

气象雷达探测资料在气候研究中的应用综述

李梅¹ 吴焕萍¹ 张帅² 吴胜男³

(1 国家气候中心, 北京 100081; 2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;
3 中国民用航空西南地区空中交通管理局重庆分局, 重庆 401120)

摘要: 作为一种时间和空间分辨率高、覆盖范围广、可提供实时数据及三维数据存储的全场扫描资料, 气象雷达探测资料(简称雷达资料)已被广泛应用于灾害天气的监测、预警中。随着存储意识的增强和存储技术的提高, 国内外雷达资料的存储时间及质量均不断提升, 具有了应用于气候学研究的潜力。当前雷达资料在气候学领域的应用主要包括对流降水雷达气候学、对流风暴雷达气候学、冰雹气候学、城市气候学等。通过厘清上述各类雷达气候学应用进展, 归纳了雷达资料在气候学领域的应用思路, 梳理了雷达资料在气候学研究中应用的难点及现有技术, 指出了雷达气候学研究的发展方向, 为扩展雷达资料的应用场景及应用能力奠定基础。

关键词: 雷达气候学, 对流降水, 气候数据集研制, 应用进展

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2025.01.004

The Application Overview of Meteorological Radar Data in Climate Research

Li Mei¹, Wu Huanping¹, Zhang Shuai², Wu Shengnan³

(1 National Climate Centre, Beijing 100081; 2 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081; 3 Chongqing Branch of Southwest Air Traffic Management Bureau, CAAC, Chongqing 401120)

Abstract: Weather radar data, characterized by its full-field scanning capabilities, high spatial and temporal resolution, extensive coverage, real-time data availability, and 3D data storage, have found widespread utility in the monitoring and early warning of severe weather events. Increased awareness regarding radar data storage and advances in storage technology have led to improvements in both the temporal span and quality of radar data, unlocking its potential for climatological research. Presently, radar data are applied in climate studies encompassing convective precipitation radar climatology, convective storm radar climatology, hail climatology, urban climatology, among others. This paper provides a comprehensive overview of the progress made in the application of radar data within these climatological domains, synthesizing novel approaches for integrating radar data into climate research. Furthermore, the paper identifies the challenges and existing technologies in radar climatology research and points out the development directions of future radar climatology research, thereby establishing a solid foundation for expanding the application scenarios of radar data and further enhancing its application capability.

Keywords: radar climatology, convective precipitation, climate dataset development, application progress

0 引言

在不断加剧的全球变暖背景下, 区域性极端气候事件的频率、强度、持续性愈发增加, 给人们的生产、生活和社会经济带来了巨大影响^[1]。《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》中明确提出了“监测精密、预报精准、服务精细能力不断提升”的目标, 这

对高质量时、空连续数据产品的要求越来越高, 特别是针对极端天气情况下的高时、空分辨率数据^[2]。虽然全国自动气象站的多年持续观测已经为我国提供了均一性较强、时间长度较长的气候资料, 但在精细化方面, 多采用区域站资料结合插值等手段实现, 仍缺乏强有力的观测资料支撑。天气雷达作为中、小尺度对流天气系统的主要探测工具之一, 可以用来测量在某一高度上的反射率分布, 从而推算瞬时降水、对流强度等的空间分布情况, 提供研究对象空间格局的详细图像, 弥补了传统站点观测中的重要细节不足问题^[3]。除了高时、空分辨率外, 气象雷达探测资料(简称雷达资料)作为一种全场扫描资料, 还具有覆盖范围广、三维数据存储以及提供实时数据的特性, 不

收稿日期: 2023年12月29日; 修回日期: 2024年6月27日
第一作者: 李梅(1994—), Email: limei@cma.gov.cn
通信作者: 吴焕萍(1977—), Email: whp@pku.org.cn
资助信息: 科技创新2030-“新一代人工智能”重大项目(2022ZD0119500); 2022年中国气象局气候研究开放实验室开放课题青年基金; 国家气候中心创新团队(NCCCXTD003)

仅有助于区域性短时极端事件的快速捕捉^[4], 还可进一步促进针对小尺度大气结构和动力学机制的深入研究^[5-8], 尤其是在站点缺少区域, 有着不可替代的作用。20世纪以来, 天气雷达给科学研究和业务应用提供了大量持续的高分辨率资料, 已被广泛应用于灾害天气(例如冰雹、龙卷、短时强降水和台风等)的监测、预警中^[9]。随着存储技术的提高和存储意识的增强, 气象雷达资料存储时间尺度及质量均有所提升, 具有了应用于气候学研究的潜力。

鉴于全球雷达资料的多元化应用及日益增长的需求, 世界气象组织(WMO)等国际组织开始关注雷达资料在气候领域的可用性和重要性。2017年3月, 全球气候观测系统/世界气候研究计划(GCOS/WCRP)大气气候观测小组在英国埃克塞特召开了第22届会议(AOPC-22), 会上AOPC决定联合气候学委员会(CCI)成立雷达观测气候应用工作组(TTROCA), 旨在探索如何科学应用雷达资料进行气候研究。其主要职责包括^[10]: 1) 确定雷达降水数据的监测要求, 定义气候研究所需存储的雷达资料元数据, 提出用于气候监测的关键雷达参数, 规定用于气候研究的雷达数据质量控制标准流程; 2) 就统一反演和标准化雷达数据的方法提出建议; 3) 评估现有雷达资料的存储情况, 考察当前数据存储结构和规模是否可以满足气候研究需求, 定义本地雷达资料存储的标准化方式方法; 4) 提出针对历史雷达数据处理流程的建议(比如: 如何记录现有雷达数据、如何用新算法进行雷达数据再处理等)。可见, TTROCA已经针对国际上雷达资料的现状进行了评估, 并就数据的前处理方法给出了相应的建议, 为雷达资料在气候领域的应用奠定了基础。

随着我国新一代天气雷达网的建成, 雷达探测覆盖范围和探测能力不断增强, 雷达基数据正确率也在不断提高, 反演产品逐渐丰富和业务化。国内也持续强调雷达资料的应用能力建设, 鼓励进一步拓展雷达资料应用场景。当前, 雷达资料已经在我国气象业务与研究中发挥了重要作用, 但在气候领域的应用潜力尚未充分挖掘, 这与雷达数据的非均一性、处理技术等有关, 如何充分利用这种高时、空分辨率资料进行气候研究是当前迫切需要解决的问题。因此, 亟需掌握国内外雷达资料在气候领域的应用现状, 从而推动我国雷达资料的气候应用能力, 并进一步提升我国精细化气候监测、预测水平。

1 可用于气候研究的雷达资料现状

当前, 天气雷达网已经覆盖了全球大多数人口密集区, 但各国家和地区的天气雷达网建成时间不

同(仍在不断新增)、数据存档质量和存储时长差异较大。与天气领域不同, 气候研究所需的数据需要满足一定的时间长度以及较高的均一性, 因此, 首先对可用于气候领域的雷达资料现状进行梳理。

1.1 可用于气候研究的国际雷达资料现状

TTROCA在2017年通过调查问卷的形式对国际上现有雷达资料的存储情况进行了调研^[10], 在WMO雷达数据库中有91个气象服务机构拥有业务天气雷达, 其中45个国家和地区的气象服务机构就雷达资料存储情况进行了回复。结果表明: 40个国家和地区已经存储了超过10 a的数据, 但只有20个国家和地区的雷达数据可以追溯到1995年以前。也就是说, 这20个国家和地区已经拥有了20余年的可用数据, 但由于雷达布设位置、覆盖范围、处理技术的变化, 资料仍存在一定的非均一性。

虽然已有几十个国家和地区存储了较长时间序列的雷达资料, 但不同国家和地区、不同数据格式雷达资料的获取方式和难度有所不同。根据TTROCA的调查问卷, 有15个国家和地区倾向于支持雷达资料的对外开放。例如, 美国支持通过门户网站开放获取实时存档数据; 德国支持开放获取存档产品并有限开放获取实时数据; 欧盟成员国已通过服务网络共享了34种不同类型的数据, 但并非全部免费开放。此外, WMO业务天气雷达项目间专家团队(IPET-OWR)指出, 对于雷达资料, 除了存储三级产品(如降雨率估计、降水分类等)和四级产品(如多元融合数据), 还应保存二级数据(如反射率、径向速度、差分反射率等)。这是由于雷达的反演及数据处理算法将不断升级, 在进行气候研究时, 为保持数据的均一性, 经常需要基于二级数据重新处理整个时间序列的数据。欧洲国家气象服务机构间关于雷达二级数据的双边数据交换已经进行了20多年^[11], 亚洲近几年也启动了类似的交换项目^[12]。

1.2 我国雷达布设及可用于气候研究的雷达资料概况

自1998年起, 中国气象局着手在全国范围内组建新一代多普勒天气雷达监测网, 以实现全国天气雷达的数字化拼图, 动态描述全国天气变化的精细图像。目前已经有近百部新一代多普勒天气雷达(S、C波段)投入业务使用。其中, S波段主要部署于沿海、沿江等地区, 以有效监测台风、龙卷等灾害天气; C波段雷达投资成本相对较低, 主要布置于内陆地区, 有效监测区域性降水等灾害天气^[13]。新一代天气雷达网(CINRAD)可用于灾害天气的监测及预警, 为防灾减灾

灾、保障人民生命财产安全做出了重要贡献。针对雷达网在我国有效覆盖情况的评估结果表明,我国雷达网分布并不均匀——在东部地区,几乎所有地区都可被2台及以上的雷达覆盖,但青藏高原、云贵高原等西部地区的雷达建设密度相对较低^[14]。此外,西部已部署的雷达也可能会受到地形干扰产生严重的波束遮挡,从而对定量降水估计(QPE)造成负面影响。因此,我国雷达网的布设仍有提升空间。

我国不仅雷达数量位居世界前列,自雷达建成以来资料的存储质量也很高,雷达基数据已永久归档存储,且一直未间断,尤其是雷达布设密度较高的东部沿海地区,经过多年的积累,开展精细化雷达气候研究的资料条件已经逐渐成熟^[15]。其中,反射率几乎是目前保存最全、准确率最高的参数,基于不断更新的算法对反射率进行再处理可提升数据的均一性,因此具备一定的气候应用潜力。

2 雷达资料在气候研究中的应用进展

当在气候学领域中应用雷达资料时,需要根据多年的天气雷达回波信息及其他有关资料进行统计分析,研究雷达回波时、空变化规律并进行气候背景分析,这就是所谓的雷达气候学。陈明轩等^[15]进一步指出了雷达气候研究的典型思路,即对某一地区长时间的天气雷达资料(目前主要是单部雷达或者雷达组网探测得到的反射率因子资料)进行统计分析研究,进而了解对流降水和对流风暴等强对流事件的精细时、空分布及演变特征。

针对当前雷达资料在国际气候研究中的应用,已有一些综述性文章,比如GCOS Report-223已分别对多个国家和地区(以欧洲为主)的应用现状进行梳理^[16-19]。在此我们将进一步更新完善国内外的应用案例,并根据雷达资料的应用对象进行分类,主要包括降水雷达气候学、对流风暴雷达气候学、城市雷达气候学和冰雹雷达气候学。其中降水雷达气候学既包含雷达降水数据集的研制,又包含对流降水的日循环特征及成因研究,以及极端气候特征分析;而对流风暴雷达气候学既包含对流风暴的日循环特征分析,又包含风暴属性的识别追踪和统计。

2.1 对流降水雷达气候学

雷达资料有助于建立高时、空分辨率的数据集,而目前长时间序列雷达气候数据集的研制工作主要集中在降水方面。全球不少地区已经构建了长时间序列的降水网格数据集^[20-22]。在将雷达反射率转换为降雨率的过程中,为了产生有效的定量降水估计(QPE),需要通过地面观测进行校正,这通常被称为雷达降水

校正或雷达-雨量计数据融合技术,已有不少研究对此进行了详细介绍^[23-27]。比如,比利时学者利用3 a的雷达资料对比评估了各类雷达-雨量计数据融合技术^[23],并进一步延长数据至10 a,对雷达QPE进行了订正、融合等再处理^[22],同时对小时降水和日降水的极大值气候学特征进行了统计分析^[28]。在德国,Winterrath等^[27]基于降水校正技术,研发了时间分辨率为5 min,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1$ km的17 a长序列雷达降水数据,并考察了特定重现期下的降水极值。在美国,Nelson等^[29]基于美国国家气象局WSR-88D雷达反射率,研发了一套密西西比河流域5 a的高分辨率(4 km \times 4 km)降水数据集,经评估,该雷达降水数据能够再现雨量计观测降水的特征;Nelson等^[30]进一步更新并延长长时间范围,对雷达QPE进行了评估和再处理,生成更优的雷达降水数据集。Nelson等^[31]提出,虽然目前的降水估计再分析方法在试点区域具备较好的效果,但仍需放眼更广范围,因此成立了降水再分析工作组,鼓励各国共同实现更优的雷达QPE再分析。

此外,与传统雨量计相比,雷达更善于捕捉具有高时、空变率的网格化对流降水,且能够存储三维参数以获得垂直对流结构。因此能够进一步提升对对流降水^[32-33]和极端降水^[34]的监测能力。数值预报及资料同化系统遵守准平衡气流和天气尺度强迫的动力学基础,故其对天气尺度的具有较长周期变化和生命期特征的对流系统具有较高的可预报性^[15]。然而盛夏期主要以热力对流系统为主,对流的日循环特征又与太阳加热作用的日变化有关,因此数值预报在夏季日循环方面会存在一定的不可预报性^[35]。此时,雷达资料可在探究降水日变化特征以及不同天气系统、气候特征和地形强迫对对流日变化的影响机理方面发挥一定的作用^[36-38]。

美国大陆地区已有学者对雷达降水日循环特征进行了系列研究。Carbone等^[35]基于3 a的雷达降水资料对对流降水回波频率的时、空分布特征进行分析,揭示了暖季降水回波存在明显的日循环和半日循环的周期传播特征,其中对流的日循环特征主要是由于太阳加热作用的日变化形成的;Ahijevych等^[38-39]则分别用7 a和8 a的雷达降水资料,指出降水回波的日循环和半日循环的周期主要归结于落基山等山区的动力抬升和局地热力强迫作用,从而导致了降水系统在山区新生并向下游(向东)不断传播的特征;Carbone等^[40]继续延长资料至12 a,给出了更为精细的日循环时、空分布模态,成功解释了美国中部大部分降雨发生在夜间的原因。

在瑞士的阿尔卑斯地区, 结合3部雷达2000—2011年的探测结果, 形成了一系列关于降水特征及其量化的研究结果^[41-43]。首先, 基于近10年时间分辨率为5 min, 空间分辨率为1 km×1 km的三维雷达数据, Rudolph等^[34]定义了高精度雷达强降水事件及其频率和间隔指数, 并对局地强降水的分布、频率特征进行了分析, 发现强降水事件夏季最频繁, 冬季最少见, 其中南部地区强降水事件间隔时间最短, 西部地区强降水事件间隔时间最长; 进而, 根据对流、平流、混合系统的环流特征差异, Rudolph等^[42]将影响总降水与强降水的环流分为6类天气型, 通过分析天气型与降水的关系, 发现具有偏南气流的平流天气模态导致日总降水量的中位数和90%分位数最高, 对流天气模态则导致极端降水事件的频率升高; 该团队还利用雷达资料的三维空间特性对不同季节风暴下的降水差异进行了更为深入的机理分析, 研究了垂直反射率结构的季节规律对降水的影响, 指出夏季降水事件具有最高的垂直范围和最大的近地表反射率, 因此夏季风暴更具对流性, 当寒冷季节变暖时, 降水可能向强对流降水转变, 而较弱的层状云降水可能减少^[41]; 基于降水与天气型的关系, Rudolph等^[43]预估了21世纪瑞士7个流域的降水趋势, 预估结果表明, 流域总降水将减少10%~15%, 但强降水事件将更加频繁, 对总降水的贡献也将大幅度提升。

2.2 对流风暴雷达气候学

雷达资料不仅可以用于对流降水的研究, 在对流风暴(包括小尺度风, 如龙卷、下击暴流等^[44-46])等强对流事件的精细化时、空分布和演变特征研究中也都有优势。对于对流风暴, 不仅可以研究其日变化特征^[47], 而且还可以对其进行识别追踪和特征统计^[48-50]。

在对流风暴气候学特征方面, 已有基于雷达组合反射率因子拼图产品对太行山东麓、西安、安徽、上海、南京、宁夏北部等地对流风暴的频次、强度、生命期、高发区、日变化、影响时长等气候学特征进行了较全面分析^[51-56], 其中胡启元等^[52]还对反射率遮挡区域进行了修订。在追踪及统计对流风暴方面, 基于甘肃天水的多普勒天气雷达资料, 肖玮等^[57]结合雷暴识别跟踪分析和临近预报算法(TITAN)对对流风暴属性特征进行了追踪统计, 分析了甘肃东南部暖季对流活动的频次、传播方向等雷达气候学特征。Moheec等^[50]则利用风暴质心追踪算法(SCIT), 对美国北达科他州的对流风暴属性的气候特征进行了研究, 发现雷达数据显示的雷暴空间分布模式比地面气象站等传统数据更准确、更广泛; 根据雷达监测, 6—7月是该地

区雷暴最频繁的时段, 而风暴出现频率在傍晚到凌晨存在明显的峰值, 即具有显著的日变化特征; 风暴的生命期和移动速度在暖季不同月份存在差异, 平均生命期为24 min左右, 平均移动速度为16.4 m/s, 持续时间越久的风暴强度越大; 在该研究的基础上, 给出了未来利用雷达资料研究对流风暴的可能发展方向, 比如进一步探究风速与反射率的关系、冬季雷暴与其他季节差异的原因、极端雷暴事件的重现期等。

2.3 冰雹雷达气候学

基于新一代多普勒天气雷达资料及冰雹指数算法, 已经建立了短时临近预报系统, 实现了冰雹灾害天气的定时、定点、定量预报^[58]。雷达资料也可应用于冰雹的气候学特征分析, 以加深对此类灾害事件的气候学特征理解, 从而增强气候预警能力^[59-60]。目前已有不少学者借助雷达资料构建了本地的冰雹气候学数据集^[61-70]。比如, Soderholm等^[61]整合了澳大利亚东南部18 a的雷达、探空、地面气象站、历史档案、模式再分析等多个数据集, 对冰雹和相关环境条件开展了中尺度气候分析, 研究表明, 在多年时间尺度上, 厄尔尼诺有利于该地区冰雹和海风天气频率的增加, 而拉尼娜对其有抑制作用; 在天气尺度上, 东南风与海风的耦合作用为该地区冰雹的形成提供了最有利的环境; 此外, 海风盛行时冰雹在海上气团的内陆分支内发展最为频繁, 说明海风气团在向内陆的传播过程中经过充分调整后可能变得有利于对流的发生、发展。不少国内学者将5 a的雷达资料与探空资料、地面观测资料相结合, 通过统计分析识别了甘南高原、甘肃平凉、临沂山区、江西省、唐山等地的冰雹高发区、降雹高峰期、日变化等气候学特征^[62-66]。比如, 吉哲君等^[62]利用2002—2012年5—9月合作站探空资料和2013—2015年新一代天气雷达资料对甘南各站冰雹日层结特征和多普勒雷达回波特征进行了统计分析, 发现该地区冰雹天气主要发生在午后至傍晚, 冰雹天气随海拔的升高呈线性增多趋势, 20世纪80—90年代为降雹的高峰期; 王若升等^[63]基于2009—2011年雷暴云多普勒雷达资料识别出平凉市冰雹高发区位于六盘山和关山山脉两侧的华亭、庄浪和崆峒区。

2.4 城市雷达气候学

雷达资料在城市气候研究中的应用也备受关注^[71-72]。强对流天气经常会给城区带来重大的灾害损失, 随着全球城市化进程的加剧和大型城市的扩张, 城市和城市群对强对流天气的发展演变愈发受到人们的关注^[15]。利用雷达资料对城市对流天气进行研究主要具备两方面的优势: 一方面, 雷达资料具有高时、

空分辨率,能够揭示对流风暴和对流降水的精细时、空演变特征,而城市水循环径流快、响应时间短的特征亟需时、空尺度小的雷达降水数据解决城市水文模型中的降水误差^[72];另一方面,虽然城市区域的尺度相对较小,但城市对流天气的影响却非常显著,利用雷达资料揭示城市地区对流系统的时、空变化特征具有一定的优越性,这也有助于理解城市地区强对流天气的气候学演变特征以及城市环境对其的影响机理,并为城市地区强对流事件的预警和排水系统的建设提供重要参考^[72]。

将雷达资料与城市气候学相结合已有尝试性研究。比如,Niyogi等^[73]利用雷达图像,对美国印第安纳州城区和农村的夏季对流风暴属性(发生发展、天气条件、运动方向)进行了研究,揭示了大型城市对区域对流的影响,结果表明,城市地区60%以上的风暴结构会发生变化,而在农村地区仅为25%,白天的城市环境对对流风暴的影响明显高于夜晚;雷达气候分析指出,该地区的风暴在靠近上风向的城区时分裂,而在下风向合并,使得小风暴和大风暴容易分布在市区下风区,而中型风暴易分布在上风区;进一步利用观测资料和MM5中尺度模式,对一次风暴个例展开了敏感性数值模拟试验,发现模式中若去除城市地区边界层等的影响,将导致区域辐合及对流、地面能量平衡、边界层结构等发生明显变化,从而导致实际发生的对流风暴无法被模拟出来,证实了城市对区域性对流风暴具有较强的影响。

可见,利用雷达资料已经在气候领域进行了一系列具有延续性和前瞻性的研究工作,上述研究进展及案例展示了雷达资料空间覆盖范围大,时、空分辨率高,可以描述天气现象三维结构等优势,未来仍可借助这些优势实现更多的探索性工作。

3 雷达资料在气候研究中应用的难点及现有技术

3.1 雷达资料在气候研究中应用的难点

总结已有雷达资料在气候研究中的应用,不难发现雷达是一种获得半定量降雨估计的有效工具,然而在定量的气候研究中仍面临诸多挑战。

1)多普勒雷达资料本身存在数据短缺、异常突变、晴空回波等一些不可忽视的质量问题。数据短缺是指数据丢失导致的监测数据不连贯,以及雷达体扫描过程中沿轴向出现整体性的数据短缺;异常突变是指在多普勒雷达探测的回波数据中存在一些孤立的异常点,其与周围的邻近点的数据差异巨大,不符合气象数据的连续性,无法作为分析参考的对象;晴空回

波则是指多普勒雷达对大气层中的无云区域进行探测时,也会产生回波,对气象分析产生较大的误判^[74]。

2)雷达设备非持续性工作带来的问题。在实际操作中,气象雷达是非全天候探测设备,在长期无天气过程时(比如冬季),很多雷达受运行成本限制处于关闭状态,无法提供相应时段的雷达资料,因此要找准天气雷达探测中的气候学指标,建立具有针对性的雷达探测资料集。

3)雷达资料的误差订正问题。由于雷达探测本身属于间接观测,常存在较大的误差,且雷达资料的误差无法像雨量计度量累计雨量一样随时间的增加迅速减小,而是需要判断误差的来源,及时、系统地消除随时间累积的每一次测量误差,这是一项具有挑战性的任务^[3]。以降水为例,造成雷达定量降水估测误差的原因有很多,比如地物杂波、异常传播、山体遮挡、建筑物遮挡、虚假回波、仪器定标误差、随机误差、校准、信号衰减、0℃亮带、雨滴谱分布变化、扫描半径、探测距离、扫描仰角以及不适当的局地天气雷达反射率因子-降水强度(Z-R)关系设定的影响等^[75-76]。根据雷达降水估计误差的发生环节,可将其分为三类:a)高空测量误差。包括由于标定不好、障碍物波束遮挡及衰减,在测量反射率和差分反射率时造成的偏差;由于雷达回波的起伏特性造成的参数不确定性;由多余回波和噪声造成的污染,同时用于消除这些回波和噪声的信号或数据处理技术也会造成污染。b)高空测量值转化为地表估计值的过程产生的误差。由于水凝物的相态变化及微物理过程,在雨滴下落至地面的时间内,降水会发生漂移及沉降,在高空观测到的瞬时降水与当前降落到地面的降水存在差异。c)从地面雷达估计量转换降雨量过程的误差。根据地面雷达探测估计可获得降水率图像,进而计算最终的累计降水量,此过程中也会产生误差。因此,在利用雷达定量降水估计之前需要先进行误差评估及订正,以提高定量降水估计的准确度^[3]。

4)雷达组网带来的误差。在进行单雷达定量降水估计时,雷达的探测高度随距离增长逐渐增加,导致降水观测位置离地面较高,从而带来更大偏差,雷达网络可以降低这一偏差。此外,相比单个长距离雷达系统,一组较短探测距离雷达的网络具有在覆盖更广范围、提供更高分辨率探测资料的优势,这在复杂地形降水监测、预测中优势更明显。因此,雷达业务组网是新一代雷达建设的重要环节,通过组网才有可能监测到完整的天气、气候系统,充分发挥每一部雷达的作用^[77]。然而,组网雷达数据的一致性问题的

可能为探测结果带来新的误差。具体来说,在理想情况下,不同雷达在网络中重叠部分的探测结果应当是一致的,然而实际情况是,由于雷达位置偏差、目标高度差异、对时误差等原因,无法实现完全一致。因此,应当以观测数据为基准,检查具有显著重叠比(紧密网络)的所有雷达之间的相对校准对齐,确保所有系统都校准到一个共同的参考水平^[78]。

3.2 提升雷达资料在气候研究中应用潜力的现有技术

针对上述存在的问题,已有相关研究通过资料处理技术和数据融合技术改善雷达资料的质量,进而提升雷达资料在气候研究中的应用效率和准确度。

首先,要对多普勒雷达资料进行质量控制。包括对数据短缺进行插补延长(如行插补法)、对异常点回波进行处理(如二维中值滤波法)、剔除晴空回波(如格网点基础回波法)^[74]。为提升雷达资料质量控制效率,已有学者研发了新一代天气雷达产品故障监测预警系统,可以实时、高效、准确检测出异常雷达产品,从单部雷达产品数据中识别出异常回波,避免进一步影响多部雷达组网拼图,对天气雷达组网产品的质量控制具有重要的意义^[79]。

其次,要进一步提升组网雷达资料的一致性,既包含对雷达网络的校准,又涉及多源数据融合技术。在进行气候数据集研发及应用前,应先对雷达基数据进行定标及循环再定标,以减少组网内不同型号、不同时期雷达带来的数据非一致性。另外,综合气象站-雷达-卫星遥感-地表辅助参量等多种资料,多源数据融合与数据同化技术已成为获取高精度、高质量及连续的多时、空尺度融合网格数据产品的有效手段。相关学者已经开发了基于地理加权回归、克里金插值、贝叶斯模式平均、最优插值、随机森林、XGBoost机器学习、结合注意力融合和信息回忆的AFR-LSTM网络、多重网格变分分析等方法,建立了不同的多源降水数据融合模型,并在淮河流域、长江流域、华南地区等进行了应用分析,提升了雷达资料的准确度^[2, 80-81]。为提升气象现代化水平,基于雷达组网产品与多源数据,也已经发展了综合气象观测产品系统,实现了以冰雹、降水、风场等要素为导向的多源数据集成、检验和分析,并结合组件化的思想增强了组网融合处理系统的场景适应能力^[82-83]。

最后,要对雷达资料进行误差订正,提升数据均一性,以更好地应用于气候研究。基于观测约束思想,可以对雷达资料不同的误差来源及环节采用全流程的误差消除算法。以降水为例,高空雷达探测误差

最主要的原因是测量反射率和差分反射率时雨对雷达波束的衰减,此时应以差分相位、地物回波强度的变化、噪声强度变化以及多雷达联合探测等作为约束条件进行订正;由高空雷达探测结果外推到地面时,雷达探测的像素离地面越高,精确订正雷达测量值就越困难,此时需要建立起高空与地面反射率的映射关系以进行订正;推导出合理的地面雷达测量值之后,应全面地考虑降水形成的微物理过程及演变,根据不同区域和不同类型研究对象使用不同或动态的反射率-降水强度关系来计算降水率;最终采用流域平滑或结合长时间序列的地面观测,采用观测约束方法(最优插值校准、变分同化、卡尔曼滤波校准、同步联合校准等)订正雷达测量的累计雨量以及雷达反射率因子三维数据^[3, 75]。基于上述方法,可更好地将雷达资料应用于气候领域。

4 展望

我国天气、气候形势异常复杂,灾害天气特别是极端天气、气候事件广发、频发、强发、并发,精密的气候监测和精准的气候预测对筑牢防灾、减灾第一道防线,保障人民生命、财产安全具有不可或缺的作用。雷达资料具有较广的覆盖面和三维数据存储,且其高时、空分辨率有利于抓住普通台站观测网络无法刻画的对流过程,具备提升气候监测、预测水平的潜力。虽然目前已有不少学者将雷达资料应用于气候精细化研究,但仍需要进一步提升雷达资料在气候领域的应用效率和准确度。未来雷达资料在气候研究中的应用工作可向下述方向发展。

4.1 发展针对气候研究的雷达资料处理、订正及多源数据融合技术

与天气领域不同,在气候研究中,对长序列雷达数据的均一化要求更高。除了提升高分辨率雷达资料的存储及提取技术,还应随着雷达布设的增加、雷达软硬件的更换、复杂的地形条件及其变化等,频繁地对大量的雷达基数据重新处理,并基于观测约束思想对雷达资料进行订正,以达到气候学要求的均一化标准。未来,多传感器、多源信息融合处理(关注过程)和信息栅格技术也是发展雷达资料在气候研究中应用的前提和方向^[3]。

4.2 开展数据集研制、对流事件气候学特征分析等应用工作

根据当前雷达资料的存储情况以及已有的研究进展,雷达气候研究在对流降水、对流风暴、冰雹、城市气候应用中均具有一定的可行性。我国也已经具备了长时间序列的雷达拼图资料,拥有进行气候研究的

能力。根据目前的雷达资料现状，以下几方面的研究具有较大的发展潜力。

4.2.1 开展中国区域长序列雷达气候学数据集应用

根据现有研究进展，对于降水的雷达气候数据集的研制经验最为丰富。国家气象信息中心已针对多源降水融合技术攻关研究多年，“中国区域多源融合实况分析1 km分辨率产品”已于2021年实现中国气象局业务准入，并启动了10 a以上的“中国区域长序列1 km分辨率降水产品”的历史回算，这对雷达资料在气候数据集中的应用提供了参考。结合我国当前气候研究和业务的需求，可利用该降水数据集进行气候学分析，并进一步研制对流风暴、冰雹等气候数据集。数据集研制既包含反演算法和数据融合技术的改进，又包含对数据集的评估工作。该项工作需要大量的雷达资料进行质量控制，目前最好能够选择地形较为平坦、雷达布设较密集、雨量计测量结果相对准确的东部地区（如京津冀、长三角等）进行数据集建设。

4.2.2 基于雷达资料的对流事件气候学特征分析

基于雷达气候数据集或雷达反射率阈值，可以获得对流降水、对流风暴、冰雹等对流事件的频次，进而对我国对流降水或风暴的气候学特征进行分析。可开展的工作不仅包含对其变化信号的检测，还包括借助雷达三维产品对其变化的诊断，以及结合气候模式对其的高分辨率预估等。比如，对于对流降水来说，可基于降水频次的雷达监测数据对其变化趋势或不同尺度（日尺度、季尺度、年尺度等）的振荡信号进行检测，还可通过环流结构对其变化进行诊断分析；并且，由于高时、空分辨率的雷达资料可以帮助划分小尺度的不同类型降水，可对比分析不同类型降水（包括极端降水）事件的气候学特征，并对其物理机制进行深入研究。此外，通过天气雷达探究风暴三维特征也是近年雷达气候学研究的新方向，在此类研究中，雷达资料往往能够比常规观测和卫星观测提供更多的风暴信息，因此借助雷达资料不仅能对风暴进行识别和追踪，还可对其进行分类并研究其产生及演变的大气环境和影响机制^[17]。

雷达历史探测资料的处理和分析工作需要跨学科团队来完成。要进行雷达气候学方面的创新研究，既需要熟悉雷达数据处理及融合技术的专业人员结合气候研究或业务需求提升雷达资料的质量，又需要由气候学专业人员对数据进行评估及应用，在此过程中，也将涉及海量数据的存储及提取等问题。因此，亟须建立由气候、大气探测、数据库建设等方面的专业人士共同组建的跨学科团队，从提升长序列雷

达资料均一性、研发雷达气候数据集、雷达气候学分析等方面实现技术攻关和应用推广，为雷达资料应用场景的拓展创造更好的条件。

参考文献

- [1] Jiang Z H, Li W, Xu J J, et al. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: Model evaluation[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(21): 8603-8619.
- [2] 阮惠华, 张钧民, 许剑辉, 等. 考虑降水时间相关性的地面观测-雷达-卫星遥感逐时降水融合方法研究[J]. *热带气象学报*, 2023, 39(3): 300-312.
- [3] 弗雷德里克·法布里. 雷达气象学: 原理与实践[M]. 苏德斌, 肖辉, 译. 北京: 气象出版社, 2021.
- [4] Rubel F, Brugger K. 3-hourly quantitative precipitation estimation over central and northern Europe from rain gauge and radar data[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 544-554.
- [5] Tabary P. The new French operational radar rainfall product. Part I: Methodology[J]. *Weather and Forecasting*, 2007, 22(3): 393-408.
- [6] Goudenhoofd E, Delobbe L. Statistical characteristics of convective storms in Belgium derived from volumetric weather radar observations[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(4): 918-934.
- [7] Marra F, Morin E. Use of radar QPE for the derivation of intensity-duration-frequency curves in a range of climatic regimes[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 427-440.
- [8] Berg P, Norin L, Olsson J. Creation of a high resolution precipitation data set by merging gridded gauge data and radar observations for Sweden[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 6-13.
- [9] 彭洁. 多普勒天气雷达回波数据可视化技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [10] Saltikoff E, Friedrich K, Soderholm J, et al. An overview of using weather radar for climatological studies: Successes, challenges, and potential[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(9): 1739-1752.
- [11] Huuskonen A, Saltikoff E, Holleman I. The operational weather radar network in Europe[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(6): 897-907.
- [12] Kakihara K. Current status of the experimental radar data exchange in the Southeast Asia[R]. WMO/ASEAN Training Workshop on Weather Radar Data Quality and Standardization, Bangkok, Thailand: Japan Meteorological Agency, 2018.
- [13] 黄兴玉, 杨磊. 用于组网探测的新一代多普勒天气雷达系统[C]//推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会2004年年会论文集(下册). 北京: 气象出版社, 2004: 481-485.
- [14] Min C, Chen S, Gourley J J, et al. Coverage of China new generation weather radar network[J]. *Advances in Meteorology*, 2019, 2019(1): 5789358.
- [15] 陈明轩, 王迎春, 高峰, 等. 雷达气候研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用[J]. *气象科技进展*, 2014, 4(5): 30-41.
- [16] GCOS. GCOS-223: Weather radar data requirements for climate monitoring[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2019.
- [17] 潘赫拉, 许东蓓, 陈明轩, 等. 天气雷达气候学研究新进展[J]. *干旱气象*, 2020, 38(6): 887-894.
- [18] Einfalt T, Arnbjerg-Nielsen K, Golz C, et al. Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3/4): 186-202.
- [19] Thorndahl S, Nielsen J E, Rasmussen M R. Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 214-226.
- [20] Overeem A, Holleman I, Buishand A. Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(7): 1448-1463.
- [21] Wright D B, Smith J A, Villarini G, et al. Long-term high-resolution radar rainfall fields for urban hydrology[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2014, 50(3): 713-734.
- [22] Goudenhoofd E, Delobbe L. Generation and verification of rainfall estimates from 10-yr volumetric weather radar measurements[J].

- Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(4): 1223-1242.
- [23] Goudenhoofd E, Delobbe L. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(2): 195-203.
- [24] Bentley M L, Ashley W S, Stallins J A. Climatological radar delineation of urban convection for Atlanta, Georgia[J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(11): 1589-1594.
- [25] Wagner A, Seltmann J, Kunstmann H. The German radar composite RX: Qualitative performance analysis for a precipitation climatology[C]//Proceedings of the 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Garmisch-Partenkirchen: ERAD, 2014.
- [26] Fairman Jr J G, Schultz D M, Kirshbaum D J, et al. A radar-based rainfall climatology of Great Britain and Ireland[J]. Weather, 2015, 70(5): 153-158.
- [27] Winterrath T, Schmitt A. Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden niederschlagsklimatologie für Deutschland zur auswertung der rezenten Änderung des extremverhaltens von niederschlag[R]. Offenbach (Main): DWD, 2015.
- [28] Goudenhoofd E, Delobbe L. Extreme value analysis based on a 10-year radar-based precipitation reanalysis[C]//Proceedings of the 16th EMS Annual Meeting. Trieste: EMS, 2016.
- [29] Nelson B R, Krajewski W F, Kruger A, et al. Archival precipitation data set for the Mississippi River basin: Algorithm development[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D22): 8857.
- [30] Nelson B R, Prat O, Stevens S E, et al. Assessment of NOAA's NEXRAD reanalysis[C]//Proceedings of the American Geophysical Union, Fall Meeting 2016. San Francisco: AGU, 2016.
- [31] Nelson B R, Seo D J, Kim D. Multisensor precipitation reanalysis[J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(3): 666-682.
- [32] Calza M, Dalla Fontana A, Domenichini F, et al. A radar-based climatology of convective activity in the Veneto region[R]. FORALPS Technical Report, 4. Trento: Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, 2008.
- [33] Weckwerth T M, Wilson J W, Hagen M, et al. Radar climatology of the COPS region[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(S1): 31-41.
- [34] Rudolph J V, Friedrich K, Germann U. A radar-based climatology of high precipitation events in the European Alps: 2000-2007[C]//Proceedings of the 13th Conference on Mesoscale Processes. Salt Lake City: American Meteorological Society, 2009.
- [35] Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59(13): 2033-2056.
- [36] Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A. Inter-annual and semi-diurnal variations in summertime precipitation[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Boston: American Meteorological Society, 2003.
- [37] Kuo J T, Orville H D. A radar climatology of summertime convective clouds in the Black Hills[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1973, 12(2): 359-368.
- [38] Ahijevych D A, Carbone R E, Davis C A. Regional-scale aspects of the diurnal precipitation cycle[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Seattle: American Meteorological Society, 2003.
- [39] Ahijevych D A, Davis C A, Carbone R E, et al. Initiation of precipitation episodes relative to elevated terrain[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2004, 61(22): 2763-2769.
- [40] Carbone R E, Tuttle J D. Rainfall occurrence in the U.S. warm season: The diurnal cycle[J]. Journal of Climate, 2008, 21(16): 4132-4146.
- [41] Rudolph J V, Friedrich K. Seasonality of vertical structure in radar-observed precipitation over southern Switzerland[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(1): 318-330.
- [42] Rudolph J V, Friedrich K, Germann U. Relationship between radar-estimated precipitation and synoptic weather patterns in the European Alps[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(5): 944-957.
- [43] Rudolph J V, Friedrich K, Germann U. Model-based estimation of dynamic effect on twenty-first-century precipitation for Swiss river basins[J]. Journal of Climate, 2012, 25(8): 2897-2913.
- [44] Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D20): D20115.
- [45] Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States[J]. Weather and Forecasting, 2012, 27(1): 106-123.
- [46] Kaltenboeck R, Steinheimer M. Radar-based severe storm climatology for Austrian complex orography related to vertical wind shear and atmospheric instability[J]. Atmospheric Research, 2015, 158-159: 216-230.
- [47] Pavai C, Vamos C. Statistical characteristics of reflectivity field in areas covered by the Bobohalma WSR-98D radar[J]. Romanian Journal of Meteorology, 2006, 8(1-2): 1-20.
- [48] Henry S G. Analysis of thunderstorm lifetime as a function of size and intensity[C]//Proceedings of the 26th Conference on Radar Meteorology. Norman: American Meteorological Society, 1993.
- [49] Saxen T R, Mueller C K, Warner T T, et al. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. Army Test and Evaluation Command. Part IV: The White Sands Missile Range Auto-Nowcast System[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(4): 1123-1139.
- [50] Mohee F M, Miller C. Climatology of thunderstorms for North Dakota, 2002-06[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(9): 1881-1890.
- [51] 程文静, 俞小鼎, 王秀明, 等. 太行山东麓对流风暴下山演变气候特征[J]. 气象, 2023, 49(6): 641-656.
- [52] 胡启元, 杜莉丽, 刘红涛, 等. 基于回波遮挡订正的西安对流天气雷达气候特征分析[J]. 陕西气象, 2023(3): 1-7.
- [53] 李慧敏, 安晶晶, 邱学兴, 等. 安徽暖季对流活动的雷达气候学特征及影响因素[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(5): 554-562.
- [54] 管理, 戴建华, 赵渊明, 等. 上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J]. 气象, 2020, 46(12): 1543-1554.
- [55] 孙康远, 郑媛媛, 慕瑞琪, 等. 南京及周边地区雷达气候学分析[J]. 气象学报, 2017, 75(1): 178-192.
- [56] 朱海斌, 杨婧, 纪晓玲, 等. 宁夏北部暖季对流风暴雷达气候学特征分析[J]. 气象, 2023, 49(9): 1085-1096.
- [57] 肖玮, 刘维成, 傅朝, 等. 甘肃东南部暖季对流活动的雷达气候学特征[J]. 高原气象, 2023, 42(6): 1536-1547.
- [58] 杨士恩, 张新华. 聊城市冰雹天气的气候特征及短时临近预报[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(3): 71-73.
- [59] Nisi L, Martius O, Hering A, et al. Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: A long-term, high resolution, radar-based analysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142(697): 1590-1604.
- [60] Lukach M, Foresti L, Giot O, et al. Estimating the occurrence and severity of hail based on 10 years of observations from weather radar in Belgium[J]. Meteorological Applications, 2017, 24(2): 250-259.
- [61] Soderholm J S, McGowan H, Richter H, et al. An 18-year climatology of hailstorm trends and related drivers across southeast Queensland, Australia[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2017, 143(703): 1123-1135.
- [62] 吉哲君, 安华银, 赵惠珍, 等. 甘南高原冰雹的气候特征和雷达回波分析[J]. 现代农业科技, 2016(6): 210-212.
- [63] 王若升, 张彤, 樊晓春, 等. 甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 373-377.
- [64] 刘亚蕊, 杜昌雨, 王庆华. 临沂市冰雹气候及雷达特征分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6622-6625.
- [65] 应冬梅, 俞炳. 江西省冰雹天气的气候特征及雷达回波特征分析[J]. 江西气象科技, 2001, 24(3): 21-23.
- [66] 王秀玲, 郭丽霞, 高桂芹, 等. 唐山地区冰雹气候特征与雷达回波分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 344-348.
- [67] Saltikoff E, Tuovinen J P, Kotro J, et al. A climatological comparison of radar and ground observations of hail in Finland[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(1): 101-114.

- [68] Cintineo J L, Smith T M, Lakshmanan V, et al. An objective high-resolution hail climatology of the contiguous United States[J]. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(5): 1235-1248.
- [69] Zharashuev M V. Statistical analysis of hail activity in Stavropol krai and Crimea[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, 37(7): 455-460.
- [70] Junghänel T, Brendel C, Winterrath T, et al. Towards a radar- and observation-based hail climatology for Germany[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2016, 25(4): 435-445.
- [71] Schilling W. Rainfall data for urban hydrology: What do we need?[J]. *Atmospheric Research*, 1991, 27(1-3): 5-21.
- [72] Thorndahl S, Einfalt T, Willems P, et al. Weather radar rainfall data in urban hydrology[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3): 1359-1380.
- [73] Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(5): 1129-1144.
- [74] 朱睿. 多普勒雷达观测资料质量控制方法研究及其应用[J]. *科技创新与应用*, 2014(27): 291-291.
- [75] 宋林焯, 陈明轩, 程丛兰, 等. 京津冀夏季雷达到定量降水估测的误差统计及定量气候校准[J]. *气象学报*, 2019, 77(3): 497-515.
- [76] 黄安明, 冷谦, 袁博, 等. 郴州天气雷达到降水估测误差分析[J]. *气象科技*, 2020, 48(2): 178-184.
- [77] 许小峰. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(6): 7-14.
- [78] Chandrasekar V, Beauchamp R M, Bechini R. *Introduction to Dual Polarization Weather Radar*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [79] 张东明, 卢兴来, 杨豪, 等. 新一代天气雷达产品故障识别及监测预警系统设计实现[J]. *气象科技*, 2023, 51(3): 381-387.
- [80] 程勇, 钱坤, 康志明, 等. 一种雷达回波外推的注意力融合和信息回忆的LSTM方法[J]. *热带气象学报*, 2023, 39(5): 653-663.
- [81] 李显凤, 张玮, 黄少平, 等. 江西省气象-水文-雷达小时雨量信息融合试验结果分析[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(3): 276-284.
- [82] 张玉洁, 邵楠, 高林, 等. 基于多源数据融合的综合气象观测产品系统设计与应用[J]. *气象与环境科学*, 2022, 45(3): 96-104.
- [83] 吴静, 艾小锋, 徐志明, 等. 组网雷达到融合处理模板设计与拓展[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2022, 20(2): 119-126.

(编辑: 郑秋红)

(上接29页)

- across 482 cities from 24 countries[J]. *Environment International*, 2023, 174: 107825.
- [78] Pascal M, Wagner V, Alari A, et al. Extreme heat and acute air pollution episodes: A need for joint public health warnings?[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 249: 118249.
- [79] Cheng Y X, Kan H D. Effect of the interaction between outdoor air pollution and extreme temperature on daily mortality in Shanghai, China[J]. *Journal of Epidemiology*, 2012, 22(1): 28-36.
- [80] Weinhhammer V, Schmid J, Mittermeier I, et al. Extreme weather events in Europe and their health consequences—A systematic review[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2021, 233: 113688.
- [81] Burke M, Driscoll A, Heft-Neal S, et al. The changing risk and burden of wildfire in the United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(2): e2011048118.
- [82] United Nations Environment Programme. *Spreading like wildfire: The rising threat of extraordinary landscape fires*[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2022.
- [83] Requia W J, Amini H, Mukherjee R, et al. Health impacts of wildfire-related air pollution in Brazil: A nationwide study of more than 2 million hospital admissions between 2008 and 2018[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6555.
- [84] Silver B, Arnold S R, Reddington C L, et al. Large transboundary health impact of Arctic wildfire smoke[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 199.
- [85] Karanasiou A, Alastuey A, Amato F, et al. Short-term health effects from outdoor exposure to biomass burning emissions: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146739.
- [86] Jalava P I, Salonen R O, Hälinen A I, et al. In vitro inflammatory and cytotoxic effects of size-segregated particulate samples collected during long-range transport of wildfire smoke to Helsinki[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2006, 215(3): 341-353.
- [87] IOM. June 10. Data on urbanization and migration[EB/OL]. (2022-06-10)[2024-03-25]. <https://www.migrationdataportal.org/themes/urbanization-and-migration>.
- [88] Luo M, Lau N C. Increasing heat stress in urban areas of eastern China: Acceleration by urbanization[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(23): 13060-13069.
- [89] 张雷, 任国玉, 苗世光, 等. 城市化对北京单次极端高温过程影响的数值模拟研究[J]. *大气科学*, 2020, 44(5): 1093-1108.
- [90] Goggins W B, Chan E Y Y, Ng E, et al. Effect modification of the association between short-term meteorological factors and mortality by urban heat islands in Hong Kong[J]. *PLoS One*, 2012, 7(6): e38551.
- [91] Lungman T, Cirach M, Marando F, et al. Cooling cities through urban green infrastructure: A health impact assessment of European cities[J]. *The Lancet*, 2023, 401(10376): 577-589.
- [92] Cuerdo-Vilches T, Díaz J, López-Bueno J A, et al. Impact of urban heat islands on morbidity and mortality in heat waves: Observational time series analysis of Spain's five cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 890: 164412.
- [93] Jenerette G D, Harlan S L, Buyantuev A, et al. Micro-scale urban surface temperatures are related to land-cover features and residential heat related health impacts in Phoenix, AZ USA[J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(4): 745-760.
- [94] He C, Kim H, Hashizume M, et al. The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: A modelling study[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2022, 6(8): e648-e657.
- [95] Dai Y F, Liu T T. Spatiotemporal mechanism of urban heat island effects on human health—Evidence from Tianjin City of China[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 1010400.
- [96] Lai L W, Cheng W L. Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(8): 2724-2733.
- [97] Aslam M Y, Krishna K R, Beig G, et al. Diurnal evolution of urban heat island and its impact on air quality by using ground observations (SAFAR) over New Delhi[J]. *Open Journal of Air Pollution*, 2017, 6(2): 52-64.

(编辑: 卢冰)