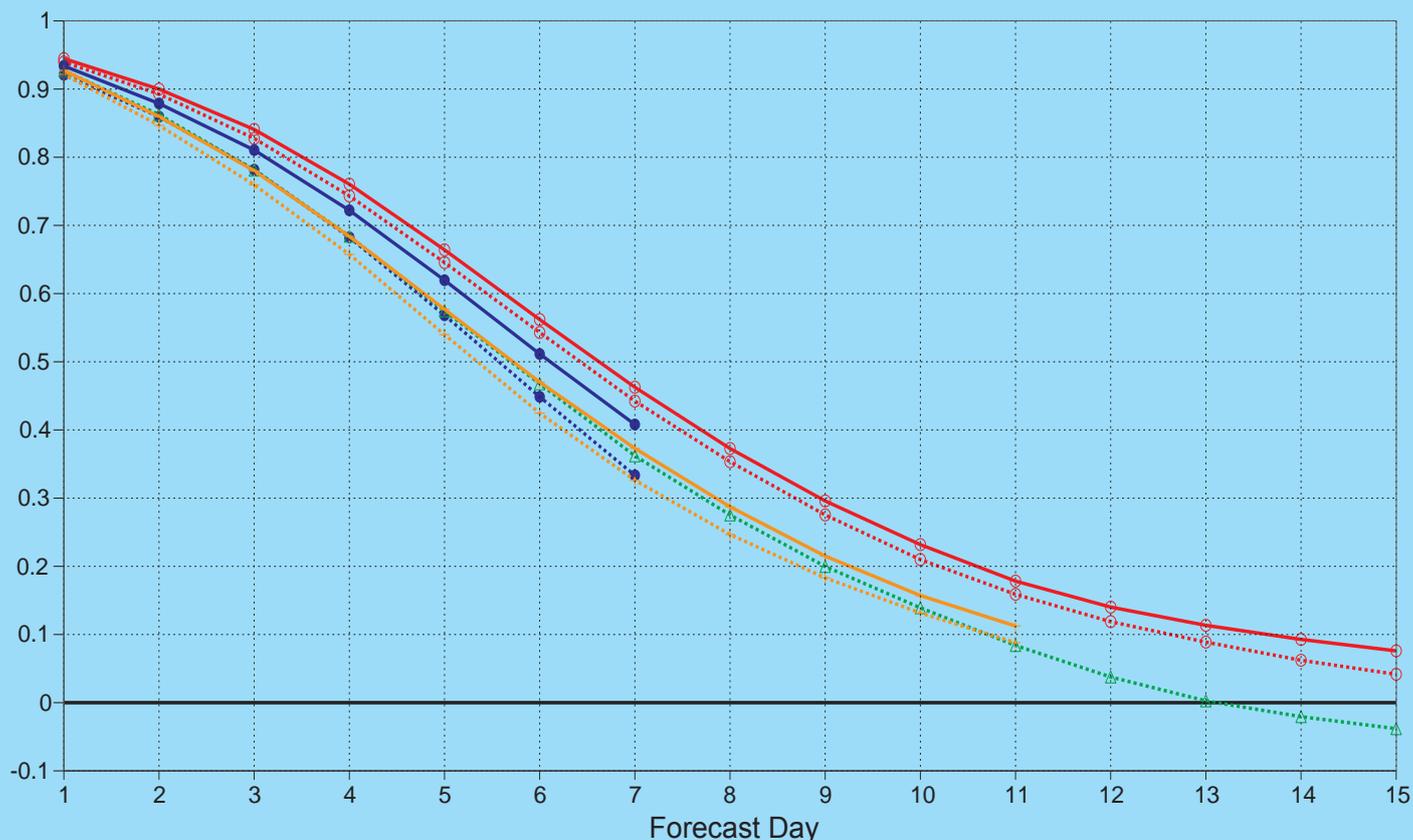


业务数值天气预报

500hPa geopotential
Continuous ranked probability skill score
NHem Extratropics (lat 20.0 to 90.0, lon -180.0 to 180.0)

- MAM2017 CMC
- MAM2017 JMA
- MAM2017 NCEP
- MAM2017 UKMO
- MAM2017 ECMWF
- MAM2018 CMC
- MAM2018 JMA
- MAM2018 NCEP
- MAM2018 UKMO
- MAM2018 ECMWF



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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

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

常务编委 (按音序排名)

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

编委 (按音序排名)

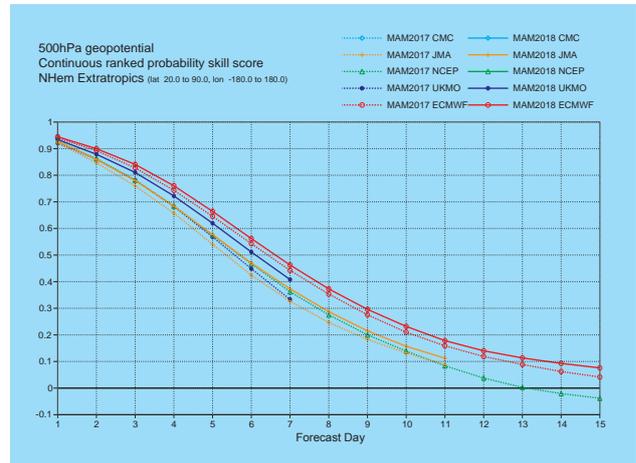
毕宝贵 陈镜明 陈云峰 陈振林 崔春光
崔讲学 董文杰 杜钧 封国林 何金海
何清 胡欣 胡跃文 姜彤 金飞飞
雷小途 李集明 李俊 李良福 李耀辉
李跃清 李忠 梁旭东 刘晶 刘黎平
刘立 刘征宇 卢乃锰 陆日宇
罗兵 罗亚丽 马舒庆 马耀明 彭莹辉
浦一芬 宋燕 索渺清 汤绪 田红海
万齐林 王斌 王斌(海外) 王东海 王元
王建林 王式功 王延青 王迎春 王元广
王自发 卫晓莉 温敏 吴富萍 杨立松
谢志辉 闫冠华 延晓冬 杨武全 张大林
杨昭明 姚学祥 伊兰 翟武全 赵广忠
张广俊 张立祥 张小玲 张跃堂 朱定真
周定文 周建华 周凌晔 周显信 邹晓蕾
朱小祥 朱玉洁 祝燕德 邹立尧

编辑部

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民
崔晓军
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
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://cmalibrary.cn/amst
投稿系统: http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx
官方微博: http://weibo.com/2115232930/profile
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 侯美亭

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9卷 第1期 2019年2月20日

1 许小峰: 主编语

研究论文

气象发展前沿报告

- 8 李婧华, 田晓阳, 贾朋群: 国外气象业务中心核心预报能力的比较和发展
- 16 于森, 窦晶晶, 苗世光, 楚艳丽, 孙丹: 城市气象研究国际前沿动态综述

研究进展

- 23 杨澄, 付志嘉: 复杂地形条件下WRF模式的适用性: 以滇西地区降水模拟为例
- 30 王后茂, 王咏梅, 王维和, 张卓: FY-3星紫外臭氧总量探测仪(TOU)监测大气臭氧及吸收性气溶胶
- 37 赵磊, 商建, 冯小虎, 张志清: 风云四号静止轨道气象卫星成像仪典型观测区域设计
- 41 张序: 昆明长水机场气候特征分析

专题 基层气象现代化

- 46 郭青, 曾东好, 高国靖, 刘导, 曾惠娟: 梅州雷电危险性分布特征分析

主编语

掌握气象科技前沿动态信息是推动气象发展的重要工作环节,2018年,各相关气象科研、业务单位经认真调研后报送了31篇涉及气象科技发展前沿的研究报告。本期气象科技前沿动态专栏从经专家评审列为优秀的报告中选用了关于气象中心核心预报能力对比和进步(P8)以及城市气象发展(P16)方面的评述类文章。两方面的主题都与气象现代化核心能力建设及领域拓展密切相关。我们还将在本专栏中陆续刊载相关文章,期待读者关注,及时了解世界气象前沿信息。

复杂地形条件会对天气气候产生较大影响,同时也是天气预报的难点之一。本期文章(P23)以地处青藏高原东南缘、地形尤为复杂的滇西地区为例,使用WRF模式和GSI同化系统对该地区的一次天气过程进行模拟试验,探讨了WRF模式在复杂地形条件下的适用性。在局地尺度上,地形的影响同样不容忽视。云南省昆明市长水机场多发的大雾与局地小地形的影响密切相关(P41);广东省梅州市雷电危险性“南至北递减”的空间分布特征(P46),也是受到了当地地形差异的控制性影响。

灰霾、沙尘等气溶胶污染事件频发是近些年来我国面临的主要环境问题之一。FY-3卫星上搭载的紫外臭氧总量探测仪(TOU)是我国首台自主研发的用于全球臭氧总量监测的仪器,TOU紫外探测数据也已被成功用于吸收性气溶胶指数的反演,为吸收性气溶胶污染事件的监测,以及沙尘、灰霾等的预报提供了及时可靠的数据支持(P30)。风云四号气象卫星是我国新一代静止轨道气象卫星,在世界气象卫星观测网中

占有重要地位,其灵活多样的观测区域设计方案(P37),能够充分发挥静止轨道卫星高时间分辨率的优势。

本刊开始设立的新栏目——“年度评述”,旨在梳理和评价上一年度发生的某类天气活动或重要科学进展。2018年是我国龙卷多发年,为此邀请了佛山市龙卷风研究中心对2018年我国龙卷活动特征进行了评述(P50),作为发表在该栏目的第一篇文章。同时编辑部采访了龙卷中心主任炎利军,就我国龙卷发生态势及龙卷预警试验未来发展等问题进行了交流。

借2018年西南联大成立80年之际,本期往事钩沉栏目刊登的2篇文章(P60、P67),分别就西南联大和北京大学在气象教育和研究方面的贡献,用事件、人物和论文等进行了很好的梳理和总结,一些感悟昭示着厚重历史和气象文化传承的力量和作用。西南联大在特殊战争年代存在不到10年期间所取得的成就,为我们留下了教育、学术和精神层面上的重要遗产。《百篇早年气象文献的梳理和回忆:螺旋式发展》(P67)一文介绍了从1935年到1979年的115篇气象科技文章,从一个侧面反映了中国在这一时期气象科技进展的历程和重要成就。

本期内容编辑期间,惊闻著名气象学家骆继宾先生去世。本期摘编了骆继宾1990年撰写的回忆周总理关心和支持气象事业的文章(P73),从中可以了解到共和国发展进程中一些重要气象事件的处理细节,同时也以此作为对骆继宾先生的缅怀和纪念。

许小峰

年度评述

- 50 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 李兆明: 2018年中国龙卷活动特征
- 56 张萌: 我国龙卷预警试验的前沿阵地——访佛山市龙卷风研究中心炎利军主任

往事钩沉

人物 / 事件

- 60 解明恩, 索渺清, 叶梦姝: 西南联大的气象教育与人才培养
- 67 陶祖钰: 百篇早年气象文献的梳理和回忆: 螺旋式发展

科学观察

- 2 贾朋群: 回望2018
- 6 许小峰: 2018年美国地球物理学会(AGU)秋季年会评述



P3

阅读

- 73 骆继宾: 幸福的回忆 巨大的鼓舞——回忆敬爱的周总理

信息

- 45 张萌: 《气象学报》推出“第三次青藏高原大气科学试验”专刊
- 74 高被引论文选编
- 76 编辑选编
- 78 涓流细语
- 79 2018年《气象科技进展》总目录
- 封3 媒体扫描



封3

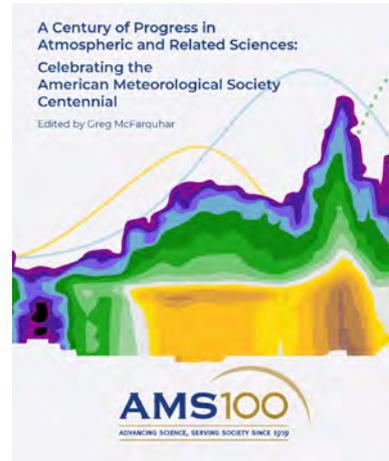
回望2018——七大脉络彰显气象科学持续发展的动力

刚刚过去的2018年，全球气象界在看似波澜不惊形势下，实际上在酝酿一些根本的改变。2018年正值第一次世界大战结束百年，这一时刻让很多学者反思那场战争因对气象信息的需求带来的对整个学科的推动，尤其是回顾自一战期间英国学者理查孙尝试手工数值天气预报之后100年来气象科学的进步，更是百感交集和对未来有了更多期待。本文从AMS百年文集试图对同样时段的梳理开始，以偏概全凝炼出2018年气象发展的脉络，与读者一起在回顾中更准确地前瞻和憧憬学科的发展。

本刊

脉络1 AMS百年文集：秀出世纪成就 剑指来日风流

历史并不算悠久的美国气象学会（AMS），即将迎来成立100年。如果说，二战前后当战争促进气象大发展时，美国还是参与者，那么罗斯贝等众多欧洲裔学者战后移民美利坚，芝加哥学派替代更加经典的挪威学派成为大气科学发展的新引擎，并在1950年成就NWP最先在美国获得成功，美国气象界无疑从20世纪下半叶开始已经走在了世界的前列。借美国气象学会走过百年，这本文集的推出，从2018年下半年开始、并在2019年持续进行。文集计划用27章梳理气象科学的百年进步，从已经在网上发表的10章左右内容和近20章信息的题目看，这本文集既有对学科经典领域的再划分（例如，应用气象学科按照基本应用、应对人口增长和其他应用被划分成3个分学科；大气化学则按照气态和非气态进行划分），又有对可能成为新的分支学科领域的探索（例如，将强对流风暴的科学和业务捆绑在一起的主题评述）。这些创新性的思想，无疑是对过去发展的凝练，并会对未来气象和大气科学的发展具有重要的启发性意义。



AMS百年文集版眼

脉络2 你方唱罢我登场，气象卫星“专门星座”时代开启

随着世界气象卫星强国在2017年及之前，大多完成了新一代气象业务卫星的发射和业务化，气象业务卫星换代告一段落。2018年，是全球针对重要地球系统变量专门卫星或星座发射竞争开始进入白热化的一年，这或许开启了气象卫星的“专门星座”的新时代。

ESA“探索地球”专门卫星系列引领潮流。8月22日，欧空局（ESA）研发20年的Aeolus（风神）卫星终于顺利升空。星上被称为“阿拉丁”的多普勒紫外激光雷达（ALADIN），实现了监测、绘制全球风速风向等风况。风神卫星改变了之前卫星只能通过追踪云层、气溶胶（烟、尘、雾、霾），或者通过测量海洋表面变化，间接获得风况的状况，可以说是填补了一项空白。更加难得的是，风神卫星是ESA“探索地球”系列中的第5项，它与之前的地球引力和地磁（Swarm卫星，3颗）、土壤湿度与海水盐分（SMOS，2颗）和冰冻圈等4种卫星或星座，共同构成对地球重要变量的星座探测。



风神卫星

欧美日多机构跟上。2018年9月和10月，美国和日本分别发射了监测地球冰变化的ICESat-2卫星和“呼吸2号”温室气体观测卫星。美国NASA的Parker太阳探测器和欧洲空间局的太阳卫星，都将进入瞄准太阳的轨道，目标是解开“日冕为何温度如此之高”和“太阳风的动力来自何处”这两个长期困扰学者的谜团。

小卫星推波助澜。2018年，美国著名的SpaceX公司完成了“SSO-A：小卫星快车”发射任务，将64颗小卫星送入地球轨道。而美国“火箭实验室”公司为了战略性应对小卫星发射市场，研制了小型运载火箭“电子”号，2018年12月成功将13颗立方体卫星送入轨道。在大型卫星面临制造和发射成本过高、研发时间周期长等风险时，2018年，重量在10~100 kg的微小卫星在遥感、通信两大领域快速发展，并有未来部分或全部替代大型卫星的趋势。作为对这一趋势的呼应，美国气象部门2018年停止了著名的合作项目COSMIC二期，选择继续从3家公司购买主要通过小卫星获得的无线电掩星大气探测数据。

数字

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

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

脉络3 新一代导航卫星和“伪卫星”平台带来天基观测新变数

2018年12月23日,美国空军成功将首颗新一代全球定位系统卫星GPS III发射升空。较上一代卫星, GPS III具有更强大的信号系统,其提供的一种新的民用信号,可以与其他导航卫星兼容,这意味着数据精度的提升。因此,借助导航卫星的无线电掩星大气探测技术和依据GPS准确定位的探空仪等,未来性能的进一步提升成为可能。

另外,主要由企业创新主导的天基观测“伪卫星”技术,例如,空中客车公司于2018年8月5日试飞的“西风神”HAPS(太阳能高空伪卫星)太阳能无人机,创下在空中停留超过25天的记录。这次飞行的高度达到7万英尺,超越了其他飞机和大部分云层。另一家企业——美国世界观察公司,则在2018年试验通过高海拔热气球形成“同温层卫星”平台。这类热气球可以到达16~30 km的高度,占据了飞机和卫星之间的最佳地球探测位置。目前,热气球飞行的最长时间为5天,未来将延长到数周。无疑,当这些技术成熟时,作为一个“动态”的“伪”卫星或下一代亚轨道星体,在地球观测中更多的作为非常可期。

国际“业务数值预报”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation	Molteni, F	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(529)	877
2	The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics	Kobayashi, Shinya	Monthly Weather Review, 1998, 126(6)	662
3	The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation	Cote, J	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(608)	609
4	A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere	Davies, T	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(560)	552
5	Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System	Buizza, R	Monthly Weather Review, 1992, 120(2)	458
6	A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations	Ritter, B	Monthly Weather Review, 2011, 139(12)	402
7	Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities	Baldauf, Michael	Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(7)	375
7	Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases	Chahine, Moustafa T.	Monthly Weather Review, 1996, 124(6)	375
9	A system simulation approach to ensemble prediction	Houtekamer, P L	Monthly Weather Review, 2004, 132(2)	364
10	An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC	Benjamin, S G	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(557)	356

来源: SCI-E数据库

检索时间: 2019年1月22日

田晓阳 提供



GPS III 卫星



左: 空客公司 Zephyr HAPS 无人机; 右: 搭载在热气球上的“同温层卫星”平台



3/8倍

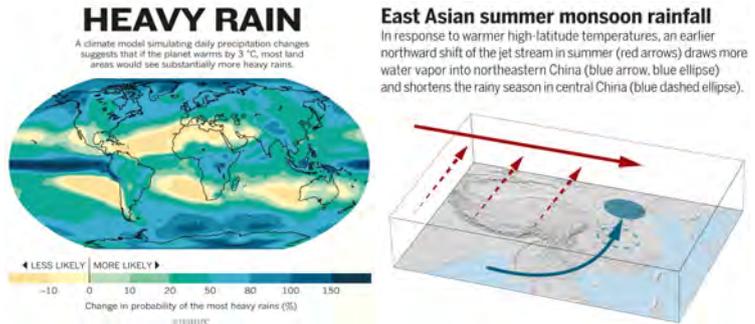
2018年末成功升空的美国新一代GPS首颗卫星,其定位精度是当前系统的3倍,而抗干扰能力更是目前系统的8倍,卫星的研发机构为洛克希德-马丁公司。

第1

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

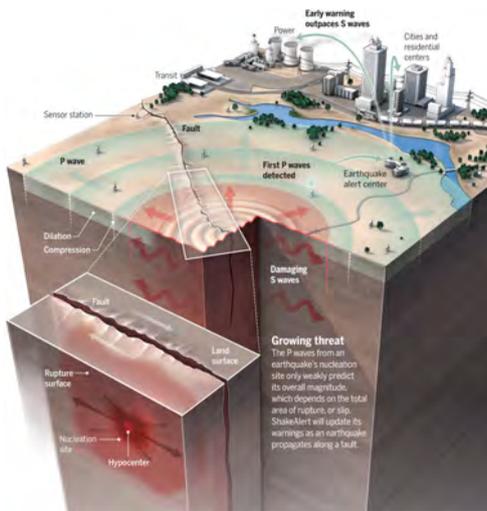
脉络4：气候变化怎样改变天气预报？

气候变化改变全球天气，在2018年成为更被关注的主题，最新的模拟研究表明，在升温背景下，全球风暴将更湿和更不稳定。2015年发表的一篇预测强暴雨趋势增加的成果，也在最近被验证。影响中国天气的主要系统，例如，东亚夏季风降水，在高纬度地球温度更高的背景下，带来夏季降水的急流北抬偏早，或许将给东北地区带来更多降水并缩短中部地区的雨季。



左：未来全球强暴雨增加趋势分布；右：东亚夏季风降水机制调整

脉络5 地震火山预警与预报合一，或许提供激烈天气预报新思路



地震早期预警系统

2018年10月，美国第一个地震早期预警系统ShakeAlert投入运行。系统利用地震中传播更快的压力波（P）与造成损害更大、但传播速度更慢的横波（S）的时间差，用P分析S的危害和地点，并通过电子预警以与时间赛跑的方式预警。这样的“无预报”手段的预警之所以成立，完全因为当今网络化的社会信息体系才可行。

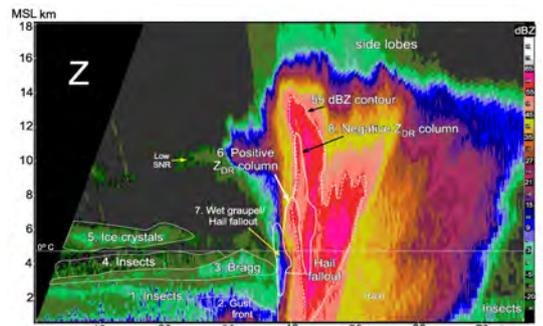
无独有偶，意大利佛罗伦萨大学的地质学家，2018年研发了世界上第一个自动化的火山预报系统，并提前1小时预测了埃特纳火山将要喷发。系统通过追踪次声波判断喷发是否将要发生，并成功向意大利政府发出预警。而在今年AGU会议上，美国、英国等学者利用人工智能手段，成果地快速处理卫星数据。正是这种处理的新算法，“意外”地自动捕捉到了火山爆发前的地面运动，从而建立了预测火山喷发系统的雏形。如果进一步试验成功，这一借助AI和卫星大数据的预测技术，将使世界上大约8亿居民受益，他们居住在全球海面以上大约1400座可能爆发的火山周边。

以往地震、火山等难以驾驭的灾害的预警，有了新的预报预警途径，即完全由数据驱动的预报方法和借助社会信息网络预警，也提示气象学者：龙卷、爬线等中小尺度强对流系统，是天气灾害中导致人员伤亡的重要事件，但其生命期显然要长于地震，而预测难度在某种意义上不会超过火山喷发。地球科学中与预测相关的研究，不仅具有学科意义，更有深厚的应用需求，相互借鉴或许能启发学者开辟新思路。

脉络6：揭示细节：双偏振雷达和遥感更强能力的展示

NCAR学者展示了S-波段双偏振多普勒雷达（S-Pol）最先进的风暴探测能力。与一般业务雷达需要快速扫描有所不同，主要用于研究的S-Pol扫描速度更慢，但能获得很多研究所需的更高分辨率和质量更好的数据：对流系统的S-Pol雷达图中，可以区分出8个不同区域并给出识别标志。

另一个例子中，学者利用全球水文地貌河流数据库，计算得到全球在年平均流量时的河流和水体面积为（773000 ± 79000 km²），占地球非冰川陆地面积的0.58% ± 0.06%，这一更详尽的数据以及对河流水体的解析，较之前的估计增加了44 ± 15%。这种通过积累得到的细节分析，以及对总体更好的概括，是遥感相关学科未来收获的一个代表，而这样的细节揭示，其意义无疑跨越学科，推进科学的整体进步。



双偏振雷达图像中可以区分出天气系统中更多的区域

数字

1.2 万亿千瓦时

初步统计表明，至2018年底，我国大陆已建5万千瓦及以上水电站约640座，全国水电总装机容量约3.5亿千瓦，年发电量约1.2万亿千瓦时，双

且继续稳居世界第一。

3.4%

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

脉络7: 想象力和细节: 更多介入创新与决策

2018年在气象天基观测领域, 想象力刺激着学界。全球气象界都非常关注的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的学术会议, 2018年用户年会的主题为“ECMWF模式输出应用: 唯一的限制是你的想象力”。这样的主题也在提示全球气象界和应用气象涉及的领域, 预报手段的更新以及模拟技术的发展, 实际上在AI和大数据时代里, 孕育了更多以前无法想象的拓展。这一点, 在前述的地震和火山预警内容中已经有了揭示, 而在气象科学的主要领域, 这样的痕迹也是到处可见的。

在这次会议上, 针对气象服务的经典领域, ECMWF提出要把预报模式的输出想象成现实生活天气条件的VR(虚拟现实), 从这个视角出发, 支持更多的决策就有了灵感。各种更加丰富的信息图表, 实际上能够对预报员给出强力的信息支撑, 一些以前难度很大的瞬间决策, 或许能够更多和更好地实现。基于此, 本次会议聚焦于“处理模式输出”和“影响预报”两个主题, 前者围绕支持预报员决定什么时候发布天气预警, 确定模式输出可视化的策略; 后者则针对水资源、能源、农业、防火和健康等主要应用领域, 开发更多和更深入、好用的影响预报产品。会议的内容显示, 这些活动中, 深入学习和大数据再利用等信息手段不可或缺, 而ECMWF对其产品从“可用”到“好用”再到“更酷地利用”, 想象的翅膀和帮助用户建立信心是最好的手段。

想象力需要细节分析的支撑, 同时其应用的领域也包括了气象相关的决策过程。美国NOAA在未来天基气象观测平台发展中, 针对其星座到底是由65颗传统卫星组成, 还是采用混合了包含86颗卫星的星座, NOAA通过对每个卫星性能的细致分析, 制作了两条技术路线的成本-性能改进图。在这张图上, 适当的决策点将带来的是: 同样的投入, 星座性能的提升被“3D风”“实时图像”“近太空大气观测”等要素所覆盖。这种在细节分析的基础上, 利用想象力给出支持决策的路线图, 是未来气象基础设施改进战略中更好的决策视角和手段。

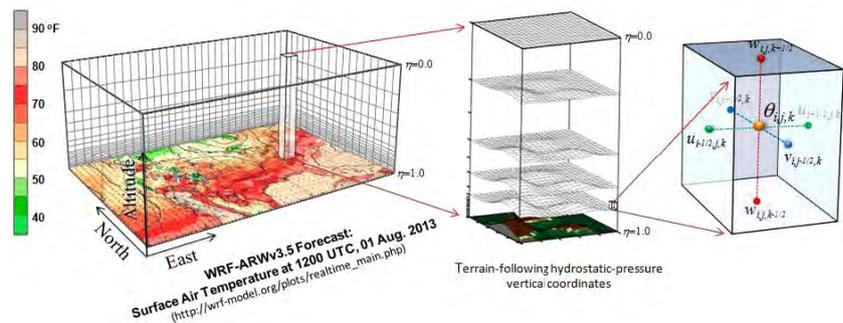
中国“业务数值预报”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	我国热带气旋研究十年进展	陈联寿	大气科学, 2001/05	613
2	数值天气预报业务模式现状与展望	陈德辉	气象学报, 2004/10	200
3	热带气旋研究和业务预报技术的发展	陈联寿	应用气象学报, 2006/12	178
4	新一代数值预报系统GRAPES研究进展	陈德辉	应用气象学报, 2006/12	154
5	国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用	李泽椿	应用气象学报, 2002/02	152
6	强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战	郑永光	气象, 2010/07	147
7	集合数值预报发展与研究进展	陈静	应用气象学报, 2002/08	146
8	GRAPES新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究	陈德辉	科学通报, 2008/10	133
9	我国台风预报业务的现状及思考	许映龙	气象, 2010/07	131
10	关于提高天气预报准确率的几个问题	矫梅燕	气象, 2007/11	74

来源: CNKI数据库

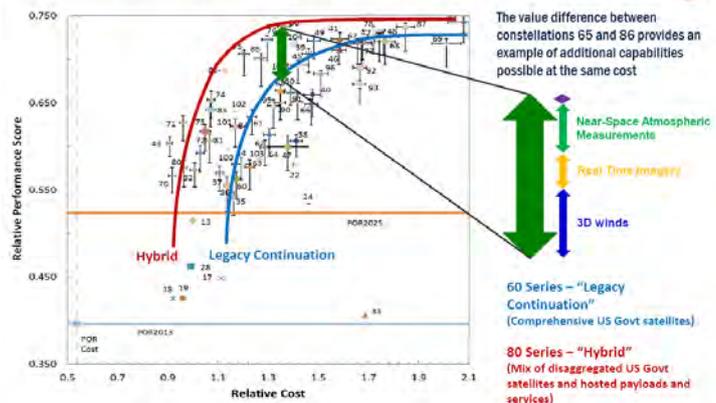
检索时间: 2019年1月22日

田晓阳提供



数值天气模式预报结果以大数据方式将物理量的计算值转化为天气VR

Evidence-Based Decision Making Tool



16%

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

第12位

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

2018年美国地球物理学会 (AGU) 秋季年会评述

■ 许小峰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.001

2018年美国地球物理学会 (AGU) 秋季年会因恰逢美国气象学会成立100周年, 也称为AGU100, 于2018年12月9—14日在美国华盛顿召开, 来自世界各地的近3万人与会, 围绕大气、海洋、冰川、生态、环境、水文、地质、地理、太空、数据、探测、智能、科研、创新、服务、教育、出版、管理等诸多领域进行了交流与探讨。

AGU100内容丰富、涉及面广, 很难完整把握会议内容, 本文仅就对目前气象部门业务科研关联度较密切的内容做一简要评述。

一、数据获取与分析

从国际视角看, 对数据的重视程度一直较高, 特别是近年来随着大数据技术的发展, 地球系统的综合数据问题也更加受到关注, 成为一个相对独立发展的领域。

在这一领域的发展特点主要集中在两个方面, 一是获取数据的手段呈多样性的发展趋势, 除了我们比较熟悉的常规观测, 如地面、探空、卫星和雷达等, 在涉及气候系统各圈层相互作用的信息获取方面明显加强, 如通量、边界层、高层大气、辐射变化、生态变量等方面的观测, 同时各种非常规的探测也呈现明显发展, 社会公众信息收集、微波通信信息间接转化数据等。例如, 美国纽约市城市学院的学者介绍了国际卫星云气候项目 (ISCCP) 的对流系统跟踪 (CT) 数据库发展情况。该数据库建设首先根据卫星获取的各类云特征信息进行归纳分析, 构造云分类数据, 然后对每个云系统跟踪, 构成完整的对流云演变过程数据, 目前已可以做到全球覆盖、10 km分辨率、从1983到2015年连续的对流云数据集。

二是在数据分析处理方面的发展, 主要在数据同化、再分析资料、质量控制、智能处理、观测系统仿真试验等领域, 有相当多的交流和介绍。如通过对2006年发射的云雷达卫星 (Cloudsat) 信息处理分析可以获取全球降水频率和强度的整体信息; 通过对云和气溶胶粒子等大气成分进行地面和现场对比观测, 对校准和验证卫星的相关测量至关重要; 而较为普遍应用的观测系统仿真试验 (OSSE), 可以在观测系



统建设前就给出逼真观测试验模拟, 有助于对新建观测系统的理解和降低投资风险。

NOAA和ECMWF等多位专家介绍了欧洲中心发展的用于OSSE的大气状况的分辨率为9 km的14个月长期预报模式 (Nature Run) 的运行情况, 经过实际对比, 认为这一模式体现了其先进、完整和准确性。这一模式可以通过网络获取到, 条件是在研究成果中要注明模式来源。

以上介绍反映了数据分析的重要性, 除了在预报过程中 (同化、资料的后处理 (再分析) 外, 提前对可能获取资料的判识分析也是很有价值的, 有助于对观测业务发展的科学性、时效性进行预先分析和判断。

二、气象小卫星星座计划

随着航天科技的发展与进步, 从20世纪末以来, 微小卫星的发射与应用越来越受到重视, 已从最早的以通信应用为主扩散到遥感、气象、海洋、测绘、空间等多个领域。微小卫星具有成本低、研发发射周期短、星座组网等优势, 目前已从研发设计阶段逐步向科研和业务应用推进, 涉及地球系统多个领域, 在AGU100会上有不少国家的专家做了相关介绍, 总体上认为发展小卫星对地球系统的探测具有独特的科学价值。

如美国密歇根大学的学者介绍了美国航天局2016年成功发射的由8颗卫星构成的CYGNSS星座信号的分析应用情况, 通过对地表GPS散射信号的分析, 获取地表状况、水汽通量、风场等信息, 并应用到台风等灾害性天气的分析预报中。

美国NASA介绍了计划中发射的通过红外光谱测风的小卫星星座机载测试试验结果, 其目标是能提供空间3~4 km分辨率的三维风场探测, 也包括水汽、云、污染和气溶胶信息。

美国海军研究实验室的专家介绍了一个被称为“彩虹”激光雷达小卫星星座的发展计划, 通过主动遥感获取地表高度、矢量风场、海冰、云水特征等信息。

* 收稿日期: 2019年1月30日

中国香港和中国科学院的专家还介绍了利用美国小卫星提供的每天覆盖全球地表信息监测青藏高原地表融化和生态退化状况的分析结果,体现了小卫星监测高时空分辨率的优势。

三、GPM测雨卫星资料的应用分析

无论是监测还是预报,包括数值模式发展,对流天气过程都是重要的难点之一,也是天气、气候研究中最大不确定性因素之一。随着探测技术和分析水平的提高,在这一领域也呈现出新的进展。雷达探测技术的发展及相关的模拟分析技术的进步起到了重要作用,包括地面天气雷达和卫星雷达技术的进展,特别是雷达卫星和卫星微波探测的发展,将对云的内部结构探测从区域拓展到全球。对全球云系变化特征进行的分析,既可针对天气过程,也能提高对全球气候问题的认识。

在本次会议上,有不少学者介绍了美国和日本联合发射的全球降雨测量GPM星座核心卫星测雨雷达星的应用情况。GPM核心星是一颗双频雷达卫星(Ku和Ka波段降水雷达DPR),并携带微波成像仪,于2014年发射,与相关微波卫星构成一个测雨星座,可以每3小时提供一次全球大部分地区的观测资料,利用这些信息可以及时绘制全球三维雨雪合成图像,并能将这些信息供数值模式使用。美国NASA的代表专门介绍了通过GPM资料演示全球三维雨雪信息合成图像,包括对台风结构的细致描绘。

日本气象厅的专家介绍了他们发展的中尺度数值模式四维变分同化系统,其中包含有云微物理过程方案,该系统的重要特点之一是可以同化GPM卫星的三维雷达观测信息,有助于分析较大范围的强对流天气。

四、智能方法

基于地球科学问题的非线性、复杂性和不确定性等特征,智能科学方法有可能在其中一些领域发挥出独特作用。特别是随着地球科学中的数据量呈指数级增长,先进的信息和人工智能技术为地球科学研究的深化开辟了新的途径,基于知识的推理有望进一步加速发展,自适应传感、机器学习、深度学习、知识绘图和其他方法越来越多地进入实用阶段。

美国阿拉巴马大学等部门的代表介绍了通过知识图发现地球科学信息的方法。如何及时发现与研究人员领域相关的数据和出版物面临重大挑战,因此,专注于数据挖掘和预测分类的认知计算工作对于促进科学发现具有特殊价值,其中的重要方法是利用知识图(Knowledge Graph),通过建立语义实体识别(SER)模型和一个关联模型,最终实现及时获取相关领域科技进展信息的目的。

在台风预报业务中对台风强度的判断具有一定不确定性,由于缺少实测信息,只能根据卫星、雷达的相关信息推断。美国国家飓风中心估计,在仅用卫星数据直接分析的情况下,其分析强度估计约有10%~20%的不确定性。来自美国NASA等部门的专家介绍了一个基于深度学习算法的热带气旋强度估算系统,通过对数万张卫星图像台风案例进行学习,对台风定强的确定性有显著提升。

五、生态气象与气候变化

AGU关注的是地球科学的整体发展,生态问题则与地球系统各圈层的相互作用密切相关,在诸多领域的讨论交流中都涉及,与气象密切相关的领域集中在气候变化问题上。既包括气候变化对生态系统的影响,也包括生态系统对气候变化的作用。其中涉及干旱、农业、林业、温室气体、气候模式、气候监测、碳循环、水资源、灾害防御和可持续发展等诸多问题,特别是气候系统各圈层相互影响、相互作用,属于AGU上涉及面最广的内容之一。

在地球生态系统研究中,全球通量网FLUXNET的信息得到了广泛使用,不少专家介绍了通过使用这些通量资料所做的工作。如来自香港的学者通过检索FLUXNET 2015数据库156个站点的逐日资料,研究分析了地球表层的能量平衡闭合(EBC)状况,并进一步分析了生物和气象变量与平衡的关系,分析不同地表、植被、气候带在不同条件下可能发生的变化。美国亚利桑那大学的学者则利用FLUXNET对全球碳排放变化状况进行了分析,认为若不能很好地执行《巴黎协定》,未来全球陆地碳吸收能力将会显著下降。

六、著名科技企业的参与

会上,除与地球科学相关的企业外,一些著名IT公司也有很活跃的参与度,包括他们自己的产品展示和相关科学家利用他们的成果所做的工作介绍。

谷歌公司在会议的展厅里占据了最显赫位置(图1),展示内容覆盖地理信息、数据分析等领域产品。在学术交流中也能看到一些专家介绍谷歌产品的应用情况。美国华盛顿大学的研究人员就介绍了利用谷歌趋势资料(Google Trends Data)分析美国花粉过敏的病情分布,对一些选定城市的信息分析表明,当空气传播的花粉浓度很高时,谷歌搜索“花粉”一词的数量会很大,可以利用这些数据建立美国大陆地区花粉对健康产生影响的时空分辨率。而利用Google Earth Engine(GEE)信息分析处理相关地球系统演变的交流论文就更多了。

IBM公司发展的量子计算机技术在世界范围引起

(下转36页)

国外气象业务中心核心预报能力的比较和发展

李婧华 田晓阳 贾朋群

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 基于文献和世界气象组织(WMO)世界气象中心以及部分国家气象中心网站的信息,梳理了世界主要气象业务中心的全球天气预报模式预报指标,分析了当前领先气象业务中心的预报水平,并对反映其核心预报能力的天气和气候预报技巧指标进行了比较。在对过去10多年来预报技巧进步趋势分析的基础上,对领先气象业务中心在2025和2035年可能达到的预报指标进行了推测。尽管未来各主要气象业务中心预报系统的提升速率将明显放缓,但是可预报时效将会大大提高:到2025和2035年,500 hPa位势高度的预报时效将分别提高至8.5和10.5 d,高分辨率模式的预报时效将分别提升至7.6和8.4 d,而多种模式要素预报的有效性将全面接近并可能进入10 d。天气型转变预测和MJO预测是反映气候预测的两个核心指标。针对Niño 3.4海温距平的未来3和6个月预测,相关性未来分别可能达到93%和86%(2025年)以及96%和90%(2035年),而气候模式对MJO的预报时效在2025年将可能达到49 d。新预报量的设计和业务化、下一代数值预报模式以及资料同化技术的研发等,将成为数值天气预报领域发展的新趋势。

关键词: 气象业务中心, 预报能力, 量化分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.002

Key Forecasting Skill Scores of Leading Operational Centres: Comparison and Outlook

Li Jinghua, Tian Xiaoyang, Jia Pengqun

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 10081)

Abstract: This paper compares global weather forecast models of leading operations centres with their forecast skills based on reviews of literature and websites of World Meteorological Centers named by WMO. The skill scores currently applied in assessing core forecasting capabilities of leading operational centres are discussed. The skill scores of 2025 and 2035 are projected based on the progress-curves of forecast skill evolution over the past 10 years or more. Although the advance of forecast skill would obviously slow down, the improvement of skillful forecasts will be evident. Forecast lead of 500 hpa geopotential height would be 8.5 and 10.5 days by 2025 and 2035, respectively. The corresponding values would be 7.6 and 8.4 days for high resolution models and both 10 days for multi-model meteorological element forecasts. Prediction skills of Niño 3.4 SST anomaly for the next 3 months and the next 6 months are likely to reach 93% and 86% in 2025, and 96% and 90% in 2035. The MJO forecast lead might be 49 days in 2025. New predictors, next generation numerical models and improved data assimilation are key players in further advancing forecast skills.

Keywords: operational centres, forecast skill, quantitative analysis

0 引言

世界气象组织(WMO)为了促进气象科学的发展,将天气和气候预报更加广泛地应用于世界各国,尤其是发展中国家,从而提升全球人民福祉,近年来特别加

强和突出了对世界气象中心的建设。在1967年认定了美国、俄罗斯和澳大利亚等3个世界气象中心之后,2017年,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、英国、加拿大、日本和中国成为第二批被认定的世界气象中心。世界气象中心在推进数值天气预报(NWP)业务化进程中,发挥着越来越重要的作用^[1]。并且,在全球化背景下,气象业务中心的职责还需在世界气象发展中发挥“中心”的作用和价值^[2]。

WMO作为联合国旗下各国气象部门的协调机构,一直关注作为现代天气预报能力核心工具的各国业务数值天气预报模式能力的提升。在2011年第16次WMO大会上,通过了在基本系统委员会(CBS)建立一个

收稿日期:2018年8月25日;修回日期:2018年12月10日
第一作者:李婧华(1987—), Email: lijinghua@cma.gov.cn
通信作者:贾朋群(1961—), Email: jiapq@cma.gov.cn
资助信息:中国气象局2018年局校合作项目“气象科技前沿动态研究”;中国气象局科技与气候变化司委托研究项目“核心技术领域的发展动态和国别研究”

评估确定性NWP预报的验证中心（WMO LC-DNV）的决议，ECMWF被指定为该中心的责任机构，实时和分阶段针对各国NWP模式指标给出汇总和评价。

如何预测以上述气象中心为代表的气象预报能力的发展，具有很大的挑战性。尤其是，当预报水平更加接近可预报性的极限，预报能力的递增速度在最近10年已出现减缓的迹象。在这样的背景下，对预报预测能力进行评估和预测，不确定性会大幅度增加。

本文所指的“主要气象业务中心”，包含了截至2018年7月，在LC-DNV网页上针对各国业务预报模式能力进行实时验证的约10个国家气象业务中心。目前，进入实时验证结果监测的国家气象业务中心的数量还在增加。本文借助近年来针对主要气象业务中心模式预报能力的对比分析结果，用核心预报指标梳理了这些中心预报能力的进步，并在此基础上结合“领先水平”的发展痕迹，特别是过去10年里预报预测水平提升的幅度，在给出当前水平（2016—2017年）的同时，对未来10年（2025年）和20年（2035年）国际

上预报预测的先进水平将可能达到的高度进行讨论。

1 模式的可预报性

经典天气预报理论中，洛伦茨基于大气混沌的本质，认为天气的可预报性为16.8 d。随着模式模拟技术的发展、学界对非线性过程认识的进步以及计算、模拟技术改进带来的手段更新等，可预报性问题得到了更加清晰的解析和拓展。在2014年WMO世界天气公开科学会议上，多位学者从动力、数值方法、云及辐射和陆-气、海-陆等相互作用的角度，梳理了科学界对可预报性的最新认识进展^[3]。Buizza等^[4]重新综合审视可预报性时，从模式与预报对象的时空尺度出发，给出了新的可预报性2D分布（图1）。可预报性时效大大提高，其中可提前接近1年预报的要素为月平均海面温度距平和厄尔尼诺等与气候信号密切相关的变量统计值。其余预报要素从易到难的排列为：月平均2 m温度和气压、遥相关指数、高空场、地面场、降水和极端天气。这些要素的可预报性空间尺度范围从1万千米的大陆尺度到100千米及以下的中小尺度。

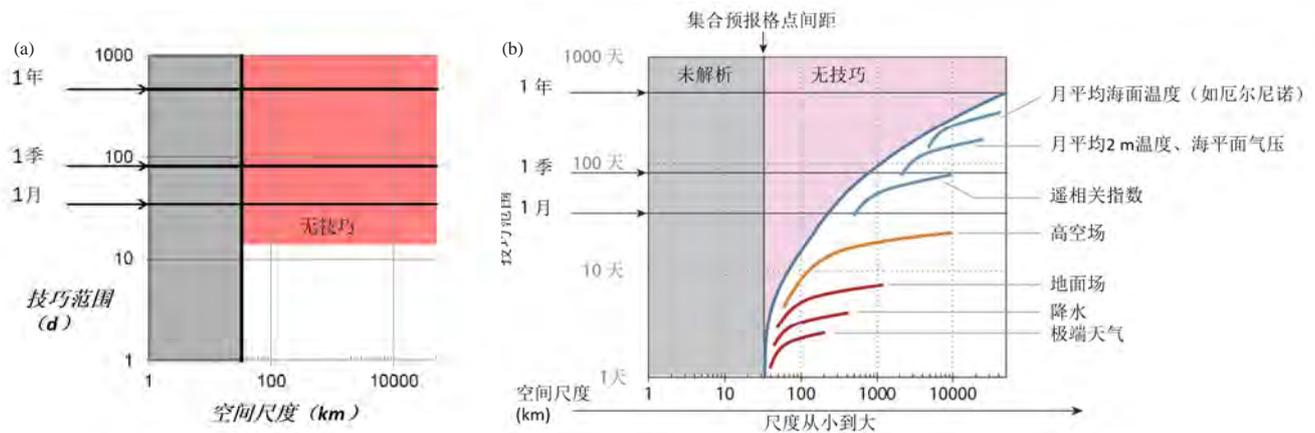


图1 洛伦茨经典可预报理论 (a) 和最新研究给出的可预报性2D分布 (b)

Fig. 1 Classical predictability theory by Lorenz (a) and 2D distribution of most recent predictability (b)

从更广泛的视野审视与预报相关的时空和地球圈层之间的联系，可以得到针对大气、陆地和海洋的可预报性分布。短期天气（7 d以内）和月预报之间时间尺度的预报预测，含有复杂的大气-陆地-海洋相互作用机制，而季节内到季节（S2S）预报中更多的信号来自海洋。

2 NWP全球业务模式核心指标

2.1 目前主要气象中心的全球天气预报业务模式

全球模式是气象业务中心开展确定性预报的核心工具，基于以往研究^[5-13]，表1梳理了目前部分气象中心业务数值预报模式的情况。当前全球数值天气预报模式主要基于初始时间概率分布函数估计模型，通过

集合系统对天气演变进行预报。先进的全球集合预报系统大约有20~50个成员，模式水平分辨率在9~50 km，垂直层数为100层左右。北半球500 hPa高度场最初集合离散度约2.5 m（大约是变率的3%），在预报最初24 h内以指数增长，10 d内发散到70 m左右。

预报系统性能领先的ECMWF，其模式水平分辨率达9 km，垂直层数为137层，预报时效在10~15 d。2017年，ECMWF将其综合预报系统（IFS）升级为IFS Cycle 43r3：改进了对流模拟，采用了新的辐射方案和气溶胶气候学，并且更好地利用了下投式探空仪数据和其他观测数据。

未来5~10年，随着各国气象部门业务主模式的

表1 部分气象中心全球业务模式
Table 1 Overviews of some operational NWP systems

机构	模式	水平分辨率	垂直层数 (模式顶)	集合 成员数	预报范围 (d)	初始状态	预报频次 (UTC)	方程*	时间 积分*	分类*	来源
欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)	IFS-HRES	T1279 (9 km)	L137 (0.01 hPa)		0~10		00, 12				
	IFS-ENS	T639 (18 km)	L91	51	0~15			H	SISL	PBTI	ECMWF ^[5]
美国国家环境预报中心 (NCEP)	GFS	T1534 (13 km)	L64 (0.27 hPa)								
	GEFS	T254 (55 km)	L42	20	0~8			H	SISL	PBTI	NCEP ^[6]
英国气象局 (UK Met Office)	UM	10 km	L70 (80 km)		0~6	混合增量 4D-Var和 MOGREPS集合	00, 06, 12, 18				
	MOGREPS-G	20 km	L70 (80 km)	控制成员 &17个扰 动成员	0~7	全球分析和44 个ETKF成员扰 动等	00, 06, 12, 18	NH	SISL	PBTI	UKMO ^[7]
日本气象厅 (JMA)	GSM	TL959 (20 km)	L100 (0.01 hPa)		3.5/11	4D-Var	00, 06, 12, 18				
	GEPS	TL479	L100 (0.01 hPa)	27	0~11	全球分析和集合 扰动	00, 12	H	SISL	PBTI	JMA ^[8] Ushiyama et al. ^[9]
法国气象局 (Meteo- France)	ARPEGE	7.5~37 km	L105 (70 km)			4D-Var	00, 06, 12, 18				
	PEARP	10~60 km	L65	35	0~4.5			H	SISL	PBTI	CNRM ^[10] Bouyssel ^[11]
德国气象局 (DWD)	ICON	13 km	L90 (75 km)		0~7.5		00, 12	NH	HEVI	EBTI	DWD ^[12]
加拿大气象局 (CMC)	GEM	Uniform 600×300 (33 km at 49°lat.)	L80 (0.1 hPa)					NH	SISL	PBTI	CMC ^[13]

*H表示流体静力模式，NH表示非流体静力模式；SISL表示半隐式半拉格朗日法，HEVI表示水平显式垂直隐式格式；PBTI表示路径时间积分，EBTI表示欧拉时间积分。

更新换代以及高性能计算机的发展，全球NWP业务模式分辨率将达到千米尺度。其中ECMWF的战略目标是，到2025年以5 km的分辨率进行全球集合预报。

反映各国NWP预报系统性能的指标，几乎与系统可输出变量一样多，但其中最关键的两项指标，是ECMWF认定的最能反映预报系统整体性能的500 hPa位势高度和850 hPa温度的可预报时效。本节主要围绕这两项指标及其他类似指标（如降水预报）展开。

2.2 ECMWF 为代表的全球领先模式核心指标现状

ECMWF给出的截至2017年底各种核心业务指标统计^[14]中，影响最大的预报产品——北半球中纬度24 h降水集合预报的进步明显，从21世纪初的2.5 d增加到7 d左右。尽管如此，对比21世纪前10年和最近10年的预报进步幅度，可以发现预报的改进速度明显“减缓”（图2），且在更多变量和时次预报中也是如此，但变缓的进步仍使10 d左右的预报具有价值。

从全球主要气象中心的预报指标演变和相互比较中看出，21世纪以来ECMWF的发展趋势也代表了世界预报业务整体上的进步。从图3中多个气象中心指标进步速度的比较^[15]可以看出，21世纪以来，第二个10年与第一个10年相比，各主要气象业务中心的预报系统性能提升速率都明显放缓。此外，在这张比较图中加入了再分析数据。这是因为模式的表现不仅依赖于预报系统，还与大气的可预报性和活跃程度等有关。再分析数据的加入，可以将某个时段内的实际业务预报系统表现与几年内不变的参考系统进行比较，



图2 ECMWF北半球中纬度24 h降水总量集合预报有效天数变化（2002—2017年）（图中给出预报时效（CRPSS≥0.1）的12个月滑动平均值）

Fig. 2 Ensemble forecast skill of predicting 24-hour precipitation totals in the northern hemisphere extratropics from 2002 to 2017. The computation of skill is based on the continuous ranked probability skill score (CRPSS). The chart shows 12-month running average values of the forecast range at which the CRPSS drops below 0.1

从而更加清晰地解读出预报系统的相对进步。

3 全球NWP模式2025和2035年性能进步预测

对世界上主要气象业务中心在未来10年甚至更长时间内预报水平提升幅度的估计，有多种方法和渠道。首先，各国气象部门在其战略中，定性或定量提出未来核心指标的改进目标，例如ECMWF制定的2016—2025年战略，在预报方面明确提出了“2+4+1”战略，即到2025年高影响天气的有效集合预报提前2周，大尺度形势和机制转化预报提前4周，

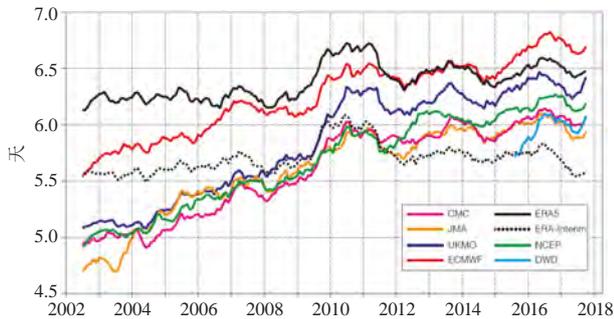


图3 世界上6个主要气象中心2002—2017年业务系统北半球中纬度500 hPa位势高度预报有效(距平相关 $\geq 80\%$)预报的天数变化,图中还给出2个再分析结果用于参考
Fig. 3 Lead time of anomaly correlation for 500 hPa geopotential in the northern hemisphere extratropics at global forecasting centres from 2002 to 2017. ERA-Interim and ERA5 are also shown for reference

全球尺度异常预测提前1年^[16]。NOAA天气气候预报机构NCEP提出,未来5年部分预报系统升级的主要特征为:水平分辨率进入10 km,区域模式和预警服务进入1~3 km,集合成员数稳定在20~30个,最长预报时段超过1年,达到15个月^[17]。此外,在最新发表的一些评述文章中^[4,18],基于过去模式性能改进的技术和科学推动以及未来新技术在获取新资料和改进模式分辨率等方面发力的分析,给出了未来预报模式改进的乐观估计,以及面临的挑战(图4)。

3.1 基于全球预报过去20年的改进:2025和2035年预报时效将分别提高到8.5和10.5 d

图5分别给出过去22和18年ECMWF与NCEP全球预报系统的预报时效的改进进程^[4,19]。ECMWF当前5 d预报与22年前的2 d预报相当,而目前的15 d预报与过去的10 d预报相当;NCEP在截止2017年的过去18年里,预报时效提高了4 d。综合两个机构的预报时效提升速率,即如果平均每10年提高近2 d的进程在未来20年里持续,那么目前主要预报指标大约6.7 d的时效,在2025和2035年可分别提高到8.5和10.5 d。

3.2 基于高分辨率模式过去22年的改进:2025和2035年时效分别提高到7.6和8.4 d

高分辨率模式是目前各国气象部门、研究机构和企业重点研发的预报工具,其意义不仅在于大幅度提升观测大数据和区域预报两端的数据吸纳和服务能力,更在于未来人工智能(AI)更多地介入NWP后^[20],高分辨率模式可成为支持全球模式通过机器学习解读更多模拟中“灰色”地带的有效手段。图6给出过去20年,ECMWF高分辨率模式系统预报时效的改进:最近10年预报时效增加了0.8 d,从大约6.0 d提高到6.8 d^[4]。未来10~20年,预报时效持续进步将使高分

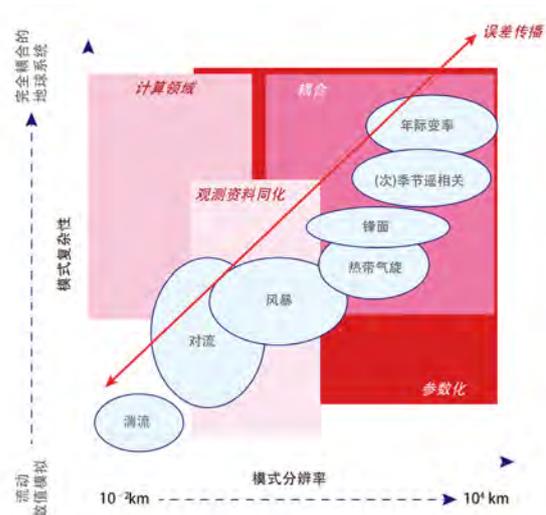


图4 未来数值天气预报的关键挑战领域。预测技术的进步来自计算科技的革新、物理过程的参数化表达、地球系统构件的耦合、先进观测资料同化算法的使用、通过集成方法对不确定性的一致描述以及它们在不同尺度的相互作用等。椭圆部分表示数值模式中解析的 $10^{-2} \sim 10^4$ km尺度范围内的主要现象,并展示出从小尺度范围流动到完全耦合地球系统的模拟复杂性;框表示未来预测技术改进遇到的最重要挑战;箭头表示跨分辨率尺度和地球系统显现的误差传播重要性

Fig. 4 Key challenge areas for NWP in the future.

Advances in forecast skill will come from scientific and technological innovation in computing, the representation of physical processes in parameterizations, coupling of Earth-system components, the use of observations with advanced data assimilation algorithms, and the consistent description of uncertainties through ensemble methods and how they interact across scales. The ellipses show key phenomena relevant for NWP as a function of scales between 10^{-2} and 10^4 km resolved in numerical models and the modelled complexity of processes characterizing the small-scale flow up to the fully coupled Earth system.

The boxes represent scale-complexity regions where the most significant challenges for future predictive skill improvement exist. The arrow highlights the importance of error propagation across resolution range and components of the Earth system

分辨率预报系统的时效分别提升到7.6和8.4 d,接近同期集合预报水平。

3.3 多种模式要素预报:过去10年进步在1~2 d

图7给出过去20年,ECMWF在温度和降水预报上的改进:其中最近10年预报时效增加了0.8~2 d,这些要素在未来10~20年持续改进,将让这些关键预报分别得到可期待的1~2 d和2~4 d的改进^[4]。对比前面针对可预报性的讨论,到2035年前后,各类集合和确定性模式预报的水平,预报有效性将全面接近和进入10 d,也更加接近可预报性的极限。

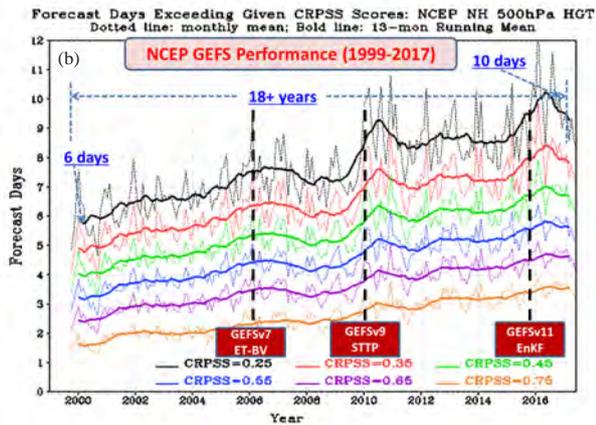
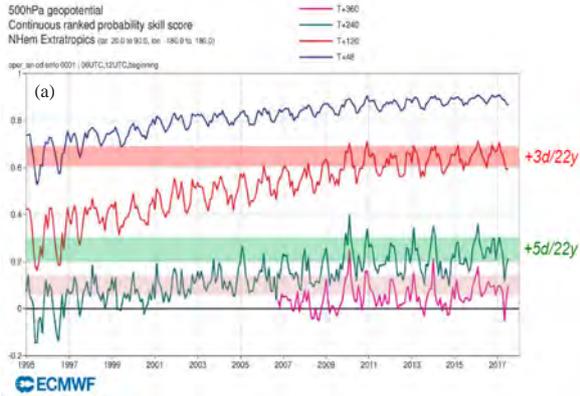


图5 ECMWF (a) 和NCEP (b) 预报系统对500 hPa位势高度预报指标的进步历程
Fig. 5 Improvement of forecast skill of 500 hPa geopotential height at ECMWF (a) and NCEP (b)

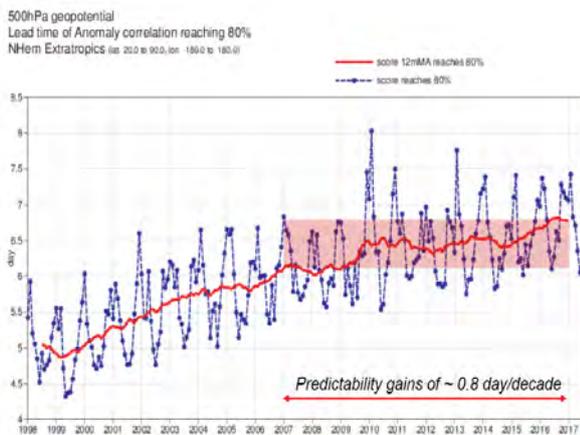
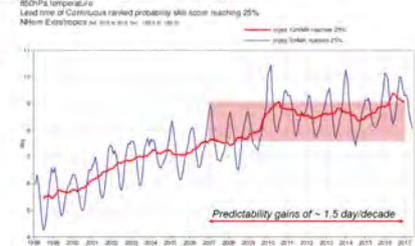


图6 ECMWF高分辨预报系统HRES对500 hPa位势高度预报的进步历程
Fig. 6 Improvement of 500 hPa geopotential height prediction by ECMWF high resolution model HRES

4 耦合气候模式和地球系统模式核心能力指标

1967年, Manabe等^[21]论述一维辐射对流平衡模式的论文, 被认为是现代数值气候模式研究的起点^[22]。在20世纪随后的时间里, 气候模式被加入了更多的要

(a) Results indicate that the reliability and accuracy of the ECMWF medium-range ensemble (ENS) has been increasing continuously, with gains of 1.5-2.0 days/decade.



(b) Supplementary score for HRES forecasts: 1-SEEPS (Stable Equitable Error in Probability Space) score for 24-h precipitation totals in the northern extra-tropics (verified against synop observations).



(c) Supplementary score for ENS forecasts: Continuous Ranked probability Skill Score (CRPSS) for 24-h precipitation totals in the northern extra-tropics (verified against synop observations).



图7 ECMWF 1998—2017年850 hPa温度 (a)、降水总量 (SEEPS验证, b) 和降水 (分级概率技巧, c) 预报进步历程和最近十年的进步幅度
Fig. 7 Forecast improvement of 850 hPa temperature (a), total precipitation (SEEPS, b) and precipitation (CRPSS, c) at ECMWF from 1998 to 2017

素, 模式的结构和计算也走向精细化。Manabe等最初的辐射对流模式已经演化为辐射驱动, 计算的复杂化也使模式发展成当前多圈层耦合的地球系统模式。最新地球系统模式的突出特点是包含了生物圈等相互作用, 如碳循环、陆地海洋生态系统和生物地球化学、大气化学以及自然和人为干扰^[23]。

20世纪90年代起, 世界气候研究计划 (WCRP) 耦合模拟工作组 (WGCM) 组织开展耦合模式比较计划 (CMIP)。前两个阶段影响范围局限在气候模式界, 第三阶段 (CMIP3) 起, 模式结果的公开性大大增加, 开始为其他研究团体所用。2008年启动的CMIP5, 已成为政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 评估报告的重要参考。当前试验阶段为CMIP6^[24], 共44家机构参与。参与CMIP6的气候中心及其耦合模式或气候系统模式的情况, 能够给出当前此类模式的全球概览。

4.1 耦合气候模式和地球系统模式的核心指标

关于模式分辨率, CMIP3周期的典型水平分辨率

为大气250 km, 海洋1.5°。7年后的CMIP5周期中, 分别缓慢进步到150 km和1°。截止到2016年, CMIP6部分模式分辨率能实现大气至少50 km和海洋0.25°。对于气候预测相关指标, CMIP6的一个目标是实现及时高效并长期的模式基准测试和评估, 并将其发展为常规操作^[25]。WGCM会议上, 通过了两个将用于CMIP6系统性和即时性能评估的工具ESMValTool (Earth System Model Evaluation Tool)^[26]和PMP (PCMDI Metrics Package)^[27]。这两个工具选择的指标基于IPCC AR5第一工作组报告第9章, 该章中给出了针对大气、臭氧和气溶胶、碳循环、海洋等35个指标。其他一些指标的选择思路^[28], 如对CMIP5部分模式进行的回顾性评估中, 选用的是与地球能量收支相关的44个指标。CMIP6的最新评估结果在两个工具网站上保持更新, 这项工作可对未来气候预测核心指标的选取起到重要指示作用。

世界天气研究计划(WWRP)和WCRP S2S项目选择的关键指标, 一为MJO预测技巧, 二为天气型转变预测。在2013—2017年的第一阶段实施中, 10个S2S模式中, 有7个MJO提前20天预报的双变量相关技巧(bivariate correlation skill)超过0.5, 只有1个模式(ECMWF)预报时效达到30天(图8)^[4, 29]; 在天气型转变预测方面, 北大西洋涛动(NAO)正负转型预报可提前3周, 其他天气型的转化提前16天预报。

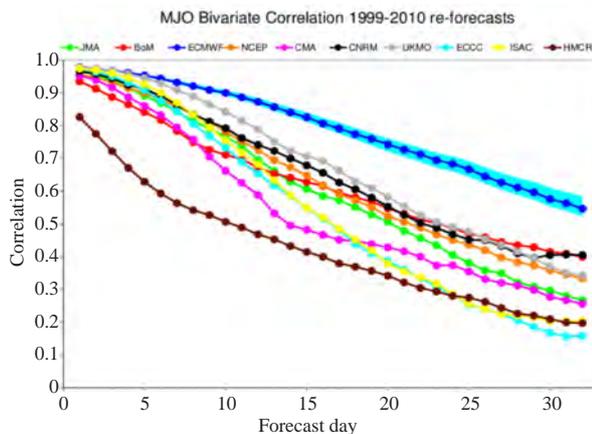


图8 10个S2S模式模型集合均值与ERA Interim之间的MJO双变量相关性相对提前期的演变

Fig. 8 Evolution of MJO bivariate correlation compared to lead time between the mean values of 10 S2S model sets and ERA-Interim

NOAA气候预测中心对季节温度的预报指标在2018年1月技巧达到36.9, 超过该年度的目标(26), 过去10年实现有效预报占比也保持上升^[30]。英国气象局季节和年代际预报系统对NAO的冬季预测技巧发展指出^[31], 1993—2016年间季节预报相关技巧为62%,

对下一个冬天预测的技巧为42%^[32], 并且随着集成员增加, 未来季节预报有可能接近0.8。

4.2 气候预测主要指标的进步和未来指标预测

根据ECMWF模式对MJO预报时效的发展, 2006—2016年, 预报时效(双变量相关 ≥ 0.5)10年约增加12 d^[15]。如保持此进步速度, 到2025年将达到49 d。

在2004年NCEP召开的纪念全球NWP业务开展50周年的学术会议上, Lord^[33]对那时NCEP的预报水平进行了阐述, 用Niño 3.4海温距平指标, 给出从1997年冬季到2003年冬季的历史回报结果(图9a), 其中提前3和6个月的相关性分别约为85%和76%(取6个月预报指标的中数)。同样的指标, 当前预报也有很多可比较的量化结果, 例如气候系统历史预报项目(CHFP)集合世界9个中心对1992—2010年历史回报3和6个月技巧分别能达到90%和82%(图9b)^[34]。这样的对比结果表明, 在Niño 3.4海温距平指标为代表的短期气候信号预测方面, 过去15年提前3和6个月的预测水平, 相关性分别提高了5%和6%。

综合考虑, 上述相差大约15年的气候预测指数的进展, 以及目前指标已经非常接近100%的情况, 未来3和6个月针对Niño 3.4海温距平预测的指标, 分别可能达到93%和86%(2025年)以及96%和90%(2035年)的水平。

5 讨论

天气和气候模式的发展, 主要以业务预报需求为导向。在当前预报时效已经接近可预报性极限的情况下, 借助高性能计算新技术和AI等新手段和思路, 以及围绕预报开发新产品支持各种业务服务, 成为推动模式预报有效性及其应用的主要手段。其中, 新预报量的设计和业务化、下一代预报模式和资料同化技术的研发等, 成为目前NWP领域发展的新趋势。

5.1 NWP水平提升的脚步没有停歇

ECMWF最新给出了世界领先的5个气象业务中心2018年和2017年3—5月预报指标的比较(图10)。其中, 在几乎所有的预报时段, 1年里的进步都是“可测量”且是正面的。ECMWF在不断改进和升级其业务预报模式的同时, 2018年, 在其模式输出端新增加了3个重要变量的模式预报场: 闪电、总水汽输送和最大对流有效位能, 以支持更多的模式应用和研究。这些新的预报产品提升了服务(如闪电)和天气诊断(如总水汽输送和对流有效位能)利用的可能。

ECMWF已经明确将其业务集合预报系统的分辨率从当前的18 km提高到5 km, 且试验表明, 提高预

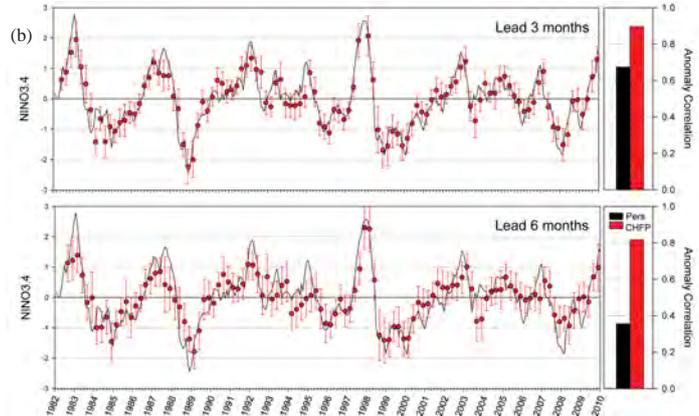
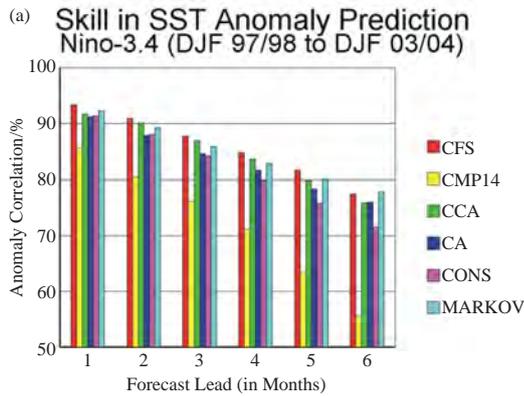


图9 2000年前后NCEP (a) 和CHFP项目给出的9个主要气候预测中心 (b) 针对Nino3.4海温距平指标的历史回报结果
Fig. 9 Hindcast results of Nino-3.4 SST anomaly at NCEP from DJF 1997/1998 to DJF 2003/2004(a) and 9 climate prediction centres in CHFP project(b)

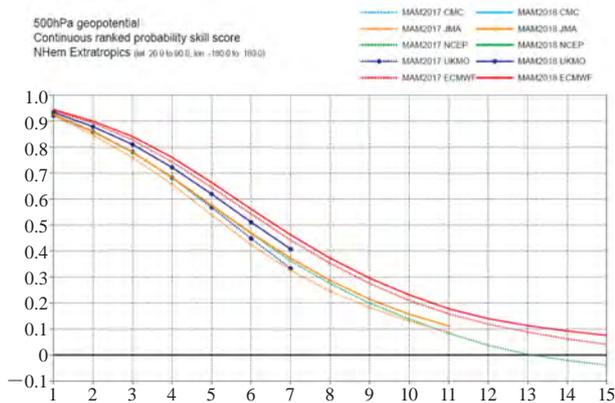


图10 2017和2018年ECMWF (红色)、UKMO (深蓝)、NCEP (绿色)、JMA (橙色) 和CMC (浅蓝) 对北半球中纬度地区500 hPa位势高度预报技巧得分对比
Fig. 10 Forecast skill scores of north hemisphere 500 hPa geopotential at ECMWF (red), UKMO (dark blue), NCEP (green), JMA (orange) and CMC (blue) in 2017 and 2018

报系统分辨率, 将提升预报的准确性。针对2017年9月Irma飓风强度预报表明, 5 km模式试验结果显示出更准确的预报结果。而当集合预报模式的分辨率提高之后, ECMWF当前集合预报系统的模式数量(50个)是否可以大幅度减少, 仍然在试验中。目前的试验表明, 减少模式数量会使中期概率预报的技巧降低。

5.2 2025 和 2035 年两个时段可期的预报指标

针对学者最新给出的可预报性2D分布图^[4], 基于文献研究成果, 本节选取了反映世界气象中心的核心业务指标, 给出当前以及未来10和20年可能的发展趋势(表2)。在分析这些指标过去10~20年进步的基础上, 同时考虑了指标接近可预报极限, 增幅减缓的可能。

表2中反映气象业务中心整体能力的所谓核心指

标, 实际上是气象业务中心一系列研发工作及其综合能力在一个总体上的考量。要有效地提升核心能力指标, WMO天气公开科学会议^[3]提出至少以下8个方面高水平的研发工作: 1) 理论进步; 2) 重大国际外场试验和观测技术(雷达、廓线仪和卫星等)复杂研发互动; 3) 数值方法挖掘(谱方法、有限元等); 4) 次网格尺度物理参数化(深对流、云、山脉等); 5) 大气-海洋-海冰和陆面-水文耦合; 6) 大气扩散和空气质量; 7) 地面、高空和卫星观测系统的资料同化; 8) 高性能计算系统。

目前世界上领先的数值天气预报机构ECMWF, 在酝酿其2016—2025年战略时, 前任中心主任作为作者之一, 在著名期刊*Nature*上发表了评述NWP进步的评述文章, 指出天气气候预报技术的巨大进步是“静悄悄的革命”, 文后给出了多达100篇文献, 这些文献在指明了NWP进步所依据的更广泛领域科学技术进步的同时, 更意味着数值模式能力的提升, 需要多领域日积月累的创新研发活动才有可能。

参考文献

- [1] 贾朋群, 胡英, 薛纪善. 业务化数值天气预报50年: 科学传承与未来展望. 气象, 2004, 12(12): 32-35.
- [2] 周庆亮. 世界气象中心设置、认定与履职简析. 气象科技进展, 2018, 8(4): 129-131.
- [3] WMO. Seamless prediction of the Earth system: From minutes to month. 2015, WMO-No. 1156.
- [4] Buizza R, Leutbecher M, Janousek M. The forecast skill horizon, ensemble prediction: Past, present and future. ECMWF Annual Seminar 2017.
- [5] ECMWF. Operational configurations of the ECMWF Integrated Forecasting System (IFS). 2018. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support>.
- [6] NCEP. Global Forecast System (GFS). 2018. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
- [7] UK Met Office. Met Office Numerical Weather Prediction models. 2017. <https://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/>

表2 世界领先水平核心预报预测指标目前值和未来（2025年和2035年）估计

Table 2 Current values of state-of-the-art core forecast indicators and their extend values in the future (2025 and 2035)

预报业务关键指标	指标说明	当前数值	2025年	2035年
全球NWP模式 核心指标1	500 hPa高度有效预报天数	有效6.7 d (距平相关 $\geq 80\%$)	8.5 d	10.5 d
全球NWP模式 核心指标2	850 hPa温度有效预报天数	有效9 d (CRPSS ≥ 0.25)	10.5 d	12 d
高分/集合预报	24 h降水总量预报	有效4.3 / 7 d	5.2 / 7 d	6.1 / 8.7 d
气候预测	提前3 / 6个月预测 Niño 3.4海温距平	相关性 90 % / 82 %	相关性 93 % / 86 %	相关性 96 % / 90 %
	MJO有效预报天数	有效38 d (BC ≥ 0.5)	49 d	—

unified-model/weather-forecasting.

- [8] JMA. Numerical Weather Prediction models and related application. 2018. <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/nwp.html>.
- [9] Ushiyama T, Sayama T, Iwami Y. The present state of flash flood forecasting utilizing numerical weather prediction in Europe. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 2017, 30(2): 112-125.
- [10] CNRM. ARPEGE. 2018. <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article121>.
- [11] Bouyssel F. Météo-France report. WGNE-30, 23-26 March 2015. http://polar.ncep.noaa.gov/conferences/WGNE-30/pdfs/day2/06-Met-France_report.pdf.
- [12] DWD. The actual operational numerical weather prediction and emergency response system. 2018. https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/06_nwp_emergency_response_system/num_weather_prediction_emergency_system.html?nn=480860.
- [13] CMC. The Global Deterministic Prediction System (GDPS) version 6.0.0 of the Meteorological Service (MSC) of Canada. 2017.
- [14] ECMWF. ECMWF Annual Report 2017, 2018.
- [15] Bauer P, Brown A, Buizza R, et al. ECMWF 2016-2025 strategy: moving towards seamless ensembles. EGU General Assembly 2018, April 8-13 2018.
- [16] 贾朋群. ECMWF未来10年“2+4+1”战略, 将天气气候预报引向极致. *气象科技进展*, 2016, 6(4): 29.
- [17] Tolman. NOAA Modeling Forum, Prediction Suites in 2018. AGU Fall Meeting, 2017.
- [18] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55
- [19] Zhu Y J. Potential operational capability for S2S prediction, metrics, post-processing, and products for S2S workshop, 28 Feb. - 2 Mar. 2018, College Park, MD, USA.
- [20] 许小峰. 从物理模型到智能分析——降低天气预报不确定性的新探索. *气象*, 2018, 4(3): 341-350.
- [21] Manabe S, Wetherald R T. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Science*, 1967, 24(3): 241-259.
- [22] Forster P. In Retrospect: half a century of robust climate models. *Nature*, 2017, 545(7654): 296-297.
- [23] Bonan G, Doney S. Climate, ecosystems, and planetary futures: the challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 2018, 359(6375): eaam8328.
- [24] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 1937-1958.
- [25] Eyring V, Gleckler P, Heinze C, et al. Towards improved and more routine Earth system model evaluation in CMIP. *Earth System Dynamics*, 2016, 7(4): 813-830.
- [26] Eyring V, Righi M, Lauer A, et al. ESMValTool (v1.0) - a community diagnostic and performance metrics tool for routine evaluation of Earth system models in CMIP. *Geoscientific Model Development*, 2015, 9(5): 1747-1802.
- [27] Gleckler P, Doutriaux C, Durack P, et al. A more powerful reality test for climate models. *Eos*, 2016, 97.
- [28] Baker L H, Shaffrey L C, Sutton R T, et al. An intercomparison of skill and over/underconfidence of the wintertime North Atlantic Oscillation in multi-model seasonal forecasts. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 7808-7817.
- [29] WMO. WWRP/WCRP Sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) phase I final report. 2018, WWRP 2018-2. World Meteorological Organization.
- [30] DeWitt D. CPC Current capabilities and metrics (Part I) and key science challenges to improving S2S forecast skill (Part II). 2018.
- [31] Scaife A. Skilful Long Range Forecasts for Europe. 2018.
- [32] Dunstone N, Smith D, Scaife A, et al. Skillful predictions of the winter North Atlantic Oscillation one year ahead. *Nature Geoscience*, 2016, 9(11): 809-814.
- [33] Lord, S. The Future of NWP. 2004.
- [34] Tompkins A M, Zárate M, Saurral R et al. The climate-system historical forecast project: providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98: 2293-2301.

城市气象研究国际前沿动态综述

于淼¹ 窦晶晶¹ 苗世光¹ 楚艳丽¹ 孙丹²

(1 北京城市气象研究院, 北京 100089; 2 北京市气象局, 北京 100089)

摘要: 通过梳理2018年8月在美国纽约举行的第十届城市气候国际会议主要研究成果, 分类总结了城市气象研究的最新国际进展与发展趋势, 包括城市气候过程、城市环境下气候变化适应与应对、气候条件下城市规划和管理、最新城市气象探测技术、城市环境数值模拟、大城市气候、城市遥感、城市地区极端天气等方面。在此基础上, 根据我国城市化发展特性, 探讨了我国城市气象研究的未来发展方向。

关键词: 城市气候, 城市环境, 国际城市气候会议, 国际前沿

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.003

Advances of Urban Meteorological Research: International Conference on Urban Climate

Yu Miao¹, Dou Jingjing¹, Miao Shiguang¹, Chu Yanli¹, Sun Dan²

(1 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

Abstract: In August 2018 the 10th International Conference on Urban Climate (ICUC-10) was held in the City University of New York. In this paper, the latest developments of urban meteorology were summarized according to the ICUC-10 reports, including climate change adaptation and mitigation in urban environments, urban planning and governance with climate, new observational techniques to study urban climate, numerical studies of urban environments, megacity climate, urban remote sensing and extreme weather in cities, etc. Based on the summaries we analyzed the research direction of urban meteorology on the basis of urbanization characteristics of Chinese cities.

Keywords: urban climate, urban environment, international conference on urban climate, advances

0 引言

目前, 极端天气气候事件和社会经济发展对愈加迅速的城市化发展进程提出了挑战。为了应对挑战, 研讨和解决城市化发展过程中的关键科学问题, 国际上成立了国际城市气候协会 (International Association for Urban Climate, IAUC)。作为一个在城市气象与气候领域寻求科学、学术和技术发展的责任组织, 其关注的领域包括: 城市气候学与气象学; 城市边界层中的交互过程; 城市空气质量; 城市风与湍流; 城市大气及地表特征的观测、模拟和遥感; 城市陆面的微尺度过程; 建筑气候学; 城市生态系统内的生物气象学和生物气候学 (包括人居舒适及灾害); 将城市大气过程纳入设计、规划和天气建模, 并通过中尺度气候模型模拟等。自20世纪80年代末, IAUC通过组织城市气候国际会议 (International Conference on Urban Climate, ICUC), 吸引了众多国际城市气象

领域专家学者共同探讨城市气象学最新的研究成果及未来研究发展方向。2018年8月6—10日在美国纽约城市大学召开了第十届城市气候国际会议 (ICUC-10) 暨第十四届城市环境论坛。会议由纽约城市大学、国际城市气候协会及美国气象学会城市环境委员会联合举办, 主题是“Sustainable and Resilient Urban Environments (可持续与弹性城市环境)”。

ICUC-10主题包含: 全球气候变化和城市化; 城市气候; 极端天气和气候事件; 城市能量和水平衡; 城市冠层和城市粗糙子层; 城市天气预报; 城市空气污染; 观测及数据; 城市水文; 热压对城市环境及公共健康的影响; 城市发展和可持续性, 适应性与减缓措施; 智慧城市及城市规划; 跨学科城市现象模拟等。

本文基于ICUC-10会议的主要成果及相关文献, 分类总结了最新研究进展和发展趋势, 根据我国城市化发展特性, 探讨我国城市气象研究的未来发展方向。

收稿日期: 2018年9月15日; 修回日期: 2018年9月21日
第一作者: 于淼 (1988—), Email: yumiao0926@126.com

1 重点研究进展

1.1 弹性城市的知识合作

美国国家航空航天局 (NASA) 的高级科学家 Cynthia Rosenzweig 在 “Knowledge Partnerships for Resilient Cities (弹性城市的知识合作)” 的研究中提出, 当前城市气候面临诸多挑战: 热浪频率增加导致的健康问题及可能增加的空气污染; 气候变化将改变城市热岛效应, 模式结果显示, 许多地区的热岛效应有所减少, 而有些地区有所增加; 由于暴雨增加而造成的洪水将导致财产和基础设施的破坏、商业和生计的损失以及与疾病相关的水污染; 海平面上升、洪水与风暴潮的同时发生会对人口、财产和沿海生态系统产生广泛影响, 并对商业和生计构成威胁。Cynthia Rosenzweig 也给出了城市影响的最新研究成果: 城市中心和城市地区通常比周围地区高出几摄氏度, 形成了所谓的城市热岛; 许多发生在城市的极端事件, 如热浪、干旱、暴雨、沿海洪水的频率和强度将增加; 由于世界上大多数人口生活在城市地区, 城市地区需要特别关注降低风险与恢复力建设问题。

1.2 规划亚洲健康城市

香港中文大学建筑学院的任超在关于 “Urban Climate Science for Planning Healthy Cities in Asia (规划亚洲健康城市的城市气候科学)” 的研究中指出: 1) 香港城市微气候研究技术研讨会及启动活动指南, 为建筑行业的从业人员提供了城市微气候设计的知识和灵感; 体现了前瞻性、用户友好性和适用性; 2) 《城市风环境评估与通风廊道规划指南》通过探讨中国城市化所带来的气候环境问题和城市通风廊道专项规划研究, 集中介绍了国内外通风廊道规划实际应用经验, 并选取英国伦敦、美国洛杉矶、德国斯图加特、日本东京、中国香港的实际应用案例, 包括各地风环境评估的考量重点、通风廊道规划的设计要素、相关法律法规及管控实施等。面对中国未来的城市化, 必须将气候环境作为自然资源积极保护和修复, 明确 “城市风环境” 与 “城市通风廊道” 对城市居住环境品质和公共卫生的重要性, 确立城市规划中风环境评估与应用的必要性。提出 “呼吸城市” 这一新的城市建设理念, 旨在加强城市生态文明规划和精细化管理, 加强对建筑、道路、公园、绿地、开放空间、水体水系等城市形态与空间要素的合理布局与管理, 促进对自然风的疏导与渗透, 加强城市内部空气对流、交换、净化的能力, 从而改善城市通风, 缓解雾霾与夏季热岛效应等城市环境问题; 3) 需要制定气候可行性论证规范、城市通风廊道设计及城市

总体规划气候可行性论证技术等行业标准。

1.3 城市化引发的科学问题

美国乔治亚大学的 J. Marshall Shepherd 在研究中指出, 城市影响降水的可能机制包括: 静稳条件, 强热岛导致辐合运动增强, 降水在城市中心增强; 区域强风, 上风向辐合增强, 导致城市下风向和城市边缘地区降水增强; 弱风条件, 城市热岛导致辐合, 导致降水在城市边缘地区增强。城市影响降水可能由一个或者多个因素共同作用影响: 1) 由于底层水平加热使得热混合增强, 使大气不稳定性增强; 2) 由于高层建筑造成的气动粗糙度增加, 增加了湍流和机械混合; 3) 汽车和工业添加气溶胶引起的微物理和动态过程的修正; 4) 物理或热力学过程使降水系统分叉。

Shepherd 提出城市化对降水影响的研究方向: 1) 城市化对极端降水事件的影响, 研究结果显示, 在世界范围内很多城市的极端降水发生频率呈正趋势, 并有 99% 的置信水平。频繁的城市极端降水导致城市内涝频发, 这是否影响城市地表水文系统, 是今后的研究重点。2) 城市径流。越来越多的城市径流数据超出标准阈值范围以及较大的单位径流峰值, 城市发展的定位和配置也对径流有显著影响, 在制定土地使用政策时, 要尽量减少因城市化而造成的流量变化, 必须考虑城市发展的范围、结构和定位。3) 城市化是否对冬季降水有影响。之前研究重点关注城市化对夏季降水的影响, 而对冬季的关注很少, 例如对冻雨的影响。4) 城市化是否对台风有影响。5) 城市化对区域气候的影响是如何影响大尺度气候变化的。

1.4 城市海洋研究新前沿

美国 Jupiter 公司的联合创始人 Alan F. Blumberg 以 “The Urban Ocean—A New Frontier (城市海洋——新前沿)” 研究为基础, 指出很多沿海城市发展迅速, 正在经历或已经完成高速城市化发展。他提出了 “城市海洋” 这一概念, 指出了城市海洋的独特性, 其受到时间和空间变化的影响, 特别是受到灾难性事件及人类相互作用的影响, 例如土地退化、河流管理、气候变化和其他人为活动。Blumberg 提出了城市海洋动力洪水模型, 发展了街区洪水的预警模型, 可以提前 5 d 预测风暴潮/降雨造成的街区洪水, 并利用集合预报的方法, 得到更加可信的预报结果。

1.5 城市气象研究与应用的结合

北京城市气象研究院 (城市院, 即原中国气象局北京城市气象研究所) 苗世光研究员介绍了城市所 “京津冀城市群强降水及雾霾观测试验 (SURF)”

的主要研究成果及睿图 (Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System, RMAPS) 数值预报模式系统。SURF科学试验通过强化国际合作达到对城市天气系统的更深入认识, 发展高分辨天气预报模式, 增强城市预报产品的应用领域, 比如能源、公共健康、气候变化、空气质量、城市规划、应急响应管理等, 开展城市影响降水 and 气溶胶的科学研究。成果主要包括: 边界层湍流特征研究, 验证了HOST假设在城市地区的适用性; 城市地表能量平衡观测研究, 评估了北京地区的辐射通量、感热潜热通量特征; 用激光雷达反演了北京城市边界层高度; 城市影响降水的气候特征; 气溶胶对辐射的影响; 城市建筑物的储热研究, 观测城市建筑物内外表面的温度; 城市建筑物特征研究, 建立城市数据集; 城市水文过程的改进, 在城市冠层模式 (UCM) 中改进了城市水文过程, 并用铁塔观测数据进行评估; 冷却塔模型对高分辨城市预报系统中地表通量模拟的改进; 灰区模型对城市边界层方案的改进; 气溶胶对降水影响的机理研究。介绍了城市所发展的RMAPS-Urban数值预报系统, 包括模式设置, 同化系统数据、方法和改进, 以及预报效果评估和未来工作计划。

2 主要研究进展

2.1 城市气候过程

2.1.1 风切变在城市边界层中的作用

英国雷丁大学的Barlow^[1]指出, 城市边界层过程控制了污染物在城市上空的混合和运输, 从而控制了地表污染浓度。因此, 建立城市空气污染模型需要充分再现城市物理过程。城市边界层 (UBL) 可以比周围的乡村边界层 (RBL) 更深, 由于城市热岛, 对流可以持续到晚上, 这可能有损于污染物浓度降低。显然, 感热通量的增加对UBL的生长及其日循环的时间起着很大的作用。然而, 与乡村相比, 城市表面较粗糙处的风切变也会增加; 特别是当低速UBL成长为高速RBL时, 在反演过程中会有相当大的风切变。通过观测和模拟, 证明风切变在UBL的日循环中扮演了相当重要的角色。利用设置在英国伦敦的地面多普勒激光雷达和现场仪器获取观测数据, 在不同分辨率下运行英国气象局统一模型开展模拟, 分析夜间射流对控制UBL晨间演化的作用, 上部UBL风切变对湍流特性的影响, 以及表面风切变对控制UBL稳定性和对流的作用。

2.1.2 社区层面城市内部热剖面研究

印度理工学院的Surabhi Mehrotra以孟买为例, 对社区层面的城市内部热剖面进行了研究, 指出建成

区的空间格局对城市表面加热现象有显著影响, 改变了城市能量与其周围环境的交换。通过观测和模式分析, 研究了高异质性城市孟买建成区内的热变化。城市区域的异质性是由建筑和自然环境参数的变化引起的, 比如建筑覆盖、建筑高度、天空视野因子、植被类型等, 形成了不同的城市建筑形式 (Urban building form, UBF)。这些参数在过去的研究中被广泛采用, 有助于提高对城市地区热负荷或冷却潜力的认识。为了得到城市建筑形态的均质聚类, 在构建自然参数的基础上, 采用主成分和聚类分析方法, 得到5个均质聚类UBF。通过遥感卫星Landsat OLI/TIRS观测到地表温度, 计算验证星温度分布特征。为了分析当地的热剖面, 为每个UBF模拟了行人平均辐射温度 (Tmrt)。对每个UBF集群进行Tmrt模拟, 并使用6种方向辐射模型“SOLWEIG”。利用微气象现场观测数据, 验证了Tmrt模拟的有效性。利用统计误差量化技术, 证实了模型对小时Tmrt数据的适用性。

2.1.3 局部气候带对地表热岛 - 冠层热岛关系的影响

英国伯明翰大学的Feng研究了卫星遥感地表温度 (Ts) 与冠层空气温度 (Ta) 之间的关系对一系列城市气候应用具有的潜在重要意义。因为背景温度的变化, 比如背景区域尺度温度较大的日变化、逐日或者逐级季节的变化幅度远大于Ts与Ta之间这种几摄氏度的差异, 所以Ts与Ta的简单回归分析统计意义并不明确。因此, 在回归分析中使用城市热岛强度 (UHII) 是有利的, 因为它减少了背景温度变化的影响。

2.2 城市环境对气候变化的适应与应对

2.2.1 气候可适应城市的塑造

通过创新、多尺度和适应性缓解设计方法, 塑造可适应气候变化的城市。

城市气候必须是当代城市规划设计的一个关键考虑因素, 气候适应性设计原则为城市设计提供了一系列“适应性缓解”策略, 指导城市规划, 应对气候风险。

1) 城市系统的效率: 通过在建筑、交通和工业领域实施低碳和接近零的能源解决方案, 可以减少基础设施产生的城市废热和温室气体排放。

2) 形式和布局: 改进建筑物和城区的形式和布局可以提供冷却和通风, 减少能源使用, 并允许市民应对更高的温度和更强烈的径流。

3) 耐热建筑材料: 选择低热容量材料和反射涂层, 通过管理表面的热交换来提高建筑性能。

4) 植被覆盖: 增加建筑和开放空间的绿化面积, 可以同时满足降低室外温度、建筑降温等需求,

同时隔离碳。

2.2.2 互联基础设施的优化管理

极端天气气候事件及其后果，包括死亡人数和其他社会经济影响，日益成为公共事件的关键焦点。互联基础设施包括相互依赖的服务或相互依赖的基础设施。依赖这些服务的用户不可避免地受到影响，特别是公众日益依赖这些服务。主要研究基础设施及其互联性在极端天气和气候变化带来的后果中所扮演的角色，以及如何减轻负面影响。一方面，基础设施互连具有很好的相互支持性和扩展性。另一方面，通过与这些连接相关的许多其他系统的级联，使单个基础设施的破坏升级。这些相互联系及其影响往往不确定和不可预料，考虑这些不确定性是极端事件背景下管理基础设施互联的关键因素。

2.3 最新城市气象探测技术

2.3.1 城市局部云覆盖监测

日本爱媛大学的Fujimori等^[2]研究了太阳辐射的减少与云层厚度的密切相关性，发现太阳辐射的大小决定了高空云层厚度的指数。然而，由于观测台站数量有限，较难获得高空间分辨率的太阳辐射观测。

因为太阳能电池板的数量在住宅、商业建筑和学校中迅速增加，提出一种利用光伏（PV）系统估算太阳辐射的新方法，并验证了应用该方法观测城市局部云覆盖量的有效性。

如果在某个季节里用一天时间获得了校准参数，光伏板的太阳辐射估值就与实测太阳辐射高度一致，在晴朗和多云天气条件下均得到良好的结果。证明了在倾斜太阳能电池板的情况下，使用直接/散射分离的转换可以提高估值。在倾斜角度为20°和30°的情况下，验证了该方法的有效性，相关性高于0.99。

2.3.2 树木和建筑对北美郊区重粒子扩散的影响

圣泽维尔大学的Roy等^[3]指出，在世界各地的城市中，以小颗粒形式通过空气传播的污染物对人类健康构成重大威胁。在过去的几十年里，已经进行了几项色散研究试验。大多数研究中，示踪气体都从中心商业区的点源释放出来，目的是描述城市形态对由此产生的示踪羽的复杂性的影响。羽流本身通常通过一系列传感器进行量化，传感器分布在距离源10 m到几千米的距离上。这些试验增强了对城市离散度的了解，为模型评估提供了优秀的数据集，但仍然缺乏郊区城市离散度特征的数据集。

2.3.3 小型城市风场研究

德国汉堡大学的Wiesner等^[4]指出，由于在粗糙子层内建筑物高度的变化，造成城市风场在空间和时间

上的变化。对研究人员和城市规划者来说，估计某一感兴趣点上的风况是一项挑战。目前利用数值模型来获取小尺度风况信息，大多数城市模型的空间分辨率仍然太粗，无法解析风速在城市微观结构中的变化。风洞试验允许对结构进行详细的观察，同时要求对形状和形态进行简化。在实际环境中，通过高分辨率观测可以收集到最精确的风数据，由于仪器数量有限，这些数据往往时间有限，成本高，而且只能提供选定地点的信息。

这种两难局面导致的问题：如何有效地将这三种方法结合在一起，以获得某一特定地点风况更全面的信息？本研究的目的是发现每种方法的优点和弱点，并找到一种方法来结合它们。为此，采用这三种方法对快速发展的城区大型建筑沿线的风场进行了研究。目标区域位于易北河德国汉堡市中心，因为它具有相对简单的河流入流条件，这简化了数值模型和风洞模型中建筑内外模拟流动的面积。

2.4 城市环境数值模拟

2.4.1 高分辨率植被模型

法国国家气象研究中心的De Munck等^[5]指出了近年来高分辨率植被模型对城市气候变化的影响。从城市规模到社区规模、街道规模，城市景观的异质性，无论是从组成、土地利用或版式形态来看，都在微气候条件下产生了空间和时间上的变化。为了分析这种可变性，2014年在法国图卢兹附近开展了观测试验，作为EUREQUA研究项目的一部分，在1、4和6月的加密观测期间，11个气象站、操作员和一辆装有仪器的汽车，在更大范围内收集了微气候观测数据。为城市规划研究提供相关的气候信息，需要成功地在高空间分辨率下模拟这种微气候变化。

植被在城市微气候条件中扮演着决定性的角色，符合当前城市规划优先级，因此重点研究了模拟结果对植被数据质量和准确性的敏感性。

利用Meso-NH气象模型，加上TEB（Town energy budget）-城市冠层模型，来模拟不同季节城市微气候的变化。TEB模型可以模拟城市覆盖层和低层大气之间的相互作用，它以城市景观的几何简化表示为基础，可以在百米尺度上考虑并模拟城市特征的变化。TEB包含了城市植被与周围建筑相互作用的详细描述，以及街道树木的辐射和通风效应。为了描述邻近地区的表面积，使用了精确的土地利用地图和该地区的版式形态参数。对于植被，根据对卫星数据的分析，进行了具体的处理，以便更精确地描述城市植被，这在城市制图中往往记录不足。除了更好地绘制

绿色区域外，三层植被（草、灌木和乔木植被）也有所不同，另外还区分了街道树木和花园树木。

2.4.2 城区复杂植被的能量和湿度

新加坡国立大学的Hayati等^[6]利用快速反应环境模拟软件对植被覆盖情况复杂的城区能量和湿度进行了计算研究。城市微气候对城市和郊区局部气候变化有重要影响。这些变化严重影响污染物的运输、空气质量、水和能源消耗以及城市居民的总体健康和舒适度。尽管对城市大气流动的计算模型进行了广泛的研究，针对微气候驱动力（包括动量通量、辐射通量和湍流热通量以及主要城市基础设施要素），即在街道、社区和城市尺度上，很少有人研究复杂的城市配置。城市微气候研究的城市工业综合体环境模拟软件（QUIC EnvSim），是一款基于OpenGL和NVIDIA的CUDA（计算统一设备架构）环境，并行化图形处理单元（gpu）的建筑解析城市仿真软件。

2.4.3 城市树木对污染物扩散的影响

亚利桑那州立大学的Wang等^[7]利用耦合的LES-Lagrangian随机模型量化了城市树木对污染物扩散的影响。城市树木可以有效地缓解加重的热应力，尤其是在夏季，提高行人的热舒适度和能源的应用效率。同时，树木的存在改变了空气的流动模式和湍流输送方式，通过物理和生化过程影响空气污染物的扩散。然而，关于这一主题的数值模拟和试验研究仍处于起步阶段。在该研究中，他们使用一个耦合的大涡模拟（LES）-拉格朗日随机模型（LSM）框架，研究了城市树木对街道峡谷内空气污染物扩散的影响。通过水通道和现场试验，验证了模型的速度场和颗粒分布，表明了模型的合理性。与风洞观测结果的对比也表明模型的合理性。利用不同的峡谷（建筑高度与街道宽度）比率和树木几何形状模拟了交通排放的离散情况。结果表明，在中等峡谷宽高比条件下，高于建筑平均高度的树木对峡谷流场和温度场的影响最大。纯量颗粒物的分散最容易受到街道峡谷中高大树木的影响，例如大树的存在会使街道峡谷内的污染物浓度增加73.5%。此外，标量粒子的运移和浓度在背风和迎风壁上的空间分布对街道峡谷和城市树木的形态高度敏感。LES-LSM耦合模型框架的开发及其在建筑环境中的颗粒运输应用可用于城市环境问题的可持续解决方案，如空气质量监测和污染风险分析。

2.5 城市遥感

2.5.1 城市化影响的评估

美国喷气推进实验室的Jeffrey C. Luvall利用全球遥感观测来评估城市化的影响。据估计，到2025年，

世界上将有66%的人口居住在城市。自然景观植被转化为人造城市结构，如道路和建筑物，极大地改变了区域地表能源预算、水文、降水模式和气象学。城市热岛（UHI）是由人造材料在白天吸收的能量，在晚上释放出来，从而使城市内部的空气变热。城市和周边乡村之间的气温差异幅度可达2~8℃。早在1833年，伦敦就报道过UHI，这是最早被观测到的城市化现象之一。来自许多城市的研究表明，这些影响包括空气质量下降、能源消耗增加、区域气候变化和对人类健康的直接影响等。

地表温度和反照率是地表能量收支的主要组成部分，为了理解UHI现象，用表面能量收支来定义表面很有用。使用能源术语建模模拟地表能源收支可以直接比较城市景观中遇到的各种地表，从植被（森林和草本）到非植被（裸露的土壤、道路和建筑）。这些变量也很容易通过飞机或卫星平台的遥感观测到，使人们能够获得城市表面的空间变异性。此外，激光雷达对城市地区物理结构的观测对于确定粗糙度系数和其他建模城市气候的关键参数非常重要。

2.5.2 城市气候模型的评价

圣路易斯大学的Benjamin Le Roy采用红外卫星图像评价城市尺度气候模型。对城市气候的研究，需要开展对城市现象（如城市热岛）的长期监测，以及相关的模型（可用于数值天气预报或气候影响研究），在时间和空间上的适当观测。业务观测网络遵循WMO标准，不适合城市环境。可以在城市中设置特定的仪器来记录城市气候，例如：1）固定的观测站，可以进行长期观测，但只能在某些地点进行；2）移动观测，可以覆盖更大的空间，但观测时间短。

红外卫星图像是一种潜力巨大的工具，它结合了城市尺度上的连续空间覆盖（取决于卫星的不同空间分辨率）和长达数年的时间深度（取决于空间任务）等优点。但这些数据在城市应用中仍未得到充分利用，尤其是长期分析。选择方法和技术建立数据评价模型，必须考虑大气和城市几何形状的影响，使用适当的大气剖面进行大气校正。城市的三维几何形状和太阳的位置导致了朝阳和阴凉区域表面温度的变化，提出了城市三维建模的几种校正方法，对估值及其不确定性做出选择。

2.5.3 利用地面热成像观测城市热各向异性

希腊赫拉克勒斯研究和技术基金会的William T.J. Morrison指出，地面热成像观测到的长波辐射通量模拟可以模拟城市热各向异性。城市几何形态和建筑

材料结合在一起,形成了复杂的长波红外(LWIR)辐射(L)的空间、时间和方向模式。有效热的各向异性(或方向变异性)导致遥感得到的城市表面温度随遥感视角而变化。针对综合室外尺度模型(COSMO)试验场和英国伦敦市中心站点,演示了利用LWIR摄像机观测数据(Lcam)解决有效热各向异性的方法。在COSMO的测试地点,24 h内,像素级别的亮度差异在1小时内达到17.5 K。为了解这种变异性,使用离散各向异性辐射传输(DART)模型和Blender三维渲染软件探索了表面的方向和阴影。把观察到的像素和整个冠层表面分类。为了评估来自COSMO场地三维(L3D)表面的exitant长波辐射的可变性,对观测进行分级。使用摄像机视图模型模拟热图像来测试参数化,确定L3D通量的摄像机透视图。24 h内,每幅图像(模拟和观察到的)平均亮度温度在0.5 K以内。L3D和DART摄像机视图模拟的高空间分辨率使像素和子面比较成为可能。在像素级,阴影迟滞、地面天空视图因子和建筑边缘效果并没有完全被L3D解决。模拟和观察到的亮度温差在白天达到15 K。在COSMO场地开发的方法被推广到解决亚小面可变性的来源,以便在伦敦中心场地进行观测。DART是一种很有前途的工具,有助于增强对地面遥感影像的理解。

2.6 城市地区极端天气

2.6.1 高分辨率热浪预测

美国纽约城市大学的Ortiz等^[8]开展了纽约市高分辨率热浪预测研究。预计全球气温将在整个21世纪上升,促使极端事件发生变化,特别是热浪频率、持续时间和强度会增加。此外,由于人为热、风速变化和辐射阻隔,大气与城市环境之间存在正反馈。全球模型对再现大规模大气现象很有用,但可能无法捕捉到城市与大气互动及其高分辨率变化。

2.6.2 降雨观测与模拟

日本筑波大学的Seino等^[9]开展了东京强降雨事件的观测和数值模拟。人口稠密的城市地区容易受到极端天气的影响,例如严重的雷暴、暴雨和洪水。为了提高城市地区的抗灾能力,需要更好地了解城市化对暴雨的影响。该研究选取了东京都市圈地区,基于日本气象厅的非静力模式(NHM)和方形棱镜城市冠层(SPUC)方案,对2011年8月26日雷雨(例1)和2013年7月18日雷雨(例2)两个极端雷暴形成环境进行了分析。加密观测数据显示,与例2相比,例1的强风暴中尺度环境具有较低的自由对流水平和较深的东风气流层特征。使用真实的建成区环境(CRNT试

验)和较低城市化环境(LURB试验),对比研究了城市对降水的影响。这两个个例中,CRNT试验相较于LURB试验均在中心城区产生了更大的降水量。两个试验的气象场对比表明,城市化引起的气温升高会导致东京降雨量增加,其原因是对流和上升运动加剧,而不是不稳定效应。这种对东京城市化如何促进降水增强的解释,与前期无降水的午后降水的综合分析结果非常一致。

2.6.3 热浪和热岛的城市空间特征

智利圣地亚哥大学的Luz A. Cárdenas-Jirón分析了圣地亚哥过去10年热浪和热岛在城市空间的分布特征。极端天气事件对环境的影响之一表现为夏季热环境对公共健康的影响。该现象的及早发现可以使政府及时向公众发布预警,并且制定中期或长期应对策略。该研究指出了热浪对公共空间热舒适性和热压的影响。对极端大气温度、地表和建筑物表面温度(例如热岛特征)的综合认知将促使人们更真实地理解室外生活空间中的热环境特征。该研究分析了近10年(2007—2016年)智利中部地区的热浪以及大都市地区表面变暖的趋势,进而研究热压对圣地亚哥城市居民的影响。在中尺度和微观尺度上,对1961—1990年的夏季(11—3月)温度进行了均一化处理;分析日最高温度(T_x)逐日时间序列,计算每月的温度序列的90%的百分位数,来作为该月的热浪临界阈值。当 T_x 值连续3 d或以上超过该阈值时,定义为一次热浪过程。利用空间分辨率为1 km的MODIS LST和月平均值,研究了近十几年(2000—2016年)LST趋势,并使用Mann-Kendall方法计算每月标准化异常。首先在城市范围内使用WBGT传感器进行了9 d的夏季观测,以估算热应力值。

3 城市气象研究思考与展望

3.1 城市气象未来发展

通过相关统计分析发现,在全球尺度上,增加城市屋顶和不透水铺砌表面的反照率所导致的负辐射强迫效应相当于44 Gt二氧化碳的减排所产生的效果。使用耦合城市冠层模型的全球气候模式模拟研究发现,如果将全球城市的房屋屋顶变成白色,全球平均的城市热岛强度将下降33%,城市日最高气温将下降0.6 °C、日最低气温将下降0.3 °C。由于高纬度地区冬季太阳辐射较弱,白色屋顶对该地区热岛效应的减缓效果不太明显。用绿地将城市中的工业区、商业区和居民区分隔开,可以缓解城市化效应使得降水增加的影响。通过数值模拟试验人为增加植被覆盖,能够缓解北京地区夏季降水减少的趋势,相比种植树木

而言, 种草的改善效果更明显。合理设计卫星城市的位置对于减少城市化气候效应引起的负面影响具有一定的作用, 例如在西南盛行风条件下, 巴尔的摩相比华盛顿市存在更高的地表气温和更差的空气质量, 其原因在于上风向地区卫星城的城市化发展所带来的影响。

城市气象领域未来发展, 将不仅仅集中于城市对气象(气候)条件和现象影响机理的揭示, 更将关注以下内容:

1) 大城市(群)对大尺度、长期气候的影响: 随着城市存在时间的增长, 以及发展规模的增大, 城市(群)的存在和协同将对大尺度、长时间的气候条件产生一定的影响。揭示城市对气候条件的影响, 将成为城市气象领域重要的研究方向之一。

2) 城市微气候环境特征观测及模拟: 随着观测技术的发展, 以及数值模式和计算机能力的不断提高, 城市微气候得到了领域内学者们越来越多的关注。城市微气候从城市到城市, 甚至在同一城市中不同地区之间都存在差异。例如, 一些地区的自然通风效果好, 感觉比其他地区凉爽。这种差异可以被看作是城市形式、气候和人员活动相互作用的结果。城市微气候特征不仅可以揭示城市形态、人类活动等对局地气象、气候条件的影响, 同时也为城市适应性研究、城市发展及规划提供基础和思路。

3) 城市气候适应性、城市发展和可持续性研究: 城市不断发展的同时带来了诸多挑战, 如高温, 雾霾等。过去几年中, 气候可行性论证、城市通风廊道设计及城市总体规划气候可行性论证技术等发展卓有成效。要有效地解决城市地区的气候弹性问题, 需要开发创新的设计方法, 能够处理指导可持续城市再生和改造策略所需的复杂信息, 并从多尺度的角度管理技术和环境解决方案。发展能够缓解城市化带来的气象和环境压力的新方法新技术, 仍为城市气象研究领域的重点。

4) 跨学科的城市气象模拟与观测: 城市气象气候条件是城市快速发展过程中典型性难题, 由于城市中人口聚集、活动频繁等原因, 城市气象气候研究需要交叉领域跨学科综合考虑。城市气候研究中经济学、社会学相关模型的应用可以为城市效应影响研究带来新的思路。

3.2 应对策略

目前国内在城市气象研究领域仍存在很多不足, 如对城市气象气候研究重要性的认识不充分、城市观

测技术相对欠缺、城市尺度数值模式基础相对薄弱等。因此, 可以从以下几方面开展城市气象科学研究, 提高对城市化气候效应的认识。

1) 发展更加精确的描述城市下垫面土地利用类型的遥感资料集, 对模拟城市土地利用方式对区域气候的改变和影响至关重要。

2) 着重改善现有城市冠层模型的模拟性能, 针对区域城市特点, 改进并完善各类城市参数, 包括热力、形态参数等, 并对城市下垫面与区域大气相互作用过程进行更合理的参数化。

3) 收集更多、更精细的能源消耗数据, 借助自动站、遥感观测数据对人为热释放的时空分布进行准确描述, 将人为热更合理地引入到城市冠层模型中;

4) 加强城市人为气溶胶对城市区域气候影响的研究。

5) 虽然目前数值模式模拟结果还具有较大的不确定性, 但是随着模式物理过程的改进完善和高性能计算能力的迅速提升, 进行高分辨和长时间的城市化区域气候效应的集合模拟, 将成为解决这一领域科学问题的有效途径。

参考文献

- [1] Barlow J F. Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, 2014, 10: 216-240.
- [2] Fujimori Y, Sweata S, Tsuzuki S, et al. Relation between solar radiation distribution by using solar panel and cloud distribution of whole sky camera. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 2017, 73.
- [3] Roy S, Byrne J, Pickering C. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2012, 11: 351-363.
- [4] Wiesner S, Eschenbach A, Ament F. Urban air temperature anomalies and their relation to soil moisture observed in the city of Hamburg. *Meteorologische Zeitschrift*, 2014, 23: 143-157.
- [5] De Munck C S, Hutchings T R, Moffat A J. Impacts of climate change and establishing a vegetation cover on water erosion of contaminated spoils for two contrasting United Kingdom regional climates: A case study approach. *Integrated environmental assessment and management*, 2008, 4: 443-455.
- [6] Hayati A N, Stoll R, Kim J J, et al. Comprehensive evaluation of fast-response, Reynolds-averaged Navier-Stokes, and large-eddy simulation methods against high-spatial-resolution wind-tunnel data in step-down street canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, 164: 217-247.
- [7] Wang C, Wang Z H, Yang J, et al. A Backward-Lagrangian-Stochastic footprint model for the urban environment. *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, 168: 59-80.
- [8] Ortiz L E, Gonzalez J E, Wu W, et al. New York City impacts on a regional heat wave. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2018, 57: 837-851.
- [9] Seino N, Aoyagi T, Tsuguti H. Numerical simulation of urban impact on precipitation in Tokyo: How does urban temperature rise affect precipitation? *Urban Climate*, 2016, 8: 8-35.

复杂地形条件下WRF模式的适用性： 以滇西地区降水模拟为例

杨澄 付志嘉

(大理国家气候观象台, 大理市气象局, 大理 671003)

摘要: 使用WRF模式和GSI同化系统对2014年7月13日云南省西部地区的一次天气过程进行控制模拟和同化模拟试验, 探讨WRF模式在复杂地形条件下的适用性, 得到以下结论: 控制试验和同化试验都能模拟出此次降水过程中云南雨带的位置, 但强度偏大。同化试验中雨带的降水强度有所减弱, 但位置略有南移。控制试验和同化试验的强降水与TRMM相比, 表现为开始时间晚, 持续时间长。控制试验的强降水落区与TRMM相似, 同化试验的强降水落区比TRMM的强降水落区偏西。同化探空数据能够显著减小模式降水模拟中各站点的24 h累积降水量及其RMSD, 改进此次降水模拟中站点累积降水量的误差。控制试验对于此次过程的小时降水量的模拟值普遍偏大, 同化试验模拟的各地的站点小时降水量相应减小, 并且对于单峰型的日降水类型具有一定的模拟能力, 峰值与实况较为接近。但是, 对于多峰值降水区, 以及无降水或者弱降水地区, 控制试验和同化试验均有较大误差。WRF模式对于滇西复杂地形区的降水具有一定模拟能力, 耦合GSI同化系统后, 能够对模式输入场各变量分布进行调整, 从而影响模式模拟性能, 但总体模拟效果还有待进一步提高。

关键词: WRF模式, GSI, 探空资料, TRMM资料, 复杂地形, 降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.004

Applicability of the WRF Model in Complex Topographic Conditions: A Case Study on Precipitation Simulation in the Western Yunnan Region

Yang Cheng, Fu Zhijia

(Dali National Climate Observatory, Dali Meteorological Bureau, Dali 671003)

Abstract: This study investigated the applicability of the WRF model in complex topographic conditions by modeling a weather incident that occurred in the west Yunnan region on July 13, 2014, using the WRF model and GSI assimilation system. The results showed that the location of the precipitation belt could be predicted by both the control model and assimilation model, although the intensity predicted by the control model was a little larger. The intensity of precipitation predicted by the assimilation model was somewhat weaker and the location of precipitation moved southward. In comparison to the results from TRMM, the precipitation predicted by the control model and assimilation model started late and had a longer duration. The precipitation region predicted by the control model was similar to the results from TRMM, while that predicted by the assimilation model was a little westward. In combining with the assimilated sounding data, the model significantly decreased the 24h-accumulated rainfall and RMSD of each site. The 1.0-h rainfall at each site simulated by the control model was larger, while the 1.0-h rainfall of each site simulated by the assimilation model was relatively small. This suggests that the assimilation model had the ability to predict single-peak precipitation. The simulation results for both the control and assimilation models for the area with multi-peak rain, and no or weak rain, had large errors. The WRF model has the ability to simulate precipitation incidents in complex terrain in the West Yunnan region. Coupling the model with GSI, it could adjust the distribution of each variable of the mode input field to influence the model simulation performance, however, the overall simulation results need to be further improved.

Keywords: WRF model, GSI, sounding data, TRMM, complex terrain, precipitation

0 引言

WRF模式作为目前较为成熟的中尺度数值预报模式, 一直有很多的研究者在对其进行开发利用,

从模式本地化参数方案的选取, 到下垫面和物理过程的改进等方面, 不断地优化模式, 使其更加适合研究者所关注的区域^[1-7]。而数据同化作为模式改进的重要手段, 同化系统也在不断地发展, 较为常用的是变分法和卡尔曼滤波, 现在较为流行的是三维变分(3D-Var)和四维变分(4D-Var), 集合卡尔

收稿日期: 2017年4月5日; 修回日期: 2017年10月9日

第一作者: 杨澄(1985—), Email: yangcheng0105@163.com

曼滤波 (EnKF) 也是近几年发展较快的数据同化方法^[8-10]。GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 系统是统一标准的全球和区域数据同化系统, 它首先是由美国国家环境预报中心 (NCEP) 的环境预报模式中心 (EMC) 作为业务系统SSI (Spectral Statistical Interpolation) 分析系统的二代产品所开发, 之后美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 业务部门加入开发以后, 使之成为NOAA全球预报系统 (GFS) 中北美中尺度模式中业务用数据同化系统, 随着美国空军气象局 (AFWA) 和美国国家航空航天局 (NASA) 等多个部门的应用, GSI得到了进一步的发展。目前, GSI已包含了二维变分 (2D-Var)、三维变分 (3D-Var)、四维变分 (4D-Var)、混合变分 (hybrid ensemble variational) 和四维集合变分 (4DEnVar) 同化方法, 可以和多种数值模式进行耦合^[11]。国外已经使用GSI做了很多研究工作^[12], 国内较多使用的是WRF-DA同化系统^[13-16], GSI引入国内的时间相对较晚, 基本处于研究应用阶段^[17-18], 尚没有投入业务应用, 但其作为美国国家气象中心的业务系统, 其算法和性能的发展都具有较好的保证。

云南省地处青藏高原东南缘, 自滇西北向滇东南海拔逐渐降低, 滇西处于青藏高原南部缓冲带, 遍布高山峡谷, 地形极其复杂, 孟加拉湾水汽在向内陆输送过程中, 经常受滇西地形的影响而产生局地天气系统, 由于尺度小、观测站点分布稀疏, 常规天气分析手段较难捕获局地系统的发展过程, 因此本文结合云南西部地区一次降水过程, 引入GSI同化系统, 并将其耦合到WRF模式当中, 利用探空数据进行同化试验, 一方面研究WRF模式在滇西复杂地形条件下的适用性, 另一方面也为将来进一步应用GSI同化系统和深入了解滇西局地环流特征做铺垫。

1 资料与方法

1.1 资料选取

天气背景分析以ECMWF Interim的再分析资料为依据, 分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 模式初始场采用NCEP的FNL再分析资料, 分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 观测数据为大理白族自治州 (简称“大理州”) 12个国家级气象站地面常规观测数据, 第三次青藏高原大气科学试验获取的青藏高原及其周边地区19个L-BAND探空数据, 以及TRMM卫星 ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) 的3 h累积降水数据。

1.2 方法介绍

本文采用WRF模式对2014年7月13日云南省西部地区的一次天气过程进行模拟试验, 模式控制试验采用3层嵌套, 水平分辨率分别为25 km、5 km和1 km, 垂直方向90层, 模拟时间设计为2014年7月11日08

时—13日20时 (北京时, 下同), 积分60 h, 将7月12日14时之前的时间剔除为spin up时间, 分析时段选取时间为7月12日14时—13日14时, 模式中的主要物理参数见表1。同化试验中将19个L-BAND探空站 (站点分布如图1所示) 的探空数据利用GSI同化系统进行同化, 其他参数设置与控制试验相同, 将同化试验分别和观测数据与控制试验进行对比。

表1 WRF模式主要参数设置
Table 1 Configuration of the WRF model

参数	设置		
	d01	d02	d03
水平分辨率	25 km	5 km	1 km
垂直层数	90	90	90
微物理方案	WSM 6-class graupel scheme		
长波辐射方案	RRTM		
短波辐射方案	Dudhia		
陆面模式	Noah Land Surface Model		
湖泊模式	Off		
积云对流方案	Grell-3	Grell-3	Off
边界层方案	YSU scheme		

2 结果

2.1 天气背景及实况

2014年7月12日08时, 云南西北地区上空500 hPa流场 (图2) 为气旋性, 其槽线一直延伸到滇中地区, 滇西南500 hPa流场表现为反气旋性旋转, 反气旋的前部偏西气流与槽线附近的滇中偏南气流汇合, 在滇中地区与东南暖湿气流交汇, 引起高空气流辐合, 为降水提供水汽和动力条件。700 hPa的滇西南有明显的气流辐合, 辐合带还出现了低空急流, 使得辐合区进一步加强, 滇中与滇东地区的偏南气流带来了充沛的水汽。此次过程造成云南省西部地区普降大雨, 局部暴雨。7月12日14时—13日14时大理州境内6个站点累积降水量达到了大雨量级, 3个站点达到了暴雨量级, 其中最大累积降水量为大理站的64.2 mm。

2.2 GSI 同化系统评估

将探空数据分别与各层模式输入场进行同化, 由于各嵌套区域大小逐级递减, 因此, 三层区域中包含的站点数分别为19, 8和4个, 探空数据进入GSI同化系统后, 代价函数和梯度函数均收敛, 也即探空数据正确进入了同化系统当中。同化探空数据以后, 对模式的输入场进行了相应的调整, 图3表明, d01的地面温度场同化探空数据以后在四川盆地上为负增量, 起到降温作用, 高原地区同样为降温作用, 但负增量较小, 由于滇南地区距离探空站较远, 探空数据对该地区地面温度的影响作用不明显。U风分量在四川盆地也为负增量, 在盆地与高原交汇区则为明显的正增量, 其他地区增量较小, 可见同化探空数据对地面

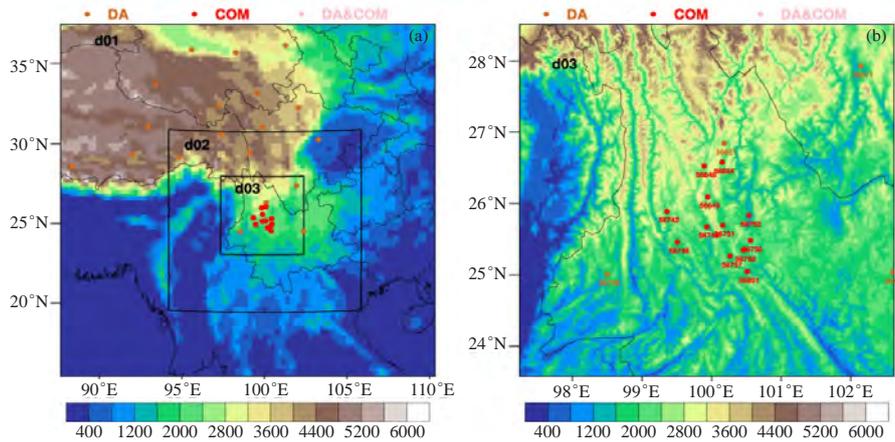


图1 模式区域设置 (a) 及最内层嵌套区域 (b) 地形高程和所用站点分布 (单位: m)

DA: 同化站点; COM: 对比站点; DA&COM: 同化与对比站点

Fig. 1 The domains setting (a) and in nest domain (b) of model with elevation and stations (DA represents data assimilation, COM represents comparison, DA&COM represents both DA and COM)

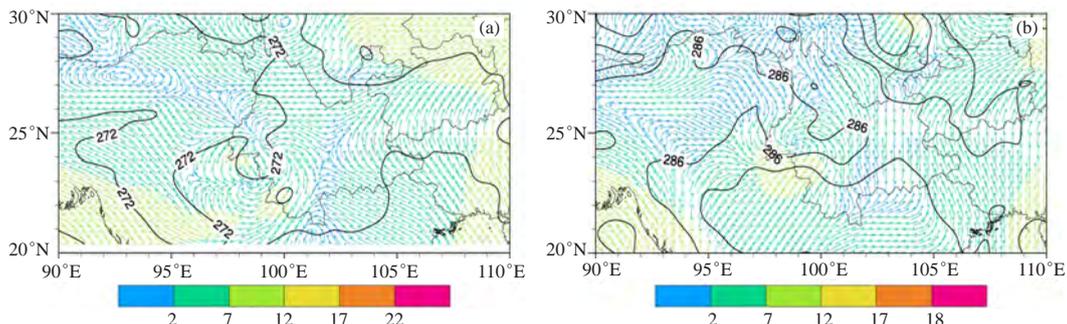


图2 2014年7月12日08时ECMWF Interim ($0.125^\circ \times 0.125^\circ$) 500 hPa (a) 和700 hPa (b) 流场 (填色, 单位: m/s) 和温度场 (等值线, 单位: K) 分布

Fig. 2 The stream (fill color) and temperature (contour) field of ECMWF Interim on 500 hPa (a) and 700 hPa (b) at 08 BT July 12, 2014

东西风的调整主要在四川盆地附近较为显著。V风分量与U风分量的增量分布恰好相反, 四川盆地为正增量, 云贵高原和青藏高原东部为负增量。地面比湿增量表现为青藏高原东部为正增量, 其他地区以负增量为主, 从比湿的最大增量层上来看 (图略), 青藏高原东部的正增量相对较小, 最大正增量在四川盆地东北部, 负增量集中在青藏高原腹地和东北地区, 其他大部分地区增量较弱。在垂直方向上各变量也有不同的增量强度, 也即在同一个地区的垂直方向上各变量并没有表现为向上或向下单调地增减, 而是在不同层次正增量和负增量均会出现, 这也是探空资料垂直方向非单调变化的体现。

从同化探空数据后的模式输入场中的各个变量增量来看, 探空数据的同化能够实际改变模式输入场的变量分布, 起到调整模式输入场的作用。

2.3 试验结果与卫星数据的对比

2.3.1 降水落区对比

图4中的TRMM卫星观测数据表明此次过程降水

呈带状分布, 我国境内在云南地区有一条明显的雨带, 自滇西北向滇东南分布, 雨带两端的滇西北和滇东南地区的累积降水量显著高于雨带中部的滇中地区, 该雨带的24 h最大累积降水量为25~50 mm。控制试验模拟了云南雨带的位置, 但是强度明显要比TRMM的降水强度大, 在云南东北部和川西、贵州和广西出现了明显的虚假降水。同化试验同样模拟出了云南雨带, 位置略有南移, 雨带强度得到削弱, 但是虚假降水范围进一步扩大, 虚假降水量也较大。

2.3.2 降水强度对比

从TRMM观测的3 h累积降水量来看 (图5), 云南的此次降水于2014年7月12日14时开始加强, 之后的17—23时的强降水分布与云南雨带对应, 表明此次云南的强降水持续时间约为6 h, 之后降水强度减弱, 系统逐渐消散。

控制试验 (图略) 中的强降水落区与TRMM的一致性较好, 降水在12日20时后开始显著增强, 至13日08时以后降水逐渐减弱, 强降水开始时间有所滞后,

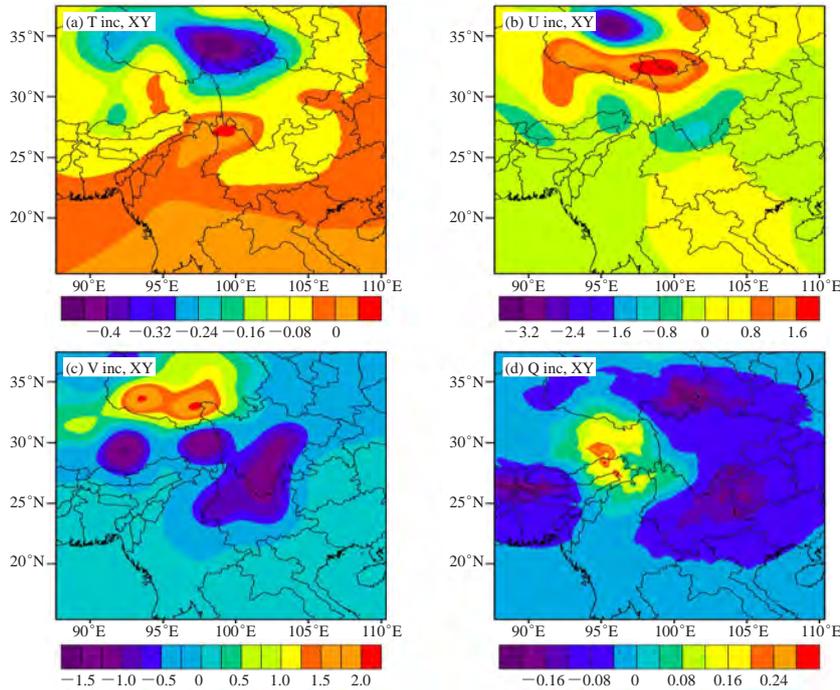


图3 同化探空数据后模式初始时刻d01输入场近地层的温度 (a, 单位: K)、*U*风分量 (b, 单位: m/s)、*V*风分量 (c, 单位: m/s) 和比湿 (d, 单位: g/kg) 增量
Fig. 3 The temperature (a), *U* wind component (b), *V* wind component (c) and special humidity in the WRF domain that assimilated sounding data at the initial time

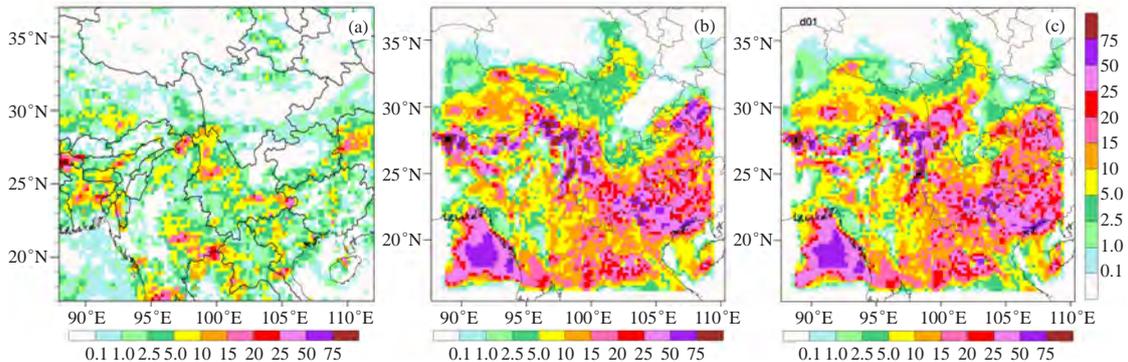


图4 2014年7月12日14时—13日14时TRMM卫星观测的累积降水量 (a) 与控制试验 (b) 和同化试验 (c) 的d01累积降水量分布 (单位: mm, 下同)
Fig. 4 Accumulation of precipitation from the TRMM (a), the control model (b) and the assimilation model (c) in domain one on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

持续时间达到了12 h。同化试验 (图6) 的强降水时间与控制试验相似, 但强降水落区有一定偏差, 表现为强降水落区主要集中在滇西北地区, 并且从模拟的降水量级来看, 同化试验和控制试验模拟的降水强度均高于TRMM的观测结果。从降水时间上来看, 控制试验和同化试验的强降水开始时间晚, 持续时间长。

2.4 试验结果与台站观测数据的对比

挑选控制试验和同化试验的模拟值中距离大理州12个地面气象观测站最近的格点降水量与实测降水量进行比较。从24 h累积降水量来看 (图7), 12日14

时—13日14时, 大理12个观测站 (obs) 除了56851站外均观测到了降水, 其中6个站达到了大雨, 其他站点为中雨以下。从模拟结果来看, 控制试验各站点降水量级基本偏大, 差别最大的站点为56746, 其d02的模拟值在观测值的2倍以上。从控制试验的平均均方根误差 (RMSD) 来看, d03的模拟误差是最大的, d01的平均RMSD最小。各站点的RMSD分布显示, 56649、56745和56752站的3个域的RMSD较为接近, 但是56752站各域的RMSD均是最小的, 56745站各域的RMSD均是最大的, 推测与地形高程有直接关系,

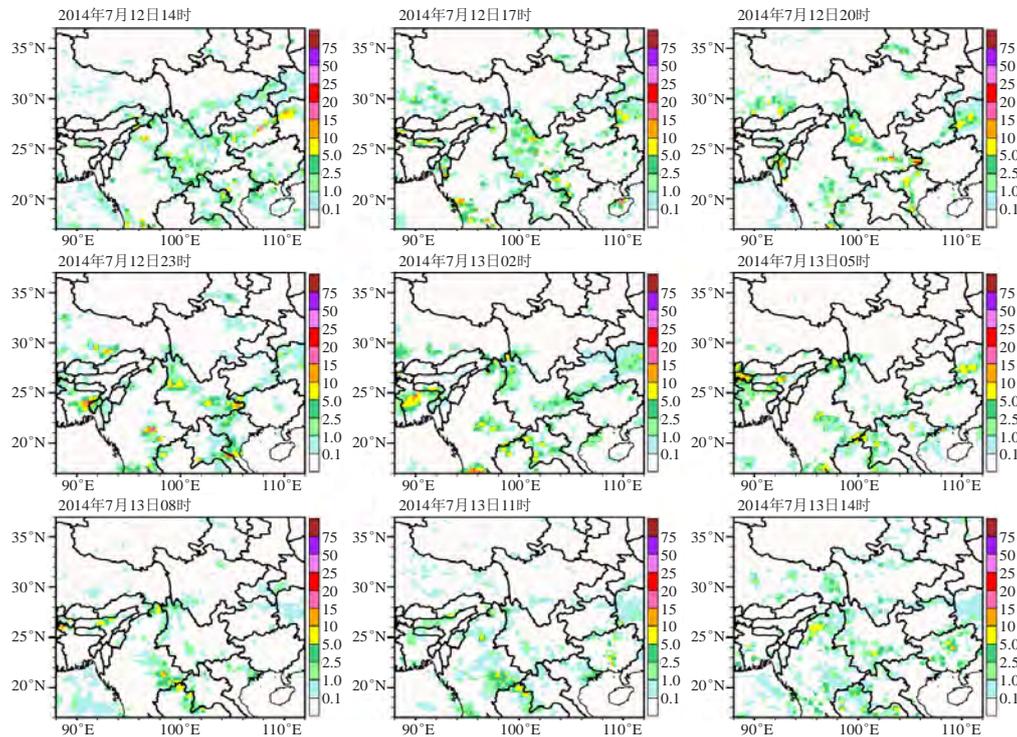


图5 2014年7月12日14时—13日14时TRMM卫星观测的3 h累积降水量

Fig. 5 The accumulated 3 hour precipitation from the TRMM on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

56745站位于苍山西面，上游为复杂的山地，下游为高大的苍山，地形复杂，对近地层环流的扰动影响非常大，56752站则处于低海拔地区，与周围的地形高度差也较小，地形对局地环流的影响相对较弱。其他站点的3个域的RMSD均有一定差异，这些站点位置均在高海拔地区，站点周围均存在海拔高差较大的山体，随着模式分辨率的提高，对这些山体的识别程度不同，因此也会造成均方根误差的差异性。同化试验中，各域模拟的累积降水量均得到了显著减少，特别是实况降水为小到中雨的站点，同化试验的模拟累积降水量与实况已非常接近，但是降水量级为大雨以上的站点，同化试验的模拟值比实况值要小，分析这几个站点发现其地理位置均处于高海拔地区，并且四周山谷和盆地交错分布且水平距离较小，海拔高差较大，使得模式模拟更加困难。与控制试验相比较，同化试验的平均RMSD显著减小，各站点的RMSD也相应的减小，并且d01和d02的RMSD普遍比d03的小，这可能与同化的站点数有关系。总之，同化探空数据能够显著改进此次降水模拟中累积降水量的量级，使得累积降水量更接近实况。

从控制试验的小时降水量来看（图略），模拟的各小时降水量基本比实况降水量大，而且在无降水时段内，模拟产生了较强降水，从而导致了累积降水量偏大。同化试验模拟的各域的站点小时降水量得到

了减小（图8），并且对于日降水特征为单峰值的降水类型而言，同化试验的d01也较好地模拟出了降水峰值，虽然峰值出现时间有所推迟，但模拟的峰值降水除了56742和56745站与实况有较大出入外，其他站点的峰值降水与实况已较为相近，d02和d03也没有模拟出单峰型降水的峰值，这个原因可能是由于d01中使用了更多的探空站数据，使得d01能够更加接近真实降水情况。对于多峰值降水而言，控制试验和同化试验均不理想，在无降水（56851站）或者弱降水（56757站）地区，控制试验和同化试验均有降水产生，可能与模式分辨率有较大关系，这需要在下一步工作中进一步研究。另外，实况降水量分布的巨大差异，也表明了此次降水过程局地环流对降水分布的影响是较为明显的，而在这样的小尺度复杂地形下，模式模拟性能还有待进一步提高。总的而言，同化试验的结果表明探空数据在模式中通过有效降低小时降水量，能够影响滇西复杂地形区降水过程中的小时降水量，使得模式对降水过程的模拟性能得到提高。

3 结论与讨论

本文使用WRF模式对2014年7月13日云南省西部地区的一次天气过程进行控制模拟试验，同时使用GSI同化系统，利用青藏高原及其周边地区19个L-BAND探空站的探空数据进行同化试验，将同化试验与控制试验分别和TRMM与地面台站观测数据进行对比，探

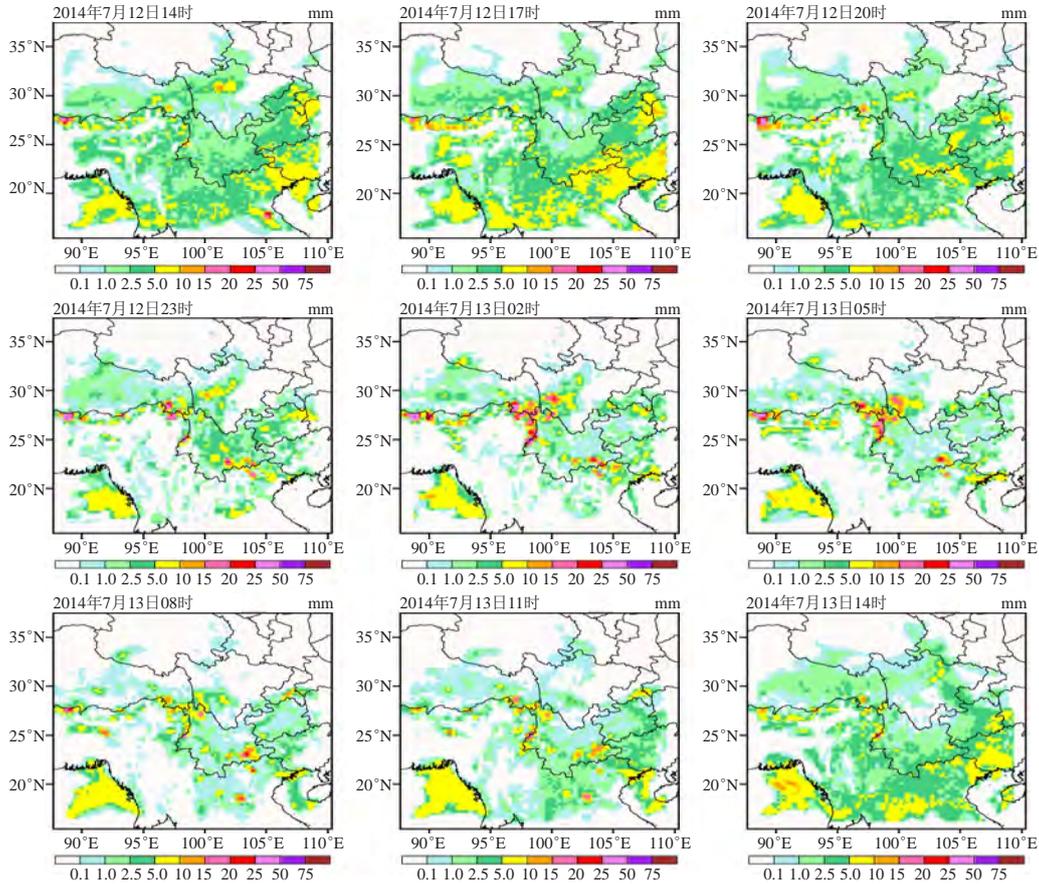


图6 2014年7月12日14时—13日14时同化试验d01的3 h累积降水量

Fig. 6 The accumulated 3 hour precipitation from assimilation modeling in domain one on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

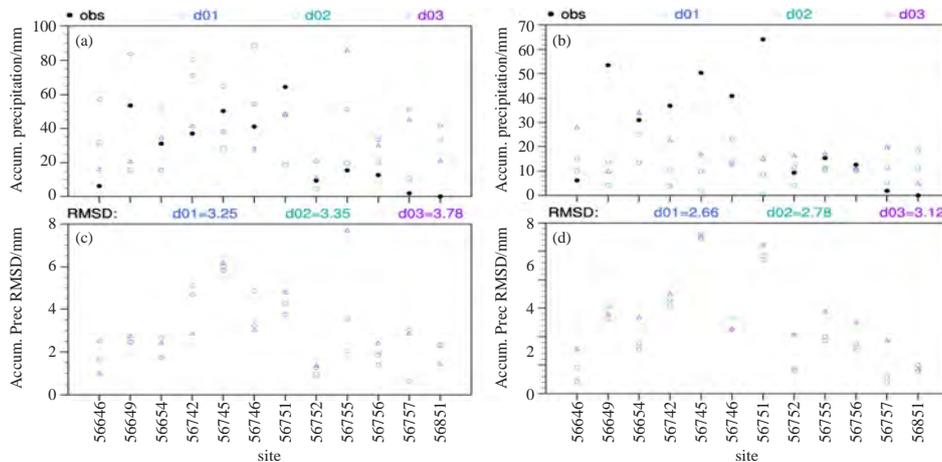


图7 2014年7月12日14时—13日14时控制试验 (a, b) 和同化试验 (c, d) 的各区域模拟的24 h格点累积降水量与对应站点累积降水量 (a, c) 及其均方根误差 (b, d)

Fig. 7 The accumulated precipitation (a, c) and root mean square deviation (b, d) from the control model (a, b) and the assimilation model (c, d) on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

讨WRF模式在复杂地形条件下的适用性，以及GSI同化系统在该地区的应用效果，得到以下结论：

1) 控制试验和同化试验都能模拟出此次降水过程中云南雨带的位置，但强度偏大。同化试验中雨带的降

水强度得到一定的订正而有所减弱，但位置略有南移，产生虚假降水的范围也进一步扩大。控制试验和同化试验的强降水开始时间比TRMM的观测晚6 h，且持续时间比TRMM长，控制试验的强降水落区与TRMM相似，

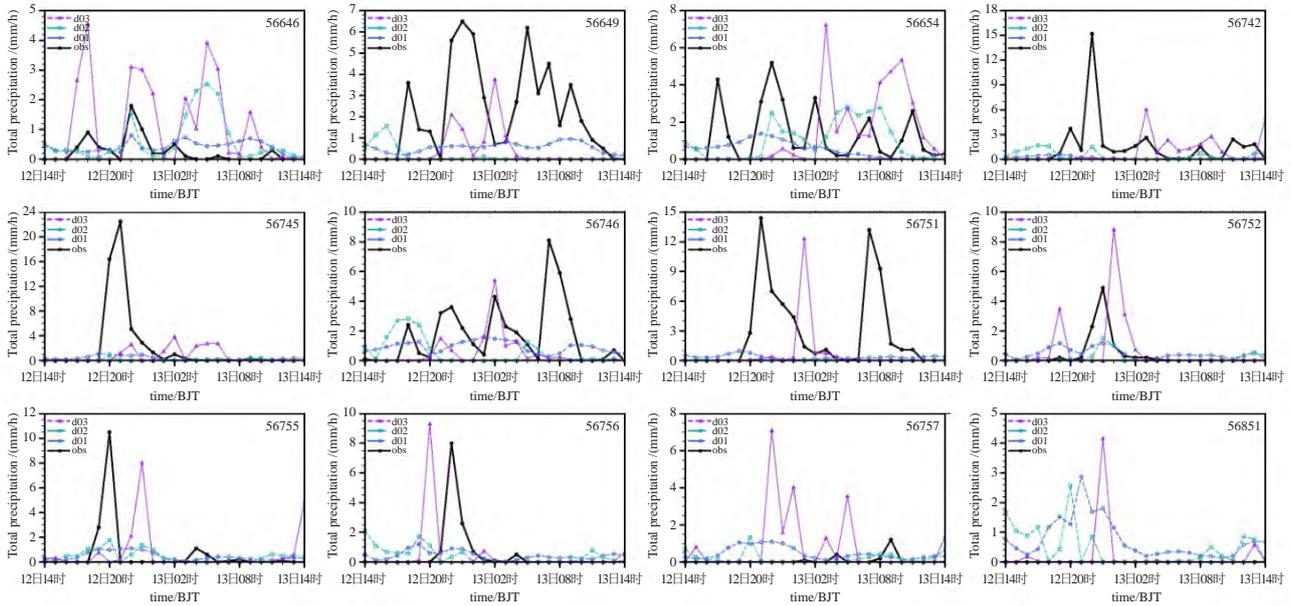


图8 2014年7月12日14时—13日14时同化试验各区域模拟的格点小时降水量与对应站点小时降水量
Fig. 8 One hour precipitation from the assimilation model in July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

同化试验的强降水落区往滇西北地区偏移。

2) 控制试验对于此次过程的小时降水量的模拟普遍偏大, 在实况无降水时段内, 也模拟产生了较强降水。同化试验模拟的各域的站点小时降水量相应减小, 并且对于单峰型的日降水类型具有一定的模拟能力, 峰值与实况较为接近。但是, 对于多峰值降水区, 以及无降水或者弱降水地区, 控制试验和同化试验均有较大误差。从24 h的站点累积降水量来看, 同化探空数据能够减小模式降水模拟数据中各站点的累积降水量及其RMSD, 对改善此次降水模拟中对比台站累积降水量的误差具有一定作用。

3) 总的来看, WRF模式对复杂地形条件下的局地降水具有一定的模拟能力, 同时通过使用GSI同化系统, 能够将探空数据有效同化到模式输入场中, 并对模式输入场各变量分布进行调整, 从而影响模式模拟结果。

由于本文中所用探空站点基本处于青藏高原腹地, 滇西地区仅有4个探空站进入了同化试验中。另外, 本文的模拟结果始终有降水量系统性误差, 这可能是由于物理参数的设置、地表粗糙度、分辨率以及模式算法等多方面的原因所致。此次模拟仅为一个个例试验, 虽然WRF模式在复杂地形条件下具有一定的模拟能力, 但不同的参数化方案、模式分辨率与下垫面的敏感性、同化站点的多寡与同化的数据源(探空、卫星、地面观测等)等问题均会对模拟结果产生影响, 下一步工作中, 我们将通过加入更多观测站点数据, 不断修改模式配置, 使得模式在复杂地形条件下对滇西地区的降水模拟能力得到进一步提高。

参考文献

- [1] Collier E, Immerzeel W W. High-resolution modeling of atmospheric dynamics in the Nepalese Himalaya. *Geophys Res Atmos*, 2015, 120: 9882-9896.
- [2] Wang D, Miao J F, Tan Z M. Impacts of topography and land cover change on thunderstorm over the Huangshan (Yellow Mountain) area of China. *Nat Hazards*, 2013, 67: 675-699.
- [3] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1191-1199.
- [4] 许建伟, 高艳红. WRF模式对夏季黑河流域气温和降水的模拟及检验. *高原气象*, 2014, 33(4): 937-946.
- [5] 段旭, 王曼, 陈新梅, 等. 中尺度WRF数值模式系统本地化业务试验. *气象*, 2011, 37(1): 39-47.
- [6] 何建军, 余晔, 刘娜, 等. 复杂地形区陆面资料对WRF模式模拟性能的影响. *大气科学*, 2014, 38(3): 484-498.
- [7] 许鲁君, 刘辉志, 曹杰. 大理苍山一洱海局地环流的数值模拟. *大气科学*, 2014, 38(6): 1198-1210.
- [8] 熊春晖, 张立凤, 关吉平, 等. 集合-变分数据同化方法的发展与应用. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 648-656.
- [9] 刘成思, 薛纪善. 关于集合Kalman滤波的理论和方法的发展. *热带气象学报*, 2005, 21(6): 628-633.
- [10] 马旭林, 陆续, 于月明, 等. 数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展. *热带气象学报*, 2014, 30(6): 1188-1195.
- [11] Developmental Testbed Center. Gridpoint statistical interpolation (GSI) user's guide for version 3.4. 2015, <http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/index.php>.
- [12] Zhu K F, Pan Y J, Xue M, et al. A regional GSI-based ensemble Kalman filter data assimilation system for the rapid refresh configuration: testing at reduced resolution. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 4118-4139.
- [13] 范水勇, 郭永润, 陈敏, 等. 高分辨率WRF三维变分同化在北京地区降水预报中的应用. *高原气象*, 2008, 27(6): 1181-1188.
- [14] 程磊, 沈桐立, 徐海明, 等. 地面加密自动站资料同化和数值模拟. *气象科学*, 2011, 31(1): 24-32.
- [15] 李华宏, 王曼, 曹杰, 等. 雷达资料在云南一次强降水过程中的三维变分同化试验. *热带气象学报*, 2014, 30(5): 881-893.
- [16] 张飞民, 王澄海. 利用WRF-3DVAR同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验. *高原气象*, 2014, 33(3): 675-685.
- [17] 郝民, 郭英华, 马再忠. 一次降水天气过程的GPS掩星资料在GSI同化系统中的应用. *高原气象*, 2010, 29(1): 164-174.
- [18] 段华, 潘晓滨, 臧增亮, 等. 基于GSI同化系统的卫星辐射率资料的同化试验. *干旱气象*, 2015, 33(6): 895-901.

FY-3星紫外臭氧总量探测仪 (TOU) 监测大气臭氧及吸收性气溶胶

王后茂¹ 王咏梅^{1,3} 王维和² 张卓¹

(1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2 国家卫星气象中心, 北京 100081;
3 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: FY-3卫星上搭载的紫外臭氧总量探测仪 (Total Ozone Unit, TOU) 是我国首台自主研发的用于全球臭氧总量监测的仪器, 自2008年5月至今已有3台仪器搭载在气象卫星 (FY-3A/FY-3B/FY-3C) 上成功发射并在轨运行。TOU利用紫外波段进行臭氧总量反演, 以获得全球臭氧的分布及其变化。2013年, 针对我国灰霾、沙尘等气溶胶污染事件频发的环境问题, TOU紫外探测数据被成功用于吸收性气溶胶指数 (AAI) 的反演, 之后TOU被用于我国吸收性气溶胶污染事件的监测, 为沙尘、灰霾等的预报提供监测数据。对TOU的数据和产品的质量和应用进行了介绍, 包括L1B数据、臭氧总量产品及AAI指数。在此基础上, 根据现有仪器的不足, 对后续仪器的发展方向进行了阐述。

关键词: 紫外臭氧总量探测仪, L1B数据, 臭氧总量, 吸收性气溶胶指数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.005

Ozone and Absorbing Aerosol Measurements by Ultraviolet Total Ozone Unit (TOU) of FY-3 Satellites

Wang Houmao¹, Wang Yongmei^{1,3}, Wang Weihe², Zhang Zhuo¹

(1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

3 University of Chinese Academy of Sciences, School of Astronomy and Space Science, Beijing 100049)

Abstract: Total Ozone Unit (TOU) is one of the main instruments on the FY-3A/B/C satellites and the first instruments in China to monitor daily total ozone coverage globally. They have been in orbit since May 2008. Total ozone is retrieved by ultraviolet radiance to observe global ozone distribution and its variation. Then, the absorbing aerosol index (AAI) is retrieved using 331 nm and 360 nm. Data from 2013 were used to observe atmospheric pollution such as smog, dust storm, and biomass burning in China. In this paper, the quality and application of TOU data are shown and discussed, which include L1B radiance, total ozone, and AAI. The direction of future instruments is discussed.

Keywords: ultraviolet total ozone unit, L1B data, total ozone, absorbing aerosol index

0 引言

近年来, 我国气溶胶大气污染事件 (如沙尘、灰霾等) 的发生越来越频繁, 尤其在我国北方地区, 除受沙尘天气的影响外, 受灰霾的影响也较大^[1]。灰霾等污染事件伴随的主要污染物为气溶胶和痕量气体 (O₃、SO₂及NO₂等), 因此对它们进行大范围的星载监测有助于我国大气环境污染的预报。

国际上对痕量气体和气溶胶的星载监测起步于20世纪70年代。1979年, TOMS (Total Ozone Mapping

Spectrometer) 探测仪利用大气紫外后向散射已连续进行近30年的全球大气臭氧总量反演, 并利用吸收性气溶胶指数进行吸收性气溶胶监测^[2-3]。之后, 一系列的星载紫外探测仪器被发射并进行痕量气体的探测, 如欧洲空间管理局的GOME-1^[4-5]、SCIAMACHY^[6]、GOME-2^[4], 以及美国的OMI^[3]和OMPS^[7-8]等。此外, 这些仪器还进行吸收性气溶胶指数的反演^[9-11], 用于吸收性气溶胶的监测, 如灰霾、沙尘、生物燃烧及火山灰等。

由中国科学院国家空间科学中心研制的臭氧总量探测仪 (TOU) 是我国自主开发研制的用于全球臭氧总量监测的仪器^[12], 于2008年开始搭载在气象卫星风云三号A星 (FY-3A) 发射, 之后的FY-3B星和

收稿日期: 2017年11月24日; 修回日期: 2018年5月3日
第一作者: 王后茂 (1986—), Email: hmwang@nssc.ac.cn
资助项目: 科技部国家重点研发计划课题 (2017YFB0502803)

FY-3C星先后搭载TOU发射成功, 至今已有三台TOU仪器在轨运行。TOU的成功发射和运行实现了我国臭氧总量探测从无到有的过程, 从根本上改变了我国大气臭氧探测和研究的现状, 为我国实时地提供全球的臭氧总量分布监测数据。研究表明, TOU与地基测量值之间的平均相对偏差为 $-0.16\% \pm 4.3\%$, 线性相关系数达到0.95, 其与美国同类仪器OMI的相对误差为2.52%^[13]。2013年, FY-3/TOU数据被成功地用于紫外吸收性气溶胶指数的反演, 进而进行我国灰霾、沙尘及生物质燃烧等吸收性气溶胶的监测。

TOU是一台采用固定光栅、狭缝阵列式Ebert-Fastie单光栅光谱仪^[14]。TOU空间扫描瞬时视场角为 3.6° , 对应的星下点空间分辨率为52.6 km, 行扫描像元个数为31个, 扫描范围为 $\pm 54^\circ$, 行扫描时间为8.16 s, 对应的刈宽为2908 km。TOU探测波段为6个(表1), 每个波段的狭缝函数接近于高斯型, 带宽(FWHM)在1.0~1.3 nm^[15]。TOU在轨辐射定标和波长定标是分别通过漫反射板和Hg线灯来实现的, 其采用三个漫反射板系统监测定标特性的变化, 用以减小星上漫反射板衰变对大气臭氧总量反演精度的影响, 漫反射板的辐射定标精度为3%。TOU利用监测296.8 nm Hg线强度相对变化的方法来实现对仪器波长漂移的监测, 波长定标精度为0.03 nm^[16]。

表1 TOU的光谱设置及特征
Table 1 Characteristics of the six TOU bands

Channel	Central wavelength/nm	Band width/nm
1	308.727	1.164
2	312.638	1.152
3	317.652	1.171
4	322.464	1.156
5	331.375	1.159
6	360.253	1.140

FY-3A/FY-3B/FY-3C TOU利用臭氧总量进行全球臭氧分布及变化的监测, 利用反演获得的AAI指数对吸收性气溶胶(如灰霾、沙尘和生物质燃烧等)的空间分布特征进行监测。本文将对TOU的探测原理、数据产品及应用进行综合介绍。

1 基本原理

1.1 臭氧总量反演原理

不同波长的紫外后向散射强度的差异与臭氧总量之间存在着密切关系, 基于这个关系进行TOU臭氧总量的反演。目前, 国际上主要有两种反演方法, 分别为TOMS^[17-18]和差分吸收DOAS^[19-20]算法。其中, TOMS算法有两个版本, 分别为TOMS V7^[17]和TOMS V8^[18], 其被应用于美国NIMBUS-7/TOMS和AURA/

OMI仪器进行臭氧总量的反演; 而DOAS算法则被应用于美国AURA/OMI仪器、欧州空间管理局GOME系列仪器^[19]及SCIAMACHY仪器^[20]。FY-3/TOU臭氧总量算法与TOMS V7基本类似, 但略有区别。TOU反演算法在不同的纬度带采用不同的通道组合来计算臭氧总量初估值, 再分别与360 nm通道组合对辐射定标的影响进行订正, 给出臭氧总量精确值^[21]。

利用太阳紫外后向散射反演臭氧和其他痕量气体时, 通常使用通道辐亮度与太阳辐照度的比值即N值

$$N = -100 \lg(I/F), \quad (1)$$

式中, I 为通道后向散射亮度, F 为相同通道的太阳辐照度。

TOU臭氧总量反演模式包括4个部分: 快速正演模式、表面特性计算、臭氧总量初估值计算和臭氧总量精确值计算, 具体方法在文献18中有详细描述。

1.2 吸收性气溶胶反演原理

吸收性气溶胶反演基于如下紫外吸收性气溶胶指数反演公式

$$AAI = -100 \lg \left\{ \left[\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \right]_{meas} \right\} + 100 \lg \left\{ \left[\frac{I_{\lambda_1}(A_{LER_{\lambda_1}})}{I_{\lambda_2}(A_{LER_{\lambda_2}})} \right]_{calc} \right\}, \quad (2)$$

式中, AAI为吸收性气溶胶指数, A_{LER} 为地表反照率, I 为强度值, λ 为波长, 下标 $meas$ 表示卫星测量值, 下标 $calc$ 表示模型计算值。基于辐射传输模型, 通过改变地表反照率($A_{LER_{\lambda_1}}$)计算获得波段 λ_1 的多个模拟观测值($I_{\lambda_1, calc}$), 将这些模拟观测值与 λ_1 的卫星量测值($I_{\lambda_1, meas}$)进行比较, 找到最接近于 $I_{\lambda_1, meas}$ 的 $I_{\lambda_1, calc}$ 所对应的 $A_{LER_{\lambda_1}}$ (此时 $I_{\lambda_1, meas} \approx I_{\lambda_1, calc}$)。由于 λ_1 波段的模拟值与观测值相等, 因此式(2)可以简化为

$$AAI = 100 \times \lg \left\{ \frac{I_{\lambda_2, meas}}{I_{\lambda_2}(A_{LER_{\lambda_2}})_{calc}} \right\}. \quad (3)$$

由于地表同一地物在紫外波段的地表反照率差异较小, 可以认为 $A_{LER_{\lambda_2}} \approx A_{LER_{\lambda_1}}$ 。因此由式(3)可得, 基于模型利用 $A_{LER_{\lambda_2}}$ 求得 λ_2 观测模拟值, 将其与 λ_2 实测值相结合即可求得吸收性气溶胶指数AAI。

AAI可以较好地进行云、雪或冰等亮背景区域的吸收性气溶胶的监测。由于灰霾、沙尘等气溶胶污染事件的发生常伴随有云, 可见光学监测方法无法有效地将云与吸收性气溶胶进行区分, 因而不能很好地进行污染事件的追踪与监测。而吸收性气溶胶在紫外波段具有较大的吸收差异, 云在紫外波段有强烈的散射作用, 吸收差异则非常小。因此, AAI可以很好地地将云和吸收性气溶胶区别开, 避免多云和阴天等带来的监测影响, 从而较好地进行云区的灰霾、沙尘等污染

事件的监测。

AAI值的大小与大气中具有吸收作用的气溶胶含量相关，因此AAI不仅可以定性反映气溶胶的多少，还可以反映气溶胶吸收性的强弱，这对气溶胶类型有很好的指示作用，为气溶胶污染事件的来源分析提供监测数据。

2 FY-3/TOU数据监测结果

2.1 L1B 数据

基于紫外波段的交叉定标方法^[22]，本研究对TOU L1B数据与欧州空间管理局MetopB/GOME-2（图1）和美国NPP/OMPS（图2）对应数据进行在轨交叉比较分析。交叉定标方法主要分为轨道预报、像元时空匹配、观测几何匹配、均匀性匹配及光谱转换与匹配等。其中，通过计算每个像元的时间和地理位

置来进行时空匹配，两台仪器的像元时间差异小于5 min，像元空间位置差异小于0.5个像元（25 km，TOU空间分辨率为50 km）^[20]。比较结果表明，TOU探测数据与国际其他标准仪器的对应数据具有很好的线性相关性（ R^2 一般大于0.96）。如图1所示，TOU 312 nm、317 nm、322 nm、331 nm及360 nm的辐亮度数据与GOME-2对应波段的数据具有很好的线性相关性（ $R^2 > 0.98$ ）。此外，交叉定标方程的斜率位于0.93~1.06，且截距均较小，这表明两台仪器的探测响应非常一致。

TOU 308 nm、312 nm、317 nm、322 nm、331 nm及360 nm的辐亮度数据与OMPS对应波段的数据具有很好的线性相关（图2）。此外，交叉定标方程的斜率位于0.86~1.06，方程的截距均较小，这表明两台仪器的探测响应非常一致。

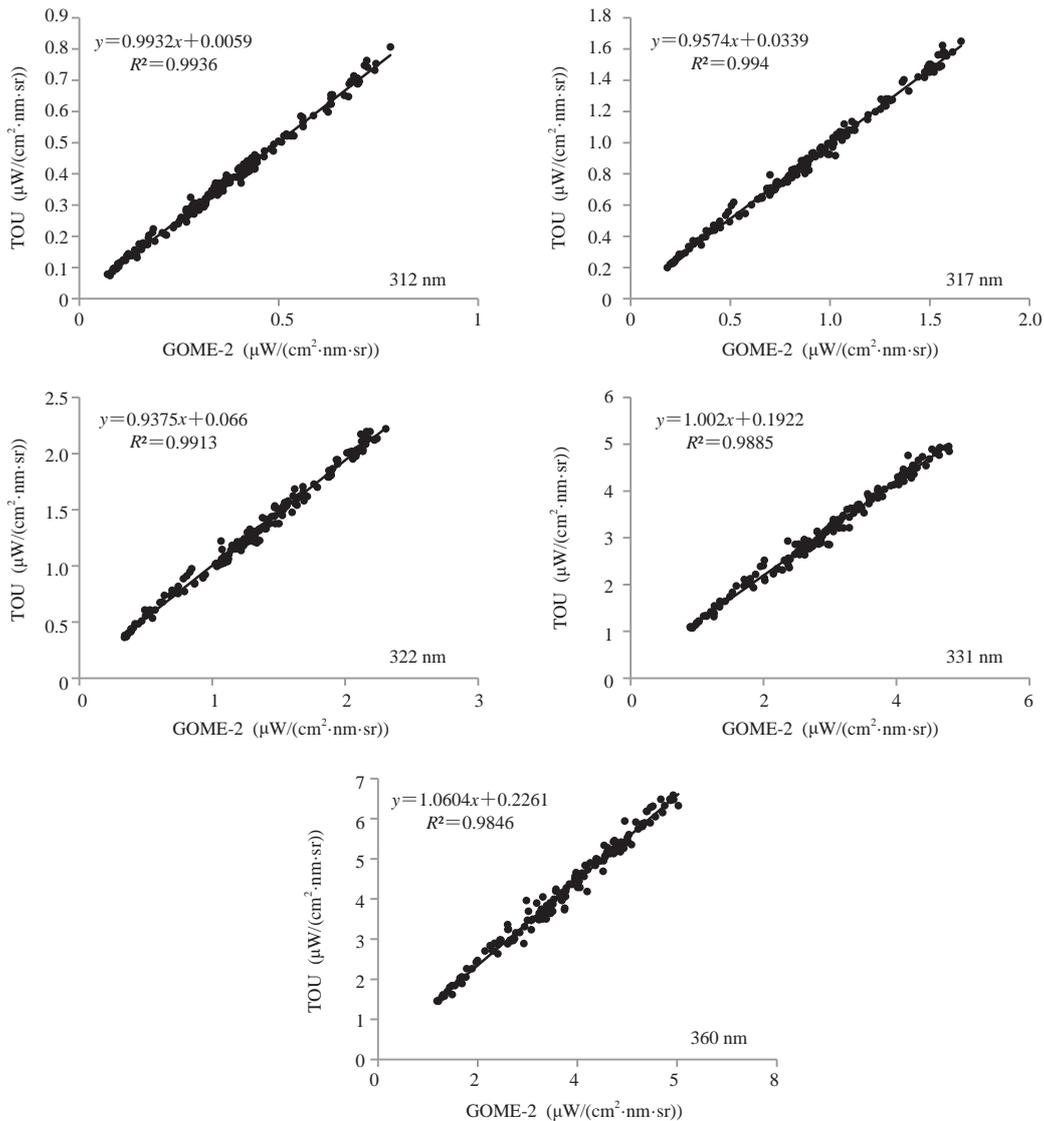


图1 TOU与GOME-2 L1B辐亮度数据交叉定标比较分析
Fig. 1 Inter-comparison of radiance between TOU and GOME-2

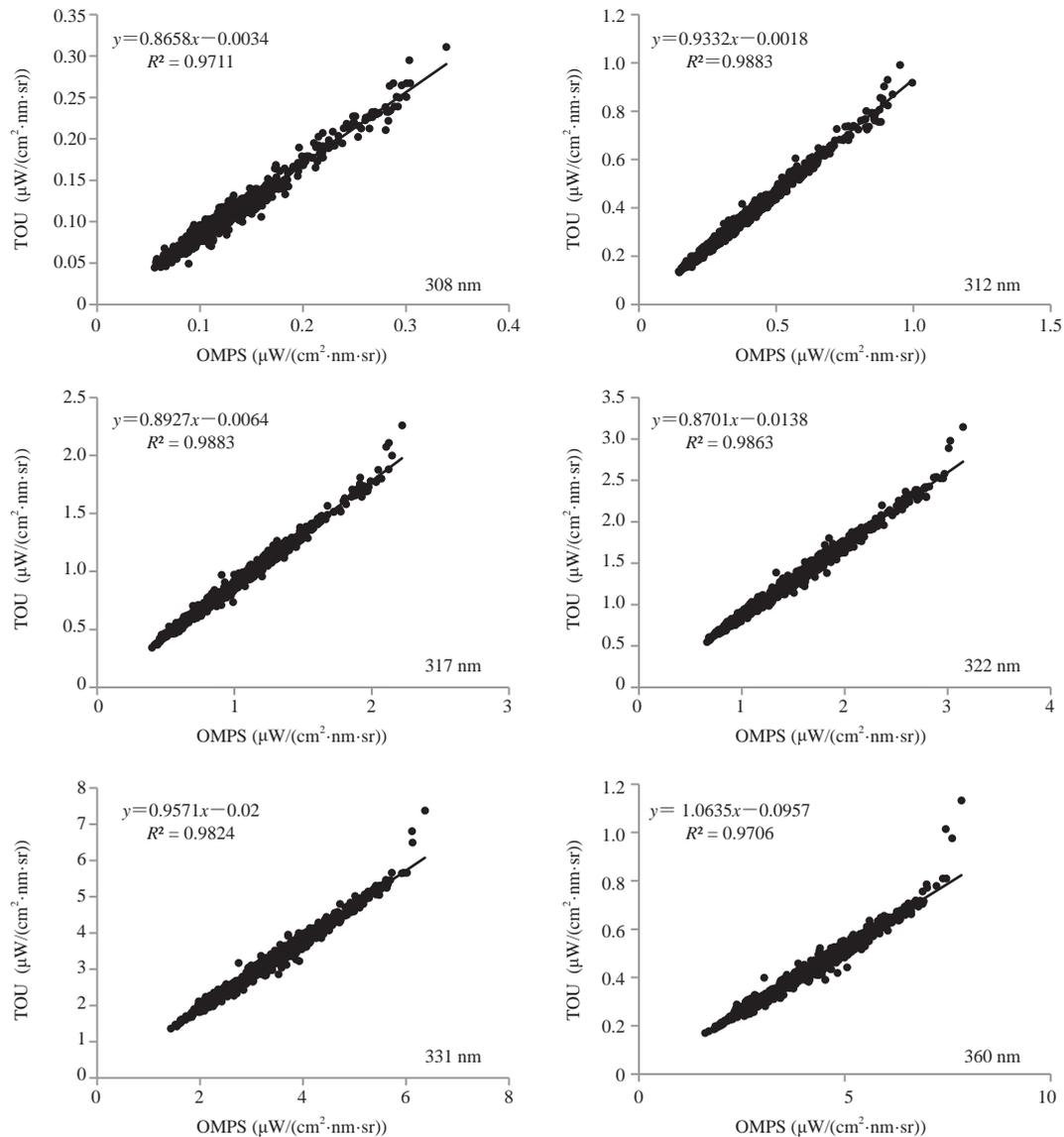


图2 TOU与OMPS L1B辐亮度数据交叉比较分析
Fig. 2 Inter-comparison of radiance between TOU and OMPS

2.2 臭氧监测

TOU通过臭氧总量来实现我国对全球大气臭氧分布的监测。因此,利用在轨测试期间TOU的观测数据,进行了全球臭氧总量反演与研究,尤其对南极及青藏高原等地区(图3)。图3为TOU 2008—2016年监测到的南极臭氧洞的年平均变化情况。可以看出,南极臭氧洞在2008—2011年较大,且没有明显的变化;2012和2013年,臭氧洞面积缩小很多;2014—2015年,臭氧洞面积扩大,且扩大面积较为明显;2016年,臭氧浓度增加,臭氧洞面积有所减小。

2.3 吸收性气溶胶监测

卫星AAI可以对连续空间分布的雾霾天气及其移动发展趋势进行监测,在空间覆盖方面具有优势,为

雾霾的产生、发展和消退等过程的研究提供实时大范围的观测数据。目前,紫外臭氧总量探测仪反演的AAI可以定性反映雾霾的强度分布情况,同时还有助于气溶胶类型的识别。

TOU是利用331和360 nm通道计算气溶胶指数,并以此进行灰霾、沙尘及生物质燃烧等吸收性气溶胶的监测。吸收性气溶胶指数能够将云、雪及冰等亮背景与吸收性气溶胶进行区分,较准确地进行灰霾和沙尘等的发生、发展和影响范围的遥感监测。

图4为2015年2月FY-3/TOU对我国灰霾进行连续空间范围变化监测的结果。由图可得,TOU可以很好地对我国北方地区产生的灰霾进行大范围的监测。

图5为2010年4月FY-3/TOU对我国沙尘型气溶胶

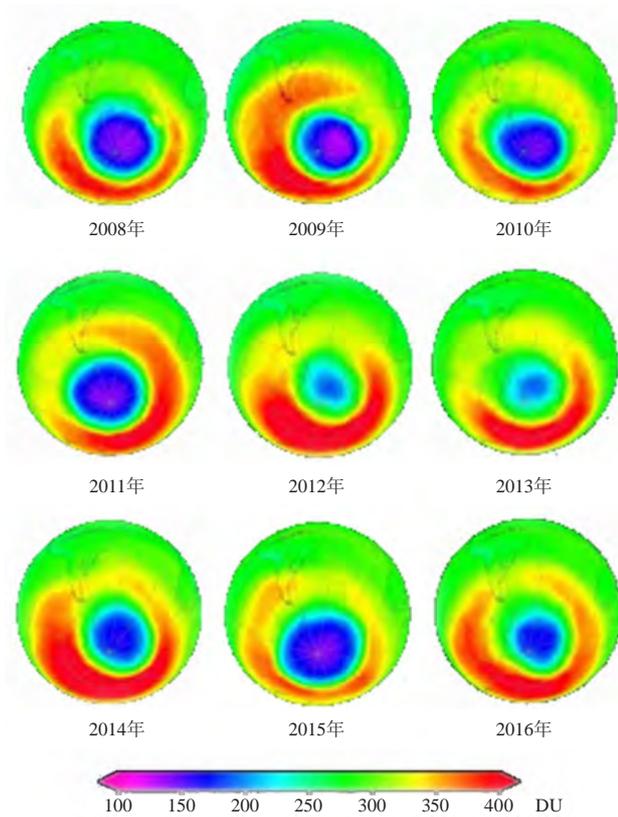


图3 FY-3卫星TOU南极地区臭氧总量监测(2008—2016年)
Fig. 3 Ozone measurements for Antarctic from 2008 to 2016 by FY-3/TOU

进行大范围连续空间变化监测的结果。由图可知，TOU可以很好地对沙尘分布等进行大范围监测。

3 结语

FY-3A/B/C卫星上搭载的TOU探测仪利用大气紫外后向散射进行全球臭氧总量的探测，自2008年，3台TOU已连续进行全球臭氧分布的特征监测，如南极臭氧洞和青藏高原等地区。TOU L1B辐亮度探测值与欧洲空间管理局仪器GOME-2和美国OMPS对应的L1B数据进行比较分析，它们之间具有很好的线性相关；而L2全球臭氧总量数据与美国仪器OMI的相对误差为2.52%，足以满足臭氧总量的探测要求。此外，2013年，基于TOU AAI成功实现了我国灰霾、沙尘等吸收性气溶胶污染事件的监测，并持续为我国大气环境监测和预报提供实时的监测数据。但TOU的波段仅为6个分离式通道，限制了其进行更多大气参数的探测。

FY-3/TOU AAI反演选择的波段为331和360 nm，它们将受到臭氧不同程度的吸收影响，这将导致反演获得的AAI产生一定的不确定性。此外，由于FY-3/TOU的空间分辨率为50 km×50 km，这不能很好地满足城市等人口密集区域的环境污染监测的要求。而且，TOU采用的是独立式多通道进行的探测，而不是采用连续的高光谱进行探测，这导致其不能应用于其他多种痕量气体（如SO₂、NO₂）的观测。因此，在今

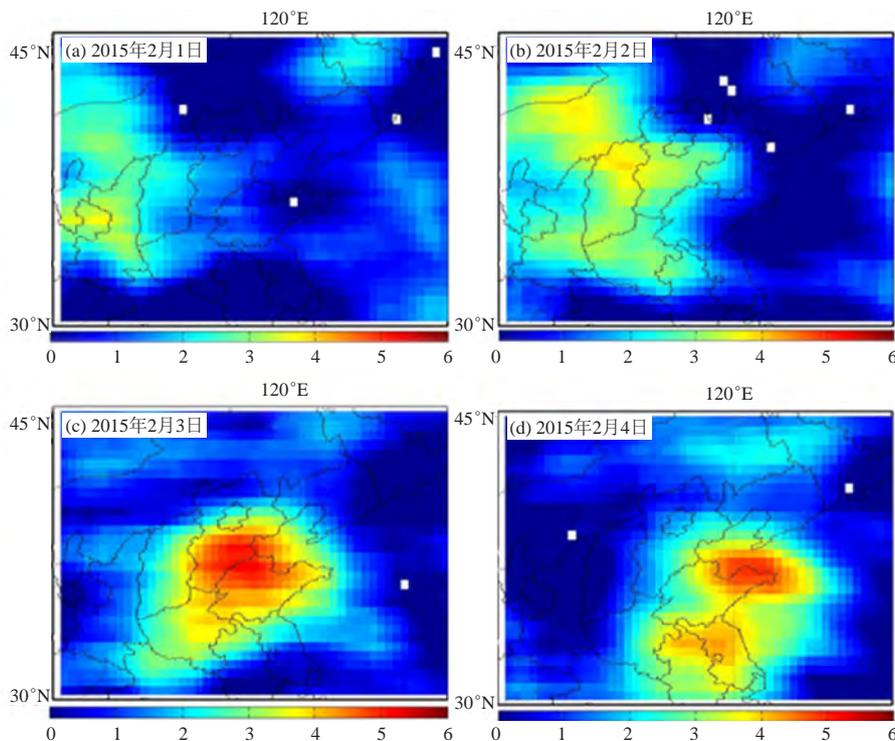


图4 紫外臭氧总量探测仪在我国华北地区的灰霾动态监测
Fig. 4 Smog observation from North China which were completed by using ultraviolet total ozone unit

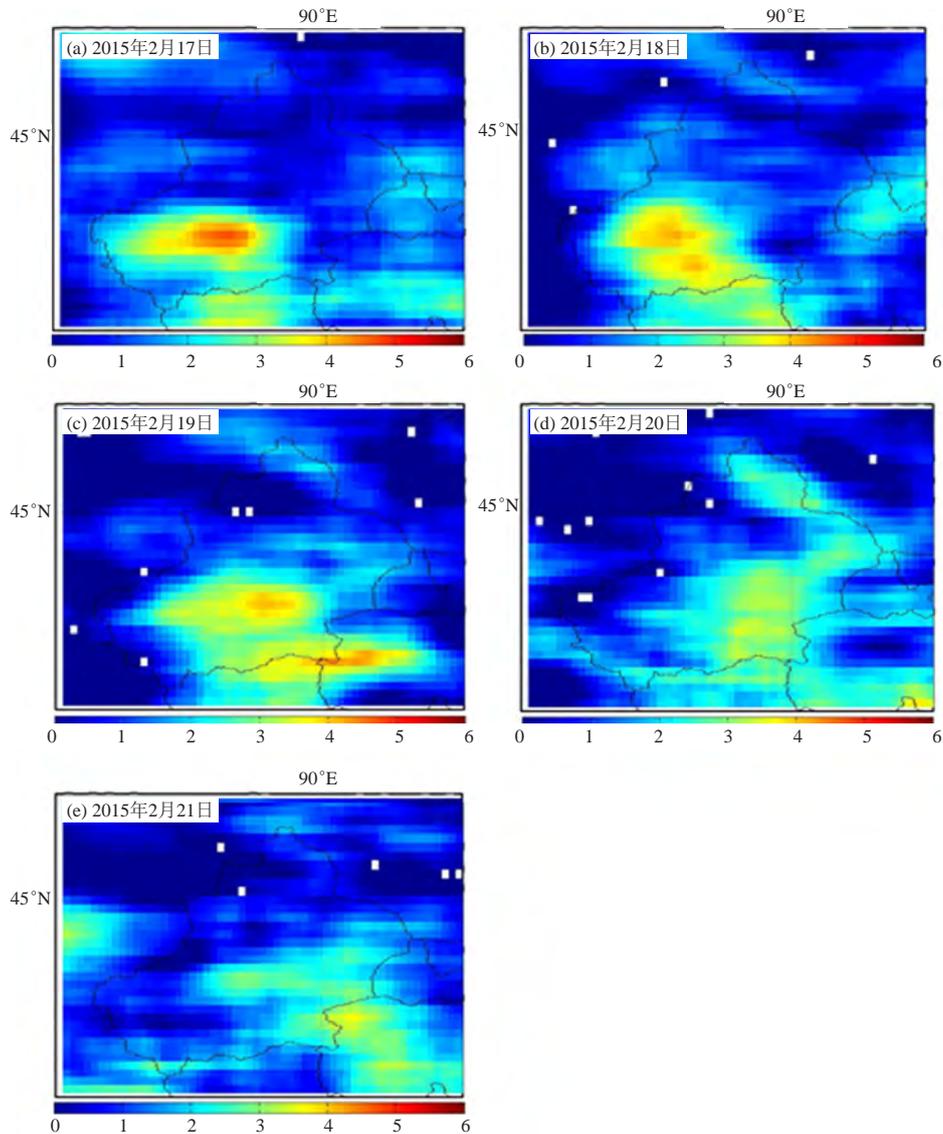


图5 2015年2月17日—21日紫外臭氧总量探测仪在我国西北新疆地区的沙尘动态监测

Fig. 5 Dust observation from northwest China using the ultraviolet Total Ozone Unit during 17–21 February 2015

后的仪器研制中，需要在波段的选取与扩展、空间分辨率的提高等方面进行改进。由于AAI的反演是基于两个不同波长对气溶胶吸收的差异，为了提高AAI的敏感性，波段选取应遵循以下原则：

- 1) 尽量避开臭氧吸收和Ring效应的影响；
- 2) 尽量避免波段间的地表反射率差异较大；
- 3) 有较强的辐射强度；
- 4) 可以兼顾与可见光气溶胶光学厚度的结合。

基于以上要求，综合考虑大气透过率在紫外波段的变化特性和太阳紫外后向散射辐射强度，在今后的仪器设计中，将采用紫外-可见光连续光谱的方式进行大气探测，光谱范围将覆盖紫外-短波可见光-近红外波段，以获得更多的大气反演参数，包括吸收性气溶

胶指数、气溶胶类型、气溶胶光学厚度及痕量气体，在分辨率的提高上主要分为以下几个方向：1) 光谱分辨率的提高，光谱分辨率将小于0.6 nm，可同时进行大气气溶胶相关参数和痕量气体的观测；2) 空间分辨率的提高，光谱分辨率满足气溶胶的探测需求，使得空间分辨率小于7 km；3) 光谱分辨率和空间分辨率的同时提高。

参考文献

- [1] 叶瑜, 李秀央, 陈坤, 等. 大气气溶胶光学厚度与大气污染物及气象因素关系的时间序列研究. 气候与环境研究, 2011, 16(2): 169-174.
- [2] Heath D F, Krueger A J, Roeder H A, et al. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUS. G Opt Eng, 1975, 14: 323-331.
- [3] Levelt P F, Van den O ord G H J, Dobber M R, et al. The ozone monitoring instrument. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44(5): 1093-1101.

- [4] Burrows J P, Mark Webber, Michel Buchwitz, et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission concept and first scientific results. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 151-175.
- [5] M de Graaf, P Stammes, O Torres, et al. Absorbing Aerosol Index: Sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D01201.
- [6] Bovensmann H, J P Burrows, M Buchwitz, et al. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 127-150.
- [7] Remund Q P, D Newell, J V Rodriguez, et al. The Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS): On-orbit calibration design. *Proc SPIE*, 2004, 5652: 165-173.
- [8] Flynn L, C Long, X Wu, et al. Performance of the Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) products. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 6181-6195.
- [9] Herman J R, P K Bhartia, O Torres, et al. Global distributions of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *J Geophys Res*, 1997, 102(D14), 16911-16922.
- [10] Torres O, P K Bhartia, J R Herman, et al. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation, Theoretical Basis. *J Geophys Res*, 1998, 103, 17099-17110.
- [11] Torres O, P K Bhartia, J R Herman, et al. A long term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *J Atm Sci*, 2002, 59, 398-413.
- [12] 王咏梅, 王英鉴, 王维和, 等. FY-3卫星紫外臭氧总量探测仪. 科学通报, 2009, 54(23): 3778-3783.
- [13] 刘利, 郑向东, 陈树, 等. 风云-3A卫星TOU臭氧总量地基对比研制分析. *空间科学学报*, 2015, 35(6): 696-706.
- [14] Wang W H, Zhang X Y, Wang Y M, et al. Introduction to the FY-3A Total Ozone Unit (FY-3A/TOU): Instrument, performance and results. *Int J Remote Sens*, 2011, 32(17): 4749-4758.
- [15] www.eumetsat.int/website/home/satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/GOME2/index.html
- [16] 王飞, 刘毅, 蔡兆男, 等. 利用GOME-2卫星数据反演对流层臭氧. *遥感技术与应用*, 2016, 31(2): 316-323.
- [17] McPeters R D, Krueger A J, Bhartia P K, et al. *Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*. 1993.
- [18] Bhartia P K. *OMI Algorithm Theoretical Basis Document, Volume II, NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, USA ATBD-OMI-02, Version 2.0*. 2002
- [19] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 151-175.
- [20] Eskes H J, van der A R J, Brinksma E J, et al. Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat. *Atmos Chem Phys*, 2005, 5(4): 4429-4475.
- [21] 王维和, 张兴赢, 安兴琴, 等. 风云三号气象卫星全球臭氧总量反演和真实性检验结果分析. *科学通报*, 2010, 55(17): 1726-1733.
- [22] 王后茂, 赵其昌, 胡秀清, 等. FY-3A/TOU与Metop-B/GOME-2在轨交叉定标检验分析. *光学学报*, 2017, 37(1): 128003-1-9.

(上接7页)



图1 Google展位

广泛关注, 美国乔治华盛顿大学的学者在这次会议上介绍了IBM量子计算的一些进展情况, 包括一些正在研究的算法及可供公众在量子设备上使用的开源软件包。

亚马逊公司的云服务在美国地球系统科学中得到了广泛应用, 大量地球数据信息都可以通过亚马逊的云系统存储和获取。在本次AGU会议上, 美国GMRT (The Global Multi-Resolution Topography Synthesis) 团队介绍了运行在亚马逊云上的全球多分辨率地形合成信息, 汇总了各种不同分辨率的陆地高程和海底测深数据, 且不断根据新的资料进行更新, 对地球科学研究有很高的应用价值。

结合以上介绍内容和我国下一步气象业务和科技发展情况, 提出以下参考建议。

1) 注意加强数据业务建设。无论是从科研还是业务需求角度看, 数据信息都成为越来越关键的环节, 需要加强总体设计、建设、管理、应用。在未来的建设发展中, 数据建设应独立于探测系统和计算网络系统, 尽管有相当大的关联性, 但仍有许多独立特征是需要单独考虑的, 应作为相对独立的业务功能发展。

2) 系统考虑卫星、雷达等遥感探测系统的业务建设。本次会议涉及气象小卫星、雷达卫星、相控阵雷达、激光雷达、云雷达等内容, 这些领域有些已比较成熟, 有些处于起步阶段, 我国也已开始有相关发展, 在未来的气象探测领域可能将发挥重要作用和影响, 需要予以关注, 并在我国的气象业务设计中统筹规划和发展。

3) 在业务科研与业务建设中注意气候系统各圈层相互影响问题。AGU会议将地球系统各领域的进展和成果放在一起交流, 本身就凸显了其相互间密切相关, 无论是地球系统、气候系统、生态系统、气候变化等问题, 都需要考虑各领域之间的相互作用和影响问题。如何把握好气象业务、科研的定位和拓展, 及与其他部门的合作, 需要做好系统的规划设计。

4) 关注人工智能技术的进展。智能技术如何在气象领域发挥作用, 需要一个探索和实践过程。但从目前的进展情况看, 在一些复杂、突变、不确定等问题的处理上确实可以发挥作用, 国内外都取得了相当多的成果, 应予以重视并加强在这一领域的设计和引导, 是发展智慧气象的重要途径。

(作者单位: 中国气象局)

风云四号静止轨道气象卫星成像仪 典型观测区域设计

赵磊 商建 冯小虎 张志清
(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 风云四号气象卫星是我国新一代静止轨道气象卫星, 采用三轴稳定姿态控制方式, 极大地提高对地观测精度及观测频次, 同时也对有效载荷观测模式的灵活设计提出了更高要求。星上装载的静止轨道辐射成像仪是我国静止轨道气象卫星携带的同类仪器中最为先进的。利用最先进的观测仪器, 提高观测效率, 在气象服务中发挥更大的作用是气象卫星应用的根本。深入探讨了风云四号静止轨道气象卫星成像仪的工作模式, 首次针对不同的观测需求提出了灵活的成像仪观测区域设计方案, 有效满足典型区域的不同观测需求, 在成像仪在轨测试中发挥了重要作用, 为开展业务运行奠定了坚实的基础。

关键词: 风云四号, 气象卫星, 成像仪, 观测区域设计, 区域成像

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.006

Typical Observation Area Design of FY-4 Geostationary Meteorological Satellite Imager

Zhao Lei, Shang Jian, Feng Xiaohu, Zhang Zhiqing
(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Fengyun-4 (FY-4) is a new generation of geostationary meteorological satellite in China. The newly used three-axis stabilized attitude control platform can greatly improve observation precision as well as frequency. It also puts forward improved requirements towards flexible observation mode design of the instruments. Advanced geostationary radiation imager (AGRI) is the most advanced equipment of its kind. Making good use of advanced equipment and improving observation efficiency play an important role in meteorological services, which is the essence of the meteorological satellite application. This paper discusses the observation modes of the FY-4 imager, and puts forward flexible area observation schemes for different needs for the first time. These flexible observation schemes can satisfy different observation requirements over typical areas. This research plays an important role in the FY-4A in orbit tests, which lays a foundation for AGRI's daily operation.

Keywords: FY-4, meteorological satellite, imager, observation area design, regional imaging

0 引言

2016年12月11日, 我国新一代静止轨道气象卫星的首发星风云四号A星由长征-3B运载火箭发射升空。它采用大型三轴稳定姿态控制平台, 代替第一代静止轨道气象卫星风云二号采用的自旋稳定平台, 可以大大提高对地观测精度及观测频次, 实现技术上的重大跨越, 提高我国静止轨道气象卫星的探测水平。卫星的辐射成像通道由风云二号的5个增加到14个, 接近欧美第三代静止气象卫星的16个通道。风云四号

还配备了有912个光谱探测通道的干涉式大气垂直探测仪, 可在垂直方向上对大气结构实现高精度定量探测, 这在国际上尚属首次。

风云四号卫星采用的大型三轴稳定姿态控制平台, 使其可以装载多种有效载荷, 包括先进的静止轨道辐射成像仪(简称“成像仪”)、静止轨道干涉式红外探测仪(简称“探测仪”)、闪电成像仪和空间环境仪器组。其中, 成像仪的性能是我国静止轨道气象卫星携带的同类仪器中最先进的; 探测仪是国际上第一台装载在静止轨道气象卫星上使用的同类仪器; 闪电成像仪是国内首次装载在卫星上, 可对大气中发生的闪电进行连续监测。首发星为科研试验卫星, 其主要任务是: 1) 获取地球表面和云的多光谱、高精度定量观测数据和图像, 特别是高频次的区域图像;

收稿日期: 2018年8月15日; 修回日期: 2018年10月18日
第一作者: 赵磊(1980—), Email: zhaolei@cma.gov.cn
通信作者: 商建(1983—), Email: shangjian@cma.gov.cn
资助项目: 科技部国家重点实验室科研仪器专项资金子课题(412412)

全面提高对地球表面和大气物理参数的多光谱、高频次、定量探测能力；2) 实现大气三维结构探测，获得垂直分辨率和精度更高的温度和湿度参数；3) 实现闪电成像观测，获取观测覆盖区范围内的闪电分布图；4) 利用星载转发器进行卫星图像和产品的广播分发和自然灾害警报信息发布；5) 利用数据收集系统自动收集多种地球环境参数资料；6) 监测太阳活动和空间环境，为空间天气预报业务和研究提供观测数据^[1]。

三轴稳定卫星平台可以实现仪器的灵活观测，大大提高观测效率。相比于我国风云四号气象卫星携带的成像仪AGRI (Advanced Geostationary Radiation Imager)，国外同类静止轨道三轴稳定卫星中，美国GOES-R卫星携带的成像仪ABI (Advanced Baseline Imager) 与AGRI性能相近，分辨率更高，频段略多，在观测任务设计上都综合考虑了观测区域范围和观测频次，对地观测模式包括全圆盘观测、美国大陆观测和中小尺度区域观测^[2]；日本Himawari卫星携带的成像仪AHI (Advanced Himawari Imager) 则设计了全圆盘观测和多种不同的区域观测^[3]。

针对风云四号气象卫星首发星装载的核心仪器——成像仪，为了发挥三轴稳定卫星平台高效率观测的特点，最大化仪器的观测灵活性，本文在探讨成像仪复杂工作模式的基础上，考虑不同的观测需求，开展灵活的观测区域设计，包括中国大陆区域、中国大陆+海区、东海海域、东南亚+南海海域、澳大利亚及其周边海域、新版中国地图区域，提出切实可行的适用于风云四号成像仪的观测区域设计方案。

1 成像仪的观测特点

成像仪采用双扫描镜结合三反射光学系统、线列探测器和辐射制冷器的扫描成像技术。来自地球景物的辐射经南北扫描镜和东西扫描镜反射到离轴三反主光学系统 (图1)，通过中继光学系统将入射辐射分裂成3个可见波段、2个近红外波段和8个红外波段。

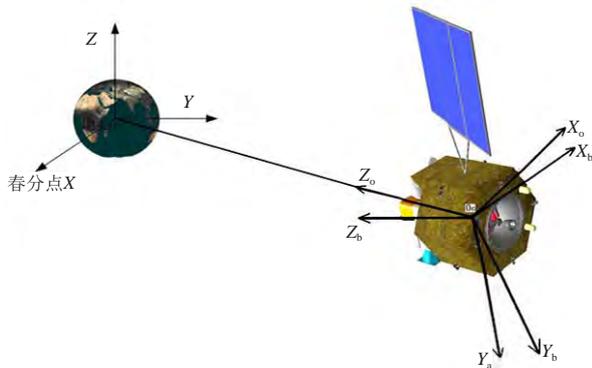


图1 成像仪探测示意图^[4]
Fig. 1 AGRI schematic diagram

探测器把景物辐射转换成电信号，经过前放、主放和滤波电路，在扫描同步信号的控制下，进行A/D转换并缓存，通过背景和噪声抑制、图像配准、校正等环节，将数字量编码送到卫星平台，经数传分系统下传^[4]。

1.1 工作模式和观测时间

成像仪的主要工作模式分为4种：扫描模式、定标模式、指向模式和调试模式，其中最重要的两类模式为扫描模式和定标模式。

扫描模式包括地球全圆盘常规成像、区域常规成像、地球全圆盘高灵敏度成像、区域高灵敏度成像和月球成像等。几种成像模式分时进行，设计观测任务时根据观测需求和时间约束，在某个时段内选取其中的一种成像模式，把观测区域范围和精确的起止时间通过观测指令上注卫星，操控仪器自动开展对地观测。成像仪在轨观测的最基本模式是全圆盘观测，即针对整个地球圆盘开展成像观测，确保以固定的时间频次获取整个地球圆盘的观测数据；在有特定区域观测的需求时，添加区域观测任务，针对指定的较小区域范围开展观测，以获取更高频次的观测数据，区域的位置和大小可以灵活设计，例如中国大陆区域、台风区域、海洋区域等任意感兴趣的区域。

定标模式包括冷空间定标、黑体定标、漫反射板定标和恒星敏感，用于获取定标所需的冷空、黑体、漫反射观测数据和定位所需的恒星观测数据，实现成像仪的高精度辐射定标和几何定位。

详细工作模式为：

1) 地球全圆盘常规成像：观测范围约 $21^{\circ} \text{EW} \times 17.6^{\circ} \text{NS}$ ，有效图像范围为 $17.6^{\circ} \text{EW} \times 17.6^{\circ} \text{NS}$ ，观测时间约13 min，按常规扫描方式完成对地球全圆盘的观测。

2) 区域常规成像：按常规扫描方式完成对指定区域的观测。观测位置和区域大小任意可选，区域观测重复次数可调。最小观测区域 $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$ 。

3) 地球全圆盘高灵敏度成像：按高灵敏度扫描方式完成对地球全圆盘的观测。

4) 区域高灵敏度成像：按高灵敏度扫描方式完成对指定区域的观测。其他要求与区域常规成像模式相同。

5) 月球成像：按常规扫描模式完成对月球全圆盘的观测。

6) 恒星敏感：恒星敏感范围 $23^{\circ} \text{EW} \times 21^{\circ} \text{NS}$ ，具有观测亮度不小于六等恒星的能力。

7) 黑体定标：扫描镜指向星上黑体，进行黑体定标。

8) 漫反射板定标：扫描镜指向漫反射板，漫反射板定标门展开，进行漫反射定标。

1.2 各工作模式下的运动特性

1) 地球全圆盘常规成像

当前设计的对地球全圆盘常规成像的观测时间约 13 min，因此观测范围设定为刚好能够覆盖整个地球的最小张角 $17.4^{\circ}\text{EW} \times 17.4^{\circ}\text{NS}$ ，为了确保地球边界信息的完整性，南北东西各加 0.1° 余量，范围约定为 $17.6^{\circ}\text{EW} \times 17.6^{\circ}\text{NS}$ ，由于需要定期进行冷空间定标，定标位置在地球东侧或西侧 0.5° 以上，图2以在西侧进行冷空间定标为例，全圆盘常规成像有效图像范围确定为 $18^{\circ}\text{EW} \times 17.6^{\circ}\text{NS}$ ，其中东西范围为地球西侧增加 0.5° ，东侧增加 0.1° ，按常规扫描方式完成对地球全圆盘的观测（图3）。

扫描镜运动定义西、北为正方向，东、南为负方向。春分、秋分前后地球东西两侧会出现较强的杂散光，届时考虑在东侧进行冷空观测，扫描起始位置相对应变为东北。其他时间默认以西北为扫描起始位置，东南为扫描结束位置。由于在扫描过程中冷空定

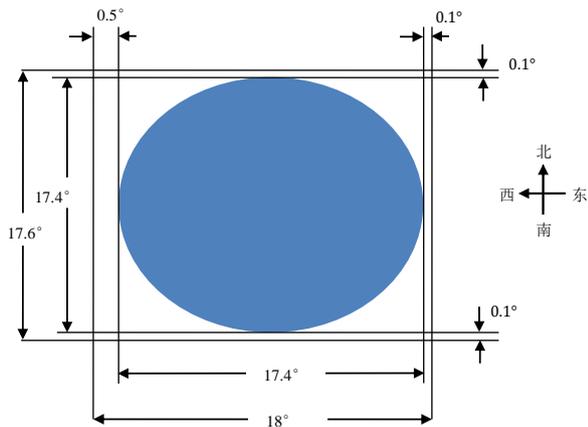


图2 地球全圆盘常规成像范围
Fig. 2 Full disk observation area

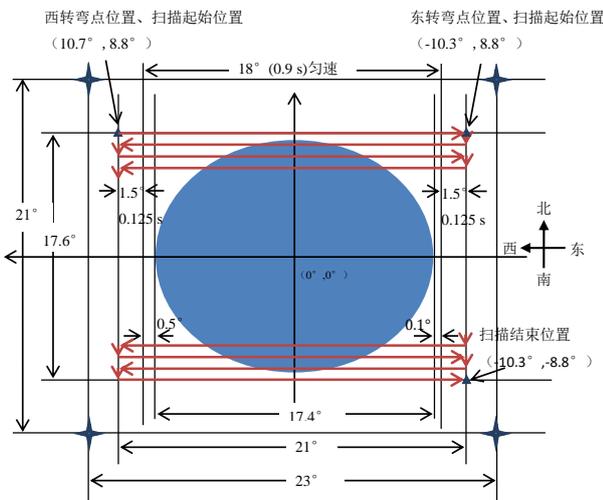


图3 地球全圆盘常规成像示意图
Fig. 3 Full disk observation diagram

标的耗时极少，因此默认地球全圆盘常规成像时每一行都进行冷空间定标观测，根据东西镜和南北镜的运动规律，精确计算每次快速指向和扫描所需的时间。

2) 区域常规成像

区域成像（图4）可以按照需求灵活指定成像的区域，每隔一定时间进行一次冷空间定标。

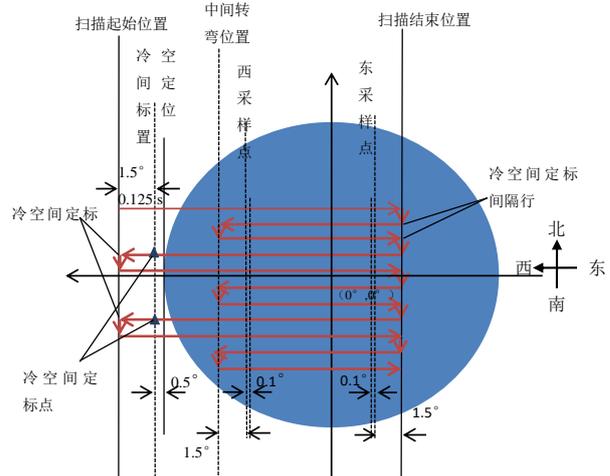


图4 常规区域成像示意图
Fig. 4 Area observation diagram

3) 地球全圆盘高灵敏度成像

与地球全圆盘常规成像扫描方式一致，只是扫描速度较慢。

4) 区域高灵敏度成像

与区域常规成像扫描方式一致，只是扫描速度较慢。可以按照需求灵活指定成像的区域，每隔一定时间进行一次冷空间定标。

5) 月球成像

根据月球预报的位置，在特定时间设计仪器的东西镜和南北镜指向月球区域开展常规观测或高灵敏度观测，与区域成像的要求相同。

6) 恒星敏感

依据指向模式命令扫描镜指向恒星经过的预定位置，进行恒星敏感。根据扫描镜运动规律和选定的观测颗数，计算指向每一颗恒星所需的时间和驻留时间，进而获得该观测任务的总时间。

7) 黑体定标

依据指向模式扫描镜指向冷空位置观测后，依据指向模式扫描镜指向位于星下点背面的黑体，驻留观测，驻留进行黑体观测。依据指向模式扫描镜再次指向冷空位置，驻留观测。

8) 漫反射板定标

依据指向模式扫描镜指向冷空位置观测后，依据指向模式扫描镜指向漫反射板，停留一定时间，进

行漫反射板定标。

9) 快速指向

南北、东西扫描镜快速运动过程如下：首先在短时间内加速至最大运动速度,然后再以该速度匀速运动，最后在短时间内减速，并停在预定位置。

加、减速过程采用1/2正弦周期。若快速运动角度范围很小，扫描镜将没有匀速运动过程。

10) 匀速段稳定时间

对于常规成像和高灵敏成像，进入匀速段后均在

短时间内实现扫描控制误差优于3角秒。

上述10种工作模式完成后，扫描镜均停在当前位置，等待后续指令。

2 成像仪典型区域设计

假定卫星定点于105°E，针对不同观测需求，设计了业务应用中可使用的六种区域扫描模式，分别是：中国大陆区域、中国大陆+海区、东海海域、东南亚+南海海域、澳大利亚及其周边海域、新版中国地图区域（图5）。

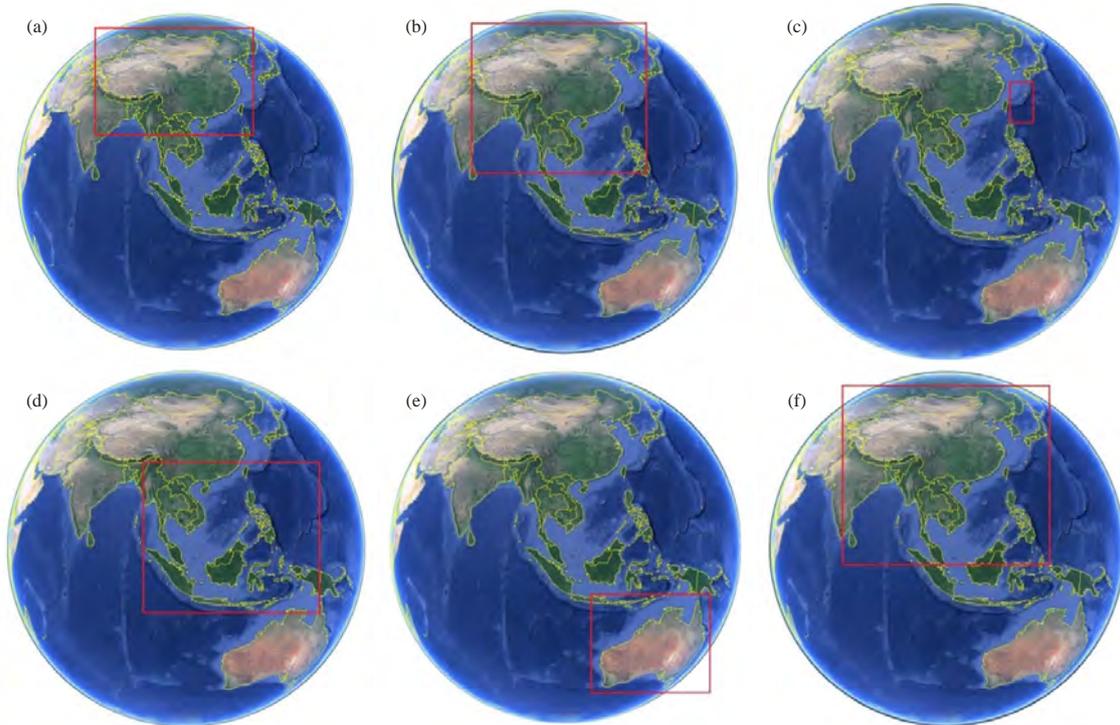


图5 典型区域设计：(a) 中国大陆区域扫描范围，(b) 中国大陆+海区区域扫描范围，(c) 东海海域区域扫描范围，(d) 东南亚+南海海域区域扫描范围，(e) 澳大利亚及其周边海域区域扫描范围，(f) 新版中国地图区域扫描范围
Fig. 5 Typical area design: (a) area of observation over China, (b) area of observation over Chinese mainland and sea region, (c) area of observation over the East China Sea region, (d) area of observation over Southeastern Asia and the South China Sea region, (e) area of observation over Australia and the surrounding sea, and (f) area of observation over China, the vertical map version

2.1 中国大陆区域

中国大陆区域是我国静止轨道气象卫星的最主要观测区域之一，也是天气预报的最主要分析对象。设计该区域的主要目的是对中国大陆区域进行高时间分辨率的扫描，获取大气和地表的高频次观测数据，充分发挥静止轨道卫星的优势。扫描范围设计为：17°—55°N，72°—136°E。根据扫描镜运动规律，精确计算所需扫描时间为189.3 s。

2.2 中国大陆 + 海区

为了对临近中国沿海地区的热带气旋等天气现象提前进行跟踪观测，需要设计一个含临近海域的观测

区域，即中国大陆+海区区域。设计该区域的主要目的是对中国大陆及海区进行高时间分辨率的扫描，获取陆地区域及海上台风区域的高频次观测数据。扫描范围：7°—55°N，73°—136°E。根据扫描镜运动规律，精确计算所需扫描时间为255.3 s。

2.3 东海海域

设计该区域的主要目的是针对东海海域台风的初生和发展阶段开展高频次观测。扫描范围：23°—34°N，125°—132°E。根据扫描镜运动规律，精确计算所需扫描时间为33.4 s。

(下转59页)

昆明长水机场气候特征分析

张序^{1, 2}

(1 中国国际航空股份有限公司运行控制中心西南分控中心, 成都 610202;

2 中国民航飞行学院航空运行专业技术及人才培养研究所, 广汉 618307)

摘要: 利用昆明市1951—2010年逐日气象数据, 采用回归分析法和Mann-Kendall突变分析法进行分析和检验, 确定了昆明市极端降水和极端温度天气事件。在此基础上, 对昆明长水机场极端天气背景下大雾天气航班安全运行开展研究, 并在对比昆明长水机场与原巫家坝机场大雾特点的基础上, 制定出航班安全运行的应对措施。研究表明, 近几年昆明市极端温度和极端降水事件呈现增多趋势; 因地形原因, 长水机场出现大雾的频率远高于原巫家坝机场; 大雾造成的低能见度天气背景下, 航班的安全运行需要航空公司各部门的通力协作。

关键词: 航空气象, 极端天气事件, 显著性检验, 大雾天气, 航班运行延误

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.007

Analysis of the Climatic Characteristics at Kunming Changshui Airport

Zhang Xu^{1,2}

(1 Southwest Sub-control Center Operation Control Center Air China Limited, Chengdu 610202

2 Civil Aviation Flight University of China, Flight Operation Institute of Professional Technics and Personnel Training, Guanghan 618307)

Abstract: Using regression analysis and Mann-Kendall sudden-change analyses, this research identified the extreme temperature weather and precipitation events in Kunming city based on a collection of meteorological data records from 1951 and 2010 from Kunming's meteorological station. Then, we outlined safe flight operations in the extreme weather conditions, especially for days with heavy fog at the Kunming Changshui airport. Finally, we provided some solutions to improve flight safety operations at the Kunming Changshui airport by comparing with the fog characteristics at the Wujiaaba airport. This research showed that: 1) extreme precipitation and temperature events of Kunming Changshui airport have been increasing in recent years, 2) The frequency of fog occurrences in Changshui was much higher than in Wujiaaba due to the surrounding landforms, and 3) flight safety operations need co-operation among relevant departments of the Airlines.

Keywords: aviation meteorology, extreme weather events, significance test, heavy fog, flight delays

0 引言

昆明长水机场(以下简称“长水机场”)多次因大雾造成航班大面积不正常而引发旅客群体事件, 长水机场地理环境与大雾天气的联系成为众多学者研究的课题。徐海等^[1]分析了大雾天气过程出现的天气背景和气象要素特征, 指出了昆明准静止锋影响下长水机场大雾天气特征。马艳等^[2]分析长水机场大雾天气的特点, 从机场相关部门的角度对大雾天气下如何更好地进行机场运行提出了建议。普锐等^[3]从地面观测资料特征、探空资料特征、天气形势入手, 提出了长水机场辐射雾观测工作中的应对方法和技巧。杨依莹^[4]用WRF数值模式模拟机场2015年12月24—26日大

雾天气的整个过程, 为民航运行和机场选址中的应用提供了新的途径和思路。

本研究通过对较长时间段气象元素的统计, 开展天气事件研究, 分析、总结长水机场形成大雾的原因, 梳理出长水机场大雾天气情况下航班安全运行及应对措施, 有利于提升民航运输的效率和安全性。

1 数据与方法

使用1951—2010年昆明地面气象观测站温度、降水、能见度和风向风速的数据。考虑到昆明市基本地面气象观测站的天气代表性与昆明长水机场略有差异, 大雾造成的低能见度天气对民航航班运行影响方面的气象数据则来源于长水机场和原巫家坝机场的航空例行天气报告(METAR)及终端机场天气预报(TAF)。

本研究使用的统计方法主要为普通线性回归分

收稿日期: 2017年11月28日; 修回日期: 2018年4月21日
作者: 张序(1982—), Email: zhangxulikeyou@126.com

析，以及利用Mann-Kendall检验法进行了突变检验。Mann-Kendall检验不需要数据遵从一定的分布规律，是一种非参数检验方法。

2 昆明市天气事件研究

2.1 昆明市降水事件研究

统计昆明市1951—2010年每年的降水事件发生频次，剔除为0的数据，得到23092条有效数据。经Excel统计得出降水事件发生频次的变化（图1），可以发现，在1951—2010年，降水最多的年份可达到1400 mm以上，最低时小于600 mm，年降水总量超过1200 mm的有13年，平均每4~5年会发生一次。

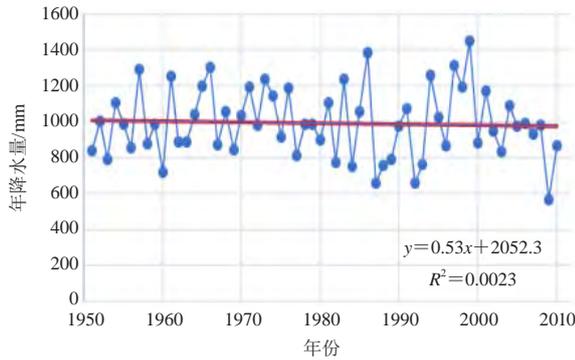


图1 昆明市1951—2010年年降水量统计

Fig. 1 Precipitation in Kunming between 1951 and 2010

图2为昆明市1951—2010年月平均降水量的分布，6—8月昆明市月平均降水量明显较多，这3个月集中了全年大部分降水。从9月开始呈下降趋势，表现出夏秋季降水丰富，冬春季降水少的季节性特点。

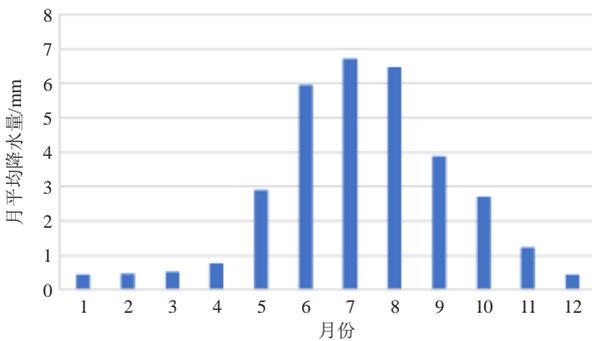


图2 昆明市1951—2010年月平均降水量分布

Fig. 2 The average precipitation in Kunming between 1951 and 2010

使用Mann-Kendall突变检验法对昆明市1951—2010年降水次数趋势进行了分析（图3），可以看出，1951—1987年呈现出一个缓慢上升的趋势，1987—2001年呈现出一个明显的下降趋势，并且通过了显著性检验，在1965，1967，1980和1986年多次达到显著水平，1995和1988年达到极显著水平。

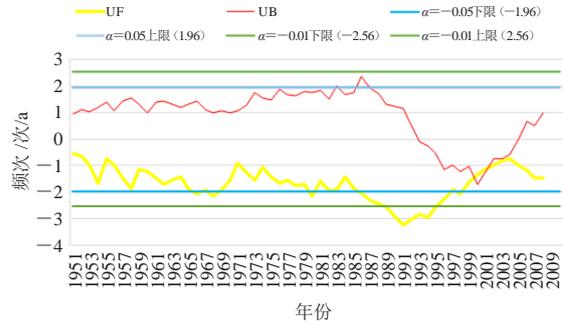


图3 昆明市1951—2010年发生降水次数Mann-Kendall统计量曲线图

Fig. 3 The frequency of precipitation in “Mann-Kendall” between 1951 and 2010

2.2 昆明市气温变化特征

昆明市1951—2010年的年平均气温呈现出一个上升的趋势，从时间段来看，在1990年以后上升趋势明显（图4）。

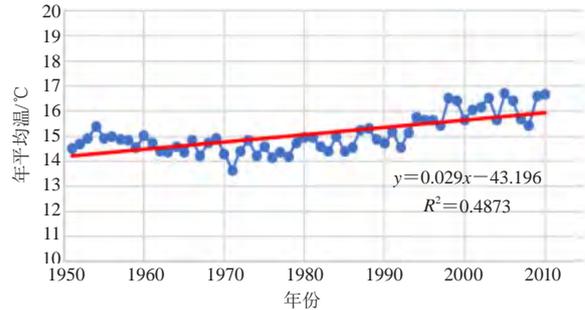


图4 昆明市1951—2010年年平均气温统计

Fig. 4 The average temperature in Kunming between 1951 and 2010

图5是使用Mann-Kendall法对昆明市1951—2010年年平均气温进行趋势分析和突变检验所绘得的曲线，可以看出，1951—1968年呈现下降趋势，并且通过了显著性检验，达到了极显著水平，1980—1985年又一次达到极显著水平，减小的趋势直到1991年结束，1992年开始出现上升趋势，在1997年达到显著水平，1999年达到极显著水平。

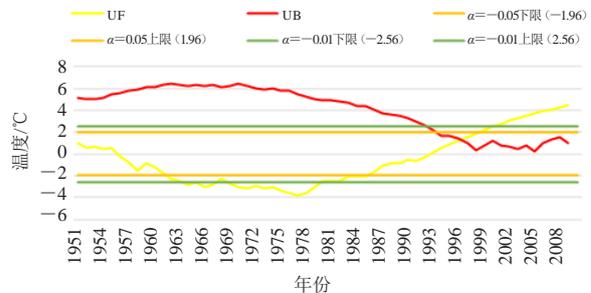


图5 昆明市1951—2010年年平均气温Mann-Kendall统计量曲线图

Fig. 5 The temperature in “Mann-Kendall” in Kunming between 1951 and 2010

3 昆明长水机场天气背景下大雾天气航班安全运行影响研究

大雾形成的低能见度天气一直是影响民航航班安全飞行的天气原因之一,从近15年的统计数据发现很多因大雾天气造成的空难,如:2003年1月8日土耳其航空公司634号班机在迪亚巴克尔机场失事就是因为机场区域浓雾造成的^[5];2010年4月10日波兰总统的专机在俄罗斯斯摩棱斯克北部一军用机场降落时失事,主要原因是航班在低能见度的恶劣天气条件下降落^[6];2010年8月24日发生的河南航空有限公司8387班机伊春坠机事故就是在能见度低于公司最低运行标准的情况下,仍然实施运行造成的^[7];2010年7月28日巴基斯坦蓝色航空202号班机在降落前坠毁于伊斯兰堡北部,大雨、多雾天气被认为是坠机发生的主要原因^[8];2014年7月23日傍晚复兴航空222号班机降落时坠毁^[9],事故报告证实失事飞机在下降过程中能见度突然变差,进近的轨迹偏离航道4°所导致的,所以关注大雾天气对航班安全飞行的意义非常重要。

3.1 昆明长水机场在极端天气条件下大雾形成原因分析

雾按照形成原理分为辐射雾、平流雾、蒸汽雾、锋面雾、上坡雾、谷雾、冰雾、低雾等。结合出现大雾天气情况下的风向、风速、气温和露点温度进行分析,发现昆明长水机场14次大雾过程中,有12次地面为东北风(1~7 m/s),为冷空气影响,属于锋面雾;2次为西南风(4~7 m/s),为辐射雾(晴空或少云),出现在日出前后。可见,长水机场大雾主要是锋面雾,其次为辐射雾,风向和风速对雾的形成有很重要的作用。辐射雾是因辐射冷却空气达到过饱和而形成的,随着日出之后气温升高而逐渐消散。

从前面的分析可以看到,昆明市的降水事件近几年呈上升趋势,气温也呈现出上升趋势,这样容易造成区域空气湿度的增加。如果地面热量散失,温度下降,空气潮湿,当冷却到一定的程度时,空气中的一部分水汽就会凝结出来,变成很多的小水滴,悬浮在近地面的空气层中,容易形成雾。锋面雾是经常发生在冷暖空气交界的锋面附近,锋前雾是由于锋面上暖空气云层中的雨滴落入地面冷空气内,经蒸发使空气达到过饱和而凝结形成,而锋后雾则由暖湿空气移至原来被暖锋前冷空气占据过的地区,经冷却达到过饱和而形成的。

分析长水机场2013年1月3日发生的长时间的大雾过程发现,从当天的重要天气图和高空风预报图上得出在昆明长水机场附近的区域内,高空500~700 hPa

为南支槽前西南暖湿气流控制的形势,地面受静止锋影响,冷空气自东向西逐渐控制本场。在3日11—23时,长水机场区域维持在一个由高空西南气流和低层弱冷空气配合控制中,所以此次大雾的形成过程是高空槽、静止锋、冷空气共同影响的结果。在日常的签派放行工作中需要关注静止锋、高空槽和冷空气预报,静止锋预报需要注意对静止锋生消、加强或减弱、维持或移动的预报;高空槽的预报重点关注高空槽的维持或过境,是水汽和低云维持的标志,当高空槽过境时,低云往往消失,大雾消散;冷空气的预报主要关注冷空气过境的情况,这个是水蒸气凝结的重要因素之一。

另外,长水机场所处的独特地理位置对大雾天气的形成有促进作用,一是机场选址在半山腰,按照冷空气爬升在半山腰会出现雾天的规律,长水机场选址半山腰,当然机场附近是出现大雾天气最合适不过的地方。其二,长水机场处在一个小洼地,机场比附近地势相对又较低,被周边起伏的山峦包围着,机场西部、西北部的最高点海拔约2200 m,东部、东南部海拔达到2500 m。在冬季晴朗的夜晚,辐射冷却较强,加上新机场北侧的海拔较低,从而在潮湿的盆地内容易形成冷气团。不断积累的冷空气团平流到新机场北侧的山坡并爬升,从而导致机场跑道附近上空形成多云状况。随着此云层向南飘移,新机场逐渐被雾所覆盖。这就像是给机场上空盖上了一层“被子”,形成了一层保护膜,不利于空气的流动,导致雾气难以散去。而当冷空气入侵且相对稳定时,大雾短时间就不容易散去。最后就是长水机场位于云南冷空气的入口,又是昆明准静止锋常影响的区域,所以一旦有西南暖湿气流配合,大雾天气相对巫家坝机场多。

3.2 昆明长水机场与原巫家坝机场大雾天气特点对比分析

统计昆明机场近10年出现大雾天气的年频次(图6),发现2012年是发生突变的转折点,这个转折点源于航班运行由原巫家坝机场转场到长水机场后地理环境变

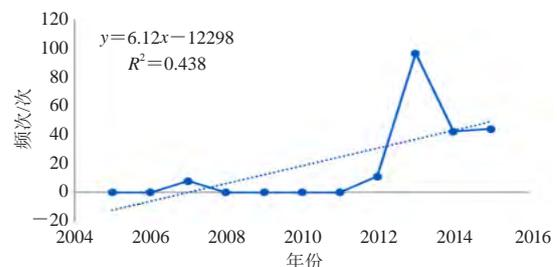


图6 昆明机场低能见度天气发生频次统计图
Fig. 6 The frequency of low visibility at the Kunming Airport

化所导致。在2011年之前极少出现大雾天气，从2012年开始大雾天气发生频率开始增大，在2013年达到一个频次近百次的峰值，之后大雾天气频次虽然有所下降，依旧是远高于原巫家坝机场的态势。

图7是一个日历年内长水机场和原巫家坝机场每月出现大雾天气的对比，分析得到长水机场出现雾的天气主要从7月开始递增，到10月达到峰值（约180次）。11月一次年1月同样处于多发季节，2—6月处于低值，变化不大，稳定在40次上下，这与降水天气事件和温度天气事件发生的趋势吻合。

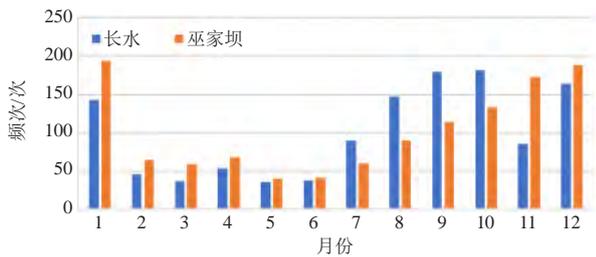


图7 长水机场和原巫家坝机场出现雾天气对比图
Fig. 7 The comparison of foggy conditions at the Changshui Airport and the Wujiaaba Airport

从所有的有效数据中整理出长水机场和原巫家坝机场24 h内出现大雾天气的对比情况（图8），分析得出长水机场出现雾的时间多在夜间20时一次日02时。从03时开始处于较低水平，在中午12时出现雾的次数相对较多。通过对比两机场24 h出现雾次数，从总数来看，长水机场出现雾的次数远远高于原巫家坝机场。

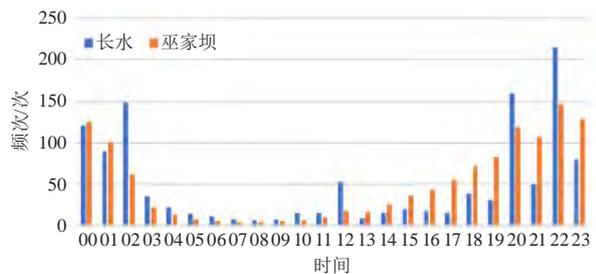


图8 长水机场和原巫家坝机场24 h出现雾天气次数对比图
Fig. 8 A comparison of the fog weather occurrence within 24 hours between the Changshui Airport and the Wujiaaba Airport

3.3 昆明长水机场大雾天气对航班运行影响研究

从整体航班量占比来看，长水机场运行的飞机以C类和D类飞机为主，由长水机场起降过程主用的21/22号跑道对外公布并使用的标准仪表进近图、II类飞行进近图和机场图得到长水机场的起降标准（表1）。

基于2012年6月27日机场搬迁前后长水机场和原

巫家坝机场能见度不满足运行标准的对比，发现在不满足精密进近的次数、非精密进近次数、目视盘旋次数和各类飞机起飞的次数上，长水机场远远高于原巫家坝机场，特别是不满足起飞标准情况出现的概率，长水机场为1.39%，远高于原巫家坝机场的0.015%，其他几项都高于5倍以上。能见度运行的情况，原巫家坝满足运行标准占98.5%，长水占统计量的88%。

由于大气的不断运动变化，产生了各种天气现象和天气变化，如颠簸、风切变、雷雨、积冰、低云、低能见度等危险天气，对飞行安全均构成极大威胁。在近13年国际民航事故气象原因分类表中，与低能见度有关的飞行事故占到了17%。大雾这类低能见度天气对飞行的影响具体表现在低空空域时常会存在明显的低能见度天气，且机场跑道由于跑道视程受到影响，会在地面对航空器的起飞或者落地安全造成重要的影响。多年来各机场因大雾所造成的航空器返航备降、机场关闭等情况时有发生，造成了很大的经济损失。同时飞机在低能见度条件下着陆时，容易造成飞机偏离跑道、在跑道外接地，甚至可能发生轮胎破裂和起落架折断等事故。

从能见度对航班安全顺畅运行的影响来看，原巫家坝机场的能见度条件优于昆明长水机场。受到长水机场独特地形的影响，大雾造成的低能见度天气在长水机场更明显，11月一次年1月的早晨到中午经常出现大雾天气，对进港航班的安全飞行有显著的影响。

4 昆明长水机场大雾条件下航班运行保障的措施和建议

针对大雾等天气造成的低能见度天气下的安全运行，本研究认为需要航空公司各部门的通力协作，在长期航班保障的经验基础上，对昆明长水机场大雾条件下航班运行保障的提出以下3点措施和建议：

1) 做好昆明长水机场进港航班备份燃油和可靠备降场的选择。在昆明长水机场附近可作为备降场使用的机场包括贵阳、成都、重庆、南宁、西安、绵阳、兰州，在签派放行飞往昆明长水机场航班的过程中应该合理地选择备降场，充分考虑备降场的保证能力，避免备降场集中选择的情况出现，充分考虑航班空中等待的时间增加，适当增加航班空中飞行的备份燃油，避免低油量落地情况的发生。

2) 推进低能见度情况下起飞和着陆过程中先进技术的使用。II类飞行、低能见度起飞程序的投入使用，使昆明长水机场在保证安全的情况下可以采用更低的能见度标准起飞、落地，针对低能见度起飞中国民用航空局近期还引入了平视显示器（HUD）的概

表1 长水机场常用跑道起降标准

Table 1 The standard of runway of departure and arrival in Kunming Changshui Airport

跑道号	运行方式	使用航图	飞机类别	标准/m	
21	ILS/DME	仪表进近图	C类/D类	跑道视程 (RVR)/能见度 (VIS): 550/800; 决断高 (DH): 60 VIS: 1800; 最低下降高 (MDH): 137	
	GP INOP	仪表进近图	C类/D类		
	22	ILS/DME	仪表进近图	C类/D类	RVR/VIS: 550/800; DH: 60
		GP INOP	仪表进近图	C类/D类	VIS: 1700; MDH: 133
		CAT-II	仪表进近图	C类	RVR: 300; DH: 30
	CAT-II	仪表进近图	D类	RVR: 350; DH: 30	
21	跑道边灯	机场图	C类/D类	RVR: 400	
	无灯 (白天)	机场图	C类/D类	RVR: 500	
	低能见度	机场图	C类	RVR: 200	
	低能见度	机场图	D类	RVR: 250	
	22	跑道边灯	机场图	C类/D类	RVR: 400
		无灯 (白天)	机场图	C类/D类	RVR: 500
		低能见度	机场图	C类	RVR: 200
		低能见度	机场图	D类	RVR: 250

念, 飞行员在使用时会感觉到精确度大大提高, 对航班运行的顺畅作用显著, 提升在复杂天气条件下低能见度起飞的能力。

3) 引入并完善系统决策系统 (CDM)。通过空管、气象、航空公司三方协同决策的方式, 加强气象信息与空管、航空公司运行信息的融合, 提高昆明长水机场低能见度天气条件下的运行效率。启用CDM系统后, 长水机场出港航班进入了西南区域统放航班放行排序, 通过CDM系统能及时得到航班出港时间, 组织旅客登机, 旅客在机上等待时间大大减少, 提升旅客在机场的航空出行体验。

参考文献

- [1] 徐海, 周立, 张潇. 一次准静止锋影响下的昆明长水机场大雾过程分析. 高原山地气象研究, 2016, 36(3): 76-81, 96.
- [2] 马艳, 黄俊齐. 昆明长水国际机场的选址与雾天气分析. 交通科技与经济, 2015, 17(4): 13-15.
- [3] 普锐, 窦体正, 吕金峰. 昆明长水机场一次经典辐射雾的分析讨论. 科技视界, 2017(4): 313-314.
- [4] 杨依莹. 地形对昆明机场一次典型大雾天气的影响研究. 中国民航大学, 2017.
- [5] 张恒俊. “黑色八月”震惊世界 中国民航“借锤敲钟”——国际民航“八月空难”阴影下的飞行安全大走笔(之三). 中国民用航空, 2006(1): 65-66.
- [6] 姜凯闻, 刘继新. 危机事件应急管理. 江苏航空, 2014(3): 59-62.
- [7] 肖玮. 伊春空难再引航空安全反思. 北京商报, 2010-08-26(002).
- [8] 韩新营. 基于多米诺骨牌模型的蓝色航空7-28事故分析. 科技视界, 2017(11): 84.
- [9] 付毅飞. 台湾客机迫降失败坠毁. 科技日报, 2014-07-24(001).

《气象学报》推出“第三次青藏高原大气科学试验”专刊

张萌



《气象学报》
2018年第6期封面

由于青藏高原是影响中国极端天气和气候事件的关键区, 对天气、气候预报有重要影响。因此, 中国气象局、国家自然科学基金委员会、中国科学院共同推动了“第三次青藏高原大气科学试验 (TIPEX-III)”工作。《气象学报》于2018年第6期推出了“第三次青藏高原大气科学试验”专刊, 共刊载16篇文

章。赵平等介绍了TIPEX-III的总体目标、外场观测布局、研究内容、特色以及所取得的阶段性进展。他指出, TIPEX-III带动了地面和高空常规观测、天气业务雷达和风廓线雷达等观测数据加工处理业务技术的发展, 提升了中国国家级土壤湿度、水汽含量等遥感产品和高分辨率多源降水融合产品的质量, 促进了气象监测、预报和数据共享业务的发展。其他文章则围绕以上内容分别进行了详细阐述。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

梅州雷电危险性分布特征分析

郭青¹ 曾东好¹ 高国靖¹ 刘导² 曾惠娟¹

(1 广东省梅州市气象局, 梅州 514021; 2 广东省平远县气象局, 平远 514600)

摘要: 利用梅州市近60年的年雷暴日、2002—2013年地闪资料及历史天气图, 对梅州市雷电活动规律及雷电发生的天气学成因进行了分析。分析表明, 梅州市近60年雷电活动大致呈现周期性变化, 近几年雷电活动频繁度略有减少, 空间分布特征呈明显的“中部高, 南至北递减的趋势”, 其中, 梅江区最高, 蕉岭最低。雷暴日季节性变化较明显, 一年四季均有发生, 属于多雷区, 各年的雷电活动的月分布曲线、时分布曲线呈明显的“单峰”特性, 主要集中分布在4—9月, 尤其是8月。雷电活动日变化峰值区为14—19时(北京时), 其中16时段雷电活动最为强烈。危险区划结果表明, 梅州地区雷暴活动的高危险性区域位于梅州中部、五华中部以及丰顺中南部地区, 低危险性区域位于北部地区, 南部地区风险明显强于北部地区。雷电活动规律与天气系统密切相关, 因而, 利用雷电活动规律及雷电发生的天气学成因, 可以合理安排日常生产生活, 减少雷电灾害的发生。

关键词: 雷电, 雷暴日, 规律, 天气学原理, 梅州

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.008

Analysis of Lightning Hazard Distribution Characteristics in Meizhou

Guo Qing¹, Zeng Donghao¹, Gao Guojing¹, Liu Dao², Zeng Huijuan

(1 Meizhou Meteorological Bureau, Meizhou 514021; 2 Pingyuan Meteorological Bureau, Pingyuan 514600)

Abstract: Using the thunderstorm days, 2002–2013 yearly lightning flashes and historical weather maps from Meizhou during the past 60 years, the lightning activity patterns, and the synoptic causes of lightning occurrence in Meizhou were analyzed. The analyses showed that there were periodic changes in lightning activity in Meizhou city in the last 60 years. The frequency of lightning activity has slightly reduced during recent years. The spatial distribution characteristics showed lightning activity was high in the middle with a south to north decreasing trend. The Meijiang area had the highest occurrences of lightning and Jiaoling has the lowest. There was evidence of seasonal variation in thunderstorm days. Each year, the lightning activity distribution curve showed a single peak characteristic, mainly concentrated in April to September, especially in August. The daily lightning activity usually peaked between 2 and 7 p.m., being most frequently at 4 p.m. Risk zoning results showed that the high-risk areas of thunderstorm activity in Meizhou were located in central Meizhou, central Wuhua, and central and southern Fengshun. The low risk areas were located in the northern region, and the risk in the southern region was significantly stronger than that in the northern region. The law of lightning activity was closely related to the weather system. Using the information from this study, daily life can be planned to reduce lightning-related hazards.

Keywords: thunder, thunderstorm day, activity, synoptic principle, Meizhou

0 引言

广东省是雷电灾害的高发区, 大范围雷暴天气时有发生, 部分地区雷电灾害频繁。对于雷电的研究, 西方一些国家开展得较早, 我国相关研究虽然起步晚, 但不少学者也在这方面做了大量的研究工作^[1-10]。当前尚未有对梅州地区雷电危险性的分析, 本文利用1954—2013年梅州市近60年的年雷暴日和

2002—2013年地闪资料, 分析了梅州市雷电活动规律以及雷电活动的天气学成因, 通过对该地区雷电危险性的研究, 旨在对今后的雷电预警发布提供参考, 以期为该地区防雷减灾提供科学依据。

1 资料及方法

本文的资料主要采用1954—2013年梅州市近60年的年雷暴日资料、2002—2013年的闪电定位资料及历史天气图, 通过数理统计等方法, 分析了梅州市雷电活动规律及雷电发生的天气学成因, 基于年平均雷暴日和地闪密度资料对该地区的雷电活动进行了风险区划。

收稿日期: 2017年9月18日; 修回日期: 2018年6月15日
第一作者: 郭青(1985—), Email: 422147578@qq.com
资助信息: 梅州市科技计划项目(2013B161和2016B204)

2 雷电活动规律

2.1 雷暴年变化规律

梅州市年平均雷暴日有72.1 d（60年平均），属于多雷区。最高年份可达108 d，最少年也有50 d，极值差异达2.16倍，由此可见，梅州雷暴日数年际间相差很大。初雷一般始于2月—3月中下旬，最早初雷日为1月4日（2016年）；终雷一般在10月，最晚终雷日为12月30日（1992年）。梅州市各年雷电活动大致呈现周期性变化，近几年雷电活动频繁度略有减少。

由梅州市年雷暴日距平曲线（图1）可以看出，梅州市年平均雷暴日数在20世纪80年代前后发生了明显变化，80年代中期以前为年雷暴日数正距平占优势的多雷暴日阶段，80年代中期以后的年雷暴日是负距平占优势的少雷暴日阶段。每10年雷暴日数大致减少2.13 d。

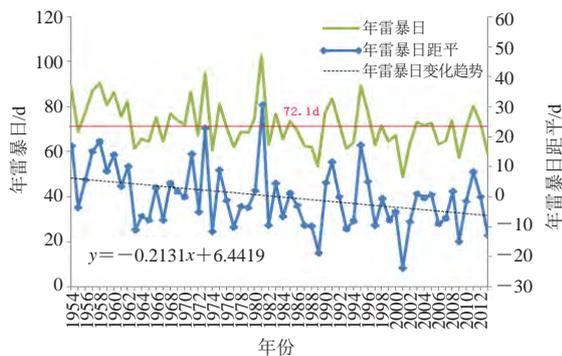


图1 梅州市近60年年雷暴日年际变化曲线

Fig. 1 Interannual variation curves of thunderstorm days in Meizhou during the last 60 years

2.2 雷暴空间分布规律

由年雷暴日空间分布（图2）和地闪密度空间分布（图3）可知，梅州市雷暴空间分布特征呈明显

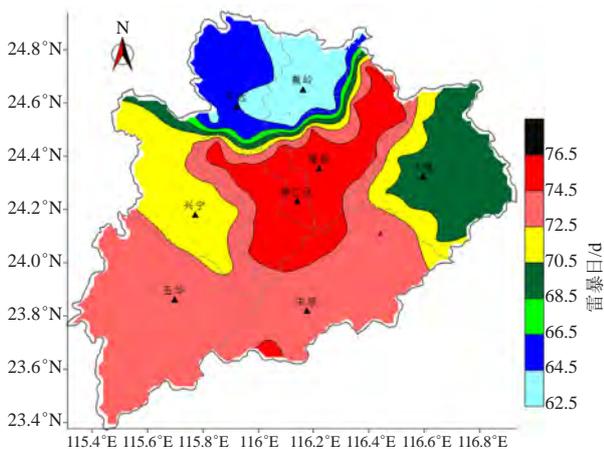


图2 梅州市近60年年雷暴日空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of thunderstorm days in Meizhou during the last 60 years

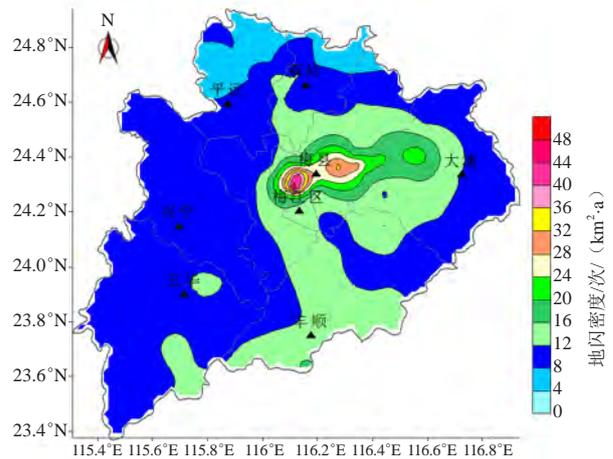


图3 梅州市近10年地闪密度空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of flash density in Meizhou in the last 10 years

“中部高，四周低，南部高于北部”的趋势，其中梅江区、梅县区为全市的峰值区域，丰顺县、五华县次之，平远县、蕉岭县为全市低值区域。

梅州地区属于多雷区的主要原因是：1）梅州山多，地形造成的大气动力抬升作用较强，下垫面相对比较复杂，受热不均，容易产生热力差异；2）梅州河流多，特别是各县县城，均有一条河流穿城而过，提供了充足的水汽条件。城区“四周环山，中间河流穿城而过”的特征，提供了动力和热力条件，进而造成本地区对流活动强，常年多雷暴天气。

2.3 雷暴季节变化规律

由梅州市闪电的月平均分布（图4）可知，梅州市各月闪电的分布规律基本一致，梅州市雷电活动月

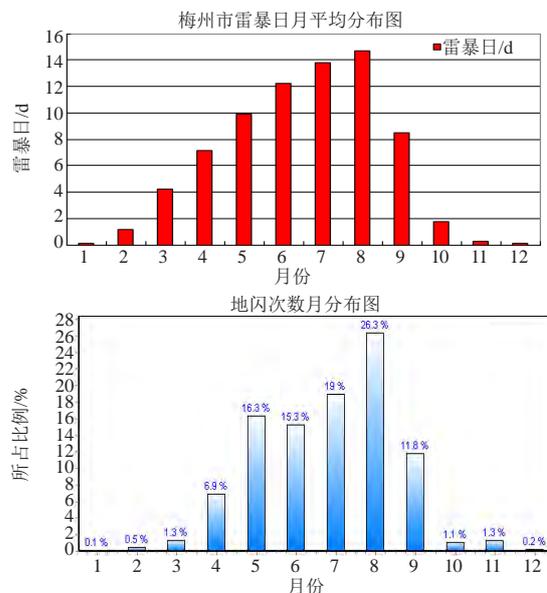


图4 梅州市闪电的月平均分布

Fig. 4 Monthly average distribution of lightning in Meizhou

平均曲线呈现“单峰”特性，5—8月为每年雷电活动高频月份，其中8月最强。夏季最多，冬季最少。造成这种季节、月分布规律的主要原因是：产生雷暴的必要条件是温暖潮湿的上升气流，春季开始，气温逐渐回升，热力不稳定条件逐渐加强，对流活动活跃，夏季高温使近地面层对流活动加剧，闪电频次达到一年中的峰值，随着秋季气温开始下降，热力不稳定条件逐渐减弱，闪电频次逐渐减少，而冬季大气层结趋于稳定，强对流天气难于形成，因此雷暴发生次数少。

2.4 地闪时分布规律

闪电的24 h分布规律只能借助于闪电定位系统的观测数据，该区域地闪时分布曲线呈“单峰”型，主要活动时段为13—20时（北京时，下同），峰值区为14—19时，21时—次日12时的闪电频次较低（图5）。闪电的时分布规律基本与大气的热力对流活动规律相吻合。一般而言，中午12时开始，随着气温不断升高，热力不稳定造成的对流活动不断活跃，16时达到了一天中的峰值。随着夜晚气温下降，大气层结稳定，对流活动减弱，闪电频次明显减少。

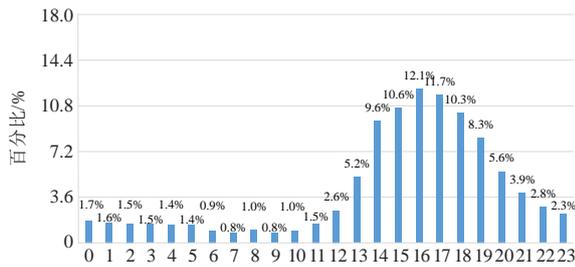


图5 梅州市地闪次数时分布
Fig. 5 Distribution of ground flashover in Meizhou

2.5 雷电灾害特征

近年来，梅州地区年平均雷电灾害起数均在100起以上，直接经济损失均达到100万元以上。雷电灾害主要集中分布在4—9月。其中，6月最严重，其次是8和7月梅州地区雷击致人伤亡的事故偶有发生，并且多数出现在农村。

雷击事故1：2013年7月7日09：30—10：18左右，受强降雨影响，广东省梅州市丰顺埔寨镇采芝村发生一起雷击事故。该村3名村民在埔寨镇采芝村吴湖角栽种红柚时，突然下起大雨，雷雨交加，3人在避雨亭躲避风雨时遭受雷击，造成2死1伤。事故还同时造成避雨亭帽顶受损，避雨亭一根支柱底部被雷电流击穿。

雷击事故2：2018年5月30日18时左右，五华县受强降雨云团影响，出现短时雷雨大风，潭下镇柏洋

村发生一起雷击事故。该村一村民在自家天台遭遇雷击，经抢救无效，于30日21：50死亡。事故发生地房屋楼梯间天面石棉瓦受损、固定铁丝烧毁，楼梯地面受损。

3 雷暴的危险性区划

通过对影响雷电危险性的3种因子进行分析，结合各自对雷电危险性的影响程度，采用气象学分析方法中经常用的分级统计方法^[10]和加权综合评价法（WCA）^[11]对雷暴危险性等级进行划分。

分级统计方法是依据各个县（市、区）的地闪密度、平均雷电流幅值、年平均雷暴日，划分出4个等级，具体方法是：将8个县（市、区）的地闪密度、平均雷电流幅值、年平均雷暴日按由小到大排序，然后按照每组2个记录，划分为4组数据，将第1组数据中的最大值和第2组数据中的最小值的平均值作为第1个等级的最大值和第2个等级的最小值，将第2组数据中的最大值和第3组数据中的最小值的平均值作为第2个等级的最大值和第3个等级的最小值，以此类推，划分等级。按照分级统计法将雷电危险性因子分为低危险区（0.2）、中等危险区（0.5）、次高危险区（0.8）、高危险区（1.0）4个等级。

加权综合评价法是假设由于指标量化值的不同，而使每个指标对于特定因子的影响程度存在差别，其表达式为

$$V(i, j) = \sum_{i=1, j=1}^n W_{ij} D_{ij}, \quad (1)$$

式中， $V(i, j)$ 为评价因子的总值； D_{ij} 为雷电风险因子的等级值（ $0 \leq D_{ij} \leq 1$ ）； W_{ij} 为权重值（ $0 \leq W_{ij} \leq 1$ ），通过分级统计方法得出； n 为评价指标个数。

结合专家打分法和刘三梅等^[3]的建议，对主要影响危险性3个因子进行划分，地闪密度认为对雷电风险影响最大（权重设为0.5），平均雷电流幅值影响次之（权重设为0.3），而年平均雷暴日影响最小（权重设为0.2），权重因子总和为1。表1为危险因子的区划表。

由地闪密度、平均雷电流幅值和年平均雷暴日资料的危险性区划结果（图6）可知，梅州地区雷暴活动的高危险性区域位于梅州中部、五华中部以及丰顺中南部地区，低危险区域位于北部地区，南部地区风险明显强于北部地区。造成中部地区雷暴高危险的主要原因是地形和河流，梅江区、梅县区四周环山，区域河网密布，有利于形成上升气流，进而发展形成雷暴。而造成梅州南部地区，特别是丰顺中南部处于雷电高危险区域的主要原因是地形差异，受丰顺北部地区的莲花山脉的影响，当南边暖湿气流受高山影响被

表1 危险因子的区划表
Table 1 Risk zoning table of risk factors

风险区划	低风险区 (0.2)	中等风险区 (0.5)	次高风险区 (0.8)	高风险区 (1)
地闪密度/次 (km ² ·a)	≤9.93	>9.93, ≤11.015	>11.015, ≤12.91	>12.91
平均雷电流幅值/kA	≤16.8	>16.8, ≤19.3	>19.3, ≤21.6	>21.6
年平均雷暴日数	≤67.62	>67.72, ≤72.63	>72.63, ≤74.66	>74.66

迫抬升时, 在山坡迎风的一侧暖湿空气爬升, 到达一定高度因冷却而形成雷雨云, 所以造成梅州地区南面雷暴活动更频繁。

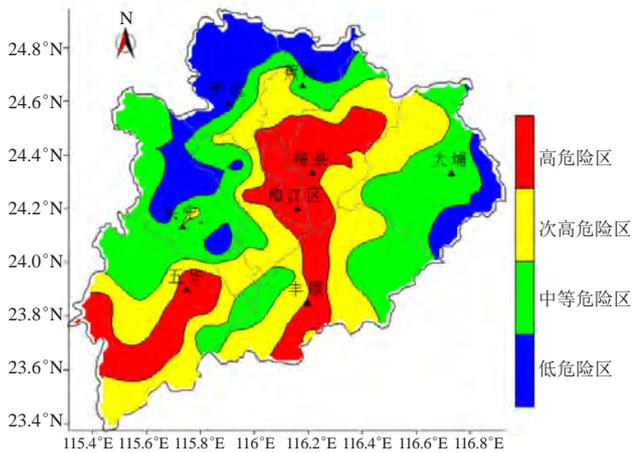


图6 梅州市近10年雷电危险性区划图

Fig. 6 Lightning risk zoning map of Meizhou City in the last 10 years

4 天气学原理分析

尽管在这方面已有部分研究工作^[8-9], 但是有必要结合本地区实际对梅州市雷电发生时的天气形势进行归纳分析。具体天气形势如下:

1) 东风波型^[8]

当副高脊线位于28°N以北, 梅州受低空信风和高空东风气流控制, 500 hPa上盛行的东风里有明显自东向西移动的东风波, 副热带高压往往东退出海。此刻梅州地区热力不稳定明显, 流场易造成大气层结不稳定, 多产生对流系统, 引起雷暴。

2) 西风槽之槽前型

500 hPa 华南有小槽东移, 梅州上空转受槽后西北气流影响, 由于前期受西南暖湿气流控制, 小槽过境对对流有触发机制, 梅州出现强对流天气。地面受锋面低槽影响, 850 hPa切变线南下影响梅州上空, 空气中水汽充沛, 多有辐合气流或上升运动的低值系统, 易产生大气层结不稳定, 在切变线上常出现雷电。

3) 副高西伸加强型

副高脊线位于南岭附近, 梅州地区处于弱高压区, 850 hPa风场以偏南风为主且风速较大, 呈气旋性弯曲, 地面受弱脊控制, 地面气温高, 有扰动出现时

易出现强对流天气。

4) 热带环流影响

受热带气旋影响, 气旋北侧类似东风波结构的倒槽作用, 在流场上表现为东南与东北气流辐合, 易发生雷电灾害, 而比较容易造成梅州地区雷电灾害的台风主要是粤东沿海登陆的台风, 其他地方的台风影响主要是体现在风雨上, 雷电影响不明显。但是热带气旋内的雷电活动一般具有间歇性活动特征, 另外闪电密度通常在热带气旋区域分布不均匀, 随着热带气旋强度增强或减弱发生变化。

5 结论

1) 梅州市60年雷电活动大致呈现周期性变化, 近几年雷电活动频繁度略有所减弱; 空间分布呈明显的“南至北递减的趋势”特征, 其中, 梅江区、梅县区最高, 蕉岭最低。雷暴的高风险区域位于梅州中部, 低风险区域位于梅州北部, 主要是受地形差异的影响。

2) 梅州市雷电主要发生在4—9月。各年的雷电活动的月分布曲线以及时分布曲线呈明显的“单峰”特性, 6—8月为每年雷电活动的峰值区, 其中8月最强; 地闪主要活动时段为13—20时, 峰值区为14—19时, 其中16时段雷电活动最为强烈; 21时—次日12时, 闪电频次较低。

3) 雷暴高发期的天气系统主要有东风波型、西风槽之槽前型、副高西伸加强型和热带环流影响。

参考文献

- [1] 许小峰. 雷电灾害与监测预报. 气象, 2004, 30 (12): 17-21.
- [2] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1981.
- [3] 刘三梅, 吕海勇, 陈绍东, 等. 广东省雷电风险区划研究. 资源科学, 2014, 36(11): 2337-2344.
- [4] 李宏景, 赵建吉. 百色城区近51年雷暴气候变化特征及分析. 气象研究与应用, 2013, 34(1): 83-85.
- [5] 郭冬艳, 姜涛, 陈红, 等. 海南岛雷电灾害特征及易损性分析区划. 气象研究与应用, 2010, 31(2): 78-81.
- [6] 林卓宏, 梁斌, 李荣标, 等. 江门地区雷电灾害易损性研究. 气象研究与应用, 2012, 33(4): 86-90.
- [7] 张晨辉, 罗碧瑜, 陈立宏. 广东省梅州雷暴时空变化特征分析. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 8060-8062, 8094.
- [8] 林良勋. 广东省天气预报技术手册. 北京: 气象出版社, 2006.
- [9] 林良勋, 梁巧倩, 温晶, 等. 广州地区雷电时空分布特点及天气学分析. 气象科技, 2006, 34(6): 680-683.
- [10] 庄燕涛, 刘三梅, 黄愷愷, 等. 广东省地闪密度空间分布的特征分析. 广东气象, 2014(4): 57-60.
- [11] 张继权, 魏民. 加权综合评价法在区域玉米生产水平综合评价与等级分区中的应用. 经济地理, 1994, 14(5): 19-21.

年度评述

2018年中国龙卷活动特征

黄先香^{1, 2} 炎利军¹ 蔡康龙¹ 李兆明¹

2018年中国可确认的龙卷天气过程有10次、共产生22个龙卷,主要发生在4—9月。其中,EF1级或以上强度的龙卷有19个,EF1级或以上强度龙卷数量明显多于2004—2013年的龙卷记录年平均值。台风相关的龙卷天气过程是2018年龙卷事件的主要特征,台风龙卷有16个,占到总数的73%。其中,1814号台风摩羯外围环流中出现了11个龙卷,在我国近30年来有记录的单个台风外围龙卷数量中居第二位。2018年台风外围龙卷数量与非台风龙卷数量相比是显著偏多的。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.009

(1 佛山市气象局佛山市龙卷风研究中心;

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室)

收稿日期: 2018年12月24日; 修回日期: 2019年1月8日

龙卷是对流风暴产生的最猛烈的天气现象，易于导致严重气象灾害^[1-4]，例如2016年6月23日江苏省盐城市阜宁县发生的EF4级龙卷，导致98人死亡、846人受伤，并有大量建筑物被损毁^[4-6]。2018年中国多地发生龙卷天气，尽管未造成严重的人员伤亡，但导致了较大的经济损失和很大的社会影响，因此本文给出2018年我国的龙卷活动情况和灾情特征，从而为发展龙卷的灾情调查和预警技术提供参考。

由于气象探测技术手段和能力所限，本文所用的龙卷灾情资料主要是通过与当地气象部门共同开展龙卷灾情调查，对龙卷路径沿线的受灾村居与工业区现场走访、勘查取证、无人机航拍、影像资料收集等方

式，再结合多种气象数据，经多方会商综合确认的龙卷及其灾害等级。由于龙卷尺度小、生消快等特点，灾调和分析过程中仍难免存在个别案例的强度定级等还需商榷。

2018年我国能够确认的龙卷天气过程有10次（表1），确认发生22个龙卷，其中EF1级或以上强度的龙卷有19个，高于2004—2013年全国记录到的年平均EF1级或以上强度的龙卷数量（14.3个）^[7]；EF2级龙卷发生在5个地方，分别是广西柳州、吉林松原、山东滨州、江苏徐州、广东佛山；EF3级龙卷有2次，发生在天津静海、广州南沙。

2018年龙卷发生时间集中在4—9月，其中8月最

表1 2018年中国龙卷活动情况

Table 1 Activity characteristics of tornadoes in China in 2018

天气过程编号	龙卷发生时间和地点	强度	环流型
1	4月20日19:10广西区柳州市柳北区	EF2	南支槽
2	5月7日11:40广东省潮州市饶平县	未定	高空槽
3	5月21日15:40广东省中山市	EF1	高空槽
4	5月28日12:00吉林省松原市长岭县	EF2	东北冷涡
5	6月8日01:40、14:03广东省广州市南沙区、佛山市南海区	EF3、EF1	台风艾云尼
6	8月4日12:50内蒙古海力素国家基准气候站	EF0	高空槽
7	8月13日17:30天津市静海区	EF3	台风摩羯
	8月13日23:00—14日14:00山东省枣庄、潍坊、烟台、滨州、德州和东营等市	EF0~EF2	台风摩羯
8	8月18日18:40、19:46江苏省徐州市铜山区、丰县	EF1~EF2	台风温比亚
9	8月31日14:25广东省广州市番禺区	EF1	季风低压
10	9月17日09:37、13:15广东省佛山市三水区、肇庆市鼎湖区	EF2、EF1	台风山竹

多，有14个龙卷生成，占到了总数的64%。出现龙卷的7个省（区、市）中，山东最多，有10个龙卷；其次是广东，有7个龙卷。22个龙卷中，有16个是台风龙卷，占到了总数的73%。其中，1814号“摩羯”是近年来最高产龙卷的台风，在其外围环流中出现了11个龙卷。

2018年多数台风龙卷发生在台风中心右前侧（东北象限）、距离台风中心200~400 km的范围内，这与以往对台风龙卷研究^[8-11]所指出的龙卷主要位于台风的右前象限、距离台风中心300~400 km的结论是一致的。还有少数台风龙卷位置例外，其中，1804号“艾云尼”台风环流中生成的广东佛山龙卷距离台风中心最近，仅有92 km；而“摩羯”台风外围环流中所产生的天津静海龙卷距离台风中心最远，达到725 km，属于远距离台风低层倒槽与中层西风槽共同作用产生的龙卷。沈树勤^[9]曾分析过距离台风中心在800 km以上的3个台风龙卷个例，Schultz等^[12]和McCaul^[13]也曾分别采用750和800 km作为美国热带气旋龙卷的距离统计上限。

2018年有2人死于龙卷灾害，分别是6月8日广州

龙卷和8月18日徐州龙卷，前者是成年人，死于简易性房屋坍塌；后者是儿童，由房屋大面积玻璃破碎所致。

4月龙卷

4月中旬广西柳州有1个龙卷发生，这是年内我国第一个龙卷灾害天气过程。4月20日傍晚，受南支槽和低空急流影响，柳州市柳北区沙塘镇上空有微型超级单体风暴发展。19:10前后，沙塘镇遭受了龙卷袭击，视频显示大量的铁皮和木板随龙卷在空中旋转，造成了高压线短路，爆出巨大的火花；多处工棚、屋顶遭到破坏，玻璃破碎，多处直径超过15 cm的树木折断或连根拔起，其中有一株直径约43 cm的大树被扭断；框架结构的房屋屋顶被刮掉；师范学院有一处空调室外机的金属外壳顶部被吹飞，位于2楼的电脑室单边向外开的厚约0.5 cm的铁门被吹嵌入门框内侧，铁门严重变形，篮球架被吹倒。受灾严重的是木材厂，龙卷造成铁皮厂房的垮塌，受损面积约900 m²，铁皮散落在周边区域（图1）。因工人外出就餐，没有造成人员伤亡。本次龙卷于19:10前后

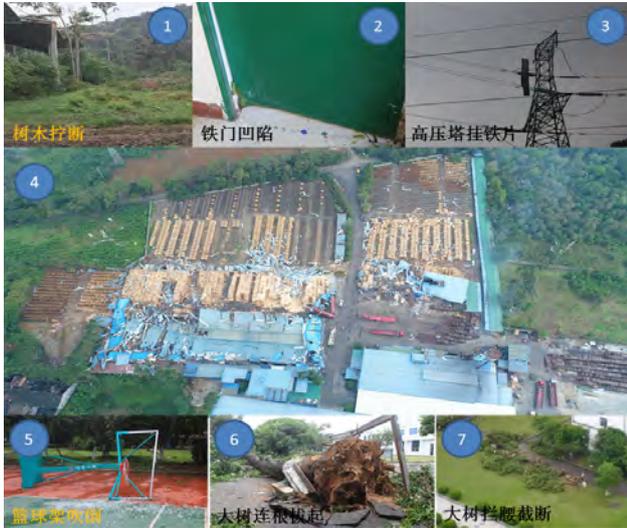


图1 2018年4月20日柳州市柳北区沙塘镇一带龙卷灾害
Fig.1 Tornado damage to Shatang Town in Liubei District, Liuzhou City on April 20, 2018

在沙塘镇触地，随后向东北方向移动，移动路径长约2 km，持续时间约10 min，最大破坏直径约400 m，龙卷级别为EF2级，属强龙卷。

5月龙卷

5月有3次龙卷过程，2次发生在广东，1次发生在吉林。

5月7日11:40，受高空槽影响，广东省潮州市饶平县钱东镇出现龙卷，钱东镇政府的工作人员在距离龙卷约3 km的位置上拍摄到了3 min的龙卷视频。该次龙卷移动方向大致是西南偏西向东北偏东，由于下垫面为广阔的鱼塘，因此没有明显的树木倒伏等痕迹，龙卷移动路径约为1.5 km，强度没有办法判断。

5月21日15:40，广东省中山市东升镇白鲤村出现龙卷，市民录下了龙卷视频。由于龙卷影响区域为大范围鱼塘，影响不严重，仅造成两处屋顶的石棉瓦和铁皮被掀翻。该次龙卷移动路径为1.1 km，持续时间约22 min，强度级别为EF1级，属于弱龙卷。

5月28日12:00前后，受东北冷涡影响，吉林省松原市长岭县太平川镇出现龙卷。受灾严重的地点为烈士墓和养殖场，其中烈士墓范围的商品房玻璃破碎，铁皮厂房顶掀翻、房屋瓦片吹飞，电线杆折断，部分直径超过20 cm的杨树被吹倒或折断。龙卷持续时间约15 min，移动路径约为6.0 km，强度为EF2级。

6月龙卷

6月出现2个龙卷，都是台风龙卷，均位于广东省。受1804号台风艾云尼环流影响，6月8日01:40、14:03前后在广州市南沙区横沥镇、佛山市南海区大沥镇先

后出现两个龙卷。

6月8日01:40前后，广东省广州市南沙区横沥镇云水雅苑住宅小区及附近工地遭受龙卷袭击，导致厂房的铁皮顶、房屋玻璃受损，路边树木倒伏、电线杆折断，临时搭建的简易住房被吹倾斜，简易住房的外墙面散落在四周，移动板房被吹翻，造成1人死亡、8人受伤。龙卷路径长度约1.1 km，最大影响直径达到200 m，强度为EF3级。龙卷发生在台风中心的右前侧（东北象限），距离台风中心约183 km。

6月8日14:03前后，广东省佛山市南海区大沥镇沥东社区发生龙卷，报料人录到5 s视频。龙卷造成厂房铁皮屋顶被掀，破坏面积约2000 m²，多辆汽车被砸，没有造成人员伤亡。龙卷影响时间约30 s，路径长度约380 m，强度为EF1级。龙卷发生在台风中心的偏东方，距离台风中心约92 km，这是我国近年来距离台风中心最近的一个龙卷，属于台风环流内部龙卷，为历史罕见个例。第一作者在此次龙卷发生前58 min（即13:05）成功发布了龙卷警报。8日中午前后，一条南北向的强回波带自南向北影响佛山禅城区南庄至南海区里水、大沥一带，强回波带由多个对流单体组成，单体之间间隙较小，几乎连续，这也使得对龙卷母体风暴的辨析更加困难，尽管12:54广州多普勒雷达1.5°仰角速度图上还只是弱中气旋，但当天的环境条件有利于龙卷的发生，弱中气旋未来加强为中等强度以上中气旋的可能性比较大，且考虑到大沥一带是佛山历史龙卷高发区等综合因素，预计大沥一带未来出现龙卷的风险比较高，本文第一作者于13:05针对大沥镇等5个镇街发出了龙卷警报，14:03许大沥镇出现龙卷灾害。实际上，在发布大沥龙卷之前的11:50还对佛山南海西樵、丹灶等地发出过一次龙卷预警，但是没有龙卷出现。

8月龙卷

8月出现14个龙卷。其中，1个西风带系统龙卷，1个季风低压外围龙卷，其余12个是台风外围龙卷。

8月4日12:50前后，受高空短波槽影响，内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特后旗获各琦苏木海力素国家基准气候站东侧4~5 km处出现龙卷，海力素国家基准气候站站长等多位工作人员分别从不同的角度和时次拍到了龙卷视频（图2）。由于龙卷风发生地附近人迹罕至、树木极少、植被稀疏，没有造成人员伤亡和财产损失。通过现场勘查取证、影像资料收集、现场走访及多种气象数据综合分析研判，确定龙卷出现时段为12:49—12:57，持续时间为8 min左右，强度为EF0级。



图2 2018年8月4日巴彦淖尔市海力素观测场附近龙卷

Fig. 2 A tornado near Hailisu Observatory in Bayannaocer City on August 4, 2018

1814号台风摩羯外围环流中至少出现11个龙卷，先后影响了天津市、山东省。

8月13日17:30前后，在台风“摩羯”登陆18.5 h后，受台风低层倒槽与中层西风槽共同影响，天津市静海区静海镇西五里到大口子门附近出现龙卷，导致房屋损毁179间、倒塌4间，倒伏或折断电线杆8根、电塔3座，农作物受灾面积有854.7 hm²，造成2人受

伤，直接经济损失超过4700万元。龙卷经过静海区静海镇魏家庄村—北五里村—西五里村—梁头镇小李庄村（图3），自东北向西南方移动，路径长度约5 km，宽度几米到几百米，持续时间约15 min，强度为EF3级。龙卷位于台风中心的正北方向，距离台风中心约725 km，这是我国近年来距离台风中心最远的一个龙卷。



图3 2018年8月13日天津市静海区龙卷路径及灾害

Fig.3 Tornado track and damage in Jinghai District, Tianjin City on August 13, 2018

随后1814号台风摩羯又在山东省至少产生了10个龙卷。其中，8月13日23:00前后1个龙卷影响了山东省南部的枣庄市台儿庄区涧头集镇谷庄村、张山子镇官庄村一带；14日09:30—14:00，又有9个龙卷先后影响山东省北部的潍坊市昌邑市柳疃镇西辛安庄村和渔尔堡村（09:30—09:50）、烟台市莱州市朱桥镇大冢坡、大兰邱家村一带（10:20—10:40）、滨州市惠民县姜楼镇（12:10前后）与桑落墅镇哨马张村（13:40—13:50）、阳信县洋湖乡马上和村

（13:10—13:20）、德州市庆云县尚堂镇李含贵村（13:30—13:50）以及东营市利津县盐窝镇北岭社区台前村（13:10—13:20）、垦利孤东油田（10:40前后）和河口六合街道南旺村附近（14:00前后）。另外，14日下午，滨州市阳信县水落坡镇任集村也出现了疑似龙卷灾害。上述多个龙卷路径长度在50 m~5 km，破坏宽度在20~150 m，强度介于EF0~EF2级。龙卷出现在“摩羯”登陆后34.5~39.0 h时段内、距离“摩羯”中心300~430 km的东北象限

螺旋雨带中。这些区域均为靠近海岸线的陆地，地势非常平坦。其中，潍坊市昌乐市柳疃镇西辛庄村和渔尔堡村均紧邻潍河且位于潍河的西侧（左侧）；烟台市莱州市朱桥镇大冢坡、大兰邱家村龙卷距离海岸线约7 km。其余7个龙卷均发生在黄河北侧（左侧）约50 km的平原范围内。龙卷造成的灾害主要表现为民房和厂房受损，瓦片和彩钢瓦被吹飞，棚架倒塌，树木、庄稼倒伏或折断，电线杆、广告牌和院墙倒塌。其中，最强龙卷发生在滨州市惠民县姜楼镇，距离海岸线约130 m，路径长约4.5 km，破坏宽度150 m，房屋严重受损，树木被折断或拔起，3吨重的钢梁被吹飞，破坏等级至少达到了EF2级。另外，袭击德州市庆云县尚堂镇龙卷，导致窗玻璃破碎，多人受轻伤，1名儿童小手指被切断，受伤较重。

1815号台风温比亚外围环流中出现了2个龙卷。其中，8月18日18:40前后，1个龙卷首先在江苏省徐州市铜山区刘集镇郭桥村触地，随后向西北方向移动，经过马宅子、许集、许楼村等地，最后在刘集镇潘屯消散，整个移动路径长约8 km，持续时间约25 min。龙卷导致1名儿童死亡，并造成房屋严重受损，杨树拦腰折断，大树被连根拔起，大片庄稼被吹倒（图4）。龙卷破坏宽度普遍在40~50 m。其中，

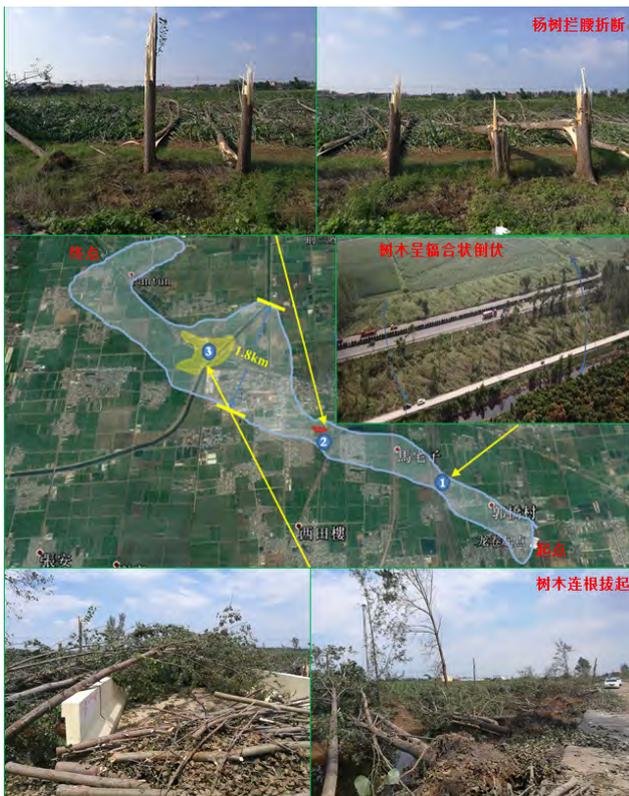


图4 2018年8月18日徐州市铜山区龙卷路径及灾害
Fig.4 Tornado track and damage in Tongshan District, Xuzhou City on August 18, 2018

在许楼村附近，龙卷最大破坏直径达到1.8 km，现场有大量树木被连根拔起，龙卷级别为EF2级，属于强龙卷。龙卷出现在台风温比亚移动方向东北象限的螺旋云带中，龙卷发生地刘集镇距离台风中心约300 km。

台风温比亚外围环流中的另一个龙卷出现在8月18日19:46前后、丰县凤城街道谢集村附近，持续时间约1 min，路径长度约500 m，破坏宽度30~40 m，附近气象站测得最大风速30.5 m/s（11级），造成部分民房受损，强度为EF1级。龙卷同样发生在台风温比亚移动方向东北象限的螺旋云带中，龙卷发生地距离台风中心约290 km。前后两处龙卷的距离为53 km。

8月31日14:25前后，受季风低压外围环流影响，广东省广州市番禺区石楼镇岳溪村出现龙卷，约2600 m²的铁皮厂房顶被掀翻，龙卷路径长度约80 m，主要影响区域为该村一家企业的第四车间，最大破坏宽度为52 m，强度为EF1级。

9月龙卷

9月出现2个龙卷，都是台风龙卷，均位于广东省。受1822号台风山竹外围环流影响，9月17日在广东省佛山市三水区白坭镇、肇庆市鼎湖区永安镇先后出现2个龙卷。龙卷发生地分别距离台风中心490和540 km，属于台风外围龙卷。

9月17日09:37前后，龙卷首先在广东省佛山市三水区白坭镇金竹村附近触地，随后龙卷向西北偏北方向移动，经过三水区西南街道，最后于10:00在肇庆市四会区挹泊村减弱消失。龙卷持续时间约23 min，移动路径长达18 km，平均移动速度为47 km/h，最大破坏宽度为150 m。龙卷造成简易棚屋被摧毁、屋顶瓦片被吹走、部分围墙倒塌、直径约40 cm的大榕树折断、树木被连根拔起或被吹倒等，强度为EF2级（图5）。第一作者及团队提前37 min发布了该次龙卷预警，这也是年内第二次龙卷预警的成功尝试。此次天气过程中，最早在当日08:30前后的广州多普勒雷达0.5°、1.5°仰角上监测到有微型超级单体风暴发展，对应速度上仍是弱中气旋，08:42—08:54，微型超级单体风暴进一步增强，低层0.5°仰角出现中等强度中气旋，底高在1 km以下，基于三水区白坭镇一带是佛山历史上龙卷多发区等综合因素考虑，本文第一作者及团队于09:00针对白坭镇等4个镇街发出了龙卷警报，09:37许龙卷在白坭镇触地。实际上在当日15:00还发出了另一次龙卷预警，没有出现龙卷。6月8日“艾云尼”台风龙卷和9月17日“山竹”台风龙卷过程，预警成功两次，空报两次。表明，并非具备相似条件的区域都有龙卷出现，业务上对龙卷的具体落



图5 2018年9月17日佛山市三水区到肇庆市四会区龙卷路径、强度及灾害

Fig.5 Tornado track, intensity and damage from Sanshui District, Foshan City to Sihui District, Zhaoqing City, on September 17, 2018

区和发生时间等的短临预报还存在极大困难。

9月17日13:15左右,肇庆市鼎湖区永安镇发生龙卷,持续时间比较短,破坏区域很小。龙卷路径上的房屋受损,强度为EF1级。

总结与讨论

2018年我国可确认的龙卷数量达到22个,其中EF1级或以上强度龙卷较2004—2013年的年平均统计结果^[7]是属于偏多的年景。龙卷活动时段集中在4—9月,以8月最多。年度首个龙卷发生在4月20日,最晚龙卷发生在9月17日。台风龙卷占到年度龙卷总数的73%,首个台风龙卷发生在6月8日,此类龙卷主要发生在夏季的6月、8月以及初秋9月。

在台风环流背景场中产生多个龙卷是2018年龙卷过程的一个重要特点。其中,最为突出的1814号台风摩羯,其外围环流中先后出现至少11个龙卷。从以往研究成果看,在近30年来,这个数量仅次于1989年9月16日第23号台风外围环流在江苏省盐城市、南通市和泰州市等地产生的23个龙卷。年度台风龙卷数量占

到总数的73%,显著多过西风带系统龙卷。为何2018年台风龙卷如此活跃且单次台风过程蕴含着多个龙卷?这种台风龙卷的高活跃度是否与年度大气环流异常、台风活动特征等存在某些联系,还值得做进一步研究。

致谢

感谢天津市气象台、山东省气象台、徐州市气象台、柳州市气象台、广东省气象台、广州市气象台、番禺区气象局、南沙区气象局、巴彦淖尔市海力素国家基准气候站,以及北京大学孟智勇教授等对龙卷灾害调查提供的支持和帮助。

资助信息

广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015);灾害天气国家重点实验室开放课题(2018LASW-B18);国家自然科学基金(41675023)

参考文献

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,2006:130-143.
- [2] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等.一次强龙卷过程的多普勒天气雷达研究.高原气象,2006,25(5):914-924.
- [3] 俞小鼎,王秀明,周小刚.雷暴与强对流临近预报技术进展.气象学报,2012,70:311-337.
- [4] 郑永光,朱文剑,姚聃,等.风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计.气象,2016,42(11):1289-1303.
- [5] 张小玲,杨波,朱文剑,等.2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析.气象,2016,42(11):1304-1314.
- [6] 郑永光,朱文剑,田付友.2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理.气象科技进展,2018,8(2):44-54.
- [7] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特征.气象,2015,41(7):793-805.
- [8] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论.北京:科学出版社,1979:464-465.
- [9] 沈树勤.台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析.气象,1990,16(1):11-15.
- [10] 郑媛媛,张备,王啸华,等.台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析.气象,2015,41(8):942-925.
- [11] 黄先香,俞小鼎,炎利军,等.广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比.应用气象学报,2018,29(1):70-83.
- [12] Schultz L A, Cecil D J. Tropical cyclone tornadoes,1950-2007. Mon Wea Rev,2009,137:3471-3484.
- [13] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane tornado environments. Mon Wea Rev,1991,119:1954-1978.

我国龙卷预警试验的前沿阵地

——访佛山市龙卷风研究中心炎利军主任

■ 张萌

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.010

张萌: 请用通俗易懂的语言简单描述一下龙卷所代表的小尺度强对流天气, 并针对2018年总体情况, 给出龙卷和小尺度灾害“年景”的准确解读。

炎利军: 龙卷等小尺度强对流天气的监测预警是世界性难题。这也是由它们自身的特点决定的。以小尺度灾害天气的典型代表——龙卷为例, 至少具有5个特点: 个头小、寿命短、脾气大、出生环境复杂, 还喜欢玩快闪。所谓“个头小”, 是指它的尺度小, 它影响的范围一般在100 m以下, 强龙卷可达几百米到1 km; “寿命短”, 是指它的持续时间短, 它的持续时间一般是几分钟到十几分钟, 短的只有几秒到几十秒, 当然也有极少数持续时间可达到几十分钟, 最长一般不超过1 h; “脾气大”, 是指它的破坏力极大, 它虽然影响范围小, 持续时间短, 但一旦发生, 往往会造成严重的灾害, 龙卷有极强的破坏力, 强龙卷常常在短时间内造成重大的人员伤亡和财产损失, 其危害很大的原因主要在于以下几个方面: 风速极大, 其中心最大风速可达100~200 m/s, 旋转性强、风向变化大, 强龙卷能将大量物体卷起抛出; “出生环境复杂”, 是指龙卷可以发生在台风的环境中, 也可以发生在暴雨的环境中, 有时候还伴有冰雹、雷暴等极端天气; 所谓龙卷的“快闪”, 主要是指龙

【编者语】

2018年佛山市对两次台风龙卷过程进行了预警试验, 发布了独立的、到达镇街的龙卷预报, 取得了较好的效果, 本刊针对我国龙卷发生态势、实际预警发布过程中存在的困难等问题采访了佛山市龙卷风研究中心主任炎利军。

卷的突发性强、移动速度快, 龙卷移动速度一般为40~50 km/h, 最快可达100 km/h。也正是龙卷自身这些独特特点, 使得我们对龙卷的“习性”还了解得不够, 对龙卷形成的机理也还不清楚。所以, 目前对龙卷的监测和预警仍极为困难。

2018年, 在上级单位和广东省内外兄弟气象部门的帮助和支持下, 佛山市龙卷风研究中心(以下简称“龙卷中心”)参与了国内16次疑似龙卷天气过程的灾情调查, 经现场勘察、航拍、采访目击者等, 最后确定, 2018年可以确认的龙卷有22个, 天气过程有10次。需要说明的是, 实际龙卷发生次数应大于该数, 因为龙卷中心是根据新闻媒体报道或内部资讯得知龙卷发生后到现场进行灾情调研, 因此并不全面。2018年国内至少有19个EF1级或以上强度的龙卷发生, 跟气象干部培训学院范雯杰和俞小鼎老师所统计的, 2004—2013年中国EF1级或以上强度龙卷的平均情况相比, 是略偏多的, 其中台风外围龙卷偏多起到一定作用, 2018年应该是龙卷等小尺度灾害偏多年景。

张萌: 近5~10年中国龙卷发生频率是否有增加趋势? 有人说龙卷和飑线等灾害天气多发趋势与人口覆盖更广泛和气象探测网覆盖更加密集有关, 是否有一定道理?

炎利军: 近几年中国由于出现了几次持续时间长、强度大的龙卷, 包括2015年台风彩虹外围佛山EF3级龙卷、2016年江苏盐城阜宁EF4级龙卷、2017年内蒙古赤峰EF4级龙卷, 从而提高了人们对龙卷的关注度, 也引发了中国龙卷发生频率是否增加的思考。相对统计数据而言, 近5年来我国EF3级及以上强度的龙卷有多发趋势。

一方面, 随着经济社会发展、人口增长以及城市建设加快, 气象灾害对人们生命财产的影响越来越



图1 本刊编辑采访炎利军主任(摄影:李兆明)

收稿日期: 2019年1月21日

大,使得人们对龙卷等灾害性天气的关注度提高;另一方面,智能手机、互联网等通信技术的发展,越来越多灾害性天气更容易被人们发现并呈现于大众媒体上,得到更广泛的报道和宣传,让更多的人关注和了解;同时随着气象现代化建设的推进,天气雷达、自动气象站等气象探测网的加密也使得观测网越来越精细,龙卷的踪影和蛛丝马迹也可能会被捕捉到。因此,龙卷和飏线等灾害性天气多发趋势或与人口分布更广泛和气象探测网覆盖更加密集有关。

张萌: 如果增加,您认为是由于仪器精细化发展能够捕捉到的龙卷变多了,还是因为气候变化等原因确实使龙卷数量增加了?

炎利军: 可以比较肯定的是,随着经济社会的发展,智能手机和社会视频进一步普及,以及探测仪器的技术革新,让我们有机会发现更多的龙卷。以前大家不大了解龙卷的时候,可能会把龙卷灾害归到普通雷雨大风造成,或者强度较弱的龙卷由于无人发现或没有造成很大灾害,而没有报道或记录。对于气候变化如何影响我国龙卷的活动,我们还需要收集更长时间序列的龙卷发生情况,做进一步的分析。

张萌: 中国的龙卷相比其他龙卷多发国家,例如美国,具有什么特色?

炎利军: 美国是世界上龙卷发生频率最高的国家(年平均超过1000个),因此对龙卷的研究开始早且较为深入。中国年平均龙卷发生频率不到美国的十分之一,对龙卷的研究处于初级阶段。

中国龙卷相比美国龙卷,发生频率低,发生时间相对集中,大都发生在春夏两季;发生地域性强,主要集中在长江三角洲江苏北平原至黄淮平原、广东和广西、东北等地势平坦地区;强龙卷具有在某地频发的特点,比如苏北地区等。美国龙卷发生频率高,全年可能发生龙卷,主要集中在春夏秋季;有两个龙卷高发区,一个是佛罗里达州,另一个是美国中南部的“龙卷走廊”,强龙卷主要集中在“龙卷走廊”。

张萌: 近年来我国很多地方出现龙卷,在不同地区,龙卷生成的机理有何差异?

炎利军: 龙卷的形成机理大致是:大气不稳定产生强烈的上升气流,上升气流在对流层的中部开始旋转,形成中尺度气旋。中尺度气旋向地面发展和向上伸展,变细增强,在气旋内部形成龙卷核心。当发展的涡旋到达地面高度时,地面气压急剧下降,地面风速急剧上升,形成龙卷。

在我国,龙卷在不同的地区有不同的影响系统,东北地区主要为东北冷涡,江淮流域主要是副高西侧的西风带中的对流系统,而华南则主要为台风以及华

南前汛期冷暖空气对峙引发的锋面和飏线系统引起的。另外,华南地区强龙卷超过一半发生在台风外围环流中,属于浅对流龙卷,或者微型超级单体龙卷,华南前汛期冷暖空气交汇形成的对流系统中出现的龙卷多为弱龙卷。

张萌: 伴随台风生成的龙卷呈什么趋势?带来龙卷的台风是否变多?是否有一个台风带来多个龙卷的情况?如果说未来影响我国的台风可能增多,那么是否预示着相关龙卷活动也更多?

炎利军: 早在20世纪50年代,美国学者开始对台风外围龙卷有所研究,研究表明:1948—1986年登陆美国的大约59%台风产生龙卷;1961—1982年登陆日本的台风中,大约有40%产生龙卷。国内由于龙卷研究刚处于起步阶段,龙卷个例较少,目前大部分台风龙卷的研究主要为个例分析,尚无台风龙卷发生概率方面的统计。陈联寿等指出,台风龙卷大多出现在相对台风移动方向的右前侧,距离台风中心300~400 km发生概率高。

有一个台风引起多个龙卷的情况。据记录,美国1967年飓风Beulah的外围雨带上产生了超过100个龙卷;2004年9月15—17日飓风Ivan的外围雨带上产生了118个龙卷,其中多数发生在飓风中心的东北部。在我国,2018年也有多次台风外围引发多个龙卷出现的情况。如:2018年6月8日,在1804号台风艾云尼进入广东境内逐渐减弱过程中,其外围广州南沙区、佛山南海区先后出现龙卷天气;2018年8月14日,1814号台风摩羯登陆深入内陆后,受其外围螺旋雨带影响,山东枣庄、东营、滨州、潍坊等地先后出现了多个龙卷;2018年9月17日上午,1822号台风山竹进入广西境内逐渐减弱,受其外围螺旋云系影响广东佛山三水区、肇庆鼎湖区先后出现龙卷天气。

如果未来影响我国的台风可能增多,那么预示着台风外围龙卷活动的可能性会增大。

张萌: 请您谈谈龙卷研究和业务之间的关系。

炎利军: 根据国家气象中心郑永光、张小玲等专家的研究论文和反馈信息,目前只有美国、加拿大等少数国家有开展龙卷预警业务,我国还没有正式开展龙卷预警业务。龙卷研究是一种基础性工作。特别是,2016年6月23日江苏盐城龙卷造成了严重灾害之后,2016年10月起中国气象局预报司启动为期3年的龙卷预警试验,2017年初,减灾司选取佛山、盐城开展龙卷群策群防和联动试验。目的是探索龙卷预报预警业务建设所需要的基础支撑条件、业务技术体系和预警服务体系,为在我国大范围地区建立龙卷监测预报预警业务提供经验,逐步提升致灾性强对流天气的

监测预报预警、防灾能力。广东省气象局是试点省份之一，佛山市是广东省的试点市，过去两年我们不断加强研究、凝炼指标，2018年开始龙卷预警试验。

但是目前我国龙卷研究还处于起步阶段，龙卷监测能力与美国等已开展龙卷业务的国家相比仍存在较大差距，龙卷研究亟待加强，可考虑先在龙卷高发地进行龙卷试验。在龙卷试验期间，至少需要加强以下几方面工作：1) 龙卷历史资料不全面，需要通过普查收集更完整的历史龙卷资料，建立完整规范、质量可靠、长时间序列的龙卷数据库，进行我国龙卷天气个例和气候特征的研究；2) 加强雷达、自动气象站等观测资料对龙卷的分析与应用，目前我国建成了多部双偏振雷达，相控阵雷达也处于规划中，发展好双偏振雷达和相控阵雷达技术，加强利用天气雷达和自动气象站等设备监测龙卷的科学研究和技术累积；3) 加强业务人员对龙卷形成机理、龙卷识别、风灾灾害调查等方面技术的培训，提高龙卷监测能力；4) 开展龙卷数值模拟研究。

张萌：2018年龙卷中心成功进行了龙卷预报，请您介绍当时决定发布预警的最主要的判断依据。未来类似准确的龙卷预报是否可以期待？

炎利军：2018年6月8日是基于大尺度环境条件利于佛山龙卷发生，如台风的强度、移动路径和历史统计的易发台风龙卷的路径相似，台风登陆后强的西南风和东南风急流在珠江口汇合，珠三角是低的抬升凝结高度，强的0~1 km垂直风切变等条件利于龙卷的发生，在短时临近上监测到有多个中气旋加强发展，移动路径可能经过佛山市地势相对平坦的区域，这些区域也是佛山历史上龙卷多发区，因此进行了龙卷预警。

过去5年，龙卷中心重点加强了龙卷大尺度环境条件、灾情调查分析和雷达识别等方面的研究，特别是对台风外围龙卷进行了深入分析，总结出龙卷易发的大尺度环流形势和从雷达图快速判断龙卷的技术指标。开发了《佛山市龙卷风及雷雨大风等灾害预警靶向发布系统》，通过该发布系统可以监测到台风外围龙卷发生的大尺度环境条件，物理量参数等是否利于龙卷的发生。台风外围龙卷的发生虽有一定规律性，但目前的仪器监测仍存在很大的难度，特别是弱龙卷可能会出现很多的漏报和空报，可以继续开展龙卷预警试验。

张萌：对于未来气象部门实现龙卷预报业务化的必要性和可行性方面，您有什么看法或建议？

炎利军：龙卷监测预警是世界性难题，尽管目前我国开展龙卷预警预报业务还存在很大的困难，但是出于防灾减灾的需要，还需大力推进包括龙卷等极端

强对流天气的短时临近监测预警业务建设。对于龙卷而言，至少还需要在三个方面做出努力：一是观测技术的变革，如使用相控阵雷达技术，提升雷达的时空监测分辨率、流场的快速探测能力，更好更快地反演三维风场动态演变特征等；二是分析技术的变革，如使用高分辨率集合数值预报模式实时预报中小尺度天气系统的活动、人工智能预测龙卷技术等；三是借助第三方的力量，这包括公共视频的龙卷图像自动识别和公众快速报告制度的建立。我国在公众报告制度方面以往重视不够，美国龙卷预警提前14.6 min，就包括了龙卷追踪志愿者及时报告所贡献的部分时效，而不仅仅是雷达监测预警贡献的预警提前量。

张萌：过去几年我国也发生过严重的龙卷灾害，那么我国开展龙卷预警业务的难处在哪里？

炎利军：我国龙卷天气预报预警相较美国更具有挑战性。首先是数量上不及美国的十分之一，发生概率很低，研究样本很少。其次是我国很多致灾龙卷多发生在暴雨、雷雨大风或者台风等环境中，这种强降水、雷暴、冰雹、龙卷等多种类型天气现象共生的情况下，使得我国龙卷预报预警更加困难。即使对于台风龙卷，虽然发生发展需要特定的环境条件，但是具备这些条件的区域并非都有龙卷发生，而且龙卷尺度小、突发性强、持续时间短、发生概率低，因此业务上对于龙卷的具体发生时间和落区进行预报预警存在极大的困难。

2018年佛山市对两次台风龙卷过程进行预警试验，虽然取得比较好的效果，但在实际预警发布过程中仍存在问题。比如：并不是具备产生龙卷条件的区域都会出现龙卷、龙卷空报率较高等，这也说明龙卷预警技术还不成熟、还不具备业务化的能力，这主要是因为孕育龙卷的母体风暴所处环境极为复杂，对龙卷的发生发展机理还缺乏深入研究，加上龙卷本身尺度小、突发性强、持续时间短、发生概率极低等特点，使得业务上对龙卷发生时间和地点等的临近监测识别和预报预警还存在诸多问题和困难。

张萌：本刊在2018年第2期和第3期，在包括龙卷中心等机构的支持下出版了两期针对龙卷和局地强对流的专辑，也请您评价和提出意见和建议。

炎利军：话题很好，实用性很强，而且如前面所言，2018年龙卷是比较高发的了，专辑很贴近业务需求和现实情况。两期针对龙卷的专辑主题包括“龙卷预报与研究”“强对流天气研究与业务”，内容包括了龙卷的统计特征、动力分析、数值模拟、预报预警，以及强对流天气预报预警业务等，内容丰富全面，为基层开展龙卷研究等方面提供了

链接：专家点评



国家气象中心强天气预报
中心首席郑永光

龙卷是地球大气中最强烈的对流风暴。美国是发生龙卷最多的国家，中国年龙卷发生数目不到美国的十分之一。龙卷通常分为两类，一类为中气旋龙卷，另一类为非中气旋龙卷。非中气旋龙卷的监测和预警十分困难；依靠新一代多普勒天气雷达有可能对中气旋龙卷进行有效预警，比如2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷和2018年佛山的两次龙卷。EF2级及以上中气旋龙卷的发展环境条件包括一定的对流有效位能、强的0~6 km垂直风切变、低的抬升凝结高度和较大的低层垂直风切变。从天气形势来看，我国龙卷易于发生在暴雨或者台风这样的天气背景下，比如2015年10月4日广东彩虹台风龙卷、2016年6月23日江苏盐城龙卷（暴雨背景）、2018年的摩羯台风龙卷等个例，这增加了我国龙卷监测识别和预报的难度。

灾后现场天气调查工作依然是确认龙卷的最重要手段之一，但目前尚未有经过灾调确认的中国龙卷年度报告发布，因此《2018年中国龙卷活动特征》一文能够为进一步深入认识中国的龙卷提供较好的研究和业务基础资料。2018年是中国的龙卷多发年，虽然其总体灾害不强，但从该年的这些龙卷个例中可看到，龙卷的监测识别和预报预警都有非常大的难度，因此未来需要在部分重点区域布设具有高空间分辨率的双偏振雷达和其他设备来提高对龙卷的综合探测能力，以加深对龙卷尤其是强致灾龙卷的认识，并发展监测识别算法和精细数值模式来提高对强龙卷的预报预警能力。

很好的专版内容。

建议可增加国外龙卷业务开展情况介绍，比如国外龙卷预警业务系统以及国外龙卷形成机理研究成

果、龙卷识别技巧、龙卷预报预警如何开展等内容的介绍。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

（上接40页）

2.4 东南亚+南海海域

针对东南亚及南海热点区域，需要特别设计一个东南亚及南海海域观测区域。设计该区域的主要目的是对东南亚及南海海域进行高时间分辨率的扫描，获取邻国及海上台风区域的高频次观测数据。扫描范围：25°N—11°S。根据扫描镜运动规律，精确计算所需扫描时间为203.7 s。

2.5 澳大利亚及其周边海域

设计该区域的主要目的是针对澳大利亚及其周边海域开展高频次观测，为相应国家提供高时间分辨率的观测资料。扫描范围：8°—50°S，108°—168°E。根据扫描镜运动规律，精确计算所需扫描时间为126.2 s。

2.6 新版中国地图区域

针对新版中国地图或竖版中国地图，专门设计了一个扫描区域，包含南海在内。扫描范围：0°—55°N，65°—140°E。根据扫描镜运动规律，精确计算所需扫描时间为301.9 s。

3 结语

风云四号静止轨道气象卫星是世界上最先进的静止轨道气象卫星之一，此次设计建设的地面应用系统是迄今最为复杂的地面系统。卫星发射入轨后，由空

间段的卫星和地面应用系统共同构成我国新一代静止气象卫星观测系统。本文探讨了三轴稳定平台上风云四号静止轨道气象卫星成像仪复杂的工作模式，首次提出了成像仪灵活多样的观测区域设计方案，在全圆观测时间之余，可以高效利用小块观测时间，按需灵活安排高频次的多种区域观测，充分发挥静止轨道卫星高时间分辨率的优势。重点设计的观测区域包括中国大陆区域、中国大陆+海区、东海海域、东南亚+南海海域、澳大利亚及其周边海域、新版中国地图区域，包含了天气预报最关注的中心区域、沿海区域、台风与热带气旋频发区域、东南亚热点区域等，在成像仪在轨测试中发挥了重要作用，为开展业务运行奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 张志清, 董瑶海, 丁雷, 等. 我国首颗第二代静止气象卫星风云-4 升空. 国际太空, 2016(12): 6-12.
- [2] DOC, NOAA, NESDIS, et al., Product definition and users' guide (PUG) volume 4: GOES-R rebroadcast (GRB), <https://www.goes-r.gov/users/docs/PUG-GRB-vol4.pdf>, 2014.
- [3] Kotaro B, Kenji D, Masahiro H, et al., An introduction to Himawari-8/9 - Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2016, 94(2): 151-183.
- [4] 多通道扫描辐射计工作流程说明. 上海: 上海卫星工程研究所, 2014.

西南联大的气象教育与人才培养

■ 解明恩 索渺清 叶梦姝

1938年4月，北京大学、清华大学、南开大学从湖南长沙组成的“国立长沙临时大学”西迁至昆明，改称“国立西南联合大学”。其存在不过9年，却成为中国高等教育史上的丰碑。西南联大地质地理气象学系的师生中产生了32位两院院士，其中气象学3人。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.011

国立西南联合大学，存在不过9年，却成为中国高等教育史上的丰碑。这所大学，身处边陲，却开启了中国近代文化史上绚烂的一页。诺贝尔奖获得者杨振宁先生曾谈道：“我一生非常幸运的是在西南联大念过书。”《国立西南联合大学史料》记载：“在抗战八年的艰苦岁月里，在地处边陲的云南昆明，国立西南联合大学师生克服物质设备、图书资料、生活条件等方面的种种困难，精诚合作，共济时艰，结茅立舍，弦歌不辍，并继承和发扬三校风格各异的优良校风和学风，五色交辉，相得益彰，八音合奏，终和且平。在当时的历史情况下，内树学术自由之规模，外来民主堡垒之称号，以卓著的业绩，蜚声海内外，为我国的教育科学文化事业做出了重大贡献，同时促进了云南和西南地区文化教育的发展，在中国教育史上和新民主主义革命史上写下了光辉灿烂的一页。”冯友兰撰写的“国立西南联合大学纪念碑”言：“联合大学之始终，岂非一代之盛事，旷百世而难遇者哉！”国外有学者说：“西南联大的历史将为举世学术界追忆与推崇……联大的传统，已成为中国乃至世界可继承的一宗遗产。”在1948年“中央研究院”首届院士评选中，全部81位院士中有27人出自西南联大。从西南联大先后走出了杨振宁、李政道2位诺贝尔奖获得者；王希季、邓稼先、朱光亚、杨嘉墀、陈芳允、赵九章、郭永怀、屠守锷8位“两弹一星”功勋奖章获得者；黄昆、刘东生、叶笃正、吴征镒、郑哲敏5位国家最高科学技术奖获得者；173位两院院士。

民国时期我国高等学府设有气象专业（气象组）的学校仅有三所，即“国立中央大学”“国立西南联合大学”（清华大学）“国立浙江大学”。三校成为中国近代气象高等教育的摇篮，为中国气象事业培养

了许多杰出人才。西南联大地质地理气象学系的师生中就产生了32位两院院士，其中气象学3人。针对西南联大气象专业的史料挖掘研究，虽有一定的覆盖，但完整和系统性研究不多，本文试图重新梳理并补充一些空白。

1 西南联大的历史沿革与概况

“国立西南联合大学”（The National Southwest Associated University）是抗日战争期间设于云南昆明的一所综合性大学。1938年4月，北京大学、清华大学、南开大学从湖南长沙组成的“国立长沙临时大学”西迁至昆明，改称“国立西南联合大学”。

1937年8月28日，“国民政府教育部”分别授函南开大学校长张伯苓、清华大学校长梅贻琦、北京大学校长蒋梦麟，指定三人分任长沙临时大学筹备委员会委员。11月1日“国立长沙临时大学”正式上课。1938年2月19日开始分三路西迁昆明。1938年4月2日，教育部电令“国立长沙临时大学”改称“国立西南联合大学”，设5个学院26个系、2个专修科、1个先修班。1938年5月4日西南联大在昆明正式开课。三校校长轮任常委会主席，因蒋梦麟、张伯苓在重庆任职，只有梅贻琦长期留于昆明，故一直由梅贻琦任主席，主导校务。

西南联大中后期在校人数维持在3750人左右，其中学生约3000人，占80%；教师约350人，占9%；职员工警约400人，占11%。西南联大机构设置如下：常务委员会（校长任主席），总务处，教务处，训导处；文学院（中国文学系、外国语言文学系、哲学心理学系、历史学系），理学院（算学系、物理学系、化学系、生物学系、地质地理气象学系），法商学院（法律学系、政治学系、经济学系、社会学系、商学

收稿日期：2018年11月8日；修回日期：2018年12月5日

系),工学院(土木工程学系、机械工程学系、电机工程学系、航空工程学系、化学工程学系、电讯专修科),师范学院(国文学系、英语学系、史地学系、公民训育学系、数学系、理化学系、教育学系、师范专修科、先修班、体育部)。

1940年西南联大在原三校研究所基础上成立北大、清华、南开研究院,联合招收研究生。三校共设14个研究所(室)32个部(组),招收研究生240人,毕业74人。

1946年5月4日西南联大举行结业典礼,7月31日宣布结束,三校复员北返。师范学院留昆独立设院,改称“国立昆明师范学院”(现云南师范大学)。从长沙临大1937年8月筹建,到西南联大1946年7月31日停止办学,西南联大存在了8年零11个月。先后在西南联大就读过的学生约有8000人,毕业生约4000人。西南联大保存了抗战时期的重要科研力量并培养了一大批优秀学生,为中国乃至世界的发展做出了重要贡献。

2 西南联大地质地理气象学系

1928年清华大学成立地理学系,1929年秋首批批学生入学,除地理学外,开设地质学、气象学课程。1930年设气象组,1931年建立气象台。1932年清华地理学系易名为地学系,分设地理、地质、气象三组。

翁文灏、黄国章、谢家荣、袁复礼、冯景兰先后任地学系主任,黄厦千讲授气象课并任气象台主任。在地学系任助理员并在气象台负责观测的有刘粹中、史镜清、黄绍先、赵恕等。1934年,留德博士刘衍淮(北平师范大学教授)到清华兼职讲授气象学。1935年留英博士涂长望借聘到清华地学系任教授,一年后到“中央研究院”气象研究所工作。1936年李宪之从德国柏林大学博士毕业后任教于清华地学系,开设气象学、天气预报、理论气象学课程。

1937年11月长沙临大在清华地学系和北大地质系基础上成立地质地理气象学系,孙云铸任系主任。1938年4月长沙临大西迁昆明更名为西南联大。西南联大地质地理气象学系隶属理学院,吴有训、叶企孙教授先后任理学院院长,孙云铸、袁复礼教授先后任地质地理气象学系主任。

西南联大地质地理气象学系继承清华体制,下设地质、地理、气象3个组,其中地质组教师和学生最多,地理组次之,气象组最少。地质地理气象学系教师阵容强大,除来自德国哥廷根大学的米士(1932年获得地质学博士,1936年加盟西南联大)外,大部分中国教授曾留学美、英、德等国,获博士或硕士学位,表1列出其中一些教授国外留学情况,其中许多

表1 西南联大地质地理气象学系教授国外留学情况

姓名	留学院校	专业	学位	毕业时间	回国时间
王烈	德国弗赖堡大学	地质学	/	1914	1914
袁复礼	美国布朗大学、哥伦比亚大学	地质学	硕士	1920	1921
冯景兰	美国科罗拉多矿业学院、哥伦比亚大学	矿床学	硕士	1923	1923
孙云铸	德国哈勒大学	地质学	博士	1927	1929
谭锡畴	美国威斯康星州立大学、约翰·霍普金斯大学	地质学	硕士	1927	1928
杨钟健	德国慕尼黑大学	地质学	博士	1927	1928
张席禔	德国慕尼黑大学、奥地利维也纳大学	地质学	博士	1928	1929
王恒升	瑞士巴塞尔大学、苏黎世高等工业学校	岩石学	博士	1936	1937
张寿常	德国波恩大学	地质学	博士	1939	1939
张印堂	英国利物浦大学	地理学	硕士	1933	1933
洪绂	法国里昂中法大学	地理学	博士	1933	1934
陶绍渊	美国芝加哥大学、克拉克大学	地理学	博士(放弃)	1939	1939
钟道铭	英国伦敦大学	地理学	博士	1937	1937
林超	英国利物浦大学	地理学	博士	1938	1938
鲍觉民	英国伦敦大学	经济地理学	博士	1940	1940
李宪之	德国柏林大学	气象学	博士	1934	1936
赵九章	德国柏林大学	气象学	博士	1938	1938

人都成为我国地学界的大师。

地质学方面有王烈、袁复礼、冯景兰、孙云铸、谭锡畴、张席禔、王恒升、张寿常、米士(Peter Misch, 德籍)、杨钟健等;地理学方面有张印堂、洪绂、钟道铭、陶绍渊、林超、鲍觉民等;气象学方

面有李宪之、赵九章,助教有刘好治、谢光道、高仕功,3人于1937—1939年清华地学系气象组毕业留校任教,1947年后到英国、美国留学深造。1938年李宪之、赵九章的年龄仅为34岁和31岁,可谓青年才俊。1946年7月31日西南联大结束,三校北返,10月清华

在地质学系基础上成立气象系，李宪之任系主任。

表2为地质地理气象学系气象组的专业课程表。表中学期栏内无填写字者，表示全学年科目，上下字者，表示上下学期科目；必修或选修栏内，罗马数表示某年级必修科目，阿拉伯数表示某年级选修科目。

西南联大注重基础课教学，理工科学生除必修国

文、英文、中国通史外，在哲学、政治学、经济学、社会学、法学概论等几门社会科学课程中还要选修一门，4年中一般要学习30门左右课程。西南联大在教学上较严格，学生按系招生，但录取后不算入系，经过一年学习后，本系基础必修课必须在70分以上，才能入本系继续学习，否则得转系。考试不及格课程，

表2 1937—1946年西南联大地质地理气象学系气象组专业课程表

学年	课程	必修或选修	学期	学分	教师	学年	课程	必修或选修	学期	学分	教师
1937—1938	气候学			4	张印堂	1942—1943	气象学	II		6	李宪之
	气象学			6	李宪之		气象观测	III	上	3	刘好治
	理论气象			6	李宪之		天气预报	III	下	3	李宪之、刘好治
	气象观测演讲		上	3	李宪之		气候学	III、IV	上	3	李宪之
	气象观测实习		上	3	李宪之		中国天气	III、IV	下	2	李宪之
	航空气象		上	2	李宪之		高空气象	III、IV	上	2	赵九章
	天气预报演讲		下	3	李宪之		理论气象	IV		6	赵九章
	天气预报实习		下	3	李宪之		海洋学	3、4	下	2	赵九章
1938—1939	海洋气象		下	2	李宪之	天气图实习	IV		6	李宪之	
	气象学	II		6	李宪之	人文地理	II		4	鲍觉民	
	气象观测	III	上	2	李宪之	毕业论文与台上实习	III、IV		2+2	本组教授	
	天气预报	III	下	2	李宪之	1943—1944	气象学	II		6	李宪之
	理论气象	IV		6	赵九章		气象观测	III	上	3	刘好治
	航空气象	3、4	上	2	赵九章		天气预报	III		6	李宪之、刘好治
	高空气象	3、4	下	2	赵九章		理论气象	IV		6	赵九章
	地球物理	3、4		4	李宪之		大气物理	3、4	上	2	赵九章
新生代地质			3	杨钟健	地球物理		3、4		4	李宪之	
地图摄影		下	2	毛准	台上实习		IV		2	本组教授	
1939—1940	气象学	II		6	李宪之		制图学	III、IV		4	袁复礼
	气象观测	III	上	3	李宪之	气候学	III、IV	上	3	李宪之	
	天气预报	III	下	3	李宪之	气象学专题讨论	研、4	下	3	李宪之	
	气候学与世界气候	III、IV		4	李宪之	天气图实习	IV		6	李宪之	
	理论气象	III、IV		6	赵九章	毕业论文	IV、4		2	本组教授	
	大气物理		下	2	赵九章	1944—1945	气象学	II		6	李宪之
	岩石发生史		下	2	王恒升		气象观测	III	上	3	谢光道
	地质学(乙)	I、II		8	张寿常		天气预报	III		6	刘好治
新生代地质			3	张席祺	中国天气		IV	上	3	李宪之	
气象学	II、III		6	李宪之	天气图实习		IV		6	刘好治	
气象观测	III	上	3	刘好治	高空气象		IV	上	2	高仕功	
天气预报	III	下	3	李宪之、刘好治	气候学		III、IV	下	3	刘好治	
气候学与世界气候	III、IV		6	李宪之	理论气象		IV		6	李宪之	
1940—1941	理论气象	IV		6	赵九章	台上实习	IV		2	本组全体教师	
	海洋学	3、4	上	2	李宪之	政治地理		下	2	钟道铭	
	高空气象	III、IV	上	2	赵九章	毕业论文	IV		2	本组全体教师	
	人文地理	II		4	鲍觉民	1945—1946	气象学	II		6	李宪之
	农业气象		下	2	李宪之		气象观测	III	上	3	谢光道
	气象学	II		6	李宪之		天气预报	III		6	刘好治
	气象观测	III	上	3	李宪之、刘好治		气候学	III	上	3	李宪之
	天气预报	III	下	3	李宪之、刘好治		中国气候	III	下	3	李宪之
气候学与世界气候	IV		6	李宪之	世界气候		IV		2	李宪之	
理论气象	IV		6	赵九章	气象专题讨论		III、IV		2	全组教师	
海洋学	3、4	下	2	赵九章	台上实习		IV		2	全组教师	
1941—1942	大气物理		下	3	赵九章	高空气象	III、IV	上	2	高仕功	
	人文地理	II		4	鲍觉民	毕业论文	IV		2	全组教师	
	毕业论文	IV		2	全组教授						

不实行补考而是重修。有的课程是连续性的，先修课程不及格，不能学习后续课程。选修课不及格不一定重修，可改学另一门选修课。全年1/3课程不及格者得留级，1/2不及格者即令退学。

地质、地理、气象三组一年级课程共40个学分。有大一国文、大一英文、中国通史、微积分、经济学概论、普通地质学，体育课每年都有但不计学分。二年级三组的共同必修课有：普通化学、普通物理（普通生物学）、第二外语（德文或法文），其他为专业课。三、四年级主要为专业课，许多学生还选修一些外系课程以扩大知识面。李宪之讲授的气象学，教材取自德国书籍及美国最新版的《普通气象学》，天气预报的教学内容则参考德国Defant的书，后用美国佩特森（S.Petterson）的《天气分析与预报》。赵九章讲授理论气象，先参考德国的《动力气象学》与《物理学手册》，后自编讲义，是我国第一本理论气象教材。

1942年毕业于地学系的胡伦积先生回忆：“记得当年在西南联大时，大一国文、大一英文课都是由名教授主讲。我们的国文课，是闻一多、朱自清、王力、罗庸、罗常培、沈从文等教授分别执教的。初到云南时学生较少，国文课甚至由许多名教授轮流各讲所长，闻一多教授讲诗词，朱自清教授讲散文，罗常培和罗庸教授讲古文。”

据统计，1937—1945学年，西南联大地质地理气象学系在校生分别为87、59、109、91、89、73、34、35、38人，合计615人，学地质的居多。人数最多为1939年学年（1939—1940年），达到109人，往后逐年减少。原因是当时许多学生为了毕业后的出路，多选择工学院和经济等系科，再一个是学生淘汰率较高，因经济困难、负担过重、成绩下降，被迫休学、退学、转学的不少，有的学生时断时续地学习，读了六七年才大学毕业。实际上，西南联大每年的毕业生甚少，致使毕业生年年供不应求，尤以理工两院毕业生最为抢手。

西南联大时期的北大理科研究所地质学部和清华理科研究所地学部共招收研究生12人，硕士毕业的仅3人（董申保、顾震潮、李璞）。地学部气象学组1943年招生，仅录取顾震潮1人，师从赵九章教授，研习动力气象学，1945年的毕业论文为*The General Law of Distribution of Turbulent Wind in a Gust*。

3 学习和生活的艰难岁月

1938年赵九章教授初到昆明时，一家挤在昆明履善巷3号既旧又破的一间半民房里，他一面教书一面进行科研，靠微薄的工资收入，维系着全家清贫的

日子。1940年为躲避日机轰炸，赵九章一家同梅贻琦等一批清华教授及家属，应云南著名报人惠我春的盛情邀请，搬到了西北郊大普吉龙院村惠家大院住了3年。搬家时赵九章一家全部的家当只装了一小马车，理学院院长吴有训说：“看到九章搬家时那点东西，我就难过得要掉眼泪！”生活所迫，赵九章不得不变卖了祖传的元代著名书画家赵孟頫的一轴真迹，以补贴家用。1941年6月学校为帮助教师渡过生活难关，将靠月薪390元度日的赵家列入膳食补助范围，每人每月给予16.8元的补助。

李宪之教授在师资短缺，教材匮乏的情况下，曾在一年之内开设了气象学、气象观测、天气预报等6门课程，家住昆明郊外，每天步行二十多里路程到学校上课。据李宪之之子李曾昆先生回忆：“抗日战争时期，父亲在昆明西南联大教书。因防敌机轰炸，也为了省钱，住在乡下莲德镇小街子，离学校很远，住的是土房子，点油灯，吃井水，家里阴暗、潮湿，老鼠很多。全家七口人，全靠父亲工资为生，经济上很紧张。……父亲每天天不亮就得步行去城里上课，天黑了才回来，有时提20斤米，走20里地。”

办学条件极差，1938年三校刚到昆明时，西南联大理学院只得租借昆明西门外昆华农校作为校舍。1939年夏季，西南联大在昆明大西门外三分寺附近购地120余亩建盖新校舍，那是一些低矮的泥地土墙草顶（部分是铁皮顶）的平房，西南联大师生就是在这样艰苦条件下学习和生活的。尽管当时昆明时有敌机轰炸，“跑警报”几乎成为常态，学习生活条件艰苦，但西南联大学生的学习是非常刻苦努力的。1941年后昆明屡遭轰炸，上课时间改为上午7—10时，下午3—5时，每节课40分钟，课间休息5分钟。联大期间全校共有中、日文图书31100册，西文图书13900册，外文期刊近百种。一些用功的学生在图书馆前排队等候借书，因图书馆阅览室位子太少，有的学生不得不到街上的茶馆中看书学习。

据西南联大史料记载：“本校学生大多数来自战区，生活至为艰苦。全校学生2800余人，持贷金及补助金生活者，达十分之七八，但贷金仅勉敷膳食。年来昆明物价高涨，以较战前约在百倍以上。各生必需之书籍纸笔以及布鞋等费，最少限度亦月须200元左右。惟在艰难困苦中，反易养成好学勤读之习。每值课后，群趋图书馆，宏大之阅览室，几难尽容。其经济来源完全断绝者，率于课余从事工作，稍获酬报，以资补助。”

据西南联大1943年毕业生田曰灵回忆：“联大的

学生多来自沦陷区，他们经济上不能得到家庭及时供应，甚至长期没有音讯，生活上靠领取贷金。初期还能勉强支付膳费。后来通货膨胀，物价不断上涨，贷金难以支付膳费，学生们便不得不在课余时间找工作干，最多的是当家庭教师。那时云南文化水平低，云南学生考取西南联大的绝少。一些家长就广为子女聘请家庭教师，这为联大学生开辟了财源。”

地质地理气象学系的气象仪器设备几乎为零，水银气压表、风向风速仪、简单的湿度计、雨量筒都没有，气象观测实习全靠眼看和手感。专业的图书资料也几乎为零，从北京到长沙，再到西南边陲昆明，路途遥远，连原有的讲稿都来不及带上，教师凭记忆授课，学生靠笔记学习。王宪钊先生曾回忆在西南联大学习气象的经历：“从1938到1941年，我在学校先后修了李宪之先生的普通气象学、气象观测、天气预报和地球物理。赵九章先生讲高空气象学、理论气象学和大气物理。刘好治先生负责我们的实习。赵先生三门课都自编讲义，基本概念清楚，字迹清晰工整。李先生讲课条理分明，口齿清楚。1943年谢光道学长返校后任助教、教员，曾教过气象观测和天气预报实习。1944年赵九章先生赴重庆任“中央研究院”气象研究所所长，理论气象这门课程改由李宪之先生担任。同时，清华航空研究所嵩明气象台撤销，该所的高仕功先生也在西南联大讲过高空气象学。气象观测实习全靠目力和手感，云和天气现象、能见度用目力观测，风速则看树枝的摇动。风小时，李先生教我们用手指蘸水来感应风向，感到凉的位置所指的方向便是风向。风稍大时，将土屑抛向空中，从其移动的方向来确定风向。在毕业前我到昆明太华山气象台实习的时候，才真正摸到了气象仪器，体验了气象台的生活。”

抗战期间，空军军官学校在昆明创办了5期测候训练班（即空军气象训练班），刘衍淮聘请李宪之、赵九章为训练班兼课。李宪之在百忙中还应聘到云南大学农学院讲授气象学。当时，空军军官学校（位于巫家坝机场附近）和省立昆明气象测候所（位于太华山）有较完备的气象设施，李宪之就安排西南联大学生到那里去参观和实习。

气象组于1939年秋与清华航空研究所在嵩明合办高空气象台进行观测工作。1940年起气象组二、三年级学生可去那里实习，限于条件，只能进行地面观测。1944年春该气象台因经费和人力困难而撤销，只得在西南联大新校舍北区把原有旧碉堡改造成气象台，因陋就简维持气象观测。四年级学生在毕业前则到昆明太华山气象台实习两四周，按值班观测员要求

进行。高空实习要到昆明远郊区的巫家坝机场，先跟雷达班，后从事辅助计算工作。气象组的毕业论文在四年级的下学期完成，题目或来源于实际，或来源于书本。台站实习既起到了实际训练的作用，又为毕业论文提出题目及实际资料。

1995年，李宪之先生曾回忆道：“我1936年在北平首次讲课，而且同时三门：气象学、理论气象、气象观测与天气预报，写讲稿、讲授、实习，一人独担，苦不堪言！原企盼第二年有了写就的讲稿，可以轻松些，不料只字未带，逃到长沙，又到昆明。起初，既无讲稿，又无书籍，只凭记忆和从市上买来的有关小册子，勉强支持。以后从中研院气象研究所借来几本书，才渡过艰苦困境。正当精疲力竭、喘息未定时，援军赵九章回来了。可以想见，当时两人心情何等愉快！经多次长谈，我从赵所谈内容得到动力，赵从我的艰辛历程获取教益。当时昆明西南联大地质地理气象系情况很好，他讲理论气象和大气物理，深受欢迎。清华航空研究所气象组，注重实验和仪器，并在嵩明县设立高空气象台，正在继续做各种准备开始大规模发展的时候，赵九章竟然于1944年被拉到重庆去了。”

4 教学名师与气象精英

任教于西南联大地质地理气象系气象组的知名教授是李宪之和赵九章。

李宪之（1904—2001年），气象学家。1924年考入北大预科后转入物理系，1927—1930年参加中国西北科学考察团，是4位学生团员之一，负责水文气象观测与研究。1930年赴德国柏林大学学习气象、海洋和地球物理，1934年获哲学博士学位，从事2年博士后研究。1936年回到清华地学系气象组任教，次年任教授。1938年任西南联大地质地理气象系教授并在云南大学、空军测候班兼课。1946年任清华气象系教授、系主任。李宪之为中国近代东亚寒潮和台风研究以及中国近代高等气象教育事业的开拓者和奠基人之一。

赵九章（1907—1968年），气象学家、地球物理学家、空间物理学家、中国科学院院士。1933年毕业于清华物理系，1935年通过庚款留学考试后赴德国攻读气象学，1938年获德国柏林大学博士学位。回国后任西南联大地质地理气象系教授兼清华高空气象台台长。1944年5月经著名气象学家竺可桢推荐，任“中央研究院”气象研究所所长。赵九章是中国动力气象学、地球物理学和空间物理学的奠基人，1999年被授予“两弹一星功勋奖章”。

西南联大地质地理气象学系培养了我国近现代许多杰出的地学人才,为我国地质学、地理学和气象学的发展做出了重大贡献。由于采用的是“精英式”教育,每年的毕业生较少。据统计,1938—1946年地质地理气象学系共毕业学生166人(北大28人、清华57人、南开7人、西南联大74人),其中西南联大学籍中有10人进入军队担任译员等,气象学专业本科毕业生仅有33人。硕士研究生毕业3人,其中气象学1人(顾震潮)。1934—1937年毕业于清华地学系气象组的学生13人,1947—1949年毕业于清华气象系的学生12人,表3为1934—1949年清华大学及西南联大气象学专业(组)毕业学生名录。

表3 1934—1949年清华大学及西南联大气象学专业(组)毕业学生名录

毕业学校及院系	毕业时间	毕业学生姓名
清华大学地学系 (13人)	1934	李良骥、刘汉、刘愈之
	1935	彭平
	1936	程纯枢、么枕生、汪国瑗、张英骏、王钟山
	1937	郭晓岚、张乃召、刘好治、蒋金涛
西南联大地质地理 气象学系 (33人+1人)	1938	谢光道、亢玉谨、万宝康、周华章、钟达三、陈鑫
	1939	高仕功、孙毓华、何明经、白祥麟
	1940	叶笃正、谢义炳、彭究成、冯秉恬、朱和周、程传颐、宋励吾
	1941	王宪钊、徐淑英、钱茂年
	1942	黄衍
	1943	李叔庭、莫永宽、钱振武、何作人
	1944	曹念祥、张文仲、罗济欣
	1945	刘匡南、秦北海、贺德骏、李廉、顾震潮(研究生)
	1946	江爱良
	清华大学气象系 (12人)	1947
1948		周琳、洪世年、唐知愚、陈滨颖
1949		朱抱真、王世平、王余初、胡人超

在西南联大的气象师生中,有7人入选《中国气象百科全书》,赵九章、叶笃正、谢义炳为著名气象学家,中国科学院院士;李宪之、朱和周、谢光道、王宪钊为气象学家。中华人民共和国成立之前,在1938年以前的清华地学系和1946年以后的清华气象系师生中,有8人入选《中国气象百科全书》,涂长望、程纯枢为著名气象学家,中国科学院院士;么枕生、张乃召、汪国瑗、朱抱真、章淹、仇永炎为气象学家。其次,入选《中国气象百科全书》的气象学家还有1940年毕业于西南联大物理系的顾钧禧,1945年毕业于西南联大研究院的顾震潮。另外,1937年毕业于清华地学系的郭晓岚(美籍华裔),1944年取得清华留美公费生资格,1945年赴美国芝加哥大学攻读气象学博士学位,师从著名气象学家罗斯贝教授,是世

界著名理论气象学家,荣获美国气象学会罗斯贝奖。

地质地理气象学系毕业的学生中,刘东生院士(1942年毕业,地质学)、叶笃正院士(1940年毕业,气象学)分别获2003年、2005年度国家最高科学技术奖。叶笃正院士是中国现代气象学的主要奠基人之一,是中国近代大气环流理论、大气动力学、青藏高原气象学、东亚地区大气环流研究的开拓者,以及国际全球变化研究的倡导者之一。谢义炳院士长期从事大气环流、低纬度天气学和天气动力学等方面的教学和研究,是中国现代天气学和大气环流学奠基人之一。

2004年10月18日中国气象学会成立80周年授予26位健在的气象前辈“气象科技贡献奖”,清华和西南联大10人获奖:么枕生、仇永炎、王世平、王式中、叶笃正、刘好治、朱抱真、李良骥、赵恕、葛学易。

5 艰辛的气象科研工作

李宪之教授1935—1936年在德国发表了《东亚寒潮侵袭的研究》《台风的研究》《大气环流与海洋环流的相似性》等重要论文。1938年到西南联大任教后,在繁忙的教学工作之余仍致力于科研工作,发表了《气象事业的重要性与展望》《气压年变型》《几个地学问题的研究》等论文。1941年李宪之教授向西南联大提出开展气象研究的计划报告——《西南高层气流与天气研究计划》,包括“中国西南高层气流”和“中国西南的天气”两个选题,因经费、资料等所困,最终未能付诸实施。赵九章教授在西南联大任教前后,在德国和国内发表了多篇重要论文,如《中国东部气团之分析》《信风带主流间的热力学》《罗斯贝反气旋微分方程的积分》《变换作用导致冷暖气团的变性》《地面阻力层与风的日变化之关系》《非恒态吹流之理论》《半永久性活动中心的形成与水平力管场的关系》等。

赵九章、李宪之等在承担地质地理气象学系的教学任务之外,还参与了清华航空工程研究所下设的航空气象研究部的工作,筹建高空气象台并与盟军开展气象合作。清华航空工程研究所翻译和编著了多部航空工程方面的书籍,被“国立编译馆”付印作为大学教科书和空军军官学校教本,如庄前鼎等翻译的《应用空气动力学》《空气动力学概论》《飞机材料学》等。赵九章与庄前鼎合编《高空气象学》;编写《防空常识》《滑翔与气象》《航空与气象》,撰写技术报告(论文)108篇,其中气象学17篇(表4)。

1941—1946年“国民政府教育部”进行了六届学术奖励工作,涵盖社会科学、自然科学等多个类别,

在六届奖励中气象学均有成果获奖（表5），赵九章教授的《大气之涡旋运动》获1943年度自然科学类二等奖。同时，西南联大地质地理气象学系孙云铸教授的《中国古生代地层之划分》，冯景兰教授的《川康

滇铜纪要》分别获1942年度自然科学类二等奖和三等奖，张印堂教授的《滇缅铁路沿线经济地理》获1942年度社会科学类三等奖，杨钟健教授的《许氏禄丰龙》获1943年度自然科学类一等奖。

表4 清华大学航空工程研究所气象学研究论文一览表

序号	作者	题目	刊物
1	赵九章	海洋不稳定吹流之理论	《清华理科报告》
2	赵九章、顾钧禧	冷气团在交换作用中之变化	《航空研究所汇刊气象论文》第一号
3	赵九章、高仕功	推后位场理论与气压预告	《航空研究所汇刊气象论文》第一号
4	赵九章、高仕功	气压预告	《航空研究所汇刊气象论文》第二号
5	赵九章、顾钧禧	无线电高空气象仪之型种及其比较	《航空研究所汇刊气象报告》第一号
6	赵九章、高仕功	高空气象计算尺	《航空研究所汇刊气象报告》第二号
7	高仕功	雾珠之结构	《气象论文》第三号
8	赵九章	阻力层与风的日变化理论	《气象论文》第四号
9	赵九章、高仕功	福丁式水银气压表制造报告	《气象报告》第三号
10	高仕功	锋向产生趋势强度	《气象论文》第五号
11	高仕功、徐淑英	高空观测与气压预告	《气象报告》第四号
12	高仕功	气压之垂直速度	《气象论文》第六号
13	高仕功	等压系之动力与运动的性质	《气象论文》第七号
14	高仕功、徐淑英	等压分析之理论基础	《气象论文》第八号
15	高仕功	昆明气团分析	《气象报告》第五号
16	高仕功	大气之辐合与散发作用	《气象报告》第六号
17	李宪之	世界主要航线之高空气流	不详

表5 国民政府教育部学术奖励中气象学获奖情况

年度	奖励类别	获奖人	题目	等次
1941年（第一届）	自然科学类	涂长望	中国气候之研究	二等奖
1942年（第二届）	自然科学类	吕炯	西藏高原与今古气候	二等奖
1943年（第三届）	自然科学类	赵九章	大气之涡旋运动	二等奖
1944年（第四届）	自然科学类	朱炳海	本国锋之消长与气旋	二等奖
1945年（第五届）	自然科学类	陈正祥	中国之霜期	给奖励
1946-1947年（第六届）	自然科学类	卢鋈	中国气候图集	二等奖

李宪之、赵九章等在西南联大任教期间，还参与创办清华地学会的学术期刊——《地学集刊》的相关工作，承担纂稿与审稿工作，指导西南联大毕业生在该刊发表了有关气象学、地理学方面的研究论文。1948年清华编纂《国立清华大学科学报告 丙刊：地质、地理、气象》，刊发地学类论文。

6 结语

西南联大地质地理气象学系气象组在滇9年，在教学、科研和生活条件异常艰苦的条件下，在李宪之、赵九章，刘好治、谢光道、高仕功等教师们的心努力下，开设了气象学、气候学、理论气象、高空气象、大气物理、气象观测、天气预报、海洋气象、农业气象等课程，教师们在条件艰苦和繁忙的教学工作之余仍致力于气象科研，发表了多篇论文，培养了硕士研究生顾震潮以及叶笃正、谢义炳等本科生33

人，为现代气象学和新中国气象事业发展奠定了重要的人才基础。

深入阅读

- 北京大学, 清华大学, 南开大学等, 1998. 国立西南联合大学史料. 昆明: 云南教育出版社.
- 北京大学校友联络处, 1988. 笛吹弦诵情弥切——国立西南联合大学五十周年纪念文集. 北京: 中国文史出版社.
- 李曾昆, 2004. 回忆//李宪之教授纪念文集——《寒潮·台风·灾害》续集. 北京: 气象出版社.
- 李曾中, 2004. 李宪之教授纪念文集. 北京: 气象出版社.
- 气象史料挖掘与研究工程项目组, 2016. 浙江大学史地系对气象人才的培养和贡献. 气象科技进展, 6(4): 75-78.
- 清华大学校史研究室, 1994. 清华大学史料选编(第三卷下册): 西南联合大学与清华大学(1937—1946). 北京: 清华大学出版社.
- 仇永炎, 2001. 寒潮·台风·灾害——庆贺李宪之教授九十五华诞文集. 北京: 气象出版社.
- 吴阶平, 钱伟长, 朱光亚, 等, 2005. 中国当代著名科学家丛书: 赵九章. 贵阳: 贵州人民出版社.
- 叶笃正, 1997. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社.
- 于沈, 1995. 西南联合大学地质地理气象学系概况. 地质学史论丛, 3: 95-102.
- 于沈, 2012. 西南联大名师: 地球奥秘的探索者. 昆明: 云南教育出版社.
- 张咸恭, 李孝芳, 徐淑英, 等, 1996. 地质地理气象学系//国立西南联合大学校史——1937至1946年的北大、清华、南开. 北京: 北京大学出版社.

（作者单位：解明恩，云南省气象局；索渺清、叶梦姝，中国气象局气象干部培训学院）

百篇早年气象文献的梳理和回忆：螺旋式发展

■ 陶祖钰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.012

我和毛节泰老师都是于1956年进入北大物理系气象专业学习的。1959年物理系气象专业改为地球物理系。2019年是北京大学地球物理系成立60周年，为了回顾地球系这段历史，毛老师收集了1935—1979年《气象学报》和《北京大学学报》上刊登的从清华气象系到北大地球系的115篇文章（见附录），让我读后写点什么。通览目录，浏览部分文献后，钩起逾半个世纪的回忆。正如古语所说的“温故而知新”，感觉收获颇多，确实有不少值得写下来的东西。

1 螺旋式增加的论文数量

总计115篇文章中天动专业（天气学和动力气象学的简称）65篇，大气专业（大气物理学的简称）50篇，和两个专业的教师数量比较匹配，发展比较均衡。

在时间上，1935—1949年只有4篇，可见在半殖民地半封建的社会环境中气象科学是多么微弱。1951年激增至5篇，凸显中华人民共和国成立初期活力的释放。可惜仅是昙花一现，1952—1954只有2篇，侧面反映院系调整、政治运动，包括战争（抗美援朝）等对学术活动的影响。

1955年转入建设时期，在向科学进军的口号下，论文数再次增至6篇，1957年达到高峰9篇。但1957年和1958年论文数又迅速降至2篇。1959年虽然短暂恢复至最高数量9篇，但1960和1961年又降到几乎为零。虽然与1959—1961年三年困难时期（饥饿）有关，更可能和政治运动有关。1962年后学术研究再度活跃，1963年达到历史的最高峰17篇。后面将提到的李其琛和谢义炳等两篇领先世界的论文也都发表于这一年。我们56级是第一个6年制的年级，1962年上半年毕业论文时间充裕，人数又多，学生成为老师们科研的得力助手，对1963年的论文高峰也有重要贡献。后来的很多论文中都能看到56级同学的名字。

1966—1977年国民经济几近崩溃，导致12年总共只有2篇论文。1978和1979年，论文数又迅速恢复到7

【编者语】

文章梳理了1935—1979年从清华气象系到北大地球物理系（简称地球系）的115篇文章，结合作者近60年的亲身经历，简要总结了地球系气象学科研究成果多寡与社会环境的密切关系。用一些典型论文介绍了从20世纪30年代黄厦千的气象风筝高空观测，到70年代末谢义炳等提出湿斜压天气动力学理论学科的发展历程。百余篇文章中，李其琛的雷达方程、赵柏林的微波遥感原理、陈秋士的热成风适应理论等论文，反映了敢于攻坚克难的精神；仇永炎的中国北方暴雨与东亚热带波动关联性的发现和谢义炳、陈受钧的热带低频振荡现象的发现论文体现了求实创新的精神。此外还特别强调了谢义炳回国后倡导的科学怀疑精神在严开伟、濮培民、陈家宜等人的论文中得到发扬。

篇和12篇。

总之，1935—1979年的45年间，论文数量呈现巨大的摆动和螺旋式变化。

2 黄厦千（1936，1937）：清华气象台首任台长和气象风筝

如果说北大气象专业源于清华气象台，那么黄厦千很可能就是北大气象专业的创始人。1929年黄厦千被派至北平接收北平气象台。该台是气象研究所的直辖台，不同于现在的市气象台，并不承担每天向公众发布天气预报的任务。同年应聘任清华大学气象专业教员、清华气象台首任台长，并同时兼任气象研究所特邀研究员。清华气象台就是在他主持下建成的（1931年）。黄厦千1934年赴美国加州理工学院学习，回国后任“中央气象局”首任局长（1941—1943年），后因违规被检举揭发而离职。

黄厦千的一个重要学术贡献是1932—1934年在清华期间施放了不下90次的德制气象风筝，开展高空观测并从中归纳出华北上空全年气团的基本类型，形成了《华北气团之几种范式》（1936）。为什么是风筝，而不是气球？因为这些气象风筝原属于1927—1930年中国西北科学考察队。施放气球需要氢气，不适合在西北荒漠地区使用。考察结束后剩余的气象风筝都卖给了清华气象台。

3 李宪之（1935）：大气环流的推荐

115篇论文的第一篇是李宪之的《大气之週

收稿日期：2018年7月5日；修回日期：2018年12月8日

流》，即大气环流。此文很短，主要介绍欧洲气象学家的三圈环流模型。精彩之处是，在只有地面图没有高空图的年代，李宪之将引起日常天气变化的气旋和反气旋的垂直环流结构与三圈环流模型结合起来，绘出了一张大气环流和天气扰动相结合的立体模型图（图1）。其中既有纬向垂直剖面，又有经向垂直剖面；既有水平环流，又有垂直环流。李宪之的这篇开山之作，开创了北大气象专业宏大的学术视野和三维空间思维的优秀学术传统。没有大气环流视野的研究，有成为井底之蛙的危险；没有三维空间的思维，有可能成为瞎子摸象。

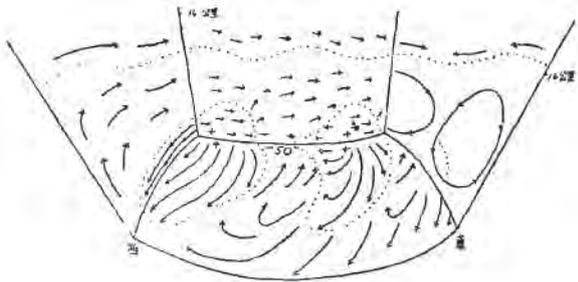


图1 李宪之论文中给出的大气环流图

4 谢义炳（1951）：科学的怀疑

怀疑，是科学的生命力所在；没有怀疑，科学就成为僵尸。1951年谢义炳回国后首次发表的两篇论文（短论），《高空注流强度的变化》和《冬季西太平洋及东亚大陆北部上空的温度场及流场》。文章都很短，但特色鲜明，即：大胆怀疑。文中的高空注流，现称高空急流，是大气环流的重要成员。谢义炳在文中怀疑高空急流强度不变的假设，更质疑高空急流是水平混合所致的结论。他指出急流的变化是大气质量的分布、垂直运动以及与之相关联的能量转换的结果。

对急流机理的质疑实质上是运动学和动力学之争。混合理论只是动能的再分布，没有回答动能的来源（能量的转换）。动力学，才是寻找急流变化和发展机理的出发点，也就是“力”。谢义炳的质疑在今天仍有现实意义，如气象界流行的“合并”“动量下传”等词汇和理论都是流于表面现象的说法。谢义炳的质疑显示了一个刚回国不久的年轻科学家（时年34岁）开创未来的雄心壮志。

谢义炳和陈文琦撰写的1955年“北京大学五四科学讨论会气象分会讨论会”纪要，详细记录了讨论会上各种意见的争鸣，也是一个很有代表性的事例。

谢义炳从动力学角度刨根问底的科学精神，源自芝加哥大学和他的导师罗斯贝。它是北大气象专业“科学的怀疑”这一优良传统的直接源头。比

如，1957年《气象学报》刊登了严开伟的两篇短文，对仇永炎在锋生函数计算和根据等熵面坡度计算空气垂直运动的计算提出了不同意见，并得到了仇永炎的正面回应。1979年陈家宜（53级，首届5年制本科）《对“近地层大气湍流混合的规律性”一文的意见》则反映了科学精神在新一代北大教师中得到传承。

又如，濮培民《大气边界层物理》一文（1963），不仅相当全面地总结了这本苏联教科书在理论的系统性和实践的应用性方面的优点，也实事求是地指出了该书的不足。这种实事求是的科学精神在当前的书籍推介中应该得到传承。

5 仇永炎（1952）：最早得出北方暴雨与热带天气系统有关的结论

某年8月1—3日，华北普降暴雨，清华气象台记录到24 h雨量达163.9 mm的大暴雨。时值抗美援朝战争期间，气象资料属于保密范围，故一律使用“某年”。论文《夏季西太平洋及东亚热带波动的运行及结构》（1952）是仇永炎对此例的研究，结论是热带波动北上造成了华北暴雨。后来发生的历次北方特大暴雨，如1963年8月河北特大暴雨、1975年8月河南特大暴雨等，一再证明仇永炎论断的正确。现在大家熟知的“七下八上”北方大暴雨是高低纬度系统相互作用的观点，其源头可追溯到仇永炎的这篇论文。这篇文章是仇永炎天天在气象台分析天气图的产物，更是他科学敏感性的体现。曾庆存在回忆录中讲了多个当年仇永炎老师在课堂上密切联系中国天气实际大胆思考的故事。

仇永炎1962年的《地转涡度尺》一文也是一篇很有历史特色的文章。在没有计算机可使用的年代，计算尺是提高计算效率的常用办法。仇永炎为了计算天气图上的地转风涡度，自己动手设计专用计算尺。这种脚踏实地孜孜以求的精神贯穿仇永炎的一生，到晚年还不畏艰难学会了在计算中心上机计算，在同龄人中绝无仅有，非常令人感动。

6 严开伟（1955）：对垂直速度的严谨推断

大气的垂直运动决定天气的好坏，但垂直速度非常小，直接测量几乎不可能。严开伟利用气球实际升速和理论升速之差推断大气垂直速度的论文《根据广州上空气球升速与大气层结构之关系推断大气垂直运动》（1955）详尽给出了“推断”的科学依据，特别是对气球升速的观测误差的来源所做的详尽分析，其严谨性堪称典范。由此推断出来的垂直速度令人不得不服。

我们这些曾经听过他讲课的年轻学生，对严开伟老师的严谨性一点印象也没有。相反，广为流传的笑话大家却都记得，严开伟老师写错别字，“乌”“鸟”不分。今读此文，对年轻时的愚钝深感愧疚。这件事或许从侧面反映了严开伟老师朴实无华的个性。

这篇论文还为我找到了一个重要问题的答案，即以英国气象学家Dines命名的达因大气质量补偿原理为什么是在20世纪初的气球观测中获得的。

类似的论文还有1956年李其琛发表的《对苏联札依齐柯夫用梳齿式无线电探空仪测量自由大气垂直运动方法的改进意见》。李其琛是1954年毕业留校的气象专修科学生。这篇由刚毕业两年的助教撰写的论文所展现的严谨性，可以推断是从严开伟老师那里得到的。当时的气象专业，谢义炳是天气动力学方面的带头人，严开伟是大气物理学方面的带头人。严开伟和李其琛的严谨性很可能不仅仅体现在科学研究上，或许也是他们俩对待生活的态度。

7 李其琛（1962）：天才的雷达气象方程

关于开创性的雷达气象方程的国际影响力的故事早已听说，今天一睹原文，深被李其琛的天才折服。从1952年考入北大到1962年发表这篇论文，李其琛当时大致相当于现在博士刚刚毕业的状态。《云和雨的相干散射与雷达气象方程》，无论是在提出问题的立意、物理模型的设计，还是数学推导的严密都可称典范，值得全系每位师生阅读。要在学术界不是跟随而是领跑，就须向李其琛学习。

李其琛在致谢中特别感谢赵柏林对他的指导和帮助。后者是留学苏联的博士，文中引用的参考文献也有一半是俄文。苏联的科学研究以严谨和深刻著称。20世纪50年代初，中国全面学习苏联，加上从欧美回国的科学家，使李其琛等中国自己培养的第一代青年科学家能博采欧美和苏联的众长。记得我们这批20世纪60年代留校的助教，在已经学过第一、第二外语（英语和俄语）的基础上，自学或进修日语、德语、法语的积极性都很高。可见当时的国际视野之广阔。

李其琛（1963）的《大气折射率起伏对雷达波的散射》也与吸收苏联科学传统有关。现在普遍应用的风廓线雷达原理也是这篇文章奠定的。文中对晴空回波机理的系统性分析对今天仍有指导意义。文中对“仙波”（也称“鬼波”）机理所做的分析，远比现在流行的源自美国学者的昆虫回波假设更科学。

据李其琛的同学、室友和同事陈受钧讲，李其

琛自己最欣赏的文章却是《雷暴活动所引起的地球大气电场分布问题》（1966），这篇文章的发表曾经有过周折，但文章中的确有天才火花的闪耀，值得今天细读。

8 谢义炳和陈受钧（1963）：台风和低频震荡——半个世纪后的发光

与李其琛类似的开创性工作谢义炳和陈受钧于1963年发表的《东南亚基本气流与台风发生的一些事实的统计与分析》。最近美国气象学会会刊刊登了一篇名为《1963年中文期刊刊登的一篇论热带季节内振荡的论文》（2018）的论文。此文的作者都是华人学者，第一作者是夏威夷大学的李天明，其他6位来自美国海军研究院、NOAA太平洋环境实验室、马里兰州大学以及台湾大学。文章指出，谢义炳和陈受钧研究报告中揭示的亚洲季风区40~50 d振荡，比Madden和Julian（1971）的发现早了8年，而后者被命名为Madden-Julian Oscillation（MJO）。

同时，李天明等还指出写此文的目的是要证明谢义炳和陈受钧发现的季内振荡与台风的关系，比国外发现的MJO相态和台风发生之间的相关性早了30多年。该文用50多年后更完整的数据和更客观定量的分析方法，用科学事实证明1963年谢义炳和陈受钧工作的开创性。

谢义炳和陈受钧的开创性工作直到半个世纪后的2018年才被重新确认。历史再次证明，是金子总会发光的真理。陈受钧和李其琛是1952年因国家急需气象人才而开设的二年制专修科同班同学。谢义炳曾回忆他是如何动员一部分新生放弃本科改读专科，并亲任班主任。很多专科班的毕业生都谈到谢义炳一生关注、关怀专科班学生的感人事迹。历史也再次证明，国家和社会的需求是学科和人才成长的根本动力。

9 陈秋士（1963）：解答地转适应理论从二维到三维的难题

陈秋士和李其琛、陈受钧同为52级，但陈秋士是四年制的本科。地球在不停地自转，高空大气西风带的准地转平衡特征及波与涡旋的形态，都与地球自转密切相关。地转适应理论是罗斯贝提出的基本理论问题。其本质是大气质量场（即气压场）和运动场（即风场）之间的适应。大尺度系统，是风场向气压场适应；中小尺度，是气压场向风场适应。一般的适应理论都只能讨论二维的地转风平衡的实现或维持。但地转风随高度改变，如何解释不同高度的风会同时地转适应，是一个理论难题。

陈秋士(1963)的《简单斜压大气中热成风的建立和破坏》一文就是对三维适应问题的回答,因为热成风就是地转风随高度的变化。陈秋士的热成风适应理论与以 ω 方程为核心的准地转适应理论(今天常称为QG理论)在本质上是相同的。后者在Holton于1972年出版的《动力气象学引论》中第一次对斜压扰动高低空相配合的准地转变化做了系统阐述。

陈秋士是谢义炳的研究生。重视基础理论问题,也是北大的学术传统之一。

10 淡出视野的中长期预报

在天气预报水平普遍不高的年代,中长期天气预报的研究反而比现在更受重视。在115篇论文中有不少大气环流变化规律的研究,如西风指数循环、北半球波谱分析和周期分析、季节变化和季节突变等。目的都是为了寻找中长期天气变化的规律和中长期预报的方法,特别是梅雨、寒潮、旱涝等与国计民生密切相关的重大气象灾害的预报问题。最具代表性的是王绍武发表于《气象学报》的《北半球500毫巴月平均环流特征及演变规律的研究——西风指数》(1963)、《北半球500毫巴月平均环流特征及演变规律的研究——超长波》(1964)及《近90年大气环流的振动》(1964)。谢义炳1959年的《关于长期天气预报的一些意见》一文对长期预报做了系统的分析。陈受钧1962年的《大型天气转变过程中北半球波谱的分析》一文也是这方面工作的一个代表。

但是,实际上大气中的振动、周期、波、循环等都很不严格。例如西风指数循环最短只有15 d,最长可到七八十天。根据如此变化不定的周期来做预报当然是不可能的。人们最关心的梅雨也是如此,平均是6月下旬到7月上旬,但年年不同。最早在5月下旬入梅。出梅也同样年际变化巨大,以致被称为二度梅。更有甚者,有的年份没有梅雨被称为空梅。梅雨期预报,过去是中长期预报会商的重点,但预报效果却难以确定。所以梅雨预报现在已很少提及。当然,梅雨作为一个气候概念还是有其科学价值的。

刚留校时给我安排的科研方向是中期天气过程,也叫作大型环流过程,以示与一般“槽来脊去”的天气过程相区别。最初两年曾经花了很多时间设计和计算各式各样的西风指数。最后也没找到一种可用来做预报的指数循环规律。

现在有了数值模式,上述这类工作已基本上很少再有人注意。究其原因,季节变化、循环周期等都是统计意义上的现象,而中长期预报要求的是确定性预

报。二者无法调和。当然,如果把中长期预报理解为概率预报,这个矛盾就不存在了。记得20世纪80年代末曾经请王绍武把他根据气候变暖趋势制作的一张未来10~20年中国旱涝长期趋势的预报曲线张贴在预报台。他对我解释说,虽然曲线是逐年的预报,但它表示未来10年内涝年偏多,或某年涝的概率偏大。几十年过去了,90年代发生了多次大范围的严重洪涝,如1991年、1996年和1998年等,的确概率偏大,证明王绍武的气候趋势预测是正确的。

11 圆盘实验

被地球引力吸附在地球表面的大气层无法在实验室里复制。用中间冷却四周加热的旋转圆盘中的液体代表大气是一种近似的实验方法。圆盘实验虽然没有 β 效应,但照样可以复制出与西风带长波类似的波状流型,所以曾经红极一时。北大和中科院大气物理研究所都仿效芝加哥大学建立了圆盘实验室。圆盘实验的成果——《轴对称加热条件下圆盘实验中波的转变过程的初步分析》(付克庄,1979)——直到“文化大革命”结束后才刊出。由于实验中模拟出了流型的转变(3波和4波之间的转变),所以被认为实验获得了重大的成果。在实际大气中,北半球西风带波数的变化常和剧烈的天气变化相联系,如寒潮。无须多言,圆盘实验也已成为消失的过去。重提此事,目的是为说明在历史的长河中,有很多东西会消失,无论它当时看起来是多么高大、先进。

当年的圆盘实验室位于物理楼北楼一层。我在五年级写学年论文《大气环流问题的读书报告》时,曾经在实验室待过一学期。当时正值三年困难时期,为了减少能量的消耗,许多活动都停止了,十分冷清。一个人在实验室看书,写了很多笔记,可惜现在全不记得了。

12 赵柏林(1978):援越抗美的无球探空

“文化大革命”期间,赵柏林主持研究的无球探空,是指用地基微波遥感代替气球探测大气温度层结。任务来源于越战期间,为避免隐藏在丛林中的中国空军机场因施放探空气球而被美军发现,空军提出能不能发明一种不需施放气球的探空方法。

这项研究成果——《遥感大气温度层结的微波辐射计之特点》——也是到“文化大革命”结束后的1978年,才在《北京大学学报》上发表。参与研制的还有大华仪器厂和上海气象仪器厂,具有产学研结合特点。军事需求,使无球探空成为“文革”中能够进行的极少数科研项目之一。

同年发表的《微波遥感云天大气层结》，是对多波段微波遥感可行性的理论分析，预见微波遥感应用的广阔前景。现在，多波段微波遥感，已成为卫星探测中最重要的手段，并在数值天气预报、气候模拟和大气环境监测中都有举足轻重的作用。科学史上，战争是科学的巨大推动力的例子举不胜举。这种状态至今未变。这既是科学的悲哀，也是人类的悲哀。

13 谢义炳 (1978)：北方暴雨——一个新阶段的开始

旱涝灾害是中华民族几千年历史上最关心的自然灾害。谢义炳从硕士研究论文《清代水旱灾之周期研究》(1943, 导师涂长望)开始就关注中国降水问题。涂长望是九三学社创始人之一，中华人民共和国的第一任气象局局长。留英时是留学生组织“反帝救亡大同盟”成员，曾在英国参加第三国际领导的秘密活动。涂长望关心国家和民生的传统传给了谢义炳。1954年长江和淮河特大暴雨洪涝灾害后，降水问题更成为谢义炳研究的重点，如《中国夏半年几种降水天气系统的分析研究》(1956)、《十年来我国降水问题的研究工作》(1959)。

在《中国东部地区夏季水汽输送个例计算》(1959)中，谢义炳对降水预报研究做了系统性思考，其中水汽的内循环和外循环观点至今仍有非常重要的指导意义。谢义炳的预报思路和目前广泛流行的思路“孟加拉湾水汽”有很大不同。在实习台讨论天气时，谢义炳经常强调华南和长江流域湿热的稻田农耕区是北方暴雨的水汽源地。

1978年，谢义炳的一篇论文《动力分析及其在天气预报中的应用》(《北京大学学报》)重点介绍1976年3月受“华北、东北、西北气象科学研究合作会议”委托，成立“75·8”暴雨北京会战组，对河南特大暴雨的动力学分析。文中系统阐述了动力学诊断分析的意义、起源和它的正确含意。强调通过计算机数值求解 ω 方程的各个强迫项以获得各天气成因贡献大小的确定性结论的重要性。

1976年开始的一波北方暴雨研究高潮，直到1992年《北方暴雨丛书》出版才告结束，前后持续了近17年。谢义炳突出强调潜热反馈作用的湿斜压天气动力学理论就产生在这个阶段。谢义炳曾经提到，斜压理论是运动场和质量场之间的地转平衡理论，而湿斜压理论是在温度之外再增加一个变量——湿度场。它是包括水汽潜热在内的湿能量平衡理论。所以，这是一个新阶段的开始。当代非静力数值模式的应用，无不

显示出潜热反馈在湿对流过程中的重要性。早在1959年，谢义炳在《天气学基础》一书中关于平衡的一段话是理解湿斜压理论的关键。他说，平衡不是绝对的，是动态的平衡。天气过程的本质就是由一种准平衡状态过渡到另一种准平衡状态。

回想起来，1985年谢义炳派我去英国雷丁大学气象系做访问学者可能是希望我跟随系主任Pearce教授做诊断分析研究，因为Pearce教授任英国气象学会主席的就职报告主题就是倡导诊断分析。可惜当时我还没有学习计算机编程，不能从事诊断计算，没有实现谢义炳老师的希望。

14 结束语

辩证法认为，一切事物都是螺旋式发展，不可能是直线前进的，总有曲折，需要不断调整。就像大气中的适应过程一样，平衡不断被破坏，又不断重建。人能做的，仅限于不要让曲折太大，更要避免崩溃。

历史长河，大浪淘沙。百篇早年气象文献只是时间长河中很短的一段。最后借用陶渊明诗作为结束：

纵浪大化中，
不喜亦不惧。
应尽便须尽，
无复独多虑。

致谢：感谢闻新宇老师为我找到英国气象学家Dines生平的文章及与质量补偿原理有关的文献；感谢张宏升老师为我解释气球升速的计算；感谢刘余滨介绍当年无球探空的情况；更要感谢陈受钧老师“百科全书”式的知识常给我解惑。

深入阅读

- 陈学溶, 2012. 我所知道的黄厦千博士. 中国科技史杂志, 33(3): 366-370.
- Lewis J M. 2014. 卡尔·古斯塔夫·罗斯贝：对其导师制的研究. 尹仔锋译. 气象科技进展, 4(6): 95-105
- S.佩特森, 1958. 天气分析和预报. 陈成枢译. 北京: 科学出版社.
- 曾庆存, 2011. 仇永炎教授的治学和教育风范与对学生的关怀//北京大学物理学院大气与海洋科学系. 勤勤恳恳教书育人——纪念著名气象学家仇永炎教授. 北京: 气象出版社.
- Li T, Wang L, Peng M, et al. 2018. A Paper on the Tropical Intraseasonal Oscillation Published in 1963 in a Chinese Journal. Bulletin of the American Meteorological Society: BAMS-D-17-0216.1.
- Liebmann B, Hendon H H, Glick J D, 1994. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and the Indian Oceans and the Madden-Julian Oscillation. J Meteor Soc Japan, 72(3): 401-411.
- Madden R A, Julian P R, 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, J Atmos Sci, 28: 702-708.

附录：毛节泰老师收集的115篇论文的主要作者、发表年和题目

主要作者	发表年	题目	主要作者	发表年	题目
李宪之	1935	大气之週流	李其琛	1963	下落过程中雨滴谱和雨的雷达反射率的变化
黄厦千	1936	华北气团之几种范式	谢义炳	1963	东南亚基本气流与台风发生的一些事实的统计与分析
黄厦千	1937	基于气压区之动能及力能而得之天气预报定则	赵柏林	1963	关于冰雹成长的机制
谢义炳	1943	清代水旱灾之周期研究	赵柏林	1963	关于水滴变形和降落速度
谢义炳	1951	冬季西太平洋及东亚大陆北部上空的温度场及流场	殷宗昭	1963	关于沙文诺夫—昂斯川姆经验公式中系数k值对我国情况的修改
严开伟	1951	北京冬半年测风气球记录的分析和应用	王绍武	1963	北半球500毫巴月平均环流特征及演变规律的研究——西风指数
李宪之	1951	现阶段的中国气象教育工作和将来展望	杨大升	1963	圆盘模型实验中的热强迫平均环流
谢义炳	1951	近代天气学的发展	李其琛	1963	大气折射率起伏对雷达波的散射
谢义炳	1951	高空注流强度的变化	濮培民	1963	大气边界层物理
仇永炎	1952	夏季西太平洋及东亚热带波动的运行及结构	陈家宜	1963	对流层下部的湍流微结构
仇永炎	1953	介绍一本苏联普通气象学	陈家宜	1963	湍流大气中水平风速模涨落的相关
仇永炎	1955	冬季东经140°剖面上的温度场与风场	陈秋士	1963	简单斜压大气中热成风的建立和破坏（一）、（二）
谢义炳	1955	北京地温的年日变化与土壤的导热率	陈受钧	1963	纬向环流建立与崩溃过程中有效位能波谱的分析
谢义炳	1955	北京大学五四科学讨论会气象分会讨论会	赵柏林	1963	雨层云人工增雨的可能性——非封闭系统的冰水转化问题
李宪之	1955	大陆起源和地球面貌发展的综合假说	赵柏林	1963	雷达测雨最优波长
严开伟	1955	根据广州上空气球升速与大气层结构之关系推断大气垂直运动	陈秋士	1964	1958年7月亚洲东南部西南季风区和太平洋信风区平均流场和平均经圈环流
赵柏林	1955	高空能见度与垂直能见度	陈文琦	1964	1958年初夏北半球对流层上部大气环流演变的分析
谢义炳	1956	中国夏半年几种降水天气系统的分析研究	赵柏林	1964	冰晶生成的机制和干冰球的蒸发
赵柏林	1956	北京冬半年近地面层湍流的特性	王绍武	1964	北半球500毫巴月平均环流特征及演变规律的研究——超长波
李宪之	1956	台风生成的综合学说	陈秋士	1964	四层模式热成风适应
李其琛	1956	对苏联札依柯夫用梳齿式无线电探空仪测量自由大气垂直运动方法的改进意见	谢义炳	1964	在给定热源与大型水平湍流影响下自由大气中的平均纬向风速与经圈环流
陈受钧	1956	1956年6月东亚上空的风和温度	濮培民	1964	大气近地面层中不同温度层结下的湍流运动
王绍武	1956	引起地面气压变化因子的分析	陈秋士	1964	惯性波的对流不稳定和台风形成初期阶段的物理分析
赵柏林	1956	摩擦层中湍流系数	谢义炳	1964	赤道辐合带上扰动不稳定性的简单理论分析
谢义炳	1956	斜压大气中涡旋运动方程及其在天气预报中的应用	王绍武	1964	近90年大气环流的振动（上）
严开伟	1957	关于“在一种寒潮情况下的水平温度场及冷锋构造”一文意见	陈受钧	1965	100毫巴低纬度环流季节变化的初步分析
严开伟	1957	关于“等熵面坡度公式及其对计算空气垂直运动的应用”一文意见	杨大升	1965	东风扰动的动力不稳定性
尹宏	1957	利用经验公式由日照记录计算中国东部总辐射的分布	严开伟	1965	利用平移气球探测北京上空晴空大气垂直扰动
杨大升	1957	北京低层高空的风速分布	陈秋士	1965	北半球冬季副热带高压带维持的涡度机制
仇永炎	1957	在一种寒潮情况下的水平温度场及冷锋构造	陈受钧	1965	地形对西风带常定扰动的多层模式
杨大升	1957	汉口低层高空的风速分布	陈秋士	1965	大尺度运动对台风形成影响的天气分析
仇永炎	1957	答严开伟质疑	尹宏	1965	大气中臭氧9.6 μ带辐射收支的计算
严开伟	1957	肠膜之特性及其在无线电探空仪上的应用	仇永炎	1965	洋面加热场和高空波动之间位相差的某些经验关系
张霭琛	1957	肠膜湿度表在地面观测中应用的结果	陈家宜	1965	混浊水体的反射率及辐射平衡的一个观测分析
杨大升	1958	下垫面对大连低层高空风速分布的影响	赵柏林	1965	自然云中的冰水转化过程
张鐸	1958	东亚寒潮结构的个案分析	王绍武	1965	近90年大气环流的振动（下）
张霭琛	1959	一种野外用的热电偶干湿表	李其琛	1966	雷暴活动所引起的地球大气电场分布问题
陈受钧	1959	东经140°剖面上的风场与温度场	张铮	1974	四聚乙醛成冰性能的试验研究
谢义炳	1959	中国东部地区夏季水汽输送个例计算	谢义炳	1978	动力分析及其在天气预报中的应用
萧文俊	1959	中国总辐射的年分布与季分布	陈秋士	1978	地球自转参数随纬度变化影响超长波不稳定性的物理过程
陈受钧	1959	从冬季到春季亚洲上空大气环流的转变	毛节泰	1978	天空背景亮度的观测
陈受钧	1959	从夏季到秋季亚洲上空大气环流的转变	赵柏林	1978	微波遥感云天大气层结
谢义炳	1959	关于长期天气预报的一些意见	张铮	1978	气流粉碎介乙醛晶粒成冰性能的实验研究
谢义炳	1959	十年来我国降水问题的研究工作	潘乃先	1978	电传飞机气象仪
严开伟	1959	适于微气象观测用的热电偶风速仪	赵柏林	1978	遥感大气温度层结的微波辐射计之特点
严开伟	1960	京郊冬春季风障微气象效应的研究	仇永炎	1979	500毫巴角动量输送波谱的周期变化
张霭琛	1960	利用热量平衡法计算官厅水库蒸发量	赵柏林	1979	上海的电离层
王绍武	1962	上海气候振动的分析	陈秋士	1979	中纬度地形影响大尺度运动简化方程及其物理过程的初步分析
王绍武	1962	东亚大气活动中心的多变变化与我国的气候振动	张铮	1979	二十四种有机化合物成冰性能的实验研究
李其琛	1962	云和雨的相干散射与雷达气象方程	仇永炎	1979	动能的周期变化和动能转换率对动能增衰的作用
李其琛	1962	关于卫星摄影技术中遇到的能见度问题	赵宗慈	1979	南北半球大气环流与气候的相互作用
严开伟	1962	关于气象工作中所使用的温度表检定槽	刘式适	1979	地球大气行星波的螺旋结构
仇永炎	1962	地转涡度尺	陈家宜	1979	对“近地层大气湍流混合的规律性”一文意见
陈受钧	1962	大型天气转变过程中北半球波谱的分析	王绍武	1979	我国旱涝36年周期及其产生的机制
王绍武	1962	大气活动中心的多年变化	陈受钧	1979	梅雨暴雨的涡度平衡与积云对流
王绍武	1962	我国气候振动的研究	杨大升	1979	热带东、西风界面附近的扰动流场
陈受钧	1963	100毫巴上大气大尺度运动（1962年1月1日到2月1日）的波谱	付克庄	1979	轴对称加热条件下圆盘实验中波的转变过程的初步分析

（作者单位：北京大学物理学院大气和海洋科学系）

幸福的回忆 巨大的鼓舞 ——回忆敬爱的周总理

■ 骆继宾

周恩来总理是我国第一代革命领导核心成员之一，他协助毛泽东主席在极其艰难的环境下领导我国的革命斗争，坚持抗日战争和解放战争，夺取了全国革命的伟大胜利，创建了中华人民共和国。新中国成立后，他担任了26年的总理，亲自指挥我国各条战线的建设，并在国际上开展积极的外交斗争和活动，被公认为世界上的一代伟人。

1968年7月中旬，淮河上游连续几天暴雨之后发生了大水。7月19日凌晨，周总理召集了气象部门和有关单位去汇报情况。当总理听完了我们的汇报后，又详细地问了一些具体地点的雨情，历史上这一带发生暴雨和大水的情况，以及淮河中下游未来的降雨预报。总理还向有关同志问了灾区群众的生活情况，在听了几个部门的汇报后，总理对防洪、抢险、救灾等都做了周密的部署。

当我们向总理汇报全国绝大多数气象台站都能按时发送气象情报时，周总理满意地点点头。在谈到天气预报工作时，周总理说：“有人说气象预报老报不准，我不这么看，我认为天气预报主要的、多数的还是准确的。”听到总理对我们天气预报工作十分正确的评价时，我们受到了很大鼓舞。以后总理又问到我们个人的情况，问我在哪里学的气象，年龄多大，工作多久，担任什么职务？我都一一做了回答。总理说：“你还算是解放后我们自己培养出来的技术人员嘛！”勉励我说，现在年龄还不大，虽然担任了一点领导工作，但还要注意不要脱离业务，有机会到外面走

【编者语】

本期内容编辑期间，惊闻骆继宾先生去世。本期摘编了骆继宾1990年撰写的回忆周总理关心和支持气象事业的文章。阅读这样的文章，让我们共同缅怀国家领导人和老同志，沿着他们指出的方向，继续气象事业的发展。

走，各方面的情况多了解一些。

以后，在许多重要时刻，在出现寒潮、大雪和冰凌，威胁到许多地方的铁路、电讯、交通的时候，在台风将要袭击我国的时候，在海上大风、冰冻将要影响到我们的生产建设和交通的时候，总理多次把我们叫去，汇报天气情况和预报。几次接见中，总理都谆谆教导我们，气象对国防和国计民生各方面都有直接影响，要我们做好气象服务工作。

1972年8月一次，我们预报第9号强台风将影响我国台湾省。总理看到这一预报后，立即指示要将这一预报告知台湾同胞，以预防台风袭击。以后又亲自审定了我们对台湾广播的第一次台风警报稿，并在警报稿的最后加了一句：祝同胞们晚安。本来，在我们看来台风影响台湾省只是一个普通的天气预报，但敬爱的周总理高瞻远瞩，胸怀宽阔，时刻不忘台湾同胞，体现了毛主席、党中央对台湾同胞的关怀。

1972年2月，尼克松第一次访华期间，在一次会谈开始时，尼克松问总理，现在外面下雪，明天还能去长城吗？总理告诉他，根据天气预报明天不下雪，不影响游览。第二天果然没有下雪。周总理对天气预报竟如此熟悉，如此肯定地做出回答，使外国记者都感到惊奇。得知这一消息，我们喜忧交集，高兴的是我们敬爱的周总理对我们的日常预报如此了解、信任，担忧的是我们的预报会不会失败？同志们都暗暗下决心，一定要把预报做好，为社会主义祖国争气。在北京市气象台等兄弟台站的共同努力下，我们较好地完成了这一次保障任务。

回想周恩来总理对气象工作历来的指示和教诲，使我深切地感到，我国气象事业是在周总理的关怀和指导下建立、成长和发展起来的。周总理虽然已经与世长辞10多年了，但他对气象事业的关心和指示仍然鼓舞着我们前进。



1988年9月7日，骆继宾（前排右3）在国家卫星气象中心观看风云一号A星发射

本文摘自《新中国气象事业四十年》，气象出版社，1990年。

高被引论文选编

编辑：侯美亭 张萌

“数值预报业务”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD(气象与大气科学领域)，检索时段：2017—2019年

英国气象局统一模式 (Global Atmosphere 6.0/6.1) 和JULES陆面模式 (Global Land 6.0/6.1) 的配置——The Met Office Unified Model Global Atmosphere 6.0/6.1 and JULES Global Land 6.0/6.1 configurations. *Geoscientific Model Development*, 2017, Vol. 10, No. 4.

英国气象局的Walters等介绍了可应用于不同时间尺度的英国气象局统一模式和JULES(协同英国陆地环境模拟器)陆面模式(Global Atmosphere 6.0和Global Land 6.0, 简称GA6.0/GL6.0)的最新科学配置。Global Atmosphere 6.0包含了ENDGame(大气模式的最新动力学框架)动力核心,它显著增加了中纬度的变率,改善了已知的模式偏差。随着模式物理参数的发展,ENDGame还增加了热带地区的变率,从而改进了对热带气旋和其他热带现象的表征。大气和地面参数的进一步发展也改善了模式性能的其他方面,包括地面天气现象的预报。研究还介绍了GA6.1/GL6.1,其中包含了与主流配置的一些长期差异,这些差异是全球天气预报仍然需要的。自2014年7月起,英国气象局使用GA6.1/GL6.1进行全球数值天气预报,同时,随后一年其余的全球预报系统仍采用GA6.0/GL6.0。

SPARC再分析相互比较项目 (S-RIP) 介绍和再分析系统概述——Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, No. 2.

气候研究界使用大气再分析数

据集来理解大气中广泛的过程和变化,然而不同的再分析数据可能会为相同的诊断提供非常不同的结果。平流层-对流层过程及其在气候中的角色(SPARC)再分析相互比较项目(S-RIP)是一项使用各种关键诊断方法比较再分析数据集的项目。日本北海道大学的Fujiwara等总结了S-RIP项目的动机和目标,并广泛回顾了再分析数据集的关键技术。S-RIP项目的目标是探讨再分析数据之间的差异、理解造成差异的根本原因,指导用户在科学研究中如何适当地使用各种再分析产品,特别是SPARC的相关性,并通过建立协作数据再分析中心和用户之间的联系,来改善未来再分析产品的质量。该项目主要关注于再分析数据之间的差异,虽然有时也包括对比再分析与观测结果的业务化研究。项目的重点是对流层上部、平流层和中间层下部的诊断。

ALADIN-HIRLAM数值天气预报系统的HARMONIE-AROME模式配置——The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Monthly Weather Review*, 2017, Vol. 145, No. 5.

瑞典气象和水文研究所的Bengtsson等介绍了对流尺度数值天气预报(NWP)模式HARMONIE-AROME的参考配置,该模式广泛应用于丹麦、爱沙尼亚、芬兰、冰岛、爱尔兰、立陶宛、荷兰、挪威、西班牙和瑞典的短期天气预报业务。HARMONIE-AROME由欧洲和北非26个国家在短期中尺度NWP上合作开发、维护和验证,是ALADIN-HIRLAM系统的一部分。HARMONIE-AROME基于ALADIN

联盟开发的AROME模式。随着联合建模框架的建立,上述位于北欧和南欧的国家都实现和利用了AROME模式,这一活动导致了模式物理参数的大量更新。本研究介绍了与AROME相比,模式动力学和物理参数化的差异,以及重要的参考配置选择,如横向边界条件、模式级别、水平分辨率、模式时间步长,以及所使用的地形、地貌和气象学数据库。单独的文件将被提供,以说明所使用的大气和地面数据同化算法和观测类型,以及提供基于HARMONIE-AROME的综合预报系统(称为HarmonEPS)的单独说明。

变分和集合变分数据同化的业务化方法综述——A review of operational methods of variational and ensemble-variational data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, Vol. 143, No. 703.

变分法和集成法分别由不同的研究开发小组开发,对于数据同化,每种方法都有各自的优势。在过去10年左右的时间里,研究者发展了各种方式来综合这些方法,特别是为了改进背景误差协方差矩阵和提高效率。这个领域目前已经变得混乱,甚至对许多专家来说也是如此,因此有必要总结这些方法,以显示它们是如何工作的,又是如何相关的,它们带来了什么好处,它们为什么被开发,它们是如何执行的,以及有待改进的是什么。为此,英国雷丁大学的Bannister介绍了基本的变分和集成技术,并展示了如何将它们组合起来以提供新的变分和混合方法。本研究的一个关键部分是本地化通常如何表示细节。一种特别的推动力是发展不受非线性预测模型影响的四维方法。本研究也试图提供了最流行的公式推导的反演。这些在文献中经常是分散的,或者是缺失的。

(以上由侯美亭选编)

GRAPES_GFS全球中期预报系统的研发和业务化——《应用气象学报》2017年第28卷第1期

沈学顺等回顾了中国气象局全球中期数值天气预报系统GRAPES_GFS的研发历程,重点介绍了近年来在GRAPES_GFS研发过程中的重要进展,概要阐述了这些进展对GRAPES_GFS业务化的贡献。动力框架方面的改进主要包括位温垂直平流的算法、极区滤波方案、标量平流方案、垂直速度衰减(damping)算法、提高模式分辨率等,改善了模式框架的稳定性、计算精度以及质量守恒性。物理过程方面的改进主要包括RRTMG辐射方案、CoLM陆面过程方案、积云对流、边界层过程、双参数云物理方案以及物理过程的调用计算等,全面提升了模式物理过程的预报能力。全球三维变分同化方面,研发了模式空间三维变分(3D-Var)系统、资料质量控制和偏差订正技术、卫星资料同化方面的相关技术等。同时,对目前GRAPES_GFS2.0的预报能力进行了评估,总体来说,该系统各项预报指标全面超越GRAPES_GFS1.0,与T639相比等压面要素预报在对流层也有明显优势,降水、2 m温度等预报也优势明显。

GRAPES_Meso V4.0主要技术改进和预报效果检验——《应用气象学报》2017年第28卷第1期

黄丽萍等针对GRAPES_Meso V3.0存在的降水量偏大、模式运行不稳定、近地面温度预报偏差较大、可同化资料偏少以及分辨率偏低等问题,开展了多方面的改进工作:引入变分质量控制以及探空湿度的偏差订正,实现了GPS/PW资料、FY-2E云导风资料以及无线电掩星资料的同化应用,提高了模式分辨率,引入四阶水平扩散方案,调整了微物理参数化方案与动力框架的耦合方案,完善了地面辐射能量平衡方程以及优化了后处理雷达组合反射率因子的诊断方案,并集成所有改进成果形成新的

业务化GRAPES_Meso V4.0。批量试验结果表明:GRAPES_Meso V4.0降水ETS评分普遍提高,同时预报偏差明显降低,月平均降水更接近实况,且能够较好地刻画雨带细节;2 m温度预报偏差有较为显著的改善,大部分地区24 h预报有1~2℃左右的降低,有些地区有3~5℃的降低;GRAPES_Meso V4.0对高度场、温度场和风场的改进效果比较显著,500 hPa的温度、风速、位势高度场的相关系数均有显著提高,850 hPa的均方根误差也明显降低,整体性能明显高于GRAPES_Meso V3.0。

MICAPS4预报业务系统建设进展与未来发展——《应用气象学报》2017年第28卷第5期

高嵩等指出,以精细化预报为标志的现代天气预报业务对高时空分辨率气象数据的应用提出了更高的要求,而传统的预报分析制作系统MICAPS3(Meteorological Information Comprehensive Analysis and Processing System Version 3)无法满足符合大数据特征的实时预报相关的数据应用。同时,模式预报和集合预报应用已在各专业预报领域中发挥越来越重要的作用,网格预报产品正在涵盖全部的预报业务流程,而MICAPS3无法提供便捷高效的支撑。为解决上述问题,国家气象中心启动了MICAPS4建设,一方面建立了基于大数据的气象实时预报应用技术体系,解决了气象大数据处理、存储、分析和显示效率的关键技术难题;另一方面搭建了多个满足不同复杂预报业务需求的专业化版本。MICAPS4将信息化技术与预报技术、预报业务流程紧密结合,解决了现代化预报方法的平台化集成应用与精细化预报制作的关键技术难题,基于MICAPS4基础框架的多个专业版在中央气象台和部分省级气象台进行业务化应用推广。基于CIMISS(China Integrated Meteorological Information Sharing

System)-MICAPS4的海量数据存储环境,极大减轻了系统部署和本地化工作量,显著提升了数据解析及数据存储访问效率。

国家级强对流天气综合业务支撑体系建设——《气象》2017年第44卷第7期

国家级强对流天气预报业务正在从以短期预报为主调整到短期和短时预报并重的业务格局。从强对流天气预报技术发展与服务需求的角度,杨波等重点介绍了国家级强对流天气综合业务支撑平台及其核心技术。该平台以气象数据组织和图形化表达两个核心要求为牵引,发展了数据分析处理系统、自动气象绘图系统和WEB检索与显示系统。数据分析处理系统基于多源观测资料、中尺度数值预报和全球数值预报,发展了集约、高效的强对流天气监测和临近预报、短时预报及短期预报等数据分析处理技术,是整个平台的核心。主要核心技术包括:从不稳定与能量、水汽、抬升与垂直风切变等条件出发,以归纳总结的分类强对流天气概念模型为基础的分类强对流短期预报分析技术;应用“配料法”发展的分类分等级的强对流天气客观概率预报技术;强对流短时预报技术包括高分辨率数值预报释用、多模式预报集成、对流尺度分析、实况和模式探空分析等多项技术,重点实现了从过去3 h实况到未来12 h预报的无缝隙衔接;强对流的监测和临近预报技术在基于多源资料的强对流天气实况与强对流系统监测技术基础上,发展了基于雷达特征量、强对流实况、各类强对流指数和预警信号等多源信息的报警技术。自动气象绘图系统实现了高效、便捷地接入多种数据、自动进行数据分析和制图等多项功能。在预报服务方面,基于WebGIS发展了县级分类强对流预警信号和国家级分类强对流预警预报产品共享技术,实现强对流短时预报业务的高交互性与上下互通的功能。

(以上由张萌选编)

编辑选编

编辑：张萌 侯美亭

利用温室气体监测卫星分析2009—2016年澳大利亚CO₂浓度的时空变化及分布——Analyzing temporo-spatial changes and the distribution of the CO₂ concentration in Australia from 2009 to 2016 by greenhouse gas monitoring satellites. *Atmospheric Environment*, 2018, Vol. 192.

日本北海道大学的Yin等利用温室气体观测卫星(GOSAT)和轨道碳观测卫星(OCO-2),综合分析了2009年6月—2016年12月澳大利亚CO₂浓度的时空变化。在空间分布上,澳洲中部的CO₂浓度一直高于其他地区,而该地区降水的缺乏被认为是导致CO₂浓度增加的主要原因之一。将结果与Köppen-Geiger气候分类相结合,发现CO₂的空间分布与各种气候类型之间存在着微妙的关系。降水、海温、沿海浮游植物、植被覆盖等因素共同影响澳大利亚CO₂浓度的空间分布。结果表明,4个Niño带的海温异常将影响澳大利亚的降水和植被生长,以及赤道中东太平洋的叶绿素总量,进而影响澳大利亚的碳循环。根据Niño-3和Niño-3.4指数,研究期间发生了两次ENSO事件。在2011年的La Niña事件期间,CO₂增加率有所下降;而在2015年的El Niño期间,CO₂增加率出现了上升。研究认为,澳大利亚海温、降水、植被、ENSO事件、海洋化学过程和森林火灾都直接或间接影响了该地区CO₂的时间变化。

气候调节着全球生物多样性与生态系统稳定性的关系——Climate mediates the biodiversity-ecosystem stability relationship globally. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, Vol. 115.

1999年,巴黎高等师范学院的Yachi等提出生物多样性“保险假说”,该假说认为生物多样性可以增

加生态系统的稳定性。最近的试验表明,生物多样性对生态系统稳定性的影响也会受到气候变化的影响,但迄今为止获得的生物多样性-稳定性关系的大部分证据来自于在有限的气候条件下进行的局地研究。为此,西班牙胡安卡洛斯国王大学的García-Palacios等研究了全球范围内气候是如何调节植物(类型和功能)多样性与全球生态系统稳定性之间的关系。研究将14年的植物生物量的遥感观测数据与对除南极洲以外所有大陆的123个旱地生态系统多样性的实地调查结合起来。在大空间尺度的气候和土壤条件下,73%的生态系统稳定性变化(表征为时间平均生物量与标准差的比值)都能被解释。植物多样性对生态系统稳定性的积极作用,与气候和土壤因素一样重要。然而,研究也发现,在全球干旱梯度上,生物多样性与生态系统稳定性之间存在很强的气候依赖性。结果表明,在低干旱水平下,叶片特征的多样性可能会促进生态系统的稳定,而在最干旱的条件下,物种丰富度可能会起到更大的稳定作用。本研究强调,为了尽量减少与植物生物量有关的生态系统服务在时间上的变化,应分别在低干旱和高干旱条件下特别提高植物的功能性和分类学多样性。

QBO对海洋大陆MJO振幅的影响:物理机制和季节性——QBO influence on MJO amplitude over the Maritime Continent: Physical mechanisms and seasonality. *Monthly Weather Review*, 2019, Vol. 147, No. 1.

美国海军学院的Densmore等利用1980—2017年平流层(100~10 hPa)日纬向风资料的经验正交函数分析,将准两年振荡(QBO)根据平流层纬向风方向和高度分层为4个相位对:中平流层东向风(QBOEM)、下平流层东向风、中平流层西向风(QBOWM)和下平流层西向风。利用实时多变量MJO(RMM)指数和向外长波辐射(OLR)MJO指数(OMI)识别了1980—2017年MJO对流包络向东穿

越海洋大陆(MC)的Madden-Julian振荡(MJO)事件。通过QBO相位对和MC(RMM相位4和5)的RMM振幅的比较可知,北半球冬季MJO事件在QBOEM期间振幅最强,在QBOWM期间振幅最弱,这与QBO驱动的上对流层-下平流层(UTLS)静态稳定性差异相一致。此外,北半球冬季RMM事件在QBOEM期间增强,在QBOWM期间减弱。在OMI中,这些幅值变化一般向东移动到东MC和西太平洋,这可能导致了RMM和OMI指数方法在结果上的不同。在北半球夏季,随着东北向传播的北半球夏季季节内振荡(BSISO)成为季节内变化的主导模式,这些关系发生了逆转。UTLS稳定性距平的纬向差异与北半球冬季沿MC向东传播的MJO事件的振幅变化保持一致,经向稳定性差异与北半球夏季沿MC向东北传播的BSISO事件的振幅变化一致。

利用高分辨率卫星产品对欧洲PM₁₀和PM_{2.5}地表浓度进行贝叶斯地统计模拟——Bayesian geostatistical modelling of PM₁₀ and PM_{2.5} surface level concentrations in Europe using high-resolution satellite-derived products. *Environment International*, 2018, Vol. 121.

欧洲各地的空气质量监测主要是基于地面观测站,然而这些地面站太少,无法准确评估空气污染对整个欧洲大陆的暴露影响,而对高空间分辨率的格点化空气质量参数的精确预测的需求正在迅速增长。为此,瑞士热带疾病与公共卫生研究所的Beloconi等分析了卫星衍生产品改善颗粒物(PM)估计的潜力。研究使用贝叶斯地统计模型,建立了污染物的空间分布和遥感预测因子之间的关联,对46个欧洲国家的PM_{2.5}和PM₁₀的年平均地表浓度进行了估计,空间分辨率达到了1 km²,并将模型结果与地统计、地理加权和土地利用回归模型进行了比较。严格的模型选择确定了对污染物估算贡献最大的地球观测数据。地统计模型优于常用的土地利用回归模型的预测能力。作为城市可持

续发展目标的主要空气质量指标, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的最终估计值表明, 2016年, 66.2%的欧洲人口呼吸的空气超过了世界卫生组织空气质量指南的阈值。本研究的估计结果可以帮助决策者和科学家评估长期暴露于污染下对人类和生态系统健康的影响。

(以上由侯美亭选编)

智能手机参与大气探测的研究进展与展望——《地球科学进展》2018年第33卷第12期

刘西川等撰文指出, 随着智能手机及嵌入式传感器的发展和普及, 出现了公众利用智能手机探测大气环境参数的非专业探测手段, 无需额外专用仪器, 具有硬件成本低、时空分辨率高、时空覆盖广等优点, 成为专业大气探测的有效补充。在气象业务、科研和公众服务等领域具有广阔的应用前景。目前我国在非专业大气探测方面的研究较少, 为了充分发挥这一非专业探测手段的效能, 在分析现有智能手机及嵌入式传感器技术现状的基础上, 重点介绍了智能手机应用于降水、气温、气压、气溶胶和辐射等参数测量的技术现状, 提出应该从加强机理研究、挖掘可用信源、数据质量控制、大数据处理技术以及与业务、科研、服务的匹配衔接等方面开展研究, 推动智能手机参与大气探测的研究与应用。

北极涛动主模态下北极冷空气的优势路径和影响地区的研究——《地球物理学报》2019年第62卷第1期

梁苏洁等以拉格朗日观点分析北极涛动(Arctic Oscillation, AO), 也被称为北半球环状模(Northern Hemisphere Annular Mode, NAM)的指数异常事件中北极近地面冷气团的活动路径, 直接地表现出了异常事件中冷气团运动的优势路径, 从而反映出AO/NAM对地面气温的直接调控作用。在正AO/NAM指数异常事件中, 极区近地面冷气团活动轨迹以纬向环流为主, 表现为环绕北半球中高纬地区的冷气团活动轨迹特征明显。而在负AO/NAM指数异常事件中, 极区

冷气团以反气旋式轨迹流出极区后, 流入中纬度海洋上的低气压区, 这种由极区向中纬度地区流动的经向运动轨迹特点显著。并且在指数下降的中后期出现两种强烈影响欧亚大陆的运动轨迹。正负事件中冷气团运动轨迹很好地解释了传统公认的AO/NAM对北半球不同地区冬季气温的影响。特别是对中国冬季气温的影响上, 正AO/NAM指数异常事件中的中低层冷气团活动有利于南支槽加深, 进而为南方地区冰冻雨雪天气提供了有利条件; 而负事件中的极地近地面冷气团可直接影响东北地区, 形成寒潮降温天气。

海洋与台风相互作用研究进展——《科学通报》2019年第64卷第1期

台风灾害是全球最主要的气象灾害之一。到目前为止, 人们已经从大气科学的角度对台风进行了长期系统并且卓有成效的研究。但人们对台风过程中海洋的剧烈变化及其对台风的反馈仍然缺乏足够的认识, 这也成为限制台风研究和预报水平的一个瓶颈问题。因此, 海洋与台风在各种时空尺度上的相互作用机理及其对台风预报和短期气候趋势预测的贡献是当前国际海洋与大气科学研究的重大前沿课题。周磊等基于国家重点基础研究发展计划, 总结了海洋与台风相互作用的最新研究成果, 重点梳理了海洋中尺度过程对台风的影响与反馈、海洋与台风的低频相互作用及其对短期气候变化趋势的影响、台风过程中的海洋多源资料同化及利用海气耦合模式进行台风预报等若干方面的研究进展。最后, 提出了今后在海洋与台风相互作用研究中需要关注和重点解决的若干关键科学问题。

基于静止轨道卫星监测中国大气污染物的模拟分析——《中国科学(地球科学)》2018年第48卷第10期

陈曦等针对对流层主要污染物(对流层 O_3 、 NO_2 、 SO_2 及HCHO)的高分辨率、高频次监测需求, 开展了基于静止轨道卫星监测中国大气污染物的模拟观测实验。在参考现有极

轨卫星载荷的遥感监测能力和仪器参数基础上, 根据静止卫星观测模型, 利用正演辐射传输模式模拟观测光谱。根据最优估计反演理论, 分析光谱仪的主要指标参数对各目标气体的反演敏感性和反演误差。基于各目标气体反演精度需求, 提出光谱仪的观测波段、光谱分辨率和信噪比等关键指标参数的建议方案。为评估选定的光谱仪参数能否满足需求, 利用大气化学输送模式模拟中国区域大气成分的三维分布, 进行中国区域的模拟反演实验。结果表明, 针对各目标气体, 满足反演需求的实验数目均达到90%左右。臭氧总量和平流层臭氧的反演精度可达到2%, 且各气体反演在太阳天顶角高于 70° 范围内仍可以获得有效数据。因此, 所提出的静止卫星观测方案和仪器参数方案具有一定可行性, 为优化将来中国静止轨道卫星光谱仪仪器指标提供了理论依据和模拟工具。

全球和区域分析的混合方案对区域预报的影响试验——《气象》2018年第44卷第12期

区域分析采用局地高密观测资料, 往往分析的中小尺度信息较丰富; 全球分析同化全球覆盖的卫星观测资料, 而且不受侧边界条件影响, 对天气系统大尺度部分描述得更好。基于以上原因, 为了提高区域模式的分析预报水平, 庄照荣等尝试在区域模式中引入全球分析中的大尺度部分, 通过DCT方法对全球T639模式分析和区域GRAPES模式分析进行谱分解, 获得综合全球大尺度和区域中小尺度信息的混合分析。动能谱分析结果表明, GRAPES分析场的动能谱能量在中小尺度部分比T639全球分析略大, 经过混合分析后, 动能谱能量更接近理想曲线。一个月的分析预报试验结果表明, 混合分析的高度、温度和风场的分析质量有明显提高, 风场6 h内的预报也比区域分析有改进; 而且全国平均ETS降水评分在各个降水量级上都有明显改进。

(以上由张萌选编)

《《涓流细语》》

“We’re starting to look at wildfire as a nonseasonal event. It can happen at any time of year, and we have to be prepared.”

“我们开始将山火视为非季节性事件，它可以在一年里的任何时间发生，我们必须有所准备。”

——2018年山火在全球蔓延，从瑞典北部到美国加州。这一常常与炎热、干燥的夏季联系在一起的事件，似乎已经没有了传统意义上的“淡季”，WMO气候数据主任Omar Baddour如是说。

“No one should expect that he will be advising this president on any meaningful manner. This president does not appear to seek advice. Science advisers have historically had little, if any, impact on major policies. This goes for John Holdren under Obama and all others before him.”

“不能期待他能以有效方式给这位总统提出建议，这位总统看起来不会征求意见。科学顾问在历史上，就对主要政策的影响甚微，奥巴马政府时期的John Holdren，以及之前的其他人都是如此。”

——2018年7月，美国总统提名原俄克拉荷马大学气象学者Kelvin Droegemeier教授为总统科学顾问，并在9月顺利通过听证，得到两党一致支持，但这一提名在参议院的确认却经历了近4个月，最终于2019年1月初才在参议院获得通过。Droegemeier自2009年以来任大学研究副校长，是极端天气方面的专家。关于Kelvin Droegemeier以及总统科学顾问的影响，研究科学与政策交叉科学，与Kelvin Droegemeier相识20多年并合作过的科罗拉多大学教授Roger Pielke给出这样的评论。

“In principle, we could already use existing infrastructure for day-to-day early detection of fog formation. Because system data can be received in real time, we can imagine short-term early warning against fog.”

“原则上，我们已经能够利用已有基础设施进行日常雾形成探测。因为系统数据能够实时获得，我们可以期待开展针对雾的早期预警。”

——目前雾的观测手段，包括卫星、能见度传感器和人工观测，都无法达到很好的空间分辨率。美国康奈尔大学学者另辟蹊径，利用来自智能手机信号塔数据探测导致雾生成的大气环境。在手机天线塔组成的网之间传递的微波无线通信数据，信号的强度受到天气影响，从而提供了一种低廉和持续的雾监

测手段。针对这一雾监测和预警的创新手段的应用，论文第一作者Noam David的口气中是满满的信心。

“A typical thunderhead is smaller than a single pixel on the weather-forecasting systems available in much of the world, making precise storm predictions tricky. GRAF will ‘crowdsource’ data from a range of different sensor sources in order to build a global forecast model with 1.9-square-mile (3-kilometer) resolution.”

“典型的雷雨云砧较目前世界上很多天气预报系统的单像素还要小，给风暴精确预测造成障碍。GRAF将‘众包’来自各种不同传感器的数据，从而建立1.9平方英里（3 km）分辨率全球模式。”

——IBM公司将于2019年基于GRAF（全球高分辨率大气预报系统）开展全球逐小时天气预报商业服务。就这项服务的意义，IBM公司发表了上述看法。而来自Weather Extreme公司的气象研究负责人Elizabeth Austin则表示，高分辨率全球预报模式的出现将是“一件大好事”，但是，具体到某个区域天气预报的改进，还有赖于那里可用数据的质量。

“The Saffir-Simpson scale on its own doesn’t capture all the severe impacts of hurricanes and tropical storms, such as coastal storm surge and flooding rainfall, which, on average, are the primary cause of death and destruction due to hurricanes.”

“塞福尔-辛普森飓风等级本身不能捕捉飓风和热带风暴的所有严重影响，例如，沿海风暴潮和洪水降雨，而一般说来，这些是飓风带来死亡和破坏的最终原因。”

——美国天气私企AccuWeather公司在AMS于2019年初召开的年会上，推出其自己开发的飓风预报等级表——“飓风实际影响等级（ReallImpact scale）”，目的是弥补通用的于20世纪70年代建立并在2009年进行了更新的塞福尔-辛普森飓风等级。一些气象学者认为，这一做法会带来混乱。但该公司CEO迈尔斯表达了这一做法的意义所在。

“It may form in an hour and dissipate the next hour. But it brings strong winds, rains and lightning along with it.”

“它可能在一个小时内形成而于下一个小时消散。但是所到之处能带来强风、降水和闪电。”

——2018年，印度有超过200人死于雷暴灾害。为此，印度气象局联合其他机构研发新的模式，用于提前6~12 h预报雷暴的发生。印度气象局隶属于印度地球科学部，参与合作的机构，包括印度热带气象所和国家中期天气预报中心等均为地球科学部所属的机构。该部官员Rajeevan在介绍了上述情况后指出，印度气象局计划实施标准化业务运行，全力应对雷暴灾害。

2018年《气象科技进展》总目录

第一期

- 7 诸葛小勇, 邹晓雷, 王元: 像素扭曲与有效对流观测范围
- 12 崔景琳, 白爱娟: 5—8月东北冷涡降水过程统计特征及其降水特征对比研究
- 22 张宝林: 沙尘天气及沙尘气溶胶影响的研究进展
- 28 弓盈, 潘煜: 基于GIS的气象服务产品交互体验设计研究
- 33 许洪泽, 周梅: ADTD异常对闪电定位资料影响分析
- 38 龚江丽, 彭莹辉, 姜海如, 辛源: 国内手机天气app服务发展状况概述
- 56 廖捷, 周自江: 全球常规气象观测资料质量控制研究进展与展望
- 64 范邵华, 余予, 鞠晓慧, 任芝花: 气象资料数字化进展及应用
- 71 谷军霞, 师春香, 潘旸: 天气雷达定量估测降水研究进展
- 79 尹金方, 梁旭东, 陈锋, 刘英, 何会中, 梁钊明, 邹海波, 徐建军, 郝世峰, 谢衍新: 东亚区域大气再分析技术研究及资料集建设
- 85 郭聪, 何恒宏, 田征, 钟磊: 可搜索对称加密技术在气象数据安全领域的研究与进展
- 92 刘魁, 舒红平, 何文春, 罗飞, 曹亮: 基于领域知识的气象智能服务软件微开发技术及应用
- 97 韩瑞, 刘娜, 任芝花, 沈文海: 中国太阳总辐射 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格点数据集的建立
- 102 韩帅, 师春香, 姜志伟, 徐宾, 李显风, 张涛, 姜立鹏, 梁晓, 朱智, 刘军建, 孙帅: CMA高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展
- 109 刘盼, 高嵩, 王若瞳, 贺雅楠, 曹莉, 韩丰: 支撑气象大数据实时预报业务应用的MICAPS4系统概述
- 117 韩鑫强, 薛蕾, 王博, 张来恩: 新一代天气雷达数据流重传机制设计与实现
- 123 贾松林, 王颖, 薛蕾, 王博: 气象数据元管理系统设计与实现
- 127 李庆雷, 远芳, 杨贵, 廖捷, 胡开喜, 姚爽, 周自江: L波段探空秒级资料稀疏化方案及检验方法
- 133 廖捷, 胡开喜, 江慧, 曹丽娟, 姜立鹏, 李庆雷, 周自江, 刘志权, 张涛, 王慧莹: 全球大气再分析常规气象观测资料的预处理与同化应用
- 143 潘旸, 谷军霞, 徐宾, 沈艳, 韩帅, 师春香: 多源降水数据融合研究及应用进展
- 153 孙超, 肖文名, 陈永涛, 曾乐, 张小纓: 气象综合业务实时监控系统的的设计
- 158 王旻燕, 姚爽, 姜立鹏, 刘志权, 师春香, 胡开喜, 张涛, 张志森, 刘景卫: 我国全球大气再分析(CRA-40)卫星遥感资料的收集和预处理
- 164 徐宾, 宁婧婧, 张雷, 师春香, 周自江: 全球海表温度融合研究进展
- 171 赵芳, 何文春, 张小纓, 张志强: 全国综合气象信息共享平台建设
- 181 陈楠, 陈东辉, 邓莉: 基于ELK的用户访问行为分析技术
- 186 戴艳萍, 李德泉, 车云飞, 段婧, 李宏宇, 钱尧: 人工影响天气数据分类与编码设计研究
- 189 高静, 刘一鸣, 任芝花, 陈京华: 中国主要作物生长发育长序列产品的研制及应用
- 197 孙晨, 王彬, 顾文静, 魏敏: 基于OpenACC的GRAPES_GLOBAL模式长波辐射异构并行化研究
- 203 赵卓宁, 李湘, 舒红平, 何文春, 孙超: 气象大数据资源汇交可视化分析研究
- 208 陈京华, 何小明, 张志强: 基于云平台的气象数据共享服务平台架构建设
- 213 徐拥军, 何文春, 倪学磊, 王琦, 郭晓军: 基于MUSIC接口的CIMISS数据环境故障应急切换设计与实现
- 219 顾文静, 沈瑜, 李娟, 孙婧: 多维、精细粒度高性能计算资源管理系统的设计和在气象业务中的应用实践
- 223 陈文琴, 黄琦: 全国气象电视会商系统技术发展及应用研究
- 229 韩春阳, 张小纓: CIMISS公共配置信息集约化管理和业务实现

- 232 贺俊彦, 刘然, 刘红梅: 基于信息技术基础架构库(ITIL)的气象信息业务统一运维体系的建设与发展
- 237 郭锋: GRAPES模式物理过程诊断软件平台开发
- 242 林曼筠, 赵现纲, 卫兰, 范存群, 谢利子: 风云三号气象卫星地面系统IT运维数据处理平台设计与实现
- 247 王琦, 郭晓军, 倪学磊: 支撑CIPAS2.0系统的数据环境建设
- 252 王颖, 薛蕾, 赵芳, 王旻燕: 气象数据格式标准化设计和实施进展
- 256 吴焕萍, 高荣, 张永强, 刘北, 冯丁: 国家气候中心桌面云应用实践
- 260 李楠, 聂元丁: 虚拟化技术在气象业务应用中的效益分析
- 264 田征, 何恒宏, 周琰: 一种高效高可靠的数据中心网络架构设计
- 268 王春芳, 李小汝: 气象灾害预警信息编码技术与应用
- 271 张来恩, 王鹏, 韩鑫强: CTS2.0消息封装及交换控制策略设计及实践
- 274 周琰, 蒋敏慧, 曹磊, 马强: 气象业务信息化发展下的网络安全治理初探
- 277 王晶, 别毅, 孔令军: 气象数据中心节能实践与展望
- 283 马渝勇, 刘筱铭, 王可耀: 四川省气象信息化历程回顾及发展展望
- 287 王彬, 孙婧: 气象高性能计算系统的业务发展概述
- 290 王鹏, 王春芳: EUMETCast组播通信技术应用
- 292 赵春燕, 郭锋, 孙婧, 周斌, 胡江凯, 常颢, 刘立明: GRAPES数值预报模式集成中试支撑平台的设计与应用
- 294 田晓阳: 近十年气象数据处理和再分析主题文献计量分析
- 296 贾朋群: 写意地球环境——ICR5评介
- 299 贾朋群: “他乡”或许不再是“异乡”——ECMWF“揭开灰色地带的谜底”学术会评介
- 303 姚秀萍, 王巍巍: 奏响气象科学的华章——《中尺度气象学研究——寿绍文学术论文选》评介
- 305 任宜勇, 李冬梅: 阿拉山口气象站在维护国家利益中的历史作用探究
- 308 张改珍, 李慧欣: 中西古代气象科技发展之比较——刘昭民访谈

第二期

- 6 杜钧, 薛明: 研发中的美国强天气(龙卷、大冰雹和局地强降水)预报系统FACETS
- 8 王东海, 李兆慧, 高枳亭, 柳崇健, 朱建军, 炎利军, 杜钧: 中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展
- 24 高守亭, 左群杰, 杨帅: 龙卷生成动力学初探
- 28 姚聃: 龙卷数值模拟研究进展
- 36 钱维宏, 梁卓轩, 罗未萌, 杜钧: 用瞬时扰动法考察龙卷环境系统的模式预报
- 44 郑永光, 朱文剑, 田付友: 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理
- 55 郑永光, 田付友, 周康辉, 朱文剑: 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查
- 62 张萌: “龙卷”主题文献计量分析
- 64 段京蕾: 浅析多媒体融合环境下中国气象频道的多维模式构建
- 68 刘银峰: 新媒体环境下气象影视资料的再开发与利用价值初探——基于中国气象频道的实践
- 70 杨萍, 邓京勉, 张萌: 霍华德——为云而生的英国气象学之父

第三期

- 6 本刊编辑部: 立足广东、面向全国、关注全球——记佛山市龙卷风研究中心成立5年的发展之路
- 8 张小玲, 杨波, 盛杰, 田付友, 周康辉, 林隐静, 朱文剑, 曹艳察: 中国强对流天气预报业务发展
- 19 傅承浩, 郜吉东, 王云恒, 唐杰, 周长青, 叶成志, 庄照荣: 雷达资料同化在可致龙卷的强暴雨系统分析中的一些应用
- 38 张云济, 张福青: 集合资料同化方法在强雷暴天气预报中的应用
- 53 孔凡轴: 雷暴尺度天气集合数值预报研究

- 61 王啸华, 郑媛媛, 濮梅娟, 宗培书, 禹梁玉: 强天气综合报警追踪平台功能设计及龙卷预警中的应用
- 70 解小寒, 王勇, 郭倩: 具有复杂地形适应能力的INCA短临预报系统介绍
- 77 李宇梅, 狄靖月, 许凤雯, 张国平, 王志: 基于当日临界雨量的国家级地质灾害风险预警方法
- 84 段中夏: 一次豫北春季持续性大风天气的分析
- 88 气象史料挖掘与研究工程项目组: 20世纪80年代人工智能在天气预报中的应用

第四期

- 6 骆敬新, 高志刚, 刘克修, 宋翔洲, 武双全, 范振华: 中国沿岸ERA-Interim和MERRA感热通量和潜热通量的资料评估
- 15 陈海燕, 雷小途, 潘劲松, 张磊: 气象灾害风险评估业务发展研究
- 22 余洋: 2016年11月一次强寒潮南下天气特征分析
- 29 梁乐宁, 刘轻扬, 卢大维, 孙晓明, 冀艺: 国家级手机决策气象服务客户端研发与应用简介
- 52 崔讲学, 王俊, 田刚, 杨文发: 我国流域水文气象业务进展回顾与展望
- 59 田刚, 陈良华, 张萍萍, 王继竹, 陈晨: 长江上游与洞庭湖洪水遭遇水雨情及天气特征综合分析
- 70 彭涛, 唐志朋, 殷志远, 丁煌: 鄂西山区中小流域水文模拟及参数敏感性分析
- 76 高琦, 徐明, 李波, 徐卫立, 王海燕: 近40年三峡库区面雨量时空分布特征
- 82 王继竹, 郭英莲, 田刚, 彭涛: 宜昌中小洪水及致洪降雨特征分析
- 89 杜良敏, 刘绿柳, 高雅琦, 肖莺, 李杨: 长江流域月季降水量的概率分布特征分析
- 95 张翠荣, 童奇, 江鸿, 徐迎春: 城市泵站区域性排涝气象调度技术研究
- 99 肖莺, 陈晨, 杜良敏: 长江上游嘉陵江首场强降水时间特征分析及预测
- 102 崔恒立, 王东仙, 吴梦雯, 牛奔: 一次西南涡暴雨的位涡分析
- 109 徐卫立, 阮燕云, 张俊: 长江上游流域降水预报在三峡水库调度中的应用
- 113 李世刚, 王东仙, 李丹, 陈艳梅: 漳河水库水资源调度气象服务及典型案例分析
- 116 王海燕, 田刚, 王继竹, 高琦: 长江黄金水道交通气象服务的现状与展望
- 120 尹恒, 夏金, 胡永光, 杜兴无, 刘志勇, 文强, 周勇: 十堰市南水北调水文气象服务
- 123 朱茜, 王立柱: 虚拟服务器技术在河南气象信息业务中的应用
- 126 覃鑫, 裴顺强: 中国气象频道电视直播类节目的改进探讨
- 129 周庆亮: 世界气象中心的设置、认定与履职简析

第五期

- 6 赵俊芳, 姜月清, 詹鑫, 孔祥娜: 我国气溶胶污染对农作物影响研究进展
- 11 姜灵峰: 近76年我国洪涝灾损度变化特征分析
- 17 李国梁, 李俊, 李享: 一次强雷电天气特征分析
- 23 罗红磊, 何如, 苏志, 周绍毅: 广西气候可行性论证发展与建议
- 27 彭宇翔, 刘国强, 田英, 李德泉, 车云飞: 贵州省人工影响天气弹药物联网管理系统应用
- 36 艾劲松, 孙雨轩, 刘凯文: 荆州市冬小麦产量动态预报方法对比研究
- 40 秦鹏程, 夏智宏, 陈伟亮: 农业气候年景评估指数构建及在江汉平原的应用
- 46 谭江红, 陈伟亮, 王珊珊: 一种机器学习方法在湖北定时气温预报中的应用试验
- 51 张丽文, 梁益同, 李兰: 基于高分一号影像的武汉市洪涝遥感监测与分析
- 58 柴振刚, 胡佩敏, 熊勤学: 基于面向对象的光学和Sentinel-1 SAR数据油菜种植空间分布信息提取方法研究
- 63 刘可群, 周守华, 黄永平, 汤阳, 李仁东, 李梦璠: 土地利用变化对洪河流域洪涝灾害影响

- 67 邓艳君, 赵卓勋, 李玲, 张伦瑾: 2014—2016年荆州城区空气质量与气象要素的关系分析
- 72 范剑, 尤慧, 刘凯文, 高华东: 不同播期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型
- 78 刘韬, 夏智宏, 朱浪: 气象条件对湖北长湖水质的影响研究
- 81 耿一风, 黄永平: 近60年荆州四季趋变特征及给作物生长影响的对策
- 85 梁益同, 夏智宏, 文雄飞, 柳晶辉, 张丽文, 邓艳君: 基于卫星遥感的40年洪湖水面变化及驱动力分析
- 91 柳晶辉, 万君: 利用HJ-1卫星多光谱数据监测城市湖泊蓝藻研究
- 96 黄端, 池泓, 朱浪, 邓艳君, 夏智宏: 荆州市农田植被净初级生产力时空特征分析
- 101 王凯, 高媛, 刘敏, 潘汉标, 夏智宏, 靳艳秋, 王芳芳: 利川市旅游气候适宜性的评价和比较
- 105 冯奇, 夏智宏, 肖飞, 董雯婷: 生态画廊建设中流域水资源生态补偿机制的建立
- 109 张怀胜, 艾劲松, 温华军, 张玉铭, 李鹏飞, 杨涛, 朱建强: 石首麋鹿栖息地环境生态现状及其保护
- 113 帅文卫, 何菊, 黄忠: 天门市茶产业发展的气候适宜性分析和对策
- 116 贺程程, 周霞, 杨峰, 周莉莉: 江汉平原气候变化及其对农业生态的影响与对策
- 119 朱玉洁, 郝伊一: 《“三农”气象服务探索》评介
- 120 侯美亭: 《生态气候学: 概念与应用(第二版)》评介

第六期

- 6 何盛浩, 周志敏, 梁涛: 鄂中区域大雾天气中地基GPS监测的水汽总量及其演变分析
- 17 王易, 韩桂荣, 曹舒娅, 刘安宁: 江苏一次灾害性大风天气过程分析
- 22 李杨, 方晶, 潘隆, 王福: 沉积物色度在古环境重建中的应用
- 28 荣裕良, 张霞, 贺千山: 上海佘山国家旅游度假区气象环境条件分析
- 33 段中夏: 豫北一次夏季雷雨大风过程分析
- 39 刘立成, 李冬梅: 农村气象信息员的功能及其作用——基于传播学“意见领袖”的角色分析
- 62 张建云, 张焱: LPA10激光雨滴谱仪的定标及观测对比
- 71 杨加春, 钱媛, 徐洁, 李庆军: 华云高精度导航探空仪在甘肃庆阳干旱气候夏季的温湿数据对比分析
- 77 吕宝磊, 胡泳涛, 李林, 梁海河, 刘钧, 王晓江: 利用集合深度学习方法融合多源数据开发全国能见度网格数据
- 83 张建云, 张焱: 一种天气雷达天线指向自动检测技术
- 89 杨宁, 张晋, 刘钧: 雨滴谱式降水现象仪降水类型判定算法优化探究
- 95 王文韬, 贾烁, 王大旺, 刘永德: 增雨防雹火箭弹催化剂播撒技术的对比研究
- 102 刘宁波, 段士军, 刘强, 李翠娜, 杜广涛, 张翠卿: 边界层风廓线雷达发射机放大链路设计与实现
- 108 吴维, 段士军, 王亚东: 一种利用电磁兼容技术提高风廓线雷达探测能力的方法
- 112 崔劼, 张焱, 孙召平, 刘强: 新一代天气雷达标准化信号处理器设计与应用
- 121 刘钧, 张彬彬, 吕宝磊: 智能气象站系统框架初探
- 125 崔宏, 吴恩平, 熊安元, 王尊鹏, 赵笔锋, 龚伟伟, 邓鑫: 基于分布式和微服务架构的华信气象服务云平台
- 133 鄢俊洁, 瞿建华, 范霖: 基于服务架构的多源气象卫星数据集成显示应用平台
- 139 虞海峰: 双线偏振雷达标定技术应用
- 147 侯竞波, 郭晋川, 高元朋: 一种小型便携式环境气象观测一体站的设计和研制
- 151 王玲玉, 郭晋川, 肖海龙: 一种气体检测仪的设计与研制
- 154 张鹏, 张焱, 张迺强: 空基遥感观测系统仿真技术与应用
- 159 梁永楼, 贾树波, 沙金, 郭雪星: 探空雷达对卫星接收信道饱和和干扰的处理
- 162 张明, 杨志勇, 王亚静, 张晋: 基于北斗通信的海洋气象漂流观测仪
- 167 王恩文: 消息队列技术在气象软件系统中的应用

《欧洲气候影响》 2018年12月

这本由欧盟联合研究中心（JRC）发表的报告，选择2018年气候大会召开之际，通过阐述气候变化的影响，表明了欧洲应对气候变化的态度。报告分6章，在第3章阐述影响时，分沿海洪水、河流洪水、干旱、农业、能源、交通、水资源、栖息地消失、林火、劳动生产率、热浪死亡等11个视角展开。

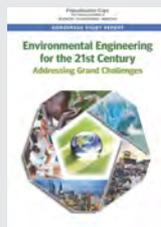


《明镜》 2018年12月

这本德文期刊本期封面报道瞄准气候变化，夸张的封面效果反映了人们对海平面升高的关注。封面文章提示，人类依靠现有科学技术尚无法判断海平面上升的速度和幅度

《21世纪环境工程》 2018年12月

美国科学院最新发表的这份报告，提出5方面的挑战：粮食、水和能源可持续供给；遏制气候变化和适应其影响；设计一个摆脱污染和废弃物的未来；建立高效、健康和弹性的城市；扶植信息化决策和行动。在阐述这些挑战的基础上，报告最后给出了为迎接新的未来，环境工程最终挑战需要做出准备的领域。



《自然-机器智能》 2019年1月

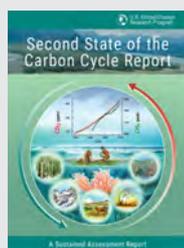
《自然》姊妹刊在2019年将迎来新成员，3种新月刊中包括了机器智能主题，这本AI类新刊将瞄准AI和机器人领域的最新进展，尤其关注大数据可用性、强大计算能力和算法突破等方面的研究进展，探索这些进步如何引领数字时代步入新时期。

媒体扫描 贾朋群 编辑

MEDIA SCAN

《自然》 2018年11月22日

本期封面报道，介绍了一个或许给诸多领域带来突破的新技术：采用固体推进系统的飞机。封面图中展示的概念验证或许改变100多年来飞机飞行依赖基于发动机的推进，并主要由化石燃料驱动，开启飞机飞行的电空气动力推进时代。



《第二次碳循环状态报告》 2018年11月

美国全球变化研究项目最新出版的这份报告，用19章分别就全球和北美碳循环和收支、人类参与碳循环（能源、城市、农业等）以及空气、陆地和水状态等方面进行阐述，最后就碳循环的结果和未来战略进行了讨论。

《融资气候未来》 2018年11月

这本由经济合作与发展组织、联合国环境署和世行等共同推出的报告，副标题点出了其内容所关注的主题：低排放、弹性未来基础设施的再思考：计划、创新、公共支出、金融系统、发展基金、尝试和COP24。报告分7章，针对大量相关问题展开。



《让气候评估可行》 2019年1月

美国科学院出版的这份报告，是一次学术会议的论文集。报告的副标题：学习加州和其他地方气候评估。报告分9章，就加州水管理、公共健康、从评估到行动等主题展开。

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang

Xiao Ziniu

Zhai Panmao

Yu Yubin

Li Weijing

Hu Yongyun

Tan Zheming

Sun Jian

Fei Jianfang

Zhao Licheng

Zhang Peng

Guan Zhaoyong

He Jianxin

Huang Jianping

Liao Xiaohan

Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

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

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin, Cui Xiaojun

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

<http://cmalibrary.cn/amst>

<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Article

- 8 Li Jinghua, Tian Xiaoyang, Jia Pengqun/ Key Forecasting Skill Scores of Leading Operational Centres: Comparison and Outlook
- 16 Yu Miao, Dou Jingjing, Miao Shiguang, Chu Yanli, Sun Dan/ Advances of Urban Meteorological Research: International Conference on Urban Climate
- 23 Yang Cheng, Fu Zhijia/ Applicability of the WRF Model in Complex Topographic Conditions: A Case Study on Precipitation Simulation in the Western Yunnan Region
- 30 Wang Houmao, Wang Yongmei, Wang Weihe, Zhang Zhuo/ Ozone and Absorbing Aerosol Measurements by Ultraviolet Total Ozone Unit (TOU) of FY-3 Satellites
- 37 Zhao Lei, Shang Jian, Feng Xiaohu, Zhang Zhiqing/ Typical Observation Area Design of FY-4 Geostationary Meteorological Satellite Imager
- 41 Zhang Xu/ Analysis of the Climatic Characteristics at Kunming Changshui Airport
- 46 Guo Qing, Zeng Donghao, Gao Guojing, Liu Dao, Zeng Huijuan/ Analysis of Lightning Hazard Distribution Characteristics in Meizhou
- 50 Huang Xianxiang, Yan Lijun, Cai Kanglong, Li Zhaoming/ Characteristics of Tornado Activity in China in 2018
- 56 Zhang Meng/ Interview with Yan Lijun, Director of the Foshan Tornado Research Center

Survey

- 2 Jia Pengqun/ Review on 2018
- 6 Xu Xiaofeng/ AGU 100 Meeting Review

History

people/ Event

- 60 Xie Mingen, Suo Miaoqing, Ye Mengshu/ The Meteorological Education and Personnel Training in the National Southwest Associated University
- 67 Tao Zuyu/ A Review of 100 Meteorological Publications at Early Stages: Spiral Development

Reading

Information

- 73 Luo Jibin/ Happy Memories with Great Encouragements: In Memory of Beloved Premier Zhou
- 74 Selected Papers