

Advances

in Meteorological Science and Technology

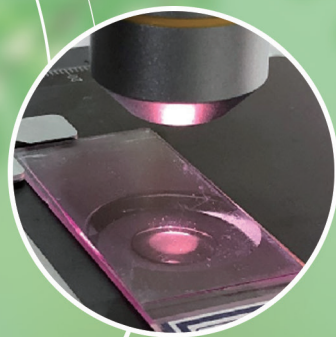
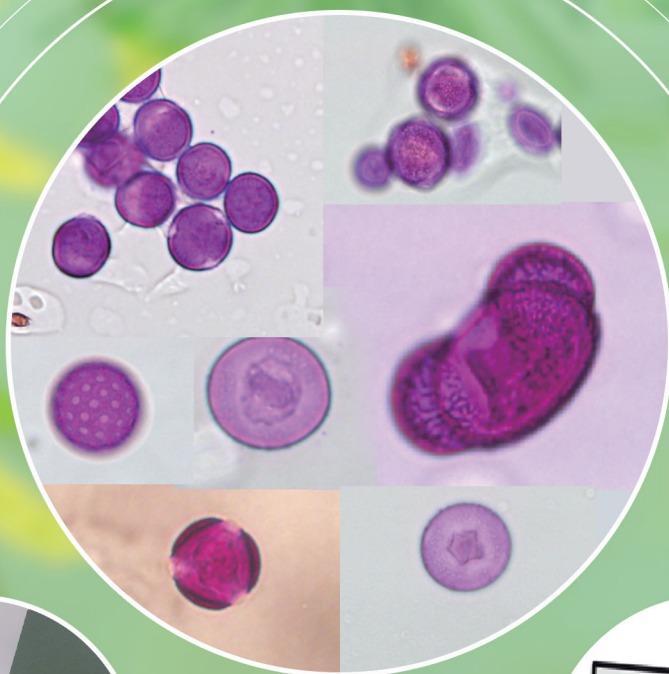
气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.1

2024年2月20日
第14卷 第1期



气传致敏花粉监测

气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院
中国气象学会

主办

主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
中国气象学会
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
王金星 中国气象学会
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
姚学祥 中国气象局地球系统数值预报中心
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
孙健 中国气象服务协会
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
廖小平 中国科学院地理科学与资源研究所
郑秋红 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

常务编委

陈金阳	成秀虎	龚建东	郭虎	郭学良
贾朋群	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	武炳义	熊绍员	杨修群	俞小鼎
张朝林	张庆云	赵平		

编委

毕宝贵	陈镜明	陈云峰	陈振林	崔春光
崔讲清	董文欣	杜钧	封国林	何金海
雷小途	李集明	李俊	姜彤	李耀辉
李跃清	李忠明	梁旭东	刘晶	李耀平
刘立成	刘实	刘征宇	卢乃锰	刘黎平
罗兵	罗亚丽	马舒庆	马耀明	陆莹
浦一芬	宋燕	索沙清	汤绪	彭田
万齐林	王斌	王斌(海外)	王海	王建林
王式功	王卫丹	王延青	王迎春	王元
王自发	卫晓莉	温敏	王翁富	吴立广
谢志辉	闫冠华	延冬	翟武	杨全
杨昭明	伊兰	于玉斌	翟武	杨全
张广俊	张立祥	张小玲	张跃堂	张大林
周定文	周建华	周凌晞	周显信	赵广忠
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立尧	邹晓蕾

编辑部

卢冰 李莉 侯美亭 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) 58993291/68409927
邮箱: qxkjz@163.com
网址: http://cmalibrary.cn/amst
投稿系统: http://qxkjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 郑秋红 卢冰

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
定价: 30元



本刊已被万方数据、中国知网(CNKI)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。

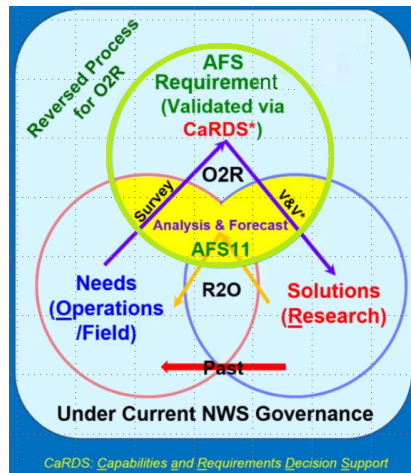
目次

第14卷 第1期 2024年2月20日

1 许小峰: 主编语

科学观察

2 周圻, 张伊, 贾朋群: 气象和大气科学新生长点——美国气象学会2024年年会带来的启示



P5

封面报道

8 尤焕苓, 叶彩华, 姜江, 赵倩, 齐晨: 致敏花粉监测预测技术研究进展

主编语

每年年初举办的美国气象学会（AMS）年会在全球大气科学界具有广泛的影响力，对于大气科学相关领域的发展具有风向标的意义。本期“科学观察”栏目文章（P2）通过梳理 AMS 2024 年年会的主要内容，对“学科进步和业务需求共同推动业务服务出新”“云物理或成为未来 10 年的研究核心”“气象数据的新视角”等大气科学的新学科生长点做了解读和介绍。

准确地监测预测致敏花粉浓度是预防花粉过敏症的基础，也是气象部门开展气象服务的重要内容之一。“封面报道”栏目文章（P8）对国内外致敏花粉监测预测技术和方法进行了综述，分析比较了各种方法的优缺点，探讨了致敏花粉监测预测技术的发展方向，并对我国开展相关业务提出了思考和建议。“年度述评”栏目文章（P15）连续第六年关注中国龙卷活动及灾情特征，对 2023 年中国龙卷的时空特征和致灾情况进行统计分析。2023 年，受东北冷涡及江淮气旋影响，多次发生龙卷群发事件。“年度述评”栏目文章（P25）还对 WMO 五个主要世

界气象中心的履职路径及发展情况进行对比，分析了各中心的现状和特点，以及中国目前的服务特色和差距。“研究进展”栏目文章（P32）介绍了中国气象科学研究院区域高分辨率数值预报检验评估系统。它是一套适用于高时空分辨率观测资料的精细化降水检验评估系统，为促进区域模式改进和高分辨率数值预报产品的偏差理解提供参考。

2023 年超强台风“杜苏芮”对我国大范围地区造成严重影响和破坏，“论坛”栏目文章（P59）复盘总结了国省市县四级联动对台风“杜苏芮”的气象服务过程，并对如何更好地开展类似气象服务提出思考。“论坛”栏目文章（P66）对基于气候生态产品价值实现的气象服务模式与发展提出思考。“往事钩沉”栏目文章（P75）介绍了宜昌海关气象观测史，并对整理的宜昌海关气象资料与现代气象资料进行了对比分析。

许小峰

年度述评

- 15 张晶晶, 黄先香, 蔡康龙, 植江玲, 黄舒婷, 徐纵横: 2023 年中国龙卷活动及灾情特征
- 25 张滨冰, 吕丽莉, 刘爽, 那晓丹: 世界气象中心履职路径及发展状况对比

研究进展

- 32 陆天舒, 孙鑫, 陈昊明, 李普曦, 朱峰, 霍庆, 周佰铨, 杨琳韵: 区域高分辨率数值预报检验评估系统
- 38 陈姣荣, 阮能, 尹依雯, 许丽丽, 袁泉, 黄天赐: 2021 年岳阳一次混合强对流天气过程成因分析

专题 基层气象现代化

- 46 王玲, 于桂花, 李金, 解帅, 苗运玲: 伊宁市降水酸碱度变化趋势与气象因子的关系
- 54 蔡涛, 戴翠贤: 三门峡市烤烟安全移栽期精细化区划及气候变化对其影响研究

论坛

- 59 姚秀萍, 张悦含, 袁俊肖: 台风“杜苏芮”(2305)过程的气象服务分析与思考
- 63 刘文钊, 李婧华: 中国近十年大气科学领域文献计量分析
- 66 范晓青, 张勇, 庞君如: 基于气候生态产品价值实现的气象服务模式与发展思考
- 70 金玲, 张丽亚, 张德林, 顾松强, 陈丽君: 智慧气象融入经济、社会、城市三大治理体系的应用

往事钩沉

- 75 熊红梅, 陈筱秋, 刘立成: 海关历史气象档案价值探析及近现代气候比较——以宜昌海关为例

阅读

- 80 2023 年《气象科技进展》总目录

气象和大气科学新生长点——美国气象学会 2024年年会带来的启示

■ 周圻 张伊 贾朋群

长期以来，美国气象界学术活动，尤其是每年初举办的年度会议，对于气象和大气科学学科发展具有风向标的意义。2024年年会是全球新冠疫情后全面恢复线下学术活动的重要一年，年会的“桥头堡”作用依然如故：不忘已有学科发展，同时拥抱新技术。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.001

全球气象界关注的美国气象学会(AMS)2024年年会，于2024年1月28日—2月1日召开。这次会议以“生活在不断变化的环境中”为主题，强调在全球未有之大变局背景下，气象界应该为社会发展做出更重要的贡献。年会在保留了气象科学研究和业务服务等“舒适区”主题的同时，还在不同的分会场提出一些颇具新意的主题或讨论视角。

刚刚过去的2023年，全球区域冲突不断的同时，

全球温度异常达到了一个空前的水平(图1)。几乎人人能够切身感受到的全球政治、气候危机，急需气象科学更深刻和有效地为全社会提供服务。在这样的背景下，本次会议的主题：气候科学如何有效服务社会显示了巨大的意义。这样的服务的核心之一，就是在人类面对减排调整能源结构(图2)，在21世纪中后期实现净零碳排放和迈向全面的碳中和社会方面，气象行业肩负重要的使命。

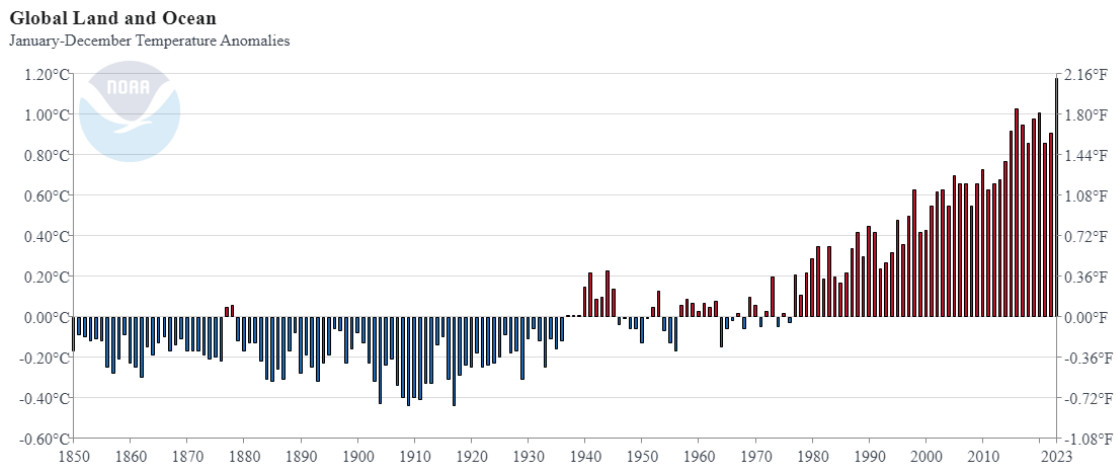


图1 1850年以来全球陆地和海洋温度逐年变化(来源: AMS网站: AMS 2024 Session Highlight: Transition to Carbon-Free Energy Generation, January 22, 2024; 图2同)

本文主要基于会议前期安排方案和少量会议内容，挑出年会上的新理念、新视角和新方法与读者共享，同时试图解读这些新内容对气象和大气科学学科整体在未来发展中可能的影响。文中图表信息来自会议相关报告或材料(可参考: <https://ams.confex.com/ams/104ANNUAL/meetingapp.cgi/>)。需要指出的

是，虽然一些主题很有创意，但相关的会议报告和墙报内容未必能够驾驭这样的主题，但这也是学术交流的意义所在：探讨和孕育新的研究方向，尽管开始时可能遇冷，但学者提出概念、学术交流的扶植作用，对有价值的方向的未来发展一定会在随后研究中逐渐体现。

资助信息：国家自然科学基金战略项目(42342025)

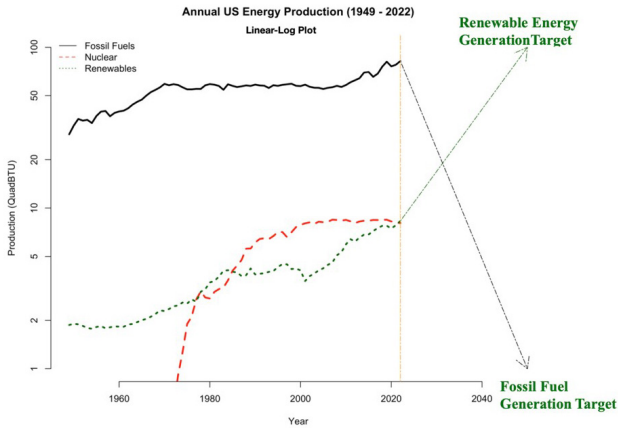


图2 1949年以来美国能源结构变化和2040年前后的期待

1 学科进步和业务需求共同推动业务服务出新

在年会最重要的环节之一“市政厅会议——机构更新”，美国国家气象局（NWS）阐述了下一代水预报能力。随着各种水相关灾害，特别是干旱、洪水和水资源管理风险的挑战加剧，美国气象部门在构建下一代水预报能力时，将一些新要素，例如全年水供给和水质等要素的预报，纳入业务以推进和扩展基于影响决策的支撑服务。为了实现这一能力，多个系统在

研发中，包括NOAA的下一代水资源模拟框架（Next Generation Water Resources Modeling Framework, NextGen），国家水模式（National Water Model, NWM），洪水泛滥制图（Flood Inundation Mapping, FIM），企业涉水解决方案（Enterprise Hydrofabric Solution）和降水频率图集（Precipitation Frequency Atlas, PFA）等。

水预测能力提升项目还得到了美国《两党基础设施法》8200万美元的资金支持，是NWS历史上最大的一笔水项目的联邦资金投入。该项目的核心内容NextGen并非一般意义上的模型，而是基于标准和模型的互操作行业软件工具，该工具为各种开发提供了基础和平台，也更有利于合作开发（图3）。一方面，NOAA设置了3.6亿美元的投资上限，选择与阿拉巴马大学及学界和私企伙伴合作，成立了第一个定位在“水”的合作研究所，该合作研究所也是对口NWS的唯一合作所；另一方面，开发工作将采取透明的开源代码，使用标准地理空间数据模型和程序库，从而满足多机构促进科学和互操作性的需要，科学选择和使用优越的模型。NOAA计划在21世纪20年代末推出全新的水预报能力产品。

美国科学基金（NSF）是AMS年会不变的热点。

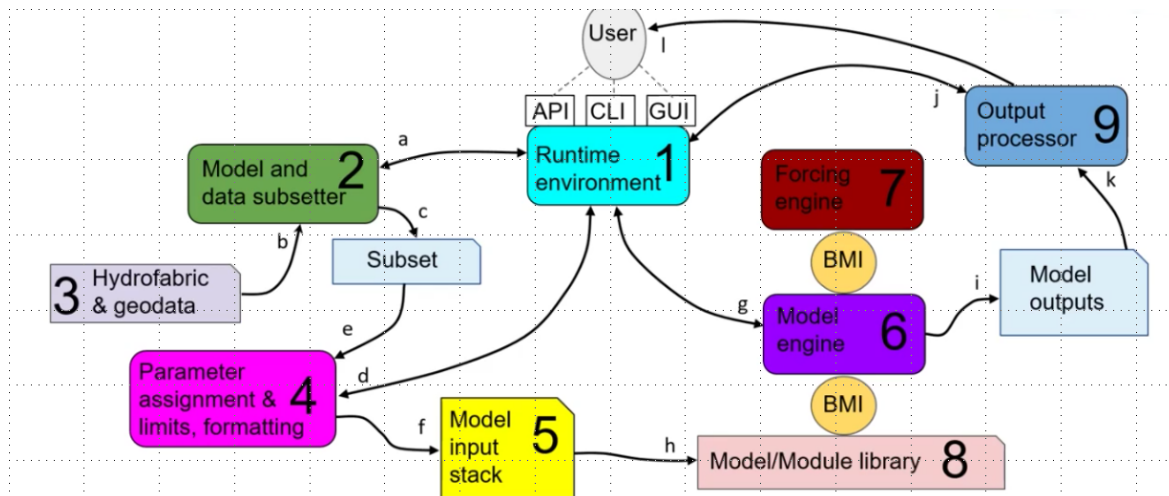


图3 NextGen组成图（来源：<https://ams.confex.com/ams/104ANNUAL/meetingapp.cgi>；图4—图8同）

本次年会全新亮相了其最新的观点：NSF正在进入新的阶段，即基于应用的、转化的和跨学科研究正在形成。NSF的这一观点和主导的“机构更新”会议分主题“NSF资助：将你的研究结果放到社会和经济中（NSF Funding: Move Your Research Results to Society and the Economy）”，无疑在重新诠释NSF主导的基础研究与应用基础研究的边界。NSF认为，支持能够快速得到结果并影响社会和经济的研究，应该放在更加

重要的位置，而这类研究与业界、地方和公共机构的合作尤其重要。NSF的这一将“个人好奇心”更紧密地与社会发展联系起来的新视角，或代表了社会和学科一并进入高度发展阶段并面临新的巨大挑战时期的有些无奈却是必须的选择。

在大数据研究中，曾经有数据企业通过收集道路上行驶车辆雨刷器摆动频率，获取降水强度信息。在业务模式模拟能力升级的背景下，一些反向问题也

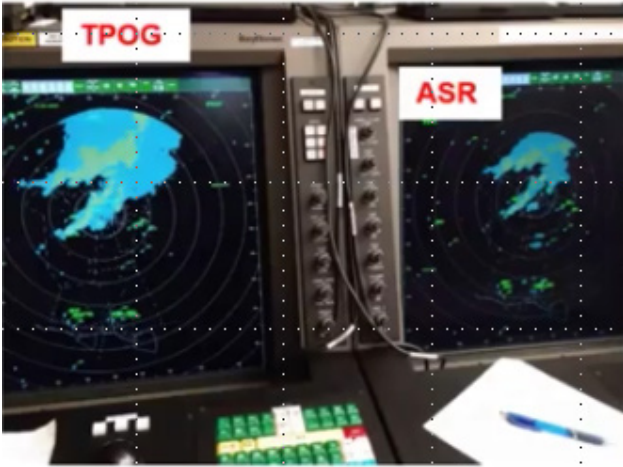


图4 TPOG和ASR (机场搜索雷达) 产品对比

被提出：应用端最需要什么细节，预报模型或监测算法就提供什么产品。例如，美国联邦航空局（FAA）气象部门在天气预报产品中推出航站楼玻璃窗降水（Terminal Precipitation on the Glass, TPOG）预报（图4），这一响应机场空管员要求给出的降水量衍生产品，目的是减少机场周围有关降水的虚假、缺失和过时描述，更好地应对快速变化的降水。

2 云物理或成为未来 10 年的研究核心

云物理研究具有悠久的历史，但一直是相对小众的领域。然而，云物理过程的重要性非常明显，例如，云物理相关的大气云层是天气、气候模拟的最重要元素之一，但在模拟活动中大多只能用参数化方式对其进行一般性描述，是目前天气和气候模拟最主要的误差来源之一。随着人工智能（AI）技术全面介入地球系统模拟研究，本届年会新增云微物理系列专题研讨会（First Symposium on Cloud Physics），可以说是恰逢其时。从会议设立的主题看，首次云物理研讨会关注的一些内容也颇具新意，例如：基于粒子的概率方法（Probabilistic Particle-Based Method）、冬季风暴云属性、卷云和深对流云、向人影学习的气候干预、云微物理跨尺度参数化和中尺度云组织等。

德国马普气象研究所介绍了在云观测方面的进展。该所研制的云风筝，云中观测空间分辨率达到惊人的0.13 m，远比飞机观测的大约33 m更加精细（图5）。学者在会上演示了风筝随考察船在海上云区采样的情景，让与会者对风筝这一最古老的高空大气探测工具又有了新的认识。

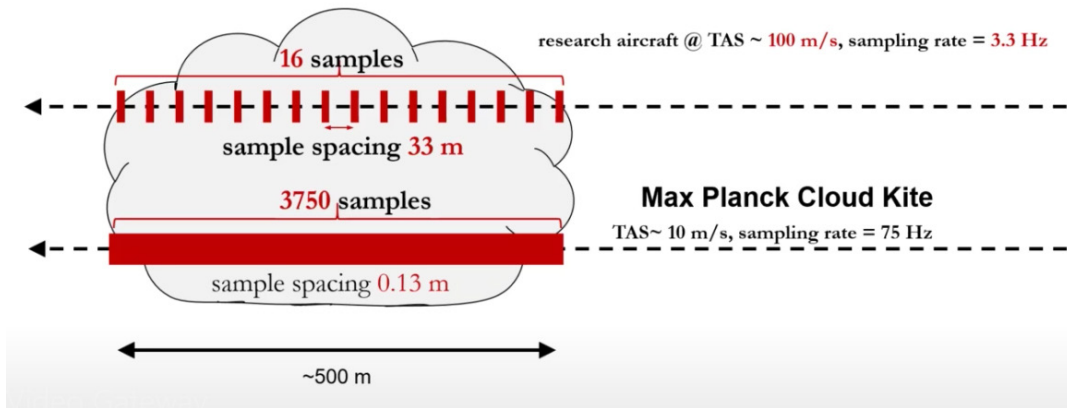


图5 德国马普气象研究所云风筝探测示意图

3 研究和管理如何高效对接业务要求

在第13届研究向业务转化会议上，专门针对地方气象部门预报员现场预报（Field Forecasting）需求无法有效化为研究主题开展了专题讨论。按照目前美国国家气象局的管理流程，瞄准业务发展的技术开发活动的第一步是独立于研发者确定需求，然后经过正式论证后再向研发人员转述。尽管这样的流程已是常态，但是难言是最优的，因为这样的程序耗时，而满足经过验证的需求涉及的资源并未被充分讨论和得到保证。这就导致论证过的需求无法及时到达研发人员

案头，而论证修改过程也会让现场预报需求在研发得到的解决方案中被打折扣。为了更好地改变这一状况，气象管理人员在年会上揭示和分析问题，提出用更加立体的方案替代过去方案（图6），其中加入了能力和需求决策支撑（Capabilities and Requirements Decision Support, CaRDS）机制，让过程立体化，从而在研究（R）和业务（O）之间更加顺畅和高效地联系起来。

刚刚过去的2023年，美国最重要的气象灾害非毛伊岛火灾莫属。本次年会另一个令人深刻的印象，是

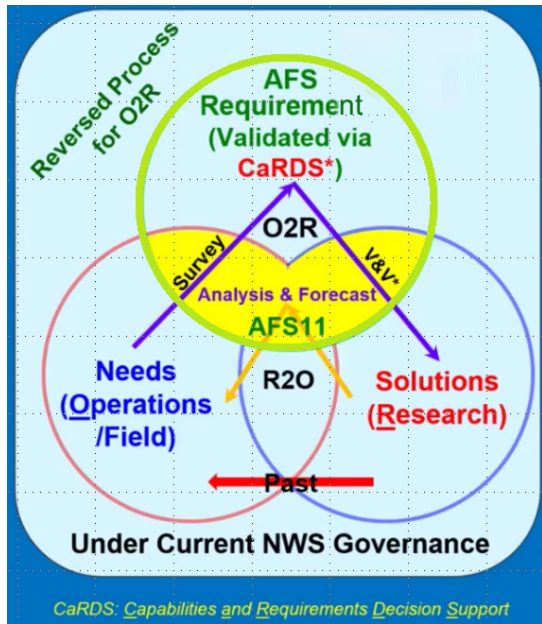


图6 面向地方气象预报难题的R2O机制

对2023年8月毛伊岛火灾教训的反思。在第12届天气有序国家建设会议和第15届新能源学术会等会议，都设立了毛伊岛火灾相关的分会主题。来自气象业务和研究，以及更大范围的学者和官员，从实时火险天气预报、火灾天气发展态势、2023年火灾生物质燃烧量、NASA火险资源管理系统（FIRMS）的有效性、火灾风险认知、火灾中大气流动力作用调查、夏威夷中尺度气象网信息和野火危机增加等角度，较全面的反思需要从这次灾害汲取的教训和各种改进之处。

4 文化也是一种自律

促进地球科学的文化变革：专业学会的作用（Facilitating a Culture Change in Geosciences: Role of Professional Societies）是年会上颇具新意的主题。本次会议将地球科学文化——定义为科学家、他们的机构、他们的专业学会和他们的网络之间多年经验和互动所产生的共同价值观、规范、传统和实践——充满了对少数群体和边缘化社区的排斥和剥削行为。专业学会帮助定义和制定地球科学专业的标准。他们独特的影响力来自其高度可见的职能，包括：广泛的会员基础、出版期刊、授予奖项和荣誉、影响政策决策以及提高公众对与科学学科相关的各种问题的认识。在讨论环节，AMS、美国地球物理联合会（AGU）、美国地理学会（GSA）等主要地球科学领域专业学会的主席和当选主席接触，以反思社会为推动文化变革而采取的行动，并促进多样性、公平性、包容性和归属感。

美国拥有约2400万亚裔美国人和太平洋岛民（AAPI），会议特意安排讨论了AAPI在天气、水和气候事业中的作用。会议认为，AAPI为美国的公共、私营和学术部门做出了杰出贡献，帮助塑造了天气、水和气候行业。本次市政厅会议举行小组讨论，重点介绍其中的一些贡献，并提请注意亚太裔社区个人继续面临的独特障碍。小组成员分享了他们在推进WWC（天气、水和气候）行业的科学知识、技术创新和经济机会方面的专业贡献。本次小组讨论将提供一个分享他们的见解和经验的平台。市政厅会议以互动对话结束，与会者可以积极参与、提出问题并发表自己的观点。反馈和讨论结果可用于告知和支持AMS更大的多样性、公平性、包容性、正义和可访问性举措。

此外，在第5届多样性、公平和包容会上，还就地球系统科学中的新科学殖民主义（Scientific-Neo-Colonialism）展开讨论，欧洲学者在会上介绍了EGU的教训。他们将研究人员进入地方或土著地区开展不涉及社区、知识拥有者和当地人员的研究并收集数据等活动，而在随后的数据分析和发表中没有当地人员参与显现比喻为“直升机科学（Helicopter Science）”。这一形象但令人深思的视角，直指提高对“直升机研究”和“科学新殖民主义”潜在剥削做法的认识。学者呼吁科学组织、出版商和供资机构今后为实现更加公平、多样和包容的地球科学环境而作出可能的努力。

5 气象数据的新视角

如果说美国气象学会上一次年会以大数据为主题，探讨了大体量和多样化的数据在揭示地球系统规律方面的意义，那么本次年会则提出了一个反向问题：即今天NWP在1 h的预报周期窗口每天的数据量达到320 TB，且预计在未来几年内将增长到每天数据量为超过PB量级，大数据量带来的一个严重问题是，利用当前的数据访问机制，有效地分发如此大量的数据将变得越来越困难。

在第40届环境信息处理技术会议上，出现了“民主化数据（Democratizing Data）”的讨论主题。与会者从联合知识网络、开放NWP数据的教训、开放数据使用环境、气象数据基于云的整合实现其价值等方面，全面探讨了以“7V”（数量、速度、多样性、可变性、准确性、可视化和价值）为标签的气象大数据，不再是一般用户眼中的猛兽，从而实现“民主化数据”理念背后“数据公平”的真谛。

来自欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的学者以“来自PB量级数据的比特量级信息（Bytes from

Petabytes)”为题，介绍了如何从海量气象数据中提取所需信息，从而很好地应对这一挑战。ECMWF发展了一种新的特征提取概念：“多面体（Polytope）”。通过利用高维计算几何领域的工具，Polytope能够从ECMWF的高维（6D/7D）天气预报数据立方体（Datacubes）中，高效地切割出各种复杂的n维形状多面体，后者可用于特征提取，在将数据交付给用户之前实现多个量级的数据缩减。这样处理的最重要意义在于，通过与新功能相结合实现从打包的千兆字节大小的预测字段中检索所需的字节，满足用户请求所需的输入输出设施减少到最低限度。目前，该项功能已经在ECMWF的IFS模式输出端实现。

NOAA学者给出该机构开放数据的量，2023年已经超40 PB，2024年将增加到50 PB（图7）。这些数据如何有效地管理和发挥出最大价值，实际上是在数字化经济普遍落地的当下，摆在各国气象主管部门面前新的和关键挑战。

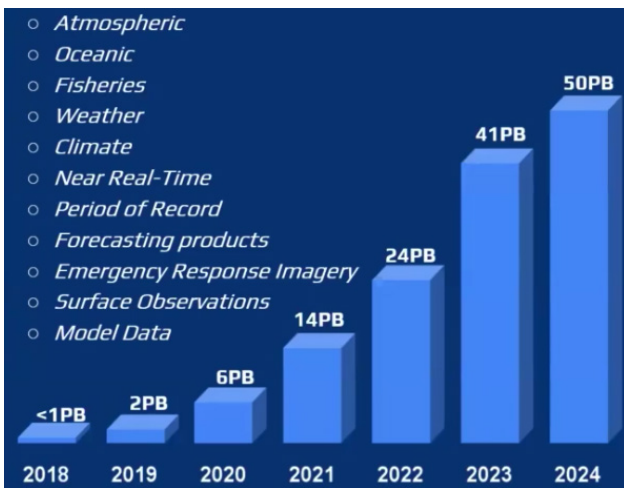


图7 2018—2024年NOAA数据量的增加

6 大模型时代的气象业务

2023年是大模型爆发的一年，大模型对气象行业的渗透也有些令人猝不及防。以IT巨头企业引领的一些研究成果对数值天气预报（NWP）领域产生了重大影响，特别是GraphCast（Google DeepMind）、Pangu-Weather（华为）和FourCastNet（NVIDIA）等成为2023年气象进步最鲜明的标签。AI也成为2024年年会讨论的热点。

为了评估不同大模型预报的性能，ECMWF凭借其数十年的模型比较专业知识，承担了将这些基于机器学习（ML）的模型与自己的基于物理的模型（IFS）进行比较的任务。为了完成这种比较，开发了一个名为ai-models的Python包。该程序包的主要目的是在推

理模式下运行任何基于Python的数据驱动模型。然而，模型本身的代码并不包含在ai-models中；相反，每个模型的推理部分需要打包在自己的Python模块中，然后将其注册为ai-models的插件。必要时，ai-models会下载模型权重。对比验证工作将通过多个来源的选择为每个模型提供初始条件，例如来自中心MARS（Meteorological Archival and Retrieval System）档案的ECMWF高分辨率操作分析、来自气候数据存储的再分析数据、普通GRIB文件以及各种其他来源。此外，ai-models通过将ML模型打包为GRIB格式来管理它们的输出。选择GRIB作为工作格式是为了能够重用该中心的所有基础设施和工具，包括其档案、评估和诊断工具以及网络产品的创建。然而，人工智能模型可以轻松扩展以支持流行的数据格式，例如NetCDF。本质上，人工智能模型充当初始条件、模型及其输出之间的中介。ai-model及其插件之间的所有内部通信都是通过Numpy数组完成的。总之，ai-models为机器学习预测系统提供了单一入口点，处理输入和输出，为用户提供分析和绘制新一代模型所需的数据和元数据。

2023年大语言模型爆发式出现，年会上学者提出“即时工程”的新概念，探讨利用ChatGPT等大型语言模型构建应用程序和服务。新概念可以通过提供帮助和文档检索的增强生成（Retrieval Augmented Generation, RAG）处理用户查询，抓取文档并将其索引到矢量数据库。在获取预测产品的推理和行动（Reasoning and Acting, ReAct）的场景中，大型语言模型从预定义的集合中选择最合适的工具并确定该工具的相关参数，如用API检索指定日期给定位置的点预测。总之，利用大语言模型的功能，可以无缝地转换用户的请求，智能回答类似“我的家乡明天会下雨吗？”一类的问题。

7 机构更新信息展示新发展前景

年会在多个分会场请不同业务机构介绍了最新发展。例如，ECMWF最新升级了当家预报模式IF（48R1版本），这个雄心勃勃的新版本带来许多进步，目前的焦点已经转向49R1版本的准备工作，它的特殊意义是将作为下一次哥白尼大气气候再分析（ERA6）以及海洋和大气成分的相应组成部分的科学基础。

除了运营升级之外，ECMWF继续在实现长期战略目标方面取得重大进展，即更高分辨率的预测和数据同化，以及地球系统所有组成部分的一致耦合。这涉及到解决公里级运行的科学挑战与对系统进行技术投资之间的平衡，以使它们灵活并准备好利用快速发展的高性能计算市场。在这两个方面，欧盟委员会在

“目的地地球”计划的框架内组织开展了极其富有成效的合作。

此外，欧美为代表的气象及相关机构，已经就需要长开发周期的雷达、气象卫星等关键基础设施的换代展开充分的调研和讨论，其中瞄准2030年以后的下一代气象监测网络，将具有新的空间和地面架构。其

中，NOAA气象卫星（图8）提供的数据，在2000年还不到1 PB的情况下，今天已经达到约40 PB，到2030年数据量将再翻10倍，达到400 PB量级。2030年以后进入轨道的GeoXO（下一代地球静止气象卫星）和NEON（Near Earth Orbit Network）将是更精细化探测的主要来源。



图8 NOAA当前和下一代气象卫星布局

8 结语

长期以来，美国气象界学术活动，尤其是每年年初举办的年度会议，对于气象和大气科学学科发展具有风向标的意义。2024年年会是全球新冠疫情后全面恢复线下学术活动的重要一年，年会的“桥头堡”作用依然如故：不忘已有学科发展，同时拥抱新技术。年会的背景包括以ChatGPT为代表的人工智能产品在2023年全面走向各个应用领域，可能带来行业发展范式巨大改变的重要发展态势。年会完成了一次全面审视气象和大气科学的发展，确认或已显现的新发展思路和方式的业内自省。

本次年会众多分会议和主题学术活动，包含了其他更多的颇具新意的理念或视角，例如：在气候变化方面，认为需要在瞬息万变中加快气候预测；在数值模拟方面，提出城市和对流高性能计算（HPC）的概念；在数据管理中，提到非卫星类数据管理；在信息技术视角，提出利用地理信息系统（GIS）传达预报

信息。

从本次会议可以看出：一是美国气象界采取务实的战略，引领气象科学学科发展和业务服务能力的提升，本次年会上虽然AI相关内容几乎到处可见，但主流研究和关注点与近年来年会几乎没有太大差别；二是社区的理念在美国学界正在成为其本色特征，在这方面美国气象部门态度的转变发挥了极大的促进作用：新一代预报模式UFS全方位基于社区和开源研发，以及NOAA影响越来越大的面向行业的R2O项目，是这一转变决定性的推进力量；三是年会全面拥抱AI在学科发展上的新态势并将其作为学科发展最重要的新工具和新研究视角，不仅在具体应用端给出AI色彩的解决方案，更从理论上开始进行阐释、归纳、概括，为未来更大规模的应用提供新的框架。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

（编辑：郑秋红）

致敏花粉监测预测技术研究进展

尤焕苓¹ 叶彩华¹ 姜江¹ 赵倩² 齐晨¹

(1 北京市气象服务中心, 北京 100089; 2 北京市顺义区气象局, 北京 101316)

摘要: 准确地监测预测致敏花粉浓度是预防花粉过敏症的基础, 也是开展气象服务的重要内容。在气候变化和城市化背景下, 花粉过敏有加重趋势, 迫切需要提供准确、快速的致敏花粉监测预测产品, 以提高敏感人群对过敏风险的防御能力。结合分析致敏花粉采集技术、监测预测方法的现状和发展趋势, 比较各种方法的特点, 探讨致敏花粉监测预测技术发展方向, 为我国发展致敏花粉监测预测业务提供参考。

关键词: 致敏花粉, 观测, 预测, 技术

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.002

Research Progress of Allergenic Pollen Monitoring and Forecasting Techniques

You Huanling¹, Ye Caihua¹, Jiang Jiang¹, Zhao Qian², Qi Chen¹

(1 Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089; 2 Shunyi District Meteorological Service, Beijing 101316)

Abstract: Accurate monitoring and forecasting of allergenic pollen concentration is not only the basis for the prevention of pollen allergy but also an important part of meteorological services. In the context of climate change and urbanization, there is an increasing trend of pollen allergy, leading to an urgent need for accurate and timely allergenic pollen monitoring and forecasting products to improve the defensive capability of sensitive people against allergy risks. Allergenic pollen collection techniques as well as the current status and the future development trend of the monitoring and forecasting methods for allergenic pollen are analyzed, together with the comparison of the characteristics of various methods. And then we discuss the future development direction of the monitoring and forecasting techniques so as to provide reference for the development of allergenic pollen monitoring and forecasting operation in China.

Keywords: allergenic pollen, monitoring, forecasting, techniques

0 引言

花粉过敏是因花粉接触到人体粘膜引起的过敏反应, 是最常见的过敏性反应^[1]。研究表明, 超过150种花粉蛋白会引起过敏反应^[2]。多数情况下, 过敏性鼻炎或花粉热患者在接触花粉后可加剧疾病, 形成哮喘等^[3]。根据世界过敏组织(WAO)报告, 花粉过敏人群比例大约在10%~40%^[4]。近几十年, 花粉过敏疾病发病率显著增加, 对致敏花粉监测预测的研究也日益增多^[5]。

WAO警告说, 气候变化将导致植物延长生长季, 更早地开花和授粉, 从而增加敏感人群的自然花粉暴露时间, 增加过敏症状的严重程度, 致敏花粉将影响到全球大部分人口的健康^[6]。随着我国生态环境改善, 城市化快速发展, 人们接触花粉的机会更多, 花粉过

敏人群有增多和病症加重的可能^[7]。加强对致敏花粉浓度的监测、种类的识别, 研究致敏花粉的季节变化规律, 及时准确地做出预测, 对于更好地预防、诊断和治疗花粉过敏相关的健康问题以及降低医疗成本至关重要。本文梳理了国内外致敏花粉的观测预测技术, 分析相关技术的特点, 为我国开展致敏花粉监测预测相关业务提供参考。

1 致敏花粉监测技术

致敏花粉颗粒通常直径在10~100 μm, 由于惯性大、沉降率高以及容易粘在观测设备的侧壁上而不易捕获。致敏花粉浓度变化非常大, 从每立方米几个颗粒到几千个颗粒不等, 需要通过大量采样确保观测结果的代表性^[8]。此外, 不同人群对花粉过敏原过敏程度不同, 过敏症状也不相同, 花粉颗粒种类的识别对于精准预防和治疗花粉过敏症有重要意义。

我国目前普遍采用重力沉降法收集花粉, 操作人员通过显微镜对花粉目视识别和计数, 花粉观测站点相对较少。重力沉降观测法需要耗费大量人力和时间,

收稿日期: 2022年11月28日; 修回日期: 2023年7月1日
第一作者: 尤焕苓(1973—), Email: you_hl@sina.cn
通信作者: 叶彩华(1968—), Email: ych6810102@126.com
资助信息: 北京市科技计划课题(z191100009119013)

同时由于操作员技能水平不同,会导致花粉观测出现较大的识别和计数差异^[9-10]。近年来,国际上花粉自动观测设备不断涌现,主要发达国家相继建立了致敏花粉观测网络,能够较快进行花粉观测^[10]。

1.1 致敏花粉的采集

致敏花粉可通过被动式和主动式两种方式采集(表1)。被动式采集利用重力沉降原理,使致敏花粉通过重力作用沉积在采样装置上,然后通过操作员显微镜目视观测,统计得到花粉数量和种类。1873年,Blackely^[11]设计了撞击花粉捕捉器,捕捉器中载玻片垂直放置,风向标使载玻片粘性表面迎风定向,对来风方向的花粉进行采集,每隔24 h更换1次载玻片,

通过人工镜检统计载玻片上附着的花粉数量和类型。1955年,Scamoni^[12]使用涂有甘油-明胶的载玻片收集花粉,载玻片安装在距地面1.6 m高处,载玻片始终暴露在迎风方向。1936年,Giesecke等^[13]使用底部带有甘油的低边玻璃杯对花粉进行采集,观测瑞士达沃斯山谷的花粉沉积。1946年,Durham^[14]提出了重力采集方法,通过覆盖一层粘附物质的水平固定的载玻片,粘附由于重力作用沉降的花粉。重力采集方法成为花粉监测科研业务中较常使用的方法,可每天或每周收集花粉样本,我国目前多采用该方法采集观测花粉浓度。被动式采集观测得到的花粉浓度单位通常为每1000 mm²面积的花粉颗粒数。

表1 致敏花粉被动式采集与主动式采集方法的比较

Table 1 Comparison of passive and active collection methods for allergenic pollen

观测原理	代表性仪器或方法	优点	缺点
被动式采集观测	Durham重力沉降法	成本低、不受天气影响,可广泛布点;国内普遍使用,普通显微镜可计数,具有较长的历史数据	人工每日采集,采集工作需人工操作;监测结果为面积浓度,缺乏同国际通用的体积浓度的可比性
主动式采集观测	Burkard花粉采集器 Rotorod花粉采集器	自动化采集,国际通用,结果为体积花粉浓度	进口价格较贵,国内未生产,国内仅研究中使用

主动式采集利用机械、物理或电力装置主动收集空气中的花粉。1952年,Hirst^[15]提出了体积采样器的设计方案,Burkard Manufacturing公司根据Hirst提出的设计原理生产了采样器。该设备可将外部空气吸入设备,空气通过狭窄的孔口加速流动到固定在匀速缓慢转动的圆筒上的粘性胶带上,花粉可吸附到胶带上。粘性胶带通常每周更换一次。操作员使用光学显微镜或电子显微镜对条带上的花粉进行计数与识别,通过单位面积粘附的颗粒数和流入空气的体积计算花粉的浓度。这种采样器是欧洲空气孢粉学中常用的采样器,能够对花粉进行长达7 d的连续采样。1999年,Frenz等^[16]设计了一个旋转杆收集器(Rotorod花粉采集器),通过以恒定的旋转速度将固定在等长转轴两端上的2个采样基条对空气进行间歇的相对运动,利用惯性撞击原理,使采样基条粘附空气中的花粉,通过操作员镜检对采样基条上的花粉记数。这种采集方法在北美广泛使用,目前我国仅在部分研究工作中使用,业务服务领域还使用较少。

1.2 致敏花粉的计数与识别

致敏花粉的计数和识别可采用人工镜检方式和计算机方式进行。通常情况下,主动式和被动式采集设备得到的花粉均由人工镜检计数识别。花粉粒总数可通过人眼在显微镜下目视计数确定。花粉种类可通过放大100~400倍的花粉颗粒形态(外壁、内壁、细胞质等)由操作员来判断。显微镜下花粉的目视计数识别要求操作员具有花粉形态学相关的知识和实际经

验,其计数分类耗时耗力,计数和识别准确性易受操作员精神状态和主观影响,计数和分类准确性较低^[17]。花粉观测中采集、染色、镜检计数和计算浓度等步骤均需通过人工完成,准确率受多种因素制约,同时收集花粉的载体中往往存在非常多的花粉粒以及污染物,也为人工计数和识别增加了难度^[9]。人工计数具有方便实施的优势,但花粉识别的人为主观因素导致观测结果误差较大,识别精度易受人为主观经验的影响。

由于花粉颗粒具有如形态、质地、形状等内在的一些数字化图像特性,可利用计算机视觉和模式识别技术对花粉颗粒进行分类和识别^[18-19]。Rodriguez-Damian等^[20]收集了100张不同的荨麻花粉图片,采用标准霍夫变换方法对花粉颗粒图像进行锐化,再将图像转化为二值图像对花粉颗粒检测计数。Oteros等^[21]对蜜蜂花粉标本进行研究,用阈值化方法对灰度图像进行二值化处理,通过孔填充法填充部分花粉内部的孔,对花粉进行计数识别。王勋银^[22]建立了植物花粉图像自动识别系统,基于视觉原理,分析和提取花粉的形态特征、内部结构特征和纹理特征,用灰度共生矩阵和傅立叶变换描述花粉的纹理信息,基于最小冗余性和最大互补性,提高系统的识别率。赵贤国^[23]研究了花粉图像的分类与识别特征提取算法,通过提高花粉图像特征向量的鲁棒性,提高对花粉的识别率与分类精度。Travieso等^[24]基于隐马尔科夫模型的轮廓特征提取方法对花粉分类,可很大程度减少图像特征

向量的维度，提高分类速度。Xie等^[25]提出基于高斯尺度的空间粗糙度特征提取方法，将花粉图像利用高斯金字塔算法分割成不同尺度的空间子图像，在不同尺度空间上对花粉图像进行粗糙度直方图统计特征提取，用于提高花粉的识别率。

近年来，基于深度学习的特征提取方法在花粉识别领域取得了良好的效果^[26]。Daood等^[27]使用卷积神经网络对花粉样本进行训练，建立了一种可识别30种花粉颗粒的方法。Kubera等^[28]通过构建深度卷积神经网络模型给花粉分类，发现即使简单的深度学习模型也能对花粉类别进行有效分类，深度学习模型识别具有相似结构的三种花粉粒（桦木、桤木和榛树）能够达到97.88%的准确率。Olsson等^[29]利用卷积神经

元网络模型对17科83类植物的花粉进行样本训练，对83类花粉分类准确率达到98%。Gallardo-Caballero等^[30]利用卷积神经网络对花粉进行检测，使用251个训练样本建立模型，135个检验样本评估模型，结果能达到99.75%的准确率。计算机方法计数和识别花粉需要有较为清晰的花粉图像，特别是分类识别对花粉图像的清晰度要求更高，对于实验室少量或单粒的花粉颗粒识别较容易实现。而自然环境下观测花粉量变化大、种类复杂且杂质混杂，生成清晰的图像和花粉识别的难度均大幅度增加，限制了自然环境下花粉自动识别技术的发展。表2给出了致敏花粉人工镜检与计算机计数分类的优缺点。

表2 致敏花粉人工镜检计数分类与计算机计数分类的比较
Table 2 Comparison of manual microscopic and computer examinations for allergenic pollen

观测方法	优点	缺点
人工镜检计数分类	成本较低，只需有一定经验的操作员和显微镜；国内研究和业务普遍使用，准确的人工观测数据可用于计算机计数识别的校验	耗时耗力，观测结果受操作员技术水平和主观性影响较大，观测结果重复性不好
计算机计数分类	显微镜或扫描仪生成图像，由计算机计数分类识别系统对图像计数识别，速度快，效率高，电子影像易存储，观测结果重复性较好；可推广应用，较大程度解放人力资源成本	需要大量的花粉样本图像数据建立模型，模型的好坏影响计数识别的精度；目前国内尚无业务应用较为成熟的系统，系统的有效性和精度在不同地域对于不同种类的花粉计数识别不一致

1.3 花粉的自动观测

近年来，国际上已出现一些商业化的花粉自动观测设备。Oteros等^[31]使用图像识别技术研制了花粉自动观测设备BAA500。该设备集成了自动气溶胶采样、精密机械传动控制、数码相机、高倍光学分析、复杂图形识别、植物科目鉴定、新物种软件训练、数据归档存储、实时数据在线显示等诸多功能。德国巴伐利亚州花粉观测网络在27个花粉监测点配备了这种设备，可发布3 h前观测的花粉浓度信息^[32]。Crouzy等^[33]研发了空气流式细胞仪Plair PA-300，可用于区分不同种类的花粉，也可为用户提供原始观测的光学数据，为校准设备识别各种花粉颗粒进行深入研究提供基础，同时也可使用已有的校准库开发感兴趣粒子的自定义算法。Kawashima等^[34]研发了一种使用激光光学仪器自动观测花粉的方法。该方法实时记录每个粒子对激光的侧向和前向散射信息，经计算机处理得到花粉信息。该设备花粉计数与Hirst型（Burkard）采样器

的计数结果具有较好的相关性。Miki等^[35]介绍了日本生产的KH-3000型花粉全自动监测仪。该设备利用半导体材料的散射激光光束、粒子计数器来检测花粉的数量和浓度，并实现数据实时输出。日本陆续在120个地区设置了2万余台该设备，并公布实时观测的花粉浓度。这些自动观测设备价格从几万欧元到几十万欧元不等，它们的观测原理和能力也有较大差异，因各地花粉种类和浓度差异较大，并非所有设备都能够表现出识别不同花粉类群的能力。

1.4 国内的花粉观测

致敏花粉的观测分为人工观测与自动观测（表3）。国内北京、上海、南京等多个省市花粉监测服务业务基本以重力沉降法进行花粉采集为主，然后通过人工镜检方式进行读数和分类统计^[10]。2000年前后，北京同仁医院引进日本花粉自动观测设备，在北京测试使用，结果由于空气颗粒物环境等差异，本地化应用效果不能满足研究和服务需求，两年后逐渐废弃。近两

表3 致敏花粉人工观测与自动观测设备的比较
Table 3 Comparison of manual and automatic observation methods for allergenic pollen

观测方法	代表性仪器或方法	优点	缺点
人工观测	显微镜、电镜下人工计数和识别	国内研究和业务普遍使用，在研究领域人工观测精度要求较高，可用于校验自动观测设备数据	耗时耗力，需额外采集，采集后需经过多种处理才可用于镜检，观测结果受操作员技术水平和主观性影响较大，观测结果较难重复
自动观测	日本大和公司的KH-3000型；德国HelmutHund公司的BAA500型；瑞士Plair公司的PA-300型	全自动仪器设备，自动化采集、计数及识别，观测得出结果快，重复性好	价格较贵，各种仪器原理不同；因国内环境气象条件和植被情况与发达国家有差异，在国内的适应性需要评估；进口设备维护保养成本高；国内有自动观测仪器正在研发测试中

年,我国个别科研机构引进了国外基于光学原理的花粉自动监测仪器,本地化应用效果仍在试用检验中。面对不断增加的花粉监测预测服务需求,花粉自动观测识别是未来的发展趋势。目前,自动化观测设备国内有公司刚刚进入研发测试阶段,效果不确定。进口设备价格昂贵,难以大范围推广布网,自动化观测设备的本地化试用效果还需要持续跟进检验。

2 花粉浓度预测

花粉浓度预测是将气象学、空气生物学、数学、工程学、物理学和信息学等结合起来,以模拟和预测花粉的排放扩散等复杂现象。天气条件可通过影响植物的开花、花粉的释放、传输和沉降等过程,对花粉排放和扩散发挥重要作用,是预测花粉过敏风险的关键变量^[36-38]。

2.1 回归分析预测方法

应用常规的统计方法预测花粉浓度是较为简单和常用的方法,可分为基于花粉观测数据的模型、基于物候的模型和其他模型。根据应用时段,花粉浓度预测可以是短期的、季节性的或长期的^[39-41]。花粉的短期预测是在主要花粉季节进行的,此时气象条件如降水、风速风向作为重要变量会导致花粉浓度的每日变化。季节性预测可预测花粉季节的开始日期、严重程度和峰值水平。长期预测可分析由于地理环境变化或气候变化导致的季节性花粉浓度的变化趋势,需要长期的花粉观测记录^[41]。通常基于花粉观测数据建立的模型主要有线性、非线性回归模型等,主要基于花粉浓度与气象条件等要素的关系建立。物候模型主要基于植物生长期模型对花粉季节(始花期、盛花期和花期结束期)进行预测^[42]。

国际上最流行和最简单的花粉预测模型是花粉日历预测。它在花粉的季节性规律中找到花粉浓度平均变化趋势,将一年中不同花粉类型的花粉浓度用图形描述,概述花粉浓度的大小和持续时间^[43]。Kubik-Komar等^[44]采用主成分分析方法对波兰2001—2016年白蜡花粉季节的数据进行研究,采用2001—2015年数据创建预测模型,2016年数据用于验证模型,结果表明:花粉季节开始、结束和持续时间、季节高峰日期和年度花粉总量预测结果与实际数据的拟合度在62%~94%。García-Mozo等^[45]分析了橄榄花粉开始季节、高峰日期、花粉结束季节和花粉季节持续时间等,发现线性回归、基于加权回归平滑算法和自回归积分滑动平均算法的季节性趋势模型均能较好地模拟花粉浓度的变化。Stach等^[46]用回归分析模型对波兰禾本科花粉进行预测,预测花粉分别在1~4 d的范围内

达到了61%的准确率,分析表明前几周或几个月的天气对于花粉起始期预测非常重要。Escabias等^[47]利用逻辑回归模型研究了橄榄花粉和气象数据间的关系,预测高浓度花粉发生的概率,结果表明逻辑模型具有良好性能。Silva-Palacios等^[48]建立了花粉日浓度短期预测模型,模型采用前10 d的花粉平均浓度变化趋势,根据气温和降水预测花粉浓度,表现出较为稳定的预测效果。

2.2 机器学习预测方法

机器学习模型经过优化,可以在不做假设的情况下拟合数据,非常适合预测复杂的非线性系统^[49]。Sánchez-Mesa等^[50]通过使用气象数据和前几天的花粉浓度作为自变量,预测每天禾本科花粉浓度,采用线性回归模型和协同进化神经网络模型对花粉浓度进行预测和验证,结果表明神经网络方法比线性回归方法具有更好的预测效果。Rodríguez-Rajo等^[51]基于多层感知器神经网络计算模型对欧洲南部禾本科花粉浓度进行预测,预测结果与实际花粉浓度间存在良好的相关性,相关系数高达0.9696。Sánchez等^[52]应用神经网络模糊模型预测橄榄花粉浓度,结果相较于经典统计方法具有明显的优势。Ranzi等^[42]采用神经网络模型预测花粉浓度,输入变量为每日花粉和温度(最大值、最小值和平均值)、降水量等气象因子,该模型可用来预测次日花粉浓度。

Navares等^[53]通过机器学习模型和变量特征选择方法,对车前草花粉浓度进行预测,结果表明该方法可有效预测花粉浓度。Lops等^[54]利用多个气象数据集、卫星数据和反映花粉通量的处理数据作为深度卷积神经网络模型的输入数据训练模型,预测2016年全年提前1~7 d的花粉浓度,取得了令人满意的预测结果。Zewdie等^[55]基于深度学习和集成学习的机器学习方法,采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的天气和陆地表面再分析气象数据、24 a的每日花粉浓度数据作为训练数据,建立机器学习预测模型,在深度神经网络、随机森林、极端梯度增强和贝叶斯岭等模型检验中,预测与实际的花粉浓度的相关系数分别为0.82、0.81、0.81和0.75,表明机器学习可有效预测花粉浓度。以上结果表明,与传统的建模方法相比,机器学习方法具有预测多天花粉浓度的能力和良好的效果,预测结果可用于提醒过敏个体在花粉高发期采取适当的预防措施。

2.3 基于模式的数值预测方法

天气尺度的大气运动和小尺度的湍流是影响花粉颗粒扩散的两个过程。花粉扩散的数值模拟必须重现

四种复杂的现象：花粉排放通量、平均风传播、大气湍流扩散和干/湿沉降^[56-57]。一般而言，扩散模型所需的输入是：植被分布图、花粉排放模型、花粉季节变化特征以及气象预测数据^[58]。描述空气中粒子运动，需要考虑重力、风速和湍流等因素，可以基于欧拉或拉格朗日的平流-扩散方程进行分析。欧拉模式用于花粉预测通常是从现有的中尺度大气污染模式出发，结合气象模式进行预测，大气中的颗粒物可被视为一个连续体，通过求解平流-扩散方程预测网格每个格点的平均大气颗粒物浓度^[59]。拉格朗日方法将空气中的颗粒视为一个离散的相位，并通过网格的坐标施加变形来模拟它们在连续空间中的单独路径^[60]。用于花粉预测的拉格朗日模式通常基于“拉格朗日粒子随机行走”方法，计算数千至数百万粒子的分布，可以给出气流的真实模拟^[61]。

Burki等^[62]基于气象和豚草花粉数据，用5种不同的神经网络配置训练了6种不同的气象变量组合，得到了30个候选排放参数化模型，并在花粉数值扩散模型COSMO-ART中对其进行测试。与原有模式参数化模型相比，基于人工神经网络的排放参数化方法在COSMO-ART的豚草花粉模拟性能上有了

很大的提高。Robichaud等^[63]采用区域空气质量模型GEM-MACH对桦树花粉扩散进行模拟，预测的桦树花粉浓度与观测结果较为一致（优于基于花粉日历的预测）。Verstraeten等^[64]使用土地利用的植被数据作为花粉排放清单，应用化学传输模型SILAM于比利时某区域，结果表明该区域高达33%的花粉是从比利时境内其他区域输送的。Zink等^[65]针对COSMO-ART研发了花粉排放的参数化模型EMPOL，将植物分布和花期作为输入参数，花粉的释放由温度和相对湿度驱动，通过包括湍流动能驱动、降水沉降、水汽粘附花粉等扩散或沉降模型，模拟瑞士2012年白桦花粉，结果表明EMPOL参数化模型可显著提高模式的预测性能。Werner等^[66]应用WRF-Chem模型模拟白桦花粉，结果表明，在两个模拟年中，模型的性能存在较大差异。模型高估了平季花粉浓度，低估了旺季花粉浓度。Pauling等^[67]利用COSMO-ART模拟花粉季节的桦树花粉传输情况，模拟与观测结果非常吻合，模拟的垂直横截面可详细分析花粉传输过程，分析结果表明花粉来源、地形、海拔高度和风的实际情况决定了花粉的分布。表4比较了致敏花粉浓度不同预测方法的优劣势。

表4 致敏花粉不同预测方法的比较
Table 4 Comparison of different forecasting methods for allergenic pollen

预测方法	优点	缺点
回归分析方法	预测因子简单，建模容易；可用于花粉关键指标的预测，且在时间序列、空间分布的预测中具有可以接受的准确率	通过花粉浓度和气象因子之间的关系建立模型，难以满足高时空分辨率预测产品需求；模型未考虑花粉生成、扩散与传输的物理作用，建立的模型适应性不够，需根据不同地点、不同时段、不同花粉类型等建模
机器学习方法	具有更高准确率；复杂模型的预测精度通常高于简单模型，且最优算法的选取也会随变量的不同而产生差异	所需训练样本数量较大，自变量与因变量之间的关系视作“黑匣子”；对极值的预测受极值样本数量影响，极值预测精度不足；计算时长较长，需通过调整核函数、按比例筛选训练样本、评估自变量贡献度等方法对模型或样本进行优化；预测结果与训练样本量关系较大
数值预报方法	考虑了空气动力学因素和气象因素，具有较好的物理意义，可得到高时空分辨率的预测产品	因受气象要素预测影响和同化进入模式的花粉浓度数据量限制，预测精度受影响较大

2.4 国内花粉预测服务

我国花粉浓度预测于20世纪90年代末起步。吴振玲等^[68]曾做过天津气象要素与花粉浓度的相关性分析，并以温度作为主要气象因子建立了逐日花粉浓度预测方程。张德山等^[69]应用正交筛选多元回归方法建立预测方程，开展北京地区的花粉浓度预测。张姝丽等^[70]利用统计方法建立了北京地区不同天气型条件下日致敏花粉总数的短期预测模型。赵文芳等^[71]提出了一种基于粒子群优化算法和支持向量机的花粉浓度预测模型，综合考虑多种气象要素，有效提高了北京地区未来24 h的花粉浓度预测精度，但预测模型没有考虑北京地区地形等因素的影响。近年来，北京、天津、内蒙古等市（自治区）每年开展花粉浓度预测服务，预测以统计分析方法为主，神经网络、机器学习

等方法也逐渐应用到预测服务中。北京地区除了花粉季对未来3 d的花粉浓度进行预测外，还开展了不同种类致敏花粉始期、高峰期和结束期预测服务，受到公众关注和好评。

3 讨论

对我国而言，在气候变化与城市化快速发展的背景下，植物的物候期和生物多样性均会发生变化，花粉种类、浓度以及分布规律也会随之变化，需要研究的工作还有很多。

1) 加强植被分布情况的调查。植被组成和变化对于监测花粉数量和种类以及分析花粉的变化规律、花粉的预测具有关键作用。可通过高时空分辨率遥感图像分类识别、物候监测并结合地面调查等方式对当地植被分布及变化规律进行及时监测。

2) 加强致敏花粉观测设备及业务组网观测研究。目前, 国内花粉观测仍以人工观测为主, 花粉自动采集、花粉计数识别、花粉自动观测设备等方面均亟待加强研究开发。同时, 目前国内花粉观测站点少, 且以24 h累计花粉沉降量观测为主, 致敏花粉区域差异性大, 时空精细化研究明显不足, 迫切需要加密花粉观测站点建设, 分时段读取观测数据, 区域数据实时共享, 形成花粉观测的高时空分辨率数据网, 提供给医疗部门、公众进行花粉过敏防御, 并为致敏花粉预测提供及时可靠的建模和验证数据。

3) 加强花粉传播规律研究。通过花粉垂直观测、植株不同距离花粉观测等实验, 结合气象条件研究花粉传播和随气流输送机理, 建立花粉传播的微物理过程。

4) 深入开展致敏花粉预测方法研究。深入研究致敏花粉与气象因子及城市局地气候之间的关系, 定量分析气象因子对花粉爆发波动的影响程度, 加强机器学习、数值预报等方法在致敏花粉预测中的应用。

参考文献

- [1] 施锐, 朱瑞卿. 花粉过敏症[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
- [2] Xie Z J, Guan K, Yin J. Advances in the clinical and mechanism research of pollen induced seasonal allergic asthma[J]. American Journal of Clinical and Experimental Immunology, 2019, 8(1): 1-8.
- [3] Erbas B, Jazayeri M, Lambert K A, et al. Outdoor pollen is a trigger of child and adolescent asthma emergency department presentations: a systematic review and meta-analysis[J]. Allergy, 2018, 73(8): 1632-1641.
- [4] Pawankar R, Canonica G W, Holgate S T, et al. WAO white book on allergy[M]. Milwaukee, WI: World Allergy Organization, 2011.
- [5] Suanno C, Aloisi I, Fernández-González D, et al. Monitoring techniques for pollen allergy risk assessment[J]. Environmental Research, 2021, 197: 111109.
- [6] Buters J T M, Antunes C, Galveias A, et al. Pollen and spore monitoring in the world[J]. Clinical and Translational Allergy, 2018, 8: 10.1186/s13601-018-0197-8.
- [7] 李全生, 江盛学, 李欣泽, 等. 中国气传致敏花粉的季节和地理播散规律[J]. 解放军医学杂志, 2017, 42(11): 951-955.
- [8] 中国气传致敏花粉调查领导小组. 中国气传致敏花粉调查[M]. 北京: 北京出版社, 1991.
- [9] 叶世泰, 张金谈, 乔秉善, 等. 中国气传致敏花粉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 尹焰寅, 刘燕, 党冰, 等. 气传花粉监测数据研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(15): 49-63.
- [11] Blackley C H. Experimental researches on the causes and nature of catarrhus aestivus (hay-fever or hay-asthma)[M]. London: Baillière, Tindall & Cox, 1873.
- [12] Scamoni A. Beobachtungen über den Pollenflug der Waldbäume in Eberswalde[J]. Zeitschrift für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung, 1955, 4: 113-122.
- [13] Giesecke T, Fontana S, Van Knaap, et al. From early pollen trapping experiments to the Pollen Monitoring Programme[J]. Vegetation History and Archaeobotany, 2010, 19: 247-258.
- [14] Durham O C. The volumetric incidence of atmospheric allergens: IV. A proposed standard method of gravity sampling, counting, and volumetric interpolation of results[J]. Journal of Allergy, 1946, 17(2): 79-86.
- [15] Hirst J M. An automatic volumetric spore trap[J]. Annals of applied Biology, 1952, 39(2): 257-265.
- [16] Frenz D A, Boire A A. Pollen recovery in atmospheric samples collected with the Rotorod Sampler over multiple-day periods such as weekends[J]. Annals of Allergy, Asthma and Immunology, 1999, 83(3): 217-221.
- [17] 欧阳昱晖, 张德山, 赵丽萍, 等. Durham花粉监测与实时自动花粉监测结果相关性分析[J]. 首都医科大学学报, 2012, 33(6): 713-716.
- [18] Tchong D K, Nayak A K, Fowlkes C C, et al. Visual recognition software for binary classification and its application to spruce pollen identification[J]. PloS one, 2016, 11(2): e0148879.
- [19] Xie Y, Xu Z. A Fourier descriptor based on Zernike invariant moments in spherical coordinates for 3D pollen image recognition[C]//2015 8th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. IEEE, 2015: 453-457.
- [20] Rodriguez-Damian M, Cernadas E, Formella A, et al. Automatic detection and classification of grains of pollen based on shape and texture[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, 2006, 36(4): 531-542.
- [21] Oteros J, Pusch G, Weichenmeier I, et al. Automatic and online pollen monitoring[J]. International Archives of Allergy and Immunology, 2015, 167(3): 158-166.
- [22] 王励银. 基于多级分类器的植物花粉图像识别[D]. 南京: 南京理工大学, 2000.
- [23] 赵贤国. 基于几何特征的花粉图像识别算法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [24] Travieso C M, Briceño J C, Ticay-Rivas J R, et al. Pollen classification based on contour features[C]//15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, Poprad, Slovakia, 2011.
- [25] Xie Y H, Xu Z F, Burkhardt H. Spatial geometric constraints histogram descriptors based on curvature mesh graph for 3D pollen particles recognition[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(6): 060701.
- [26] 朱延刚. 基于多特征融合的花粉图像识别算法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [27] Daood A, Ribeiro E, Bush M. Pollen grain recognition using deep learning[C]//International Symposium on Visual Computing. Cham: Springer International Publishing, 2016: 321-330.
- [28] Kubera E, Kubik-Komar A, Piotrowska-Weryszko K, et al. Deep learning methods for improving pollen monitoring[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3526.
- [29] Olsson O, Karlsson M, Persson A S, et al. Efficient, automated and robust pollen analysis using deep learning[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2021, 12(5): 850-862.
- [30] Gallardo-Caballero R, García-Orellana C J, García-Manso A, et al. Precise pollen grain detection in bright field microscopy using deep learning techniques[J]. Sensors, 2019, 19(16): 3583.
- [31] Oteros J, Pusch G, Weichenmeier I, et al. Automatic and online pollen monitoring[J]. International Archives of Allergy and Immunology, 2015, 167(3): 158-166.
- [32] Oteros J, Sofiev M, Smith M, et al. Building an automatic pollen monitoring network (ePIN): selection of optimal sites by clustering pollen stations[J]. Science of the Total Environment, 2019, 688: 1263-1274.
- [33] Crouzy B, Stella M, Konzelmann T, et al. All-optical automatic pollen identification: towards an operational system[J]. Atmospheric Environment, 2016, 140: 202-212.
- [34] Kawashima S, Clot B, Fujita T, et al. An algorithm and a device for counting airborne pollen automatically using laser optics[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(36): 7987-7993.
- [35] Miki K, Fujita T, Sahashi N. Development and application of a method to classify airborne pollen taxa concentration using light scattering data[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 22371.
- [36] Levetin E, Van de Water P K. Pollen count forecasting[J]. Immunology and Allergy Clinics, 2003, 23(3): 423-442.
- [37] Lee H R, Kim K R, Choi Y J, et al. Meteorological Impact on Daily Concentration of Pollens in Korea[J]. Korean Journal of Agricultural & Forest Meteorology, 2012, 14(3): 99-107.
- [38] Kim J H, Oh J W, Lee H B, et al. Evaluation of the association of

- vegetation of allergenic plants and pollinosis with meteorological changes[J]. *Allergy, Asthma and Respiratory Disease*, 2014, 2(1): 48-58.
- [39] Suanno C, Aloisi I, Fernández-González D, et al. Pollen forecasting and its relevance in pollen allergen avoidance[J]. *Environmental Research*, 2021, 200: 111150.
- [40] Maya-Manzano J M, Smith M, Markey E, et al. Recent developments in monitoring and modelling airborne pollen, a review[J]. *Grana*, 2021, 60(1): 1-19.
- [41] Vélez-Pereira A M, De Linares C, Belmonte J. Aerobiological modeling I: a review of predictive models[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148783.
- [42] Ranzi A, Lauriola P, Marletto V, et al. Forecasting airborne pollen concentrations: development of local models[J]. *Aerobiologia*, 2003, 19(1): 39-45.
- [43] Šikoparija B, Marko O, Panić M, et al. How to prepare a pollen calendar for forecasting daily pollen concentrations of *Ambrosia*, *Betula* and *Poaceae*?[J]. *Aerobiologia*, 2018, 34(3): 203-217.
- [44] Kubik-Komar A, Piotrowska-Weryszko K, Weryszko-Chmielewska E, et al. Analysis of *Fraxinus* pollen seasons and forecast models based on meteorological factors[J]. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 2018, 25(2): 285-291.
- [45] García-Mozo H, Yaezel L, Oteros J, et al. Statistical approach to the analysis of olive long-term pollen season trends in southern Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 473: 103-109.
- [46] Stach A, Smith M, Baena J C P, et al. Long-term and short-term forecast models for *Poaceae* (grass) pollen in Poznań, Poland, constructed using regression analysis[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3): 323-332.
- [47] Escabias M, Valderrama M J, Aguilera A M, et al. Stepwise selection of functional covariates in forecasting peak levels of olive pollen[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27: 367-376.
- [48] Silva-Palacios I, Fernández-Rodríguez S, Durán-Barroso P, et al. Temporal modelling and forecasting of the airborne pollen of *Cupressaceae* on the southwestern Iberian Peninsula[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60: 297-306.
- [49] Breiman L. Random forests[J]. *Machine learning*, 2001, 45: 5-32.
- [50] Sánchez-Mesa J A, Galán C, Martínez-Heras J A, et al. The use of a neural network to forecast daily grass pollen concentration in a Mediterranean region: the southern part of the Iberian Peninsula[J]. *Clinical & Experimental Allergy*, 2002, 32(11): 1606-1612.
- [51] Rodríguez-Rajo F J, Astray G, Ferreiro-Lage J A, et al. Evaluation of atmospheric *Poaceae* pollen concentration using a neural network applied to a coastal Atlantic climate region[J]. *Neural Networks*, 2010, 23(3): 419-425.
- [52] Sánchez J M B, Lugilde D N, de Linares Fernández C, et al. Forecasting airborne pollen concentration time series with neural and neuro-fuzzy models[J]. *Expert Systems with Applications*, 2007, 32(4): 1218-1225.
- [53] Navares R, Aznarte J L. Forecasting *Plantago* pollen: improving feature selection through random forests, clustering, and Friedman tests[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 139(8): 163-174.
- [54] Lops Y, Choi Y, Eslami E, et al. Real-time 7-day forecast of pollen counts using a deep convolutional neural network[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32: 11827-11836.
- [55] Zewdie G K, Lary D J, Levetin E, et al. Applying deep neural networks and ensemble machine learning methods to forecast airborne *Ambrosia* pollen[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(11): 1-14.
- [56] Helbig N, Vogel B, Vogel H, et al. Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale[J]. *Aerobiologia*, 2004, 20(1): 3-19.
- [57] Chamecki M, Meneveau C, Parlange M B. Large eddy simulation of pollen transport in the atmospheric boundary layer[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2009, 40(3): 241-255.
- [58] Sofiev M, Siljamo P, Ranta H, et al. Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 50: 392-402.
- [59] Sofiev M, Vira J, Kouznetsov R, et al. Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(11): 3497-3522.
- [60] Young D L, Wang Y F, Eldho T I. Solution of the advection-diffusion equation using the Eulerian-Lagrangian boundary element method[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2000, 24(6): 449-457.
- [61] Zhang Z, Chen Q. Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(25): 5236-5248.
- [62] Burki C, Šikoparija B, Thibaudon M, et al. Artificial neural networks can be used for *Ambrosia* pollen emission parameterization in COSMO-ART[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 218: 116969.
- [63] Robichaud A, Comtois P. Numerical modelling of birch pollen dispersion in Canada[J]. *Environmental Research*, 2021, 194: 110554.
- [64] Verstraeten W W, Kouznetsov R, Hoebeke L, et al. Modelling grass pollen levels in Belgium[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 753: 141903.
- [65] Zink K, Pauling A, Rotach M W, et al. EMPOL 1.0: a new parameterization of pollen emission in numerical weather prediction models[J]. *Geoscientific Model Development*, 2013, 6(6): 1961-1975.
- [66] Werner M, Guzikowski J, Kryza M, et al. Extension of WRF-Chem for birch pollen modelling – a case study for Poland[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2021, 65(4): 513-526.
- [67] Pauling A, Clot B, Menzel A, et al. Pollen forecasts in complex topography: two case studies from the Alps using the numerical pollen forecast model COSMO-ART[J]. *Aerobiologia*, 2020, 36(5): 25-30.
- [68] 吴振玲, 宛公展, 白玉荣, 等. 天津气传花粉预测模型研究[J]. *气象科技*, 2007, 35(6): 832-836.
- [69] 张德山, 海玉龙, 冯涛, 等. 北京地区1~4天花粉浓度预报的应用研究[J]. *气象*, 2010, 36(5): 128-132.
- [70] 张姝丽, 张德山, 何海娟, 等. 北京城区8月日花粉总数量和致敏花粉数量短期预报[J]. *气象科技*, 2006, 34(6): 724-727.
- [71] 赵文芳, 王京丽, 尚敏, 等. 基于粒子群优化和支持向量机的花粉浓度预测模型[J]. *计算机应用*, 2019, 39(1): 98-104.

(编辑: 郑秋红)

2023年中国龙卷活动及灾情特征

张晶晶¹ 黄先香¹ 蔡康龙¹ 植江玲¹ 黄舒婷¹ 徐纵横²

(1 佛山市龙卷风研究中心 中国气象局龙卷风重点开放实验室, 佛山 528000; 2 上海市文来实验学校, 上海 201107)

摘要: 通过风灾调查和网络信息研判, 分析了2023年中国龙卷时空分布特征。2023年中国共出现56个陆龙卷及20个水龙卷, 可确认灾情强度等级的龙卷有28个, 其中EF2级及以上强龙卷有8个。陆龙卷多发于东北地区、江淮平原及华北平原, 发生时段为3—9月, 主要影响系统是东北冷涡、江淮气旋和热带气旋。江苏省龙卷发生频次最多, 共遭受12个龙卷袭击, 其中EF2级及以上强龙卷6个, 造成14人死亡。水龙卷多发于沿海地区, 发生时段为3—10月。2023年, 台风龙卷数量相对较少, 但受东北冷涡及江淮气旋影响, 多次发生龙卷群发事件。

关键词: 中国龙卷, 2023年, 风灾调查, 龙卷群发

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.003

Tornado Activities and Disaster Characteristics in China in 2023

Zhang Jingjing¹, Huang Xianxiang¹, Cai Kanglong¹, Zhi Jiangling¹, Huang Shuting¹, Xu Zhongheng²

(1 Foshan Tornado Research Center and China Meteorological Administration Tornado Key Laboratory, Foshan 528000; 2 Shanghai Wenlai Experimental School, Shanghai 201107)

Abstract: Through the investigation of wind disasters and the analysis of online information, the spatial and temporal distribution characteristics of tornadoes in China in 2023 are analyzed. The conclusions are as follows. In 2023, a total of 56 land tornadoes and 20 waterspouts occurred in China. There were 28 tornadoes of confirmed intensity levels, 8 of which were of EF2 intensity or higher. Land tornadoes occurred more frequently in the northeast region, the Yangtze-Huaihe plain, and the North China Plain, spanning from March to September. The main influencing systems were the northeast cold vortex, the Jianghuai cyclone, and tropical cyclones. Jiangsu Province experienced the highest frequency of tornadoes. A total of 12 tornadoes hit Jiangsu in 2023, including 6 tornadoes of EF2 intensity or higher, and resulting in 14 deaths. Waterspouts were more frequently seen in coastal areas, occurring from March to October. In 2023, the number of typhoon-triggered tornadoes was relatively low, but due to the northeast cold vortex and the Jianghuai cyclone, multiple clusters of tornadoes occurred.

Keywords: tornado in China, 2023, investigation of wind disaster, cluster of tornado

0 引言

龙卷是大气中最猛烈、最具有破坏性的天气现象。2019年开原龙卷、2021年江苏及武汉龙卷等(EF3级及以上强龙卷)均导致了严重人员伤亡和重大经济损失^[1]。龙卷尺度小, 持续时间短, 监测及灾情确认难度大。近年来, 通过日益成熟的现场灾情调查技术及发展迅猛的网络信息, 中国龙卷的时空分布情况及灾情特征得以更加全面地认识^[2-8]。本文收集并梳理了2023年中国龙卷信息(包括灾情调查数据及网络媒

体信息), 分析2023年中国龙卷活动情况及灾害特征, 为健全中国龙卷数据库提供参考。

1 2023年中国龙卷概述

2023年可确认灾情等级的龙卷共有28个, 其中EF3级(强龙卷)龙卷2个, EF2级(强龙卷)龙卷6个, EF1级(中等强度龙卷)龙卷15个, EF0级(弱龙卷)龙卷5个。佛山市龙卷风研究中心(以下简称龙卷研究中心)与龙卷发生地的气象部门合作, 对其中25次龙卷过程开展了灾情调查。灾情调查工作通过对灾害现场开展无人机航拍、实地测量、走访龙卷目击者等手段获取灾情信息, 并利用气象监测数据分析综合研判龙卷灾害情况^[9]。最终经多方会商确认龙卷具体发生时间、灾害路径以及灾情等级等。强龙卷的目击者、互联网信息及媒体报道众多, 利于及时开展灾情调查^[10]。因此该项工作基本涵盖了对2023年EF2及

收稿日期: 2024年1月15日; 修回日期: 2024年1月19日
第一作者: 张晶晶(1990—), Email: zhangjjg@foxmail.com
通信作者: 黄先香(1974—), Email: fsqxj@163.com
资助信息: 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2021Q18);
广东省佛山市气象局科技项目(201905); 广东省佛山市气象局科技项目(202207)

以上强度龙卷的实地灾情调查。本文灾情调查定级采用国际通用的增强藤田标准（简称EF等级）来判定龙卷级别^[11-12]，并结合中国国家标准《龙卷风强度等级》（GB/T 40243-2021）对龙卷强度进行定级^[13]。此外，通过与气象爱好者合作，龙卷研究中心同时对社交媒体（包括但不限于抖音、快手、微博、微信等媒体平台）上的龙卷信息（包括相关影像信息或官方资

料）开展收集与甄别研判^[8]，收集陆龙卷信息28个（多为弱龙卷），水龙卷信息20个。综合灾情调查及网络信息，确认2023年共出现陆龙卷56个，水龙卷20个。龙卷综合信息见表1。与以往中国龙卷年度综述^[4-8]一致，本文将对陆面造成破坏的陆龙卷进行研究，包括部分时段出现在水面上后移入陆地并对陆面造成破坏的龙卷。

表1 2023年中国可确认龙卷(陆龙卷)信息表
Table 1 Confirmed tornadoes (waterspout excluded) in China, 2023

编号	日期	时间/BT	地点	强度等级		环流型	伤亡	信息来源
				增强藤田标准	国家标准			
1	3月7日	不详	青海海南	/	/	短波槽	/	自媒体
2	4月15日	14: 00前后	山东德州	EF1	中	高空槽	/	官方信息
3	4月15日	15: 40	山东临沂	EF2	强	高空槽	/	灾情调查
4	5月12日	18: 00前后	天津	/	/	高空槽	/	自媒体
5	5月14日	15: 00前后	河北承德	/	/	高空槽	/	自媒体
6	5月14日	15: 00前后	河北承德	/	/	高空槽	/	自媒体
7	5月25日	14: 00前后	内蒙古呼伦贝尔	/	/	高空槽	/	自媒体
8	6月1日	13: 20—13: 50	辽宁阜新	EF1	中	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
9	6月1日	13: 40	辽宁沈阳	EF0	弱	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
10	6月1日	13: 40	辽宁沈阳	EF0	弱	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
11	6月1日	13: 55—14: 25	辽宁铁岭	EF2	强	东北冷涡	13人受伤	灾情调查
12	6月1日	14: 14	辽宁沈阳	EF0	弱	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
13	6月5日	09: 40	黑龙江牡丹江	/	/	东北冷涡	/	自媒体
14	6月7日	12: 00前后	黑龙江黑河	EF1	中	东北冷涡	/	官方信息
15	6月8日	18: 00前后	内蒙古呼伦贝尔	/	/	东北冷涡	/	自媒体
16	6月10日	16: 00前后	黑龙江黑河	/	/	东北冷涡	/	自媒体
17	6月10日	16: 22	江苏南通	EF2	强	东北冷涡	2人死亡	灾情调查
18	6月12日	13: 00	青海海东	/	/	高空槽	/	自媒体
19	6月17日	17: 00	吉林长春	/	/	东北冷涡	/	自媒体
20	6月20日	下午	黑龙江哈尔滨	/	/	东北冷涡	/	自媒体
21	7月1日	10: 45—11: 00	吉林榆树	EF1	中	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
22	7月1日	11: 05	吉林榆树	EF0	弱	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
23	7月1日	11: 31—11: 40	吉林榆树	EF2	强	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
24	7月1日	11: 34	吉林榆树	EF1	中	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
25	7月1日	11: 47—11: 53	吉林榆树	EF1	中	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
26	7月1日	12: 30—12: 40	黑龙江哈尔滨	EF1	中	东北冷涡	无伤亡	灾情调查
27	7月6日	15: 00前后	黑龙江哈尔滨	/	/	东北冷涡	/	自媒体
28	7月7日	白天	青海玉树	/	/	高空槽	/	自媒体
29	7月7日	15: 00前后	辽宁朝阳	/	/	东北冷涡	/	自媒体
30	7月17日	早晨	海南儋州	/	/	台风“泰利”	/	自媒体
31	7月19日	13: 00前后	海南乐东	/	/	西南低涡	/	自媒体
32	7月25日	17: 30	内蒙古鄂尔多斯	/	/	高空槽	/	自媒体
33	7月26日	15: 00前后	天津	/	/	高空槽	/	自媒体
34	7月27日	下午	内蒙古巴彦淖尔	/	/	高空槽	/	自媒体
35	7月29日	11: 40—11: 50	河南濮阳	EF1	中	台风“杜苏芮”	无伤亡	灾情调查
36	7月29日	12: 00前后	河南濮阳	/	/	台风“杜苏芮”	无伤亡	自媒体

(续表1)

编号	日期	时间/BT	地点	强度等级		环流型	伤亡	信息来源
				增强藤田标准	国家标准			
37	7月29日	12: 20	河北邯郸	/	/	台风“杜苏芮”	/	自媒体
38	7月29日	14: 00前后	黑龙江绥化	/	/	东北冷涡	/	自媒体
39	7月30日	15: 00前后	吉林大安	/	/	东北冷涡	/	自媒体
40	8月6日	15: 00前后	四川成都	/	/	西南低涡	/	自媒体
41	8月7日	15: 30前后	内蒙古乌兰察布	/	/	高空槽	/	自媒体
42	8月13日	15: 15—15: 18	江苏盐城	EF1	中	江淮气旋	2人死亡15人受伤	灾情调查
43	8月13日	15: 50	江苏盐城	EF2	强	江淮气旋		灾情调查
44	8月17日	15: 41—15: 43	广东潮州	EF1	中	副高边缘	无伤亡	灾情调查
45	8月24日	中午	辽宁朝阳	/	/	东北冷涡	/	自媒体
46	9月3日	下午	台湾台东	/	/	台风“海葵”	/	自媒体
47	9月15日	下午	内蒙古鄂托克	/	/	高空槽	/	自媒体
48	9月19日	15: 40	江苏连云港	EF1	中	江淮气旋	/	官方信息
49	9月19日	16: 35—16: 41	安徽宿州、江苏徐州	EF1	中	江淮气旋	/	灾情调查
50	9月19日	17: 20	江苏宿迁	EF3	强	江淮气旋	5人死亡, 4人受伤	灾情调查
51	9月19日	17: 34—17: 50	江苏宿迁	EF2	强	江淮气旋	/	灾情调查
52	9月19日	18: 04	江苏盐城	EF0	弱	江淮气旋	/	灾情调查
53	9月19日	18: 50	江苏宿迁	EF1	中	江淮气旋	/	灾情调查
54	9月19日	20: 04	江苏淮安、盐城	EF3	强	江淮气旋	5人死亡, 4人受伤	灾情调查
55	9月19日	20: 35	江苏盐城	EF1	中	江淮气旋	/	灾情调查
56	9月19日	21: 31	江苏盐城	EF1	中	江淮气旋	/	灾情调查

注: 表中伤亡人数以截稿时媒体信息为准。

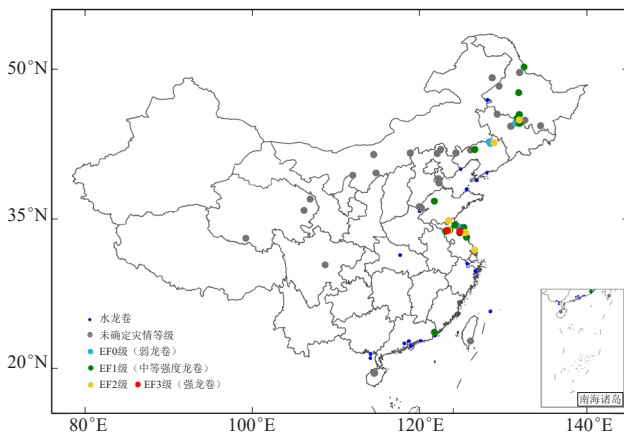


图1 2023年中国龙卷空间分布情况

Fig. 1 Spatial distribution of tornadoes in China, 2023

图1给出了2023年中国龙卷的空间分布特征。2023年全国共有15个省级行政区遭受龙卷灾害, 主要分布在东北地区、江淮平原及华北平原。内蒙古中部、西北及华南地区亦有少量龙卷发生。出现龙卷次数最多的省级行政区为江苏, 6—9月共出现12个龙卷, 其中EF2级及以上强龙卷占50%, 造成14人死亡。2023年, 在东北冷涡的影响下东北地区龙卷频发, 吉林、辽宁、黑龙江各发生7个龙卷。华南地区2023年

龙卷数量相较往年明显偏少, 仅出现3个, 其中广东1个, 海南2个(图2a)。

2023年中国3—9月共7个月受到龙卷影响(图2b)。龙卷高发时段集中在6—9月, 其中龙卷数量最多的月份是7月, 出现了19个龙卷, 其次是6月, 有13个。9月江苏及安徽出现龙卷群发事件, 共产生9个龙卷, 造成9月龙卷数量相对偏多, 有11个。2023年龙卷群发事件明显偏多, 如受东北冷涡后部短波槽影响, 6月1日辽宁出现龙卷群发事件, 共出现5个龙卷过程; 6月5—8日, 内蒙古东部及黑龙江陆续受到4次龙卷袭击; 7月1日吉林及黑龙江再次出现东北冷涡影响的龙卷群发事件, 共发生6个龙卷; 9月19日, 江淮气旋影响江苏及安徽等地, 带来大范围强对流天气及9个龙卷过程(包含2个EF3级和1个EF2级强龙卷)。

从龙卷风灾强度看, 2023年中国EF2级及以上强龙卷有8个, 相较2004—2022年记录到的EF2级及以上级别龙卷数量年平均值(4.2个)偏高, 共造成14人死亡。其中EF3级龙卷2个, 分别出现在江苏宿迁及江苏淮安; EF2级龙卷6个, 出现在山东临沂、辽宁铁岭、吉林榆树、江苏南通、盐城及宿迁。

此外, 2023年共收集到20个可确认的水龙卷信

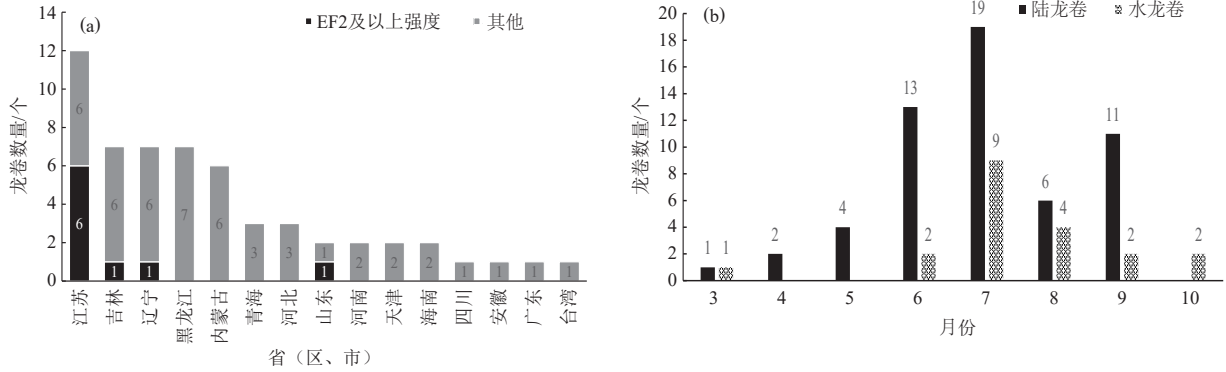


图2 2023年中国各行政区域陆龙卷分布(a)及中国水龙卷及陆龙卷逐月分布(b)

Fig. 2 Tornado distribution in administrative regions (a) and monthly distribution of waterspouts and tornadoes (b) in China, 2023

息, 主要出现在中国东部及南部沿海地区, 其中广东7个, 广西3个, 辽宁3个, 分布呈南多北少。水龙卷出现时间为3—10月, 主要集中在7—8月(13个, 占比65%)。

2 2023年中国龙卷逐月情况

2.1 3月龙卷

3月可确认龙卷过程1个。受短波槽东移影响, 3月7日青海省海南藏族自治州发生龙卷灾害, 属西风带龙卷。2013—2022年, 中国年内首个龙卷90%出现在3月下旬之后, 且仅2017年及2022年3月有龙卷出现^[8]。因此该龙卷为国内近十年间, 年内首个龙卷出现时间最早的龙卷。龙卷信息由自媒体渠道收集, 由于缺乏探测数据及灾情调查, 无法确定强度等级。另外, 3月12日14:00(北京时, 下同)许, 台湾省东海钓鱼岛附近发生水龙卷。

2.2 4月龙卷

4月, 通过灾情调查收集到龙卷灾情信息2个, 同为高空槽过境造成, 均发生在山东。

根据山东省德州市气象台灾情调查报告: 4月15日13:45—14:20山东省德州市齐河县发生龙卷, 龙卷自西向东移动, 持续时间为35 min, 长度为6.1 km, 呈现间歇性接地特征。受灾区域出现水泥电线杆被吹倒, 杨树折断, 房屋及厂房屋顶受损等情况。多个地点指示物受灾情况达到增强藤田标准EF1级的破坏程度, 相当于国家标准中等强度龙卷。

同日, 山东省临沂市郯城县受到龙卷袭击, 龙卷研究中心联合当地气象部门对此次龙卷开展了现场灾情调查, 确认龙卷发生时间为15:31—15:48持续时间为17 min。龙卷自后宅村随雷暴母体自西南向东北移动, 先后影响东风岭村, 东、西王瞳村等村居地, 直至曹庄镇消散, 灾害路径长度为11 km, 最大影响宽度为480 m。龙卷研究中心以受灾区域通信基站铁塔

顶层断落, 水泥钢筋电线杆折断作为标准, 判定该龙卷强度达到EF2级, 即国家标准强龙卷(图3)。根据临沂S波段雷达观测结果, 龙卷发生期间有钩状回波特征, 15:28起0.5°仰角速度图上出现中气旋及TVS特征, 速度差为20 m/s, 15:32达到最强, 速度差为70 m/s, 15:52中气旋及TVS特征消散。

2.3 5月龙卷

5月, 通过媒体信息收集及气象部门认定, 确认龙卷4个, 主要出现在华北及东北地区(河北2个, 天津1个, 内蒙古1个)。

通过社交媒体信息收集确认: 5月12日18:00天津滨海新区窦庄子村发生弱龙卷, 5月25日14:00内蒙古呼伦贝尔汉古尔河镇额尔根浅村发生龙卷。

据当地气象部门信息: 5月14日15:00前后河北承德围场新合村、郭家屯发生弱龙卷, 为两个独立的龙卷过程。新合村房屋及电力网路设施受损, 树木折断, 牛舍受灾; 郭家屯龙卷导致加油站广告牌及加油机损坏, 房屋及电线杆受损; 承德雷达UAM产品出现报警。

2.4 6月龙卷

6月, 东北冷涡活动频繁, 辽宁及黑龙江出现龙卷群发。通过媒体信息收集及灾情调查认定陆龙卷13个, 大部分龙卷出现在东北地区, 其中辽宁5个, 黑龙江4个, 内蒙古、吉林、青海及江苏各1个。

6月1日, 受东北冷涡后部短波槽活动影响, 辽宁多地出现龙卷, 龙卷研究中心会同中国气象局气象探测中心雷达应用室和阜新市气象局共同开展现场调查, 确认5个龙卷过程, 其中EF0级3个, EF1级1个, EF2级1个。13:20—13:50, 辽宁省阜新市市区遭受龙卷袭击, 龙卷由西南向东北移动, 后转西北方向, 沿途导致水泥电线杆及铁制路灯杆折断, 并引起树木倒伏, 高层建筑墙面损坏等灾情(图4a), 达到EF1级龙

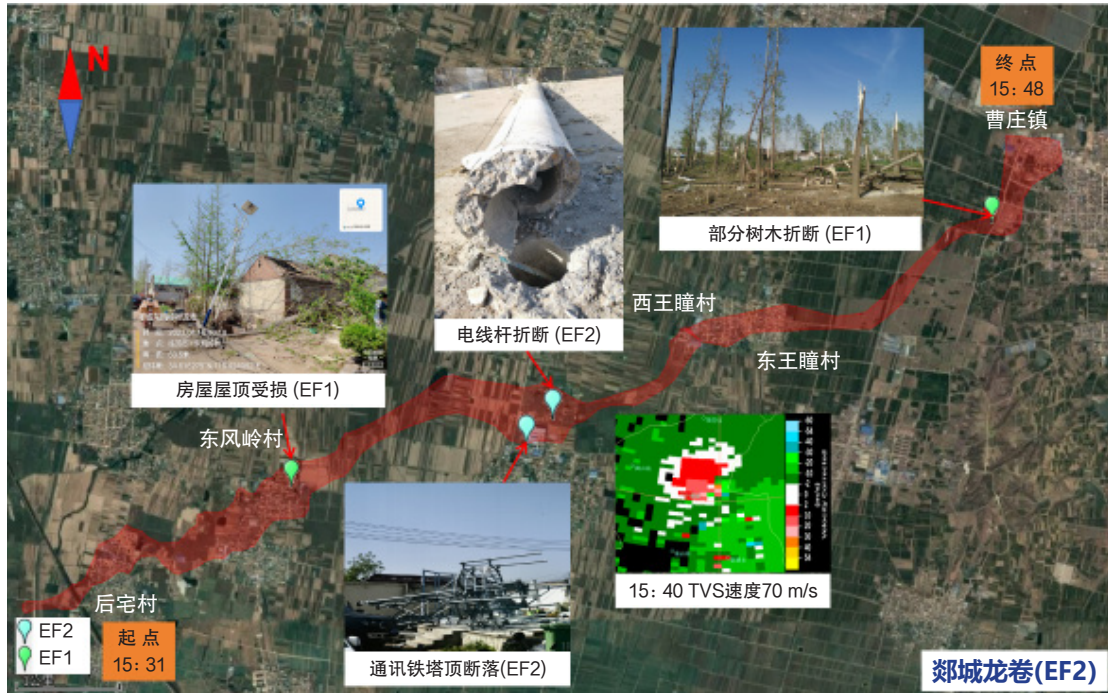


图3 2023年4月15日山东省郯城县龙卷灾害路径及灾害情况 (红色填色为受灾区域)

Fig. 3 The disaster path and damage of the tornado occurred in Tancheng , Shandong Province on April 15, 2023 (the red filling: the affected area)



图4 2023年6月1日辽宁多地龙卷灾害路径及灾害情况 (红色虚线为龙卷灾害路径)

Fig. 4 The disaster path and damage of tornadoes in Liaoning Province on June 1, 2023 (the dash lines in red: the disaster paths)

卷强度，属国家标准中等强度龙卷，持续时间10 min，长度3.0 km。13: 40，辽宁省沈阳市法库县遭受龙卷袭击，目击者拍摄视频画面显示，龙卷发生时同时存

在2个漏斗状涡旋，这一特征对龙卷数量的判断造成了干扰。经龙卷中心实地勘察判定龙卷灾害路径，并与北京大学孟智勇教授等专家讨论研判，确定法库县

发生2个龙卷，北侧的龙卷自南向北发展后路径发生偏折，转向东南行，长度为0.8 km，南侧的龙卷自西向东移动，灾害路径长度为0.6 km（图4b）。两个龙卷导致树枝折断，围墙和房顶轻度受损等灾情，均判定为EF0级强度，属国家标准弱龙卷。13:55—14:25，辽宁省开原市（县级市）发生EF2级龙卷（属于国家标准强龙卷），龙卷自北山村向东北方向移动，影响田家窝棚村及池家窝棚村，导致大量树木折断，房屋围墙倒塌，灾害路径长度为11 km（图4c），李家水库监

控拍摄到龙卷经过水面后再次袭击陆地的画面，通过灾情前卫星拍摄的田家窝棚村画面及灾后照片对比（图5），可以看到龙卷导致该区域房屋大量受损，大量房屋屋顶被掀起，部分建筑物倒塌（经实地调研确认为泥砖砌墙房子和简易结构养殖场倒塌）。14:14，沈阳市康平县发生EF0级龙卷（属于国家标准弱龙卷），龙卷主要经过农田，在植被上留下白色亮带，灾害路径长度为1 km（图4d），因灾情指示物较少，周围无明显其他风灾破坏痕迹，初定为EF0级别。



图5 田家窝棚村受灾前卫星影像 (a) 及受灾后航拍影像 (b)

Fig. 5 Satellite images before the tornado damage (a) and aerial image after the tornado damage (b) of Tianjiawopeng Village

6月5—8日，受东北冷涡活动影响，黑龙江接连出现3个龙卷。5日09:40，牡丹江市东宁市出现龙卷，据当地气象部门报告，该龙卷由水龙卷上岸演变为陆龙卷。7日11:49—12:01，黑河市爱辉区出现龙卷，经当地气象部门现场调研确认该龙卷强度达EF1级，属中等强度龙卷，龙卷未造成人员伤亡，但房屋受损严重。8日16:00前后，爱辉区再次出现龙卷过程，导致篮球架倒塌，部分车辆受损。

6月10日16:22，江苏省南通市启东市王鲍镇出现1个龙卷，经现场灾情调查研判，该龙卷灾害路径长为6.4 km，最大影响宽度300 m，造成少量房顶完全倾覆，部分房屋外墙倒塌及树林辐合状倒伏（图6），其强度达EF2级，造成2人死亡，这是2023年首个造成居民死亡的龙卷。

2.5 7月龙卷

7月，通过媒体信息收集及灾情调查认定陆龙卷19个，其中吉林6个，河南3个，黑龙江2个，内蒙古2个，海南2个，辽宁、青海、河北及天津各1个。7月，中国东北部地区依然是龙卷高发区域。

7月1日，东北冷涡活跃，低层切变线过境时吉林及黑龙江境内出现小规模龙卷爆发，吉林省榆树



图6 2023年6月10日江苏省启东市龙卷灾害路径及受灾情况（红色虚线为龙卷灾害路径）

Fig. 6 The disaster path and damage of the tornado occurred in Qidong, Jiangsu Province on June 10, 2023 (the dash line in red: the disaster path)

市和黑龙江省哈尔滨市两地共发生6个龙卷，龙卷研究中心通过现场调查，确认EF0级龙卷1个，EF1级4

个, EF2级1个。10:45—11:00榆树市大岭镇民主村发生EF1级中等强度龙卷, 灾害路径长为7 km, 龙卷造成部分一层民居屋顶被掀翻, 并在农田上留下不连续亮带。11:31—11:40榆树市于家镇中合村发生EF2级强龙卷, 灾害路径长为6.1 km, 大量民居屋顶被掀翻, 部分农田受损(图7a)。11:34榆树市于家镇前齐乡出现民居玻璃窗破碎, 部分屋顶瓦片掀起, 树木折断, 农田出现不连续的破坏痕迹等龙卷灾情(图7b), 经现场调查确认为EF1级中等强度龙卷, 灾害路径长

度为5.1 km。11:05榆树市大坡镇发生EF0级弱龙卷, 龙卷对农田造成破坏并留下明显条迹, 长度为4 km。11:47—11:53榆树市土桥镇平安屯发生EF1级中等强度龙卷, 灾害路径长为3.6 km, 金属厂房屋顶板材出现变形, 移动板房遭到损毁, 民居屋顶破坏, 农田上龙卷破坏留下的亮带条迹清晰可见, 植被呈人字形倒伏(图7c), 均属明显的龙卷风灾破坏特征。12:30黑龙江省哈尔滨市阿城区遭受龙卷袭击, 出现铁皮屋顶及茅草屋顶被掀起, 门窗破损等灾情(图7d), 经判定

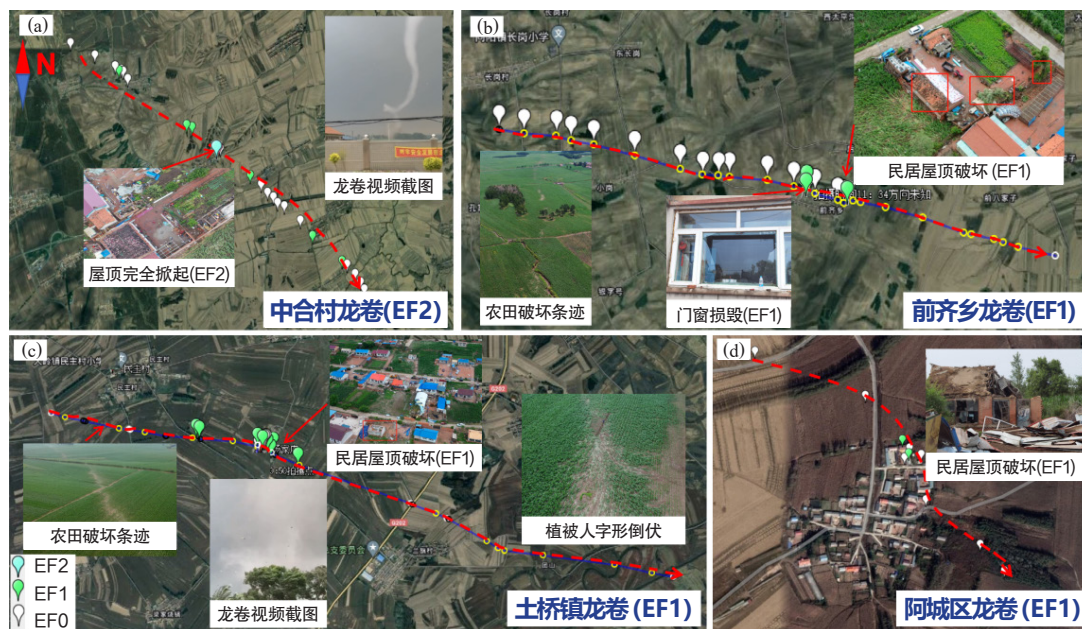


图7 2023年7月1日吉林和黑龙江多地龙卷灾害路径及灾害情况(红色虚线为龙卷灾害路径)

Fig. 7 The disaster paths and damages of tornadoes in Jilin and Heilongjiang Provinces (the dash lines in red: the disaster paths)

为EF1级中等强度龙卷, 灾害路径长度为0.8 km。

7月29日14:22—14:24, 黑龙江省绥化市遭受龙卷袭击, 龙卷研究中心通过现场调查, 确认为EF1级中等强度龙卷。龙卷自西南向东北移动, 灾害路径长为1.8 km, 造成铁皮屋顶掀起, 厂房屋顶倾覆变形, 农作物倒伏等灾情。

2.6 8月龙卷

8月, 通过媒体信息收集及灾情调查认定龙卷6个, 其中江苏盐城2个, 四川、内蒙古、辽宁、广东各1个。

8月13日, 江苏省盐城市大丰区出现2个龙卷过程(图8)。15:18大丰区吉兴村出现非框架性屋顶严重受损, 门窗玻璃受损, 树木折断等灾情, 经判定龙卷强度为EF1级, 即国家标准中等强度龙卷, 灾害路径长度为2.1 km。15:55大丰区龙港村出现水泥电线杆被折断, 砖混结构单层住宅屋顶倾覆, 外墙坍塌等灾

情, 属EF2级强度, 即国家标准强龙卷, 灾害路径为7.8 km, 造成2人死亡15人受伤。

8月17日, 粤东地区午后对流发展旺盛, 潮州市湘桥区铁浦镇16:45出现龙卷, 造成树木折断, 铁皮厂房屋顶及骨架受损等灾情, 未造成人员伤亡。经龙卷研究中心现场灾情调查发现灾害点金属结构工业建筑屋顶板材变形, 部分桁架弯曲(图9), 确认强度为EF1级, 属中等强度龙卷。这是2023年广东省内唯一出现的陆龙卷。龙卷长度900 m, 持续时间1~2 min。当日潜势预报产品显示, 午后粤东沿海龙卷指数逐渐增大, 但龙卷发生地附近龙卷指数小, 预报位置存在偏差。汕头S波段雷达于15:36—15:48探测到弱中气旋, 仅有15:42一个体扫探测到TVS(20 m/s); 梅州S波段雷达和潮州相控阵雷达由于距离较远, 探测到的TVS旋转速度弱(仅6 m/s左右)。以上雷达均没有发出中气旋或TVS报警产品, 且龙卷风暴特征提前量太

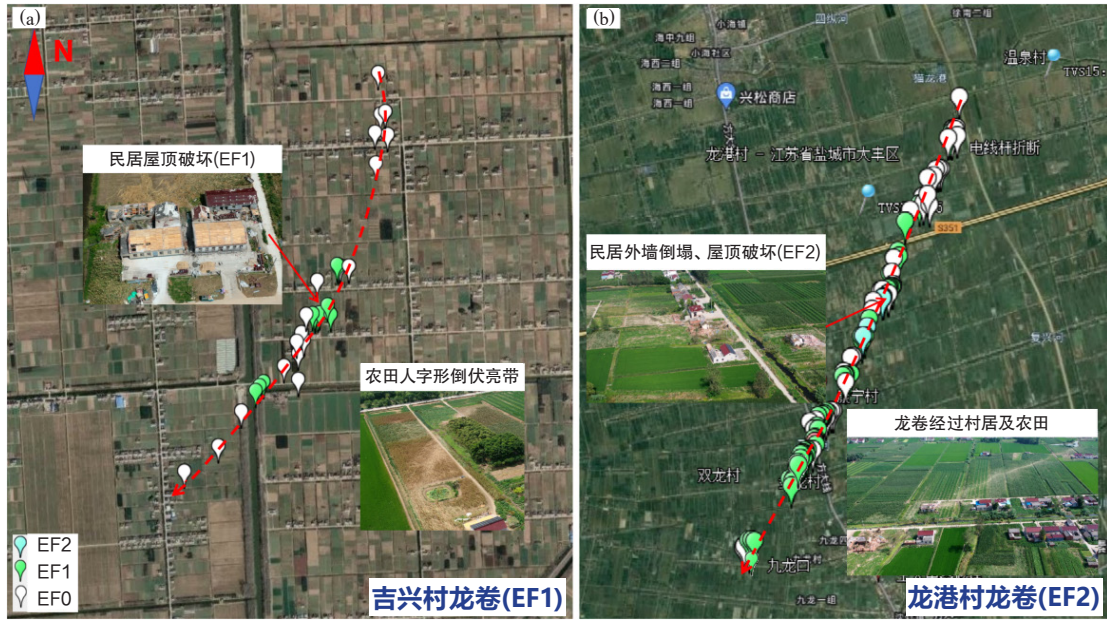


图8 2023年8月13日江苏省盐城市2个龙卷灾害路径及灾害情况 (红色虚线为龙卷灾害路径)
Fig. 8 The disaster paths and damages of two tornadoes in Yancheng, Jiangsu Province on August 13, 2023 (the dash lines in red: the disaster paths)

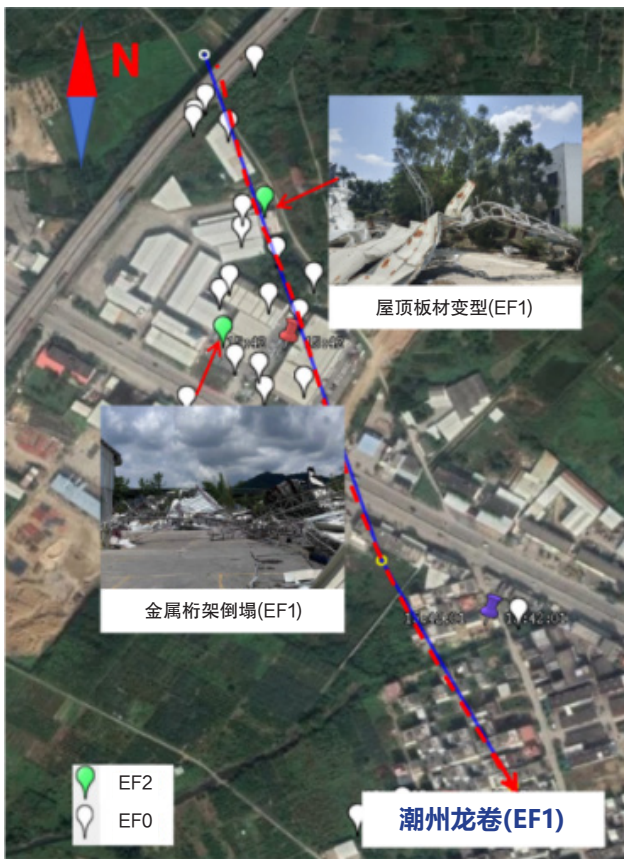


图9 2023年8月17日广东潮州龙卷灾害路径及灾害情况 (红色虚线为龙卷灾害路径)
Fig. 9 The disaster path and damage of the tornado occurred in Chaozhou, Guangdong Province on August 17, 2023 (the dash line in red: the disaster path)

短, 预警难度大。期间, 位于铁铺镇的自动气象观测站在16:00测得最大阵风14.4 m/s (7级)。

2.7 9月龙卷

9月共发生龙卷11个, 其中9月19日江苏龙卷群发占9个, 另外2个分别发生在内蒙古及台湾。

9月19日, 受江淮气旋影响, 江苏、安徽出现大范围强对流天气, 多地遭受龙卷袭击, 共发生9个龙卷, 造成10人死亡, 至少8人受伤。此次龙卷群发事件中, 强龙卷占3个, 分别发生在江苏宿迁宿城区南蔡乡 (EF3级)、江苏淮安涟水县和江苏盐城阜宁县 (EF3级), 以及江苏宿迁宿豫区大兴镇 (EF2级)。此外, 江苏宿迁泗阳县穿城镇 (EF1级)、江苏徐州睢宁县及安徽宿州泗县 (EF1级)、江苏连云港灌云县小伊镇 (EF1级)、江苏盐城建湖县宝塔镇 (EF1级)、江苏盐城滨海县 (EF1级)、江苏盐城响水县建华村 (EF0级) 也遭到了龙卷袭击。

结合雷达、实地灾情调查研判以及政府新闻通告, 首个龙卷出现在15:40, 造成江苏连云港灌云县小伊镇出现房屋顶严重受损, 玻璃窗破损等灾情, 龙卷灾害路径长度为1.4 km, 属EF1级中等强度龙卷。16:35—16:41安徽宿州泗县出现龙卷, 龙卷自西南向东北移动, 进入江苏徐州睢宁县, 灾害路径达8.3 km, 主要经过农田及植被, 留下白色亮带, 并造成树木倒伏等灾情 (图10a), 强度为EF1级, 属中等强度龙卷。17:20龙卷袭击江苏宿迁宿城区南蔡

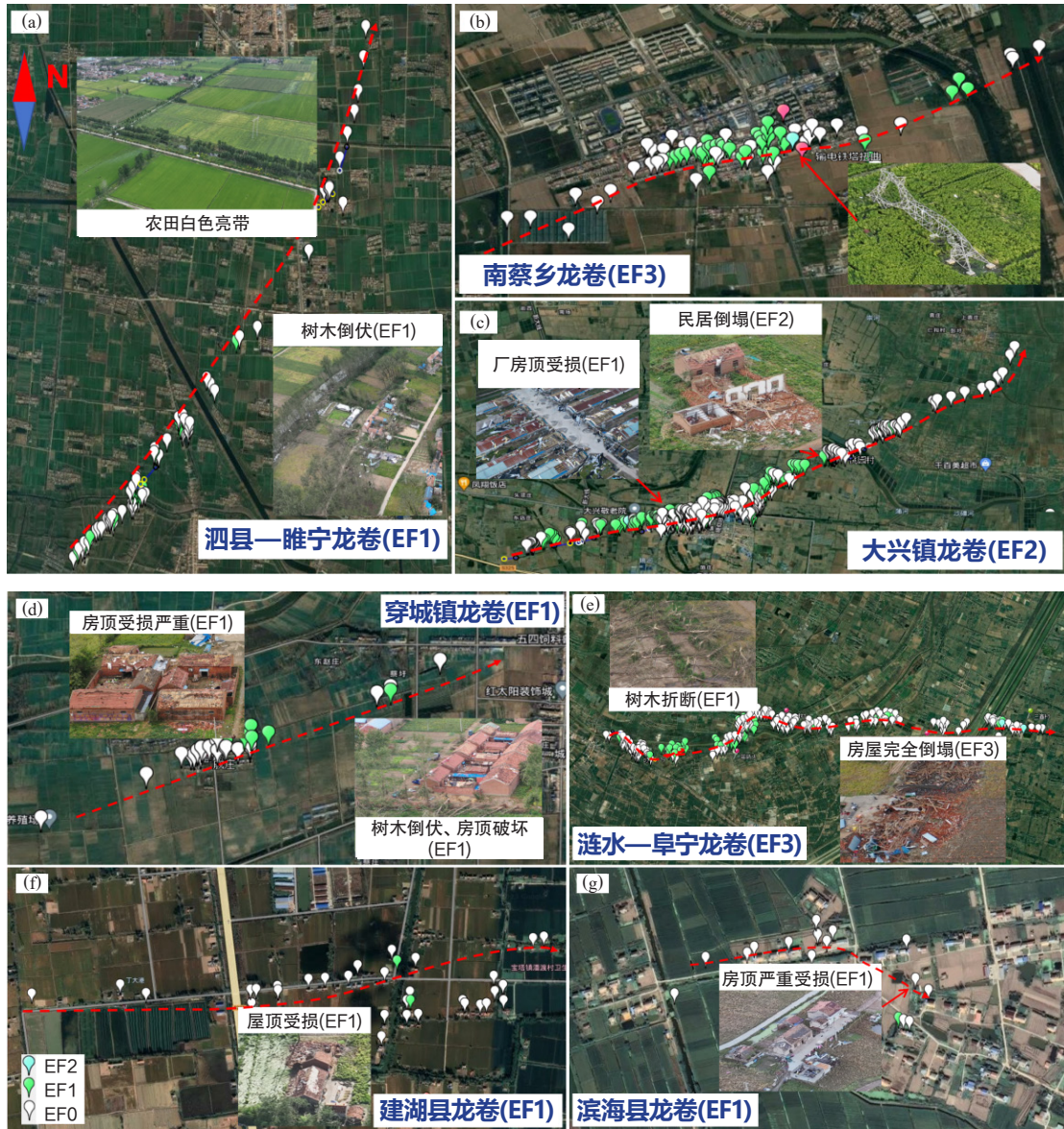


图10 2023年9月19日江苏和安徽多地龙卷群发灾害路径及灾害情况 (红色虚线为龙卷灾害路径)

Fig. 10 The disaster paths and damages of the tornadoes in Jiangsu and Anhui Provinces on September 19, 2023 (the dash lines in red: the disaster paths)

乡, 造成大量房屋倒塌损毁、车辆掀翻、电线杆倒塌等破坏 (图10b), 灾害路径为3 km, 强度达EF3级。17: 34—17: 50宿迁市宿豫区大兴镇遭受龙卷袭击, 龙卷自西南向东北方向移动, 影响灾害路径为14 km, 强度达EF2级, 属强龙卷, 龙卷沿途导致厂房铁皮屋顶大面积受损, 非框架民居 (砖房) 倒塌 (图10c)。据新闻通报, 大兴镇及南蔡乡 龙卷灾情主要发生在乡镇区域, 人员稠密、建筑结构复杂, 龙卷共造成5人死亡, 4人重伤, 受灾人口5512人, 1646户房屋一般受损, 倒塌房屋137户, 农作物受损41.8 hm², 临时转移安置405人, 约2000 m²猪舍部分墙体倒塌、顶部塌陷。18: 04江苏盐城响水县建华村遭受龙卷灾害, 该龙卷

影响范围较小, 造成玉米地倒伏、多处房顶受损等灾情, 结合雷达分析判断为EF0级弱龙卷, 灾害路径为1.1 km。18: 50, 江苏宿迁泗阳县穿城镇出现EF1级龙卷, 龙卷长度为2.1 km, 造成多处民居屋顶严重受损, 树木倒伏 (图10d)。另据新闻报道, 因树木折断还导致了20多根通信杆路, 10余根通信光缆受损等次生灾害。20: 04有强龙卷自西向东袭击江苏淮安涟水县及盐城市阜宁县, 灾害路径达19 km, 造成非框架建筑完全倒塌, 大片树木折断等灾情 (图10e)。龙卷研究中心会同江苏省气象局专家综合研判, 确定龙卷强度达EF3级。据阜宁当地政府通报, 该龙卷造成5人死亡, 4人轻伤, 1364人受灾, 房屋受损614间, 树木

倒伏1800余株，农作物受损199 hm²，转移安置129人。21:31江苏盐城建湖县宝塔镇遭受EF1级中等强度龙卷袭击，龙卷灾害路径为2.3 km，主要经过农田并导致民居屋顶受损(图10f)。20:35江苏盐城市滨海县遭龙卷袭击，龙卷导致房屋屋顶严重损坏，灾害路径长为0.5 km，强度为EF1级，属中等强度龙卷(图10g)。

3 小结

龙卷尺度小，生命史短，但往往引起严重的风灾破坏。龙卷鲜少经过气象测站，且易摧毁观测设备，故难以通过气象测站确定龙卷的风速。通过开展现场风灾调查，收集风灾破坏特征，并由指示物的受损程度判断风速是目前定量龙卷灾情及研判龙卷强度等级的有效手段。此外，通过社交媒体辅助收集龙卷信息，能将未开展灾情调查的龙卷信息共同记录存档，有助于完善龙卷数据库。

通过现场灾情调查及信息收集研判相结合，本文梳理了2023年中国龙卷活动情况及大部分强龙卷灾情特征。结果显示，2023年可确认的陆龙卷为56个，较2018—2022年数量显著偏多(图11)。2023年，影响中国龙卷的大尺度天气系统主要为东北冷涡、江淮气旋及热带气旋，大部分龙卷属西风带龙卷，台风背景下的龙卷过程较少(仅5个)。6—7月，东北冷涡在我国东北部地区多次造成龙卷群发；9月江淮气旋活动导致江苏和安徽多地遭受龙卷灾害。2023年中国龙卷活动特征与历史情况基本相符^[2]。从空间上看，2023年龙卷主要发生在东北地区、江淮平原及华北平原，华南仅记录到3个陆龙卷过程，较往年偏少，西部地区青海记录到3个龙卷，为历年少有。从时间上看，龙卷主要发生时间集中在5—9月，7月为龙卷发生频数最多的月份；首个龙卷出现时间(3月7日)早于往年；最晚的龙卷出现在9月19日，在江苏省盐城市。

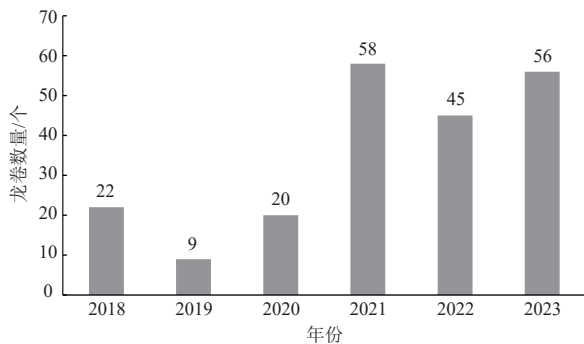


图11 2018—2023年中国龙卷数量统计

Fig. 11 The number of tornado in China from 2018 to 2023

2023年共计由4个龙卷导致了14人死亡，导致人

员伤亡的龙卷均为EF2级及EF3级强龙卷，其中6月10日江苏南通龙卷导致2人死亡，8月13江苏盐城龙卷致2人死亡，9月19江苏盐城龙卷、宿迁龙卷各导致5人死亡。EF2级及以上级别强龙卷有8个，相较2016—2022年平均值(6.1个)偏多。9月19日有9个龙卷袭击江淮平原，2023年度两个最强的龙卷(EF3级)均在此过程中产生。

随着龙卷灾害现场调查的发展，气象工作者对龙卷风灾的认识也不断加深，但国内从事龙卷风灾现场灾调工作的团队仍较少，开展全面的灾情调查仍存在很大难度。未来还需要依托信息化技术的快速发展，建立灾情调查远程通讯系统，开展灾情调查数据实时传输与同步分析，结合三维建模等技术^[9]，提高龙卷灾后调查的效率，才能实现龙卷风灾更及时、更专业、更全面的调查与评估。

致谢：感谢国家气象中心、中国气象局气象探测中心雷达应用室、山东省气象局、辽宁省气象局、黑龙江省气象局、江苏省气象局、安徽省气象局、河南省气象局、广东省气象台、潮州市气象局、汕头市气象局、揭阳市气象局、清远市气象局、气象爱好者及佛山市龙卷风研究中心其他同事对龙卷数据收集提供的支持和帮助。

参考文献

- [1] 郑永光. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J]. 气象科技进展, 2020, 10(6): 69-75.
- [2] 俞小鼎, 赵焯, 范雯杰. 中国龙卷的时空分布与关键环境参数特征[J]. 热带气象学报, 2021, 37(Z1): 681-692.
- [3] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [4] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征[J]. 气象科技进展, 2019, 9(1): 50-55.
- [5] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征[J]. 气象科技进展, 2020, 10(1): 7-14.
- [6] 蔡康龙, 黄先香, 李彩玲, 等. 2020年中国龙卷过程及灾情特征[J]. 气象科技进展, 2021, 11(1): 40-45.
- [7] 植江玲, 黄先香, 白兰强, 等. 2021年中国龙卷活动及灾情特征[J]. 气象科技进展, 2022, 12(1): 26-36.
- [8] 黄舒婷, 李兆明, 白兰强, 等. 2022年中国龙卷活动及灾情特征[J]. 气象科技进展, 2023, 13(1): 23-32.
- [9] 蔡康龙, 俞小鼎, 李彩玲, 等. 2019年广西临桂微下击暴流和广东湛江龙卷现场灾情调查对比分析[J]. 气象, 2021, 47(2): 230-241.
- [10] 李彩玲, 谭浩波, 蔡康龙, 等. 2016—2020年中国龙卷过程和灾情特征[J]. 热带气象学报, 2021, 37(5): 733-747.
- [11] Fujita T T. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980[J]. Monthly Weather Review, 2009, 109(7): 81A49642.
- [12] McDonald J R, Mehta K C. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EFscale) [R]. Lubbock: Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [13] 姚聃, 梁旭东, 孙继松, 等. 龙卷风强度等级(GB/T 40243-2021) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

(编辑: 郑秋红)

世界气象中心履职路径及发展状况对比

张滨冰¹ 吕丽莉¹ 刘爽² 那晓丹³

(1 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 中国气象局气象发展与规划院, 北京 100081;
2 国家气象中心(中央气象台), 世界气象中心(北京)运行办公室, 北京 100081; 3 中国气象局国际合作司, 北京 100081)

摘要: 为了有效推进“全球监测、全球预报、全球服务”业务能力高质量发展, 本文系统梳理了WMO综合处理和预报系统(WIPPS)的设立和升级过程、WIPPS产品应用情况问卷调查结果, 并且对比了五个主要世界气象中心的发展路径。结果表明, WIPPS延用了全球资料加工预报系统(GDPFS)的三级业务框架, 为会员国提供高质量的数据和产品服务。调查问卷结果显示超过九成的WMO会员会经常使用世界气象中心、区域专业气象中心等中心共享的研究资料和预报产品来提升本国/本区域的气象服务能力。其中, 六区协(欧洲)借助WIPPS体系充分发挥了自身资料加工能力强的特点, 通过加强资料共享不断提升国际影响力。我国目前尚未有中心被认定为全球牵头中心, 但我国也提供了一系列特色区域专业服务, 如沙尘暴、区域气候、海洋气象等。在海洋气象服务方面, 受限於我国气象系统与海洋系统分属不同部门, 在海浪数值预报与服务方面, 与其他中心如邻国日本等尚存在差距。我国数值预报水平与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、英国、日本等尚存在一定差距。当前主要世界气象中心制定了一系列发展战略方案以提升预报水平, 增强创新能力与科研能力, 这也对加快提高我国数值预报能力、切实提高国际中心履职能力提出了更紧迫的要求。

关键词: WIPPS, 世界气象中心, WMO区协, 履职职能, 发展对比

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.004

Comparison of the Performance Path and Development of World Meteorological Centres

Zhang Binbing¹, Lyu Lili¹, Liu Shuang², Na Xiaodan³

(1 CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Institute for Development and Programme Design, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 2 National Meteorological Centre (Central Meteorological Observatory) and the World Meteorological Centre (Beijing) Operation Office, Beijing 100081;
3 International Cooperation Department, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: To promote high-quality development of “three global” operation capacity, this paper presents a comprehensive analysis of the establishment and upgrading of WIPPS, the questionnaire survey results of WIPPS product application, and compares the development paths of five major world meteorological centres. The results show that WIPPS has maintained the three-level operational framework of GDPFS, providing high-quality data products and services to WMO Members. According to questionnaire results, more than 90% of WMO Members use the research data and forecast products shared by WMC, RSMC and other centres on a regular basis to enhance their national/regional meteorological service capacity. In particular, Regional Association VI (Europe) have leveraged their strong data processing capabilities with the assistance of the WIPPS system and have enhanced their international influence through data sharing. None of the operational centres in China has been recognized as a global leading unit in this field, but China has provided a range of specialized regional services such as sandstorm, regional climate, and marine meteorology. In terms of numerical forecast and services of ocean waves, there remains a gap compared to other centres such as Japan due to the separation of China’s meteorological and marine systems. China’s numerical forecast level has a notable gap compared to that of advanced centres such as EC, the United Kingdom, and Japan. The major world meteorological centres have formulated a series of strategic development plans to improve the level of forecasting and enhance the ability of innovation and scientific research. Thus, more urgent demand has been put forward for accelerating the improvement of China’s numerical weather prediction capabilities and elevating the international centres’ duty performance abilities.

收稿日期: 2023年12月28日; 修回日期: 2024年2月4日
第一作者: 张滨冰(1997—), Email: lynn97426@163.com
通信作者: 吕丽莉(1987—), Email: lililyu@hotmail.com
资助信息: 中国气象局气象软科学重点项目(2024ZDIANXM14);
中国气象局气象发展与规划院专项研究项目
(JCYJ20230103)

Keywords: WIPPS, World Meteorological Centre, regional associations of WMO, duty performance, development contrast

0 引言

自恢复在世界气象组织(WMO)合法席位50年以来,我国承担了WMO世界气象中心等26个国际业务中心职责,是全球气象数据、产品和服务的重要贡献者。为了扩大我国气象事业的国际影响力,有效推进全球监测、全球预报、全球服务(简称“三个全球”)业务能力高质量发展,本文系统梳理了世界气象中心设置背景与过程,基于WMO组织开展的WMO综合处理和预报系统(WMO Integrated Processing and Prediction System, WIPPS)预报产品应用情况问卷调研结果分析了各会员对三级气象中心的产品需求和各区协预报产品加工水平分布情况,对比分析了包括中国在内的五个主要世界气象中心的履职职能、业务水平和战略计划,围绕我国国际业务发展现状展开分析和思考,力求为我国进一步加强国际气象业务统筹协调管理能力,提升全球气象国际竞争力提供参考。

1 世界气象中心设置背景与过程

1967年,WMO批准了“世界天气监视网计划(World Weather Watch, WWW)”,确定全球资料加工系统(Global Data-processing System, GDPS)为其三大业务体系之一。GDPS历经多年发展,先后升级为全球资料加工预报系统(Global Data-processing and Forecasting System, GDPFS)和无缝隙全球资料加工预报系统(Seamless GDPFS),并于2023年第19次世界气象大会升级为WIPPS。WIPPS延用了GDPFS的业务框架,由世界气象中心(World Meteorological Centre, WMC)、区域专业气象中心(Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC)和国家气象中心(National Meteorological Centre, NMC)三大部分组成,履行在全球范围内提供高质量预报产品和服务的职能。

1.1 GDPS设立过程

1962年6月,世界气象组织执行理事会第14次届会提出了“世界天气监视网计划”。1967年4月,世界气象组织第5次世界气象大会正式批准了该计划,并确定其业务体系由全球观测系统(Global Observing System, GOS)、全球电信系统(Global Telecommunication System, GTS)和GDPS三部分组成^[1]。其中,GOS承担优化全球大气和海洋观测系统以及规范观测技术和观测网作业要求的职能,GOS也是当前WMO全球综合观测系统(WMO Integrated Global Observing System, WIGOS)的关键组成部分;GTS是一个地面和卫星电信链路的综合网络,由各国运营的气象电信中心相互连接,实时收集和分发所有气象数据和预报警报信息,历经多年发展演变形成

了今天的WMO信息系统(WMO Information System, WIS);GDPS作为WWW的核心部分,主要承担加工气象资料,为WMO成员提供预报预测等信息服务的职责。在WWW第一个执行计划期,GDPS设置了三级气象中心运营体系:世界气象中心、区域气象中心和国家气象中心,分别在全球、区域和国家层面履行气象数据资料加工职能。1987年5月世界气象组织第10次世界气象大会同意引进“区域专业气象中心(Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC)”的概念,截至当前,已逐步把区域气象中心全部过渡为区域专业气象中心。

1.2 GDPS更名为GDPFS并细化三级气象中心业务要求

2003年5月世界气象组织第14次世界气象大会依据WMO基本系统委员会2002年特别届会的建议,将GDPS改为GDPFS。相较于GDPS,GDPFS在加强实时及非实时数据、产品、服务共享的同时,更加强调预报产品、技术的高效共享。GDPFS为提升履职能力,明确并细化了三级气象中心职责范围和运作模式^[2],图1反映了GDPFS三级气象中心的主要工作职责:1)世界气象中心作为先进的数值天气预报中心,负责开展全球确定性数值天气预报、全球集合数值天气预报和全球长期数值天气预报;2)区域专业气象中心的主要职责包含一般性工作、特殊工作及协调验证工作等三种类型,前两种属于实时活动,由普通区域专业气象中心承担,而第三种属于非实时活动,由专业水平较强的牵头中心承担。具体而言,一般性活动主要为满足基本业务需求;特殊活动主要为针对特定类型的用户和业务量身定制的服务;非实时类活动主要为协调验证工作,为会员应用RSMC产品提供帮助。3)国

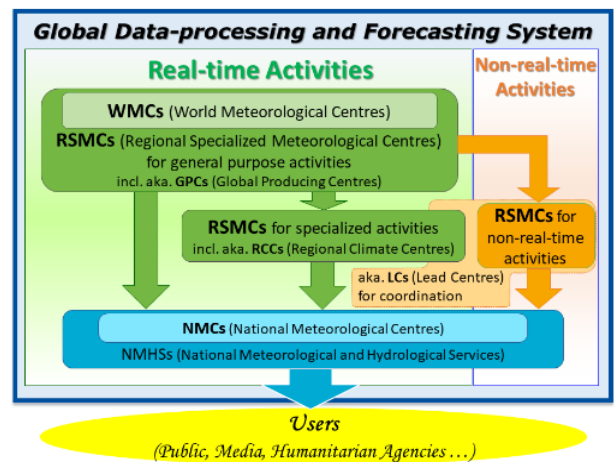


图1 GDPFS三级气象中心工作职责划分示意图^[2]
Fig. 1 Schematic diagram of the division of responsibilities of the GDPFS three-level meteorological centre

家气象中心主要负责在本国/本区域范围内应用其他中心提供的产品及自主研发产品，加强本国/本区域预报和预警服务水平。

在GDPFS框架下，在全球范围内形成了22类总计137个专业气象中心，对提高WMO成员预报和服务能力起到了重要作用。根据WMO相关网站显示，截止2020年，193个会员中超过95%的会员能够自主运行数值天气预报模式，比例相较1990年提高近2.5倍，并且临近预报模式和海浪模式数量超过了40个，呈现了快速增长态势^[3-4]。

1.3 GDPFS升级为WIPPS

2022年9月，世界气象中心气候预测系统专家小组提出通过运用大数据、云计算、人工智能、机器学习等方式提升气象、气候、水文、海洋等领域的预报水平，将GDPFS升级为无缝隙GDPFS(Seamless GDPFS)，使GDPFS成为一个更有效且适应性强的监测预测系统^[5]。

2023年第19次世界气象大会将GDPFS升级为WIPPS，更加强调地球系统理念^[2]，通过应用地球系统模型逐步实现海洋、大气、冰冻圈、生物圈、陆地系统、全球碳循环等系统的耦合，从而实现更加精准的天气和气候预报预测。截止到2023年底，在WIPPS框架下，在全球范围内形成了23类总计142个专业气象中心，相较GDPFS增加了1类5个专业气象中心^[6]。

GDPFS经历无缝隙GDPFS阶段后，正式确定为WIPPS，实现了由气象预报系统向地球综合系统的逐步过渡，从而能够更好地为会员国提供高质量的数据和产品服务，满足用户对环境数据产品服务日益增长的需求。

1.4 WIPPS未来工作要求

2022年联合国秘书长在世界气象日上呼吁由WMO牵头执行全民早期预警倡议，2023年第19次世界气象大会正式通过了《WMO 2024—2027年战略计划》。该计划的顺利执行除了依托WMO现有活动及伙伴关系，如WMO全球多灾种预警系统(Global Multi-hazard Alert System, GMAS)、系统观测融资机制(Systematic Observations Financing Facility, SOFF)和气候风险和早期预警系统倡议(Climatic Risk and Early Warning Systems, CREWS)等外，还必须依托人道主义和公共团体、国际金融机构和金融机制等运营实体的大力支持^[7-8]。

作为牵头单位的WMO将大力发挥作为一个科技组织的特色，基于会员的需求，尤其是资源最贫乏的会员的需求，加强WMO区域和全球基础设施，如全球基本观测网(Global Basic Observing Network,

GBON)和WIPPS的建设，从而高效地支持会员提供有效的预警服务。这也对WIPPS提出了更高的要求。大会也对WIPPS框架进行了适当拓展，通过了“全球温室气体监视网决议”和“应对冰冻圈变化的全球和区域影响的优先事项”，将“全球温室气体监视网”部分业务及极地和高山地区监测预警纳入WIPPS框架，确保WIPPS能够在“早预警—早行动”的价值周期内更好地提供服务^[9]。

2 各区协WIPPS预报产品需求及加工能力建设情况

2021年WMO基于各会员应用WIPPS预报产品情况和预报产品加工处理能力建设情况开展了问卷调查，193个会员中共有114个会员响应了此次调研活动。其中，91.2%会员反馈在提供本国或本地区气象服务时需要应用WIPPS预报产品，然而部分会员反馈自身不具备进一步加工处理WIPPS预报产品的能力^[10]。

2.1 数据产品应用情况

WMO绝大多数会员需要应用WIPPS的预报数据产品为本国气象服务提供支撑；还有部分会员额外掌握未公开的观测数据，他们中大部分愿意把这些数据共享给世界气象中心或区域专业气象中心。

图2显示了WMO六个区域协会会员反馈结果的分布情况，有104个会员反馈会使用WIPPS提供的预报产品，其中一区协的会员占比最多，高达38.5%。在各项预报产品中，网格数据产品和表格数据产品最受欢迎，约72.1%的会员会应用网格数据产品，约69.3%的会员会使用表格数据产品。此外，有83个会员国反馈还额外掌握未传送到GTS或WIS的观测数据，有71个掌握额外观测数据的会员愿意把这些数据共享给世界气象中心或区域专业气象中心。83个额外掌握观测数据会员中有24个来自六区协(欧洲)，约占六区协会员总数的一半，表明六区协整体的观测水平发展较为均衡，处于整体相对发达的水平。

2.2 预报产品加工能力

一、二、三、四及六区协共108个会员反馈了关于预报产品加工能力的调研结果，有91个会员反馈拥有自主运行数值预报模式的能力，其中超过85%的会员能够运行区域性数值预报模式，约30%的会员能够运行全球性数值预报模式。有79个会员反馈有能力进一步加工数值预报信息产品，其中六区协高达86%的区协会员具备加工能力，表明六区协整体数值预报信息产品加工能力较强，而一区协在这方面的能力较弱，仅有48%的区协会员具备加工能力，相较于平均水平低24个百分点(图3a)。根据调研结果，拥有自主

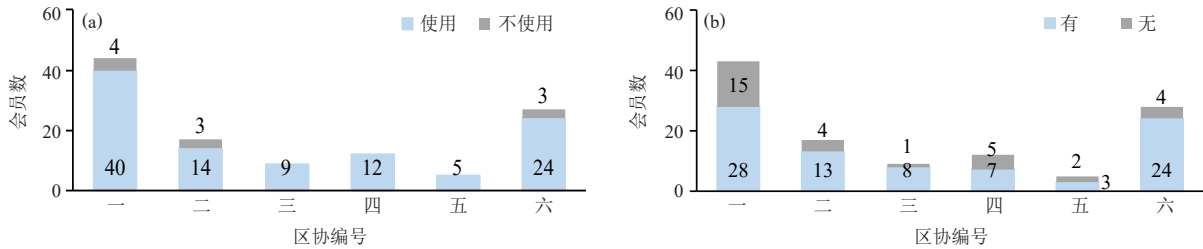


图2 各区协会员数据应用情况调研结果^[6]
(a) 是否应用WIPPS预报产品; (b) 是否有未传送到GTS/WIS的观测信息
Fig. 2 Survey results of data application of regional association members

(a) Whether to apply WIPPS forecasting products; (b) Does it have observations that have not been transmitted to GTS/WIS

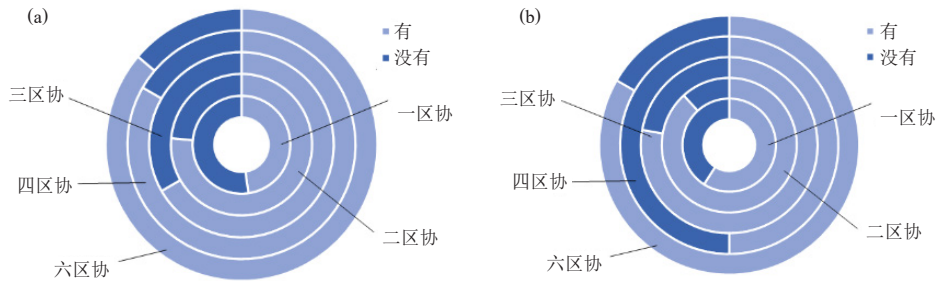


图3 各区协会员数值预报资料加工处理能力调研结果^[6]
(a) 是否能进一步加工数值预报产品; (b) 是否拥有自主开展天气预报、数据分析及数据可视化的综合系统
Fig. 3 Survey results of numerical forecasting data processing capacity of regional association members

(a) Whether the numerical forecast products can be further processed; (b) Does it have an integrated system for weather forecasting, data analysis and data visualization

运行数值预报产品加工能力的会员通常使用高性能计算机和 workstation 加工数值预报信息产品，这也对其他不具备产品加工能力的会员的硬件水平提出了更高的要求。有83个会员拥有自主开展天气预报、数据分析及数据可视化的综合系统，其中二区协和六区协拥有自主综合系统的会员数量占比最高（88%，83%），而四区协仅有一半会员拥有综合系统，占比较少（图3b）。

总的来说，虽然大多数WMO会员自身具备运行数值预报模式的能力，但仍然有部分会员由于缺乏加工预报资料设备与算力水平的支撑及相应的技术水平而不具备这一能力。从本次调研情况来看，一区协能够自主运行数值预报模式会员占比较少且预报资料加工处理能力较弱，二区协应用综合系统的会员占比最多，三区协自主运行数值预报模式能力的会员占比最高，四区协有能力加工预报资料的会员占比较高但有综合系统的会员占比最低，六区协运行数值预报模式能力及预报资料加工处理能力都相对较强。

3 世界气象中心履职情况对比

3.1 世界气象中心认定及分布情况

截至目前，WMO分四批认定了10个世界气象中心。1967年，WMO首批认证了俄罗斯莫斯科、美国华盛顿、澳大利亚墨尔本3个世界气象中心；2017年

5月，WMO执行理事会第69次届会认定ECMWF、英国埃克塞特、加拿大蒙特利尔、日本东京和中国北京等5个中心为第二批世界气象中心；2018年，WMO执行理事会第70次届会认定德国奥芬巴赫为世界气象中心；2021年6月，WMO执行理事会第73次届会认定法国图卢兹为世界气象中心。

当前，共有5个世界气象中心设置在欧洲（六区协），2个世界气象中心设置在亚洲（二区协），2个世界气象中心设置在北美洲（四区协），1个世界气象中心设置在大洋洲（五区协），非洲（一区协）和南美洲（三区协）暂时还未设置世界气象中心。

本文选取了预报水平和履职能力领先的5个主要世界气象中心开展对比研究，其中包括欧洲ECMWF、英国埃克塞特、美国华盛顿、日本东京和中国北京。

3.2 WIPPS框架下世界气象中心承担的主要职责对比

WIPPS组织开展的各项工作主要由各世界气象中心和区域专业气象中心承担，其中世界气象中心需在全球范围内开展数值预报工作，区域专业气象中心基于专业领域开展预报、预警等工作。截至2023年，WIPPS共发布23项工作，各主要世界气象中心均承担多项工作。表1梳理了目前五个中心承担的主要

职责^[10]。除了作为世界气象中心均需承担的全球确定性数值预报、全球集合数值天气预报和全球数值长期预报外，各中心还在WIPPS框架下作为专业气象中心承担多项专业气象服务工作。从表1中可以看出，欧洲ECMWF虽然提供的专业气象服务种类没有其他几个中心多，但少而精，是全球唯一牵头了两项检验协调工作的世界气象中心。作为牵头中心，ECMWF组织各中心交换验证结果，从而提供不同中心的数值天气预报产品检验信息；同时ECMWF还为海洋学和海洋气象学联合技术委员会提供设施，并维护海洋预报验证统计信息的存档。日本东京提供的专业气象服务种类最多，同时在数值预报领域也有很强的实力，负

责协调集合数值预报系统检验。英国埃克塞特和美国华盛顿提供的专业气象服务种类比较相近。相较于美国，英国还提供了数值海浪预报，并承担着1~10 a气候预报牵头协调工作，主要负责收集其他中心的预测结果并检验这些信息的准确性。而美国则与韩国首尔共同担任WMO长期多模式集合牵头中心，负责汇集和开放共享全球预报中心的预报信息，以提高长期区域性预报的可靠性。当前全球5个牵头中心有2个在欧洲，分别由ECMWF和英国承担；1个在北美，由美国承担；2个在亚洲，分别由日本和韩国承担。中国北京目前尚未被认证为牵头中心，未来在提升数值预报能力及国际影响力方面仍然任重而道远。

表1 五个主要世界气象中心承担WIPPS主要职责汇总
Table 1 Summary of the WIPPS work mandated by the five major WMCs

中心	欧洲ECMWF	英国埃克塞特	美国华盛顿	日本东京	中国北京
世界气象中心	世界气象中心； 全球确定性数值预报；全球集合 数值天气预报	世界气象中心； 全球确定性数值预报； 全球集合数值天气预报	世界气象中心； 全球确定性数值预报	世界气象中心； 全球确定性数值预报； 全球集合数值天气预报	世界气象中心； 全球确定性数值预报； 全球集合数值天气预报
区域专业气象 中心等	全球数值长期预报； 全球确定性数值预报检验； 海浪预报检验	全球数值长期预报； 1~10 a气候预测； 数值海浪预报； 核环境应急响应； 国际空中火山观测服务； 海洋气象服务	区域气候预测与监测； 核环境应急响应； 国际空中火山观测服务； 海洋气象服务	全球数值长期预报； 数值海浪预报； 临近预报； 区域气候预测与监测； 热带气旋预报； 核环境应急响应； 国际空中火山观测服务； 海洋气象服务	全球数值长期预报； 区域气候预测与监测； 核环境应急响应； 沙尘暴预测； 海洋气象服务
牵头中心	协调确定性数值天气预报检验； 协调海浪预报检验	协调1~10 a气候预报	协调多模式集合预测以 进行长期预报	协调集合数值预报系统检验	

虽然中国北京未被认定为牵头中心，但也承担了一些有特色的区域专业服务。中国北京是全球沙尘暴预测工作的中心，表明中国沙尘暴预报水平与研究能力受到广泛的国际认可。虽然中国承担了海洋气象服务，但是受限于我国气象系统与海洋系统分属不同部门的限制，截至目前，并没有承担海浪数值预报与验证服务。我国是海洋大国，随着“一带一路”倡议的发展，精准海洋气象预报尤其是海浪预报服务需求也日益增长，在此背景下，进一步加强海浪数值预报是大势所趋。相比之下，日本在海浪数值预报领域的工作要更有成效。

4 主要世界气象中心最新进展及未来发展策略：以NWP水平提升为例

4.1 主要世界气象中心全球性预报水平现状及最新进展

图4对比分析了主要世界气象中心的全球数值预报模式现状，可以看出当前ECMWF业务模式的各项性能指标都相对领先。ECMWF全球数值天气预报水平处于世界第一梯队，英国处于第二梯队，澳大利亚、加拿大、德国、美国、日本处在第三梯队，中国

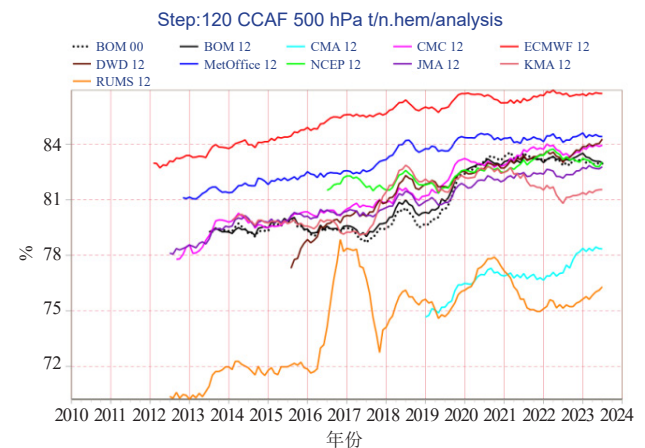


图4 世界主要气象机构的全球数值天气预报水平对比 (2010—2024年500 hPa高度5天预报ACC对比图) (来源: WMO确定性数值天气预报验证中心)
Fig. 4 Comparison of global numerical weather prediction levels of major meteorological agencies in the world (ACC comparison chart of 5-day forecast for 500 hPa altitude from 2010 to 2024)

与其他中心尚存在一定的距离。

表2梳理了五大主要世界气象中心全球数值天气预报模式参数：各中心全球天气预报业务模式大约有30~50个集合成员，水平分辨率主要集中在

9~35 km, 垂直层数集中在100层左右。ECMWF的各项预报模式参数都处于领先水平。ECMWF中期集合预报模式(ENS)和高分辨率预报模式(HRES)的水平分辨率均达到9 km, 垂直层数为137层, 集成员数有51个, 这三项预报模式参数都是五大主要世界气象中心中的最优水平。英国气象局UM预报模式水平分辨率达到10 km, 也处于领先水平, 仅比ECMWF低

1 km。日本气象厅预报模式集成员数达到51个, 与ECMWF数量相同。当前中国气象局预报模式各项参数与其他主要世界气象中心还存在一定差距, 中国气象局预报模式水平分辨率为12.5 km, 与ECMWF相比差3.5 km; 垂直层数为87层, 与ECMWF相比差50层; 集成员数31个, 与ECMWF和日本气象厅相比差20个。

表2 五个主要世界气象中心全球集合预报模式参数
Table 2 Parameters of global ensemble forecast models of the five major WMCs

机构	模式	水平分辨率	垂直层数(模式顶)	集成员数	预报频次/UTC	预报范围/d
欧洲中期天气预报中心(ECMWF)	IFS-ENS	9 km	L137	51	00, 06, 09, 12, 15, 18, 21	0~15
	IFS-HRES	9 km	L137		00, 06, 12, 18	0~10
美国国家环境预报中心(NCEP)	GEFSv12	25 km	L64	31	00, 06, 12, 18/00	16/35
	GSM	0.1250°(TQ959)		51	06, 18/00, 12	5.5/11
日本气象厅(JMA)	GEPS	0.25°(TQ479) 13 km	L128(0.01 hPa)	51/25	06, 18/00, 12	5.5/11/18/34
	UM	10 km	L70(80 km)		00	6/2.5
英国气象局(UK Met Office)	MOGREPS-G	20 km	L70(80 km)	18	00, 12/06, 18	0~7
	CMAGFS	12.5 km	L87	31	12	0~15

为了提升全球气象预报水平, 各主要世界气象中心持续优化预报模式, 更新系统性能, 预报准确率也不断提高。近年来五个主要世界气象中心都通过升级数值预报系统, 改进参数配置, 提升要素完备度, 降低预报偏差。ECMWF在2023年将综合预报系统(Integrated Forecasting System, IFS)升级为Cycle 48r1, 将中期集合预报的水平分辨率从18 km提升到9 km, 并改进了积雪预报模式, 采用多层雪参数替代单层雪参数^[11], 这些升级让ECMWF部分ENS的高空参数预报评分提升了1%~3%, 地面参数预报评分提升了2%~6%。英国气象局从2015年开始配置超级计算机Cray XC40, 在2019年开始实施Parallel Suite 43, 改进大气过程表示方式, 优化显示模拟集合预报过程, 并在2022年开始部署下一代地球系统模式(National Groundwater Modelling System, NGMS), 以综合分析气象、海洋和环境变化情况。美国NOAA在2020年将全球集合预报系统GEFS升级为12版本, 运用新的模式扰动技术的同时, 将集成员数从21个增加到31个, 水平分辨率也增加到25 km。日本JMA在2023年将全光谱模式(Global Spectral Model, GSM)的垂直层数从100个增加到128个, 水平分辨率从20 km提升到13 km, 并将全球集合预报系统(Global Ensemble Prediction System, GEPS)两周预报集成员数增加到51个。我国2022年对数值预报系统CMA-GEPS和CMA-GFS进行同步技术改进, 垂直坐标升级为混合垂直坐标, 形成CMA-GEPS 1.3版本, 在中长期预报中识别大范围强降雨、确定降水区域的能力更

强, 在短期预报中精准锁定降水落区和发生时段的能力更优, 台风路径预报的误差降低13%, 强度预报误差降低33%, 集合平均的可用预报天数提高了0.4 d。

4.2 主要世界气象中心全球数值预报水平未来发展策略

当前, 各主要世界气象中心制定了未来提升预报能力, 增强气象服务效益的战略方案。各中心未来发展策略主要包括应用无缝隙地球系统模式、高性能计算机、人工智能等技术手段提升预报水平; 通过建立合作网络, 搭建社区平台等方式增强创新能力与科研能力, 提升服务效益。

处于预报水平第一梯队的ECMWF通过推动地球系统建设, 优化预报和服务水平。《ECMWF 2021—2030年战略计划》提出了科学技术、影响效益、组织人员的三层战略框架^[12]。在科学技术方面, 通过搭建无缝隙地球系统, 实现天气和地球系统科学建设, 并通过高性能计算机和人工智能推进数字孪生地球, 实现数值天气预报尖端技术突破。在影响效益方面, 通过地球系统反馈多时段详细天气信息以提供高质量预报产品; 实施开放数据政策, 共享多项数据集; 开设培训课程, 帮助用户有效利用数据资源。在组织人员方面, 通过搭建内部通讯系统, 建立多点企业文化; 通过营造分布式、灵活且有弹性的工作环境, 提高生产效率。

英国气象局通过建设超级计算机, 不断优化算力水平和配套设施。《Met Office 2022—2027年数据科学框架》中提出了由“能力建设、人才建设、合作交流”

三个支柱支撑的数据科学框架^[13]。在能力建设方面,通过计算机仿真和机器学习等方式提升归因能力、数据科学融合模拟能力、不确定性转化能力和从数据到决策的能力四个重要能力。在人才建设方面,通过组建信息实验团队,指导和协调气象局数据科学活动。在合作交流方面,通过广泛开展交流合作,寻求有互补专业知识的合作伙伴,不断扩大伙伴关系网。

美国NOAA通过搭建社区,促进多学科领域的协作交流。NOAA发布的《天气项目办公室2022—2026 战略计划》提出包括“合作交流、效益发挥、系统建模、设施优化”四方面的战略目标^[14]。在合作交流方面,以社区为基础促进多学科领域的协作交流,与学术、政府和行业伙伴建立气象研究及发展合作网络。在效益发挥方面,改进对重大天气的预报和服务能力,优化气象信息在社会中的传播、应用,促进气象信息发挥效益。在系统建模方面,以社区为基础的地球系统建模方法,支撑统一预报系统(Unified Forecast System, UFS)优化升级。在设施优化方面,与首席信息官办公室合作,加强观测系统、计算系统、人工智能、科学数据库等基础设施建设。

日本气象厅计划通过优化和开发数值预报模式,提升极端天气的预报准确率,并提升气象社会服务效率。《2030年日本气象厅数值预报战略计划》提出进一步推动数值预报模式的开发是实现预测创新的关键路径^[15]。日本气象厅计划通过将局部地区水平分辨率提升至1 km以内和发展集合预报系统等方式提升暴雨天气预报准确率;通过将用于台风预报的全球模式的网格间距提升到10 km等方式改善台风预报能力;通过开发分层地球模式系统和高分辨率的海洋模式,优化气象社会服务能力;通过开发高分辨率区域气候模式,提前10~100 a预测极端天气现象和海平面变化情况,以应对全球气候变化。

5 结论

作为世界天气监视网计划三大业务体系之一的GDPS历经多年发展,成为了当前的WIPPS,更加强地球系统理念,同时也延用了GDPFS的三级业务框架,为会员国提供更高质量的数据和产品服务。从WMO开展的问卷调查结果来看,超过九成的WMO会员均会使用WIPPS提供的预报产品。虽然有超过一半的会员能够自主运行国家/地区数值预报模式,但能够运行全球性数值预报模式的会员占比较少,因此全球相关预报资料需要依靠世界气象中心等中心提供支持,并且将近三成的会员需要依靠世界气象中心、区域专业气象中心等中心共享的研究资料和预报产品来

提升本国/本区域的气象服务能力。近年来,六区协充分发挥自身资料加工能力强的特点,不断提高资料共享力度,通过加强用户粘度提升了自身国际影响力。

当前全球5个牵头中心有2个在欧洲,1个在北美,2个在亚洲。虽然中国北京未被认定为牵头中心,但承担了一些有特色的区域专业服务,如沙尘暴、海洋服务等。受限于我国气象系统与海洋系统分属不同部门的限制,截至目前,我国并没有承担海浪数值预报与验证服务,相比之下,日本在海浪数值预报领域的工作更有成效。

当前ECMWF全球数值天气预报水平处于世界第一梯队,英国处于第二梯队,澳大利亚、加拿大、德国、美国、日本处于第三梯队,而我国预报水平与其他先进气象中心相比还存在一定差距。近年各主要世界气象中心通过发展无缝隙地球系统模式、高性能计算机、人工智能等技术手段提升预报水平,增强创新能力与科研能力,这在某种程度上也对我国加快提高气象数值预报能力提出了更高要求。当前,我国履职能力与其他主要世界气象中心仍有一定差距,在提升数值预报能力及国际影响力方面仍然任重道远,需进一步梳理和学习其他中心的先进做法,为我国提升业务水平和国际影响力提质增效。

2023年第19次世界气象大会选举产生了新一届WMO领导班子,WMO主席由阿联酋国家气象局局长阿卜杜拉·艾哈迈德·阿尔曼杜斯担任,WMO秘书长由阿根廷国家气象局局长塞莱斯特·绍罗担任。塞莱斯特·绍罗是WMO首位女性秘书长,也是首位南美籍秘书长。绍罗认为气候变化是我们这个时代全球面临的巨大威胁,她将强化WMO在区域层面的工作,推动早期预警服务,就全民早期预警倡议等内容保持与联合国、合作单位和私营部门的密切联系。WMO将围绕全民早期预警倡议平等倾听所有会员的声音,优先考虑最脆弱会员的需求,实现未来五年全球人人享有预警。在此框架下,WMO将继续拓展在WIPPS框架下的业务活动,确保WIPPS能够在“早预警—早行动”的价值周期内更好地提供服务。

参考文献:

- [1] 周庆亮. 世界气象中心的设置、认定与履职简析[J]. 气象科技进展, 2018, 8(4): 129-131.
- [2] WMO. GDPFS white paper[R]. Geneva, 2016.
- [3] WMO. Status of operation of numerical models at WMO GDPFS centers for 2020[R]. Geneva, 2021
- [4] WMO. Monitoring and evaluation[EB/OL]. Geneva, 2023. <https://community.wmo.int/en/planning-and-monitoring/monitoring-and-evaluation>
- [5] IPMA. Meeting of expert team on operational climate prediction

(下转37页)

区域高分辨率数值预报检验评估系统

陆天舒¹ 孙鑫² 陈昊明¹ 李普曦¹ 朱峰² 霍庆³ 周佰铨¹ 杨琳韵¹

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2 内蒙古气象台, 呼和浩特 010051;
3 国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 近年来我国区域高分辨率数值预报业务发展迅速, 目前传统检验方法已不能满足高分辨率模式降水检验评估需求。区域高分辨率数值预报检验评估系统在吸收降水传统检验方法优势的同时, 融入基于降水发展演变过程的检验评估方法, 旨在建立一套适用于高时空分辨率观测资料的精细化降水检验评估系统, 为促进区域模式改进和高分辨率数值预报产品的偏差理解提供了重要参考, 也为理解区域数值预报的模拟能力及其偏差提供了新的视角。

关键词: 数值天气预报, 高分辨率模式, 检验, 评估

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.005

Verification and Evaluation System of Regional High Resolution Numerical Weather Prediction

Lu Tianshu¹, Sun Xin², Chen Haoming¹, Li Puxi¹, Zhu Feng², Huo Qing³, Zhou Baiquan¹, Yang Linyun¹

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2 Inner Mongolia Meteorological Observatory, Hohhot 010051; 3 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081)

Abstract: In recent years, regional high resolution numerical weather prediction has developed rapidly. On the contrary, the traditional verification methods can't meet the needs for the verification and evaluation of precipitation forecast by high-resolution models. The verification and evaluation system of regional high resolution numerical weather prediction takes advantages of traditional verification means while incorporating the verification and evaluation methods based on the precipitation development and evolution process, aiming to establish a refined precipitation verification and evaluation system suitable for high spatiotemporal resolution observation data. It not only provides an important reference for promoting the improvement of regional model and the understanding of deviation of high resolution numerical weather prediction products, but also provides a new perspective for understanding the simulation ability and deviation of regional numerical weather prediction.

Keywords: numerical weather prediction, high resolution model, verification, evaluation

0 引言

数值模式的发展是气象乃至地球系统科学的核心内容, 模式检验评估是理解模式偏差、完善数值模式和提升预报服务产品质量的有效方法, 是现代数值模式发展的基础环节之一^[1]。近年来, 我国区域高分辨率数值预报业务发展迅速^[2-4]。国家级^[5]和 华北^[6]、华东^[7]、华南^[8]等区域气象中心相继建立了水平分辨率为 3 km 的区域高分辨率数值预报系统, 逐步实现了区域对流可分辨尺度模式的业务化运行, 模式产品广泛应用在短时临近预报预警以及短期预报业务和服务中。高分辨率模式产品的应用为数值预报产品的评估、后

处理和偏差订正带来了新的挑战, 传统检验方法已不能满足于高分辨率模式降水检验评估的需求, 特别是微小的强度偏差或位置偏移会导致评分大幅降低, 即“双重惩罚”问题。降水精细化预报水平的提高不仅需要预测理论、数值模式等的不断改进, 也需要客观的评估方法。近年来国内外相继发展了一系列新的基于降水空间结构特征的检验方法, 如邻域法^[9]、尺度分离法^[10]、场变换法^[11]以及基于对象的评估方法^[12]等。此类方法有利于从高分辨率模式预报结果中提取更多的空间信号, 但是也带来了新的问题, 如信息量过多, 针对性不够强, 不能突出重点等^[13]。世界天气研究计划数值试验工作组成立了预报检验研究联合工作组, 一直致力于提升针对数值模式预报效果的评估能力。美国及欧洲也都已经建立了综合的评估体系以综合认识模式预报偏差。

随着公里尺度高分辨率模式产品在短时临近预报预警以及短期预报业务和服务中的广泛应用, 迫切

收稿日期: 2022 年 9 月 6 日; 修回日期: 2023 年 7 月 24 日

第一作者: 陆天舒 (1988—), Email: luts@cma.gov.cn

通信作者: 孙鑫 (1981—), Email: 641680001@qq.com

资助信息: 国家自然科学基金项目 (U2142214); 中国气象科学研究院科技发展基金项目 (2023KJ028)

需要建立基于新的高分辨观测资料的客观综合评估方法和手段,揭示模式的预报能力及关键偏差,同时通过评估给出预报可适用性和不确定性^[14-16],为预报业务提供应用参考,从而提高对高分辨率数值预报产品的应用能力。中国气象科学研究院自2017年底开始牵头研发面向精细化预报的模式检验评估方法和指标体系,并联合国家气象信息中心和内蒙古自治区气象台开展区域高分辨模式检验评估系统建设^[17]。新研发的检验评估方法在保留已有业务系统检验指标的基础上,针对区域高分辨率模式的优势及其在业务应用中的需求^[18],重点研发了基于降水发展演变过程的检验评估方法,建立了包括降水频次/强度特征、降水日变化以及降水事件起止时间特征等的检验评估指标,并建成了区域高分辨率数值预报检验评估系统。自2019年12月2日起投入准业务运行。进一步改进形成的1.1版自2022年1月1日起正式业务运行,检验结果通过国家气象业务内网(<http://idata.cma/areaHighResolution>)实时发布。

1 检验评估业务系统的建立

1.1 系统结构与流程设计

根据区域高分辨率模式检验评估中需要更多关注降水、地面气温及风场等近地面要素及天气过程的预报精细化程度、极端性预报能力的业务需求,中国气象科学研究院科研人员着眼于降水过程,重点关注降水精细化特征的检验评估指标,已经对降水频次-强度结构、持续时间、降水开始-峰值-结束时间等检验评估方法和流程进行了深入研究^[19-24]。本系统旨在吸收已有降水传统检验方法优势的同时,融入降水过程检验评估方法和流程,建立一套能够适用于高时空分辨率观测资料的精细化降水检验评估系统,为模式结果的定量评估和订正提供依据。检验评估系统包含降水传统检验、降水空间检验、降水过程检验及近地面要素检验等功能(图1)。系统在Linux操作系统软件环境下运行,基于国家气象信息中心的气象大数据云平台“天擎”系统^[25]建设,采用JAVA、python和脚本语言开发,通过“天擎”加工流水线定时调度运行作业脚本,建立预报产品及实况数据获取、资料预处理、检验评估结果生成等系统流程,实现检验评估业务系统的准实时自动运行。国家气象信息中心的“天镜”业务监控系统为检验评估业务系统提供全流程监控,确保各环节数据完整有效。

系统流程主要为4个步骤。首先,任务调度子系统驱动数据获取子系统从云平台MUSIC数据接口及云平台数据存储地址获取站点与格点数据,并对原始文

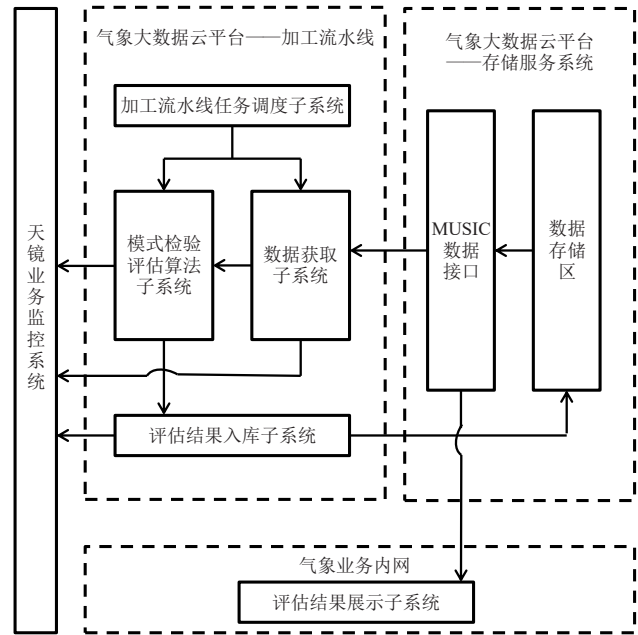


图1 区域高分辨率数值预报检验评估系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of verification and evaluation system of regional high resolution numerical weather prediction

件进行插值与格式转换等预处理工作,以此作为系统数据输入。随后,算法子系统针对评估指标生成结果文件,存储至暂存区。之后,入库子系统对暂存区内结果进行实时扫描入库。最后,完成入库的结果数据通过MUSIC数据服务接口传至气象业务内网,在网页上展示检验评估结果。另外,“天镜”业务监测系统会在数据流过程中获取数据认证信息,对模式检验评估过程进行全流程监控,能够及时获取原始数据到报情况和检验结果入库情况的数据完整性。

结果展示网页上提供各个数值预报模式的检验评估结果。3、6、12、24 h累计降水量的检验结果包括TS评分、ETS评分、空报率、漏报率、预报偏差、评分综合展示图等不同检验方式的可视化展示;逐3 h的温度、相对湿度、水平风向以及风速的检验结果包括均方根误差、平均误差、平均绝对误差、偏差等;空间检验结果包括3、6、12、24 h累计降水的分数技巧评分、分数技巧评分热力图等;降水过程检验结果包括逐3 h的降水频次-强度分布,24 h预报的降水日变化振幅与峰值时间,以及降水事件起止时间出现的频次的检验。检验区域除全国和各3 km模式区域外,面向省级业务单位的应用需求,还提供了包括中国大陆31个省(区、市)区域的检验评估结果。

1.2 数据获取子系统

模式检验评估系统基于“天擎”业务系统进行开发,数据获取子系统包含预报产品及实况数据获取

模块与资料预处理模块，利用“天擎”数据服务接口直接获取数据参与计算，减少数据搬运与落地存储环节。配合“天镜”业务监测系统，实时监控数据完整性。

1.2.1 站点实况资料获取

考虑到实况资料的可用性和当前模式分辨率，系

统采用气象大数据云平台发布的国家级地面观测站数据，包括国家级气象站（基准站、基本站、一般站）和质量控制后的部分区域自动站的数据，共约11000个站（图2）。

站点实况数据获取模块的主要功能是逐小时获取地面观测实况资料，模块采用JAVA语言开发，结合

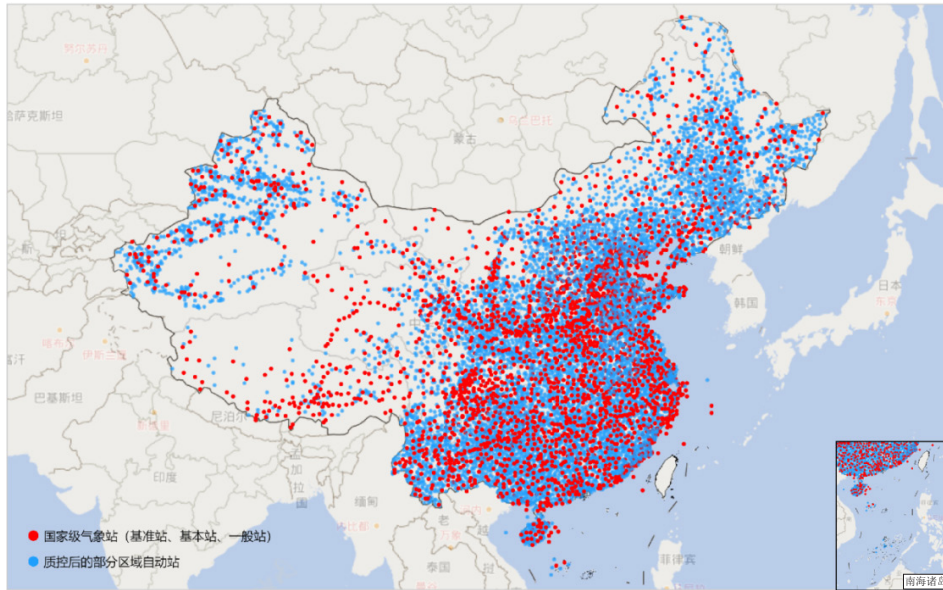


图2 国家级气象站（红色点）和部分区域自动站（蓝色点）分布图

Fig. 2 Distribution of national weather stations (red dots) and partial regional automatic weather stations (blue dots)

气象大数据云平台MUSIC接口配置信息及站点信息表编写站点数据接口调用函数，定时获取地面观测站降水及近地面要素数据（图3）。依据降水累计规则将逐小时地面观测站数据实时处理为逐3、6、12、24 h的降水累计数值，并对获取数值进行缺失值处理及格式转换，形成系统所需文件。获取地面气压、海平面气压、温度、水汽压、10 min平均风速、10 min平均风向等近地面要素数据并形成系统所需站点数据文件。站点实况数据获取模块在运行时会自动检测之前两个时刻的数据完整性，除此之外，该模块结合加工流水线任务调度子系统定时监控数据实时完整性，对缺失数据开展数据补充。

1.2.2 格点数据获取与预处理

格点数据获取（图4）与预处理（图5）模块的主要功能是获取模式数据与格点实况数据并提取信息，配合加工流水线任务调度子系统自动实现模块功能，其中模式数据每日获取当天00时和12时（世界时）起报的模式数据并进行预处理，格点实况数据则为每小时获取及预处理。另外，与站点实况数据获取模块相同，该模块结合加工流水线任务调度子系统对获取的

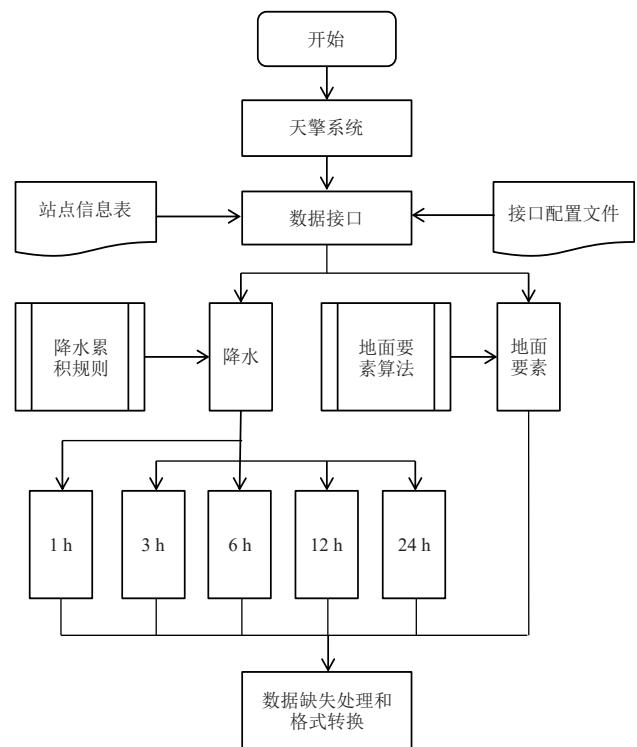


图3 站点实况数据获取流程图

Fig. 3 Flow chart of real-time data acquisition at stations

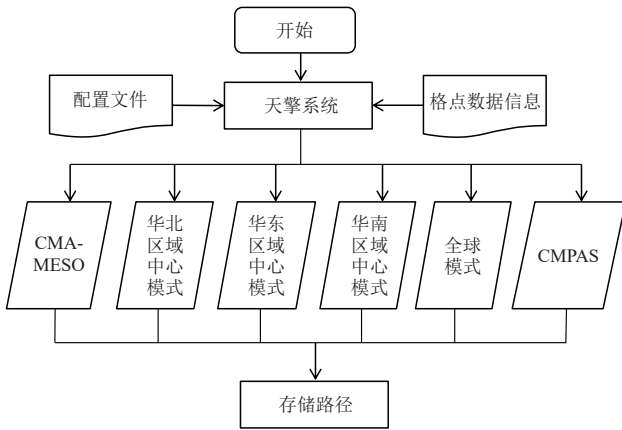


图4 格点数据获取流程图

Fig. 4 Flow chart of grid data acquisition

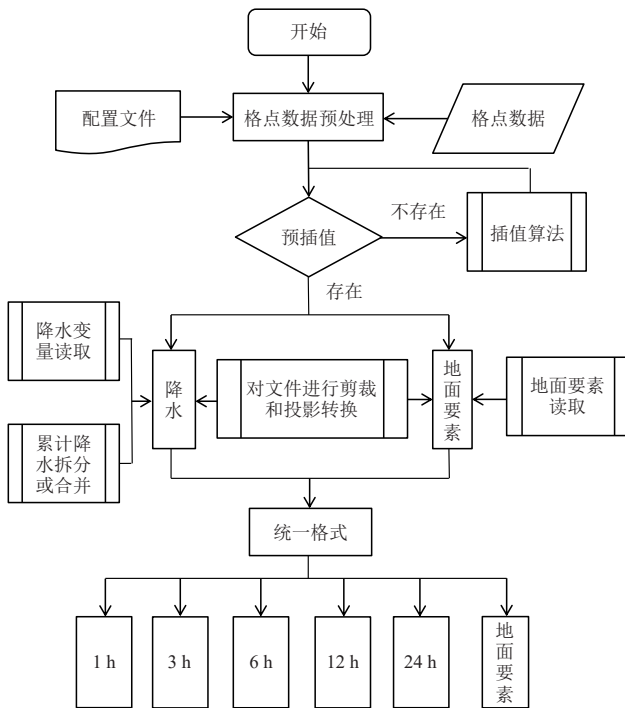


图5 模式预处理流程图

Fig. 5 Flow chart of numerical weather prediction model pretreatment

数据进行完整性监控，定时补充缺失数据并完成预处理。

数据获取来源为气象大数据云平台存储与服务系统，目前开展10个天气预报模式系统的检验评估工作，包括中国气象局地球系统数值预报中心研发的中国气象局中尺度天气数值预报系统（CMA-MESO）、华北区域中心研发的中国气象局北京快速更新循环数值预报系统（CMA-BJ 3 km和9 km）、华东区域中心研发的中国气象局上海数值预报模式系统（CMA-SH9）和中国气象局上海快速更新同化数值预报系统（CMA-SH3）、华南区域中心研发的中国气象局广东快速更新

同化数值预报系统（CMA-GD）和中国气象局南海台风数值预报系统（CMA-TRAMS）共7个区域数值天气模式系统，以及中国气象局全球同化预报系统（CMA-GFS）、欧洲中期天气预报中心全球数值地球系统模式（ECMWF）、美国全球天气预报系统（GFS）共3个全球天气预报模式。格点实况数据采用国家气象信息中心制作的中国区域地面-卫星-雷达三源融合降水格点分析产品（CMA Multi-source merged Precipitation Analysis System, CMPAS）。

模式及格点观测数据预处理模块针对上述获取到的数据进行解析、裁剪插值以及输出。其目的就是提取预报模式或格点观测数据中检验评估系统所需数据信息，减少检验评估过程中冗余数据读取，并利用模式样例文件降低数据预处理时长，做到计算资源与存储资源的合理分配。在模块运行前，预先设置系统配置信息，主要包括各个模式的裁剪范围、分辨率、起报时间间隔等内容。根据配置信息生成各个模式的插值文件，系统在运行数据剪裁及投影变化时会预先加载对应模式的插值文件，读取模式样例文件获取模式网格点经纬度信息，对比模式区域的裁剪范围进行裁剪插值，并对裁剪中超出模式本身范围区域进行识别，最终输出预处理结果。

1.3 模式检验评估算法子系统

该子系统是区域高分辨率数值预报检验评估系统的核心部分，其中包含对预处理后的数值预报产品进行传统降水评分计算、近地面要素评分计算、空间邻域法检验，最后利用传统检验中系统生成的站点降水信息开展降水过程分析计算（图6）。

传统降水评分计算、近地面要素评分计算及空间邻域法检验的计算基于美国国家大气研究中心数值预报发展试验中心研发的数值预报检验评估工具MET（Model Evaluation Tools）。MET工具提供了丰富的站点、格点数据接口程序，它的核心组件集成了多种先进模式检验评估算法。评估工具使用的模式数据和实况数据分别来自模式及格点观测数据预处理模块和站点实况数据获取模块，采用定时调度的方式控制检验流程。传统降水评分和近地面要素评分将模式预报数据按邻近点方法取值到观测站点后进行对比与统计分析。利用预先设置的配置文件调用评估工具不同算法完成降水、地面要素及空间邻域检验工作。降水检验结果包括逐3、6、12和24 h降水累计等；地面要素检验结果包括温度、相对湿度和风速等；空间邻域检验包括分数技巧评分（FSS）、FSS热力图、渐进分数技巧评分等。

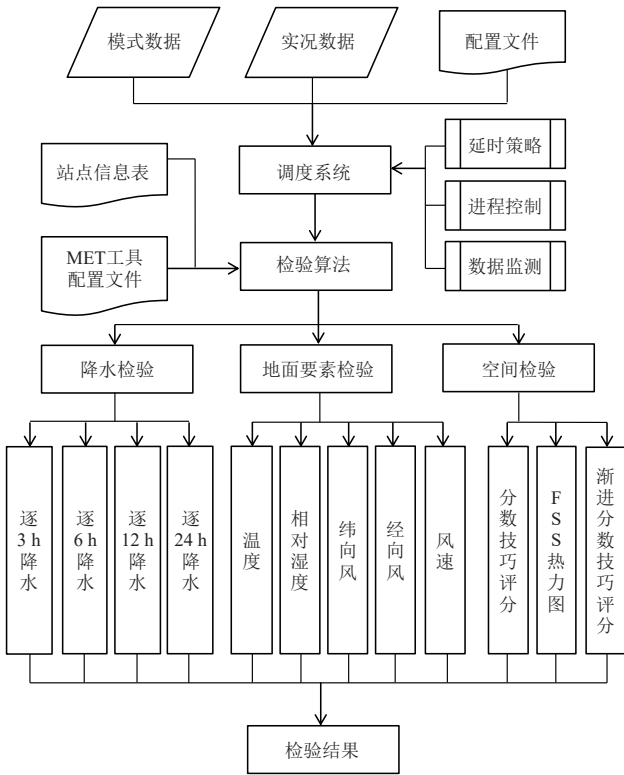


图6 检验评估算法流程图

Fig. 6 Flow chart of verification and evaluation algorithm

降水过程检验基于评估工具输出的站点降水数据诊断文件，通过分析某一特定时间段内降水过程的数值预报产品数据，得到其日变化特征、频次-强度特征和开始结束时间特征等，并与实况数据开展对比。日变化特征为针对完整的24 h序列中逐3 h的平均降水量、平均降水频次以及平均降水强度，分析其峰值时间分布和日振幅分布。将降水按照强度进行区间划分，统计每个区间内的平均降水频次、平均降水量，按照拟合公式进行频次-强度以及降水量-强度特征分析。统计24 h序列里降水事件在不同时刻开始/结束的次数，得出降水最易开始/最易结束时间特征。

1.4 加工流水线任务调度子系统

加工流水线任务调度子系统基于气象大数据云平台加工流水线开发，其功能是配置数据获取子系统与模式检验评估算法子系统的作业任务。利用云平台加工流水线特点，实现算法任务的定时执行，分时段合理调配计算节点，避免出现计算资源饱和，确保检验评估系统稳定运行。加工流水线任务调度子系统除了对数据获取子系统开展数据缺失补充外，还会根据数据实时监控情况针对模式检验评估算法子系统开展检验结果的定期补充生成，确保模式检验结果的完整性。另外，加工流水线任务调度子系统具备人机交互

功能，可随时根据需求更新作业任务目录。

1.5 评估结果入库子系统

评估结果入库程序主要功能是对实时计算生成的结果文件进行解码入库处理，便于后续评估结果的在线展示读取数据。模式检验评估算法子系统定时生成评估结果并统一数据格式，入库子系统实时扫描预先设置的结果存储路径，当出现指定数据格式的文件时便将其解码入库，入库时检查数据记录唯一性，并配合“天镜”系统对模式检验评估结果入库的完整性进行全面监控。文件入库后，系统自动将结果文件移出数据缓存区，降低缓存区负荷，避免出现数据存储空间不足的现象。

1.6 评估结果展示子系统

评估结果展示子系统的主要功能是将入库后的检验评估结果数据实时显示在气象业务内网上。针对降水传统检验、近地面要素检验、空间邻域法检验、降水过程检验等不同检验结果以及单模式和多模式不同维度的展示，评估结果展示子系统配置相应的数据服务接口，基于气象业务内网实现检验评估结果的在线实时可视化展示。检验评估结果能够实现任意时段在线统计，配置相应的数据统计模块，实现动态在线实时统计计算和结果的图表展示功能。降水传统检验结果实时展示预报技巧评分、公平技巧评分、空报率、漏报率、预报偏差、评分综合展示图等内容的可视化展示。近地面要素检验结果实时展示实现温度、相对湿度、纬向风、经向风、风速等近地面要素的均方根误差、平均误差、平均绝对误差、偏差等内容的可视化展示。空间邻域法检验结果实时展示分数技巧评分、分数技巧评分热力图、渐进分数技巧评分等内容的可视化展示。降水过程检验结果实时展示降水过程频次分布特征、强度分布特征、降水量随强度分布、频次随强度分布、峰值时间分布、日振幅分布、日变化曲线、最易开始时间、最易结束时间等内容的可视化展示。检验结果展示数据均可通过网页下载。

此外，降水过程检验评估基于在线地图展示针对频次-强度特征、日变化特征、事件起止特征等，使用网页地理信息服务及海量点渲染引擎等技术实现相关检验评估指标的在线地图展示功能，并提供地图放大、缩小、拖拽等地理信息系统功能。

2 未来展望

区域高分辨率数值预报检验评估系统为促进区域模式改进和高分辨率数值预报产品的偏差理解提供了重要参考，特别是降水过程检验评估结果为理解区域数值预报的模拟能力及其偏差提供了新的视角。在未

来, 面向区域高分辨率数值预报产品应用与无缝隙精细化预报能力提升的业务需求, 区域高分辨率数值预报评估检验系统会继续开展改进升级工作。

1) 考虑高分辨率模式强降水预报检验的重点, 以逐1 h或3 h降水为主, 开展强降水过程发展演变的模式预报评估方法研究, 提炼对降水过程空间形态(如面积、质心位置、轴向等)的适用检验指标, 研发适用于高分辨率模式独立检验业务的空间检验方法。

2) 在认识强降水时空演变观测特征和模式模拟关键偏差的基础上, 研发强降水空间精细化特征的定量评估方法, 以及降水演变过程特征的评估方法。结合业务观测资料和外场观测试验, 研究针对强降水过程演变特征的评估方法, 考察降水事件起止时间、强度、影响范围、时空特征等在不同强降水过程评估中的应用方法。

3) 研究不同尺度影响下的降水预报偏差, 探讨模式强降水空间分布及时间演变与地形因子的关联^[26], 完善考虑地形影响的模式检验评估方法。

参考文献

- [1] Yu R C, Li J, Jia P Q. Development of operational weather forecasting shaped by the “Triple-In” properties of numerical models[J]. WMO Bulletin, 2019, 68(2): 56-62.
- [2] 张小玲, 杨波, 盛杰, 等. 中国强对流天气预报业务发展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(3): 8-18.
- [3] 王毅, 周庆亮, 代刊, 等. 全球数据处理和预报系统发展及展望[J]. 气象科技进展, 2019, 9(2): 9-10.
- [4] 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2019, 45(4): 445-457.
- [5] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES Meso V4.0主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 25-37.
- [6] 卢冰, 孙继松, 仲跻芹, 等. 区域数值预报系统在北京地区的降水日变化预报偏差特征及成因分析[J]. 气象学报, 2017, (2): 58-69.
- [7] 徐同, 李佳, 杨玉华, 等. SMS-WARMS V2.0模式预报效果检验[J]. 气象, 2016, 42(10): 1176-1183.
- [8] 徐道生, 张艳霞, 张诚忠, 等. 华南区域高分辨率模式中不同雷达回波反演技术方案的比较试验[J]. 热带气象学报, 2016, 32(1): 9-18.
- [9] Mittermaier M, Roberts N. Intercomparison of spatial forecast verification methods: identifying skillful spatial scales using the fractions skill score[J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(1): 343-354.
- [10] Casati B. New developments of the intensity-scale technique within the Spatial Verification Methods Intercomparison Project[J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(1): 113-143.
- [11] Marzban C, Sandgathe S, Lyons H, et al. Three spatial verification techniques: cluster analysis, variogram, and optical flow[J]. Weather and Forecasting, 2009, 24(6): 1457-1471.
- [12] Ebert E E, Gallus Jr W A. Toward better understanding of the contiguous rain area (CRA) method for spatial forecast verification[J]. Weather and Forecasting, 2009, 24(5): 1401-1415.
- [13] 陈昊明, 李普曦, 赵妍. 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望[J]. 气象科技进展, 2021, 11(3): 155-164.
- [14] Liang X Z, Li L, Dai A, et al. Regional climate model simulation of summer precipitation diurnal cycle over the United States[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(24): L24208.
- [15] Dai A. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models[J]. Journal of Climate, 2006, 19(18): 4605-4630.
- [16] Zhang Y, Chen H M. Comparing CAM5 and superparameterized CAM5 simulations of summer precipitation characteristics over continental East Asia: mean state, frequency-intensity relationship, diurnal cycle, and influencing factors[J]. Journal of Climate, 2016, 29(3): 1067-1089.
- [17] 孙鑫. 高分辨率快速循环同化预报系统在内蒙古地区汛期预报性能检验和评估[J]. 内蒙古气象, 2014(5): 3-7.
- [18] Yu R C, Zhang Y, Wang J J, et al. Recent progress in numerical atmospheric modeling in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(9): 938-960.
- [19] Chen H M, Yu R C, Li J, et al. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River valley[J]. Journal of Climate, 2010, 23(4): 905-917.
- [20] Li J, Yu R C. A method to linearly evaluate rainfall frequency-intensity distribution[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2014, 53(4): 928-934.
- [21] Li J, Yu R C, Yuan W H, et al. Precipitation over East Asia simulated by NCAR CAM5 at different horizontal resolutions[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015, 7(2): 774-790.
- [22] Chen H M, Yu R C, Wu B Y. FY-2C-derived diurnal features of clouds in the southern contiguous China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117: D18101.
- [23] Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: a comparison of satellite data with rain gauge observations[J]. Journal of Climate, 2008, 21(16): 3997-4010.
- [24] Yu R C, Li J, Chen H M, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28: 877-902.
- [25] 刘媛媛, 何文春, 王妍, 等. 气象大数据云平台归档系统设计及实现[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 697-706.
- [26] 徐安伦, 张万诚, 李建, 等. 复杂山地气象观测试验研究综述[J]. 气象科技进展, 2022, 12(2): 13-20.

(编辑: 卢冰)

(上接31页)

- system[R]. Lisbon, 2022.
- [6] WMO. Designated WIPPS centres[EB/OL]. Geneva, 2023. <https://wmo.maps.arcgis.com/apps/dashboards/7c3d45e5003a417988bad63e91ad8748>
- [7] WMO. Cg-19 world meteorological congress abridged final report of the nineteenth session: 1326[R]. Geneva, 2023.
- [8] WMO. WMO strategic plan 2024 - 2027: WMO-No. 1336[R]. Geneva, 2023.
- [9] WMO. Evolution of the WMO integrated processing and prediction system: a roadmap for 2022 - 2026: INF. 4.2(6)[R]. Geneva, 2023.
- [10] WMO. WIPPS dashboard[EB/OL]. Geneva, 2023. <https://community.wmo.int/en/activity-areas/wmo-integrated-processing-and-prediction-system-wipps>
- [11] ECMWF annual report[R]. Bracknell, 2023.
- [12] ECMWF strategy 2021 - 2030[R]. Bracknell, 2020.
- [13] Met Office. Embedding machine learning and artificial intelligence in weather and climate science and services[R]. Devon, 2022.
- [14] NOAA. Weather Program Office (WPO). Weather program office strategic plan fiscal years 2022 - 2026[R]. Washington, 2022.
- [15] JMA's NWP strategic plan toward 2030[R]. Tokyo: Japan Meteorological Agency, 2018.

(编辑: 郑秋红)

2021年岳阳一次混合强对流天气过程成因分析

陈姣荣^{1, 2, 3} 阮能^{1, 2, 3} 尹依雯^{1, 2, 3} 许丽丽^{1, 2, 3} 袁泉^{1, 2, 3} 黄天赐^{1, 2, 3}

(1 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118; 2 洞庭湖国家气候观象台, 岳阳 414000; 3 岳阳市气象局, 岳阳 414000)

摘要: 应用常规气象资料、NCEP逐6 h、逐3 h (空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$) 再分析资料和雷达资料等, 对2021年5月15日湖南省岳阳市的一次混合型强对流天气过程演变及特征进行分析, 并对极大风与强降水中心位置不同进行了简要分析。结果表明: 两槽一脊的环流形势下, 南支槽、低涡、切变线、冷空气渗入地面倒槽等是天气尺度影响系统; 水汽的强烈输送和辐合、“上干冷、下暖湿”的不稳定层结、强垂直风切变是这次强对流天气的有利环境条件。雷达回波的形态特征如三体散射、中气旋、“V”型缺口、中层径向辐合(MARC)、VIL跃增、列车效应等特征对分析和识别强对流天气的种类及强对流天气预警的发布具有重要指示意义。极大风与强降水中心出现位置的不同与水汽辐合的中心位置、垂直运动的强弱以及不稳定能量条件差异有关, 与洞庭湖大型水体和临湘东部山区地形的阻挡作用关系密切。

关键词: 强对流, 环流形势, 环境条件, 雷达回波特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.006

Cause Analysis of a Mixed Severe Convective Weather Process in Yueyang in 2021

Chen Jiaorong^{1, 2, 3}, Ruan Neng^{1, 2, 3}, Yin Yiwen^{1, 2, 3}, Xu Lili^{1, 2, 3}, Yuan Quan^{1, 2, 3}, Huang Tianci^{1, 2, 3}

(1 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410118; 2 Dongting Lake National Climate Observatory, Yueyang 414000; 3 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: Using conventional meteorological data, NCEP 6-h and 3-h reanalysis data (spatial resolution of $1^\circ \times 1^\circ$) and radar data, the evolution and characteristics of a mixed severe convective weather process in Yueyang City, Hunan Province on 15 May 2021 are analyzed, and a brief analysis of different locations for the extreme wind speed and the heavy rainfall center is carried out. The results show that, under the circulation situation of two troughs and one ridge, the southern branch trough, the low vortex, the shear line, and the cold air infiltration into the ground inverted trough are the synoptic-scale influence systems; the strong transportation and convergence of water vapor, the “upper dry and cold, lower warm and wet” unstable stratification, and strong vertical wind shear are the favorable environmental conditions for this strong convective weather. The morphological characteristics of radar echo, such as three body scattering, mesocyclone, V-notch, mid-level radial convergence (MARC), VIL jump, and train effect are of great significance for the analysis and identification of different types of severe convective weather as well as for the release of severe convective weather warning. The fact that the extreme wind speed and the heavy rainfall center occur at different positions is related to the central position of water vapor convergence, the vertical motion intensity and the difference in the unstable energy conditions. It is also connected to the blocking effect of Dongting Lake, the large water body, and the eastern mountainous areas of Linxiang.

Keywords: severe convection, circulation situation, environmental conditions, radar echo characteristics

0 引言

强对流天气春夏多发, 具有突发性强、发展迅速、极端性强、致灾风险大等特点, 容易导致各类灾害的发生, 是预报员在业务工作中面临的挑战和难题^[1-3]。近年来, 在强对流预报预警方面有大量的分析与研究^[4-6], 气象工作者在短时临近预报预警服务中积累了不少经验, 特别是从雷达回波特征及卫星云图特

征等方面提炼总结, 从天气学角度分析探讨, 并在动力、水汽、不稳定能量等方面开展潜势预报^[7-10]。许爱华等^[11]、郑媛媛等^[12]、庞古乾等^[13]在概念模型、卫星云图特征、形成机理、物理量诊断、潜势预报等方面进行了研究和提炼, 还有不少学者对强对流天气的发展演变过程开展了数值模拟研究^[14-19]。

春夏季是湖南强对流天气多发的季节, 强对流天气的地域特征明显, 各地发生强对流天气过程时, 大气对流参数阈值也有明显差异。混合强对流天气的预报更是预报员面临的难题和挑战, 对于混合强对流的预报预警提前量和准确率均有待提高^[1, 2, 3]。因此,

收稿日期: 2022年8月18日; 修回日期: 2023年2月13日

第一作者: 陈姣荣(1976—), Email: 55062510@qq.com

资助信息: 湖南省气象局2020年重点课题(XQKJ20CA005)

很有必要针对本区域的强对流天气进行分析和研究。2021年5月15日湖南岳阳出现了冰雹、雷雨大风和短时强降水3种不同类型的强对流天气，点多面广、极端性强，造成该次如此剧烈天气的环境条件如何？可能的成因是什么？本文将利用常规气象资料、NCEP逐6 h（空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ）再分析资料及雷达资料，对此次强对流天气过程的天气形势演变、物理量条件进行分析，以期增强对强对流天气成因的认识，并对冰雹、雷暴大风、短时强降水3种强对流天气的雷达回波特征进行探讨，旨在为本地强对流天气监测、预报、预警和服务提供参考依据。

1 天气实况和灾情

此次影响岳阳的强对流天气过程出现在2021年5月15日08时—16日08时（北京时，下同）。根据强对流发展演变，可分为三个阶段：第一阶段为5月15日13—15时，以冰雹和雷暴大风为主，主要影响区域为岳阳市中北部的岳阳市区、云溪区、临湘市中南部等地；第二阶段为5月15日15—19时，仍以雷暴大风和冰雹为主，强对流自西向东影响岳阳县全境及临湘市大

部，部分站点出现短时强降水；第三阶段为5月15日19时—16日02时（最强为15日19—22时），强对流从沅江附近的东洞庭湖面开始向东北和东南两个方向发展，以雷暴大风和短时强降水为主，强对流再次影响岳阳县全境和临湘中南部，湘阴县、汨罗市、平江西部也受到不同程度的影响。

根据区域站监测及收集的实况统计（图1），此次过程岳阳市共有19站次极大风速达 17.2 m/s （风力等级8级）以上，6站次达 20.8 m/s （9级）以上，3站达 24.5 m/s （10级）以上，其中最大风力达12级（岳阳县中洲站，风速为 36.9 m/s ），创岳阳市有气象观测记录以来历史极值，湖南省第二大值；临湘市、岳阳县、云溪区、君山区、湘阴县均出现冰雹，最大冰雹直径达 3 cm （岳阳县公田镇，发生时间为15日17时）；24 h全市累计降水量 $\geq 100 \text{ mm}$ 的有13站， $\geq 50 \text{ mm}$ 的有103站，最大累计降水量达 168.2 mm （临湘龙源站），全市有152个站达到短时强降水标准，最大小时雨强为 $58.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ （君山穆湖铺，发生时间为15日18—19时）。

气象灾害管理系统的灾情统计数据（来源于岳阳

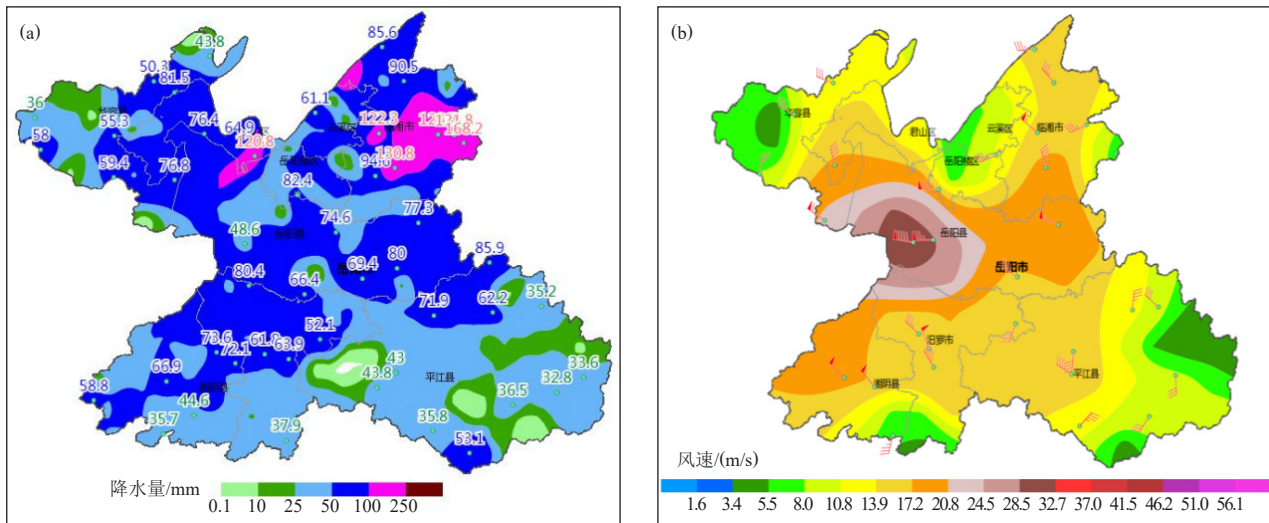


图1 2021年5月15日08时—16日08时岳阳降水量(a)和极大风速(b)分布

Fig. 1 Distribution of precipitation (a) and extreme wind speed (b) in Yueyang from 08: 00 BT on May 15 to 08: 00 BT on May 16, 2021

市应急管理局)显示，此次过程受灾严重，特别是受大风、冰雹灾害影响严重，以房屋倒塌、农作物及树木受损为主。

2 环流形势演变

图2a和图2b分别为5月15日08时和5月15日20时500 hPa高度场叠加风场的环流形势。15日08时，500 hPa欧亚中高纬为两槽一脊，中低纬南支槽东出，副热带高压（以下简称副高）西伸脊点达到 95°E 附近，具有东高西低的形势，是湖南容易出现强对流天气的

形势之一，到15日20时，副高西脊点有所东撤，北支和南支槽均有增强加深，北支槽带来的冷平流与南支槽前、副高西北侧的西南风带来的暖湿气流在湖北和湖南的交界区有明显交汇。图3a和图3b分别为5月15日08时和5月15日20时各层影响系统综合图。15日08—20时，700 hPa和850 hPa都存在明显的西南风急流（最大超过 24 m/s ），为两湖地区持续输送不稳定能量和充沛的水汽，700 hPa低涡位置较为偏北，但850 hPa低涡的位置由川渝地区南掉至贵州地区，湘北

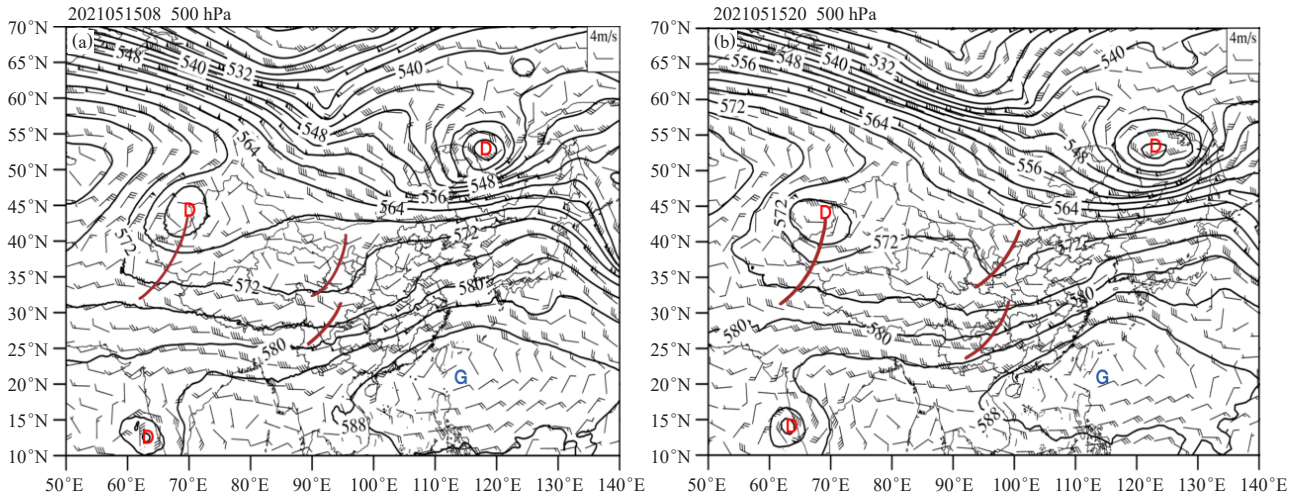


图2 2021年5月15日08时 (a) 和20时 (b) 500 hPa环流形势
Fig. 2 500 hPa circulation situation at 08: 00 BT (a) and 20: 00 BT (b) on May 15, 2021

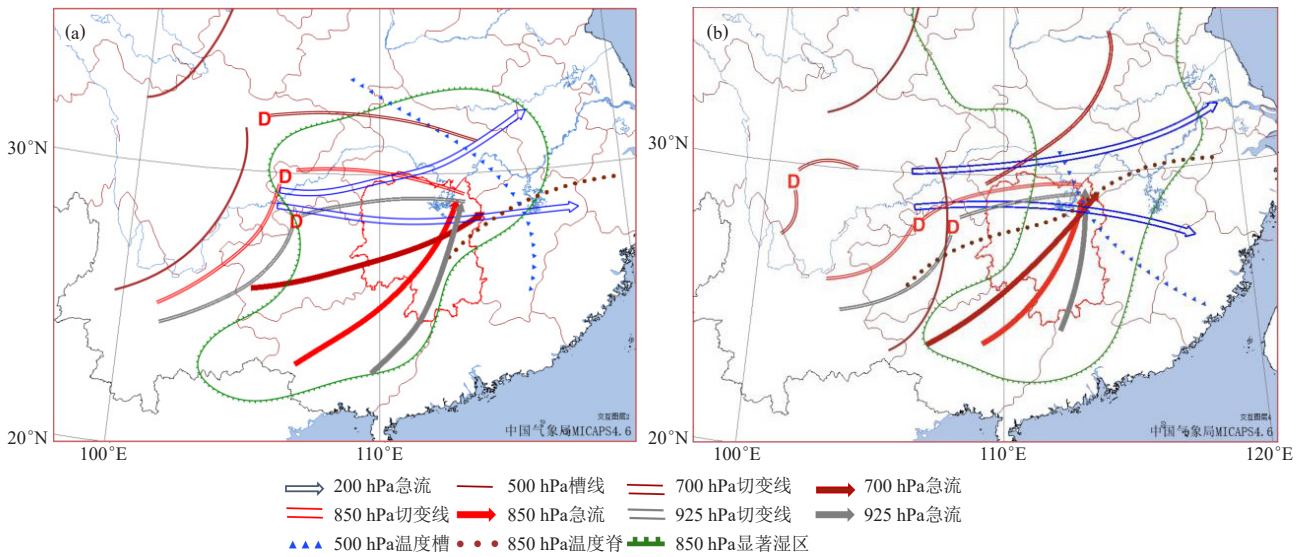


图3 2021年5月15日08时 (a) 和20时 (b) 各层影响系统综合图
Fig. 3 Comprehensive diagram of each layer's impact system at 08: 00 BT (a) and 20: 00 BT (b) on May 15, 2021

地区位于切变南侧的西南急流中，且中低层切变位置较为重合，进一步增强了上升运动。925 hPa，15日08时江淮地区为低值系统影响，超低空南风急流建立，长沙站最大风速超过18 m/s，为湘北地区持续输送不稳定能量，来自南海的水汽通道带来了充沛的水汽供应，低涡切变东伸至湘北地区，整个湘北地区处于风速风向辐合区；到15日20时，虽然江南地区仍为低值系统影响，但淮河及江北地区已有明显的北风入侵，由等温线也可以看出有冷平流的影响（图略），超低空南风急流强盛（长沙为18 m/s）且维持，而武汉站仅为4 m/s的东南风，风向风速的强烈辐合维持在湘北—鄂东南地区，且从安徽—湖北、贵州—湘北地区有宽广的切变维持，强烈的上升运动加之充沛的水

汽及不稳定能量输送，有利于强对流的发生发展。此外，200 hPa高空急流分流区从15日08—20时，自湘北—鄂南地区东移到湘东北—赣北上空，且随着时间推移分流辐散更加明显，强烈的抽吸作用有利于上升运动的加强和维持。

从地面气压场可知（图略），15日08时江淮流域为低压倒槽影响，14时前晴空辐射增温明显，地面气温升至34℃，大气不稳定能量聚集，到15日20时，川渝—湖北地区等压线明显变密，北部冷高压向东南方向移动，湘北一带开始有冷空气渗透影响，地面倒槽锋生。根据NCEP逐3 h再分析资料（空间分辨率为1°×1°）分析地面辐合线的演变可知（图4），5月15日14时左右，在常德—华容地区已有弱的辐合线生成，

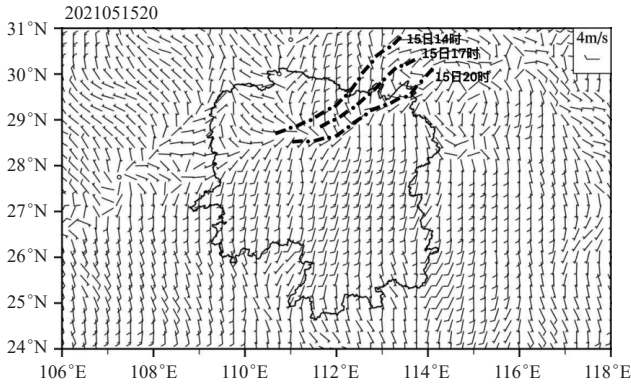


图4 2021年5月15日14—20时地面辐合线演变和20时风场
Fig. 4 Evolution of the ground convergence line from 14: 00 BT to 20: 00 BT and wind field at 20: 00 BT on May 15, 2021

实况证明此区域在14时前后有局地对流的发生，而15日17—20时地面辐合线稳定维持在洞庭湖地区，此时段也是强对流发生发展最强烈的时段。

3 物理量诊断

利用NCEP逐6 h再分析资料（空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ）对5月15日强对流天气过程水汽、动力以及层结等进行物理量诊断分析。下文中，物理量的时

间-高度图均选取出现多种强对流天气的临湘市龙源站（ 113.0°E ， 29.0°N ）进行分析。

3.1 水汽条件

5月15日08时随着西南急流的加强，低层（850 hPa、925 hPa）水汽通量不断加强，岳阳市上空的水汽通量辐合区也逐渐加强。分析925 hPa的水汽通量和水汽通量散度（图5）可见，5月15日14—20时岳阳市处于水汽通量的大值区，最大可达 $30 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ，水汽通量的辐合也明显增强，14—20时水汽通量辐合达到最大，为 $-5 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ，对应岳阳市中北部强对流发生的最强时段。15日20时后，随着冷空气的渗透，水汽通量大值区和辐合区开始逐渐南压；15日20时—16日02时强水汽通量辐合区仍位于岳阳市中南部，与晚上强对流发生的区域对应；16日02时后水汽通量大值区已南压至长沙一带，系统南压，岳阳市强降水天气减弱。

从临湘市龙源站相对湿度的时间-高度图（图略）上可知，500 hPa以下是相对湿度 $>60\%$ 的湿区，特别是5月15日08—20时850 hPa相对湿度 $>70\%$ ，而500 hPa以上存在相对湿度低值区（最小仅为30%），表

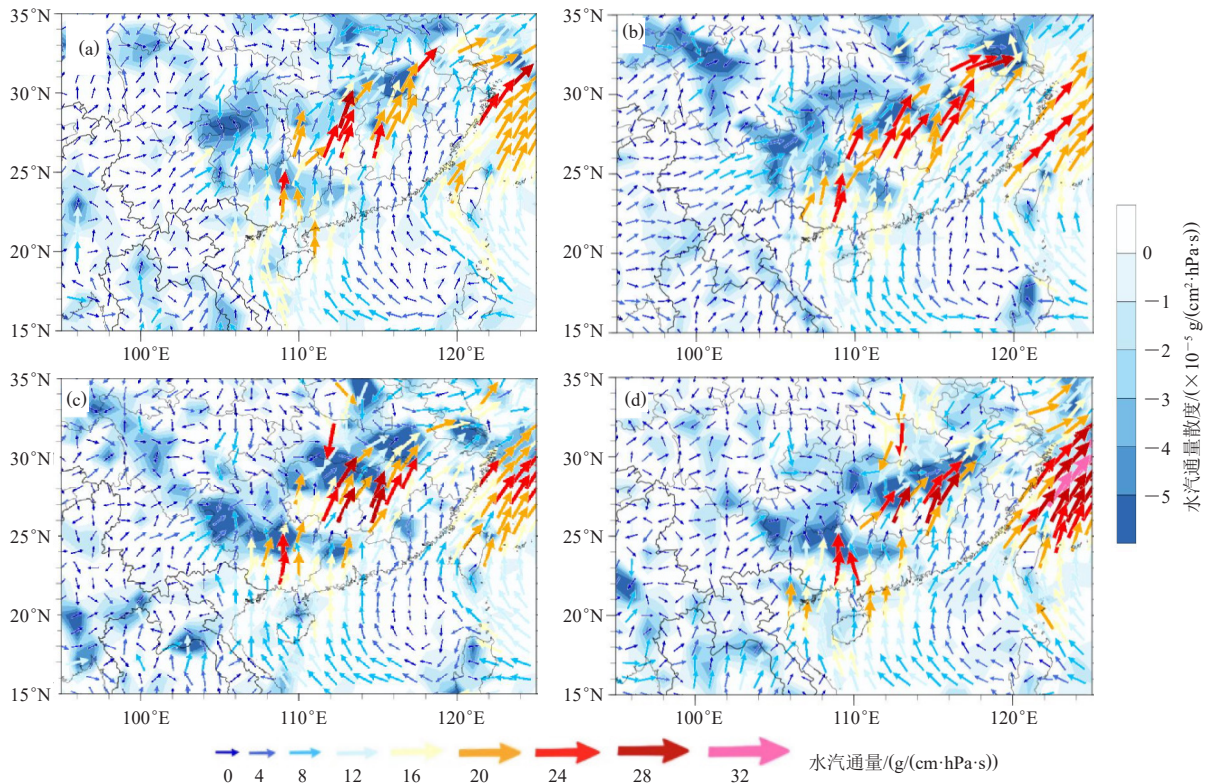


图5 2021年5月15日08时—16日02时925 hPa水汽通量和水汽通量散度叠加图
(a) 5月15日08时；(b) 5月15日14时；(c) 5月15日20时；(d) 5月16日02时

Fig. 5 Superposition diagram of 925 hPa water vapor flux and water vapor flux divergence from 08: 00 BT on May 15, to 02: 00 BT on May 16, 2021

(a) 08: 00 BT on May 15; (b) 14: 00 BT on May 15; (c) 20: 00 BT on May 15; (d) 02: 00 BT on May 16

明上层相对干、低层相对湿的层结分布有利于不稳定层结的建立，对应时段也出现了雷暴大风，14时之后转为整层湿，对应短时强降水天气。从5月15日14时沿113.0°E的比湿纬度-高度垂直剖面图可知，700 hPa以下比湿均>8 g/kg，850 hPa比湿>13 g/kg，且湿层增厚，是临湘龙源一带产生暴雨及大暴雨的主要原因之一。

3.2 动力条件

图6为此次岳阳强对流天气过程垂直速度和散度时间垂直剖面图。龙源站垂直运动的时间-高度图(图6a)显示，5月15日08时开始，低层逐渐转为负值区，表明转为上升运动，14时后上升运动进一步加强，对应地面的对流天气开始发展；15日14—20时从低层至100 hPa附近均为负值区，强烈的上升运动有利于强对流的维持和发展，该时段对应此次过程的最强时段，岳阳市上空垂直上升运动达-1.0 Pa/s；16

日02时，虽然高层上升运动达到最强，但是低层逐渐转为正值区，表明有下沉运动，对应实况强对流天气减弱。从散度的时间-高度图(图6b)可见，14日白天开始地面倒槽不断发展，对应低层负值区不断增大，辐合不断加强；15日08时，倒槽进一步发展，低层850 hPa附近及以下辐合区进一步增大，有利于上升运动的加强，14—20时近地面辐合达到最强，而400 hPa以上为辐散，低层辐合、高层辐散，动力抬升条件好，有利于垂直上升运动加强和维持。

3.3 层结条件

本文选取长沙站5月15日08时探空图(图7a)，从层结曲线的形状可以看出，呈向上开口的“喇叭状”，为“上干冷、下暖湿”的特征；0~6 km有较强的垂直风切变，达30.4 m/s，0~1 km同样存在较强的垂直风切变，同时抬升凝结高度较低，为798.2 m，有利于雷暴大风的发生；经订正后的CAPE值为1320.4 J/kg，热

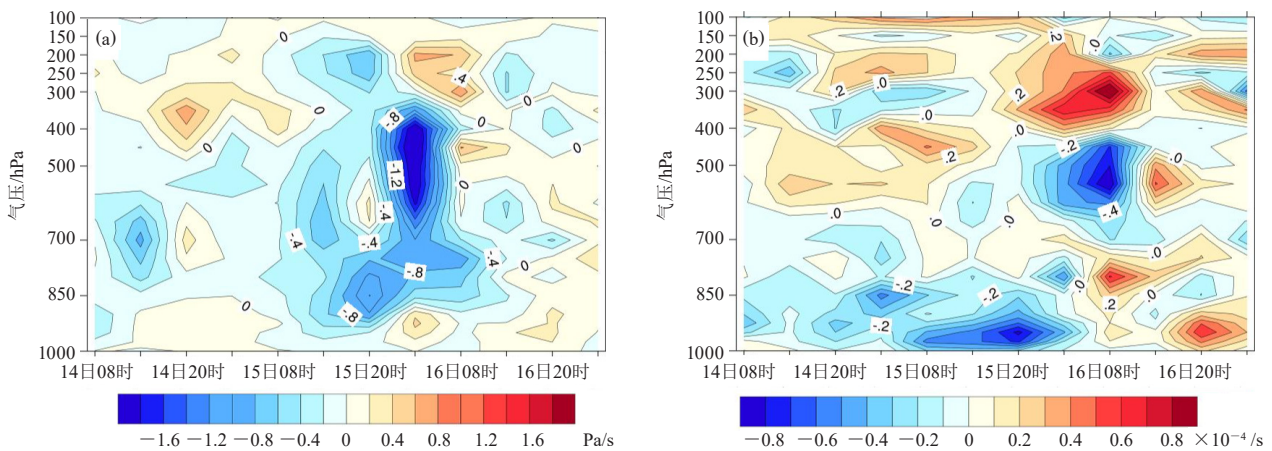


图6 2021年5月14—16日的垂直运动(a)和散度(b)沿113.0°E、29.0°N的时间-高度剖面图

Fig. 6 Time-height profile of vertical motion (a) and divergence (b) along 113.0°E and 29.0°N from May 14 to 16, 2021

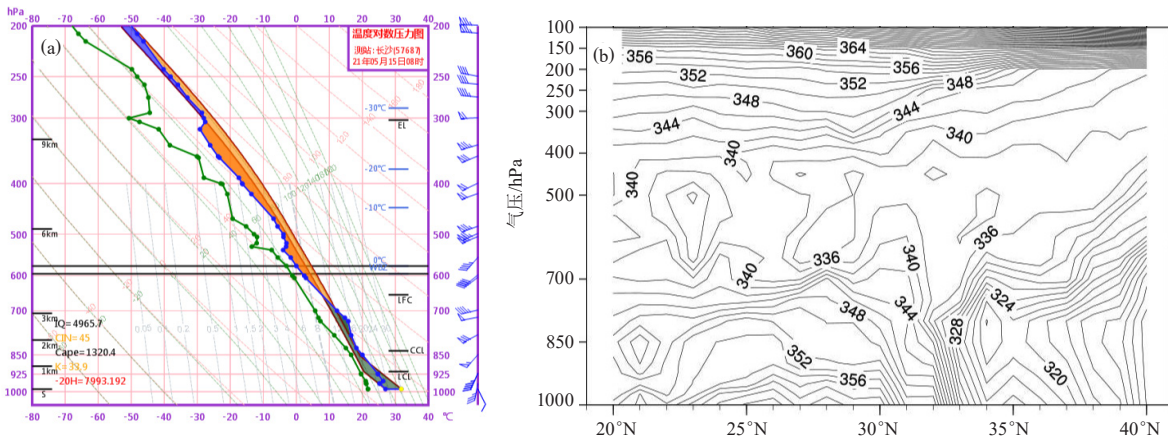


图7 2021年5月15日08时长沙站探空图(a)和5月15日14时假相当位温(b, 单位: K)沿113.0°E的纬度-高度图

Fig. 7 Sounding map (a) of Changsha Station at 08:00 BT on May 15, 2021 and latitude-altitude map of pseudo equivalent potential temperature (b, unit: K) along 113.0°E at 14:00 BT on May 15, 2021

力不稳定条件较好;同时0℃层和-20℃层高度合适,有利于冰雹的发生。由于上干下湿的层结、强垂直风切变和热力不稳定条件,20时前后,整层湿度加大(图略),不稳定条件维持,实况上先后出现了雷暴大风、冰雹、短时强降水等混合强对流天气^[20-21]。

5月14日白天开始,岳阳市上空假相当位温(θ_{se})随高度递减,条件不稳定层结逐渐形成。至15日14时(图7b),假相当位温线密集且随高度递减至500 hPa附近,条件不稳定特征明显。同时32°—33°N附近同样存在等温线密集区但是温度偏低,而32°N以南的温度高,表明该处为冷暖气团的交界面,即锋面所在的位置,由此可见此次过程发生在冷锋来之前的暖区中。

4 雷达回波特征

4.1 冰雹的回波特征

5月15日岳阳市多县市出现了冰雹,冰雹出现时段主要集中在14—18时,此时段内降雹点主要集中在岳阳市中部的岳阳县和东北部的临湘市,最大冰雹直

径达3 cm(岳阳县公田镇,发生于17时)。根据前文综合分析,大气环境条件满足的条件下,强回波垂直结构和上升气流强度等特征对冰雹天气很关键^[21]。因此,主要从基本反射率、反射率垂直结构和垂直液态水含量(VIL)等方面进行分析。

从5月15日16时30分1.5°基本反射率(图8a)来看,岳阳县东部甘田乡的强回波最大反射率达69.5 dBz,三体散射(TBSS)特征明显,同时,VIL>64.5 kg/m²,且在16时42分和16时47分超过70 kg/m²(图略)。对16时30分的单体作反射率垂直剖面(图8b),发现高悬垂的穹窿结构和有界弱回波区特征明显,而强的垂直风切变正是对流风暴悬垂结构的动力因子。-20℃层高度上的强回波对大冰雹的增长至关重要,从图8b可知,65 dBz强回波扩展高度超过10 km,即-20℃层高度(由图7a可知,约为7.9 km),有利于大冰雹的产生。实况上,17时岳阳县公田镇出现了直径3 cm的大冰雹。

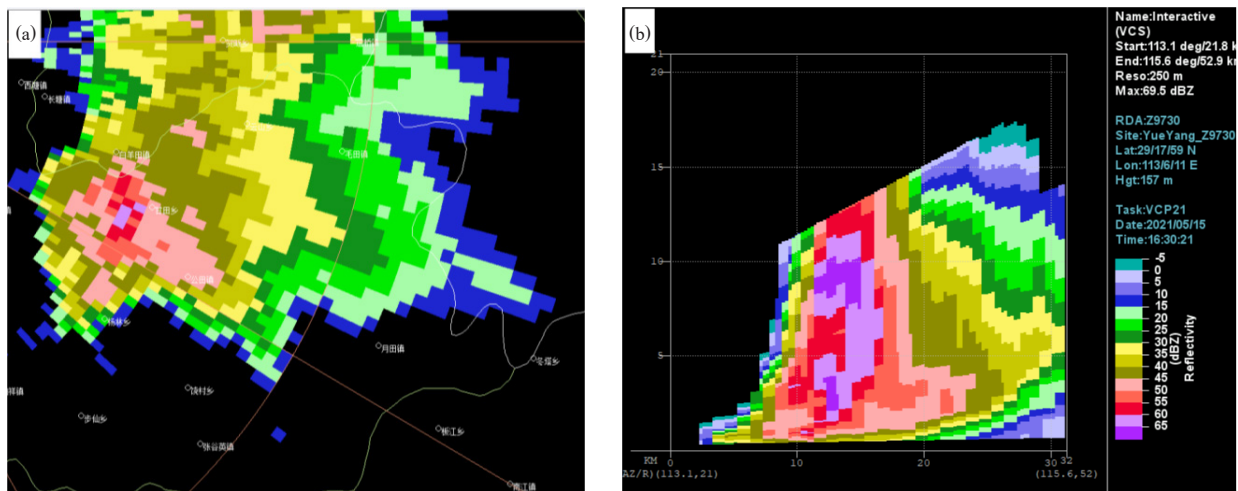


图8 2021年5月15日16时30分岳阳雷达1.5°基本反射率(a)和反射率垂直剖面(b)

Fig. 8 1.5° basic reflectivity (a) and reflectivity vertical section (b) of Yueyang Radar at 16: 30 BT on May 15, 2021

4.2 雷暴大风的回波特征

本次过程雷暴大风最强时段主要出现在5月15日20—21时,自西向东席卷岳阳市大部分地区。19时位于洞庭湖西岸的安乡、南县—汉寿一线等多个回波单体逐渐合并,强回波带已初步形成一条东北—西南向的弓形回波,并快速东移,在移至洞庭湖面时进一步激发增强,19时30分形成飊线,从1.5°径向速度(图略)看到,沅江一带中低层西南急流旺盛,风速超过27 m/s,有多个中气旋存在,回波前部边缘清晰,有“V”型缺口。其中从益阳沅江发展东移的强回波伴有中气旋,从19时54分到20时12分共持续了4个体扫,

为飊线内嵌的一个经典的超级单体。

从5月15日20时06分岳阳雷达站的径向速度(图9)可见,此时回波进一步加强,东移进入岳阳境内,飊线头部的强回波区猛烈发展,气旋性环流愈发清晰明显,中气旋垂直厚度约为7 km,中心最大风速超过45 m/s,对流组织性强。同时,从岳阳雷达组合反射率(图10a)看回波呈“S”型分布,飊线南段的前部和后部都有一个“V”型缺口,前部的“V”型缺口(A处)为暖湿入流,进入飊线主上升气流,后部的“V”型缺口(B处)为起源于飊线后侧中高层的后侧下沉气流,此两股气流在中层强烈辐合,导致下沉气流

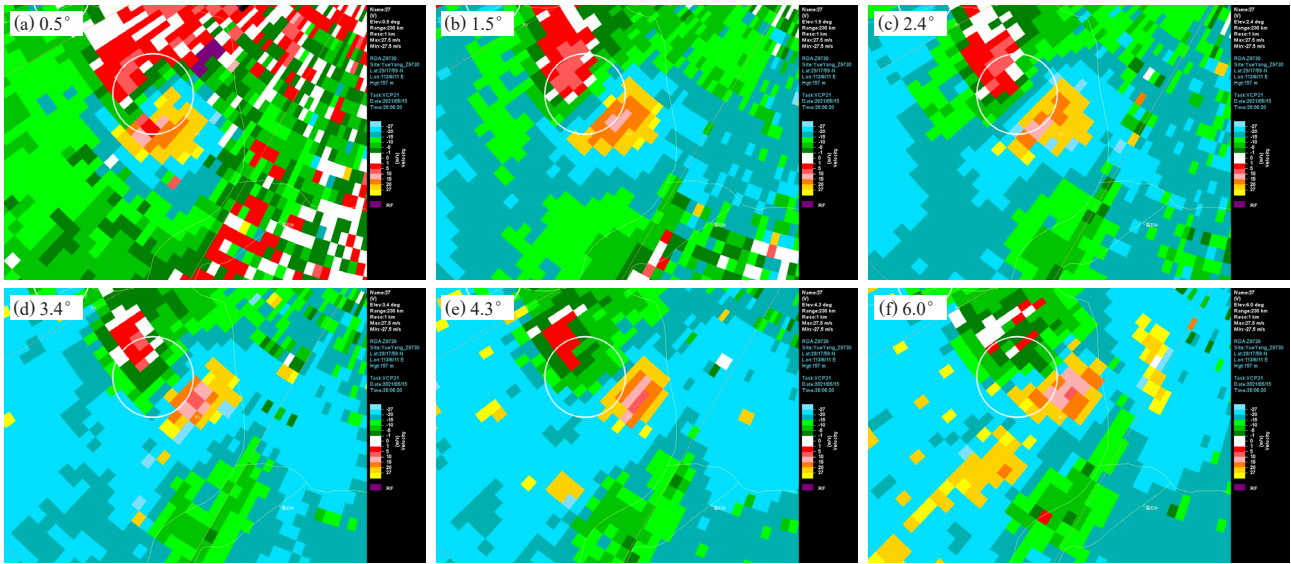


图9 2021年5月15日20时06分岳阳雷达0.5°~6.0°各仰角径向速度 (白色圆圈为中气旋)

Fig. 9 Radial velocities of 0.5°—6.0° elevation angles of Yueyang Radar at 20: 06 BT on May 15, 2021 (the white circle: mesocyclone)

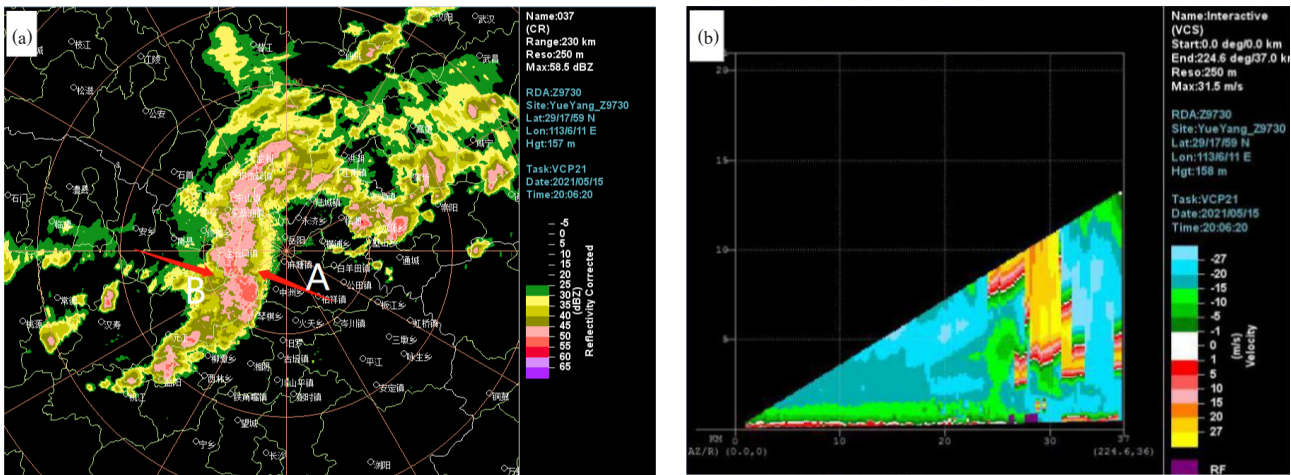


图10 2021年5月15日20时06分岳阳雷达组合反射率 (a) 和沿224°、36 km的径向速度垂直剖面 (b) (红色箭头所指为“V”型缺口区)

Fig. 10 Combined reflectivity (a) of Yueyang Radar and the vertical profile of radial velocity (b) along 224° and 36 km at 20: 06 BT on May 15, 2021 (the red arrow: pointing to “V” notch)

加速下沉，在飑线低层前沿形成辐散风^[22-23]。再看岳阳雷达站20时06分沿径向（起点为岳阳雷达站，剖面终点方位角为224°，径向距离为36 km）的速度剖面（图10b），也可以看出，离雷达约27~28 km内近地面风力较弱，为东北风，风速为5 m/s，岳阳北部地区地面有辐合线存在，地面辐合线的抬升触发使飑线维持发展。距离雷达28~30 km处，3~5 km高度处为强烈辐合，中层辐合高层辐散，抽吸作用明显，上升运动剧烈。距离雷达30 km附近为该垂直环流的下沉支，强烈的下沉气流形成猛烈的下击暴流，带来了影响岳阳东部县市的短时强降水和雷暴大风。受其影响，20时23分岳阳县中洲站出现了极大风速达36.9 m/s（12

级）的极端大风，创下岳阳有气象记录以来的大风极值。随后飑线向东快速移动，大风影响岳阳县全境、岳阳市区以及临湘市南部，历时1.5 h，21时开始减弱，21时30分东移出岳阳境内。

本次出现的极端大风，发生在强垂直风切变环境下，且有中层冷空气的卷入，岳阳县境内深厚的中气旋、较强的下沉气流与高空动量下传相结合，是岳阳县中洲站出现极端灾害性大风的重要原因。

4.3 短时强降水的回波特征

本次过程的强降水时段主要集中在5月15日15—22时，强降水落区主要集中在岳阳市中北部地区，其中临湘市强度最大。从5月15日19时13分组合

反射率(图11a)可见,影响岳阳市中北部地区的对流系统为多单体风暴,单体呈西南—东北向排列并向东北方向移动,具有明显的“列车效应”。从5月15日19时13分反射率垂直剖面(图11b)可见,多个单体具有

回波悬垂的特征,且单体的质心低,加上临湘东部山区地形的增幅作用,在临湘造成较长时间的强降水,15—22时临湘全市7小时累计降水量普遍>50 mm,>100 mm的有7个站,>150 mm的有2个站。

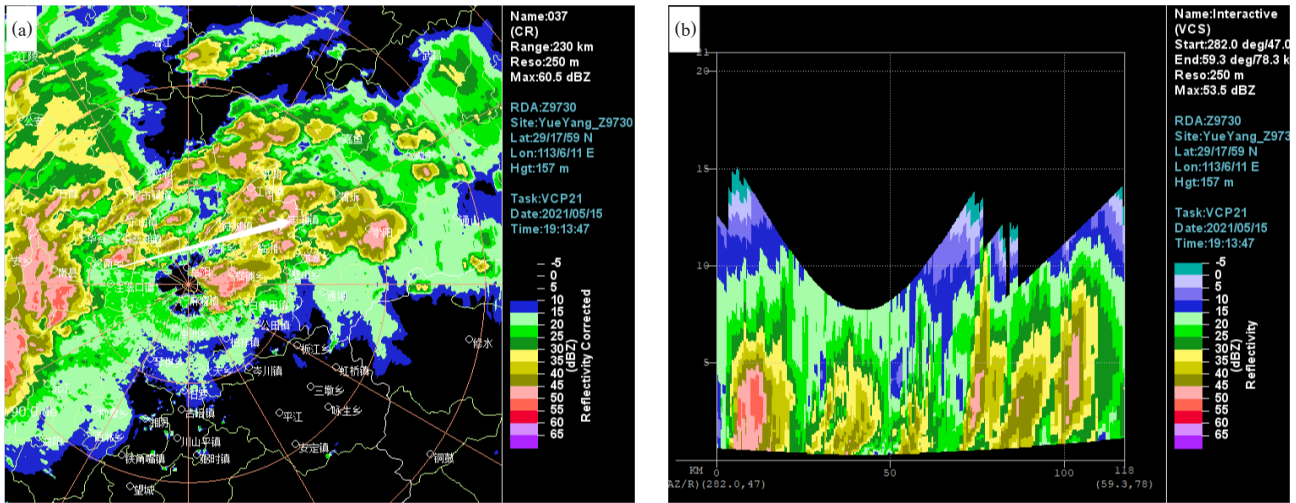


图11 2021年5月15日19时13分岳阳雷达组合反射率(a)和沿图a中白色箭头的反射率垂直剖面(b)

Fig. 11 Combined reflectivity (a) of Yueyang Radar and reflectivity vertical section (b) along the white arrow in Fig. 11a at 19: 13 BT on May 15, 2021

临湘的短时强降水是在“上干下湿”环境下转为“整层高湿”环境的条件下发生的,且临湘站处于低层强辐合、高层强辐散的区域,具备产生“列车效应”的环流配置,同时西南风从洞庭湖上源源不断地向其东北方向的临湘提供了水汽和不稳定能量,加上临湘东部山区地形的增幅作用,导致临湘境内出现了大范围大暴雨。此次强对流天气过程,前期的对流活动以冰雹和雷暴大风为主,后期以短时强降水为主,这种强对流天气类型的演变与水汽、温度等气象要素在垂直方向的层结变化有密切关系。

5 极大风与强降水中心位置偏差分析

从图1可知,本次过程的强降水中心出现在岳阳市东北部的临湘市龙源站,而极大风速中心出现在岳阳县西部的中洲站。根据前文分析可以发现,极大风速与强降水中心位置不同与水汽辐合的中心位置、垂直运动的强弱以及不稳定能量条件偏差有关。

水汽辐合的强中心在岳阳市东北部的临湘市,特别是5月15日14时之后水汽通量复合中心明显加强,湿层增厚扩展到600 hPa附近,且高层辐散与低层辐合形成抽吸作用,是临湘市产生暴雨的主要原因之一。除此之外,地形的增幅作用也是临湘市产生强降水的重要原因。位于临湘市东侧龙源乡的药姑山,海拔高度为1260 m,药姑山区范围广,坡度平缓,非常有利于气流的上升运动,加之洞庭湖蒸发的水汽正好由西南气流输送到药姑山区,因此临湘成为岳阳市暴雨最

易产生和暴雨强度最大的区域^[24]。本次过程西南气流强盛,水汽经洞庭湖进一步增强,源源不断地向东北方向输送,持续的上升运动和水汽辐合导致临湘龙源成为强降水的中心。

岳阳县中洲站出现极端灾害性大风的主要原因是强的垂直风切变和热力不稳定条件下,中层有冷空气的卷入,且有深厚的中气旋、较强的下沉气流与高空动量下传相结合。同时,极端大风也与洞庭湖大型水体有重要关系。由于中洲西靠洞庭湖,湖面摩擦力小,从益阳沅江境内生成的强风暴在湖面上快速东移,长驱直入进入中洲境内,加上湖陆热力的差异,对流在进入中洲境内时进一步激发和增强,故中洲站为本次过程极大风中心。风暴上岸后,在继续东移过程中由于能量的释放和陆地下垫面摩擦力增大,风力逐渐减弱。

6 结论

分析天气系统演变及其高低层配置、水汽条件、垂直运动、层结条件等对强对流天气潜势预报有指示意义;分析雷达回波特征对识别风暴发展阶段、强对流类型及发布预警信号有指示意义。

1) 本次强降水、强对流天气过程是发生在欧亚中高纬两槽一脊的环流形势下,南支槽、低涡、切变线、冷空气渗入地面倒槽等是天气尺度影响系统。水汽的强烈输送和辐合、“上干冷、下暖湿”的不稳定层

(下转53页)

伊宁市降水酸碱度变化趋势与气象因子的关系

王玲¹ 于桂花¹ 李金¹ 解帅¹ 苗运玲²

(1 伊犁州气象局, 伊宁 835000; 2 乌鲁木齐市气象局, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用1993—2020年伊宁市酸雨观测资料, 结合相关地面气象资料, 统计分析伊宁市pH值和电导率(K值)变化趋势, 研究其与气象因子的关系。结果表明: 近年来伊宁市年平均pH值呈波动下降趋势, 2003—2005年、2015—2020年已发展为轻酸雨区; 降水酸性在秋冬两季显著增强, 冬季降水pH值最低、酸雨发生概率最大; pH值在2002年发生由大到小的突变, 酸雨呈增多趋势; 年平均K值明显上升, 1997年发生由小到大的突变, 说明大气降水洁净程度降低, 污染呈增加趋势, 利于酸雨形成; 酸雨发生概率在小雨量级出现最大, 随雨量级增大呈显著下降趋势; 降水呈酸性时地面主导风向为偏西风, pH值与降水量呈负相关、与风速呈正相关, K值与降水量呈负相关、与风速呈负相关; 雾有利于增强降水酸度和酸雨发生概率; 硫化物排放量增大致使大气污染日趋严重, 酸雨发生概率呈上升态势。

关键词: 降水酸碱度, 气象因子, 伊宁市

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.007

Relationship between Precipitation pH Variation Trend and Meteorological Factors in Yining

Wang Ling¹, Yu Guihua¹, Li Jin¹, Xie Shuai¹, Miao Yunling²

(1 Ili Meteorological Bureau, Yining 835000; 2 Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi 830002)

Abstract: Using acid rain observation data from 1993—2020 in Yining, combined with relevant ground meteorological data, the trends of pH and conductivity (K value) in Yining were statistically analyzed to study their relationships with meteorological factors. The results show that the annual average pH value in Yining has been fluctuating and decreasing in recent years, and has developed into a light acid rain area during 2003—2005 and 2015—2020; moreover, the acidity of precipitation is significantly enhanced in autumn and winter, with the lowest pH value and the highest probability of acid rain in winter; the pH value changed abruptly from large to small in 2002, and the trend of acid rain increased accordingly; the annual average K value has been increasing significantly, with a sudden change from small to large in 1997, indicating a decrease in the cleanliness of atmospheric precipitation and an increasing trend of pollution, which is conducive to the formation of acid rain. The probability of acid rain is highest when light rain occurs, and decreases significantly with the increase of the precipitation level; when the precipitation is acidic, the prevailing wind direction is westerly, pH value is negatively correlated with precipitation and positively correlated with wind speed, while the K value is negatively correlated with precipitation and negatively correlated with wind speed; fog is conducive to the enhancement of precipitation acidity and possibility of acid rain. The frequency of acid rain is increasing due to the increase of sulfide emissions, which leads to the increasing air pollution.

Keywords: precipitation acidity, meteorological factor, Yining

0 引言

人类活动、工业生产排放的各类硫化物与大气降水产生物理或化学作用, 造成降水酸化, 形成酸雨。大气降水趋于酸化导致酸雨污染已成为21世纪人类面临的主要环境问题之一, 其造成的危害不仅仅局限于本地, 还能够利用高空大气输送影响大范围的降水酸化, 造成区域酸雨加重。近几十年以来, 我国经济快速发展, 能源消耗急剧增加致使酸雨污染日趋严重,

已成为继东欧、美国东北部之后的第三大酸雨区^[1]。监测数据表明, 中国酸雨区以城市为核心^[2], 主要分布在东北地区、华北大部、西南和华南沿海地区及新疆北部地区^[3]。

自1982年建立全国酸雨监测网后, 众多学者对降雨酸化的时空变化、化学性质、形成机理、影响因素等展开研究^[3-8], 为我国酸雨控制和研究提供了大量的数据支持。中国区域的降水化学组成属硫酸或硝酸型, 这与逐年上升的区域SO₂和NO_x等酸性气体排放密不可分^[3]。1993—2006年全国酸雨发生范围总体呈扩大趋势, 且北方酸雨强度加强非常明显^[5]。1991—2008年新疆城市降水年均pH值逐年平缓降低, 其中伊

收稿日期: 2022年8月3日; 修回日期: 2022年10月31日

第一作者: 王玲(1977—), Email: 420289782@qq.com

通信作者: 苗运玲(1976—), Email: hmyl65313@163.com

宁市变化起伏较大^[6]。北疆酸雨出现多,其中伊宁市因各类硫氧化物排放量呈上升趋势而导致pH均值逐渐减小,酸雨发生概率增大^[7-8]。

伊宁市作为国家西部对外开放重要门户城市,是天山北坡西部中心和向西开放的桥头堡,重要的地理位置使伊宁市降水酸化研究极具意义。伊宁市空气污染物主要有颗粒物、NO₂、SO₂,这些污染物也是造成伊宁市降水呈酸性的主要因素^[8-9]。2015—2018年伊宁市空气质量整体呈下降趋势,重度污染天数自2016年后呈现逐年翻倍态势。当地能源结构以煤为主,冬季采暖期燃煤型污染最为突出,空气污染情况不容小觑。受燃煤影响,采暖期NO₂、SO₂浓度在1—2月达到峰值,是当地降水呈酸性的重要因子之一。目前关于伊宁市酸雨的研究较分散,没有系统研究其特征及影响因素。本文利用伊宁市1993—2020年酸雨观测资料分析该地降水酸碱度变化趋势与气象因子的关系,以期为伊宁市科学治理大气污染、精准防控降水酸化提供可靠依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

伊宁市地处天山西段、伊犁河谷盆地中央,属于温带大陆性气候,地理坐标80°4′—81°29′E、43°50′—44°9′N,面积约为640 km²。地形地貌复杂多样,主要以山地、丘陵和平原为主,四季分明,日照充足。由近30年(1991—2020年)气候整编资料可知:伊宁市年平均气温10.0℃,年极端最高气温39.2℃,最低气温-31.5℃,年降水量306.6 mm,年内降水分布不均衡,年平均风速1.5 m·s⁻¹,主导风向以ENE和E为主。

1.2 资料来源

伊宁国家基准气候站酸雨观测始于1993年1月,是中国气象局酸雨观测站网之一。文中资料来源于伊宁站的酸雨观测数据,降水样品的采集、测量及月、年统计值依据《酸雨观测业务规范》^[10]中的相关规定执行。

研究资料为1993—2020年伊宁站达到酸雨观测标准的日期、降水量、pH值、电导率(K值)及相应时间的风向、风速、雾等常规气象观测资料。当日08—次日08时降水量达到1.0 mm时,样品采集后记录为一个降水样品。pH值^[10]定义是氢离子浓度的负对数,其值范围1~14,可以反映大气降水的酸碱程度,值越小酸度越大。电导率K值表示大气降水的导电能力,它的大小可以反映降水中离子含量的高低。酸雨强度划分标准^[10]为:pH<4.5为强酸雨,4.5≤pH<5.6为弱酸雨,5.6≤pH<7.0为中性,pH≥7.0为碱性。降

水平均pH值和电导率K值的计算方法均采用《酸雨观测业务规范》^[10]中的方法。

1.3 研究方法

为了分析伊宁市酸雨的变化特征,采用线性趋势、多项式拟合、相关系数等方法开展研究,利用F分布函数对回归系数进行检验^[11-12],运用Mann-Kendall(简称M-K)方法^[13]对pH值和电导率K值的时间序列进行突变分析,利用信噪比检验转折点是否存在突变。

2 结果分析

2.1 pH值和K值变化特征

2.1.1 年变化

分析1993—2020年伊宁站采集的1598个降水样品,结果显示,pH值日变化范围为3.06~9.18,平均值为6.11。K值日变化范围为2.2~591.7 μs·cm⁻¹,平均值为51.4 μs·cm⁻¹。由表1可知,伊宁市大气降水多呈中性,占总样品的61.64%;其次为碱性,占比19.21%;酸雨共出现306次,占总样品的19.15%。从图1可知,1993—2020年伊宁市降水样品与酸雨出现次数均呈增加趋势,其中2005年出现酸雨次数最多,达38次,且13次为强酸雨。28年中仅有2年未出现酸雨,有1/3的酸雨集中在2004年、2005年和2010年,其中2005年酸雨出现概率达73.08%;pH值最小为3.06,对应K值为65.5 μs·cm⁻¹,出现在2004年12月21日。

表1 1993—2020年伊宁市降水样品pH值概率
Table 1 pH probability of precipitation samples in Yining from 1993 to 2020

pH值	降水样品/个	所占比例/%
pH<4.5	36	2.25
4.5≤pH<5.6	270	16.90
5.6≤pH<7.0	985	61.64
≥7.0	307	19.21

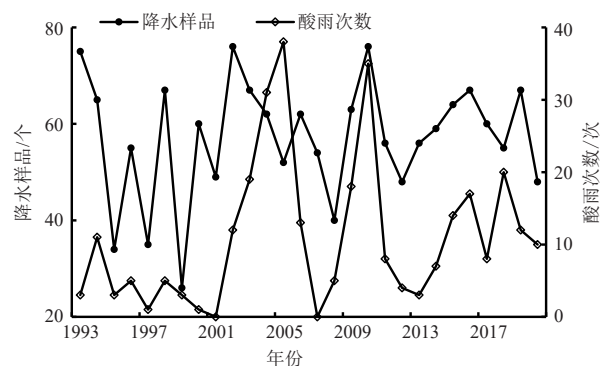


图1 1993—2020年伊宁市降水样品和酸雨出现次数逐年变化
Fig. 1 Year-to-year variation of precipitation samples and acid rain occurrence in Yining from 1993 to 2020

按照中华人民共和国气象行业标准《酸雨评价方法》^[14]中的标准(表2),由图2可知,伊宁市2003—2005年、2015—2020年pH值在5.31~5.60的酸雨出现概率为11.67%~32.73%,属于轻酸雨区;其他年份均未达到酸雨区标准。说明近28年来,伊宁市从无酸雨到出现酸雨,这与李晓燕等^[7]研究结论基本一致。因人口增长和城市化加剧,能源消耗快速上升,导致大气降水酸化是不容忽视的事实,应该引起有关部门重视,科学加强污染防治是十分必要的。

表2 酸雨区分级标准

Table 2 Classification standard for acid rain area

pH值	酸雨出现概率/%	酸雨区
<5.00	>50	重酸雨区
5.01~5.30	30~60	中酸雨区
5.31~5.60	10~40	轻酸雨区
>5.60	0~20	非酸雨区

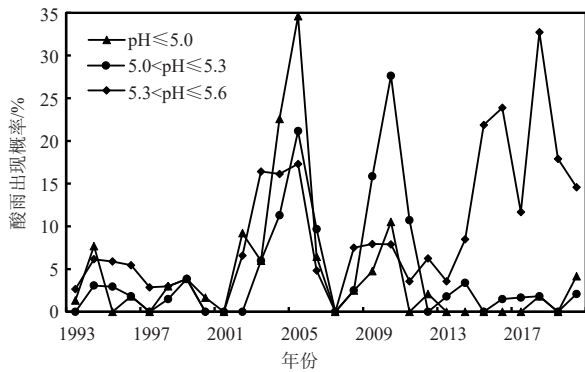


图2 1993—2020年伊宁市酸雨在不同pH值区间概率分布
Fig. 2 Probability distribution of acid rain in different pH value in Yining from 1993 to 2020

从图3可知,近28年伊宁市pH值年变化呈下降趋势,速率为 $-0.19 (10 a)^{-1}$,可见该地降水酸性增强,这与刘新春等^[6]、李晓燕等^[7]的研究结论一致。年平均pH值变化范围在4.65~6.99,极差达2.34,说明伊宁市pH值年际变化较大。K值年变化范

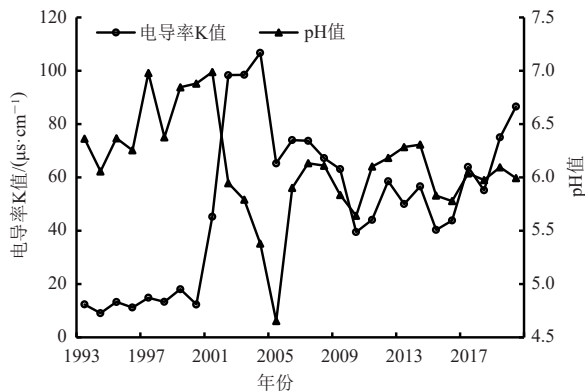


图3 1993—2020年伊宁市降水样品年均pH值和电导率K值变化
Fig. 3 Variation of average annual pH and conductivity K value of precipitation samples in Yining from 1993 to 2020

围在 $9.1 \sim 106.7 \mu s \cdot cm^{-1}$,呈显著上升趋势,增加率为 $18.70 (10 a)^{-1}$,通过0.01的显著性水平检验,说明上升趋势很明显,即大气降水中离子浓度增加,洁净度降低,杂质不断增多,大气污染程度增大。伊宁市逐年降水pH值下降,而K值上升,说明大气污染日趋严重。对pH值和K值进行相关性分析,相关系数为 -0.545 ,通过0.01的显著性水平检验,说明二者存在显著的负相关关系,即K值越大,pH值越小,降水的酸度越强,环境污染越严重,反之降水的酸度越弱,空气质量越好。

2.1.2 季节变化

对伊宁市降水pH值和K值的季节变化分析(图4)表明,四季中pH值从高到低的排序为夏季>秋季>春季>冬季,其值分别为6.28、6.17、6.08和5.88,除夏季外其他三季均呈下降趋势,其中秋季通过0.01的显著性水平检验,冬季通过0.05的显著性水平检验,其他两季均未通过显著性检验,说明秋冬两季降水酸性是显著增强的。从各季酸雨出现次数(表3)可知,冬季出现最高,共出现137次,占总酸雨次数的44.77%,其中强酸雨出现19次,占总强酸雨次数的52.78%;其次是春季,酸雨出现71次,占总酸雨次数的23.20%,其中强酸雨出现8次,占总强酸雨次数的22.22%;秋季与春季较接近;夏季最少,仅出现36次,占比为11.76%,其中强酸雨占比8.33%。四季中K值从大到小的排序与pH值一致,夏季、秋季、春季、冬季分别为55.2、50.1、49.7、48.2 $\mu s \cdot cm^{-1}$,四季均呈上升趋势,其中春季和夏季通过0.01的显著性水平检验,秋季和冬季未通过显著性检验,表明春夏两季降水中的杂质是显著增多的,即空气污染增加趋势较秋冬两季显著。夏季pH值和K值最大,冬季pH值和K值最小,出现这种情况的原因为,伊宁市地处中国北方,土壤碱性物质含量较高,大气中的碱性颗粒物浓度也相应较高,当伴随强对流天气出现较大风速时,这些碱性颗粒物溶解至降水中,一方面对降水的酸度有中和缓冲作用^[5],使夏季降水pH值升高,另一方面则造成K值增大。此外,夏季降水过程中对流旺盛,降水强度大,对大气酸性污染源稀释和扩散作用明显,故夏季酸雨概率较小。冬季伊宁市供暖时段为10月20日一次年4月5日,冬季12月、1月和2月是伊宁市最为寒冷的季节,采暖的燃煤量很大,煤炭中含硫量较高,是大气中硫化物的主要来源,故易造成降水pH值下降,降水的酸性增强。

2.1.3 月变化

由1993—2020年伊宁市降水月平均pH值和K值变化趋势可知(图5a),各月降水pH值变化幅度较

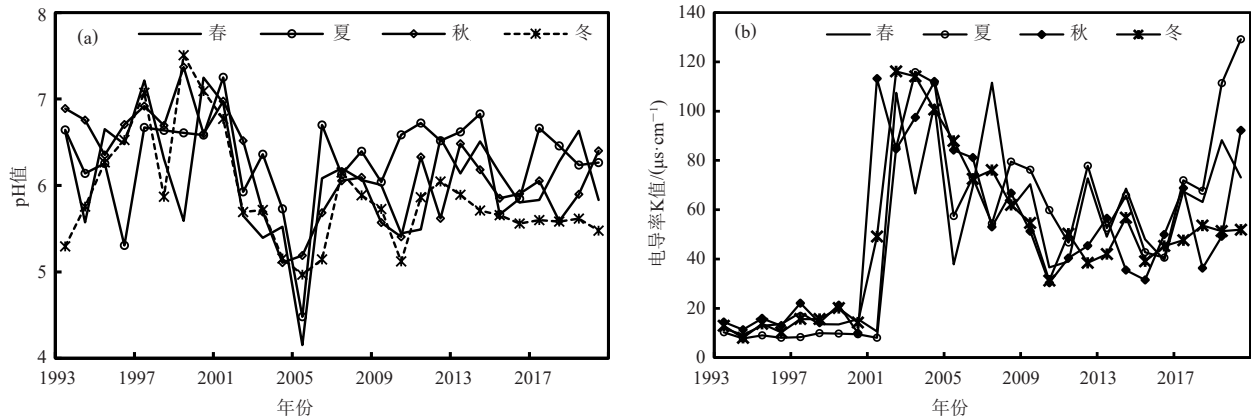


图4 1993—2020年伊宁市四季酸雨平均pH值(a)和电导率K值(b)变化

Fig. 4 Changes of the average pH (a) and conductivity K value (b) of four seasons of acid rain in Yining from 1993 to 2020

表3 1993—2020年伊宁市四季酸雨及强酸雨分布
Table 3 Distribution of acid rain and strong acid rain in Yining in all seasons from 1993 to 2020

季节	酸雨次数/次	占比/%	强酸雨次数/次	占比/%
春	71	23.20	8	22.22
夏	36	11.76	6	16.67
秋	62	20.26	3	8.33
冬	137	44.77	19	52.78

大, 最高值出现在8月, 为6.56; 最低值出现在12月, 为5.80, 有明显的高峰和低谷, 表现出一定的规律性, 总体呈“抛物线”型特征。每月均有酸雨现象发

生(图5b), 其中12月和2月酸雨次数最高, 占总酸雨次数的30.72%; 9月出现次数最少, 占比1.31%。K值总体变化与pH值基本相同, 最高出现在8月, 为 $62.3 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 最低值出现在12月, 为 $44.9 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。对各月pH值和K值进行趋势分析可知, pH值在8—12月呈明显下降趋势, 其他各月均呈上升趋势, 其中2月通过0.05、9月通过0.01的显著性水平检验, 其他各月均未通过显著性检验。K值月变化趋势与pH值相似, 其中3月通过0.05、5—7月通过0.01的显著性水平检验, 其他各月均未通过显著性检验。

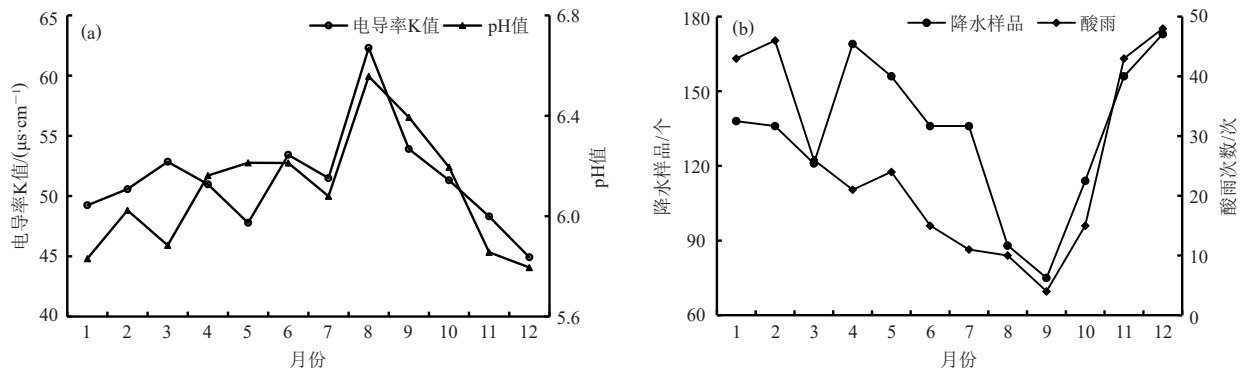


图5 1993—2020年伊宁市降水月平均pH值和电导率K值变化(a)与月降水样品和酸雨出现次数(b)

Fig. 5 Variation of monthly mean pH and conductivity K value of precipitation (a) and monthly precipitation samples and occurrences of acid rain (b) in Yining from 1993 to 2020

2.2 突变分析

利用M-K方法对伊宁市28年的pH值和K值进行突变分析。年突变分析显示, pH值(图6a)UF和UB曲线相交于临界线范围内, 交点为2002年, 并通过信噪比检验, 说明2002年是pH值由大到小的突变年, 即该区域酸雨呈增多趋势; K值(图6b)UF和UB曲线相交于1997年并通过信噪比检验, 表明1997年是K值由小到大的突变年, 即降水中的杂质不断增多, 空气污染越

来越严重, 在2001年超出临界值(1.96), 并且一直持续到2020年, 说明K值增大很显著。这种增加趋势在未来是否会持续有待于进一步研究和讨论。对不同季节pH值和K值进行突变分析(图6c~6j)发现, pH值只在秋、冬季发生突变, 突变年分别为2001年和2014年(均通过信噪比检验), 表明pH值发生突变受秋、冬季突变影响较大。K值除秋季外其他三季均发生突变, 其中春、冬季突变年均出现在1997年, 夏季出现在

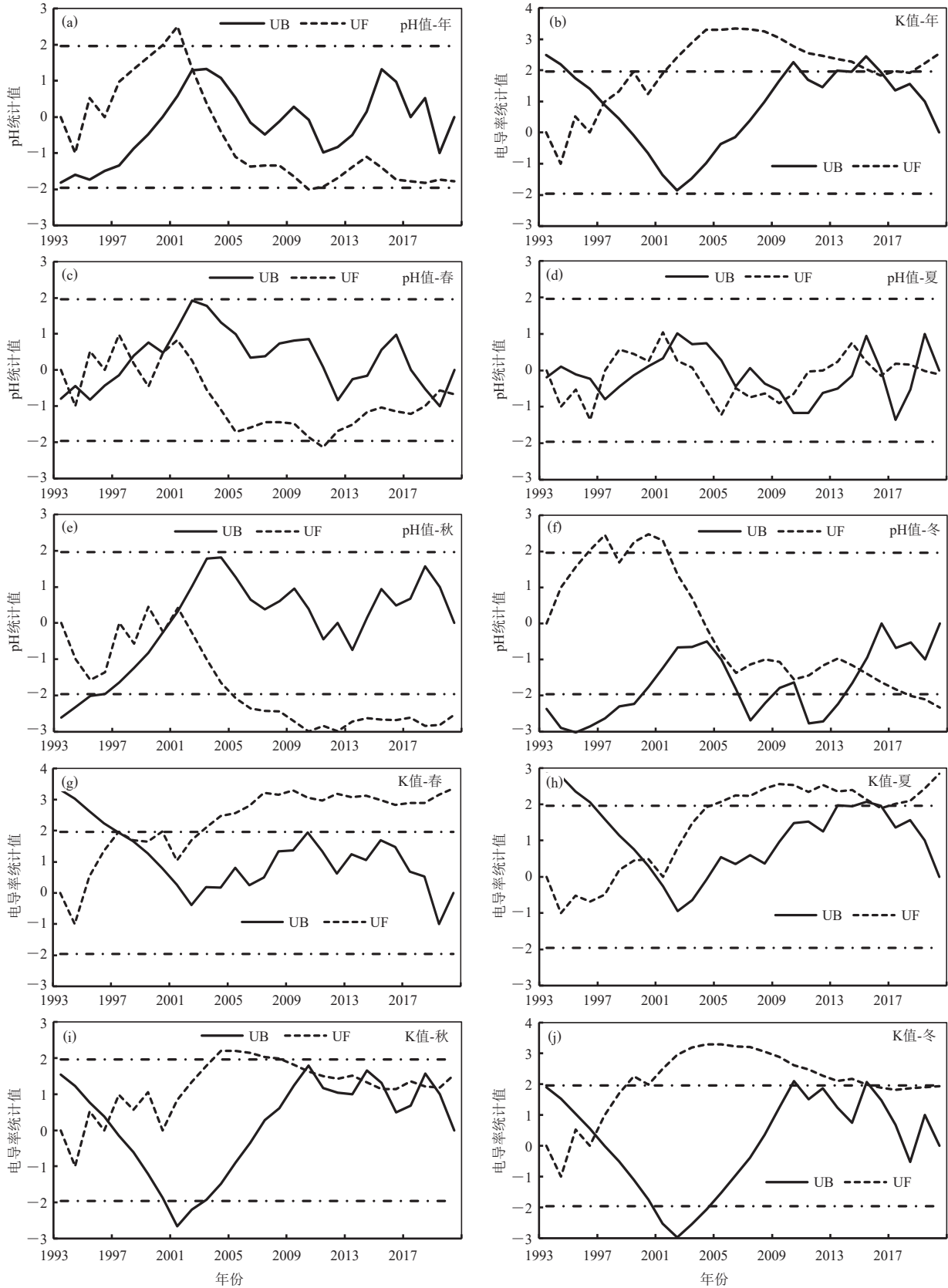


图6 1993—2020年伊宁市降水年、季平均pH值和电导率K值突变分析

Fig. 6 Analysis of sudden changes in annual and seasonal mean pH and conductivity K value of precipitation in Yining from 1993 to 2020

2000年,均通过信噪比检验,说明年K值突变出现在1997年是受春、冬两季的影响。

2.3 pH值和K值与气象因子的关系

大量对酸雨的研究^[15-21]表明,酸雨的形成和强度与降水量、风向、风速、雾等气象因子有一定的关系。为了解伊宁市酸雨成因,利用2004年、2005年、2010年酸雨资料与动力(风向、风速)、湿度(降水量)进行相关性分析。原因是这三年酸雨出现次数较其他年份偏多,达104次,占近28年总次数的33.99%,有较好的代表性。

2.3.1 降水量对pH值和K值的影响

新疆气象局规定降水量的4个等级分别为小雨(0.1~6.0 mm)、中雨(6.1~12.0 mm)、大雨(12.1~24.0 mm)和暴雨及以上(24.1 mm),将每一个降水样品的降水量按此标准划分等级。由表4可知,伊宁市小雨量级时弱酸雨出现次数最多,占比58.8%,且随降雨量级增大呈下降趋势,当量级为暴雨等级时酸雨出现次数最少,占比仅为2.3%;强酸雨的出现次数也是随着降水量增大而下降,且强酸雨在各降水量级中出现次数均明显小于弱酸雨的出现次数。出现这种情况的原因可能是伊宁市降水达到暴雨量级的次数

很少,且降水量级大对大气污染物稀释和扩散比较有利,故强酸雨发生概率较小。

表4 1993—2020年伊宁市各级降水量对应不同强度酸雨的统计值

Table 4 Statistics of acid rain of different intensities corresponding to different grades of precipitation in Yining from 1993 to 2020

项目	酸雨强度	小雨	中雨	大雨	暴雨及以上
出现次数占比/%	强酸雨	7.5	2.3	1.3	0.7
	弱酸雨	58.8	19.9	7.2	2.3
占总降水量百分比/%	强酸雨	3.5	2.8	3.9	4.4
	弱酸雨	28.5	27.3	18.6	10.9

由各降水量级对应的不同等级酸雨降水量的分布可知,弱酸雨降水量在小雨等级时所占比例最高,达28.5%,且四个等级降水中,弱酸雨降水量所占比例均高于强酸雨;强酸雨则是在暴雨等级时所占比例最高,达4.4%。

降水量大小会直接影响对大气污染物的冲刷能力。从图7a可知,pH值和降水量呈负相关,通过0.01的显著性水平检验,说明降水越大,出现酸雨的概率越小,反之越大。K值与降水量也呈负相关(图7b),但未通过显著性检验,说明降水量的大小对K值影响不显著。

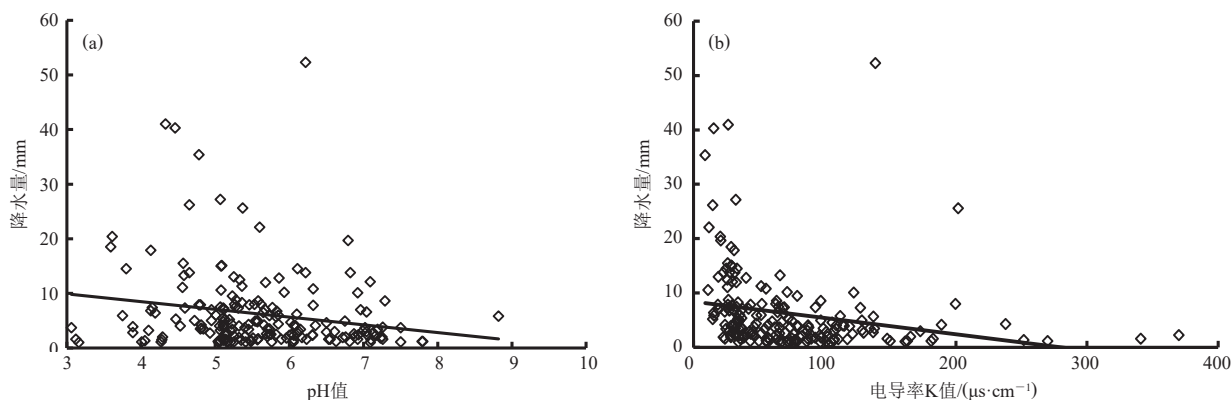


图7 1993—2020年伊宁市降水样品的pH值(a)和电导率K值(b)与降水量的相关性

Fig. 7 Correlation between pH (a), conductivity K value (b) of precipitation samples and precipitation in Yining from 1993 to 2020

2.3.2 风对pH值和K值的影响

风作为气象要素中的动力因子,风向影响污染物水平迁移扩散方向^[22],风速大小会影响污染物扩散和稀释能力。

由图8可知,2004年、2005年和2010年出现降水时的地面主导风向以W为主,出现次数占比为16.05%;E次之,出现次数占比为11.32%,S、NNW和N等风向时酸雨仅有零星分布。同时对三年出现的104次酸雨对应的地面风向进行分析(图略),主导风向仍以W

为主,出现次数占比为16.83%,E次之,出现次数占比为12.26%,当风向为S时没有出现酸雨。综上所述,伊宁市受偏西风影响时较容易形成酸雨,这是因为受喇叭口独特地形影响,降水天气过境时盛行偏西风,而伊宁市人口和工业主要集中在城市西方,聚集了能源消耗产生的致酸污染物。在大气污染物相对恒定的条件下,风向对污染物的扩散方向有明显影响,降水过程中偏西风会携带较多的大气污染物,为酸雨的形成提供前期储备条件。

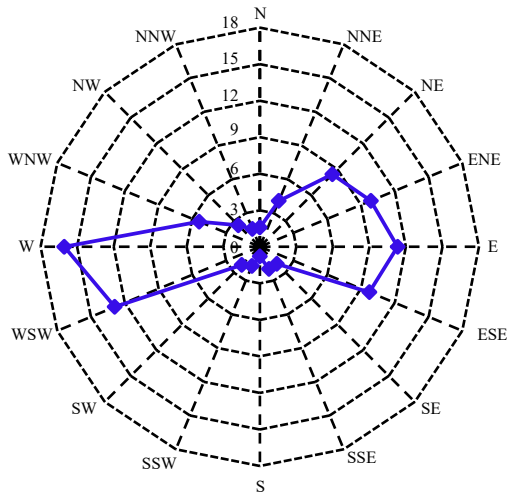


图8 1993—2020年伊宁市采集降水样品时的地面风向玫瑰图(单位: %)

Fig. 8 Surface wind direction rose diagram when collecting precipitation samples in Yining from 1993 to 2020 (unit: %)

为了研究风速对pH值、K值的影响, 同样进行了相关分析。从图9a可知, pH值与风速呈正相关, 但没有通过显著性检验, 说明风速对酸雨的形成影响不显著; K值与风速呈负相关(图9b), 并通过0.01的显著性水平检验, 表明风速的大小对K值影响显著, 风速

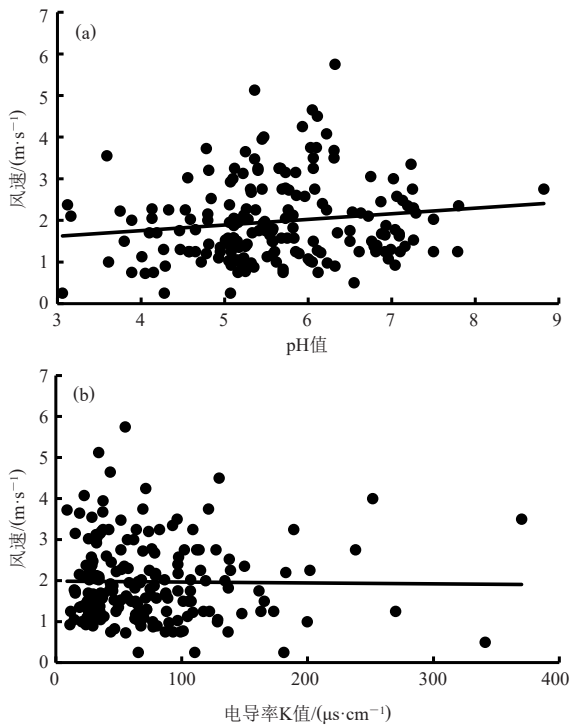


图9 1993—2020年伊宁市降水样品pH值(a)、电导率K值(b)与风速的相关性

Fig. 9 Correlation between pH (a), conductivity K value (b) and wind speed of precipitation samples in Yining from 1993 to 2020

越大, 越有利于污染物的扩散, 起到稀释作用, 不利于酸雨的形成, 反之有利于酸雨的形成。

2.3.3 雾对pH值和K值的影响

雾对酸雨的影响有两个方面, 一是影响大气污染物的扩散, 二是影响酸雨前体物的化学转化速率^[23-24]。有雾出现时, 大气层结较稳定, 地面风速小, 湿度大, 且多有逆温, 大气污染物不易扩散, 有利于降水酸化; 同时空气中充足的水汽加快了酸雨前体物SO₂、NO_x转化为硫酸和硝酸的速率, 增加了降水酸化的几率。伊宁市28年降水样品1598个中出现雾均集中在冬半年, 共有135次, 其中pH值<5.6为60次, 占比44.44%。降水样品中有雾出现时pH平均值为5.90, 冬半年(10—4月)无雾时pH平均值为6.24; 雾与酸雨呈正相关, 相关系数为0.748, 并通过0.01的显著性水平检验, 说明雾对降水呈酸性影响明显。分析发现, 雾对电导率K值影响不大。

3 结论

1) 1993—2020年伊宁市年平均pH值呈波动下降趋势, 酸雨出现概率逐年上升, 电导率K值呈明显上升趋势, 冬半年(10—4月)酸雨污染相对严重, 夏半年(5—9月)偏轻; 酸雨月和季节变化明显, 冬春季pH值、K值均低于夏秋季, 月平均pH值和K值规律性显著, 8月最高, 12月最低。整体来看, 降水pH值呈下降趋势, 酸雨发生概率上升, 伊宁市已从无酸雨区发展为轻酸雨区。

2) 利用M-K方法对伊宁市pH值和K值进行突变分析, 运用信噪比检验可得, 2002年是pH值由大到小的突变年, K值在1997年发生突变; pH值在秋、冬季发生突变, 突变年分别出现在2001和2014年; K值在除秋季外其他三季均发生突变, 其中春、冬季突变年均出现在1997年, 夏季突变年出现在2000年。

3) 酸雨出现次数在小雨量级时最多, 且随降水量的增大而减小, pH值与降水量呈显著负相关, 降水量变化对K值影响不显著。地面主导风向为偏西风时降水出现酸化次数较多, 说明偏西风对酸雨的形成作用显著。pH值与风速呈正相关, K值与风速呈负相关, 风速大小对K值作用显著。雾与酸雨密切相关, 降水过程中有雾时酸雨出现次数远大于无雾时酸雨出现次数, 说明雾对酸雨的贡献较大。

4) 城市人口和经济的快速发展, 工业各类硫化物排放量急剧上升是伊宁市大气污染日趋严重、降水酸化的主要原因。科学采用诸如调整能源战略、发展集中供热, 采用清洁能源等方法 and 措施加强污染防治刻不容缓。

参考文献

- [1] 杨昂, 孙波, 赵其国. 中国酸雨的分布、成因及其对土壤环境的影响[J]. 土壤, 1993, 31(1): 13-18.
- [2] 王德春, 赵殿五. 中国酸雨概述[J]. 世界环境, 1998(2): 8-10.
- [3] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.
- [4] 中国生态环境部. 2020年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中国生态环境部, 2021.
- [5] 赵艳霞, 侯青. 1993—2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 1032-1042.
- [6] 刘新春, 何清, 钟玉婷. 新疆城市酸雨分布特征及变化趋势分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 115-120.
- [7] 李晓燕, 钟玉婷, 侯俊. 新疆降水pH值得时空分布及变化趋势初步分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(5): 24-26.
- [8] 王彩萍. 伊宁市大气环境污染特征及防治对策[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(4): 64-67.
- [9] 尚毅林, 迟洪蕾. 伊宁市空气质量特征分析及对策研究[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(12): 55-58.
- [10] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [11] 张山清, 任泉, 刘振新, 等. 乌鲁木齐市城区大气降水酸碱度及电导率变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(2): 11-14.
- [12] 苗运玲, 张军, 郑玉萍, 等. 乌鲁木齐市酸雨变化特征及其与气象因子的关系[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(5): 62-68.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.

- [14] 李帅, 刘丹, 于成龙, 等. 1991—2012年黑龙江省酸雨变化特征[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 105-111.
- [15] 乔晓燕, 尹佳莉, 李林, 等. 2003—2015年北京市观象台酸雨特征及长期趋势分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(4): 52-57.
- [16] 王桂芳, 何云, 马强, 等. 固原市酸雨变化特征及影响因素分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(2): 31-36.
- [17] 蒲维维, 张小玲, 徐敬, 等. 北京地区酸雨特征及影响因素[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4): 464-471.
- [18] 宋佰春, 李斌, 徐传凯. 2003—2007年日照市酸雨变化特征与成因研究[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(6): 49-52.
- [19] 李倩, 杨旭, 马梁臣, 等. 长春市酸雨变化特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(4): 48-55.
- [20] 李亚军. 2006—2019年山西省酸雨变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 134-138.
- [21] 张良玉, 魏丽欣, 赵春雷, 等. 2012—2017年京津冀区域酸雨变化特征[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 47-54.
- [22] 王苗, 吕槐槐, 王凯, 等. 武汉市酸雨变化特征及影响因子分析[J]. 气象, 2019, 45(2): 282-289.
- [23] 于文革, 梁铁军, 孙莹, 等. 丹东市酸雨特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(4): 77-82.
- [24] 黄磊, 王庆国. 广西南宁市酸雨特征及影响因素分析[J]. 贵州气象, 2014, 38(6): 52-54.

(编辑: 郑秋红)

(上接45页)

结、强的垂直风切变是此次强对流天气的有利环境条件。地面辐合线是主要触发机制, 强对流触发后, 在850 hPa切变线南侧, 低空急流出口区自西向东组织化发展。

2) 冰雹发生时雷达回波具有三体散射特征, VII跃增; 雷暴大风发生时为飚线中内嵌超级单体, 含有深厚的中气旋, 加上动量下传共同作用, 有利于出现极端灾害性大风; 而短时强降水发生时“列车效应”特征明显, 低质心、高效率的回波有利于强降水的发生。另外, “V”型缺口、弱回波区、中气旋、中层径向辐合(MARC)等特征对分析风暴发展所处阶段及发布强对流天气预警具有重要指示意义。

3) 极端大风与强降水中心出现位置的不同与水汽辐合的中心位置、垂直运动的强弱以及不稳定能量条件差异有关, 与洞庭湖大型水体和临湘东部山区地形的阻挡作用有较大关系。洞庭湖水体对强对流的激发作用使得洞庭湖东部沿岸一带强对流更为剧烈, 导致出现极端大风; 洞庭湖水汽随着西南气流源源不断地向东北方向输送, 以及临湘东部山区地形的阻挡对临湘市出现强降水中心有一定的增幅作用。洞庭湖水体对岳阳市强对流的影响作用有待进一步分析和研究。

参考文献

- [1] 姚蓉, 唐佳, 兰明才, 等. 一次混合强对流天气的环境条件及演变特征分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 217-226.
- [2] 唐佳, 姚蓉, 王晓雷, 等. 2015年春季湖南两次混合对流天气过程对比分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 250-259.
- [3] 王起唤, 姚蓉, 周长青, 等. 湖南春夏季混合强对流天气过程对比分析[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(19): 65-74.
- [4] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气

- 象, 2012, 38(2): 164-173.
- [5] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [6] 叶成志, 唐明晖, 陈红专, 等. 2013年湖南首场致灾性强对流天气过程成因分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 1-10.
- [7] 章丽娜, 王秀明, 熊秋芬, 等. “6.23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 1-9.
- [8] 周后福, 余政, 袁业畅, 等. 2013年4月29日皖西南强风暴天气雷达资料分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 80-86.
- [9] 王丛梅, 俞小鼎. 2013年7月1日河北宁晋极端短时强降水成因研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 105-116.
- [10] 翟丽萍, 农孟松, 屈梅芳, 等. 相同大尺度环流背景下不同类型强对流天气个例分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(4): 346-353.
- [11] 许爱华, 马中元, 叶小峰. 江西8种强对流天气形势与云型特征分析[J]. 气象, 2011, 37(10): 1185-1195.
- [12] 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象, 2011, 37(7): 795-801.
- [13] 庞古乾, 伍志方, 叶爱芬, 等. 珠三角地区前汛期强对流潜势预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 564-568.
- [14] 马明, 林锦冰, 傅云飞. 一次强对流活动中雷电与降水廓线特征研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 797-805.
- [15] 姜晓曼, 袁慧玲, 薛明, 等. 北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 207-219.
- [16] 卢冰, 史永强. 2012年7月中旬克拉玛依罕见强对流天气的数值模拟分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 949-956.
- [17] 吴丹娃, 潘益农, 吴林林, 等. 2011年6月23日沿淮强对流天气中尺度辐合特征模拟研究[J]. 热带气象学报, 2013, 29(4): 672-680.
- [18] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [19] 孙继松. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [20] 许爱华, 陈云辉, 陈涛, 等. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 197-206.
- [21] 盛杰, 毛冬艳, 蓝渝. 春季我国冷锋后部的高架雷暴天气特征分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1058-1065.
- [22] 俞小鼎. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [23] 丁青兰, 刘武, 朱晓虎, 等. 一次飚线天气过程多普勒雷达产品分析及临近预报[J]. 气象科技, 2008, 36(2): 160-163.
- [24] 喻长建, 陈姣荣, 喻宇. 近3 a岳阳暴雨时空分布规律及形势特征分析[J]. 贵州气象, 2019, 43(4): 46-50.

(编辑: 郑秋红)

三门峡市烤烟安全移栽期精细化区划及气候变化对其影响研究

蔡涛^{1,2} 戴翠贤²

(1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2 河南省三门峡市气象局, 三门峡 472000)

摘要: 基于三门峡市63个自动气象站气象数据, 选取逐日最低气温和平均气温两个气象因子构建本地烤烟安全移栽期区划指标, 使用多元线性回归方法, 建立区划指标的空间分析模型, 结合地理信息系统(GIS)技术得到了网格距为1 km×1 km的精细化安全移栽期区划, 同时对烤烟安全移栽期历年变化特征进行了分析。结果表明: 三门峡市不同区域烤烟安全移栽期在4月13日—5月10日, 其中在4月13—20日、4月下旬、5月上旬3个时段进入烤烟安全移栽期的区域海拔高度分别为200~700 m、500~1000 m、700~1200 m, 面积占比分别为12%、41%、38%, 5月中旬以后不再适宜烤烟的移栽。三门峡市1981—2021年3—5月平均最低气温和平均气温分别以0.58 °C/(10 a)和0.54 °C/(10 a)的速率显著升高, 与历年烤烟安全移栽期呈显著负相关, 相关系数分别为-0.408和-0.435。气温的上升使得烤烟安全移栽期以2.41 d/(10 a)的速率在显著提前。

关键词: 烤烟, 移栽期, 精细化区划, 气候变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.008

Study on the Refined Regionalization and the Impact of Climate Change on the Safe Transplanting Period of Flue-Cured Tobacco in Sanmenxia

Cai Tao^{1,2}, Dai Cuixian²

(1 CMA Key Laboratory of Agrometeorological Ensuring and Applied Technique, Zhengzhou 450003; 2 Sanmenxia Meteorological Bureau, Sanmenxia 472000)

Abstract: Based on the observation data from 63 automatic meteorological stations in Sanmenxia, the two meteorological factors of the daily minimum temperature and the daily average temperature are selected to build the zoning indexes for the safe transplanting period of local flue-cured tobacco. A spatial analysis model of the regionalization indicators is established by multiple linear regression methods. And with the help of the geographic information system (GIS) technology, a refined regionalization with a grid distance of 1 km×1 km is generated for the safe transplanting period. In addition, the annual variation characteristics of the safe transplanting period of flue-cured tobacco are analyzed. The results show that: the safe transplanting period of flue-cured tobacco in different areas of Sanmenxia city spans from April 13 to May 10, and the altitude range of the safe transplanting period from April 13 to April 20, late April and early May is 200—700 m, 500—1000 m and 700—1200 m respectively, with the area proportion of 12%, 41%, 41% and 38% respectively. After mid-May, it is no longer suitable for flue-cured tobacco transplanting. From 1981 to 2021, the average minimum temperature and average temperature in Sanmenxia significantly increased at a rate of 0.58 °C/(10 a) and 0.54 °C/(10 a), respectively, which evidences strong negative correlation with the safe transplanting period of flue-cured tobacco over the years, and the correlation coefficients were -0.408 and -0.435, respectively. The increase in temperature has made the safe transplanting period of flue-cured tobacco significantly advance at the rate of 2.41 d/(10 a).

Keywords: flue-cured tobacco, transplanting period, refined regionalization, climate change

0 引言

烤烟移栽是烤烟生产上关键的技术环节之一。移栽期不同, 烤烟大田生长期的气候条件发生变化, 烤

烟的产量和品质将产生较大差异^[1-2]。烟苗移栽过早, 易遭受春季冷空气袭击, 引发“早花”现象, 造成减产降质; 烟苗移栽过迟, 则大田生育期内光热总量不足, 上部烟叶成熟期因温度过低而导致难以成熟落黄, 产量质量均下降^[3-4]。不同烟区因气候条件差异而使烤烟移栽期也不相同。有不少学者研究分析了气象条件对烤烟移栽期的影响, 或者基于气象因素进行了

收稿日期: 2022年10月10日; 修回日期: 2022年12月28日
第一作者: 蔡涛(1981—), Email: 122074659@qq.com
资助信息: 三门峡市气象局气象科学技术研究项目(SQ202102)

烤烟安全移栽期的区划分析^[5-9]。

三门峡市地处河南省西部，总面积10496 km²，是北亚热带与暖温带的过渡带，兼有南北气候特点，适宜优质烤烟的种植。2019年三门峡共收购烟叶2.1175×10⁷ kg，连续15年烟叶质量、数量稳居全省第一^[10]。由于三门峡市位于我国第二阶梯到第三阶梯的过渡地带，90%以上为山地和丘陵，不同烟区气候差异较大使得烤烟移栽期也存在较大差异，所以进行烤烟安全移栽期的精细化区划具有重要的现实意义，但一直以来全市只有4个国家级气象观测站（以下简称国家站），站点分布稀疏，空间代表性差，不能真实反映不同烟区的气候特征。随着近些年区域无人值守自动气象站（以下简称区域站）的加密布局，三门峡市已逐步形成梯度气象观测站网，为不同海拔烟区气象分析提供了基础。另外，由于全球气候正在经历着以变暖为主要特征的变化过程，气候变化对农作物生产已经产生了深刻影响^[11]。目前有关气象因素对三门峡烤烟影响的研究多集中在气候变化对烤烟内在品质和化学成分的影响^[12-15]，以及烤烟生育期内气候变化特征方面的分析^[16-19]，而气候变化对烤烟移栽期影响的分析却不多见。综上，本文以三门峡市国家站和区域站气象数据为基础，基于数字高程模型（DEM），对三门峡市烤烟安全移栽期进行精细化区划，同时使用国家站历史气象资料分析气候变化对烤烟移栽期的影响，以期对烤烟安全生产、烟农增产增收提供科学指导。

1 资料与方法

1.1 资料使用及来源

三门峡市区域站均是近些年所建立，且建站时间早晚不一，所以从现有区域站中筛选出59个近三年仪器运行稳定、数据完整的站点，加上4个有长期历史气象数据的国家站，使用上述共63个气象站（图1）2019—2021年的气象数据，结合站点经度、纬度、海拔高度信息进行烤烟安全移栽期的区划分析，并制作安全移栽期区划图。使用4个国家站1981—2021年的气象数据进行气候变化对烤烟安全移栽期的影响分析。气象数据为单站逐日平均气温和逐日最低气温，来源于三门峡市气象局。DEM数据来源于地理空间数据云，进行重采样处理后分辨率为1 km×1 km。

1.2 烤烟安全移栽期区划指标的确定

因为温度为影响烤烟适宜移栽期最为关键的因素^[20]，所以本研究在前人研究成果^[5-6, 20]的基础上，结合三门峡本地实际情况，确定三门峡烟区烤烟安全移栽的区划指标：1) 日最低气温>5℃稳定通过且保证

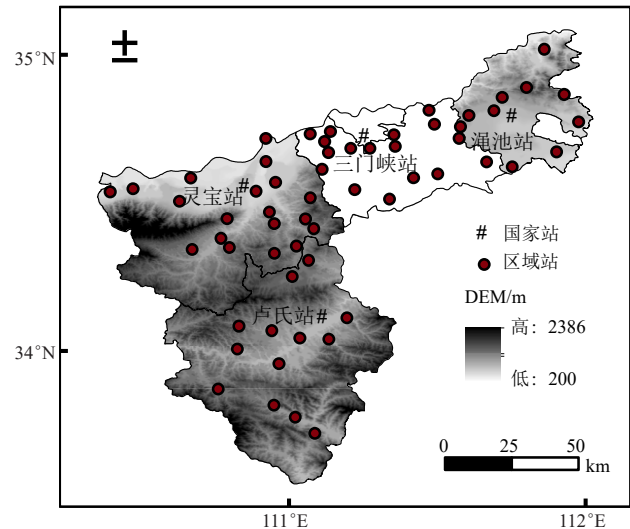


图1 三门峡市气象站点分布
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Sanmenxia

率为100%（以DTmin5表示）；2) 日平均气温≥13℃稳定通过且保证率为80%（以DTmea13表示）。由于以上两项指标对烤烟移栽的影响是相互独立的，具有不可替代性，因此，两者必须同时具备。稳定通过是指原始数据序列的5 d滑动平均值当年春、夏季最后一次≥阈值的首日，即为稳定通过的日期，即在该日期之后，不再出现日滑动平均值小于阈值的情况。把该日期转化为可以数据计算的日序值，每年1月1日的日序值为1、1月2日的日序为2，…，依次类推。保证率是指某一现象在某一定数值以前或以上发生的频率^[21]，本文指稳定通过日期前气象因子≥阈值的累积频率，用于说明该日期后该气象因子≥阈值的可靠程度。

1.3 小网格化处理及空间插值

气象因子特别是温度受海拔、地形、地貌等影响较大，为使稳定通过的界限温度符合当地的实际情况，必须对稳定通过日期进行小网格化处理。一般情况下，分布在网格点上的气象要素值取决于该点的地理因子，即经度、纬度、海拔高度。首先使用研究区内63个气象站点2019—2021年气象数据，计算每个站点区划指标日序值；然后采用多元回归分析法，建立区划指标日序值与气象站点经度、纬度和海拔高度的关系模型（表1）。回归方程物理意义明确，通过了显著性水平检验（ $P < 0.01$ ），然后通过关系模型推算得到区划指标日序值的空间栅格图层。

为了进一步提高拟合精度，将回归方程计算后的残差值运用ArcGIS 10.2中的反距离权重插值方法（Inverse Distance Weighted, IDW）进行空间插值，并与推算的栅格图层进行叠加运算，得到1 km×1 km网

表1 区划指标的小网格推算关系模型
Table 1 Small grids calculation models of regionalization indicators

区划指标	样本数	区划指标空间分析模型	回归效果检验 (P)
日最低气温 $>5^{\circ}\text{C}$ 稳定通过且保证率为100%的日序 (DTmin5)	63	$Y1=11.9031\lambda-18.5870\varphi+0.0096h-579.7788$	$5.23\text{E}-04^{**}$
日平均气温 $\geq 13^{\circ}\text{C}$ 稳定通过且保证率为80%的日序 (DTmea13)	63	$Y2=6.6667\lambda-2.6552\varphi+0.0236h-550.1193$	$9.75\text{E}-10^{**}$

注: λ 、 φ 、 h 分别为经度(单位: $^{\circ}$)、纬度(单位: $^{\circ}$)、海拔高度(单位: m); P 为显著性检验概率; **表示通过0.01的显著性水平检验。

格的两个区划指标空间分布图层。由于安全移栽期要同时达到两个区划指标的要求, 所以将两个区划指标的空间分布栅格图层再次进行“与”运算, 最终得到安全移栽期区划分布图。

1.4 气温和安全移栽期的年际变化

计算1981—2021年4个国家站逐年DTmin5和DTmea13的日序值, 取某站某年两个区划指标日序值的较大值为该站该年的安全移栽期日序值, 4个站点平均值即为三门峡市该年安全移栽期日序值。使用线性趋势分析和Mann-Kendall (M-K) 检验法来分析各统计值的年际变化趋势。

M-K检验法是一种广泛应用于水文与气象数据趋势性检验的方法。对于检验统计量 Z , 当 $Z>0$ 时, 表示所检验序列呈上升趋势, 当 $Z<0$ 时, 表示所检验序列呈下降趋势。当 Z 的绝对值 ≥ 1.28 、1.64与2.32时, 分别表示通过了0.10、0.05与0.01的显著性水平检验, 即检验结果分别具有90%、95%与99%的置信度^[22]。

2 结果与分析

2.1 DTmin5和DTmea13的对比

统计63个气象站点日序值计算结果, DTmin5的日序平均值为109.3, 最小值为85, 最大值为122; DTmea13的日序平均值为115.2, 最小值为104, 最大值为141; 在所有站点中有43个站点DTmin5日序小于或等于DTmea13日序, 占有站点的68%, 可见大部分区域日最低气温 $>5^{\circ}\text{C}$ 的稳定通过日期要早于日平均气温 $\geq 13^{\circ}\text{C}$ 的稳定通过日期, DTmin5的日序平均值比DTmea13早约7 d。图2a和图2b分别为DTmin5和DTmea13通过日期的空间分布, 由图可知两个区划指标稳定通过日期基本呈由北向南逐渐推迟的特点。在灵宝北部的低海拔区域4月上旬最低气温即可稳定大于 5°C , 但这一区域要到4月中旬平均气温才能稳定达到 13°C 以上。三门峡南部稳定通过两个指标的时间最晚, 多数区域在5月上旬可同时满足DTmin5和DTmea13的要求, 两者基本保持同步, DTmin5的最

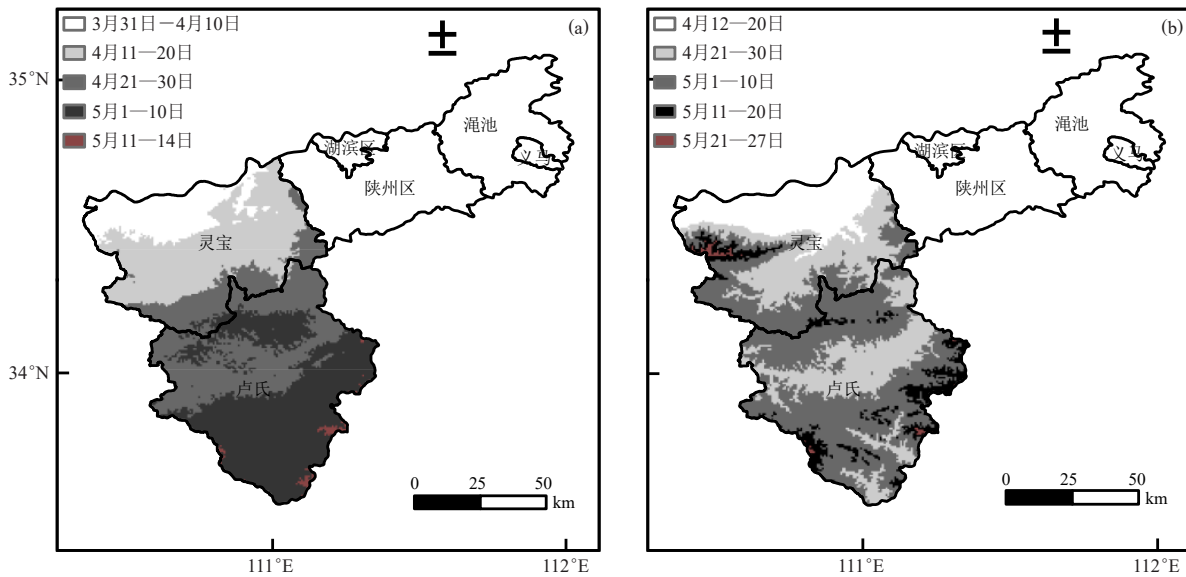


图2 三门峡市烤烟安全移栽期区划指标通过DTmin5日期 (a) 和DTmea13日期 (b) 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of regionalization indicators on the date DTmin5 (a) and DTmea13 (b) for the safe transplanting period of flue-cured tobacco in Sanmenxia

迟日期在5月11—14日, DTmea13的最迟日期在5月21—27日, 两者相差也在10 d以上, 但这一区域面积很小, 多分部在卢氏县的熊耳山、伏牛山等高山区, 而灵宝境内的秦岭山区甚至要在5月下旬平均气温才

能达到 13°C 以上。

2.2 安全移栽期区划结果

由图3可知在4月13—20日即可安全移栽的区域主要集中在灵宝北部的豫灵、故县、阳平的北部

和西阎、函谷关、大王、陕州区的大营等乡镇。这一区域紧临黄河沿岸，地势较低，海拔高度多在200~700 m，占三门峡总面积的12%，是三门峡烟区内最早可安全移栽的区域。4月下旬可移栽的区域主要集中在渑池县以及陕州区的高庙、交口、西张村，以及灵宝的阳店、川口、苏村、朱阳等乡镇，多为丘陵地带；在卢氏县主要分布在徐家湾、磨沟口、城关镇、横涧、范里、东明等乡镇，虽为山区，但这一区域是黄河右岸重要支流洛河的流经之地，从东向西横跨卢氏中部，海拔较低，具有明显的地域特征。处于这一移栽期的区域海拔大多在500~1000 m，占三门峡总面积的41%。5月上旬移栽区域主要集中在卢氏县境内以及灵宝、陕州区、渑池的小部分乡镇。这些区域多为山地，海拔较高，特别是卢氏大多数的移栽区域均处于这一时段内，海拔高度大约在700~1200 m，占三门峡总面积的38%。在5月中、下旬移栽的区域面积很少，主要分布在卢氏的熊耳山、伏牛山以及灵宝小秦岭、崤山等海拔较高的山区地带，海拔高度多在1200以上。这些区域因地势高、气温低、坡度大，不适宜烤烟种植，其面积约占三门峡总面积的9%。

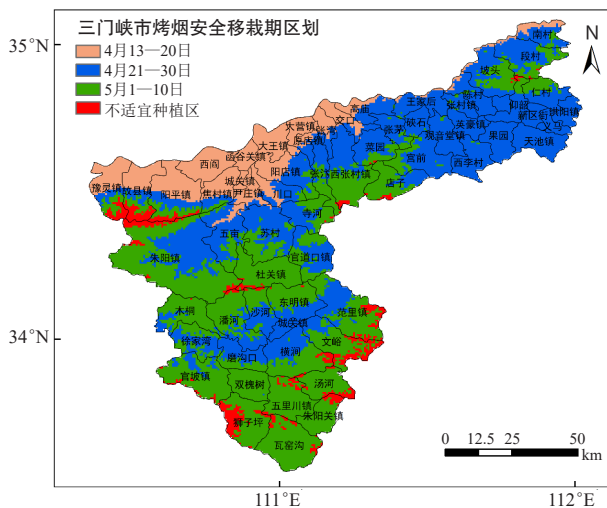


图3 三门峡市烤烟安全移栽期区划

Fig. 3 Safe transplanting period regionalization of flue-cured tobacco in Sanmenxia

2.3 气候变化对烤烟安全移栽期的影响

为了分析气候变化对烤烟安全移栽期的影响，分别统计了三门峡市四个国家站1981—2021年3—5月逐日最低气温平均值 (MT_{min})、逐日平均气温平均值 (MT) 和烤烟安全移栽期日序的年际变化情况 (图4)。1981—2021年三门峡市 MT_{min} 和 MT 分别以 $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 和 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 的速率呈显著上升趋势，M-K趋势检验Z值分别为4.99和3.85，通过了0.01

的显著性水平检验。烤烟安全移栽期以 $2.41\text{ d}/(10\text{ a})$ 的速率呈明显提前趋势，M-K趋势检验Z值为-1.65，通过了0.05的显著性水平检验。历年烤烟安全移栽期最大值为1991年的第130日 (5月10日)，最小值为2014年的第82日 (3月23日)，年际间相差达48 d。将 MT_{min} 、 MT 分别与安全移栽期日序值进行Pearson相关分析 ($n=42$)，相关系数分别为-0.408和-0.435，均通过0.01的显著性水平检验。可见最低气温和平均气温的上升，使三门峡烤烟移栽期也呈显著的提前趋势。

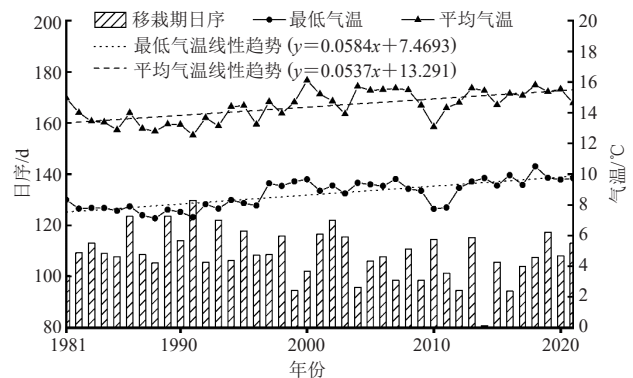


图4 三门峡市1981—2021年3—5月平均最低气温、平均气温、烤烟安全移栽期日序变化

Fig. 4 The average minimum temperature, average temperature and daily order change of safe transplanting period of flue-cured tobacco in Sanmenxia from March to May of 1981—2021

表2为各国家站的安全移栽期年际变化趋势，其中卢氏站变化趋势最大，达 $5.42\text{ d}/(10\text{ a})$ ，三门峡站最小，为 $1.43\text{ d}/(10\text{ a})$ 。各烟区变化均呈提前趋势，其中灵宝、渑池 $|Z| > 1.64$ ，通过了0.05的显著性水平检验，卢氏 $|Z| > 1.28$ ，通过了0.1的显著性水平检验，三门峡站虽也呈提前趋势，但没有通过显著性水平检验。

表2 三门峡市烤烟安全移栽期变化趋势

Table 2 Variation trend of safe transplanting period of flue-cured tobacco in Sanmenxia

国家站	卢氏	灵宝	渑池	三门峡站
气候倾向率/ $(\text{d}/(10\text{ a}))$	-5.42	-3.18	-2.60	-1.43
Z值	-1.48	-1.88	-1.66	-0.74

3 讨论与结论

在进行烤烟安全移栽期气候区划时，区划指标是影响区划结果的关键。本研究主要基于烟苗移栽后是否会受到低温冷害，以及能否保证正常生长发育所需最低温度这两个方面来进行区划指标的确定，这也是烟农在实际移栽生产过程中主要考虑的气象因素。郭松等^[17]研究表明豫西烟区5月为雨季前期，日照时数

多、光质好、云少晴天多、紫外线强,该时段有利于抑制病害发生,可为烤烟后期生长奠定基础。9月烤烟成熟期内则多连阴雨天气^[16, 23],像卢氏的杜关、官道口,灵宝的朱阳、故县等安全移栽期区划较晚的乡镇,其成熟期将延迟至9月下旬甚至更晚,此时因降温迅速,热量不足,严重影响烤烟的正常落黄成熟,烟叶烘烤后质量下降。如2011年9月全市出现长期阴雨寡照天气(卢氏尤为严重),导致烟叶不能正常落黄^[17]。高真真等^[24]研究指出适当提早移栽期可以保证烟叶成熟期有较高的温度条件,促进浓香型特色的彰显。莫建国等^[25]也提出了通过合理的调整移栽期,充分利用短时间的高温时段,减轻后期低温的影响。在全球气候变暖的大背景下,三门峡市3—5月最低气温和平均气温显著上升,促使烤烟安全移栽期提前,烟农可根据安全移栽期区划结果合理调整移栽期,充分利用气候资源,最大限度地避免9月下旬至10月初降温或早霜冻对中、上部烟叶的不利影响。

本研究根据研究区内气象站的气象数据和站点信息,采用多元回归建立了关系模型。运用ArcGIS软件制作出精度为1 km×1 km网格的三门峡烤烟安全移栽期区划分布图,突破了传统区划中资料以点代面的局限,提高了区划的精度和准确度。得出的区划结果与全市不同烟区实际种植情况基本一致,说明方法可行,确定的区划指标合理,结果具有实用价值。

1981—2021年三门峡市烤烟安全移栽期以2.41 d/(10 a)的速率在显著提前。随着新品种的推广、种植栽培技术的发展,区划结果也需要不断更新,才能满足实际的生产需要。在生产过程中,当地在进入烤烟安全移栽期后,还应根据土壤墒情、雨情等合理安排移栽日期,为烤烟的优质高产打下基础。

参考文献

[1] 祖朝龙,徐经年,殷凤生,等.皖南烟区烤烟移栽适期的研究[J].安徽农业科学,2004,32(5):969-970.

- [2] 黄廷炎,杨善恭,周博扬,等.闽北烤烟移栽期的预报[J].气象研究与应用,2010,31(1):57-59,62.
- [3] 刘德玉,李树峰,罗德华,等.移栽期对烤烟产量、质量和光合特性的影响[J].中国烟草学报,2007,13(3):40-46.
- [4] 关罗浩,叶为民,刘丽,等.移栽期对烤烟新品种金海一号产质量的影响[J].西南农业学报,2014,27(2):813-818.
- [5] 邓环,秦鹏程,蔡长春,等.湖北省植烟区精细化安全移栽期区划[J].中国农学通报,2016,32(13):129-135.
- [6] 李伟,陆魁东,周清明,等.湖南烤烟适宜移栽期分析[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(2):135-138,118.
- [7] 邱雪柏,尹鹏达,陈伟,等.近51年遵义县气候变化对烤烟移栽期的影响[J].中国烟草科学,2013,34(4):36-41.
- [8] 张玉芳,刘琰琰,杜成勋,等.烤烟移栽期干旱监测评估模型研究及在攀西地区的应用[J].西南农业学报,2019,32(2):286-290.
- [9] 杨希,杨可辉,卜银军,等.闽西北霜期时空变化对烤烟移栽期的影响[J].中国烟草科学,2018,39(2):25-31.
- [10] 李建平.三门峡烟叶产业为民增收近7亿元[N].河南日报农村版,2019-11-29(4).
- [11] 房世波,韩国军,张新时,等.气候变化对农业生产的影响及其适应[J].气象科技进展,2011,1(2):15-19.
- [12] 姬兴杰,孟寒冬,左璇,等.河南烟区主要气候因子与烤烟烟叶化学成分的关系[J].中国烟草科学,2017,38(1):35-41.
- [13] 吴璐,刘晓迎.河南烟区烤烟生育期地表温度日较差变化对烤烟化学品质指标的影响[J].气象与环境科学,2020,43(1):18-25.
- [14] 孟寒冬,姬兴杰.气候变化对河南烟区烤烟石油醚提取物的影响[J].中国农业科技导报,2019,21(12):140-150.
- [15] 张慢慢,邵惠芳,许自成,等.三门峡烟区烤烟经济性状与气候因素的关系[J].西南农业学报,2016,29(11):2732-2737.
- [16] 刘晓迎,左璇,刘雅星,等.河南浓香型烟叶产区气候条件分析[J].河南农业科学,2017,46(3):52-58.
- [17] 郭松,许自成,苏永士,等.豫西烟区烤烟生育期35年日照时数的变化特征[J].中国农业气象,2010,31(4):558-562.
- [18] 张燕燕,吉志红,陈莹.三门峡烟区与国外烟区气候相似性分析[J].农学学报,2017,7(8):43-47.
- [19] 邵惠芳,郑聪,许自成,等.三门峡烟区烤烟气候适生性评价及与国外烟区的相似性分析[J].西南农业学报,2011,24(1):34-37.
- [20] 中国农业科学院烟草研究所.中国烟草栽培学[M].上海:上海科学技术出版社,2005.
- [21] 邱宝剑,卢其尧.农业气候区划及其方法[M].北京:科学出版社,1987.
- [22] 徐泽华,韩美.山东省干旱时空分布特征及其与ENSO的相关性[J].中国生态农业学报,2018,26(8):1236-1248.
- [23] 朱玉周,张录军,廖荣伟,等.1970—2012年河南省初秋降水特征分析[J].气象与环境学报,2015,31(6):93-100.
- [24] 高真真,刘扣珠,史宏志,等.移栽期和采收期对豫中烤烟上六片叶发育期温度指标的影响[J].中国烟草科学,2019,40(1):49-57.
- [25] 莫建国,古书鸿,李洪勋.基于GIS的威宁县烤烟种植精细化气候区划[J].贵州农业科学,2014,42(2):77-80.

(编辑:郑秋红)

台风“杜苏芮”(2305)过程的气象服务分析与思考

■ 姚秀萍 张悦含 袁俊肖

面对超强台风“杜苏芮”，气象部门国省市县四级联动，紧密配合，实现递进式服务，围绕气象灾害演进发生的不同阶段，提供预报预警服务产品，并在这一过程中分级别、分区域精细化调动部门应急联动和社会力量，以服务对象为主体，提供决策气象服务、公众气象服务和行业气象服务等，让气象监测预报预警信息能快速转化为各级政府、社会公众和特定行业（渔业、航空等）的防灾减灾行动力。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.009

我国是世界上受热带气旋影响最严重的国家之一，平均每年登陆台风7~8个，是世界上台风登陆最多、灾害最严重的国家之一。2023年台风“杜苏芮”是有完整观测记录以来登陆福建省的第二强的台风，其云系覆盖范围大、强度强，影响时间长、范围广。在其影响下，福州、莆田、安南等地日降雨量均超过1961年以来的历史极值。受台风“杜苏芮”残余环流北上影响，华北地区出现了2023年入汛以来持续时间最长、累计降水量最大、影响范围最广、致灾风险最高的暴雨过程。台风“杜苏芮”严重影响人民的人身财产安全，造成福建、浙江、安徽、江西、广东等地291万人不同程度受灾，紧急避险和转移安置76.8万人，损坏房屋1.5万余间，直接经济损失147.4亿元。北京全市因灾死亡33人，主要由洪水冲淹、冲塌房屋等原因造成；因抢险救援牺牲5人，还有18人失踪，包括1名抢险救援人员；近129万人受灾，房屋倒塌5.9万间，严重损坏房屋14.7万间，农作物受灾面积22.5万亩（1亩 \approx 666.7 m²）。河北省87个县（区）54万人受灾。截至2023年8月1日06时（北京时，下同），强降雨造成河北省11人遇难，其中2人在抢险救灾中因公殉职。

1 台风“杜苏芮”的影响

1.1 台风“杜苏芮”天气过程

2023年7月28日09时55分，台风“杜苏芮”在福建晋江沿海登陆，中心附近最大风力达15级（50 m/s），中心最低气压为945 hPa。

“杜苏芮”登陆后沿着偏北方向移动，依次经过福建、江西和安徽省，于7月29日08时在安徽省安庆市宿松县境内减弱为热带低压。中央气象台于29日11时对其停止编号。7月29日—8月1日，台风“杜苏芮”残余环流继续北上影响北方地区。

1.2 台风“杜苏芮”降水特征

“杜苏芮”为1949年以来登陆福建省第二强台风，台湾、浙江部分地区累计雨量达300~700 mm。在“杜苏芮”的影响下，强降水横扫河北、北京、天津、山西、河南、山东等大范围地区，涉及14个省（区、市）。北京、天津、河北中南部和东北部、山西东部、山东中部和西南部、河南北部等地累计降水量为100~300 mm；北京西南部，河北保定、石家庄、邢台、邯郸，山西阳泉、晋中、晋城，河南鹤壁、新乡等部分地区为400~550 mm；北京昌平、门头沟，河北保定、石家庄、邢台局地区为650~1003 mm。这样的过程累计雨量，远超2012年“7·21”特大暴雨（极值541 mm）。其中，河北省邢台市临城县赵庄梁家庄站累计降水量达1003 mm。对于年平均降水量约500 mm的邢台，这意味着几乎在三天里下了大概两年的降水。图1为在“杜苏芮”影响下7月29日08时—8月1日20时海河流域面雨量实况图。

1.3 台风“杜苏芮”灾情

据应急管理部2023年8月4日发布的7月全国自然灾害情况统计，“杜苏芮”造成福建、浙江、安徽、江

收稿日期：2023年9月13日；修回日期：2023年11月17日

第一作者：姚秀萍（1967—），Email: yaoxp@cma.gov.cn

资助信息：国家自然科学基金项目（42275013）；中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金重点项目（2023SYIAEKFD02）；中国气象局气象干部培训学院中短期预报教学团队项目

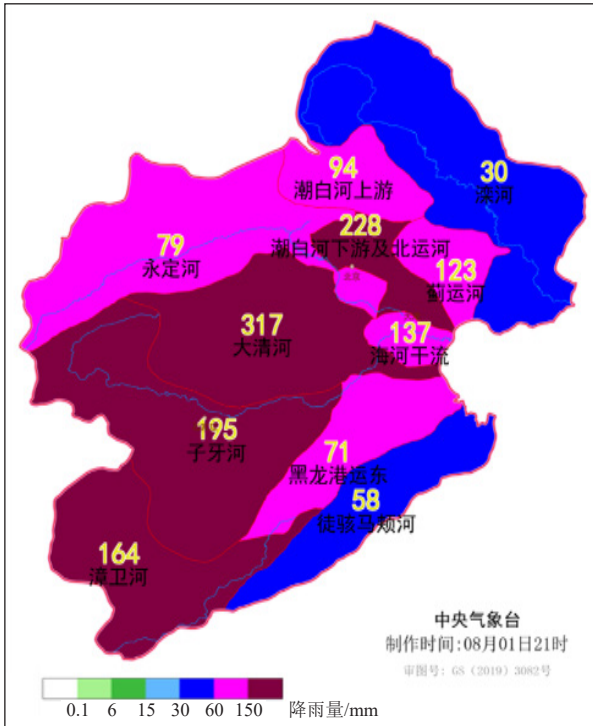


图1 2023年7月29日08时—8月1日20时海河流域雨量实况图(来源:中央气象台)

西、广东等地291万人不同程度受灾,紧急避险和转移安置76.8万人,损坏房屋1.5万余间,直接经济损失147.4亿元。

2023年8月10日,据海河水利委员会消息:受台风“杜苏芮”影响,海河发生流域性大洪水,截至8月10日08时,33座山区大型水库蓄水102亿 m^3 ,较多年同期偏多近65%。

福建省紧急避险转移人员达39.95万人,农作物受损面积达37396.27 hm^2 ,其中绝收面积达1701.76 hm^2 ,房屋倒塌和严重损坏3357间。福建省渔船、轮渡、航班、铁路均受到不同程度的影响。福建省受台风“杜苏芮”的影响停运的列车达50班,客渡船183艘全部停运,危险品船100艘全部进入锚地避风,施工船273艘全部进入避风水域。

北京市门头沟全区受灾人口约31万人,约占全区人口的77%;房屋倒损8418间、严重损坏26493间;城乡道路、电力、供排水、通信等基础设施大量损毁;全区需重建40个村,47%的村庄全面受灾。

河北省受灾人数达222万人。涿州市全市停水停电,市区积水深达6 m。截至8月1日11时,涿州市146个村庄遭遇洪水过境,部分村庄民房淹没,受灾群众达13万人,受灾面积225 km^2 。截至7月31日17时,已统计农业受灾面积648万 km^2 。

2 面对台风“杜苏芮”的气象服务

“杜苏芮”登陆前,2023年7月26日早上,中国气象局专题部署防范应对工作。各级气象部门精准预警响应,增强气象预警与灾害预报的联动,强化预警指向性,落实直达基层防汛责任人的临灾预警“叫应”机制。

2.1 国家级业务单位气象服务

7月29日下午,中央气象台预报员加强研判,发布暴雨红色预警。7月31日18时,中央气象台持续发布暴雨红色预警;水利部和中国气象局联合发布红色山洪灾害气象预警;自然资源部与中国气象局联合发布地质灾害气象风险预警。

中央气象台开展专题会商,并为北京市气象局提供技术支持;国家卫星气象中心启动风云四号B星1 min加密观测;中国气象局气象探测中心派专家赴北京市气象局协同做好暴雨监测服务,向中央气象台、相关省(市)气象局提供雷达、垂直观测、大气可降水量等监测服务产品。

为迎战台风“杜苏芮”登陆,中国气象局公共气象服务中心(简称公服中心)及时形成《重大过程公众气象服务重点提示》2期,制作发布原创图文、短视频,针对受台风影响的区域做好公众服务提示,相关话题“当暑期游撞上台风季”观看人数突破188万人。每日发布《全国气象灾害高级别预警叫应服务快报》,7月27日17时—28日15时30分,以短信点对点的形式提醒8900人次,以微信群机器人点对面的形式提醒81702人次。针对受台风影响的台湾、福建、浙江等地,制作发布并加密核查12328站点精细化服务产品。公共服务中心为交通和电力等行业提供专业意见,与交通运输部路网中心会商研判,发布《重大公路气象预警(台风)》《重大公路气象预警(暴雨)》;发布迎峰度夏能源保供气象服务周报《台风“杜苏芮”将带来强风雨 关注对东南沿海电力安全影响》。为应急管理部、武警指挥保障大队、地理信息中心等台风敏感用户提供伴随式决策气象服务支持。

2.2 省市县级气象局气象服务

“杜苏芮”先后影响了华东、华北等地区,本文选取了不同区域内的部分具有代表性的省市县级气象局的气象服务措施进行复盘总结。

2.2.1 福建省气象局气象服务

2.2.1.1 决策气象服务

面对来势汹汹的“杜苏芮”,福建省气象台严阵以待。7月24日16时30分,福建省气象台将重大气象灾害(台风)Ⅳ级应急响应提升为Ⅲ级。截至7月24

日,针对此次过程福建省气象台共向福建省委、省政府等相关部门报送《重要天气预警报告》4份,《下周天气》1份,滚动字幕6期。

7月27日09时,福建省气象台将台风应急提升为I级,全台立即进入I级应急响应状态。福建省气象台严格按照应急响应要求,精密跟踪台风路径实况,加强与应急管理厅等部门的联防联控,加强监测会商,做好气象服务保障工作,为省委、省政府部署防御台风工作提供科学决策支撑。

2.2.1.2 公众气象服务

福建省气象局与省广播电视局、省广播影视集团、省广电网络集团等应急广播联盟成员单位联动,做好多部门预警传播服务,启用应急广播系统对接服务平台,首次通过福建新闻频道、福建应急广播、海博TV、IPTV、各级融媒体中心等112个应急广播全媒体渠道快速传播台风、暴雨等预警信息777条,有效扩大预警信息传播覆盖面。

落实“一过程一策”机制,加入省局台风“杜苏芮”科普宣传联动工作组;福建预警发布卡通IP形象“安澜”上线;原创发布台风最新动态及防御科普短视频服务作品14篇,浏览量达198.6万次,点赞量2.37万次;8篇短视频长期占据抖音热搜榜,点击量超1.3亿人次;联合国家预警中心共同发力提高触达率,进一步强化台风防灾减灾科普宣传。

台风影响期间福建省通过预警发布系统共发布预警1954条和风险消息17456条,其中,气象部门发布预警1657条、风险消息454条。87条台风红色预警、72条暴雨红色预警点对点送达基层责任人,达86.1万人次。“12379短信平台”点对点发送预警短信1263.36万条,全媒体预警发布渠道传播服务受众达18.1亿人次,充分发挥预警信息先导作用。

2.2.1.3 行业气象服务

福建省针对水电、核电、航空等重点服务客户通过视频会商、首席专家解读、现场入驻服务等多种举措,全力做好台风“杜苏芮”气象服务保障工作。一是组织开展20多次航空专题气象服务会商,全力为旅客安全出行保驾护航。二是为国网福建省电力有限公司、电力科学研究院制作台风影响期间极大风速色斑图,为电网的科学调度、安全运行提供了有力保障。三是与省地质环境中心联合召开“全省市县地质灾害气象风险自动化预警系统”培训,系统实现了地灾预警监测、一键式靶向发布和智能统计分析的业务链条,提升地质灾害气象风险预警能力。四是协助人寿、人保、平安和阳光财险等保险公司及时向其客户

发布气象灾害预警预报信息,清除安全隐患,避免或降低可能产生的财产损失。

2.2.2 京津冀地区

2.2.2.1 北京市气象局气象服务

1) 决策气象服务

7月26日,提前4天开展台风“杜苏芮”对北京市影响的综合研判,提前3天向市政府领导、防汛指挥部汇报,随时报告低压系统的发展情况及预报信息。

7月28日起,北京市委书记尹力,市长殷勇,副市长夏林茂、高朋等多次听取北京市气象局汇报,要求加强滚动监测预报预警,为应对工作提供支撑。

2) 公众气象服务

全市气象部门进入特别工作状态,全体干部职工24小时在岗、在职、在责,做好实时监测、滚动预报、及时预警、跟进服务。做好气象北京微博微信信息发布,开展面向公众的网络直播、科普解读。

3) 行业气象服务

7月29日10时,北京市气象局启动暴雨一级应急响应,北京市人民政府防汛抗旱指挥部启动全市防汛橙色(二级)预警响应。11时,气象部门发布华北地区和北京地区暴雨、特大暴雨专项警报,并根据预警信息发布和天气实况,为北京市铁路局、市交通委员会、地铁、排水集团、电力公司、平安保险等部门提供逐小时气象跟踪与专项预报服务。

北京市气象台全体首席到岗,与中央气象台、中国气象局气象探测中心、北京城市气象研究院、北京市气象探测中心骨干共同研讨,联合“会诊”。为更有针对性地为重点区域、行业部门提供保障,核心区气象处组织专班、专岗业务人员分三组24小时进驻东城区、西城区、天安门管委会,跟踪核心区降雨最新发生发展情况,及时向区(委)防汛指挥部及其各成员单位提供最新天气预报,协助开展值守巡查、队伍组织、物资调配、抢险救灾等工作。

2.2.2.2 天津市各区气象局气象服务

1) 决策气象服务

自7月26日起,天津市各区气象局向区委、区政府、区气象灾害指挥部办公室成员单位及各乡镇(街道)报送《气象信息快报》。各区气象局主要领导当面向区委书记、区政府主要领导、分管领导进行汇报,区政府根据预报信息,第一时间召开区防汛防风调度会议,气象局作为第一发言单位,对天气情况进行汇报,并提醒相关部门提前做好防范工作。

各区气象局与区应急局、水务局开展联合会商,防汛抗旱指挥部办公室根据预报结论启动防洪应急响应

应，各部门提前做好防洪排涝抢险救援工作准备。

2) 公众气象服务

自7月28日07时起，各区气象局通过电视、广播、报纸、网站、电话、传真、邮件、短信、农村大喇叭、气象信息电子显示屏、气象微信平台、气象微博平台等多手段、多渠道及时向气象灾害指挥部成员单位、各委办局（组织部、统战部、发展改革委员会、人民防空办公室、财政局等相关单位）、各功能区管理委员会、各街镇政府、企业、公众等发布气象预报预警和服务信息。

3) 行业气象服务

各区气象局及时将台风气象信息向各应急局、电力系统、港口调度中心、盐场、海事局、油田等主要客户进行电话叫应。台风影响过程中，值班员及时发布降水间歇期和风力转弱时段的预报信息，保障各部门开展工作。

8月1日01时天津市防汛抗旱指挥部发布通知启动市防洪Ⅰ级应急响应。8月6日，根据泄洪需求，海河流域的永定河、大清河、蓟运河都将通过海河泄洪。经过及时泄洪，8月21日海河流域河流陆续解除洪水红色预警。

4) 大型活动气象服务

针对在滨海泰达足球场举行的中超联赛，滨海新区气象局在7月28—29日逐小时提供气象服务专报；针对在蓟州区举行的“村BA”全国和美乡村篮球大赛，7月27日—8月6日，蓟州区气象局每3小时提供专题气象报告，保障大型赛事活动的顺利进行。

3 小结

面对超强台风“杜苏芮”，气象部门国省市县四级联动，紧密配合，实现递进式服务，围绕气象灾害演进发生的不同阶段，提供预报预警服务产品，并在这一过程中分级别、分区域精细化调动部门应急联动和社会力量，以服务对象为主体，提供决策气象服务、公众气象服务和行业气象服务等，让气象监测预报预警信息能快速转化为各级政府、社会公众和特定行业（渔业、航空等）的防灾减灾行动力。气象部门主动融入国家防灾减灾工作，为群众防灾避险赢得先机，充分发挥了防灾减灾第一道防线的作用。但是仍然存在一些问题：一是短时临近预报潜势分析能力还

有待加强，对于实况的把握仍然不够精准，对降雨的极端性、对由“列车效应”产生的持续性暴雨没有充分的预估。二是基层气象预报仍依托于国家及省市预报员，国家及省市预报员对基层地势、地形不够了解，且不能直观地观测到降水的变化，导致对形势的分析研判订正不够及时。三是基层人力不足，虽然已经制定了完善的预警发布机制和叫应机制，但是因人力不足导致服务流程的各个环节不能同步进行，面对重大天气过程，与水务、应急等部门叫应不够及时，存在延误抢险救灾时机的可能。针对这些问题，提出如下思考。

一是提升预报精准度。除了要发展预报技术、升级观测装备外，还要注重专业技术人才队伍的培养，提高基层气象业务人员的监测预警服务能力，同时加强与农业、水文、应急等其他领域技术人才的合作，共同提升预报服务水平。

二是开展智能化服务。依托大数据、人工智能等新兴技术，推动公共气象服务精细化、专业化、多元化，完成从公共气象服务到气象科技服务的拓展和延伸。

三是挖掘个性化需求。以场景为牵引，以需求为导向，通过多种途径面向各行业、各领域用户开展调研，有针对性地开展服务产品研发。

四是丰富宣传科普形式。在保持气象专业性的基础上，用公众喜闻乐见、通俗易懂的方式，使科普变得生动有趣、直观快捷，做到既接地气又有干货。

致谢：感谢中国气象局气象干部培训学院2023年第4期大气科学基础知识面授培训班全体学员收集相关资料。

深入阅读

- 陈联寿, 孟智勇, 2001. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 25(3): 420-432.
- 刘达, 向纯怡, 张玲, 等, 2023. 台风“杜苏芮”(2305)的主要特点及路径和强度预报难点分析[J]. 海洋气象学报, 43(4), 1-10.
- 王恒君, 2023. 福州12345齐心抗击台风“杜苏芮”[N]. 通信信息报, 8月9日第6版.

(作者单位: 姚秀萍、张悦含, 中国气象局气象干部培训学院; 袁俊肖, 天津市蓟州区人工影响天气办公室)

(编辑: 郑秋红)

中国近十年大气科学领域文献计量分析

■ 刘文钊 李婧华

基于Web of Science平台下的SCIE数据库和中国知网（CNKI）数据库，利用计量学方法，从论文数量、来源出版物、高被引论文和研究热点等方面，分析了中国大气科学领域的研究态势及前沿热点，客观、科学地给出近十年研究进展。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.010

在过去十年中，气象事业呈快速上升，同时也产出许多重要的研究成果。通过系统梳理国内外大气科学领域论文产出、高产机构、学科方向与合作态势，能够及时为气象部门科研工作者提供科研合作线索。

目前，在数值预报、人工智能与天气预报的融合、气候变化及其衍生影响等研究领域，已有众多学者较为系统地归纳总结了对应学科的研究现状与前沿动态。为了更好地回顾并展现近十年国内外大气科学领域发展现状，同时结合大气科学的研究特点，本文以大气科学领域2012—2021年产出论文为研究对象，基于Web of Science平台下的SCIE数据库和中国知网（CNKI）数据库，利用计量学方法，从论文数量、来源出版物、高被引论文和研究热点等方面，分析了大气科学领域中的研究态势及前沿热点，试图以定量的方式，进一步客观、科学地给出大气科学领域在这十年当中研究的进展情况。

1 数据来源与统计方法

基于SCIE数据库和CNKI文献数据库对2012—2021年国际和国内的大气科学领域主题研究论文进行检索。对比国内外文献的产出和影响差别，尝试探索近十年大气科学的研究进展。在SCIE数据库中，以学科分类为“Meteorology & Atmospheric Sciences”，国家选择“中国”，文献类型为“Article”为检索条件，检索年限为2012—2021年，共得到中国发表大气科学领域SCIE论文31459篇。在CNKI数据库中，以学科为“气象学”，文献类型为“核心期刊”为检索条件，检索年限同样为2012—2021年，只选择中文文献，通过人工筛选最终得到大气科学领域中文文献28565篇（检索时间为2022年6月）。

收稿日期：2022年6月24日；修回日期：2022年12月2日
第一作者：刘文钊（1988—），Email: liuwz@cma.gov.cn
通信作者：李婧华（1987—），Email: lijinghua@cma.gov.cn
资助信息：中国气象局气象干部培训学院项目（2023CMATCQN08）

2 结果与分析

2.1 论文产出量

论文产出量作为衡量科研产出的重要指标之一显得尤为重要。从图1能够清晰地反映出不同年份CNKI和SCIE数据库中的大气科学领域论文发文情况。在CNKI数据库中，论文经历了三个阶段，2012—2014年论文量为逐年递增的趋势，2015—2018年则呈现出短暂下降情形，但这种趋势在2019年发生改变，连续三年表现出稳步提高的态势。在SCIE数据库中，中国大气科学领域论文除2013—2014年短暂出现数量下降以外，其余年份（2014—2021年）文章数量整体呈现出大幅增加的趨勢，且每经过两年文章数量就攀升到新的高度。中国国际论文量自2017年开始高于国内论文，也从侧面反映出我国科研人员研究成果的国际影响力不断增加。

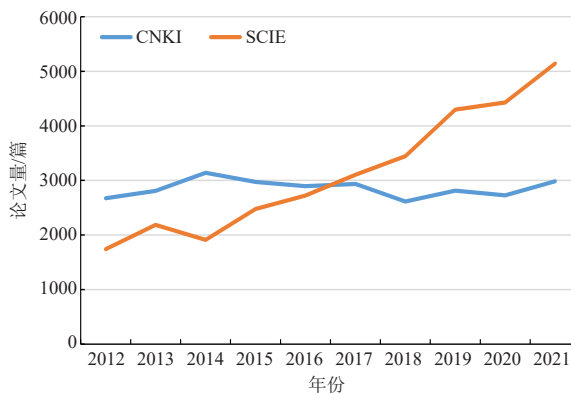


图1 2012—2021年中国发表在CNKI和SCIE数据库的大气科学领域论文

论文篇均被引频次和 h 指数是衡量论文影响力与研究质量的重要指标。从表1中可以清晰地看出，

2012—2021年在SCIE数据库中发表的论文篇均被引频次和*h*指数总体呈逐年上升态势，从2012年最初的2.50提高到2021年的30.94，*h*指数从28增长到101，近十年里分别增长到原来的12倍和4倍，这很好地体现出我国论文的整体水平和质量在稳步提高。

表1 SCIE数据库中国大气科学领域论文的影响力指标

发表年份	被引频次	篇均被引频次	<i>h</i> 指数
2012	12882	2.50	28
2013	31839	7.19	44
2014	52633	12.25	61
2015	58499	16.98	71
2016	62280	20.06	83
2017	65945	24.23	90
2018	69903	28.21	98
2019	61870	32.36	98
2020	65674	30.04	103
2021	53832	30.94	101

2.2 机构产出及刊物影响力

在CNKI和SCIE数据库中，分别对各机构的论文量进行统计分析（表2，不限定第一机构）。在CNKI数据库中，南京信息工程大学以4205篇论文稳居第一，作为大气科学学科入选国家“世界一流学科”建设学科，确实展现了相当的科研实力。中国科学院大学和中国科学院大气物理研究所分别发表1821篇和1660篇，位居第2名和第3名。在SCIE数据库中，中国气象局以4447篇论文排在第1，表明中国气象局在发表高水平研究论文上体现出较深的科研学术能力。中国科学院大气物理研究所所以微弱劣势排在第2，南京信息工程大学紧随其后，以4299篇论文排在第3，充分体现两家机构在大气科学领域中发挥的科研排头兵作用。

表2 CNKI和SCIE数据库中国大气科学领域论文量排名前10的机构

机构名称(基于CNKI)	论文量/篇	机构名称(基于SCIE)	论文量/篇
南京信息工程大学	4205	中国气象局	4447
中国科学院大学	1821	中国科学院大气物理研究所	4429
中国科学院大气物理研究所	1660	南京信息工程大学	4299
中国气象科学研究院	1504	中国科学院大学	4062
兰州大学	1005	北京师范大学	1737
国家气候中心	971	北京大学	1568
国家气象信息中心	836	南京大学	1528
北京师范大学	792	清华大学	1308
中国科学院地理科学与资源研究所	641	中山大学	1158
南京大学	627	中国科学院地理科学与资源研究所	1124

此外，分别对发表在CNKI和WOS数据库中的出版物进行统计分析。从表3和表4显示的来源出版物看，发表在外文期刊上的论文数量，整体上要多于国内期刊。一方面说明，中国作者更愿意把相关研究成果发表在国外期刊上，另一方面说明，国内期刊对于中国作者的吸引力相对偏弱，这也间接导致国内期刊上优质论文相对较少，这种现象应被广大科研人员、管理者和期刊界所重视。笔者认为应加强有关政策上的引导与扶持，才能让更多高质量的优秀论文发表在祖国大地上。另外，在排名前10的国际出版物中，位于Q1区的期刊占到了50%，也充分表明更多高质量的论文予以发表。

表3 SCIE数据库中国大气科学领域论文量排名前10的出版物及其相关信息

出版物名称	论文量/篇	影响因子	分区
Atmospheric Environment	2362	4.8	Q1
Journal of Geophysical Research Atmospheres	2077	2.7	Q2
Atmospheric Chemistry and Physics	1856	6.1	Q1
Atmosphere	1513	2.7	Q3
Natural Hazards	1470	3.1	Q2
Climate Dynamics	1446	4.4	Q1
Journal of Climate	1381	5.1	Q1
Advances in Space Research	1359	2.2	Q3
International Journal of Climatology	1263	4.1	Q2
Atmospheric Research	1169	5.4	Q1

注：表中期刊影响因子和分区信息来自于科睿唯安官方发布最新年度（2021年）期刊引用报告数据（Journal Citation Reports, JCR）。

表4 CNKI数据库大气科学领域论文量排名前10的出版物及相关信息

出版物名称	论文量/篇	综合影响因子
气象	1711	2.37
高原气象	1429	2.36
大气科学	927	2.02
热带气象学报	892	1.75
气象科学	847	1.30
大气科学学报	816	1.38
气象学报	782	2.34
应用气象学报	621	2.50
气候与环境研究	554	1.09
气候变化研究进展	540	1.82

注：表中期刊影响因子信息来自于中国知网官方数据。

2.3 学科分布与高被引论文

科技论文的学科分布是衡量学术机构研究重点以及科研领域是否合理的重要参考标志之一。从CNKI的检索结果发现，与大气科学联系较多的学科主要包括：环境、海洋、农业资源与环境、植物保护和作物等。在SCIE数据库中，与大气科学联系紧密的学科分别是生态环境学、地质学、水资源学、工程学、天文

学天体物理学等。此外，像建筑科学、控制工程、测绘、林学、地球化学地球物理、海洋学、生物物理学也均有一定的论文量（表5）。从上述结果中可以看出，与大气科学领域相关的学科分布较为广泛，涉及多个学科，凸显了其是一个跨学科研究主题，在未来研究中更应发挥其特有的交叉学科优势。

表5 与大气科学领域联系紧密的学科分布

学科名称 (基于CNKI)	论文量/篇	学科名称(基于SCIE)	论文量/篇
环境	1965	Environmental Sciences Ecology	9797
海洋	1333	Geology	5740
农业资源与环境	1296	Water Resources	4294
植物保护	956	Engineering	2203
作物	850	Astronomy Astrophysics	1826
地球物理	763	Agriculture	967
建筑科学	369	Forestry	952
控制工程	324	Geochemistry Geophysics	834
测绘	309	Oceanography	629
城乡规划与市政	280	Biophysics	286

通过对SCIE数据库中国大气科学领域被引频次排在前20的论文分析发现，在热带太平洋ENSO循环中云辐射反馈模拟方面取得的成果引起了国际同行的较多关注，在青藏高原冰川与气候变化事实分析、温室效应导致极端厄尔尼诺事件等方面的研究成果，也引起国内外同行的相当关注。此外，多篇科研论文聚焦在气候变化及其衍生影响。例如“厄尔尼诺”严重扰乱了全球天气模式、生态系统、农业生产等、同时造成了如干旱、丛林火灾、温室效应、洪水和世界范围内的其他极端天气事件等。相关研究还通过作物模型

来评估干旱威胁对全球气候变化和粮食生产的影响，得出气候变暖已经减缓了大多数国家的小麦种植和产量。研究还有气溶胶排放对空气环境影响。另有相关研究显示，季节性变化与气溶胶排放存在着相关联系，同时温室气体排放对于作物产量也同样具有深远影响。

对CNKI数据库大气科学领域被引频次排在前20的论文分析发现，气候变化为主题的论文占大多数，主要包括了IPCC评估报告对于全球变暖、人类活动受气候变化影响等的相关研究；在全球变暖背景下的我国西北干旱区水资源问题应对和适应未来气候变化带来的影响的研究分析；气候变化对农业影响的研究方法、气候变化对农业气候资源和农作物生长发育和产量的影响。此外，利用资料诊断，从大气环流背景场和雾霾天气演变过程两个方面，分析了气象条件在持续性强雾霾天气发生中的作用；针对雷暴和强对流天气的综述型论文；以主观预报为主、结合客观算法的临近预报技术，讨论高分辨率数值预报模式在临近预报中的应用等相关主题论文。

由此可见，不论是在SCIE还是在CNKI数据库中，与气候变化相关的研究论文仍占据了相当大的比重，纵观近十年的研究主题也均以全球变暖、温室效应、碳排放、极端降水、极端天气等息息相关，反映出极端天气与气候变化及其衍生影响是过去十年大气科学领域的研究热点和重点。表6、表7分别给出了2012—2021年SCIE和CNKI数据中被引频次排在前10的高被引论文。

表6 2012—2021年SCIE数据库中国大气科学领域被引频次排名前10的论文

论文题目	第一作者	出版刊物	被引频次	发表年份
A Further Study on the Simulation of Cloud-Radiative Feedbacks in the ENSO Cycle in the Tropical Pacific with a Focus on the Asymmetry	Chen Lin	Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences	1412	2019
Different Glacier Status with Atmospheric Circulations in Tibetan Plateau and Surroundings	Yao Tandong	Nature Climate Change	1384	2012
Increasing Frequency of Extreme El Nino Events Due to Greenhouse Warming	Cai Wenju	Nature Climate Change	1181	2014
Accelerated Dryland Expansion Under Climate Change	Huang Jianping	Nature Climate Change	1016	2016
Greening of the Earth and Its Drivers	Zhu Zaichun	Nature Climate Change	980	2016
Rising Temperatures Reduce Global Wheat Production	Asseng S	Nature Climate Change	956	2015
Chemical Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing: Seasonal Perspective	Zhang R	Atmospheric Chemistry and Physics	906	2013
Trends in China's Anthropogenic Emissions Since 2010 as the Consequence of Clean Air Actions	Zheng Bo	Atmospheric Chemistry and Physics	854	2018
Updated Analyses of Temperature and Precipitation Extreme Indices Since the Beginning of the Twentieth Century: the Hadex2 Dataset	Donat M G	Journal of Geophysical Research- Atmospheres	798	2013
Uncertainty in Simulating Wheat Yields Under Climate Change	Asseng S	Nature Climate Change	795	2013

注：检索日期为2022年6月。

(下转74页)

基于气候生态产品价值实现的 气象服务模式与发展思考

■ 范晓青 张勇 庞君如

气象服务工作应分析和适应生态产品价值实现的需求，依托气候资源评价服务，提高生态产品价值实现的效能。通过文献调研、政策调研、网络调研、典型案例调研等方式，分析生态产品价值实现对气象服务的需求，进一步对特色气候资源评价、气候生态品牌创建两种现有气象服务模式及存在问题进行了分析，提出了基于气候生态产品评价的服务模式，并对气候生态产品的价值实现机制和服务模式的发展进行了思考。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.011

生态产品是指良好的生态系统以可持续方式直接或间接地满足人类生产、生活需求的物质产品和服务，包括良好生态系统直接带来的农产品、清洁水源、木材等物质供给，也包括公园、名胜区消遣体验等文化服务，还包括清新空气、宜人气候、固碳、防风固沙、生物多样性保护等调节服务。生态产品价值实现是指将生态产品所具有的生态价值、经济价值和社会价值，通过生态资源调查与评价、生态价值评估与核算、生态保护与补偿、市场开发与经营等措施进行体现，进而利用政府主导、企业和社会各界参与、市场化运作机制，实现生态优势向经济优势转化。

气候资源是重要的自然资源，具有供给、承载、调节等服务功能。开展气候资源评价是气象部门一直以来通过气候资源保护利用，服务经济社会发展的一项基础性技术工作。随着《建立健全生态产品价值实现机制的意见》出台，社会各界不断深入推进生态产品价值实现。面对新的需求，气象部门关于气候资源对生态产品价值实现的思考和服务实践也越来越活跃。本文对标生态产品价值实现相关概念和要求，在对现有气象服务进行分析的基础上，对气候生态产品的概念和内涵进行了思考，进一步对基于气候生态产品价值实现的气象服务模式及发展提出了建议。

1 生态产品价值实现相关需求和措施

科学准确评价生态资源，摸清生态资源家底、分

析生态资源优势 and 潜力，是生态产品价值实现的基础性技术工作。通过生态资源评价，将生态优势附着于农产品、工业品、旅游或文化服务产品的价值中，可有效促进生态产品溢价。随着各地生态产品价值实现工作的推进，对绿色认证等优势生态资源评价技术的需求也越来越具体。

以生态资源评价为基础开展品牌创建，通过品牌赋能带动生态资源富集地区生态产品价值实现，支撑以可持续的方式进行“生态产业化、产业生态化”开发与经营，提高农产品、清洁水源等优势生态产品的知名度和影响力，也是多地开展生态产品价值实现的成功经验。以农产品为例，地理标志农产品、农产品区域公用品牌等权威品牌的创建，不仅为公众提供了更多美好生活的选择，促进了市场交易，也是广受地方政府青睐的生态产品价值实现措施。

2 生态产品价值实现气象服务现有模式及分析

近年来气象部门在服务生态文明建设中发挥气象科技优势，除了依托气候资源评价挖掘地方特色气候资源，还探索开展了气候生态品牌创建。

2.1 特色气候资源评价

面向具体地区、具体生态产品开展特色气候资源精细化评估，应科学厘定气候资源优势程度及贡献，助力地方发现好的生态产品、提高生态产品的市场信

收稿日期：2023年3月12日；修回日期：2023年9月17日

第一作者：范晓青（1978—），Email: fanxq@cma.gov.cn

通信作者：张勇（1976—），Email: yzhang@cma.gov.cn

资助信息：中国气象局气象发展与规划院政策专项研究资金项目（ZCYJ0220011）

赖度，代表性工作有农产品气候品质评价、特色旅游气候资源评价等。

农产品气候品质评价是通过筛选农产品气候品质指标关键气象因子建立评价模型，量化评价天气气候条件对农产品品质的影响。气象部门从2012年开始开展这项工作。多地针对具体农产品建立了专门的气候品质评价模型。从认证农产品气候品质等级到评价气候品质优级农产品，从使用代表性气象站观测数据进行评价到使用覆盖种植区的高分辨率气象格点资料进行评价，气象部门这项技术在时间和空间上的精细化程度不断提升。多地开展农产品气候品质评价十多年来的实践表明，通过开展农产品气候品质评价，显著提高了地方优势农产品的气候附加值和市场竞争力，有效推进了气候资源优势转化为经济优势。农产品是很多地方开展生态产品价值实现的主要载体。依托农产品的气候品质评价，服务于地方生态产品价值实现，需求潜力大、发展前景广阔。

对文化服务类生态产品如旅游景区、风景名胜区，气象部门通过针对性开展红叶、花海、云海、雾凇等特色气候景观的气候资源评价及预报服务，有效吸引了游客量攀升，带动旅游收入增长。对特定地区通过评价挖掘避暑、避寒、康养等特色气候资源，为评价地区生态产业化发展提供技术支撑，带来了经济效益和社会效益双丰收。

2.2 气候生态品牌创建

国家级气象部门探索开展的“国家气候标志”评价服务，像“中国天然氧吧”“避暑旅游目的地”“中国气候宜居地”“中国气候好产品”等成为赋能地方绿色发展的金字招牌，为地方带来了显著的效益，吸引了广泛参与。2022年中国气象局在全国创建示范活动框架下规范开展这项工作，出台了气候生态品牌创建管理办法。国字号的权威进一步提升了品牌需求热度，为品牌规模化发展注入活力。“中国天然氧吧”是气候生态品牌的典型案例，本文以此为例对气候生态品牌创建这种服务模式进行分析。

“中国天然氧吧”评价工作于2016年启动。2018年《国务院办公厅关于促进全域旅游发展的指导意见》将中国天然氧吧列入国家全域旅游发展计划。2020年全国评比达标表彰工作协调小组将中国天然氧吧列入第二批全国创建示范活动保留项目目录。到2022年底，全国29个省（自治区、直辖市）共有313个地区被授予“中国天然氧吧”称号。

根据《“中国天然氧吧”创建活动管理办法》，“中国天然氧吧”是指气候舒适、生态环境优良、配套设

施和服务完善、适宜旅游、休闲、度假、养生的特定区域。“中国天然氧吧”以符合条件要求的县级行政区或旅游景区为创建主体，旨在发现生态旅游气候资源优势，引导地方保护利用优势资源，推进价值实现、赋能绿色发展。

“中国天然氧吧”创建指标包括两个维度（见图1）。一是包含空气负离子浓度、气候舒适度、空气质量、水质、森林覆盖率等的生态资源禀赋相关评价指标。二是包含基础观测能力、区域发展规划、旅游接待能力、交通便捷性、特色荣誉等的创建工作效能评价指标。通过两个维度的指标综合评价，体现该品牌对具备生态资源禀赋“天帮忙”与践行绿色发展理念“人努力”两方面的内在要求。

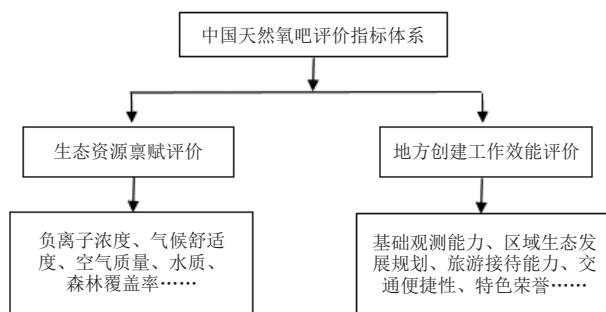


图1 中国天然氧吧评价指标示意图

“中国天然氧吧”创建是气象部门服务生态产品价值实现的创新实践，主要以县级行政区域为创建主体，向地方政府授予品牌，激发生态产品价值实现机制要求的“政府主导”这一关键环节的活力。创建要求所有氧吧地区制定氧吧相关生态规划，并由气象部门对已创建地区实行定期复查，对不能继续符合指标要求的地区进行撤牌。通过这些措施引导地方在用好用优势生态资源的同时进行持续性保护。国字号品牌吸引了社会组织、企业等各界围绕创建地区开展了各式氧吧特色产业活动，如氧吧体育赛事、氧吧地区优质农产品展等，带动氧吧地区经济效益和社会效益的提升。通过品牌创建，政府主导、各界参与、市场化运作的氧吧气候生态品牌价值实现机制已逐步形成。

2.3 存在的问题

技术方面，近年来气象部门在趋利气象服务中积累了数量较多、种类细分的气候资源评价技术，但在实际应用中，主要是气象部门主动提供服务。由于外界对气候资源评价技术认知不足，对气象部门的主动需求度低，在开展生态产品价值实现中对气象部门的需求往往还停留在气象数据的直接供给或统计分析层面。总体来说，现有气候资源评价服务模式具有小、低、散的特点，尚未形成合力和规模化效应。

管理方面，国家级气候生态品牌在创建示范活动框架下开展。虽然品牌权威、知名度高、影响力大，但是对应的气候资源类型有限，与意向创建地区的优势资源类型未必一致，导致一些无法创建国字号品牌的情况。也有一些地区在推动创建过程之初，对地区优势气候资源类型认识不足，导致一定程度的盲目性，提高了创建成本。近年来多地气象部门也探索开展了各具特色的气候生态品牌创建，适应地方旺盛需求，成为国家级品牌的有益补充。但是，由于省级之间创建品牌类型、技术方法、规模力度等情况差异较大，存在同类型品牌标准规范不统一等情况。地方创建意愿和结果也由于对品牌认知不同等原因，存在较大差异。

3 气候生态产品评价及服务应用

基于对现有服务的分析，根据气象部门科技型、基础性、先导性的特征，建议对面向生态产品价值实现的气候资源评价工作进行集约化组织管理，建立全国一体化的气候生态产品评价业务，并进一步理顺气候生态产品评价与气候生态品牌创建两种服务模式的关系，提升气象服务生态产品价值实现的整体效能。

3.1 气候生态产品内涵和分类

随着多地气象部门积极探索本地区气候生态产品

价值实现的路径，气候生态产品的概念已被较广泛使用，但较少有对气候生态产品内涵和分类的明确表述。本文参照生态产品的一般描述，对气候生态产品的内涵和分类进行了思考，将生态系统主要受气候条件影响，以可持续方式提供的满足人类生产和生活需求的物质产品或服务统称为气候生态产品。根据气候资源的供给、承载、调节等功能，气候生态产品包括气候适宜条件下的物质供给，如气候品质优质的农产品，风能、太阳能等，也包括由特定气候条件形成的具有宜游、宜业、宜居、生态调节等功能的服务供给，如气候景观、气候康养、避暑避寒、固氧固碳等。

3.2 气候生态产品评价的服务模式

气候生态产品评价是气象部门依托气候资源评价技术面向社会开展的一项科技服务。它是通过气候生态产品评价，由气象部门主导，气候赋能，为各界开展生态产品价值实现提供气候品质可靠的生态产品，提升生态产品的供给能力和水平。在气候生态产品评价的基础上，政府部门可根据本地区气候生态产品情况，针对性创建气候生态品牌、本地区区域公用品牌等，通过政府主导、品牌赋能，推动气候生态产品价值实现。基于气候生态产品评价的气象服务模式示意图2。

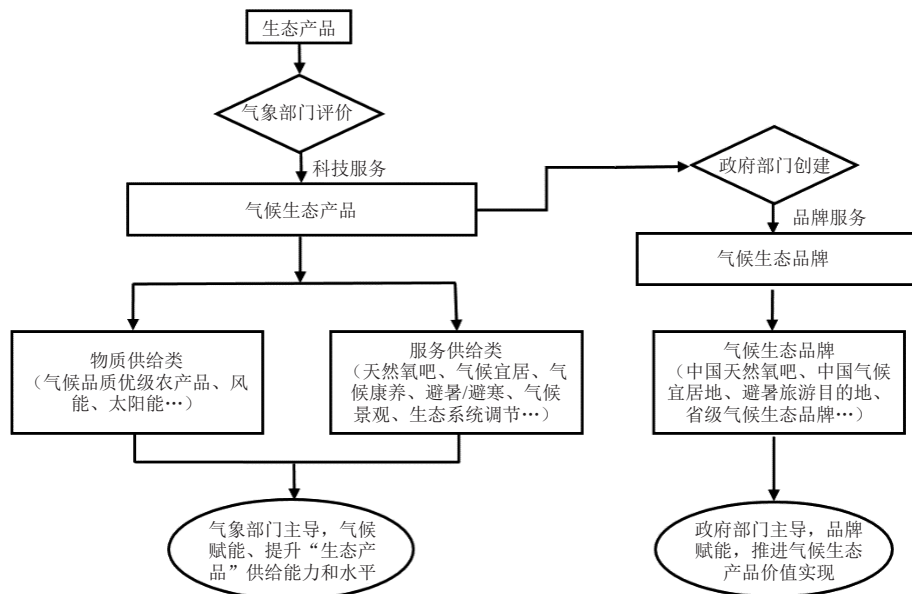


图2 基于气候生态产品评价的气象服务模式示意

以“中国天然氧吧”为例对图2进行说明。按图1所示利用左侧技术指标开展资源禀赋评价，将满足要求的地区评价为“天然氧吧”，这一工作即为气候生态产品评价。评价气候生态产品是创建气候生态品牌的前提和基础。在确定某地具备某种优势资源的基础

上，通过人为制定针对性创建措施推进其价值实现，并设定匹配的指标评价创建成效，则政府部门可对达到了创建指标要求的地区授予气候生态品牌。仍以图1为例，“天然氧吧”地区按右侧指标要求推动创建，对达到要求的地区授予“中国天然氧吧”称号，这一

工作即为气候生态品牌创建。气候生态品牌的成功创建体现了地方依托气候生态产品促进区域生态价值实现的成效，是气象部门在气候生态产品评价技术服务的基础上向意向创建地区提供的品牌增值服务。根据当前气候生态品牌创建情况，探索开展气候生态产品评价，对气候生态品牌创建减少盲目性、提高针对性和规范社会认知等都具有积极的现实意义。

4 气候生态产品价值实现气象服务模式发展思考

《气象高质量发展纲要（2022—2035年）》明确要求建立气候生态产品价值实现机制，本文在提出气候生态产品评价服务模式的基础上，进一步对气候生态产品的价值实现和这项服务模式的发展进行了思考。

一是通过气候生态产品评价积极融入生态产品价值实现的外部机制。“十四五”期间，我国生态产品价值实现机制要求不断完善生态产品评价、丰富生态产品供给。气象部门通过全国一体化开展气候生态产品评价，在从气候角度帮助地方摸清气候资源优势和生态产品家底的同时，还应对评价的气候生态产品进行规范发布，并积极探索联合相关部门推进生态产品品牌共建，在丰富生态产品供给上积极发出部门声音，融入全社会生态产品价值实现的外部机制。

二是通过气候生态品牌创建驱动气候生态产品价值实现的内部机制。从气象部门内部而言，通过“中国天然氧吧”品牌创建已经形成了相应的气候生态产品价值实现机制。气象部门应以此为典型案例，通过规模化总结品牌创建带来的经济效益、社会效益和生态效益，推广成功经验做法，示范引领更多气候生态产品通过品牌赋能进行价值实现。

三是保障气候生态产品评价的可持续发展。我国应加强气象与农业、旅游、环境等领域的交叉学科研究，面向具体生态产品，丰富和细化基于指标和阈值的评价标准建设，提高开展气候生态产品评价的科学性和规范性；应加强与行业领域的数据共享，依据评价指标和阈值，通过持续性评价为气候生态产品建立综合、立体的数字画像，为气候生态产品评价和溯源提供数据支撑；还应建设全国一体化的气候生态产品评价平台，集约化带动评价能力提升。生态产品价值实现机制要求探索构建特定地域单元的生态产品价值

评价体系。开展气候生态产品评价，可以依据地方对生态产品价值实现的需求，以县级行政区域为主体先行试点，通过评价挖掘气候生态产品及推进气候生态品牌建设，以点带面推动对气候生态产品的规模化评价和价值实现。

深入阅读

- 丁国香, 刘安平, 刘承晓, 等, 2016. 安徽省山岳型景区旅游气象服务业务系统[J]. 南京信息工程大学学报, 8(1): 71-75.
- 高晓龙, 张英魁, 马东春, 等, 2022. 生态产品价值实现关键问题解决路径[J]. 生态学报, 42(20): 8184-8192.
- 贺楠, 范晓青, 姜燕, 等, 2021. 我国农产品气候品质评估工作的思考[J]. 气象科技进展, 11(5): 182-184.
- 胡桂萍, 范倩文, 朱玉洁, 2022. 探索气候生态产品价值实现的可行性路径[J]. 浙江气象, 43(3): 17-20.
- 李仁忠, 王治海, 金志凤, 等, 2015. 浙江省农产品气候品质认证服务浅析[J]. 浙江气象, 36(4): 23-26.
- 李长顺, 黄文霖, 宗晨, 等, 2021. 清新福建气象条件贡献率评价指标系统设计[J]. 计算机技术与发展, 31(12): 211-216
- 李家启, 郑箐舟, 詹璐, 等, 2022. 巫山脆李“中国气候好产品”品牌效益及价值提升途径分析[J]. 南方农业, 16(7): 36-40.
- 廖峰, 2020. 生态产品价值实现与山区农产品区域公用品牌研究[J]. 丽水学院学报, (11): 1-10.
- 南锡康, 孟冬, 马朋林, 2022. “十四五”时期生态产品价值实现前景研判[J]. 自然资源情报, (12): 1-6.
- 潘煜, 詹璐, 2021. 中国天然氧吧品牌价值现状及公共需求研究[J]. 科技传播, 13(22):13-16.
- 生态产品价值实现路径、机制和模式课题组, 2019. 生态产品价值实现路径、机制与模式[M]. 北京: 中国发展出版社.
- 谭萍, 陈玉贵, 罗丹, 2021. 中高端气象服务品牌推广战略研究[J]. 品牌与标准化, (4): 21-26.
- 王丽, 2022. 生态产品价值实现理论探索[J]. 中国国土资源经济, (11): 4-10.
- 王丹丹, 许金萍, 李艳芳, 等, 2022. 湖州气象在“两山”理念转化及生态产品价值实现中的贡献[J]. 浙江气象, 43(3): 9-16.
- 汪如良, 邓德文, 章开美, 2022. 江西气候生态产品价值实现的探索与思考[J]. 气象与减灾研究, 45(2):141-144.
- 肖芳, 姜海如, 2021. 优质生态气候产品价值实现途径探讨[J]. 中国发展观察, (11): 46-47.
- 谢花林, 陈倩茹, 2022. 生态产品价值实现的内涵、目标与模式[J]. 经济地理, 42(09): 147-154.
- 徐擎擎, 李衍彪, 曹伟, 等, 2022. 农产品气候品质认证技术研究进展[J]. 热带农业科学, 42(4): 132-135.
- 詹璐, 2021. 拓宽绿水青山与金山银山的转化通道—国家级气候品质评价发展历程与现状研究[J]. 科技传播, 13(24): 38-41.
- 张林波, 虞慧怡, 2021. 生态产品价值实现:理论、实践与任务[M]. 济南: 山东人民出版社.

(作者单位: 范晓青、庞君如, 中国气象局公共气象服务中心;
张勇, 中国气象局气象发展与规划院)

(编辑: 卢冰)

智慧气象融入经济、社会、城市 三大治理体系的研发应用

■ 金玲 张丽亚 张德林 顾松强 陈丽君

以上海市浦东新区为试点，将“智慧气象”场景融入经济、社会、城市三大治理体系的应用场景，建设了浦东“智慧气象”平台。基于物联感知、图像识别、智能发现、大数据融合、移动互联和GIS等技术手段，平台建立智能化精细化的气象灾害风险预警模型，实现灾害性天气的智能发现和风险预警的自动推送；建立气象安全智能监管模型，实现气象安全监管的智能发现、分类监管、自动派单和协同处置的技术流程创新；建立气象全要素治理标准化流程清单，构建风险预警分级联动闭环，应用于智慧气象场景关键治理流程，实现气象融入经济、社会、城市治理体系中各部门协同机制。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.012

“智慧气象”是气象现代化发展的产物，是人们对气象智能化的积极探索和追求，是气象与科技、经济、社会的深度融合。发展观测智能、预报精准、服务开放、管理科学的智慧气象，是转变气象发展方式的重要途径。“智慧气象”已通过云计算、物联网、移动互联、大数据、智能等新技术的深入应用，依托于气象科学技术进步，使气象系统成为一个具备自我感知、判断、分析、选择、行动、创新和自适应能力的系统，让气象业务、服务、管理活动全程都充满智慧。2016年建设的“浦东新区重点单位气象安全智能综合监管平台”，将气象安全智能监管纳入浦东新区经济治理风险防范体系。2017年建设的“城市大脑——智慧气象精细化管理平台”，纳入了浦东新区城市运行智能化管理平台。

2021年浦东新区打造社会主义现代化建设引领区，提出“率先构建经济治理、社会治理、城市治理统筹推进和有机衔接的治理体系”。鉴于“浦东新区重点单位气象安全智能综合监管平台”侧重于气象安全监管，“城市大脑——智慧气象精细化管理平台”侧重于气象赋能城市精细化服务。两个平台存在功能相对单一、场景分散、受众面不强的问题，亟需集约化转变系统建设，整合技术成果，建设“智慧气象”应用场景，将气象治理要素贯穿经济发展监管、社会民

生服务、城市运行安全，从服务供给侧发力向应用需求侧发力延伸，融入浦东新区经济、社会、城市治理深化整合后的核心流程体系。

1 总体设计思路

“智慧气象”以平台深化整合为抓手，坚持数字化转型方向，以数字治理引领整体转变的要求，以融入浦东新区经济、社会、城市三大治理的设计思路和总体框架，搭建由基础层、数据层、服务层、应用层、展示层组成的平台构架。整合场景主要是解决了浦东新区重点单位气象安全智能综合监管平台”仅有气象监管内容、场景受众面小的问题，并丰富“城市大脑——智慧气象精细化管理平台”内容，解决了管理平台中天气元素为主的单一性以及缺乏部门间场景互动性的问题。

“智慧气象”应用场景，一方面以精准高效响应群众和市场主体需求为导向，建立气象要素影响城市安全、经济发展、民生服务3方面15个标准化服务清单，明确了要素名称、定性描述、识别方式、预警阈值界定以及对应的协同派单对象，体现了条块联动的处置标准和处置流程，从智能化技术支撑、服务流程再造方面深入研究，实现了气象风险源头预防，助力各部门综合治理；另一方面，以提升智能化为核心的风险主动发现能力为目标，以气象灾害风险为要素，以各

收稿日期：2022年5月16日；修回日期：2022年9月10日
第一作者：金玲（1984—），Email: 542712285@qq.com

部门融合为路径,运用物联感知、图像识别、算法模型等智能化手段实现问题智能发现和趋势研判,建立多元素气象灾害风险模型。

此外,围绕各方主体全面参与,“智慧气象”平台实现了气象业务流程转型,建立影响预报、风险预

警、气象服务与智慧化气象安全监管工作的创新机制;以气象风险事前防范为重点,逐个要素形成协同处置流程,分级构建联动响应闭环,与各部门进行协同联动,推送精细化气象灾害风险提示,实现气象风险源头预防(图1)。



图1 上海浦东“智慧气象”平台

2 核心功能与技术设计

从智能发现、精细预报、精准服务、智能监管、联动响应、反馈机制等方面运用智能化手段实现“智慧气象”应用场景在三大治理体系的核心技术研发应用。

2.1 基于智能发现的灾害天气风险预警模型

针对不同类型的天气特点,平台从智能网格预报、重要信息天气领导专报、十天预报、短时临近预报以及相关新型监测手段,设定相关阈值,采取格点插值、敏感字提取、双偏振雷达参量及雷达外推产品进行多源数据融合判断等方式,结合服务对象地理位置,应对不同气象灾害风险的承受能力,实现灾害性天气风险智能发现,推送精细化风险提示。基于“智慧气象”应用场景,通过智能发现建立的灾害天气风险预警模型,在经济发展、民生服务和城市安全各领域实现气象灾害的精细化风险预警。2022年汛期期间,平台智能发现强降水20次,大风39次,雷电89次。根据不同部门阈值需求,平台实现了自动推送精细化预警292次。

2.1.1 实现灾害性天气的智能发现

针对短时临近预报的相关新型监测手段(探空、双偏振雷达、自动站等)依次通过格点插值、敏感字提取、双偏振雷达参量读取与判断。根据相关阈值设定,平台进行多源数据融合判断等方式实现灾害性天

气的智能发现和预报。

根据不同类型的天气特点(影响范围、影响时间、预报能力),平台将风险预警的天气过程分为两大类,分别是过程性天气(包含台风、寒潮、高温、低温、过程性暴雨等)和强对流天气(包含短时强降水、雷电、雷暴大风、冰雹等)。其中,着力解决强对流天气智能发现的判断阈值和模型搭建。

针对过程性天气,平台主要通过智能网格预报、重要信息天气领导专报、十天预报、结合自动站(大风、气温)实况进行风险预警的智能发现和推送。利用智能网格预报1 h降水量、24 h滑动累积降水量,逐小时气温,风速等产品通过格点插值到服务对象(工地、小区等)相应经纬度,通过阈值判断(例如1 h降水量可达35 mm或24 h可达50 mm)进行风险提示。针对强对流天气过程,平台通过大量强对流天气个例分析,针对雷暴大风、短时强降水,试图通过双偏振雷达(青浦、南汇)参数及相关产品(TVS、QPE、QPF,光流法雷达回波外推产品),结合闪电资料、探空资料,实现雷暴大风、短时强降水、冰雹的智能识别。

通过文献调研及专家评审,平台建立了以探空、雷达、自动站、闪电定位仪等多源数据融合的阈值判断方法。通过对当日宝山08时(北京时,下同)探空0℃、-10℃、-20℃高度自动读取,利用青浦S波段双偏振雷达的相关参量(组合反射率、径向速度、微

差反射率因子ZDR、相关系数CC、相位差KDP)以及雷达小时定量降水估测产品QPE,回波顶高ET等进行强对流天气类型的智能判别和智能发现。若上述强对

流天气发生在上游,则利用光流法回波外推产品,实现未来1 h是否影响本区预警区域的智能提醒。主要判断方法如图2所示。

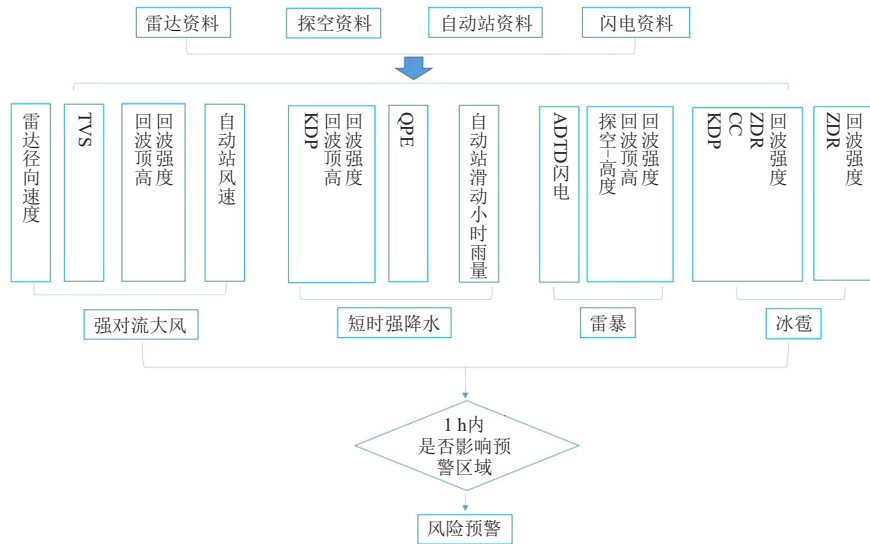


图2 风险预警流程图

2.1.2 建立风险预警模型

目前平台实现了台风大风影响下浦东新区部分沿海学校承灾体自身暴露度脆弱性动态风险指数的构建方法。未来将通过基于对承灾体脆弱性暴露度的数据获取调查分析,确定不同气象灾害所对应的风险因素、风险因子及风险指标权重,制定指标体系,形成动态风险预警提醒。

2.2 基于动态风险监管模型形成智慧管理模式

运用物联感知在线监测防雷设备运行,图像识别检测报告的关键信息、数据比对检测机构资质等智能化监管手段,智能发现防雷安全监管各方面风险隐患建立“防雷安全风险监管模型”,平台实现针对防雷安全监管的智能发现、分类监管、自动派单、协同处置的智慧化全流程闭环处置。基于“智慧气象”应用场景,运用物联感知、图像识别、数据比对等智能化手段,基于风险监管模型,开展了智能发现、自动派单、分类监管。自平台运行以来,智能在线监测技术实现自动预警共12次,平台通过对近300家重点单位近400份防雷安全检测报告进行机器学习、自动巡检、识别风险,从技术层面实现平台按照“高中低”风险自动推送执法人员不同监管措施,提升监管效能近60%,属于全国首创气象安全监管技术运用。

2.2.1 智能发现防雷安全风险隐患技术

在部分重点易燃易爆危化场所安装防雷设施在线监测硬件,平台实现了实时在线监测防雷设施(含防雷接地装置、电涌保护器SPD等)的接地电阻、漏电

流、绝缘电阻以及失效状态等重要敏感参数值。当防雷设施性能参数达到系统预警值,“智慧气象”平台将通过短信推送等方式告知工作人员,提醒对相应防雷设施进行检修或者更换处理,解决了原有靠人工一年两次检测中可能有的疏漏以及检测周期较长的问题,实现了风险的实时报警。

2.2.2 建立防雷安全风险监管模型

基于雷电风险因子、地域风险因子以及承灾体风险因子,平台建立了防雷安全监管模型,如图3所示。

通过多级综合评估,由第二层指标向第一层指标逐级计算得出“气象灾害防御重点单位雷击风险”的隶属度向量 g ,通过加权平均的方法量化得到综合评估结果。

根据综合评估结果 g 值,按表1进行风险等级判定。

表1 区域雷击风险分级标准

危险等级	综合评估用 g 表示, g 值越小代表区域内项目雷击致灾风险越低, g 值越大代表区域内雷电致灾风险越高, g 值区间 $[0,6]$
I级	综合评估 $0 < g < 2$, 低风险
II级	综合评估 $2 \leq g < 4$, 中等风险
III级	综合评估 $4 \leq g \leq 6$, 高风险

2.3 治理关键环节

2.3.1 形成标准化要素清单

根据群众和市场主体需求,按经济、社会、城市三类梳理气象治理要素,以要素为条目,平台将要素作为治理的基本单元,编制形成治理“要素字典”。

其中,经济治理要素主要涉及企业防雷安全监

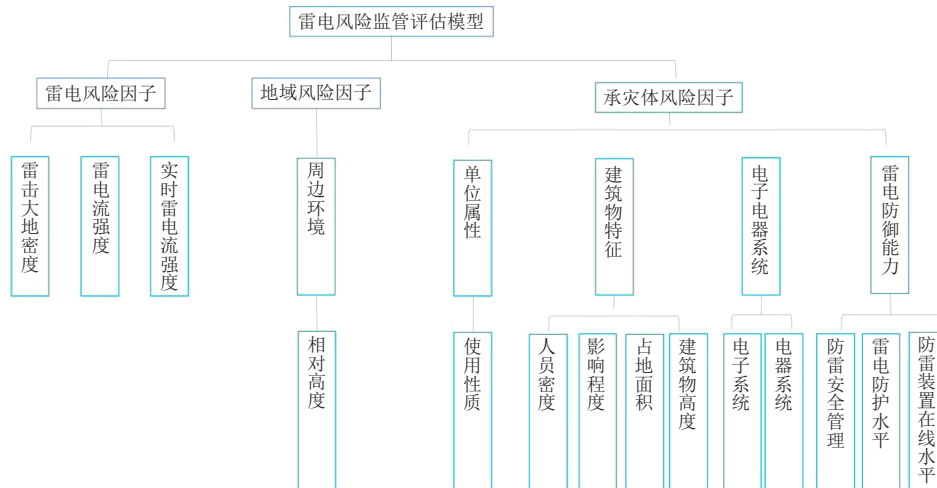


图3 防雷风险监管模型示意图

管和气象灾害防御重点单位的管理；社会治理要素包括对气象服务有重点需求的相关行业，如农业气象服务、旅游气象服务、小区气象服务等；城市治理要素主要覆盖城市运行中存在的气象风险，如城市内涝、城市风灾、工地安全等。针对各类要素，平台明确其要素名称、定性描述、识别方式、预警阈值界定以及对应的协同派单对象，体现条块联动的处置标准和处置流程。

2.3.2 建立联动闭环机制

基于气象业务流程，以气象风险事前防范为重点，逐个要素形成协同处置流程，平台分级构建联动响应闭环机制。对于通过社会主体自行处置的问题形成“小闭环”（如防雷安全智能在线监测发现的问题）；对于通过跨处室、跨层级处置的问题形成“中闭环”（如雷电灾害风险发现）；对于需要跨政府部门、跨行业、跨主体处置的问题形成“大闭环”（如城市安全风险、农业气象风险、气球升放安全监管等），分级联动响应闭环机制如图4所示。通过将各类风险预警工单信息同步给城运协同系统，平台实现风险的智能发现、智能分析和智能处置全流程闭环。通过系统运行，平台实现“小闭环”独立处置12起工单事件，“中闭环”协同处置3起工单事件，“大闭环”覆盖街镇城运中心、农委、建设与交通委员会、应急管理局、生态环境局6个部门协同联动处置292起工单事件，通过城运中心协同平台实现气象业务流程跨部门、跨层级协同联动。

2.3.3 场景效能评估

平台将指标嵌入影响预报风险预警服务以及气象安全监管等各个业务环节，建立评价机制，建立效能评估体系，形成风险智能发现数、风险预警准确率、

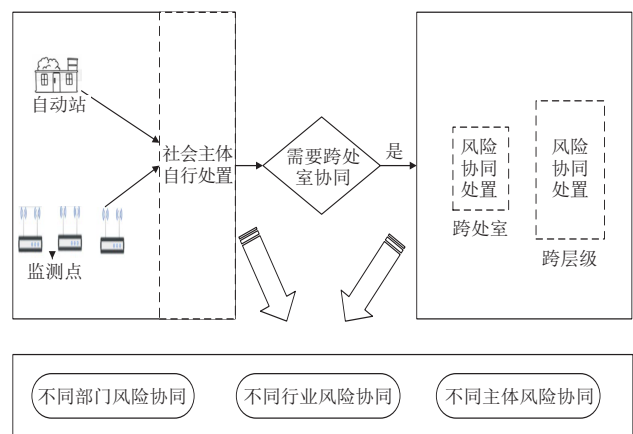


图4 分级联动响应闭环机制示意图

协同派单准确率、及时处置率等四大指标。

3 小结

基于“智慧气象”应用场景，通过智能发现建立的灾害天气风险预警模型，在经济发展、民生服务和城市安全各领域实现了气象灾害的精细化风险预警。运用物联感知、图像识别、数据比对等智能化手段，基于风险监管模型，“智慧气象”平台实现了智能发现、自动派单、分类监管。基于分级联动响应闭环机制，“智慧气象”平台建立了标准化、规范化、数字化的问题发现和派单机制、处置流程和处置标准；通过数字化技术手段实现纳入各行业、领域、区域处置气象灾害事件主要流程，实现了气象业务流程跨部门、跨层级协同联动。“智慧气象”平台还建立效能初级评估指标体系，实现了与业务流程无缝衔接的常态化评价机制。“智慧气象”平台针对场景运行的真实情况开展实现了无人干预的目标式量化管理，定期评估风险模型的运算准确率，实现了技术与业务发展同步可持续迭代。

浦东新区“智慧气象”应用场景虽然初步实现了

灾害性天气发现提醒智能化、气象安全监管自动化，但是由于汛期强对流天气的突发性、智能网格预报以及光流法外推产品的局限性及不稳定性，针对汛期强

对流天气的智能发现仍然存在空报、漏报情况。未来仍然需要不断的个例检验，修改风险发现阈值进行改进和提高。

深入阅读

陈玉琪, 陆小林, 2019. 智慧气象在智慧城市建设中的应用分析[J]. 智能城市, (21): 14-15.
 刘莎, 2018. 智慧气象内涵及发展思路[J]. 陕西气象, (5): 37-39.
 罗晨, 2019. 新型雷电防护在线监测系统的研究与应用[J]. 通讯世界, (11): 174-175.
 刘元林, 王子夏, 唐翠云, 2021. 温州市易燃易爆场所防雷智能监测平台在气象安全中的应用[J]. 科技风, (3): 79-80.
 罗志勇, 2017. 中山市重点场所电源SPD在线安全监测系统[D]. 成都: 电子科技大学.
 雷晓霞, 2019. 气象灾害应急联动机制问题研究——以柳州市为例[D]. 南宁: 广西大学.
 马雯, 2018. 数字城市中的气象灾害预警分析[J]. 科技风, (35): 128.

孙峰, 郑雨涵, 邓炜, 等, 2021. “互联网+”时代我国应急管理吹哨预警机制优化研究[J]. 电子政务, (9): 93-104.
 涂珊珊, 刘翔, 窦俊辉, 等, 2021. 基于突发事件预警信息发布系统的智慧气象服务研究[J]. 湖北应急管理, (11): 64-67.
 喻迎春, 王妍捷, 2020. 基于微信的气象灾害预警信息精准智能推送技术的实现[J]. 气象科技, (2): 195-199.
 张良, 秦雪, 2020. 基于气象的特大城市运行风险治理多层次联动响应体系研究——以上海市徐汇区为例[J]. 风险灾害危机研究, (1): 169-188.
 张建国, 翁雪玲, 孙悦程等, 2021. 智慧气象在防灾减灾平台建设的应用与探索[J]. 科技风, (25): 118-120.

(作者单位: 金玲、张丽亚、张德林、顾松强、陈丽君, 上海市浦东新区气象局)

(编辑: 卢冰)

(上接65页)

表7 2012—2021年CNKI数据库大气科学领域被引频次排名前10的论文

论文题目	第一作者	出版刊物	被引频次	发表年份
IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点	沈永平	冰川冻土	1044	2013
IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论	秦大河	气候变化研究进展	911	2014
2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析	张人禾	中国科学·地球科学	561	2014
雷暴与强对流临近天气预报技术进展	俞小鼎	气象学报	490	2012
气候变化科学与人类可持续发展	秦大河	地理科学进展	436	2014
气候变化对中国农业生产的影响研究进展	郭建平	应用气象学报	418	2015
西北干旱区水资源问题研究思考	陈亚宁	干旱区地理	381	2012
气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展	宋晓猛	水利学报	380	2013
一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比	吴佳	地球物理学报	365	2013
1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势	贺伟	生态学报	337	2013

注: 检索日期为2022年6月。

3 小结

本文基于CNKI和SCIE数据库, 通过对近十年中国大气科学领域研究论文统计分析发现, 中国发表的大气科学领域中外论文自2012年以来, 虽出现过短暂波动, 但总体上一直保持着稳步发展的态势, 特别是SCIE论文保持了较高的增长速度, 在2021年达到了顶峰。在近十年中SCIE数据库中论文被引频次、篇均被引频次和h指数等重要指标均有大幅提升, 直接反映出我国在大气科学领域的科研学术能力正在扩大影响。

深入阅读

常宗强, 张静辉, 2017. 近15年强对流天气研究中文文献的计量分析[J]. 气象科技进展, 7(3): 53-56.
 申乐琳, 何金海, 杨雪, 2021. 基于国内文献计量的古季风演化历史评述[J]. 气象科技进展, 11(3): 173-178.
 许小峰, 罗云峰, 宁笔, 2011. 从SCI数据库看中国气象局科技论文产出和学术影响力[J]. 气象科技进展, 1(1): 44-48.
 徐静雯, 黄琬青, 胡泽文, 等, 2021. 2015—2019年国际大气科学领域科研合作态势的图谱分析[J]. 世界科技研究与发展, 43(6): 764-775.

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

(编辑: 卢冰)

海关历史气象档案价值探析及近现代气候比较 ——以宜昌海关为例

■ 熊红梅 陈筱秋 刘立成

宜昌海关留存有相对系统的气象资料，较为完整地记录了宜昌19世纪末至20世纪初的气温、降雨等气象数据，在科学数据匮乏的19世纪末，具备珍贵的历史价值、学术价值和社会价值。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.013

中国海关历史悠久，制度源于西周，那时已有“关”的设置，到春秋战国时期，古籍中就有许多关于“关”和“关市之征”的记载。中国近代海关存在于清代鸦片战争到中华人民共和国成立前。鸦片战争后，中国就失去了关税自主权，其间英国人罗伯特·赫德（Robert Hart）在中国担任海关总税务司长达半个世纪（1861—1911年），包揽了海务、邮政、航道、港务和检疫等事务。他在任期内创建了一整套严格的海关管理制度，并提出在各海关口岸和主要灯塔所在地设立气象观测站，后逐步形成气象观测网。

1 宜昌海关的历史

1861年，在英国政府的施压下，清政府被迫根据签订的中英《天津条约》将九江、汉口和镇江辟为对外贸易口岸，并分设海关，英国的势力已至长江中游。宜昌位于长江三峡西陵峡出口处，上扼云、贵、川于一喉，下控荆、沙、襄于一掌，其交通优势备受英国觊觎。1877年（光绪三年）3月，湖北巡抚根据1876年中国政府与英国政府签订的《烟台条约》“开放宜昌、芜湖、温州、北海为通商口岸”的规定和北京“总理衙门”来文，请政府委派荆宜施道、宜昌海关首任监督孙家谷，会同英国领事馆办理宜昌开关事宜。4月1日，宜昌海关正式开关办公，关址设在原东湖县城南门外（现宜昌市人民政府所在地）。宜昌成为当时中国西部最偏远的通商口岸。

1895年，根据中日《马关条约》“开放沙市、重庆、苏州、杭州为商埠”的规定，宜昌海关奉命指导重庆海关业务，兼管荆沙海关涉外事务。宜昌的货物中转量倍增，贸易总额甚至一度是沙市海关的3倍

之多。1940年，日本占领宜昌，海关撤迁至四川巫山县城，直至逐步解体。宜昌海关经清光绪、宣统，北洋军阀政府，国民政府三朝历史政权，直至1949年解放，历时72年。尽管宜昌为被迫开设通商口岸，但它改变了宜昌几千年来的社会经济形态，促进了宜昌商贸发展、城市兴盛。图1为19世纪末宜昌海关码头。

2 宜昌海关气象观测站的建立

1869年11月，为了获取我国重要口岸的气象情报，保障船舶航行的安全，规避气象灾害对涉外贸易的影响，赫德提出在各海关口岸及重要灯塔所在地开展气象观测工作。此后，相继在我国沿海重要口岸、岛屿（含台湾地区）及长江沿岸、边关商埠城镇建立海关气象观测站70多处，其中就包括宜昌海关气象观测站。当时海关气象观测主要是为船舶航运服务，海关气象观测站除了日常气象观测，还要编发气象报告和发布大风信息警报。1882年10月，赫德令各海关将气象观测记录寄送上海徐家汇观象台，开展简易天气预报的制作尝试，用于为船只提供天气变化、尤其是恶劣风暴警报。宜昌海关也需按时向上海拍发电报，报送气象观测的内容。

宜昌海关气象观测始于1882年7月，终于1938年4月。观测地点于1897、1914、1933年虽有数次迁移，但大体上位于宜昌市沿江大道海关旧址（现市政府所在地）附近。每日至少有03、09、15、21（或22）时（北京时，下同）4次观测，自观测之始就开始留存风向风力、干球和湿球温度、最高和最低气温以及降水量等气象要素的直接观测记录。但以上观测仍不够规范，直到1905年《气象工作须知》颁布后，观测工作

收稿日期：2022年9月19日；修回日期：2022年12月21日
第一作者：熊红梅（1980—），Email: 965051895@qq.com
资助信息：湖北省气象局软科学研究课题（2022HBR003）



图1 19世纪末宜昌海关码头旧貌(来源:《近代宜昌海关<十年报告>译编》)

制度才变得较为系统完善。

3 宜昌海关气象档案整理分析

3.1 宜昌海关档案形成及现状

因宜昌海关直接管理着长江中游沙市及上游重庆等辖区的航运、航道,监督进出口贸易,所有进出口货物都必须接受宜昌海关的检查。在历时72年的宜昌海关活动中,形成了具有查考利用价值的文件材料、照片、图表等档案,共计333卷84342张,主要由英、汉两种文字构成。这些档案资料全面记述和反映了宜昌海关的进出口贸易、关税、人事等方面的详细情况,还记述了航运、水务、重大自然灾害、气象发报规定等内容,在我国海关历史上具有重要地位,对研究宜昌经济、历史具有重要意义,也对中国海关、税务、邮政、气象等历史研究具有重要价值,1987年被列为国家重点档案。

20世纪60年代初,上海海关通过邮寄的形式将宜昌海关档案交由原宜昌市档案馆,后经几次转交于1985年5月正式移交给宜昌地区档案馆(现宜昌市档案馆)保存。由于档案形成时间久远、保存不当等原因,致使部分档案损毁严重。1987年以来,各级领导关心支持宜昌海关档案的抢救修复工作,但因条件有限,经抢救、整理修复后的宜昌海关档案除前38卷外,均没有译抄卷内文件目录,也没有译制案卷标题,卷内文件属外文的都未能翻译成中文,不利于档案的开发利用。

3.2 宜昌海关气象档案

宜昌海关气象观测站通过多年观测,形成、积累

了大量的气象历史资料,记录比较完整,是中国近代气象情报资料的重要组成部分。

为了深入了解各个通商口岸城市的社会发展情况,全国各海关口岸共编写了五期《十年报告》,分别为1882—1891年、1892—1901年、1902—1911年、1912—1921年,1922—1931年,均为英文档案。李明义和李晓舟将各期《十年报告》中关于宜昌海关的报告内容完整翻译出来,形成《近代宜昌海关<十年报告>译编》。书中全面记载了宜昌及周边地区当时在贸易、航运、关税、金融、农业、产业、教育、行政、医疗、文化、宗教等各方面的情况,给研究近代宜昌经济发展和社会变迁提供了重要资料。书中也详细记载了很多气象方面的信息,比如第一个十年报告中记载的宜昌气候“虽然夏季温度计的示数很高,有时会超过100华氏度,……,冬天偶尔也会下雪,但宜昌从不积雪,……,但温度计很少低于华氏28度。……,冬季的长江江面上总是弥漫着浓厚的雾气。……,夏季常有雷雨。”并附有详细气象观测记录,包含气温、气压和降水量等气象要素。还详细记载了长江宜昌段水位涨落变化情况等诸多水文方面的信息。第二至第五个《十年报告》中都分别详细记载了当时宜昌气候信息。大量的气象资料给气象研究者提供了不可多得的第一手素材,对近代宜昌气候变化研究起到重要参考作用。

3.3 宜昌海关气象档案的价值

气象档案特别是气象记录档案,多记载了客观世界气象风云变幻,其内容具有原始性和不可替代性的特点。它的内容信息和记录形式是气象事业发展和天

气变化的历史印记和凭证, 具有重要的历史研究和收藏价值。随着时间的流逝, 它就显得愈发珍贵和重要, 特别是这些气象档案在当时具备世界气象科学的先进水平。气象档案的价值主要表现在历史价值、学术价值和社会价值上。

3.3.1 历史价值

从现存海关档案中可以看出, 尽管宜昌近代海关长期被外国人掌控, 但在客观上也给当地带来了先进的技术、设备、管理理念和方法。海关总税务司引入西方先进的技术和设备, 建立气象观测站网体系, 开展了卓有成效的气象观测工作, 留下了大量珍贵的气象资料, 具有历史研究和收藏价值。

3.3.2 学术价值

建立宜昌海关气象观测站, 开展气象观测工作, 记录下当时的气温、气压、风向风速、降水等一系列气象要素数据, 形成了大量的气象资料并保存至今。这些历史资料为研究宜昌当时的气候状况及该地区长期的气候变化提供了重要依据。其中洪水、干旱、冰冻等第一手资料对于研究极端天气在形成灾害性天气方面起到的作用尤其珍贵。这些数据和档案资料客观上促进了我国气象学的发展, 具有极高的学术价值。

3.3.3 社会价值

有人类就有气象, 气象对社会的价值涉及到科学、文化、经济、军事、生活等社会各个领域。如农业部门利用气象档案的研究成果指导各地农业活动获得好的收成; 利用气候分析预测各种灾害性天气, 指导各部门做好预防工作挽回经济损失。工程部门通过对气象的分析在工程设计、施工的过程中做出更好的决策, 减少失误, 成功率大大提高。前人对这些气象档案的研究成果给后来的气象档案研究者提供了研究指引, 具有很好的社会应用价值。

4 近现代宜昌气温、降水对比分析

相较于只探究近代气象档案形成历史或只研究资料本身, 从近现代对比的角度进行延伸分析更有意义, 其结果可以更好地指导现代社会生产活动。本文近代(19世纪末)的气象观测数据主要来自《近代宜昌海关<十年报告>译编》。由于中国当时处于半封建、半殖民地社会, 海关一直被英、法、德、俄、日等国家所控制, 海关档案的文种以英文为主。其中, 气象资料虽然较多, 但是不够全面、完整、具体, 本文仅将宜昌海关19世纪末(1892—1901年)每月最高、最低气温和月平均降水量与现代(1951年宜昌建立气象台站以来)的数据进行对比挖掘分析。1892—1901年海关原始资料气温单位是华氏度($^{\circ}\text{F}$), 降水量单位是

英寸(inch), 根据公式:

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) / 1.8, \quad (1)$$

$$1 \text{ inch} = 25.4 \text{ mm}, \quad (2)$$

将其换算成现代气温单位($^{\circ}\text{C}$)和降水量单位(mm)。现代宜昌气象观测站建立于1951年7月, 8月开始有气温、降水等观测记录。

4.1 月最高气温

1892—1901年, 宜昌海关观测的月最高气温均出现在8月, 最高为 41.1°C 。自1951年宜昌建立气象观测站以来, 所观测的月最高气温也是出现在8月, 最高为 41.4°C 。最高气温现代比1892—1901年略有上升, 观测表明夏季炎热程度仅略有增强(表1)。

表1 19世纪末(1892—1901年)与现代(1951—2021年)宜昌月最高气温对比

月份	19世纪末/ $^{\circ}\text{C}$	现代/ $^{\circ}\text{C}$	现代与19世纪末之差/ $^{\circ}\text{C}$
1月	15.9	22.5	6.6
2月	20.9	28.2	7.3
3月	26.3	33	6.7
4月	33.6	36.7	3.1
5月	35.5	38.7	3.2
6月	38.2	39.9	1.7
7月	40.3	40.7	0.4
8月	41.1	41.4	0.3
9月	36.3	39.2	2.9
10月	30.9	35.7	4.8
11月	26.7	29.8	3.1
12月	20.6	24.6	4.0

相较于19世纪末, 自1951年以来, 各月最高气温整体呈上升趋势, 春季(3—5月)增温 $3\sim 7^{\circ}\text{C}$, 夏季(6—8月)增温 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$, 秋季(9—11月)增温 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$, 冬季(12—次年2月)增温 $4\sim 7^{\circ}\text{C}$, 春冬增幅较大, 夏秋增幅一般(图2)。

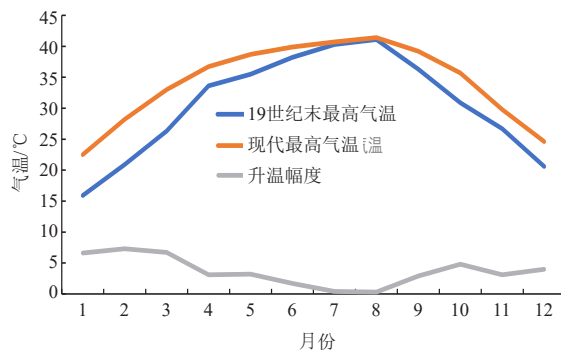


图2 现代(1951—2021年)较19世纪末(1892—1901年)宜昌各月最高气温变化趋势

4.2 月最低气温

1892—1901年, 宜昌海关观测的月最低气温均出

现在1月,最低为-2.4℃,自1951年宜昌建立现代气象观测站以来,所观测的月最低气温也是出现在1月,最低为-9.8℃(表2)。月最低气温现代比19世纪末下降明显,观测表明现代冬季寒冷程度较19世纪末加深显著。

表2 19世纪末(1892—1901年)与现代(1951—2021年)宜昌月最低气温对比

月份	19世纪末/℃	现代/℃	现代与19世纪末之差/℃
1月	-2.4	-9.8	-7.4
2月	-1.5	-4.5	-3.0
3月	0.8	-1.3	-2.1
4月	6.9	0.4	-6.5
5月	12	8.8	-3.2
6月	17.6	14.7	-2.9
7月	21.0	17.4	-3.6
8月	20.2	17.2	-3.0
9月	15.5	11.4	-4.1
10月	10.1	3.7	-6.4
11月	3.1	-0.9	-4.0
12月	-1.4	-5.4	-4.0

相较于19世纪末,自1951年以来,各月最低气温整体均呈下降趋势,春季(3—5月)降幅2~7℃,夏季(6—8月)降幅3~4℃,秋季(9—11月)降幅4~6℃,冬季(12—次年2月)降幅3~7℃,其中1月、4月、10月下降幅度最大,达7℃左右,其他月份下降3℃左右(图3)。

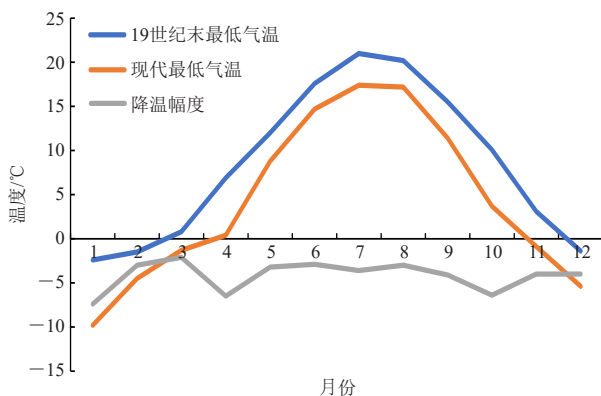


图3 现代(1951—2021年)较19世纪末(1892—1901年)宜昌各月最低气温变化趋势

4.3 月平均降水量

1892—1901年,宜昌海关观测的年平均降水量为1057.8 mm,月平均降水量最大、最小值分别出现在7月和12月,分别为184.7 mm和16.8 mm。自1951年以来现代气象观测的年平均降水量为1154.7 mm,月平均降水量最大、最小值也分别出现在7月和12月,分

别为216.3 mm和19.8 mm(表3)。年降水量现代比19世纪末平均增加96.9 mm,观测表明现代降水总量较19世纪末有较明显增加。

表3 19世纪末(1892—1901年)与现代(1951—2021年)宜昌月平均降水量对比

月份	19世纪末/mm	现代/mm	现代与19世纪末之差/mm
1月	19.6	22.9	3.3
2月	26.7	32.6	5.9
3月	51.3	59.0	7.7
4月	121.4	98.4	-23.0
5月	131.3	132.6	1.3
6月	122.2	153.9	31.7
7月	184.7	216.3	31.6
8月	175.0	179.3	4.3
9月	116.6	112.9	-3.7
10月	65.8	80.0	14.2
11月	26.4	47.0	20.6
12月	16.8	19.8	3.0
合计	1057.8	1154.7	96.9

从图4所示的各月平均降水距平百分率可以看到,相较于19世纪末,自1951年以来,各月降水量除4月、9月有一定减少外,总体呈增加趋势。除4月、5月、8月、9月外,其他各月均偏多15%以上,其中11月总体偏多78%。从四季来看,现代较19世纪末除春季(3—5月)总体减少4.5%外,夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12—次年2月)分别偏多14.0%、14.9%和19.3%。

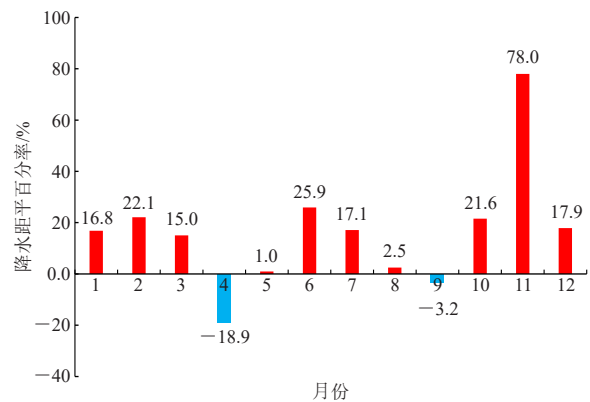


图4 现代(1951—2021年)较19世纪末(1892—1901年)宜昌各月平均降水距平百分率

4.4 数据可用性分析

从数据的奇异值判定和宜昌地方志灾害记录两个方面分析数据的可用性。

1)从1892—1901年的月最高气温和最低气温来看,19世纪末海关观测记录的温度气象数据的极值均未超过1951年以来现代气象观测记录,未出现不合常

理的奇异值。高温记录上出现的夏季极值记录仅略低于现代气象观测的历史同期极值，考虑宜昌19世纪末可能发生过较明显的夏季高温干旱。

2) 从《中国气象灾害大典(湖北卷)》等文献统计的湖北省历代大涝、大旱年来看，19世纪末并未有年份列入，因此湖北当时的大背景是水旱灾害并不是特别严重。《湖北省近五百年气候历史资料》表明19世纪末宜昌周边无一级和五级涝旱明显年份，二级偏涝年份仅有1896年，四级偏旱年份有1898、1899和1900年三个年份，其余年份均为三级正常。然而由于清末宜昌抗灾能力差，常常水旱交乘、无年不灾，如《近代宜昌海关<十年报告>译编》记载了1897年宜昌水旱成灾；从《宜昌市志》记录的19世纪末水旱灾害及赵希竹、把增强对清代水旱研究来看，宜昌有1896年早涝迭乘、1898年州县被水淹的相关记载。但相对于洪涝，宜昌这一时期的旱灾影响更加明显，相关记录的重要旱灾就有3次：1897年（清光绪二十三年）宜昌、郟阳、施南三府大旱，受灾人在百万人以上；1898年（清光绪二十四年）枝江旱；1900年（清光绪二十六年）枝江大旱。这些文字记载也能较好解释对应19世纪末宜昌降水偏少、高温干旱影响较大的结论。

以上相关结果表明，《近代宜昌海关<十年报告>译编》提供的近代海关气象记录数据可信度很高，观测记录很好地表现出19世纪末宜昌气候呈下列特征：夏季高温较为明显，冬季温暖少雪；多数年份年景属于正常，但水旱灾害仍发生频繁，其中干旱影响相对较大。

5 小结

本文通过分析近代宜昌海关气象档案的形成历史，探索19世纪末海关气象观测数据的价值，并结合现代气象观测进行近现代数据对比，开展数据应用挖掘尝试，得到结论如下。

1) 近代宜昌海关气象档案的内容在当时具备世界气象科学的先进水平，具备很高的历史价值、学术价值和社会价值，支持了我国现代气象观测站网的建立和天气预报的发布，客观上促进了我国气象学的发展。

发展。

2) 近代海关气象记录可信度很高，观测记录能较好地对应宜昌地方志及历史文献研究等记录的气象灾害事件。海关气象观测记录表明19世纪末宜昌气候多数年份年景正常，但水旱灾害仍发生频繁，其中干旱影响相对较大。

3) 相较于19世纪末，1951年以来，宜昌夏季炎热程度仅略有增强，冬季寒冷程度明显加深，雨水总量总体增多；最高气温整体呈上升趋势，春冬季增幅较大，夏秋季增幅较小；最低气温整体均呈下降趋势，各月均下降2℃以上；降水量除春季略有减少外，其他季节均有所增加，其中夏季增多较为明显。

深入阅读

- 把增强, 2012. 张之洞辖区灾荒及其影响论略[J]. 河北经贸大学学报, 33(2): 78-82.
- 丁海斌, 冷静, 2009. 中国古代气象档案遗存及其科技文化价值研究[J]. 辽宁大学学报(哲学社会科学版), 3(37): 103-108.
- 高尚田, 2014. 浅谈气象档案的价值与开发利用[J]. 农业与技术, 12(34): 165-196.
- 李明义, 李晓舟, 2020. 近代宜昌海关《十年报告》译编[M]. 北京: 团结出版社.
- 宋建萍, 何晓, 苏秀梅, 等, 2016. 近代湖北海关气象观测档案初探——以江汉关、宜昌关、沙市关为例[J]. 气象科技进展, 6(6): 71-74.
- 温克刚, 2007. 中国气象灾害大典(湖北卷)[M]. 北京: 气象出版社.
- 吴增祥, 2014. 1949年以前我国气象台站创建历史概述[J]. 气象科技进展, 4(6): 60-66.
- 吴增祥, 1999. 气象档案价值鉴定的依据和方法[J]. 档案学研究, 4(7): 20-22.
- 武汉区域气候中心, 2018. 湖北省近五百年气候历史资料[M]. 武汉: 华中科技大学出版社.
- 杨萍, 王志强, 2019. 中国近代海关气象的发展及启示[J]. 阅江学刊, 11(6): 24-32.
- 宜昌市地方编纂委员会, 1999. 宜昌市志[M]. 合肥: 黄山书社.
- 赵希竹, 2012. 清代湖北省水旱灾害的时空分布研究[D]. 武汉: 华中师范大学.
- 周月华, 高贤来, 2003. 1470—2000年湖北省旱涝变化分析[J]. 气象, 29(12): 18-21.

(作者单位: 熊红梅, 湖北省公众气象服务中心; 陈筱秋, 湖北省气象局财务核算中心; 刘立成, 平顶山学院新闻与传播学院)

(编辑: 郑秋红)

2023年《气象科技进展》总目录

第一期

- 2 许小峰: 将天气雷达网建到太空
- 9 贾朋群, 肖芳: 回望2022: 全球气象科技风云
- 15 左群杰, 梁钊明, 高守亭: 我国南方冬季暴雪期间高空槽的发展变化个例研究
- 23 黄舒婷, 李兆明, 白兰强, 黄先香, 植江玲, 徐纵横, 刘屹靖: 2022年中国龙卷活动及灾情特征
- 33 王柏林, 白海: 从2022年世界气象科技博览会看气象装备发展
- 43 柳晶, 李菁, 林琴, 刘汉博, 于金, 赵薪童: 水文降水资料引入精细化气象服务中的可用性评估
- 50 旷兰, 田茂举, 康俊, 李奇临, 刘祥, 李深智: 国家级降水融合产品在山洪模拟中的适用性研究
- 56 贾燕, 杨明, 严睿恺: 台风“烟花”决策气象服务特色经验及技术探究
- 61 卢晓昱, 李新华, 钟化然: 哈尔滨机场中等强度降水案例分析及短时临近预报探究
- 68 侯美亨, 韩佳芮: 卫星遥感生态变化监测业务现状及培训需求探讨——基于省级气象部门问卷调查的分析
- 72 张丽, 孙大兵, 司红君: 宛敏渭先生的一生: 奠基物候学和开创近代安徽气象事业
- 77 张文建: 国际气象合作走过一个半世纪: 国际气象组织(IMO)历史阶段的合作历程
- 88 朱玉洁, 陈姻雅: 全球性气象合作走过150年——致敬IMO开启的国际气象事业
- 91 穆俊宇, 李陶陶: 漫谈“世界气象日”主题
- 封三 张萌, 吴灿: 大气科学领域ESCI(2021年版)新期刊概览

第二期

- 2 贾朋群, 李婧华: 不朽的经典: 克劳修斯—克拉珀龙方程走过190年
- 5 杨艳茹, 邓星辰, 虞越越, 周玉, 谈佳铭, 谷金穗: 我国延伸期预报业务现状及其协同运行机制分析
- 16 陈丽凡, 曹丽娟: 海平面观测及数据产品研制进展及展望
- 26 赵艳霞, 陈思宁: 天气风险管理理论及实践进展
- 38 张霏燕, 姜盈, 张日佳: 杭州亚运会皮划艇和赛艇项目气候背景分析
- 44 张捷, 张小龙, 陈泊舟, 陈子凡: 基于数据挖掘的气象三要素空间一致性检验方法
- 49 尹恒, 夏金, 尹欣, 文强, 邹莹, 黄锐: 武当山北坡气温的垂直变化特征
- 53 包苏伦高娃, 王一飞, 阿荣: 气象因子对滑雪运动发展的影响
- 58 张亚男, 罗浩: 贵阳机场低空风切变成因初步分析
- 67 姚镇海, 江春, 姚叶青, 丁浩, 诸葛杰, 马邵翔: 民用无人机作业气象标准制订及气象保障体系构建浅析
- 73 杨涵清, 陈奇, 孙兰东, 吴蔚, 刘苏潇: 碳达峰和碳中和行动方案——国内外“双碳”实现路径的典型案例分析与启示

- 80 万金红, 孙大兵, 张葆蔚: 清代旱涝灾害奏报刍议
- 89 姚展予: 中国与阿拉伯国家人工影响天气交流合作
- 91 李超, 鲍雅芳: 从第一届天气与社会会议看社会科学和气象服务的融合发展
- 96 李傲, 徐明: 2023年暴雨东湖论坛: 推动暴雨前沿科学研究
- 封三 魏晓敏: AI 助力数据驱动是否会改变NWP? ——ECMWF-ESA 主题会议评介

第三期

- 2 王卓妮, 贾朋群: 气象科学的新视野: WMO长期目标实施的启示
- 6 胡小旭, 王伟, 徐敏, 徐敬争, 陆琛: 华东沿海高标准农田大气湍流特征的观测分析
- 14 葛玲玲, 师春香, 谷军霞, 徐宾: 强对流实况分析关键技术与产品研制进展和展望
- 22 李金海, 马元仓, 管琴, 黄甜甜: 青海高原降水相态转换特征及预报指标分析
- 29 张露云, 左洪超: 1980—2019年江淮地区夏季气温变化及其异常年环流特征
- 36 吴英, 于涵, 范晓青, 柳晓庆, 王秀荣: 基于舒适度的广东省茂名市避寒气候资源分析
- 41 蒙军, 徐良军, 王冉熙, 王兴菊, 刘思洋: 安顺市一次局地大暴雨天气漏报原因分析
- 52 陈赞亮, 梁铭海, 刘光胜, 周喜杨, 高强, 朱云立, 毛镇南: 黄龙带水库入库水量与降水量关系研究
- 58 兰红平, 李明华, 赖鑫, 郑群峰, 徐婷, 王书欣, 王明洁, 罗欣: “31631”递进式气象服务模式及其在深圳的实践
- 63 褚红星, 李兆明, 何珊, 刘思晨, 蔡康龙: 11次龙卷个例的网络信息与灾情调查结果对比分析
- 66 严梓畅, 邹嘉南, 武欣蕊, 周笑迂, 何南腾: 江浙沪气象科普基地现状的个例分析及其科普效果研究
- 69 鞠晓慧, 王妍, 李俊: 珍贵气象档案数字化技术与应用
- 73 陈金阳: WMO北京区域培训中心国际培训二十周年
- 76 蔡云, 王楚钦: 龙云与云南近代气象事业发展述略
- 封三 卢冰, 贾朋群: Timothy Palmer教授荣获国际气象组织(IMO)奖

第四期

- 2 许小峰: 走出“气候赌场”
- 10 娄海萍, 黄志凤: 瓦里关全球大气本底站建站历史及成就回顾
- 12 祝存兄, 周秉荣, 肖建设, 李晓东, 陈国茜: 青海省高寒生态气象服务
- 14 杨延华, 赵海梅: 青海省农业区透雨
- 17 王宁章, 李明, 罗文昭, 王剑琼, 李宝鑫, 任磊: 2019年瓦里关地区CO₂和CH₄浓度变化特征及潜在来源分析
- 24 李明, 李宝鑫, 罗文昭, 任磊, 王宁章: 瓦里关地区大气降水化学特征及离子来源

- 29 权晨, 赵彤, 何杰, 沈晓燕, 申燕玲: 青海省长序列高分辨率气象要素栅格数据集构建与评估
- 34 余迪, 杜海荣, 郭娇, 李万志, 祁门紫仪, 时盛博: 基于多源数据的三江源区雪灾风险评估
- 41 郭世钰, 张玉欣, 韩辉邦: 国内典型人工影响天气云降水观测试验进展
- 50 王丽霞, 周万福, 张莉燕, 王启花, 杨雪玲, 李京梅: 青海省春季一次积层混合云飞机人工增雨作业个例分析
- 57 朱世珍, 龚静, 张玉欣, 王丽霞, 张博越: 青海省东部农业区多点联合防雹个例分析
- 64 周万福, 姚展予, 马学谦, 田建兵, 贾烁, 张博越, 赵文慧, 王伟健, 张沛: 青海高原人工消(减)雪试验效果分析探讨
- 72 赵彤, 刘洁, 孙玮婕: 基于NPP的青海省草地生态足迹以及生态承载力估算——以海晏县为例
- 80 严应存, 豆青芳, 高贵生, 校瑞香, 李璠, 李菲: 青海高原青稞农艺性状变化特征及产量形成主要影响因素
- 87 马有绚, 张调风, 温婷婷, 马占良, 来晓玲, 段丽君: 黄河上游地区径流量的转折性变化及其成因
- 93 李德林: 中国大气本底基准观象台的前世今生
- 96 张国庆, 虎文珺, 刘鹏, 王剑琼, 关晓军: “十四五”中国大气本底基准观象台发展思路
- 98 李甫, 肖宏斌, 陈奇, 张娟, 周秉荣: 青海省通量观测站网的运行管理
- 101 陈国茜, 校瑞香, 祝存兄, 曹晓云, 史飞飞, 赵彤, 肖建设: 青海省生态气象业务系统建设
- 107 徐月顺, 钱有海, 达海钰, 李宝华, 管琴: 青海省森林草原气象火险预报预警服务实践
- 111 刘青春, 邹立尧, 罗昌娟, 桓姝琦, 乜虹: 浅析高原灾害性天气预报技术培训案例建设
- 114 唐伟, 于丹, 肖芳, 贾朋群: 美国统一预报系统研发进展和展望
- 121 左河疆, 高娜, 高睿娜: 湿球温度快速计算方法研究及误差来源分析
- 126 张强, 于洁: 航空气象服务的公共产品经济学分析
- 130 李周, 谷秀杰, 王友贺, 邵宇翔, 席乐, 栗晗: 台风“温比亚”造成河南特大暴雨诊断分析
- 139 王凌, 鞠晓慧, 刘霄, 杜冰: 基于自记观测和自动站观测的四川省降水数据集研究与应用
- 146 汪开斌: 防雷标准中数值修约表述探讨
- 150 伍洋, 翟薇, 张勇, 顾青峰, 李俊, 陆楠: 基于数据产品供需关系的气象工程集约化设计方法
- 155 张文建: 香港天文台140年贡献于WMO全球和区域合作
- 158 宋军, 周龙, 高磊, 李昱茜: 沙俄占领大连时期气象观测资料考证
- 封三 卢冰:《地球物理学评论》创刊60周年

第五期

- 2 李婧华, 贾朋群: 永远的季刊 不变的创新——《英国皇家气象学会季刊》创刊150周年评介

- 6 王子忠, 潘志华, 宋玉, 黄娜, 龙步菊, 伦飞: 基于超越对数生产函数的气象条件变化对京津冀地区行业产出的影响研究
- 14 温康民, 吴滨: 城市化对气温变化影响研究进展
- 22 朱国富: 建立我国数值预报同化诊断系统的行动方案顶层设计
- 28 王毅, 刘爽, 代刊, 李嘉睿, 许万智, 郝伊一: 无缝隙地球系统理念下世界气象中心发展趋势浅析
- 33 蔡银寅: 大气环境资源指数及其实证检验
- 45 杨亚丽, 纳丽, 龚瑞: 宁夏流感与气象条件关系研究
- 51 杨欣, 王加平: 利用风廓线雷达资料分析哈尔滨机场低空急流特征
- 56 李润春, 李伟, 宋希娟, 王妍, 贾利冬, 张宝军, 高原: 山西省阳泉市行业气象灾害风险评估及在灾害防御中的应用
- 62 徐沈, 王金虎, 王宇豪, 周纬昕, 许俊辉: 苏州市雷电灾害致灾因子危险性区域差异研究
- 67 张蕾, 姚叶青, 丁国香, 张曼义: 安徽省强对流天气短时临近预警服务系统设计——以铁路货运服务为例
- 72 姚秀萍, 王立梅, 邓一, 章丽娜, 王卓妮: 气象高质量发展下教学团队建设的思考
- 75 相婷婷, 李蓓蓓: 我国古代观象机构的设置与演化
- 封三 卢冰, 李婧华:《英国皇家气象学会季刊》上的中国声音

第六期

- 2 贾朋群, 樊奕茜: 陆地卫星50年发展和应用之路
- 10 刘嘉慧敏, 潘留杰, 戴昌明, 胡启元, 何林, 燕若彤: 我国气温网格预报检验及客观订正方法研究进展
- 21 张雅乐, 王梅华, 贾朋群, 钟琦, 薛建军, 赵桂香: 需求引领的协同创新机制研究和启示——基于数值预报协同的多案例研究
- 29 庄园, 张悦含, 孙世玮, 王元: 数值天气预报检验方法邻域法的研究进展
- 41 段光玉, 华丽仙, 罗思源, 于琼花: 华北夏季降水异常与大气环流和海温的关系
- 49 赵俊杰, 高艳平, 李智才: 运城市极端气温变化特征及不同重现期气温估计
- 54 马燕, 路锦燕, 辛和平, 李建刚: 阜康地区夏季短时强降水时空分布特征
- 60 顾婷婷, 潘娅英, 单权, 周建辉, 郑芊彤: 浙江省光伏最佳倾角及斜面总辐射研究
- 65 秦世广, 刘健, 李巍, 邵楠, 庞晶, 周薇, 刘洁, 石锐: 中国气象局综合气象观测业务运行信息化平台的设计与业务化运行
- 73 王媛媛, 翟亮, 吴宏议, 何娜: 冬奥会开闭幕式关键气象要素阈值及服务用语分析
- 76 任志杰, 张影, 王邦中: 新中国成立前后东北气象教育培训历史初步研究
- 封三 卢冰: 中国学者“陆地卫星”主题论文计量分析

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Chinese Meteorological Society
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
Wang Jinxing
Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Yao Xuexiang
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Sun Jian
Fei Jianfang
Zhao Licheng
Zhang Peng
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Zheng QiuHong (executive)

Managing Editors

Chen Jinyang, Cheng Xiuhu, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang,
Jia Pengqun, Li Bai, Li Guoping, Luo Yufeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo,
Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang
Huaigang, Wu Bingyi, Xiong Shaoyuan, 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 Weidan, 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, Yi Lan, Yu Yubin, 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

Lu Bing, Li Li, Hou Meiting, Cui Xiaojun

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,

Beijing 100081, China

Tel: +86-10-58993291/68409927

Email: qxkjz@163.com

http://cmalibrary.cn/amst

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

Survey

2 Zhou Qi, Zhang Yi, Jia Pengqun/ A New Perspective in
Meteorology Science Shaping by AMS Annual Meeting in 2024

Cover Story

8 You Huanling, Ye Caihua, Jiang Jiang, Zhao Qian, Qi Chen/
Research Progress of Allergic Pollen Monitoring and Forecasting
Techniques

Annual Review

15 Zhang Jingjing, Huang Xianxiang, Cai Kanglong, Zhi Jiangling,
Huang Shuting, Xu Zhongheng/ Tornado Activities and Disaster
Characteristics in China in 2023

25 Zhang Binbing, Lyu Lili, Liu Shuang, Na Xiaodan/ Comparison of
the Performance Path and Development of World Meteorological
Centres

Progress

32 Lu Tianshu, Sun Xin, Chen Haoming, Li Puxi, Zhu Feng, Huo
Qing, Zhou Baiquan, Yang Linyun/ Verification and Evaluation
System of Regional High Resolution Numerical Weather Prediction

38 Chen Jiaorong, Ruan Neng, Yin Yiwen, Xu Lili, Yuan Quan, Huang
Tianci/ Cause Analysis of a Mixed Severe Convective Weather
Process in Yueyang in 2021

Special

46 Wang Ling, Yu Guihua, Li Jin, Xie Shuai, Miao Yunling/
Relationship between Precipitation pH Variation Trend and
Meteorological Factors in Yining

54 Cai Tao, Dai Cuixian/ Study on the Refined Regionalization and
the Impact of Climate Change on the Safe Transplanting Period of
Flue-Cured Tobacco in Sanmenxia

Forum

59 Yao Xiuping, Zhang Yuehan, Yuan Junxiao/ Analysis and Reflection
on the Meteorological Services for Typhoon Doksuri (2305)

63 Liu Wenzhao, Li Jinghua/ Bibliometric Analysis of Atmospheric
Science in the Last Ten Years in China

66 Fan Xiaoqing, Zhang Yong, Pang Junru/ Meteorological Service
Model based on the Value Realization of Climate Ecological
Products and Reflections on Its Development

70 Jin Ling, Zhang Liya, Zhang Delin, Gu Songqiang, Chen Lijun/
Integrating Smart Weather into the Economic, Social, and Urban
Governance Systems

History

75 Xiong Hongmei, Chen Xiaoqiu, Liu Licheng/ Value Analysis of
Customs Historical Meteorological Archives and Comparison of
Modern and Contemporary Climates: Taking Yichang Customs as
an Example

Reading

80 Table of Contents of *Advances in Meteorological Science and
Technology* (2023)