] Dodov B A, Fofoula-Georgiou E. Floodplain morphometry extraction from a high-resolution digital elevation model: A simple algorithm for regional analysis studies. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(3): 410-413.
- [6] Tribe A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models - A review and a new method. *Journal of Hydrology*, 1992, 139(1-4): 263-293.
- [7] Turcotte R, Fortin J P, Rousseau A N, et al. Determination of the

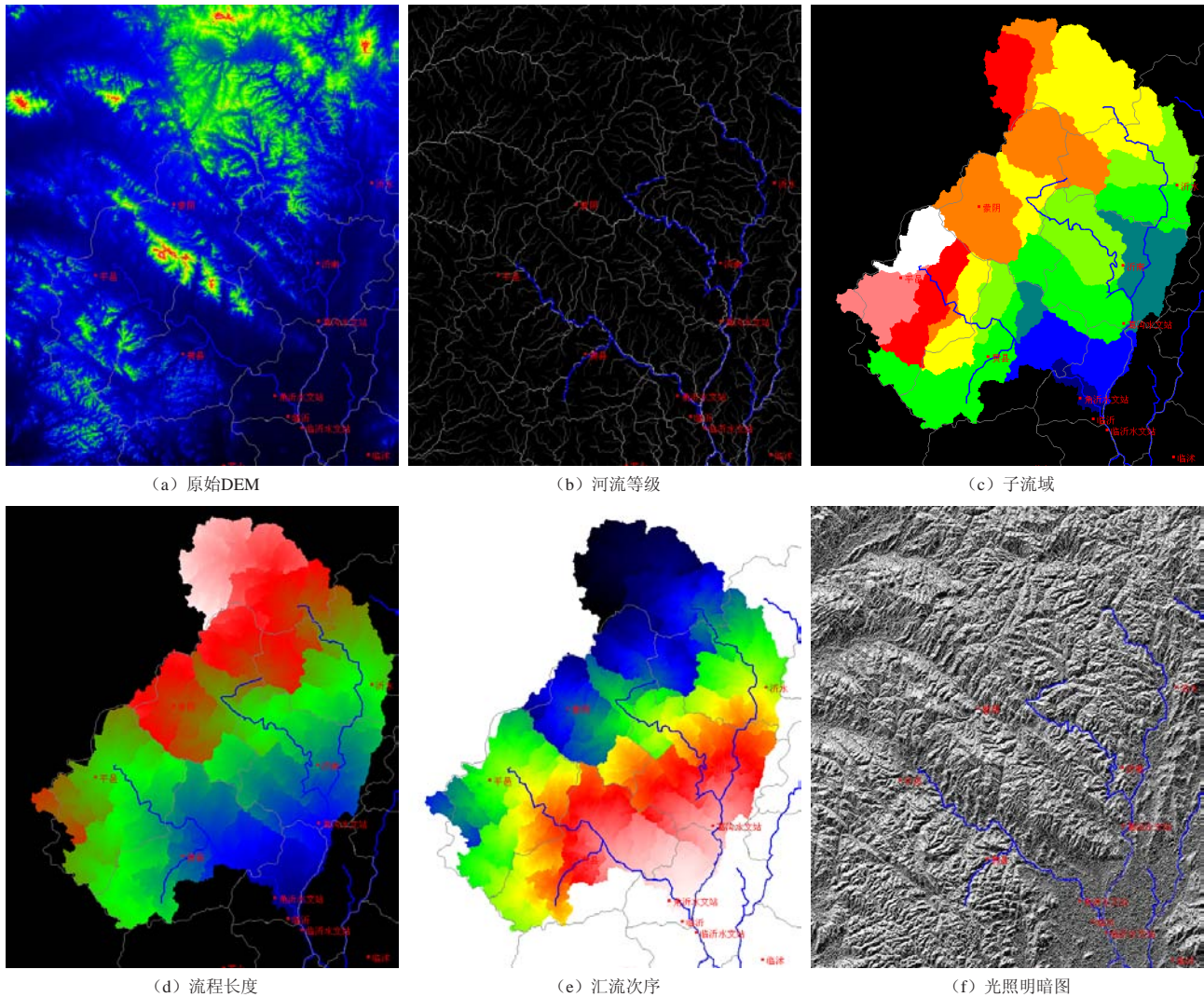


图4 DEM原图及其导出的流域信息

- drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3-4): 225-242.
- [8] Paz A R, Collischonn W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. *Journal of Hydrology*, 2007, 343(3-4): 127-139.
- [9] Colombo R, Vogt R V, Soille P, et al. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data. *CATENA*, 2007, 70(3): 296-305.
- [10] Ahamed T, Rao K G, Murthy J. Automatic extraction of tank outlets in a sub-watershed using digital elevation models. *Agricultural Water Management*, 2002, 57(1): 1-10.
- [11] Jenson S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(11): 1593-1600.
- [12] Planchon O, Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *CATENA*, 2002, 46(2-3): 159-176.
- [13] Jana R, Reshmidevi T V, Arun P S, et al. An enhanced technique in construction of the discrete drainage network from low-resolution spatial database. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(6): 717-727.
- [14] Tucker G E, Lancaster S T, Gasparini N M, et al. An object-oriented framework for distributed hydrologic and geomorphic modeling using triangulated irregular networks. *Computers & Geosciences*, 2001, 27(8): 959-973.
- [15] 刘学军, 王永君, 任政, 等. 基于不规则三角网的河网提取算法. *水利学报*, 2008, 39(1): 27-34.
- [16] McMaster K J. Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 13-13-8.
- [17] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions AGU*, 1957, 38(6): 913-920.
- [18] 张渭军, 王文科, 孔金玲, 等. 基于数字高程模型的水系自动生成. *大地测量与地球动力学*, 2006, 26(4): 41-44.
- [19] 沈中原, 李占斌, 李鹏, 等. 基于DEM的流域数字河网提取算法研究. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(1): 20-28.
- [20] 叶爱中, 夏军, 王纲胜, 等. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成. *水利学报*, 2005, 36(5): 531-537.
- [21] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005.
- [22] 唐泽圣, 周嘉玉, 李新友. 计算机图形学. 北京: 清华大学出版社, 1994.

从地形罗斯贝波到非静力中尺度动力学： 重温周晓平先生经典著作

蔡鸣¹ 张大林^{2, 3} 许秦⁴

(1 美国佛罗里达州立大学地球海洋大气科学系, Tallahassee, Florida, USA;

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

3 美国马里兰大学大气和海洋科学系, College Park, Maryland, USA;

4 美国国家海洋和大气管理局强风暴实验室, Norman, Oklahoma, USA)

摘要: 为缅怀气象学家周晓平先生, 重温了周先生的几篇经典著作。这些工作为周先生从研究生、青年到中年不同时期具有先驱性的科研成果, 涉及地形对罗斯贝波的动力作用、积云动力学及其数值模拟、非静力中尺度动力学等领域。这些在当时国内外气象界均具有领先水平的研究成果, 不仅推动了理论研究, 也被广泛应用于气象业务预报, 为中国气象事业做出了杰出的贡献。

关键词: 地形罗斯贝波, 积云动力学, 非静力中尺度动力学

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.010

From Orographic Rossby Waves to Non-Hydrostatic Mesoscale Dynamics: A Tribute to Professor Xiaoping Zhou

Cai Ming¹, Zhang Dalin^{2, 3}, Xu Qin⁴

(1 Department of Earth, Ocean, and Atmospheric Science, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland, USA

4 NOAA/National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, USA)

Abstract: In honoring and celebrating the professional achievements of Professor Xiaoping Zhou, an internationally recognized prominent meteorologist, this short essay reviews some of his most influential works at different stages of his professional career. The selected seminal works of Professor Zhou cover a wide range of topics, from dynamics of topographic Rossby waves, cloud dynamics and modeling, to mesoscale dynamics and numerical simulations. Professor Zhou's pioneering work not only contributed greatly to theoretical advancements in mesoscale and cloud dynamics, but also has provided guiding principles for the development and improvement of operational numerical weather predictions in China in the past 50 years. His contributions to the science will be remembered forever.

Keywords: orographic Rossby waves, cloud dynamics, mesoscale dynamics

0 引言

著名气象学家周晓平先生于2015年1月22日仙逝, 享年82岁。周晓平先生品格高尚、治学严谨、淡泊名利, 为国家培养出一批暴雨研究和预报方面的优秀人才, 为我国中小尺度气象科研和教育事业的发展做出了卓越贡献, 楷为师表。作为他的学生, 我们在此简要回顾周晓平先生在当时国际上领先的科研成果及影响至今

的几篇经典之作, 以表缅怀之心。他的这些工作涵盖下述三大问题: 地形对罗斯贝波的动力作用, 积云动力学及其数值模拟, 以及非静力中尺度动力学。

1 地形对罗斯贝波的动力作用

国际著名气象学家罗斯贝^[1]首先从理论上建立了大气长波理论, 因而大气长波也常被称为罗斯贝波。后来叶笃正^[2]首次提出了罗斯贝波频散理论。在长期的天气实践中, 陶诗言^[3]发现, 在大高原南边的波动(如印缅槽)东移速度一般较北面的波动偏慢。周晓平在读研究生一年级时(即1957年), 就已与导师顾震潮合著一篇经典之作, 对这种现象予以清晰的理论

收稿日期: 2015年2月18日; 修回日期: 2015年3月2日

第一作者: 蔡鸣(1957—), Email: mcai@fsu.edu

资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB441402)

解释^[4]。他们首先将这种复杂的天气学现象转化为一个相对简单又符合实际的旋转流体动力学问题，即叠加在西风基本气流上的波动通过东西走向山脉时沿着山坡的传播。这样，他们将大地形对波动气流的作用清楚地表述成在波动（槽或脊）前后气流中会出现的山脉所强迫的辐散辐合运动，而地球旋转效应又将这种辐散辐合气流转换成涡旋气流。通过解这个旋转流体动力学问题，他们揭示了大地形作用和科氏参数随纬度增大（即 β 效应）对波动气流作用是异曲同工，都能引发罗斯贝波。两者区别在于，后者引发的罗斯贝波仅沿纬圈向西传播，而前者引发的罗斯贝波传播方向则与地形坡面走向有关。在北半球，东西走向的大地形所引发的罗斯贝波沿南坡向西传播，沿北坡则向东传播。这就从理论上揭示了为什么叠加在西风基本气流中的波动通过东西走向山脉时，北面的波动一定比南面的波动向东移动得快。

此外，周晓平和顾震潮还将此理论运用于实际，根据青藏高原南北两侧的平均坡度及纬度，定量地给出了地形（南北坡面方向及坡度）和 β 效应（高原南北两侧的纬度差异导致的 β 参数值差异）分别对南北坡面波动传播速度差异的贡献。如图1所示，取青藏高原北坡沿 40°N 平均坡度为 0.2% ，对于一个波长为 3000km 左右的波而言，其通过北坡顺西风向东传播的速度会比通过平地向东的传播速度快 3.5m/s 。相反，当同一波长的波沿高原南坡时（平均坡度还取为 0.2% ），它的传播速度会比通过平地向东的传播速度慢 3.5m/s 。这样，在高原北面和南面槽脊顺西风东移速度可差 7m/s 。图2是周晓平和顾震潮合著的这部论文中所讨论的1957年1—3月通过西藏高原的南北坡波动的移动速度实测结果。波动在南北坡向东移动均比盛行西风慢，所以， β 效应确实比山脉效应大。但理论计算的南北坡面波动传播速度差异（约 5.5m/s ）中

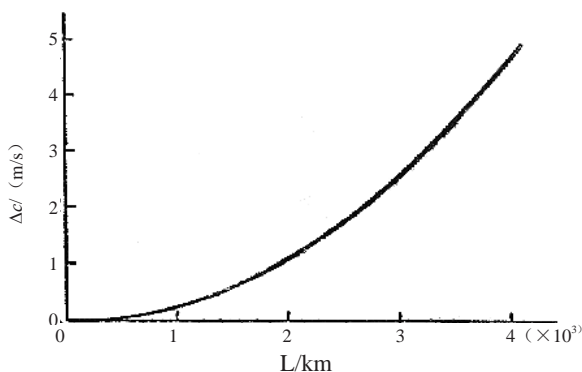


图1 地形造成的相速度 (Δc) 随波长 (L) 的变化^[4]
(参数取值: 纬度为 40°N , 坡度为 -2×10^{-3} , 大气等效厚度为 8000m , 等压面为 500hPa)

仅有一小部分（不到 1m/s ）可由因纬度差异导致的 β 参数值差来解释。其余的大部分（近 4.7m/s ）是由南北坡面方向及坡度大小差异而定。这就证实了他们所得出的理论解（仅考虑西藏高原南北两侧的坡度及 β 参数值差异）能基本解释实际观测到的西藏高原南北两侧波动东移动速度的差异（约 7.5m/s ）。

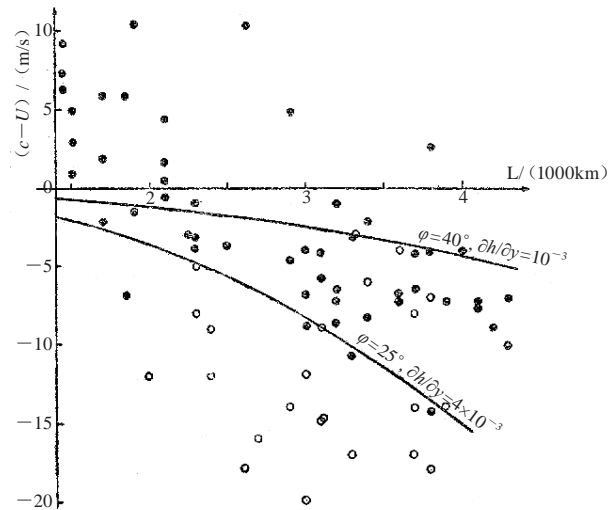


图2 西藏高原南北坡 500hPa 实测天气系统相对平均西风的移动速度 ($c-U$) 随波长 (L) 的变化^[4] (观测时间为1957年1—3月。黑点为西藏高原北坡的实测值, 圆圈为西藏高原南坡的实测值。曲线是由 β 效应和地形共同所引起的波动相对平均西风的理论移动速度。上面曲线纬度为 40°N , 坡度为 -1×10^{-3} , 下面曲线纬度为 25°N , 坡度为 4×10^{-3} 。其余参数取值: 大气等效厚度为 8000m , 等压面为 500hPa)

在气象海洋科学界，周晓平和顾震潮合著的这篇论文首次证明地形同等于 β 效应，都能引发罗斯贝波。该论文是一篇开拓性著作，延续和发展了罗斯贝波理论，并领先国外同类工作一年以上^[5-8]。次年，该工作在《西藏高原气象学》一书中得到高度肯定和重点介绍，并被用于进一步解释为什么当大槽通过青藏高原时，其南部往往被阻于高原西侧，仅其北部变成浅槽在北侧东传通过高原这一经典现象^[9]。这为其后我国东部降水、寒潮爆发过程的机制和数值预报研究奠定了坚实的理论基础。

2 积云动力学及其数值模拟

1959年，周晓平去苏联进修，师从国际数值天气预报的奠基人之一基别尔。他在那时便开始积云动力学的数值研究，回国后成为我国开展积云动力学及数值模拟研究的先驱者之一。20世纪50年代末正是国际上积云模式和其他气象模式研究的起步阶段^[10-11]，同时流体力学数值模式的差分算法也正处于开发阶段^[12]，可用于模式物理过程验证的云内参数观测甚少。尽管各种云内微物理过程都需要仔细考虑，但局

限于当时的计算条件,只能做粗略的参数化^[10]。周晓平在前苏联进修期间就发展了轴对称对流模式^[13]。他在该模式中改进了前人的计算方法和边界条件,研究了热泡在底层大气中产生浅对流的过程。其结果延伸了美国著名云动力学家Malkus和Witt合作的热对流研究工作^[14],为理解不同下垫面的加热和环境层结对对流单体发展的影响提供了重要依据。

1962年回国后,周晓平先生开始着手研究深对流积云单体的数值模拟。为此,他发展了由凝结潜热释放驱动的轴对称对流模式^[15],使用单点探空资料,假设较高湿度的边界层,成功模拟了一个云宽2~3km、云顶高达6km的对流系统。云中上升速度在4~5km高度达最大,约为20m/s,在2~3km高度存在上升速度的第二个高值区。该模拟云体,其成熟阶段的内部流场结构及其周围下沉气流的演变都与有关观测较为一致。虽然这些结果在今天看似较为简单易懂,但在当时简陋的计算条件下(特别是我国科学家到20世纪70年代初还在使用手摇计算器)可谓是一项了不起的工作。这些结果可媲美甚至优于当时国外同行的研究^[10]。

在开展上述研究工作的同时,周晓平还与巢纪平合著完成了《积云动力学》一书^[16]。其中非静力弹性方程组的研究与国外同行几乎同时进行^[10, 17]。在书中讨论了制约积云发展的一些主要因子和过程,其中包括静力稳定度、湍流扩散的影响、云外下沉气流的影响、挟卷过程的影响、环境风切变的影响以及与对流活动间的相互制约。书中也介绍了周晓平所做的大气热对流数值试验结果^[13]。相比于国际上发表的其他数值试验结果^[14],周晓平的数值试验积分时间较长,因此能更好地反映层流流体中对流活动的主要特点。书中又进一步介绍了当时周晓平的积云数值模拟的最新成果^[15]。这些数值试验成功地模拟了云底高度稳定的积云发展,相对其他国际上发表的结果^[18],这一结果更接近观测。该书不但总结了当时国内外对积云动力学和数值模拟的最新成果,而且还颇具前瞻性地指出了未来研究方向和重要科学问题。如在该书的结束语中提到:“积云是在一定的背景条件下发展起来的。背景条件的特征是和天气系统的活动分不开的,是天气形势的一种反映。背景条件如何,对积云的发生、发展有重要的影响”,预示通过进一步研究积云与环境场的相互作用将有助于改进强风暴数值天气预报。该书的结束语中也同时指出积云研究对于研究云中起电机的重要性:“强烈的积云总是伴随着闪电和雷击,因此积云形成的研究,对于研究云中起电机

制是不可缺少的一环。”当今对闪电的研究也证实其起电和放电机制与积云对流中强烈上升气流、下击暴流和水平风切变等为特征的流体力学过程以及与各类云粒子相变、增长、碰并等为特征的云物理过程密切相关^[19]。这本书是1978—1982年中科院大气物理研究所中小尺度流体力学研究生入学考试的指定参考书籍。作为恢复高考后首几届的研究生,其内容至今对于我们的科学研究和教学仍有指导意义。此外,该书中的成果被应用于实际中,为后来我国暴雨动力学和数值天气预报研究打下了坚实基础。特别是在周晓平的带领下,我国在20世纪70年代初发展了一个东亚季风的暴雨数值预报模式。而与此同时美国宾夕法尼亚州立大学中尺度模式专家Anthes也还正在经历从MM1到MM2再到MM3的发展过程。更为重要的是,周晓平使用此模式与中国气象局武汉暴雨研究所合作开展了夏季暴雨业务数值预报试验,大大推动了国内科研向业务方向的应用。

3 非静力中尺度动力学

20世纪70年代中末期,国外中尺度动力气象理论开始将行星尺度的惯性对称不稳定机制^[20-22]运用到中尺度^[23-24]。在行星尺度问题中,所考虑的基本气流是绕地轴旋转对称的纬向风及沿径向倾斜的等熵面。当纬向风垂直切变强到一定程度,切变可造成惯性不稳定,从而激发与等熵面近似平行的经向垂直环流。由于这种经向环流也是轴对称于地轴,其所属的惯性不稳定在历史上被称为对称不稳定。在中尺度问题中,对应的基本气流是有垂直切变的局地水平风(而不同于旋转对称的纬向气流)。所激发的惯性不稳定扰动是在基本气流的横截面中的倾斜垂直环流,其动力机制仍属惯性不稳定^[25]。但由于历史的原因,它仍常被称作对称不稳定。当尺度减小到中小尺度时,非静力的作用往往不可忽略,但这在当时的中尺度对称不稳定性的理论研究^[23]及数值模式的发展中(例如从MM3到MM4)尚未得到重视。

周晓平在进行中小尺度天气动力学和数值模拟的研究过程中,早已注意到非静力对准确模拟和预报产生强暴雨的中尺度系统的重要性,尤其对 β 中尺度系统(水平尺度20~200km)而言。在进一步发展非静力模式并用于积云动力学数值模拟研究的同时,他和他的课题组对非静力模式与静力平衡模式做了细致的比较。这些研究揭示了静力模式将产生虚假的高频重力波,夸大能量的传播速度,并部分歪曲低频惯性波的结构,同时还证实这些虚假的特征对中尺度数值模拟及预报以及对细网格的天气尺度系统预报都是不

利的^[26]。他还指导改革开放后首届研究生攻关“非静力大气中的惯性不稳定”这一课题。这一研究课题关注的是强水平风垂直切变所激发的中尺度扰动以及它们与暴雨形成和发展的关系（例如锋面雨带、飑线等）。通过使用非静力模式，并与静力平衡模式比较，上述研究课题^[27]不但从理论上研究了具有切变和层结的平行基本气流的斜压惯性不稳定，而且用理论结果讨论了一类中尺度强对流及暴雨的触发和维持问题。例如观测表明有一类中尺度对流有图3的基本形态，并且常常处于斜压惯性不稳定背景场中。可以认为这种中尺度对流也有类似条件不稳定的特点，即上升气流区域的层结稳定度小于下沉气流区域的层结稳定度，而基本风场的切变在两个区域都一样。上升气流区域中有强的湿斜压不稳定，因此上升气流不是垂直的而是以明显的角度（45°左右）向等熵面一侧倾斜。倾斜的上升气流有利于将降水质点从上升气流中分离出去，从而防止降水质点在上升气流中造成冷却效应，使上升气流易于维持。下沉气流散布在较大范围的弱或接近斜压不稳定的区域。若取对流层厚度为10km，则可估计图3环流型的水平尺度为100km。这与观测的量级一致。沿着三角形底边的补偿气流可以把较大范围（百千米宽）边界层中的水汽汇聚起来，使这种中尺度强对流得以维持和发展。

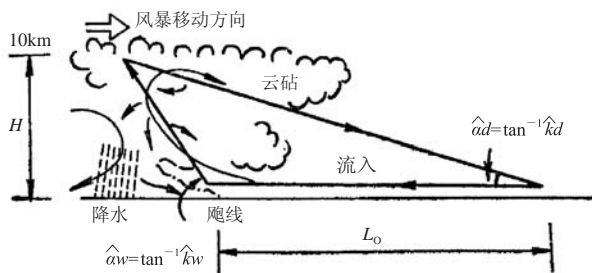


图3 一类中尺度强对流型的结构^[27]（环境场的基本气流方向是垂直于并指向图面内，且风速随高度增大）

4 结语

周晓平先生是我国大气对流和中尺度天气动力学以及天气数值模拟研究的先驱者和奠基人之一，也是暴雨和强风暴数值模式与预报研究的开拓者。周晓平先生虽已驾鹤西归，但他对气象事业做出的卓越贡献将永远造福世人，他严谨求实的治学精神将为一代代气象人铭记传承。我们深切缅怀周晓平先生！

参考文献

- [1] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Mar Res*, 1939, 2: 38-55.
- [2] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6: 1-16.
- [3] 陶诗言. 冬季由印缅来的低槽对华南天气的影响. *气象学报*, 1953, 28: 172-192.
- [4] 周晓平, 顾震潮. 大地形对高空行星波传播的影响. *气象学报*, 1958, 29: 99-103.
- [5] Robinson A R, Stommel H. Amplification of transient response of ocean to storms by the effect of bottom topography. *Deep-Sea Res*, 1959, 5: 312-314.
- [6] Phillips N. Elementary Rossby waves. *Tellus*, 1965, 17: 295-301.
- [7] Rhines P B. Slow oscillations in an ocean of varying depth. I. Abrupt topography. *J Fluid Mech*, 1969, 37: 161-189.
- [8] Rhines P. Edge-, bottom-, and Rossby waves in a rotating stratified fluid. *Geophys Fluid Dyn*, 1970, 1: 273-302.
- [9] 杨鉴初, 陶诗言, 叶笃正, 等. 西藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1959: 1-275.
- [10] Cotton W R. Theoretical cumulus dynamics. *Rev Geophys*, 1975, 13(2): 419-448.
- [11] 张大林. 大气科学的世纪进展与未来展望. *气象学报*, 2005, 63(5): 812-824.
- [12] Arakawa A. Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two-dimensional incompressible flow. Part I. *J Comput Phys*, 1966, 135: 103-114.
- [13] 周晓平. *Изв. АН СССР, Сер. Геофиз*, 1962: 542-557.
- [14] Malkus J S, Witt G. *The atmosphere and the sea in motion*. New York: Rockefeller Institute Press, 1959: 425-439.
- [15] 周晓平, 李兴生, 张耀科, 等. 积云发展的数值试验. *气象学报*, 1964, 34(4): 475-485.
- [16] 巢纪平, 周晓平. *积云动力学*. 北京: 科学出版社, 1964.
- [17] Ogura Y, Charney J. A Numerical Model of Thermal Convection in the atmosphere. *Proc Internat Symp Numer Wea Pred*, Nov. Meteor Sinica, 1962, 34: 475-484.
- [18] Asai Y. Numerical experiment of convection in the model atmosphere. *Proc Internat Symp Numer Wea Pred*. Tokyo: Meteor Soc Japan, 1960: 469-476.
- [19] 郝秀书, 张其林, 袁铁, 等. *雷电物理学*. 北京: 科学出版社, 2013.
- [20] Fjortoft R. On the frontogenesis and cyclogenesis in the atmosphere. Part I. On the stability of the stationary circular vortex. *Geophys Publ*, 1944, 16(5): 28.
- [21] Kuo H L. Symmetrical disturbances in a thin layer of fluid subject to horizontal temperature gradient and rotation. *J Meteor*, 1954, 11: 399-411.
- [22] Ooyama K. On the stability of the baroclinic circular vortex: A sufficient criterion for instability. *J Atmos Sci*, 1966, 23: 43-53.
- [23] Hoskins B J. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1974, 100: 480-482.
- [24] Emanuel K. Inertial instability and mesoscale convective systems. Part I: Linear theory of inertial instability in rotating viscous fluids. *J Atmos Sci*, 1979, 36: 2425-2449.
- [25] Xu Q, Clark J H E. The nature of symmetric instability and its similarity to convective and inertial instability. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 2880-2883.
- [26] 周晓平, 张可苏. 非静力平衡模式中重力惯性波的频谱结构和传播特征. 第二次全国数值预报会议文集. 北京: 科学出版社, 1980.
- [27] 许素, 周晓平. 非静力平衡大气中的斜压惯性不稳定. *大气科学*, 1982, 6: 355-367.

气候变化背景下的城市暴雨内涝问题探析

■ 刘俊 鞠永茂 杨弘

2013年夏季，受气候变化引发的大气环流形势场异常调整的影响，先在印度，进而在我国四川、陕西和黑龙江等省区，最后是俄罗斯远东地区，出现了一连串的极端降水事件，造成大面积城市暴雨内涝灾害。

随着我国城市化进程的不断推进，人口和生产力变得越来越集中，极端降水及其伴生的次生灾害所造成的损失正被成倍放大。气候变化引发的极端降水造成区域洪涝和滑坡、泥石流等次生气象灾害的主要致灾因子，关于极端降水的研究一直备受关注。

极端降水的成因既有中尺度天气要素的影响，也有气候因子制约因素。中尺度环流是触发机制和外在表现，而气候因素则是极端降水发生发展的主要孕灾环境。因此，从气候变化的角度对极端降水事件的成因加以分析，对认识极端降水的形成机制和深入研讨其预报着眼点具有重要的意义。

本文以极端降水为媒介，简要列举了近几年我国主要城市内涝灾害情况，分析了相关城市内涝的主要致灾因子，探讨了城市内涝与气候变化之间的关联。在此基础上，从气候变化的视角，对应对城市内涝提出了初步建议。

一、城市暴雨内涝主要特征

城市暴雨内涝灾害是指由于暴雨急而大，城市排水不畅引起积水成涝，造成市区严重积水，影响公共安全的气象灾害。综合我国城市内涝灾害情况分析，近年来其主要有以下两个基本特点。

一是城市暴雨内涝灾害在全国大中型城市凸现，具有普发性、群发性和持续频发性的特征。据2011年住房和城乡建设部调研结果显示：2008—2010年，全国62%的城市发生过内涝灾害，超过3次以上的城市有137个。从地域上看，不仅是南方的广州、深圳、昆明和武汉等城市，北方地区的济南、北京和长春等城市近几年都遭受了较为严重的内涝灾害。区域性极端强降水往往造成点多面广式的城市暴雨洪涝灾害。2013年汛期，四川省先后出现5次区域性强降雨过程，其中7月7—12日的强降水过程，都江堰幸福镇累计降雨量达1151mm，强降水中心分布与汶川地震震区位置走势基本一致。持续集中强降水的出现，造成

了绵阳、德阳、成都、雅安、北川、汶川和芦山等多个市县出现大面积严重洪涝并引发地质灾害。城市暴雨内涝灾害还表现出持续频发性的特点，近10年北京先后于2004，2006，2007，2008，2009，2011和2012年发生了严重的内涝灾害，其中包括2011年6月23日和2012年7月21日的严重内涝灾害。

二是城市暴雨内涝灾害造成的经济损失巨大。据统计，目前全球各种自然灾害所造成的损失，洪涝占40%，热带气旋占20%，干旱占15%，地震占15%，其余占10%。近年来，随着城市规模加速扩张，特别是大批基础设施工程加快建设，城市在暴雨内涝及其衍生灾害方面的脆弱性越来越显著，灾害损失也以前所未有的速度增长。城市暴雨内涝灾害发生时，首先是因建筑物和物资破坏带来的直接经济损失。2010年5月，暴雨3次袭击广州市，使羊城饱经水患。其次，暴雨内涝引发的城市交通、网络、通信、水、电、气和暖等生命线工程系统瘫痪，社会经济活动中断，其间接灾害损失某种程度上已远远超过因建筑物和物资破坏所造成的损失。2011年6月23日，北京市突降暴雨，经济损失近百亿；2012年7月21日的突发极端降水，直接经济损失100多亿元。

二、城市暴雨内涝与气候变化的关联性分析

灾害风险分析理论认为，风险分析的基本要素包括：孕灾环境分析、致灾因子分析、承灾体敏感性、脆弱性和风险防范能力分析等基本元素分析，以及在此基础上多目标融合的综合风险评估。以下从致灾因子、孕灾环境和承灾体的脆弱性三个方面分析城市暴雨内涝与气候变化的内在关联性。

1 致灾因子分析

城市暴雨内涝灾害直接由极端强降水事件所引起，没有强降水事件就不会发生内涝灾害。在这个意义上，气候变化带来的极端降水是城市暴雨内涝灾害的主要致灾因子。2013年，IPCC第五次评估报告

(AR5) 第一工作组 (WG1) 发布了最新的研究报告, 依据新资料更加全面阐述了气候系统变暖是毋庸置疑的事实。自1950年以来, 气候系统观测到的许多变化是过去几十年甚至近千年以来史无前例的。随着气候变暖, 在中纬度大陆块和多雨的热带地区, 极端降水事件将变得更加频繁、强度更强。有研究显示, 全球雨季极端降水的线性趋势比总降水在变化幅度上要大, 在对气候变化的响应上, 极端降水事件表现得更加明显。

我们采用1951—2012年的逐日降水资料, 利用趋势分析和M-K突变检验等方法, 对北京地区极端降水演变规律进行了分析。极端降水的定义采用目前国际上使用较多的百分位法, 其是一种对利用固定阈值定义不同区域极端降水事件方法的改进。该方法可以基于实际研究的需要, 综合考虑时间序列的长短和不同站点的气候态差异, 确定一个贴近防灾减灾需求的阈值来界定极端天气气候事件。具体为, 将北京观象台1981—2010年逐年6—8月的日降水量按照从大到小予以排序, 取每年各序列第95个百分位日降水量数值进行30年平均, 计算北京地区极端日降水事件的阈值。其中, 逐日降水量为观象台逐日08时至次日08时累积降水。

频次和强度是衡量极端降水的两个主要指标, 频次是指一段时间内极端降水的次数, 强度则为对应时间段内极端降水总量与频次的比值。第二次《气候变化国家评估报告》指出: 1951年以来, 全国范围的极端降水事件的频率和强度变化趋势不明显, 而华北和东北地区气象干旱面积呈增加趋势。分析北京地区夏季极端日降水频次变化规律, 极端降水频次出现较多的时段集中于20世纪50—70年代, 以1999年为界, 北京地区夏季极端日降水频次出现了突变, 由前期的正常偏多转变为偏少(图略)。与评估报告的结论相一致, 北京地区及其所处的华北实际上处于降水偏少、年代际偏早的大趋势背景中。

进一步分析北京地区夏季极端日降水的强度(图1a), 发现其最明显的特征是20世纪后期至2012年, 极端日降水强度呈现先减弱后迅速增强的趋势。其中, 2011年和2012年夏季极端日降水强度超过70mm。多项式线性拟合结果显示, 近十年来, 北京地区夏季极端日降水强度呈现上升趋势。尽管对1951—2012年北京地区夏季极端日降水的强度M-K突变检验显示, 1960年以后极端降水强度发生了由偏强向偏弱的突变, 此后没有出现突变点(图略)。但是, 对1991年以来的极端日降水强度进行M-K突变检

验分析, 可以看出, 自2011年起, 北京地区夏季极端日降水的强度出现了由偏弱向偏强的突变(图1b)。因此, 尽管处于年代际偏早的气候背景中, 北京暴雨内涝灾害的频繁发生与强度逐渐增强的极端强降水事件有一定的联系。

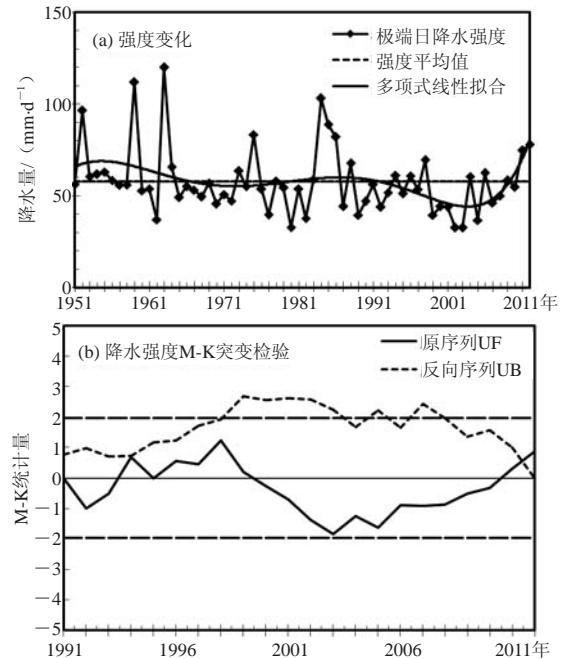
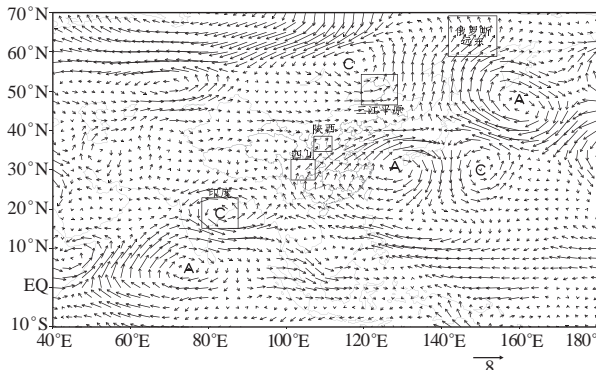


图1 北京地区夏季极端日降水强度演变特征及其突变检验 (显著性水平为0.05)

2 孕灾环境分析

城市暴雨内涝灾害并不是孤立事件, 而是全球洪涝灾害的组成部分, 发生在极端气候事件频发的孕灾环境中。以2013年夏季为例, 图2给出了NCEP再分析资料2013年7月欧亚地区700hPa流场距平分布, 可以看出, 印度北部、贝加尔湖以东和日本东南部出现异常的气旋环流, 印度南部、东海东部和白令海峡出现异常的反气旋环流; 尤其是东海东部的异常反气旋环流, 导致了西太副热带高压异常增强。2013年夏季, 气候变化导致的大气环流形势场的异常调整结果, 使欧亚中高纬的大气环流呈西低东高异常分布型, 冷空气频繁南下活动; 同时, 西太平洋副热带高压持续稳定且偏西偏北; 印度夏季风和东亚夏季风持续偏强。受该大气环流异常调整影响, 先在印度, 进而在我国四川、陕西和黑龙江等省区, 最后是俄罗斯远东地区, 出现了一连串的极端降水事件, 造成大面积城市暴雨内涝灾害。相关新闻报道显示, 2013年6月中旬开始, 印度北阿坎德邦遭洪水袭击, 造成近6000人失踪; 7月上旬, 5次强降雨过程接连袭击四川, 部分地方暴雨到大暴雨, 成都、绵阳、汶川和雅安等地受灾

严重, 145万余人受灾; 7月份, 陕西延安市出现暴雨32站次, 为历年同期的8倍, 造成延安凤凰山、宝塔山和名人故居等百余处文物旧址严重受损; 8月初, 东北地区连续遭受4次强降水袭击, 暴雨致使松花江黑龙江干流出现1999年以来最大洪涝灾害, 长春和哈尔滨等城市遭受严重城市内涝; 8月上中旬, 俄罗斯远东地区遭遇严重洪灾, 直接经济损失超过1000亿卢布, 近10万人受灾。正是由于大气环流的异常调整, 造成了区域气候变化和极端降水事件的发生, 进而为城市暴雨内涝灾害营造了重要的孕灾环境。



矩形区域为暴雨内涝发生地域, A代表反气旋环流, C代表气旋环流。

图2 2013年夏季亚洲季风区城市暴雨洪涝灾害及其对应的大气环流形式分布图

3 脆弱性分析

气象灾害的风险源自天气或气候事件与承载体脆弱性的相互作用。也就是说, 城市暴雨内涝灾害的损失程度不但与极端降水事件有关, 还取决于城市这一承载体的脆弱性。城市经济类型的多元化及资产的高密集性, 致使城市本身就具有综合承灾能力的脆弱性。城市承灾体在暴雨内涝灾害中的脆弱性还受许多因素制约, 比如: 2013年7月四川地震受灾城市的脆弱性就与前期地震形成震裂山体, 改变了地质结构有关; 武汉暴雨内涝灾害上的脆弱性与其填湖造田, 城区扩张有关。但是, 城市承灾体在暴雨内涝灾害上的脆弱性更重要的是受人类活动与气候变化相互作用影响。IPCC AR5报告指出, 20世纪中期以来, 全球气候变化95%以上的可能与人类活动有关。如图3所示, 人类活动通过基础设施建设、排放温室气体影响着气候环境。城市化效应对城市暴雨内涝灾害的影响, 也是人类活动影响气候的有力证据。在既有经济发展模式和缺乏有效风险管理情况下, 快速城市化和超大城市发展, 已经导致出现高度脆弱的城市社区。当然, 人类为减缓和适应气候变化而采取的措施, 如用可再生能源替代原有能源以减少碳排放、采取积极的措施有效地管理城市暴雨内涝灾害风险等, 也可以有效地减

小城市承灾体的脆弱性。因此, 人类活动与气候变化的相互作用左右着城市承灾体在暴雨内涝灾害中的脆弱性。

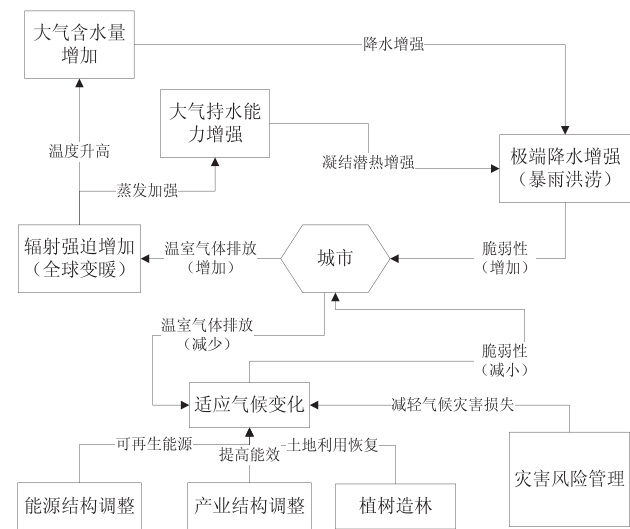


图3 影响城市承灾体脆弱性的可能机制示意图

三、应对措施

城市暴雨内涝灾害的管理工作需要做的有很多, 其中包括合理化城市规划和排水管网建设、兴修水利工程、引进先进暴雨管理和城市暴雨洪涝风险管理技术等诸多方面。但是, 从气候变化与防灾减灾的视角来分析, 主要应重视以下几个方面: 一是站在应对全球气候变化的战略高度, 积极减缓和适应气候变化; 二是建立合理的城市暴雨内涝评估模型, 为政府合理决策提供依据; 三是提高气候预测和天气预报准确率, 做好城市暴雨内涝的早期预警报警; 四是积极宣传开展防灾减灾工作, 促进城市暴雨内涝灾害防御配套机制建设。

(作者单位: 刘俊, 总参气象水文局; 鞠永茂, 杨弘, 解放军61741部队)

深入阅读

- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 16(4): 482-493.
- 刘俊, 刘善亮. 2011. 关注暴雨·雷暴. 北京: 军事科学出版社.
- 刘俊. 2011. 城市暴雨内涝灾害防御机制思考. 2011年中国气象学会年会论文集. 北京: 气象出版社.
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测. 气象学报, 57(2): 208-216.
- 张继权, 李宁. 2007. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用. 北京: 北京师范大学出版社.
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Ya, et al. 2008. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. Bull Amer Meteor Soc, 81(3): 417-425.

从2014年国际顶级期刊论文看世界大气科学领域华人学者的高影响研究活动

■ 李婧华

为了考量2014年华人作者在大气科学领域的研究在世界顶尖学术期刊上的显示度,选取*Nature*、*Science*和*Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America (PNAS)*这三种在国际上具有重要影响力的学术期刊,统计了2014年华人作者的发文情况,对华人作者本人情况、所属机构和研究领域等进行了分析。

本文所说的华人作者包括了中国大陆学者、在其他国家/地区工作和学习的中国人以及具有其他国家国籍的华裔学者。本文以作者姓名的汉语拼音为线索,统计了华人科学家以第一作者身份在*Nature*、*Science*和*PNAS*上发表的大气科学领域论文。无法从姓氏上甄别的华人作者,本文未进行统计。

2014年华人科学家以第一作者身份,在*Nature*、*Science*和*PNAS*上分别发表了12篇、4篇和10篇论文,总计发表了26篇大气科学相关研究论文。表1给出了这些论文的详细信息,其中按研究领域划分为气候及气候变化(11篇)、大气化学(8篇)、古气候(3篇)、海洋学(3篇)和碳循环(1篇)。26篇论文的华人作者,按照所属机构可划分为中国大陆机构(6人次)、国外机构(12人次)和双责任机构(指作者机构为两个,且其中一个为大陆机构,8人次),分别占23.1%、46.1%和30.8%。在国际合作方面,有24篇论文是由多国研究者共同完成,国内合作仅2篇。

根据2014年在3种期刊上发表论文的26名华人作者责任机构的国别分布,可以发现,这些作者主要



2014年华人科学家以第一作者身份,在*Nature*、*Science*和*PNAS*上分别发表了12篇、4篇和10篇论文。

来自美国和中国,此外,双责任机构的华人作者共8名,中美机构的共6位,中澳机构和中瑞机构各1位。有14篇论文华人作者的责任机构为(含)中国大陆机构,其中高校11篇(北京大学7篇,中国海洋大学3篇和南京信息工程大学1篇),中科院2篇(地环所和寒旱所各1篇),国家气候中心1篇,“本土”作者和双责任机构作者产出分别为6篇和8篇。

根据华人作者的国外机构属性分布,可以发现,这些作者主要来自大学(15篇)和研究机构(5篇),而且涉及的高校均为美国大学,可以看出,美国高校仍是大气科学领域人才输出和引入的重要机构。另外5篇的华裔作者是来自欧洲(德国、瑞士和挪威)和澳大利亚的科研机构。

一项杰出的科研成果,往往是多个机构共同完成的。*Nature*、*Science*和*PNAS*杂志上发表大气科学的华人第一作者论文,绝大部分是国际合作论文。26篇华人第一作者的大气科学相关学科文章中,有14篇论文的华人作者责任机构是(含)中国机构,其中8位华人作者具有中国和海外2个责任机构,且多数是中美两国的高校。

此外,有11篇论文的第一作者是在读博士或博士后,其中,有5篇论文是国内高校的在读博士或博士后为第一作者完成,另外6篇是国外高校在读博士或博

士后为第一作者完成。赵磊博士在*Nature*上发表了关于城市热岛效应的论文,他所在的耶鲁大学—南京信息工程大学大气环境中心是两校于2011年联合创办,该中心主要的科研内容是与大气环境相关的污染和资源问题,耶鲁大学终身教授李旭辉是该中心的主任。李旭辉教授本科和硕士毕业于南京气象学院,1992年获得加拿大英属哥伦比亚大学的土壤学博士学位,现任耶鲁大学森林环境学院全球变化事务主任,同时也是中国科学院海外评审专家。他长期从事森林气象学、边界层气象学及微气象方面的研究工作,在碳通量微气象观测方面具有很深的造诣和丰富的实践经验。北京大学环境科学与工程学院的郭松博士在*PNAS*上发文揭示北京霾形成机制,合作者有大气化学和气溶胶研究领域著名的“千人计划”学者张人一教授。张人一教授1983年在南京气象学院获得学士学位,1993年获得麻省理工学院大气化学博士学位,现任德州农工大学大气化学和大气环境中心主任,是美国气象学会大气化学委员会主席。

优秀海外学者不仅是我国科研领域的中坚力量,更为科研领域后备人才培养做出了突出贡献。这些高影响力论文的产出,表明我国对海外华人科技领军人物的引进政

表1 2014年Nature、Science和PNAS发表的华人第一作者大气科学论文及相关信息统计

序号	第一作者	第一作者机构	篇名	来源	作者信息
1	Li Xichen	纽约大学	热带大西洋及其北部对南极半岛和海冰的影响	Nature, 2014, 505(7484)	2006年北京物理学学士 2009年中科院海洋学硕士 目前在纽约大学大气海洋中心在读博士
2	王旭辉	北京大学	热带温度变化后碳循环敏感性增加两倍	Nature, 2014, 506(7487)	目前为北京大学城市与环境学院博士生
3	周黎明	纽约州立大学奥尔巴尼分校	刚果雨林在过去10年广泛衰退	Nature, 2014,509(7498)	1991年南京气象学院气象学学士 1994年南京气象学院气象学硕士 2002年波士顿大学地理学博士 2000年南京气象学院气象学学士
4	Ding Qinghua	华盛顿大学	加拿大东北部和格陵兰岛近期北极快速变暖的热带强迫	Nature, 2014, 509(7499)	2002年夏威夷大学马诺阿分校气象学硕士 2008年夏威夷大学马诺阿分校气象学博士
5	蔡文炬	1. 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 2. 中国海洋大学	全球变暖导致极端印度洋偶极子事件发生频率增加	Nature, 2014, 510(7504)	1986年厦门大学物理海洋学硕士 1990年澳大利亚弗林德斯大学物理海洋学博士
6	赵磊	1. 南京信息工程大学 2. 耶鲁大学	局地气候条件对城市热岛效应的显著贡献	Nature, 2014, 511(7508)	现耶鲁-南信大大气环境中心
7	Zhang Xu	德国霍姆兹兹极地与海洋研究中心阿尔弗雷德·魏格纳研究所	冰盖变化引起的冰川气候突变	Nature, 2014, 512(7514)	中国海洋大学气象学学士、硕士 现德国霍姆兹兹极地与海洋研究中心在读博士
8	Zhang Zhongshi	挪威皮叶克尼斯气候研究中心	中新世晚期特提斯海收缩引起的撒哈拉沙漠酸化	Nature, 2014, 513(7518)	2003—2007年在中科院大气所工作
9	Huang Ru-Jin	1. 瑞士保罗谢勒研究所 2. 中科院地球环境研究所	中国雾霾事件中二次气溶胶对颗粒污染的贡献	Nature, 2014, 514(7521)	
10	曾宁	马里兰大学	农业绿色革命导致大气二氧化碳含量季节波动幅度增加	Nature, 2014, 515(7527)	1987年中国科技大学近代物理系学士 1991年亚利桑那大学天体物理学硕士 1995年亚利桑那大学大气科学系博士
11	刘征宇	1. 威斯康星大学麦迪逊分校 2. 北京大学	过去2.1万年厄尔尼诺的演化和强迫机制	Nature, 2014, 515(7528)	1982年南京气象学院应用数学学士 1985年中科院大气所气象学硕士 1991年麻省理工学院物理海洋学博士
12	金飞飞	1. 夏威夷大学马诺阿分校 2. 国家气候中心	海洋次表面传热产生的厄尔尼诺东引起太平洋热带气旋加强	Nature, 2014, 516(7529)	1982年南京气象学院气象学学士 1985年中科院大气所大气动力学博士
13	张一歌	耶鲁大学	热带太平洋1200万年的温度历史	Science, 2014, 344(6179)	2007年南京大学地球化学学士 2009年乔治亚大学海洋学硕士 2014年耶鲁大学地球物理学博士 现哈佛大学地球和行星科学系在读博士后
14	Li Xin	德国于利希研究中心	从齐柏林对对流层测量结果推断气态亚硝酸的气相消失	Science, 2014, 344(6181)	曾在北京大学环境模拟与污染控制国家重点实验室工作
15	张正光	中国海洋大学	海洋中尺度涡的水体输运	Science, 2014, 345(6194)	中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室应届博士生
16	陈显尧	1. 中国海洋大学 2. 华盛顿大学	行星中的热量分配导致全球变暖的减缓与加速	Science, 2014, 345(6199)	2009—2014年在国家海洋局第一海洋研究所工作
17	林金泰, 潘达*	北京大学	中国在美国的国际贸易和空气污染	PNAS, 2014, 11(5)	2003年北京大气科学学士, 经济学学士(双学位) 2008年美国伊利诺伊大学大气科学博士 2010年哈佛大学博士后
18	王戎	北京大学	利用排放清单和高分辨率模式研究黑碳暴露	PNAS, 2014, 11(7)	北京大学城市与环境学院博士
19	杨保	中科院寒旱所	青藏高原东北部树轮记录3500年来的年降水量	PNAS, 2014, 11(8)	1994年山西师大地理系自然地理专业理学学士 1997年中科院寒旱所硕士 2000年中科院南京湖泊所理学博士
20	彭书时	北京大学	中国植树造林有助于区域地表气温降低	PNAS, 2014, 11(8)	北京大学城市与环境学院博士 现在法国气候与环境变化实验室做博士后
21	Zhang Xuan	加州理工学院	实验室试验中蒸汽损耗对二次有机气溶胶的影响	PNAS, 2014, 11(16)	2007年北京师范大学环境科学学士 2010年北京大气科学硕士 现加州理工学院环境科学与工程在读博士
22	Geng Lei	华盛顿大学	冰芯硝酸盐的氮同位素与人为大气酸化变化的联系	PNAS, 2014, 11(16)	现华盛顿大学大气科学系博士后
23	Wang Yuan	1. 德州农工大学 2. 加州理工学院	使用多尺度全球气候模型评估人为气溶胶对太平洋风暴路径的影响	PNAS, 2014, 11(19)	德克萨斯A&M大学在读博士
24	刘征宇	1. 威斯康星大学麦迪逊分校 2. 北京大学	全新世温度变化之谜	PNAS, 2014, 11(34)	同11
25	郭松	1. 北京大学 2. 德州农工大学	中国严重灰霾的形成	PNAS, 2014, 11(49)	2012年北京大气博士 现德州农工大学在读博士后
26	Xiang Bin	哈佛大学	制冷剂HCFC-22和HFC-134a的全球排放: 不可预见的全球贡献	PNAS, 2014, 11(49)	2004年复旦大学环境科学学士 2009年纽约州立大学大气化学博士

注: *共同为第一作者, 表中只介绍了第一位作者的信息, 统计中国按一位作者计算。

策取得了显著的成效。我们国家应继续提供优惠条件, 吸引优秀海外人才“落户”, 推动我国大气科学

领域研究取得更多突破性成就。同时, 还应在大气科学研究领域持续增加投入, 鼓励科学研究向国际先

进水平靠拢, 逐步提高我国在大气科学领域的科研水平。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

“极轨卫星”主题文献计量分析

李婧华 吴灿

一、数据来源及统计方法

利用中国知网学术期刊网络出版总库(以下简称CAJD)和ISI Web of Science平台SCI-E数据库,检索统计国内外有关“极轨卫星”主题论文。CAJD数据库中采用检索式为主题=(极轨卫星 or 极轨气象卫星 or 极轨环境卫星 or 极地轨道 or 泰罗斯 or TIROS),学科类别限定为气象学、自然地理学与测绘学、海洋学和资源科学,SCI-E数据库中检索式为TS=(("polar orbit*" NEAR/5 satellit*) OR ("polar-orbit*" NEAR/5 satellit*) OR ("solar synchronous" NEAR/5 satellit*) OR ((TIROS OR NPOESS OR METOP) AND satellit*)),学科类别为气象与大气科学、遥感、地学多学科和多学科。数据年限均选择所有年,文献类型均选择论文和综述,检索命中该领域国内和国际论文分别为481篇(检索日期2015年3月30日)和1176篇(检索日期2015年3月30日)。

二、统计结果和分析

1 研究总量增长趋势

SCI-E最早收录有关“极轨卫星”的研究论文是1960年*Journal of Geophysical Research*发表的题为Initial Results of the TIROS I



2008年以来,风云三号极轨气象卫星A、B和C星相继发射,国内极轨卫星研究迎来了一个小高峰。

Meteorological Satellite的文章。CAJD收录该主题最早的研究论文是1974年在《气象科技资料》发表题为“气象卫星的轨道”的文章。图1是SCI-E和CAJD数据库中“极轨卫星”主题论文的年代分布。根据SCI-E数据库,可将“极轨卫星”主题论文总量增长划分为三个阶段:第一阶段为1960—1990年,美国和前苏联分别在1960年代发射了极轨卫星后,该领域的研究逐步开展起来,但是这一阶段论文数量增长缓慢,且论文总量极为有限;第二阶段为1991—2008年,在这一时期,美国、俄罗斯、中国和欧盟等国家和地区相继发射和建立了极轨卫星系统,极轨卫星逐步投入到气象业务中,因此在此阶段,极轨卫星主题论文研究开始呈现上升趋势;第三阶段为2009年以来,极轨卫星主题论文产出较上一阶段有明显增加的趋势,年均超过60篇/年。CAJD数据库方面,国内在该领域研究论文产出呈现稳步增长的趋势。1994年之前,该领域年均发文量

低于10篇;1994年之后,年均发文量超过10篇。2008年以来,风云3号极轨卫星A、B和C星相继发射,国内极轨卫星研究迎来了一个小高峰。同时,中国在该主题下的SCI-E发文量也有小幅增长。

2 主要国家和机构产出及其影响力分析

极轨卫星研究论文主要来自美国、欧盟主要国家(包括德国、法国、英国等)、中国、俄罗斯和印度等(表1)。这些国家和地区均有极轨卫星系统,在研究极轨卫星时具有很大优势。美国是世界上最早发射极轨卫星的国家,并以绝对优势处于极轨卫星领域研究的第一集团,其论文总数占国际论文总量的56.9%,h指数达62,产出和影响力均远远高于其他国家。欧盟国家是该领域研究的第二集团,在该领域产出总量为558篇,占国际论文总量的47.4%。其中,法国和英国篇均被引次数较高,h指数超过30。中国、俄罗斯和印度是第三集团,中国在该领域产出虽排第5,但是总被引次数、篇均被引次数和h指数却低于产出排名靠后的比利时、意大利和荷兰。尽管有自己的极轨卫星系统,第三集团的国家在该领域的研究还是逊色于欧美国家,影响力有限。

在机构层面,国际机构中,SCI-E发文数量最多的前9所机构,美国机构有6所,法国机构有3所(表2)。其中,NOAA和NASA在该领域优势明显,产出分别为274和248篇。国内机构中,开展极轨卫星

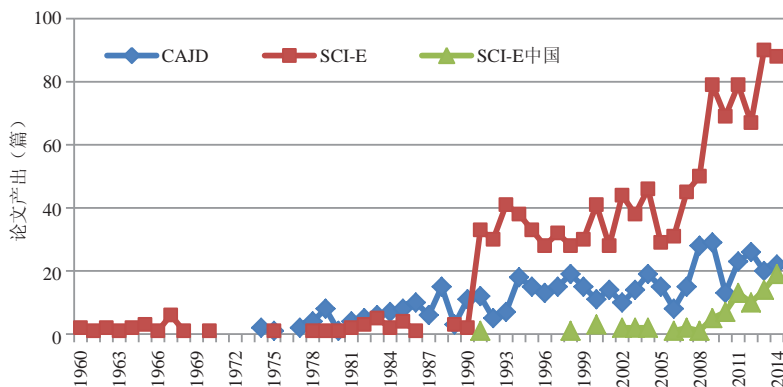


图1 1962—2014年SCI-E和CAJD数据库中“极轨卫星”研究论文数量年度变化趋势

表1 “极轨卫星”主题论文 (SCI-E) 产出量排名前10的国家及其影响力

国家	产出 (篇)	总被引次数	篇均被引次数	h指数
美国	669	16923	25.30	62
法国	160	4471	27.94	36
德国	141	2255	15.99	26
英国	117	2948	25.20	30
中国	89	829	9.31	15
比利时	49	1011	20.63	18
意大利	47	938	19.96	16
荷兰	44	865	19.66	17
俄罗斯	36	213	5.92	7
印度	36	176	4.89	7

表2 SCI-E和CAJD数据库“极轨卫星”主题论文产出较多的机构

机构	产出 (SCI-E篇数)	机构	产出 (CAJD篇数)
NOAA	274	国家卫星气象中心	100
NASA	248	南京信息工程大学	24
法国国家科学研究所	114	北京大学	19
威斯康星大学	77	中国科学院大气物理研究所	17
马里兰大学	70	新疆乌鲁木齐气象卫星地面站	14
巴黎综合理工大学	50	陕西省农业遥感信息中心	12
法国发展研究院	49	中国气象科学研究院	11
科罗拉多州立大学	49	解放军理工大学	10
科罗拉多大学	41	广州市气象卫星地面站	9

研究的主要是气象部门, 其中国家卫星气象中心产出最多, 发文数量占CAJD该领域论文产出的20.8%。国家卫星气象中心参与了气象卫星生产研制、系统建设、数据处理等, 极轨卫星属于其专业研究领域, 因此在该领域的研究具有非常大的优势, 国家卫星气象中心对极

轨卫星的研究, 也代表了我国在该领域的最强实力。

3 来源期刊和高产作者分析

表3给出了国内外刊载“极轨卫星”主题论文较多的期刊。SCI-E数据库中, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*以146篇刊载

表3 SCI-E和CAJD数据库刊载“极轨卫星”主题论文较多的期刊

来源出版物 (SCI-E)	产出 (篇)	来源出版物 (CAJD)	产出 (篇)
<i>Journal of Geophysical Research: Atmospheres</i>	146	沙漠与绿洲气象	44
<i>International Journal of Remote Sensing</i>	89	气象	43
<i>IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing</i>	79	气象科技	38
<i>Journal of Atmospheric and Oceanic Technology</i>	57	应用气象学报	25
<i>Remote Sensing of Environment</i>	56	陕西气象	14
<i>Advances in Space Research</i>	56	大气科学	13
<i>Atmospheric Chemistry and Physics</i>	55	内蒙古气象	11
<i>Geophysical Research Letters</i>	47	南京气象学院学报	9

表4 国内外“极轨卫星”主题论文高产作者

作者	单位	产出 (SCI-E篇数)	作者	单位	产出 (CNKI篇数)
Clerbaux C	法国凡尔赛大学	31	董超华	国家卫星气象中心	13
Chedin A	法国国家科学研究所	29	张凤英	国家卫星气象中心	12
Coheur PF	比利时布鲁塞尔自由大学	26	卢乃锰	国家卫星气象中心	9
Scott NA	法国国家科学研究所	25	杨忠东	国家卫星气象中心	8
Hurtmans D	比利时布鲁塞尔自由大学	24	张鹏	国家卫星气象中心	8

量位列第1, *International Journal of Remote Sensing*和*IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 位列第2和第3。CAJD数据库中, 刊载最多的是《沙漠与绿洲气象》, 随后是《气象》和《气象科技》, 还有一些省级期刊《陕西气象》和《内蒙古气象》也刊载较多该主题论文。此外, 国内外刊载“极轨卫星”论文较多的期刊除了大气科学类期刊, 也有关注空间技术和遥感等方面的期刊。表4给出的是国内外“极轨卫星”主题论文的高产作者。SCI-E数据库中, 共有6位学者产出达20篇以上。CAJD数据库中, 有6位学者产出大于5篇, 他们全部来自国家气象卫星中心, 其中, 董超华发文量最多, 为13篇。SCI-E和CAJD被引频次最高的热门文献在本期P3、P5页榜单给出。

三、结果讨论

总体而言, 拥有极轨卫星的国家是该领域研究主要的论文产出国, 美国和欧盟在该领域的研究最为活跃, NOAA、NASA和法国国家科学研究所是该主题论文的重要产出机构。国家气象卫星中心是中国开展极轨卫星相关研究最早且持续活跃的机构, 2008年以来, 随着风云3号系列卫星相继发射, 国内关于极轨卫星的研究不断加强。未来要进一步增强气象部门与科研院所的合作, 借鉴国外先进的极轨卫星相关研究, 不断增强我国在极轨卫星领域的科技实力和影响力。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

深入阅读

胡英, 李婧华. 2013. “风云气象卫星”主题文献计量指标分析. 气象科技进展, 3(4): 153, 160.
杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 2009. 中国新一代极轨气象卫星—风云三号. 气象学报, 67(4): 501-509.

气候变化综合评估模式研究：任重道远

——美英科学论坛第三次主题年会介绍

■ 戴洋

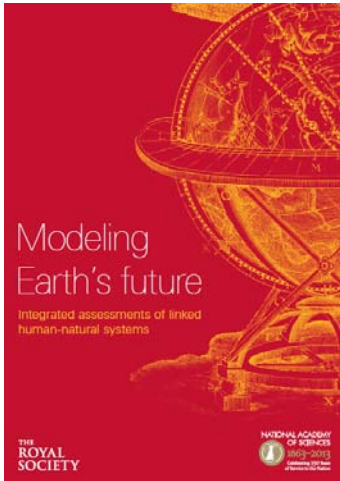


图1 《模拟地球的未来》报告

全球气候变化问题是人类迄今为止面临的规模最大、范围最广、影响最为深远的挑战之一。一直以来，气象学家们孜孜不倦地改善气候模式，以期对未来的气候变化做出更准确的预测。2012年美英科学论坛^①召开了第三次年会，主题为“综合评估模式和气候变化研究的未来需求”，就这一气候变化研究新领域，形成了很多鲜明的、发人深思的观点。

一、会议概况

2008年创建的美英科学论坛，目的在于帮助两国科学界领导层在一些在全球范围有利于整个人类的科学焦点问题上建立一个持久的伙伴关系，另一个目的则是在于检验科学技术作为引擎，在创造人类未来这方面的驱动力究竟几何。2012年，该论坛围绕“综合评估模式和气候变化研究的未来需求”主题，召开了第三次年会。此次论坛汇集了一批来自各领域的专家和学者，



2008年创建的美英科学论坛的另一个目的在于检验科学技术作为引擎，在创造人类未来这方面的驱动力究竟几何。

他们用各种不同方式来模拟自然和人类系统，其中，有的纯粹专注于自然系统，有的则涉猎广泛，研发的模式包括了经济、技术、农业和其他人类系统。正如会议总结报告（图1）撰写者Olson所说，“每一个群体都有很多要向其他群体学习的，也都有很多要向其他群体说的”。

二、综合评估模式

综合评估模型并非是因为气候变化研究才横空出世的，事实上，综合评估方法所使用的一些分析工具及技术，如生态模拟和系统分析等，其发展可追溯到20世纪中后期对全球环境的研究，为了解决全球环境问题，“综合评估”的政策评价过程被引入，相应的评估模型作为核心研究工具进而被逐步研发。自国际应用系统分析研究所（International Institute of Applied Systems Analysis, IIASA）研发了综合评估模型RAINS对欧洲酸雨问题及适应对策进行分析评估，Nordhaus将经济系统与生态系统整合到一个模型框架里来对气候政策进行评价之后，气候变化综合评估模式取得了长远发展。目前全球比较知名的综合评估模式有IGSM，IMAGE，DICE，CETA，PAGE，LFBQUEST，ESCAPE等。

类似于气候模拟者用对大气、海洋和陆地的数值模拟来预测未来

气候那样，综合评估模式将复杂度不一的气候模式与对经济活动、技术进步、农业和其他人类活动的模拟相结合，来探测气候变化的广泛影响，以及人类社会可能减缓和适应气候变化的可能方式。综合评估模式中包括了物理的气候系统（一般都是简化的），也包括了经济行为、技术进步，农业生产和其他人类系统行为，通过对自然和人类系统进行耦合，来探究气候变化的广泛影响及人类社会可能减缓和适应气候变化的可能方式，预测一个变化中的气候对食物生产、自然生态系统、人类健康、人口迁徙、淡水供应等很多重要方面的影响。学者殷永元等认为，综合评估方法具有5个特征：政策导向，联接气候变化影响与可持续发展；系统性及多学科交叉；多目标多部门评估；多个利益团体参与及展示利弊得失；使用先进的分析方法。这些特征的概括，也在一定程度上说明了综合评估模式研发的艰巨性。

综合评估模式具有多样性的特征。有的相对简单，例如，Dynamic Integrated Climate Change (DICE) model^②，只有19个公式；有的则有成千上万的公式。一些模式是“自下而上”架构的，着眼于减排技术；有的则是“自上而下”，重点在于经济市场。按模型框架划分，可分为最优化模式、可计算一般均

① 由Raymond和Beverly Sackler建立于2008年

② <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/DICE2007.htm>

衡模式和模拟模型等。按其区域划分,则可分为全球模型和区域化模型。就经济、物理和生态的影响,不同的模式输出也不一样,有的是简单的输出,有的是较详细的社会经济措施;一些聚焦于预估相关的不确定性,另一些则目标锁定在建设“愿景”或界定最优政策。

在模式的目标方面,综合评估与一般的基础科学研究之间最主要的区别之一是研究目的不同:后者主要在于进一步了解某系统或事物的内在联系;而前者大多在于为决策或政策制定提供科学依据,即政策导向。本次论坛的综合评估模式的目标是多样的,包括:1)为综合评估模式系统内部的各种反馈提供信息。如气候变化了,人类生产生活、经济等各方面都相应地发生变化,这些变化又会反过来反作用于气候。2)发现那些可能尚未被现有的综合评估模式纳入研究,但实际很重要的相互作用。例如,城市空气污染一般是局地或者区域尺度,而不是像气候变化那样的全球尺度,但局地或者区域尺度的污染物又能影响全球尺度的大气。所以,气候变化有关的政策就与大气污染政策有关系,考虑污染就会有益于对气候变化的研究。其他一些类似的已被或可能尚未被模式考虑进来的主题还包括:粮食生产、交通运输、制造业、城镇化、生物多样性、人口增长、水资源供应和质量、人类健康、土地退化沙化、生态系统紊乱、垃圾降解等。3)为决策者的决策提供信息。综合评估模式能获得很有价值的政策观点。这些模式表明,要避免自然和人类系统可能会发生的可怕的变化,目前政策提出的排放限制是不够的。他们证明,并不需要大量减少人类福利,也可以稳定温室气体浓度,然而这需要一些可能很难被落实执行的政策。此外,他们还显示了一些减缓气候变化行动(如,为温室气

体排放进行定价)所可能带来的结果。等等。

无论是简单的还是复杂的综合评估模式,其结果都有着不确定性。例如,各个河川流域的径流量预估在会议期间引起了众多讨论,这是个融合了气候、土地作用、农业等很多影响因素的复杂难题,气候模式本身对于预测区域降水尚有不不确定性,其他各种相关因素的影响使得综合评估模式对其预估的不确定性更为严重。与极端事件有关的不确定性同样很突出:不管是自然系统的极端事件,还是人类系统的极端事件,其影响都不容小觑,但目前模式对极端事件的模拟能力几乎是匮乏的,因此这对于模式来说是个严重的瑕疵。再以碳循环模式为例,为了使模式能真实地刻画相关的庞杂的各种生物物理化学过程,碳循环模式比过去要复杂得多,但同时一个显而易见问题是,他们是否因此比过去更准确?英国研究人员Pierre参与的一项碳循环模式比较研究表明,由于碳循环模式变复杂,使得气候模式的输出结果的不确定性增加,而气候模式结果不确定性的增加,自然会给综合评估模式带来更大的不确定性。

模式对不确定性的处理非常关键。本次论坛形成的观点包括:1)承认不确定性是讨论和未来分析的一个不可缺少的共同认知基础,尤其是当不同的观点分化严重时。2)在评估未来可能付出的代价时,将不确定性(包括事件的可能性和影响)的整个变幅区间都纳入模式,要比用可能性和影响的平均值代入模式时,获得的模拟结果更好。3)不确定性评估还使得科学家能够确定模式中不同的输入所带来的不同影响。例如,综合评估模式PAGE的一系列模拟实验显示,对温室气体增加的气候敏感性的不确定性是评估未来气候变化代价(成本)时最大的影响,位列其后的是折现率和

大气中温室气体半衰期等的输入。按照这个分析,对这些不确定的输入的深入理解,可以为未来节约上千亿美元的付出。4)所有的模式都有不确定性,但不确定性并不一定就是个缺点。实际上,对模式来说,给出预估结果和对不确定性的识别与量化是同等重要的。

综合评估模式到底能发挥什么作用,是本次论坛集中讨论的热点之一。麻省理工学院20年来研发的综合全球系统模式MIT Integrated Global Systems Model (IGSM)^①是一个比较复杂的模式,具有模块化的框架,其组成成分可根据研究目的不同而增减,除了模拟自然系统的气候模式、陆地生态系统模式、耦合的大气化学与自然排放模式等之外,还包括排放预测和政策分析模型EPPA(一个囊括了全球大的经济体里众多消费和生产活动的经济学模型),以及对能源使用、农业生产的模拟等。IGSM模拟结果表明,发达国家的能量消费会保持稳定,发展中国家则会增长到发达国家当今的水平。

另一个热点是研究为了稳定温室气体浓度而改变全球能源系统所要付出的成本。例如,一个排放预测和政策分析经济学模型已应用于计算在实行不同减排政策的情况下到2050年全球福利损失的可能性。结果表明,到2050年,若大气中CO₂含量稳定在560ppmv的水平,则全球福利损失大于1%的可能性为70%,大于2%的可能性为30%,而大于3%的可能性仅为10%。

三、综合评估模式的未来发展

在很多方面,综合评估模拟还处于发展初期(婴儿期)。未来发展还有很多亟待解决的方向。

首先是如何更好地处理多学科交叉融合的问题。由于综合评估需要把生态、环境和社会经济各方面纳入到一个全面系统的分析框架中,因此综合评估模式需要不同学

^① <http://globalchange.mit.edu>

科背景的专家坐到一起共同解决问题，多学科交叉的研究方法和途径是必须和必要的。只有靠跨学科研究，合作者们跨越界限开展研究，才有望解决一些光靠本学科力量无法解决的难题。然而真正坐到一起时，这些不同学科专业背景的科学家又不可避免地会站在自己的立场（学科背景）来看待问题。未来，如何有效地协调不同学科专业的研究人员在综合评估研究中的交流与合作，是综合评估模式研究能够取得成功的关键。

第二，人类活动与气候和环境变化之间有着高度错综复杂的关系，我们对这些系统的内在关系及它们动态发展的了解也极为有限，而模式中完全的综合，则意味着要将地球生活很多改变的方面都折成货币价值，这是一个广泛面临的挑战，也是这类模式所共有的一个特点。特别是，综合评估需要联接科学研究与政策制定，向决策者、公众团体及利益集团提供决策依据，

以完成综合评估的目的。因此，不完全综合模式，辅以专家判断相结合，是一种互补的有用的方式。在模拟研究中结合参与途径方式（participatory approach），实现多个利益团体参与及展示利弊得失，以弥补计量模型的不足，已得到了综合评估研究界的认可。

第三，极端天气气候事件影响大，理应被纳入到综合评估模式中。但目前，顶级的气候模式对于详尽模拟极端天气气候事件尚有难度，对发展还比较“稚嫩”的综合评估模式来说，困难尤甚。气候模式正在开始用随机技术，将小尺度的人类行动（低于目前已比较精确的模式格点精度）的影响考虑进模式。应该开发综合评估模式中刻画极端事件的这些技术。模式对次网络事件的不确定性的描述必须清楚透明，然而要达到这个要求，对任何一个综合评估模式研究者来说都是个挑战。

此外，如何改进综合评估模式

中普遍存在的大量的简化，是个棘手的难题。同时，效仿世界气候研究计划为推动气候模式的发展所组织的一系列模式比较计划，对气候变化综合评估模式开展类似的比较研究也是很有价值的。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

深入阅读

魏一鸣, 米志付, 张皓. 2013. 气候变化综合评估研究新进展. 系统工程理论与实践, 33(8): 1905-1915.

殷永元, 王桂新. 2004. 全球气候变化评估方法及其应用. 北京: 高等教育出版社.

张雪芹, 葛全胜. 1998. 气候变化综合评估模型. 地理科学进展, 18(1): 60-67.

The Royal Society. Modeling Earth's future. 2013. The Royal Society. <https://royalsociety.org/~media/policy/Publications/2013/modeling-earths-future/2013-10-01-modelling-future.pdf>

气候“门外汉”接任美国总统气候及能源政策高级顾问

■ 吴灿



迪斯在其位于白宫的办公室
（图片来源：The New York Times）

美国总统前气候变化及能源政策顾问波德斯塔，在气候领域拥有丰富从业经历，其离任后，谁将有资格接替他成为下一任顾问，一直是舆论讨论的焦点。今年2月，美国总统奥巴马公布了新的总统气候变化及能源政策顾问人选——前美国行政管理和预算办公室副主任布雷恩·迪斯（Brian Deese）。

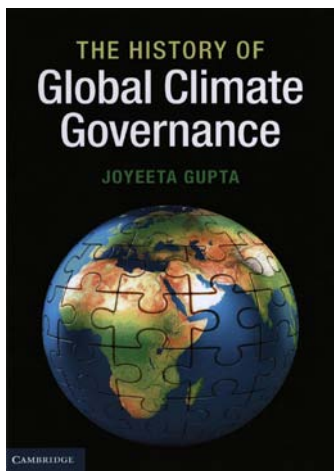
与波德斯塔“德高望重”的形象相比，迪斯不仅年轻（37岁），甚至此前都未从事过任何与气候、环境及能源相关的工作，也没有参与过国际谈判，可以说经济学出身的迪斯完完全全是气候能源领域的“门外汉”。对于这一“门外汉”的当选，着实出乎外界意料。作为总统的气候变化及能源政策顾问，其主要工作是推动奥巴马总统雄心勃勃的气候政策。气候政策的成功推进，必须争取煤炭行业的支持，因而选择怎样的人选代表总统向煤炭行业进行游说尤为关键。奥巴马选择迪斯这样一个毫无行业背景的后生担当此重任，可谓是相当大胆的举动。

最近，迪斯公布了奥巴马政府减排的核心内容：承诺到2025年在2005年的基础上减排温室气体26%~28%，这与前些时候中美的联合声明相一致。美国的这一承诺将通过严格减少汽车和燃煤电厂排放实施。虽然今后擅于利用统计数据，从经济学的角度分析和处理气候及能源问题的迪斯的路还很长，但是在年末巴黎气候峰会之前，“门外汉”上任不久助力美国政府在承诺减排上的大手笔出台，似乎给人带来更多的期待。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

并不遥远的全球气候治理过程

■ 王邦中



2014年剑桥大学出版社出版了阿姆斯特丹大学乔伊塔·古普塔教授的“*The History of Global Climate Governance*”（《全球气候治理的历史》）一书。之前在参加某次联合国气候变化框架公约会议时，曾读到过该教授的另外一本书。联想之前的想法，感到眼睛着实为之一亮，精神确实为之一振。于是趁2015年春节假期，将其逐行地通读下来。

全书分为四大部分。第一部分导论，先讲气候变化问题的实质，再讲应对气候变化减缓、适应措施以及地球工程。第二部分介绍气候谈判的历史，分阶段叙述全球气候治理特别是气候变化谈判的过程：第一阶段（1990年前）设置舞台，定义气候问题；第二阶段（1991—1996年）明确关键问题：气候变化框架公约；第三阶段（1997—2001年）挑战下的进展：京都议定书形成及其之后；第四阶段（2001—2007年）面临挑战的制度安排：领导力竞争的到来；第五阶段（2008—2012年）做大谈判的蛋糕。第三部分全球气候治理的若干问题，分别介绍国家、联盟及其



按学习曲线的说法，第一阶学习和第二阶学习业已完成，问题是我们是否准备好第三阶学习。

他参与方与谈判的挑战，气候变化诉讼和人权事项。第四部分未来展望，阐述气候变化治理：陡峭的学习曲线。为此，联合国气候变化框架公约秘书处首任执行秘书米歇尔·库塔亚评价到，乔伊塔·古普塔对四分之一世纪气候变化谈判所进行的分析式历史考察，对气候变化领域新人将提供入门的各方教育，对老手则将提供反思的最佳机会。前者，可以从她气候科学和可持续性分析基础收益，后者则可以从她宣讲国际法和人权中激起好奇心。

本书读下来有以下印象。

一是全。时间记载上是全覆盖，从治理层面上，以1979年第一次世界气候大会作为起点，一直到2012年多哈气候大会。空间分布上还是全覆盖，内容表述上，也是多方面的，有气候变化科学的争论与共识，有气候变化政治以及经济、社会的分析与判断，如诉讼和人权相关进展都包括在内。

二是新。提供了30多年多角度、多角色全球气候治理的信息。在相当程度上，方式非常新，每一阶段全球气候治理过程描述都基本给出主要事件表、治理结果、问题梳理和各方立场，同时最后给出每一阶段主要特征及可能发展趋势，如果是浅阅读，就可以抓两头，来确定每一阶段主要内容。新，还体现在最后一部分，从学习曲线理论层面上分析全球气候治理过程并展望未来，即非结构性问题需要学习，第一阶学习在于改进规程，第二阶学习在于聚焦直接驱动因子和

影响，第三阶学习在于聚焦基础驱动因子和影响。这样一来，全球气候治理，即可实现从特设到全面，并进一步从项目到双赢再到试点示范经集成达到主流形成的预期目标。如果对新进行再补充的话，还可以加上本书从全球领导者角度，同时也是分阶段地，对全球气候治理问题进行审视。

三是细。全球气候治理中各角色表现和作用，既从南北两大集团层面分析，也从两大集团内部联盟叙述。发达阵营分别讲美国、欧盟、东欧中央组、俄罗斯、日本，发展中阵营分别讲“七十七加中国”集团、非洲、小岛国联盟、最不发达国家、石油输出国、中国、印度。全球气候治理中“共同但有区别责任”原则，也有较为深入的汇总分析。

读书时，考虑到作者来自印度但多在荷兰进行研究，可以期待书中或许有东西方的融合，或许会对南北问题有侧重的表达，这需要思考和判断。如联合国气候变化框架公约秘书处执行秘书（2006—2010年）德波尔在为本书作序时评价，无论你是否同意乔伊塔·古普塔对气候治理历史的阐述，本书就是简洁而且令人信服地给出了国际谈判过程业已发生过程的全球概貌，以及未来可能的走向分析。按学习曲线的说法，第一阶学习和第二阶学习业已完成，问题是我们是否准备好第三阶学习。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

编辑选编

《大气科学进展》期刊创立30周年纪念专刊——Special Section to Commemorate the 30th Anniversary of AAS. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, Vol.32, No.1-2.

为纪念《大气科学进展》期刊创立30周年，大气科学进展组织了30周年纪念专刊。专刊分为两期出版，主题分别为全球大气科学研究前沿与中国大气科学研究进展。期刊邀请了在大气科学各个领域最著名的科学家执笔撰稿，内容涵盖了大气科学领域当前和新兴的热门话题。

其中Brian Hoskins重点回顾了有关位涡的理论，并讨论了位涡观点带给我们的一些启示。该文内容包括位涡的本质、位涡在大气对称稳定性中的调制作用、其反演流场和Rossby波的作用以及两者耦合产生斜压不稳定、位涡和中纬度天气系统，最后深刻讨论了热带动力活动。

郜永祺等从古气候、观测数据以及数值模拟等方面，系统回顾了中外关于海冰变化及其对欧亚气候影响的研究，内容包括：海冰的变化及其主控因素；近期卫星观测海冰急剧消融的可能原因及影响，历史和预估的未来海冰演变趋势及影响；北极海冰与北大西洋涛动、近期欧亚地区的变冷、冬季大气环流、东亚夏季降水、欧亚春季降雪、东亚冬季风以及中纬度极端天气事件的联系；北极海冰变化引起的气候遥响应等。

钱云等提出光学吸收性气溶胶，比如黑碳、有机碳、沙尘，通过多种途径影响大气和冰雪圈的水分和能量平衡。在大气中的吸收性气溶胶会通过吸收太阳辐射以及和云的相互作用从而改变大气状况，沉降到冰雪表面的吸收性气溶胶会使雪变脏，降低雪面对光的反射，可能加速冰雪的老化过程，从而进一步降低雪面的反照率，加速冰雪

融化。在IPCC第四次和第五次评估报告中，冰雪中吸收性气溶胶引起的辐射强迫被确定为影响气候变化中的一个主要因素之一。然而，要量化这个效应，不确定性仍然非常高。在这篇综述文章中，我们总结了测量冰雪中吸收性气溶胶的几种不同的技术和方法，回顾了在北极、青藏高原和其他中纬度地区测量冰雪中吸收性气溶胶的进展。也总结了在全球和区域尺度模拟冰雪中吸收性气溶胶的浓度，引起的反照率降低、辐射强迫和气候及水文效应的研究进展。最后，讨论并确立了在这一领域的优先研究需要和研究方向，以降低在评估冰雪中吸收性气溶胶对全球和区域气候及水循环的影响时的不确定性。

廖宏等提出对流层臭氧(O₃)和气溶胶是大气中的主要污染物。自工业革命前开始，这些污染物便通过辐射强迫对气候有着显著影响。由于中国经济的快速发展，大气污染物的浓度在中国地区相对较高，因此，量化中国大气污染物在区域气候变化中的作用尤为重要。这篇综述文章总结了目前关于中国空气污染物影响气候变化的认识，并在此基础上指出了减小污染物气候效应研究不确定性的关键科研需求。文章主要由以下几部分构成：1) 收集整理了中国区域观测的臭氧和气溶胶地表浓度的月、季节或年平均均值，旨在展示中国区域地表臭氧和气溶胶浓度的量级并为今后的模式结果评估提供数据集；2) 总结了地基和卫星观测的臭氧柱浓度、气溶胶光学特性以及模式估算的对流层臭氧和气溶胶的辐射强迫；3) 总结了区域和全球气候模式模拟的中国区域臭氧和(或)气溶胶导致的气候变化，包括温度和降水变化的符号和量级；4) 基于对研究现状的总结，指出了今后关于中国空气污染物气候效应研究需要关注的重点。

高守亭等回顾了过去10年来中国气象学家对暴雨系统中湿空气

动力学的理解的研究进展，及把水汽较真实地并入到动力学理论方面取得的进步，主要包括广义湿位涡(GMPV)和改进的湿非地转Q矢量(Q_{um})，也回顾了涡动力学的研究进展。用质点动力学的方法研究了空气质点垂直涡度的发展，即涡度倾斜发展理论。该理论指出了随着等熵面的倾斜，垂直涡度越容易发展，并提出了对流涡度矢量理论(CVV)。在锋面和波动动力学方面的研究进展也得到了总结，包括初始非平衡流的地转调整及边界层摩擦的日变化对锋生和锋面结构的影响，以及地形和锋的相互作用对锋生及锋结构的影响，指出了地形扰动可以改变锋生和锋的结构。在大气涡动力学方面，混合波涡动力学已经被拓展到去解释热带气旋中螺旋雨带的传播和动力不稳定的发展。暴雨系统中的波流相互作用研究也得到了回顾，主要是把原有大尺度波流相互作用的理论拓展到了中尺度暴雨系统，丰富了大气中尺度动力学理论。

气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化——《气象》2015年第41卷第3期

李维京等撰文指出，我国南方地区各季节降水异常主要包含三种优势模态：长江及其以南地区降水呈整体偏多或偏少的一致型，长江中下游流域与华南呈反相变化的南北反相型以及东南与西南呈反相变化的东西反相型。其中一致型是南方地区各季节降水变率的第一优势模态。总体而言，在1961—2013年南方地区平均降水存在明显的年代际和长期趋势变化。其中，夏季和冬季南方区域平均降水具有相似的年代际变化特征，而秋季降水的年代际演变几乎与上述两个季节的相反。不过，在近30年南方各季降水量发生年代际转折的时间不尽相同：春季和秋季降水分别在21世纪初期和20世纪80年代中后期之后

进入干位相, 冬季和夏季降水则分别在80年代中期和90年代初期之后进入湿位相。自21世纪初期以来, 南方夏季和冬季降水逐渐转入中性位相。此外, 南方春季和秋季降水均呈减少趋势; 而夏季和冬季则相反, 均呈增多趋势。对于西南地区, 除了春季外, 其他三个季节的降水均呈减少趋势, 出现了季节连旱的特征, 尤其是秋旱最为严重。不过, 不管是季节降水量还是旱/涝日数, 在我国南方大部分地区其线性变化趋势并不十分显著, 这与南方降水年代际分量对降水变率存在较大贡献相关。分析还发现, 我国南方区域洪涝受灾面积具有比较明显的年代际变化, 而干旱受灾面积则没有明显的年代际变化特征, 近十多年来西南地区干旱和洪涝受灾出现了交替互现的特点。

农业气象灾害风险评估研究进展与展望——《气象学报》2015年第73卷第1期

农业气象灾害风险研究既是灾害学和农业气象学领域中研究的热点, 又是当前政府相关管理部门和农业生产部门亟需的应用性较强的课题。为全面了解农业气象灾害风险评估的研究现状, 王春乙等在综合分析近30年来相关文献的基础上, 对农业气象灾害风险评估方面所取得的研究成果进行了总结和评述, 指出了当前研究的一些不足, 并对今后农业气象灾害风险评估研究的趋势进行了展望。首先对农业气象灾害风险评估研究的历史进行了回顾; 重点阐述了农业气象灾害风险评估的主要内容, 包括致灾因子的危险性评估, 承灾体脆弱或易损性评估, 灾情期望损失评估和灾害风险综合评估; 归纳出农业气象灾害风险评估研究中采用的3类主要方法——基于指标的综合评估方法、基于数据的概率评估方法以及基于情景模拟的评估方法; 最后对农业气象灾害风险评估目前存在的问题和未来可能的研究方向进行了探讨。

三种聚类分析方法在中国温度区划分中的应用研究——《气候与环境研究》2015年第20卷第1期

韩微等根据全国512个气象站1961—2010年的逐日气温观测资料, 采用日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日数作为划分我国温度分布的指标, 经过旋转经验正交函数分析方法处理, 将时间演变过程中变化相似的区域归为一类。在此基础上, 采用K-means法、分层聚类法、聚类统计检验法3种聚类分析方法进行客观分区, 分别将全国温度变化区划分为10个地区、9个地区、13个地区, 且不同区域分界线与中国地形分布有很好的一致性。综合三种方法, 我国的温度区可划分为: 青藏高原地区、西南地区、华南地区、长江中下游地区、黄淮地区、华北地区、东北地区、西北中东部地区、新疆地区。

大气灰霾追因——《科学通报》2015年第60卷第2期

当前我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重, 空气质量、大气能见度和人体健康均受到影响和威胁, 准确判定解析和定量确定 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源是有针对性地制定政策法规和控制措施的重要科学前提。张延君等简要总结目前3大主要颗粒物源解析方法——源清单法、扩散模型法和受体模型法的发展历程和应用特征; 以美国亚特兰大采集的 $\text{PM}_{2.5}$ 及化学成分为公共数据平台, 评述了目前几种主要 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析模型(受体模型和扩散模型)的方法特点以及适用性, 分析了不同源解析方法对机动车源、燃煤源、生物质燃烧源、道路尘以及二次源等多种源类的解析特点、结果差异以及可能原因, 总结了各种源解析方法在方法及应用上的优势和局限, 提出多种方法集成应用和发展混合模型是未来开展颗粒物源解析工作的方向。

马庆鑫等通过多种手段研究了在矿质颗粒物、黑碳颗粒物表面以及吸湿过程中的大气非均相反应过

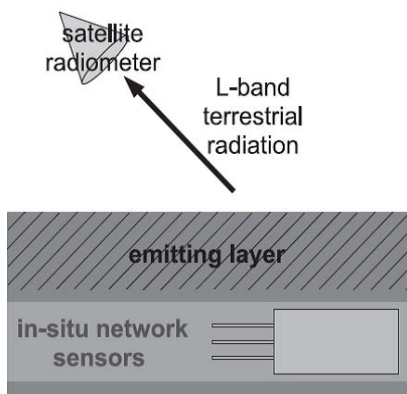
程。灰霾是由于高浓度大气颗粒物消光导致能见度下降的污染现象, 而颗粒物的消光性质与其参与的大气物理化学过程密切相关。因此, 认识颗粒物参与的大气非均相反应对于揭示灰霾成因具有重要意义。通过系统研究大气非均相过程对常见污染气体的源汇平衡、颗粒物二次组分形成、老化过程对颗粒物吸湿性的影响, 发现了多污染物共存气体在非均相反应中的复合效应, 揭示了 O_2 在界面反应中的关键作用, 阐明了有机碳在黑碳老化过程中的作用。在吸湿性研究中, 发现了混合颗粒物在吸湿过程中的化学反应, 揭示了弱酸置换强酸的反应机理, 解释了二次组分对矿质颗粒物吸湿性的促进机理。这些研究成果不仅促进了对大气非均相反应的深入认识, 也有助于揭示我国的灰霾成因。

气象信息化进程中云计算的意义——《信息化研究》2015年第1期

沈文海撰文指出, 在信息化进程中, 云计算造成的影响是深远的。首先, 它改变了人们对IT资源的认识和使用IT资源的方式, 对资源不求所有, 按需即用的新理念、新方法正在迅速普及。其次, 云计算改变了传统的技术架构, 原有僵化的烟囱式的IT架构可以变为灵活、可伸缩、可度量、按需供应的新架构, 人们只需能宽带上网, 便可获得数据中心所能提供的一切技术和系统服务。第三, 云计算颠覆了人们数十年形成的业务应用的使用方式: 既然资源可以按需即用、用毕即收, 那么业务工作也能类似地按需使用由气象云提供的业务功能, 而不必自己拥有需要呵护备至的业务系统。最后, 做为派生效应, 云计算将逐步缓解并最终消除人们心中信息化投入悖论的阴影, 在成熟的云环境下, 业务平台的自动伸缩和高度智慧给业务部门带来的不仅是便捷, 还有以低成本获得高效用的实际效果。

SMOS卫星及南叉河原位土壤水分观测网观测到的不同的雨后土壤变干速率——Different rates of soil drying after rainfall are observed by the SMOS satellite and the south fork in situ soil moisture network. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, Vol. 16, No. 2.

土壤水分影响潜热和感热通量的平衡，从而也影响了陆地——大气相互作用的空间变化。2009年升空的土壤湿度和海洋盐度（SMOS）卫星携带的遥感仪器能够在全球范围内监测近地表的土壤水分，欧洲中期天气预报中心和加拿大气象局的天气预报也正在使用SMOS的土壤湿度数据，虽然传统意义上，土壤湿度很难引起天气预报部门的重视。为验证SMOS数据，美国爱荷华州立大学的Rondinelli等利用位于爱荷华州南叉河流域的美国农业部土壤水分原位观测网络的土壤湿度数据，与其进行了对比。研究发现，SMOS观测到的显著降雨后土壤变干的速率要高于实地观测的土壤变干速率。这可能是由于SMOS观测的是土壤表面（就是几厘米厚的土壤层），而用于实地观测的土壤水分传感器被埋在土壤表面之下，其观测的土壤层次与SMOS存在差异（见下图）。总体上，SMOS观测的近地表土壤湿度平均要低于实地观测的土壤湿度。不过，SMOS和实地观测的土壤层次的差异，以及因此得到的不同土壤水分动态，并不能解释二者之间的偏差，尽管它可以解释一些均方根误差。另外



需注意的是，SMOS观测受到了更多的噪声影响。相比，NASA今年发射的SMAP土壤湿度观测卫星（P5）在许多方面都有所改善。

使用SMILES观测评估对流层冰云在气候模式中的昼夜循环——Evaluating the diurnal cycle of upper-tropospheric ice clouds in climate models using SMILES observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, Vol. 72, No. 3.

利用来自国际空间站（ISS）上超导亚毫米波临边辐射探测器（SMILES）对对流层上层的冰云观测数据（冰水路径，pIWP），美国加州理工学院喷气推进实验室的Jiang等研究了热带和中纬度地区（40°S—40°N）对流层冰云的昼夜循环，并定量评价了10个气候模式模拟的冰云昼夜变化。在陆地上，SMILES观测到的pIWP在局地时间18时有一个最大值，而不同模式模拟的pIWP峰值与其有一4~12个小时的差异。在海洋，观测显示了比陆地小很多的昼夜周期振幅，峰值出现在局地时间12时，而不同模式模拟得到的pIWP峰值出现在一天内的不同时段，差异较大。大多数模式显示海洋上的pIWP具有比陆地更小的昼夜周期振幅，这与观测一致。然而，总体上，模拟得到的陆地和海洋的冰云昼夜周期振幅比观测到的要高20%~300%。经验正交函数（EOF）分析发现，对于观测和模拟的陆地冰云而言，第一EOF模态能解释其昼夜变化的70%以上，且观测和模拟具有相似的时空格局。而在海洋上，对于观测而言，第一EOF模态仅能解释方差的26.4%，而大多数模式的第一EOF模态能解释70%以上。而且，在海洋上，模拟结果的前几个EOF模态的时空格局显示了与观测较大的分歧，这表明控制海洋冰云昼夜循环的物理机制更加复杂，不能很好由当前的气候模式模拟。

从Landsat地面反射率数据和6个FLUXNET站点的地基观测数据估算直射、漫射和总光合有效辐射吸收分量（FPAR）——Estimation of direct, diffuse, and total FPARs from Landsat surface reflectance data and ground-based estimates over six FLUXNET sites. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, Vol. 120, No. 1.

植被吸收的光合有效辐射（PAR）被称为光合有效辐射吸收分量（FPAR），是量化植被冠层吸收性光合有效辐射（APAR）和总、净初级生产力的基本气候变量。目前的基于卫星遥感的FPAR产品一般只考虑了植被对太阳入射光中直射部分的吸收效率。但太阳入射包括直射光和漫射，而叶片通常在漫射条件下的光合作用效率更高。如果只考虑直射，势必导致对FPAR的低估，进而影响对全球能量平衡的估算。直射和漫射的辐射传输，以及植被对它们的吸收过程并不相同，因此在FPAR估算时应区别估算植被对直射和漫射两部分的吸收效率。为此，中科院地理所的李文娟等开发了一种新的方法，可以根据Landsat地面反射率数据分别估算直射、漫射和总FPAR。首先，在6个FLUXNET站点（作物、落叶阔叶林和常绿针叶林），研究提出了地面观测直射和漫射FPAR的方法。然后，使用一个耦合的土壤—叶—冠层辐射传输模式（SLC）模拟了直射和漫射条件下的地表反射率。通过查找表的方法，比较Landsat-5 TM数据和模拟的地表反射率之间的关系，就可以估算直射、漫射和总FPAR。FLUXNET站点的观测结果显示，植被的漫射FPAR比直射FPAR高19.38%，总FPAR也比直射FPAR高16.07%。而从Landsat估算的地面分辨率为30m的直射、漫射和总FPAR值，与地面观测值相比误差小于10%。晴空条件下，直射APAR高于漫射APAR，但是总的APAR被低估

了。本研究的方法可以扩展到其他卫星数据上用于生成直射、漫射、总FPAR产品,获得的FPAR产品也可以用于多种估算植被生产力的模型上。

一种新的基于贝叶斯模型平均的降水降尺度方法:以中国为例——A new statistical precipitation downscaling method with Bayesian model averaging: a case study in China. *Climate Dynamics*, 2015, in press.

沈阳农业大学的张先亮等发展了一种新的统计降尺度方法——贝叶斯统计降尺度方法,并利用该方法对中国的具有连续观测记录(1961—2012年)的583个气象站点的月降水进行了降尺度。贝叶斯统计降尺度方法是基于贝叶斯模型平均方法。该统计降尺度方法的主要优点为:一是进行预测时,充分利用了先验气候统计信息,可以得到可靠的未来变化信息;二是根据大尺度预测因子在过去时段对预测量的贡献进行加权平均,降尺度的物理意义明确;三是对大区域范围进行具有同一规则下的统一处理。对583个气象站点的月降水的降尺度结果发现,新方法比常用的线性回归方法具有更好的降尺度效果。这种新的降尺度方法的出现对于大范围区域的统计降尺度以及改善统计降尺度的预测结果具有重要意义。

中国季风研究的最新进展——Recent advances in monsoon studies in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, Vol. 32, No. 2.

中科院大气物理所的薛峰等回顾了中国的季风研究近年来取得的重大进展,其进一步缩小了中国与国际气象界之间的差距。本综述主要由七个部分组成。第一部分是引言。第二部分讨论了基于近年来提出的一些新方法的全球季风系统及其季节变化有关的进展;此外,还论述了东亚季风(包括南海夏季风爆发)的一些主要季节内特点。第

三部分,讨论了ENSO和东亚季风的相互作用,特别关注了中国的气象学家的一些研究成果,其表明ENSO对东亚夏季风的影响明显不同于对热带季风的影响。第四部分讨论了对东亚季风也有重要影响的热带太平洋以及其他海洋盆地(如印度洋和大西洋)。第五部分,给出了陆面过程在东亚夏季风中的作用;如有研究表明,伴随着春季青藏高原更多的雪覆盖,长江流域的东亚夏季风有所减弱、夏季降水偏多。第六部分重点在于南半球大气环流对东亚夏季风的影响,来自南半球的信号有望为中国夏季降水的季节性预测提供新的线索。最后,在第七部分,关注了东亚夏季风的年代际变化,特别是,对那些发生在20世纪70年代末的显著的年代际变化的理解,将可能影响对东亚夏季风的预测能力。

利用Landsat和GLASS数据评价快速城市化下的地表反照率变化及其对辐射收支的影响——Assessing surface albedo change and its induced radiation budget under rapid urbanization with Landsat and GLASS data. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, in press.

土地利用变化(主要为反照率)辐射强迫效应是气候变化研究尚未解决的重要问题,尤其关于如何识别快速城市化过程中导致的下垫面变化与相应的辐射收支成为了研究者关注的热点。中国科学院遥感与数字地球研究所的胡永红等利用改进的辐射强迫提取方法,结合Landsat卫星数据量化了北京市2001和2009年城市反照率变化影响下的辐射收支状况,并利用北京气象站的辐射观测数据识别了城市局地的辐射强迫变化特征。研究发现,2001—2009年北京的城市化特征表现为年均城市扩展达到了3.3%,同时城市内部三维结构复杂度增加,导致了较低反照率,同时城市外围扩展区域的平坦下垫面增加了

城市反照率。这种变化导致了北京市中心区2009年比2001年多吸收了约 $6.93 \times 10^8 \text{W}$ 的太阳辐射,而在农田与城市边缘区吸收的较少。城市的水平与立体的结构特征影响着下垫面太阳辐射收支,沿着城市中心到郊区的样带可以发现辐射强迫值有明显的梯度变化趋势,其最大值达到了 0.41W/m^2 。总的来说,城市化对于下垫面改变的累积效应影响了城市的辐射收支特征,最终将影响局地气候变化。

2000—2012年戈壁沙漠的收缩——Contraction of the Gobi Desert, 2000–2012. *Remote Sensing*, 2015 Vol. 7, No. 2.

沙漠和半沙漠是全球环境的关键组成部分,通常被称为干旱地区,其覆盖了全球陆地表面的41%,世界上有20亿居民的家园位于干旱地区。作为高度动态化的生物群落区,沙漠的扩张和收缩受气候和人为因素的共同影响,干旱地区的荒漠化进程正在成为研究关注的热点之一。地处东亚的戈壁地区是世界上最主要的沙漠之一,然而至今没有准确的有关戈壁沙漠的确切边界及定义。利用高分辨率的MODIS数据和气象干旱指数,英国牛津大学的Sternberg等对戈壁沙漠的边界定义进行了改进,并发现在2000—2012年间,戈壁沙漠出现了萎缩之势。戈壁沙漠的这种面积波动主要受降水驱动,这与中国和蒙古大量的有关人类引起荒漠化的报道并不一致。研究也注意到定义戈壁(边界)的不精确性和20世纪80—90年代定义撒哈拉沙漠南部边界的争议存在惊人的相似之处。本研究在定义戈壁沙漠边界时,参考了植被指数、干旱指数和地形图,这种定义方法有助于理解该沙漠地区的“变绿”与“褐化”、人类活动和土地利用、生态生产力和正在改变的气候。21世纪初至今,戈壁沙漠的平均面积为230万 km^2 ,在面积上仅次于撒哈拉沙漠和阿拉伯沙漠。

《《 涓流细雨 》》

“Information on weather and climate, and its variability and change, is so embedded in our daily life – from daily weather forecasts to seasonal climate predictions – that at times it is easy to forget the amount of observations, research, computing and analysis that lies behind weather and climate information products. Today, the average weather forecast of five days in advance is as skillful as the two-day forecast twenty-five years ago and seasonal climate forecasts have become increasingly skillful. This has been made possible thanks to advances in remote sensing, including satellites, major improvements in science and dramatic increases in computer power. Scientific progress in meteorology and climatology in the last fifty years is indeed one of the most significant one in all scientific disciplines.”

“有关天气和气候、及其变率和变化的信息，从每日天气预报到季节性气候预测，早已植入我们的日常生活。有时，人们不免忘记了天气和气候信息产品背后大量的观测、研究、计算和分析。今天的五日平均天气预报终已同二十五年前的两日预报一样纯熟。季节性气候预报已变得日益娴熟。这要归功于包括卫星在内的遥感技术的发展、重大科学进步和计算机能力的大幅提升。过去五十年，气象和气候科学的进步在所有科学学科中确实可谓首屈一指。”

——在2015年世界气象日来临的时候，WMO主席M. Jarraud在致辞中，用上述文字描述了气象信息与日常生活、气象工作和成就。2015年世界气象日的主题是“气候知识支持气候行动”，这样的主题也让人联想和期待年末世界气候谈判收获好的结果。

“the plane would have been moving at close to 100 miles per hour, and that at that speed, when you start sliding, there’s really not much you can do. If there was a crosswind, that would have made the situation worse, because it could have caused the plane to turn like a weather vane into the wind.”

“飞机的速度应该接近每小时100英里，在那样的速度下滑行，实在没有什么办法。如果出现侧风的话会更糟，因为那会导致飞机像风中的风向标一样转向。”

——2015年3月5日当地时间11时，美国达美航空一架客机在纽约拉瓜迪亚机场降落时转向并瞬间冲出13号跑道。飞机降落时当地在下大雪，飞机机头冲破护栏，在落入海湾前一刻停住。机上127名乘客和5名机组人员中没有严重受伤者。飞机驾驶员在接受纽约时报采访谈到飞机落地情形时如是说。据悉7000英尺长的13号跑道是该机场2个跑道之一，部分跑道架设在钢柱之上延伸到海中，因此结冰速度极快，加上跑道尽头周围就是冻结的海湾，几乎容不得降落飞机出现半点差错。

“Growth in government demand will be stronger than in the commercial world,” said Villain. “Civilian government agencies in established and developing space countries [will] use small satellites for three purposes: operational missions — principally in Earth observation — in-flight technology validation and demonstration, and engineering education.”

“政府需求的增长将比商业需要还要快，已经和正在开发空间技术国家的民用政府部门将小卫星用于3个目的：以地球观测为主的业务项目、航空技术验证及演示和工程教育。”

——欧洲咨询公司（Euroconsult）在其最新发表的题为“小卫星市场展望”的报告中预测，从现在到2019年将有510颗小卫星升空，报告编辑者、公司的首席顾问Rachel Villain就未来小卫星发展的驱动来源做出上述表态。小卫星（small satellite）按照其质量范围（从1kg到500kg）可以分为纳米卫星（nanosat）、立方卫星（cubesat）、微卫星（microsat）和小型卫星（minisat）4种。

“The big data revolution could lead to currently unimagined uses for the data we receive from satellites. Entrepreneurs could come up with new applications and ideas for mashing up data. But the data itself should, I believe, be regarded as a public good. How to guarantee this, in a world where public budgets are squeezed and space exploration is becoming increasingly affordable for private players, is a question that deserves serious thought and active engagement.”

“大数据革命能够让我们当前的卫星数据得到意想不到的应用。企业家能够提出新应用和不断深加工数据的思想。但是，我认为数据本身属于公共财产。在目前公共预算到处紧缩，而私人可承担的空间探索不断增加的形势下，如何保证这一属性，是一个需要严肃思考和积极取得共识的问题。”

——达沃斯论坛（世界经济论坛）是具有全球影响的舆论前沿，2015年1月24日，美国NOAA局长沙利文在于1月21日同期开始的第45届达沃斯论坛的论坛博客上发表题为“天基大数据如何帮助地球上的生命”的博文，强调了天基气象资料对全球福祉的不可替代性，同时敏锐指出在私企深度参与背景下，如何保持天基数据的公共属性这一严峻的挑战。

“The successful completion of the CDR for this scientifically advanced instrument allows the program to move into the manufacturing, assembly, integration and testing phase with instrument completion expected in early 2017”

“针对这一科学上先进设备CDR的成功完成，使得我们进入到制造、组装、集成和试验阶段，预计在2017年初将全面完成仪器的制作”

——由贝尔航空公司 (Ball Aerospace) 和韩国航空研究所 (KARI) 共同开发研制的地球静止环境监测分光仪 (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer, GEMS) 近日完成了关键性设计审查 (Critical Design Review, CDR), 贝尔公司副总裁 Cary Ludtke发表了上述看法。据悉, GEMS在紫外和可见光波段监测穿越边界层的污染事件, 计划随韩国GEO Kompsat 2B卫星升空, 将成为世界上首颗位于地球静止轨道上的空气质量监测卫星。该卫星将提供朝鲜半岛以及亚太更广泛地球每小时的臭氧、臭氧前体物和气溶胶的观测, 有助于改进污染事件的早期预警和认识长期气候变化。

“Instead of continuing down the path of large government-owned satellites that are prone to cost overruns and delays, we must look outside the box for new methods of providing essential weather data. For example, there are private companies such as PlanetIQ, Spire, GeoOptics, Tempus Global Data and HySpecIQ that have plans to launch constellations of GPS Radio Occultation and Hyperspectral Sounding satellites, two sources of data that can greatly enhance our forecasting ability. Considering options that reduce the burden on massive government satellite systems will allow us to more accurately predict the weather.”

“与其继续走大型的政府拥有卫星却容易超出预算和延误的路子, 我们必须转变思路, 寻求提供关键天气数据的新方法。例如, PlanetIQ, Spire, GeoOptics, Tempus Global Data和HySpecIQ这样的私企已经计划发射GPS掩星族群和超谱探测卫星, 两个数据源能够极大强化我们的预报能力。考虑各种选择和减少政府卫星系统巨大负担将带来更加准确的天气预报。”

——2015年2月12日, 美国国会环境分委员会针对未来NOAA卫星资料覆盖的空白召开了“缩小差距: 美国天气卫星和天气预报 (Bridging the Gap: America's Weather Satellites and Weather Forecasting)”听证会, 环境分委员会主席Jim Bridenstine就弥补NOAA和NASA卫星发射档期存在的空白期, 在听证发言中发表了上述支持私企介入的看法。据悉, 2016财年NOAA卫星预算超过20亿美元, 占NOAA总预算的大约40%, 而在2008年这一比例仅为25%左右, 不到10亿美元。

“KIAPS (Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems) has been developing a new global NWP model(KIM, KIAPS Integrated Model) as well as an advanced data assimilation system since 2010. Science 2013, we have implemented and investigated Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) data assimilation system to a cubed sphere model of NCEP CAM-SE, while developing KIM. It would be very easy to replace the model by KIM when released because the grid structure between

CAM-SE and KIM is same.”

“自2010年以来, KIAPS (韩国大气预报系统所) 一直开发新的全球NWP模式 (KIM, KIAPS 综合模式)。2013年以来, 我们在开发KIM的同时, 还在探讨局地集合转化卡尔曼滤波 (LETKF) 数据同化系统应用于具有立方球格点的NCEP CAM-SE模式。因为CAM-SE和KIM的格点结构相同, 一旦 (LETKF) 开发完成, 再用KIM替代很容易。”

——2015年初美国气象学会年会上, 来自KIAPS的专家用上述话语介绍了可能是支撑韩国下一代天气预报模式框架的开发情况。虽然KIAPS开发产品与气象业务部门应用还有距离, 但其高度计划性的时间进程, 技术上本土开发为主、模式和同化系统并行、同时借助NCEP模式等外力的战略和做法已经显现。

“COSMIC-2 is Worth the Fight. COSMIC is the third-most-important data that goes into [the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts] forecasts. It's interesting that it's No. 3 even though its cost is a lot less than some of the other things. The more opportunities for the community to secure critical data, the better our options. If there was not \$100 million from Taiwan on the table to make this a very cost-effective investment for the U.S. taxpayer, then I think we would not be pushing COSMIC-2. That's really the game changer in this budgetary environment.”

“COSMIC-2值得一搏。COSMIC是欧洲中期天气预报中心预报产品的第三重要数据来源。这一点很有意思, 尽管位于第三, 但其费用要比其他一些来源要少很多。科学共同体获得关键数据的机会越多, 我们就会有更好的选择。如果没有来自台方1亿美元的公开投入使得该项目成为美国纳税人划算的投入, 我想我们也不会去推进COSMIC-2, 在目前预算环境下, 这一点改变了博弈取向。”

——UCAR主席Thomas Bogdan于2015年2月2日在走访《空间新闻》编辑部时发表上述评论。2012年担任UCAR主席之前的6年, Bogdan一直是NOAA空间天气预报中心的主任。他目前是UCAR主持的美国和中国台湾联合COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate, 气象、电离层和气候卫星探测系统) 项目的首席顾问。COSMIC项目是NCAR继HAO (High Altitude Observatory) 之后目前主要的天基项目。面对美国议员登针对COSMIC-2项目“有更好、但非关键”的质疑, Bogdan先生从技术和效益两个角度, 捍卫项目的继续。据悉, COSMIC-2项目总经费预算在2亿美元左右, 目前已经列入NOAA官方项目, 并获得2014—2015两个财年轻费支持, 美国气象界对2016财年项目继续获得经费支持也持乐观态度。

第80页评刊

来信截至 2015年3月15日

@ 何日有太白

看了贵刊2014年第6期《气象科技发展的若干回顾及启示》一文后，让我对大气科学的发展脉络有了更为清晰的认识，并且深受启发、感悟颇深。对于大气科学的发展方向，我也谈谈自己的看法。我认为大气科学如今已经发展到了很高的水平，在这个基础上再出现重大突破，可谓是千难万难，而且并不是由气象一个单独学科所能改变的，就像文章中所提到的，这需要多学科的相互促进与协作。所以，我认为大气科学如今的重点，是将现有的学术成果尽快地转化为服务用户、服务市场的成果。说到底，大气科学的存在很大一部分原因就是为辅助人们做生产决策的。在我国这样一个第三产业相对欠发达的国家，虽然拥有广阔无边的气象业务需求和市场，但气象产品的再开发和利用、多元化输出等方面与发达国家相比还存在很大的距离。主要体现在气象产品单一，缺乏需求调研，服务手段落后等，许多情况下，还泛泛地提供风湿湿等气象要素预报，对用户缺乏有效的调研，搞不清楚现在的用户需要什么，而总在一些细枝末节上自我纠结，最后，气象服务就成了无源之水、无本之木，发挥不了其应有的作用。最后总结一句，气象服务如果不能在服务上下大力气、花大功夫，不能让整个社会都感受到气象的指导功能，那么整个气象学存在的意义都会大打折扣。

评论 from

@许小峰xiaofeng: 已经在发生变化，越来越多的单位、企业和个人开始在气象服务上下功夫，会逐步完善的。

@中国气象频道: 非常同意! 成果产品化必将是又一次学科加速发展融合的过程。

@北京气候评估: 我们在努力改善! 服务需求逐步成为我们中心创新第一动力。

@vvhww: 参加美国气象学会年会发现，美国各级气象机构都称为weather service, service是核心，气象服务正在成为主流。应用气象领域也更应该受到关注和重视，而不是一贯地认为其缺乏科技含量。

@ 达达爱插画

地理学有三个大方向：自然地理，人文地理和地理信息系统。看了2015年第1期《建设地理信息大数据》这篇文章，对中国现在的地信方面有如下思考。

1) 对比国外和国内的地理信息系统，国外的地理信息系统比国内建设得更加完善。在一些西方发达国家，GIS广泛应用于环境保护、灾害预测、城市规划建设、资源保护、政府管理等众多领域。国内在此方面应用还太少，政府部门花费人力物力得到的基础数据，不对外公开，不利于GIS服务大众化。

2) 在地理信息采集这方面，应建立统一的标准。首先，国内各个地理信息数据的采集应制定统一的标准，或者相应数据转化的标准，使各个系统采集的数据在全国通用，这样才能更方便数据使用和更新。其次，现在全国正在建设或已投入使用的地理信息产业园共有6个，这些产业园一旦全部投入使用，与GIS有关的企业会大量入驻，对我国的GIS发展也会起到驱动作用。未来还需要国家对比参考国外信息采集的标准来制定一系列的法律法规，为未来我国GIS的发展指明方向。

对于文中所说的VGI而言，虽然说人人都是数据生产者，但是每个人的标准不一样，对于同一数据可能有不同的表述，个人感觉应该制定简约易懂的标准，即使不是专业人员也可以准确地搜集、表述数据，如果基础数据错误太多，纠错也是一个工作量极大的工程。对数据进行及时更新，对数据的来源日期要有详细记录，否则在数据应用时也会错误百出。

回复 (from 作者)

感谢读者针对《建设地理信息大数据的思考》的深入思考，读后颇有同感。

1) 政府部门汇集、处理和管理了海量地理信息数据，但由于保密等原因，目前难以向社会公众提供进一步的数据与应用服务。我相信，随着保密工作的进一步科学化，以及数据分层技术与标准的逐步推广，GIS深入公众生活会逐步成为现实。

2) 标准作为地理信息行业健康发展的重要保障，一方面要规范传统的地理信息行业内的数据采集工作，另一方面要及时推出针对新出现的基于互联网的VGI采集技术的规范建议，解决目前存在的采集标准不一或者无标准可依的问题。

@ 陶陶嘻嘻

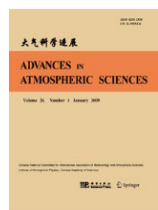
一直对贵刊有关城市气象的专题非常感兴趣，2014年第5期中的专题文章大多是从气候的角度阐述和城市气象相关的内容，因为主要从事公共气象服务工作，所以想谈谈城市气象服务的一些感受。通过近几年的《公众气象服务满意度评价报告》中的许多数据可以看出城市公众气象服务相较农村更具难度。大城市接收气象信息的渠道较多，公众对气象信息的准确性、及时性、可读性要求更高。而且大城市受“雾霾天气”困扰已无法忽视，公众也提出需要气象部门提高环境、健康等预报服务水平。此外对于大城市公众工作、生活的移动性较大，更加迫切的需要更加“精细化”或者说“定时定点”的预报。因此，建议气象部门和更多学者关注城市气象，优先改进公众最迫切的诉求。

回复 (from 编辑部)

的确，随着物质生活水平不断提高，国民对于与日常生活息息相关的天气预报要求也越来越高。这对气象科研、业务及服务人员提出了更高的要求，我们希望有更多关于科研—业务—服务相互转化的话题能够在本刊的平台上进行交流，给我们的从业人员更多启发。

《全球智库报告2014》 2015年1月

美国宾夕法尼亚大学与合作机构如期发表的2014年全球智库报告指出，全球共有6681家智库，其中中国429家。报告列出的环境领域全球排名靠前的65家智库中，世界资源研究所（WRI）、斯德哥尔摩环境所（SEI）和世界观察研究所位列前3位。按照智库所在国划分，前10个智库中美国有4家，德国3家，瑞典、英国和加拿大各1家。中国上榜的是排名第36位的中国环科院（CRAES）和排名第45位的香港思汇政策研究所（Civic Exchange）。位列17至19名的3家印度智库（科学环境中心、ATREE以及能源和资源研究所）是环境领域亚洲排名最靠前的智库。



《大气科学进展》 2015年1—2期

2015年是《大气科学进展》(Advances in Atmospheric Sciences)杂志创刊30周年，该刊也从2015年开始，从双月刊改为月刊。该刊今年1期和2期，推出纪念专辑，主题分别为“全球前沿大气科学研究评述”和“中国大气科学研究评述”，用7篇和6篇评述论文，扫描和强调了全球和中国大气科学研究的热点和创新点。纪念刊部分文章摘要，请参考本期“编辑选编”。

《气候政策》 2015年1期

本期推出“气候技术开发和转化政策”专辑，12篇文章包含社论、研究、综合及展望等栏目，对联合国气候变化框架公约签订的20多年来，技术开发和转化对气候变化政策的支撑作用等方面，进行了很好的梳理和评述，并对未来趋势进行了展望。



《哲学学报A》 2015年4月

本期为该刊出版350周年纪念刊之一，16篇评述文章专注于经典物理学方面，最早刊载于该刊的重要成果。一些耳熟能详的大家的创新工作，例如，牛顿力学、麦克斯韦电磁理论、雷诺湍流动力等悉数收入。阅读纪念刊的目录，气象学者就可以鲜活地感悟，科学发展史上气象科学对物理学的依赖和促进。该期所有文章均可免费获取。

媒体扫描

MEDIA SCAN



《中国科学：地球科学》 (英文版) 2015年3月

湖泊在决定局地 and 区域气候中起重要作用，本期封面报道介绍了中科院和云南省气象学者共同开展的，自2011年以来针对洱海的湖-气相互作用的观测研究成果。

《科学通报》 2015年2月

本期以“大数据研究与应用”为主题的专辑，在大数据背景下组织了主要针对多样性和理论基础方面的研究多篇论文。其中，中科院和国家海洋局作者针对对地观测、海洋预报与大数据关系的文章，具有很好的启发意义。



《风能展望》 2015年3月

美国能源部最新发表的这份报告，全面评述了美国风能新时期的到来。目前美国电能的4.5%以上来自风能，这份报告量化了未来风能的高速发展对经济、环境和社会带来的益处，指出实现这样的远景业内要采取的行动。

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

Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Wang Huijun
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Fei Jianfang
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Lü Shihua
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Peng, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Chen Zhongmei

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China
Tel: +86-10-68409927/68409933
Email: amst@cma.gov.cn
<http://library.cma.gov.cn/amst>
<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by
Beijing Baochang Color Printing Limited Corporation

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
RMB 30.00

Main Contents

- 1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief
Article
- 6 Zhang Peng, Yang Lei, Gu Songyan, Hu Xiuqing,
Wu Xiaojing, Wu Ronghua, Bi Yanmeng, Liu Cheng/
Meteorological Requirements for the Early-Morning-
Orbit Satellite
- 13 Zhang Guangjun, Cai Ming, Hu Aixue/ Simulation of the
Impact of Energy Consumption on Global Climate
- 18 Lei Xiaotu, Yu Hui/ The Progress of WMO Typhoon
Landfall Forecast Demonstration Project
- 24 Zhao Junhu, Yang Jie, Gong Zhiqiang, Feng Guolin/
Analysis of and Discussion about Dynamic-Statistical Climate
Prediction for Summer Rainfall of 2013 in China
- 29 Li Liangfu, Qin Binquan, Yang Lei, Mi Xiang, Liu
Qingsong/ Research on Cable Lightning Protection
Technology of Cable Supported Bridge
- 35 Zou, Xiaolei, Weng, Fuzhong, Tian, Xiaoxu/ An Effective
Mitigation of Radio Frequency Interference over Land by
Adding a New C-Band on AMSR2
- 42 Bao Hongjun, Wang Lili, Liang Li/ Optimization
and Improvement of Water Logging & Water Logged
Risk Meteorological Forecast and Warning Operational
Technology of China
- 48 Wang Lili, Chen Dehui/ Verification of Precipitation
Prediction by Feedback Model Between Land Surface and
Atmosphere Based on GRAPES in Flood Forecasting
- 53 Liu Yonghe, Zhang wanchang/ A DEM Based Drainage
Networks Extraction Module Seamlessly Integrated in a
Distributed Hydrological Model
- 59 Cai Ming, Zhang Dalin, Xu Qin/ From Orographic Rossby
Waves to Non-Hydrostatic Mesoscale Dynamics: A Tribute to
Professor Xiaoping Zhou

Forum

- 63 Liu Jun, Ju Yongmao, Yan Hong/ Analysis of the Question
about City Rainstorm Waterlogging in the context of Climate
Change

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 66 Li Jinghua/ Analysis of Influence of Ethnic Chinese
Authors of the World Top Journals in 2014 in the Field of
Atmospheric Sciences
- 68 Li Jinghua, Wu Can/ A Bibliometric Analysis of Polar
Orbiting Satellite

Reading

- 70 Dai Yang/ Integrated Assessment Models of Climate
Change Research: Much still Remains to be Done
- 73 Wang Bangzhong/ The History of Global Climate
Governance