

宋晓雯,董自鹏,陈乾,等. 城市气象观测与研究进展综述[J]. 陕西气象,2025(2):46-54.

文章编号:1006-4354(2025)02-0046-09

城市气象观测与研究进展综述

宋晓雯^{1,2,3},董自鹏^{1,2,3},陈乾^{2,4},李星敏^{1,2,3},陈闯^{1,2,3},彭艳^{1,2,3}

(1. 陕西省气象科学研究所,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 中国气象局秦岭气溶胶与云微物理野外科学试验基地,西安 710016;

4. 陕西省大气探测技术保障中心,西安 710014)

摘要:在全球气候变化和快速城市化的大背景下,极端天气引发的城市气象灾害事件发生频率增加,强度增大,因此,作为城市天气预报、气象服务与致灾天气机理研究基础的城市气象观测变得尤为重要。近些年,国内外开展了大量的城市气象观测与研究,并取得丰硕成果。本文从城市气象综合观测、大型外场观测试验以及城市气象观测研究进展三个方面对城市气象观测进行了综述,并对今后相关研究作了展望。

关键词:城市气象;观测试验;气候效应;大气污染

中图分类号:P411

文献标识码:A

城市化是人类社会发展的必然趋势,预计到2030年,全球将有60%的人口居住在城市^[1]。在全球气候变化和快速城市化的综合影响下,环境压力和不利环境效应日益突出,城市热浪、雾霾和暴雨等极端天气、灾害事件对城市居民生活的威胁越来越大^[2-4],给城市可持续发展带来巨大挑战。因此,在这样的背景下,城市气象业务服务与防灾减灾需求不断提升,这也促使城市气象领域不断深化和发展。

城市气象观测是开展天气预报、各类气象服务以及科学研究的重要基础。近二十年来,随着城市气象观测理念、技术和方法的不断进步,世界各国加速构建和完善城市气象综合观测网,推动了城市气象观测与研究快速发展^[5-6]。中国也相继出台了一系列政策助力城市气象观测发展,不断提升城市监测精密能力。例如,2022年4月国

务院印发《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》,提出要建设国家天气、气候及气候变化、专业气象和空间气象观测网,形成陆海空天一体化、协同高效的精密气象监测系统^[7-8];2022年12月中国气象局观测司与预报司印发《城市气象观测能力建设指导意见》,明确提升城市多维度立体综合观测能力、提升城市气象大数据管理能力、强化城市重大活动气象观测保障服务能力及深化部门合作、提高社会化观测能力的总体目标^[9]。目前,国内外学者针对城市气候效应、大气边界层特征、大气污染等问题开展了大量的城市气象观测试验,已取得不少显著成果^[10-13]。鉴于此,本文从城市气象综合观测、大型外场观测试验和城市气象观测研究进展三个方面简要回顾城市气象观测与研究取得的重要进展,并对未来相关研究作出初步展望。

收稿日期:2024-02-29

作者简介:宋晓雯(1996—),女,汉族,山东龙口人,硕士,助理工程师,主要从事环境气象研究。

通信作者:董自鹏(1984—),男,汉族,江苏连云港人,博士,高工,主要从事大气环境研究。

基金项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2024P021;CXFZ2022P021);陕西省重点研发计划项目(2024SF-YBXM

1 城市气象综合观测

城市大气条件、大气过程观测可为提高城市气候认识奠定重要基础^[10]。为了满足城市天气预报预测、气象服务和科研对高质量观测数据的需求,各国逐渐建立起城市气象综合观测网,这些观测网可以进行城市热岛、大气污染和城市通量监测等。城市气象观测的历史可回溯到16世纪,16世纪末出现了第一批对大气状况进行科学描述所必需的气象观测仪器。17世纪出现了观测网概念,1653—1654年建立了欧洲气象观测网(Rete Medicea),主要在佛罗伦萨、巴黎、米兰、瓦隆布罗萨、帕尔马等10个欧洲城市设置气温观测站^[14]。1724—1735年第二个国际气象观测网开始观测,并按照John Locke于1660年在伦敦提出的协议,对仪器、操作方法和读取时间有精确的规范^[14]。1960年开始,世界各地开始进行城市气候研究;21世纪后,由于气象观测的理念、技术和方法不断进步,城市气象观测发展速度迅速提升。中国拥有体量庞大的城市气象综合观测网,截至2024年10月,全国累计建成7.6万余个地面自动气象观测站、131个国家高空气象观测站、1300余套沿海/海岛自动气象站、546部雷达、9颗在轨风云气象卫星,组成陆海空天一体化综合气象观测系统^[15]。目前,中国最发达和成熟的的城市气象综合观测网以长三角、珠三角和京津冀三大城市群为代表,可为城市天气预报、城市气象科学研究和相关部门决策等提供高精度观测数据和气象服务^[6]。

长三角城市群的气象综合观测网主要由城市、生态、农业、海洋、交通等专业气象监测网构成。例如,上海市建立了由自动气象站网、风廓线雷达站网、天气雷达站网、环境气象观测站网和气象梯度塔等多个观测站网组成的国际一流城市气象综合观测体系(SUIMON),重点开展超大城市综合观测试验、智能气象观测,着力提升城市气象探测水平^[16-17];苏南地区基本形成了交通气象监测网,率先开展交通气象预报服务和相关研究工作,提高了公路交通气象实时监测和预报预警业务水平^[18];杭州市建立了地面与遥感观测相结合的多层次、立体式大气复合污染监测网,形成较为

完善的环境空气监测监控系统,为城市大气污染综合治理提供科学依据^[19];苏州市则建立了城市热岛监测网,进行城市热岛研究^[6]。珠三角城市群的气象综合观测网是由地面自动气象站、大气成分观测站、城市冠层观测、GPS/MET水汽监测、大气垂直廓线超级站等观测站网组成^[6]。例如,深圳市城市气象综合探测系统(SUMON)从1994年开始建设,以“精细的灾害监测、综合的气候监测”为特色^[20];此外,珠三角地区利用气象综合观测网开展了大量大气污染与边界层特征研究工作,为区域大气污染联防联控提供科学指导^[21]。京津冀城市群为提高影响天气观测、预报以及服务能力,建立了较为稠密的气象综合观测网,主要包括京津冀大气污染综合立体观测网、超大城市气象保障与服务监测网、交通气象服务系统等^[11,22]。针对城市降水、雾霾等问题,外场观测增加了激光雷达和风廓线雷达观测,空中、地面观测分别增加了飞机、车载激光雷达观测,以获得足够多且连续的立体观测数据^[11]。除以上三大城市群外,东北城市群也占据重要地位,同时东北地区是中国第五个严重大气复合污染区域^[23]。近年来,东北城市群建立的大气污染立体监测网,可为该区域的大气污染特征和成因机制研究提供重要的数据保障^[24]。

除以上各类城市气象观测网,气象观测塔可以获取大气边界层的重要气象资料,也是一种极好的城市气象观测设施。北京早在1979年建成325 m专用气象塔^[25],还有天津气象塔(255 m)、深圳气象塔(356 m)^[26]等,均为多元化的城市气象观测提供坚实基础。

2 大型外场观测试验

20世纪末至21世纪初,欧洲、北美和亚洲的许多国家和城市相继开展大型外场观测试验,主要集中在边界层以内,目的是了解城市气象过程,提高城市高分辨率气象现象的可预测性,其中城市边界层气象和空气污染是两个重要研究内容^[27]。比较有代表性的国际大型短期观测试验有:希腊雅典污染物传输与化学转化试验(MED-CAPHOT-TRACE)^[28]、美国盐湖城城市2000试验(URBAN 2000)^[12]、美国俄克拉荷马2003

联合试验(JOINT URBAN 2003)^[29]、美国休斯顿环境气溶胶雷暴试验(HEAT)^[30]、法国马赛城市边界层试验(ESCOMPTE)^[31]、瑞典巴塞尔城市边界层试验(BUBBLE)^[32]、英国伦敦空气污染物扩散试验(DAPPLE)^[33]和日本东京都市区对流研究(TOMACS)^[34]等。此外,也有一些长期观测,比如芬兰赫尔辛基中尺度天气预报和污染物扩散试验(HELSINKI TESTBED)^[35]、韩国首尔都市区高分辨率城市气象观测网(WISE)^[36]以及中国上海城市气象综合观测网(SUIMON)^[16]等。

2000年后,国内城市气象大型观测试验陆续开展。如2001—2003年开展了北京大气边界层动力、热力和化学综合观测试验(BECAPEX),获得了城市大气动力和大气化学三维结构图像,以揭示北京城市污染“空气穹隆”大气化学结构特征及其变化规律^[37]。2004年在北京实施了城市边界层观测试验(BUBLEX),获取了大量边界层温、湿、风资料,初步揭示了北京地区大气边界层特征^[38]。2005—2006年南京大学在南京城区利用激光雷达实施边界层观测试验,最终提出一个由边界层混合状态确定边界层高度的方法^[39]。由于城市对高影响天气造成灾害的放大效应越来越备受关注,更多学者开始开展城市高影响天气机理及减缓对策研究^[40]。为解决北京夏季暴雨预报难题,2009—2010年北京城市气象研究所与中国气象局气象探测中心等多个单位联合开展环北京夏季暴雨适应性外场观测试验,针对高影响天气对其上游地区预报敏感区域实施加密观测,提升了高影响天气数值预报水平^[10]。为探究城市群下垫面在高影响天气形成、发展及衰减过程中的作用,2010年进行了京津冀城市群局地环流及其对高影响天气过程影响观测试验,着重加大对城市群边界层结构以及热岛、山谷风和海陆风环流的观测^[41]。为深入了解沿海城市的气候效应,2010—2014年南京大学开展了多过程协同强化观测试验,研究长三角城市群大气边界层、陆面过程、地表物理特性、大气污染及其辐射特性等内容^[42-43]。为发挥首都区位优势,2015—2017年北京城市气象研究所联合国内外多家单位围绕城市精细化预报服务业务问题,在京津冀地区开展“城

市对降水、雾-霾影响观测试验(SURF)”^[11];基于城市强降水、雾-霾和边界层外场观测试验,解决了夜间边界层高度判定的难题,提高了对城市边界层三维结构以及下垫面地气交换过程的认识,揭示了城市局地环流对雾-霾的影响,推进了精细化预报“睿图系统”的研发,提升了城市降水与雾-霾的预报水平^[11]。为提高气象观测数据质量和解决城市环境气象服务、短临预报中技术难题,2016—2018年中国气象局气象探测中心联合多家单位在以北京为中心的京津冀地区、广州、上海、西安、成都等多个城市进行超大城市综合气象观测试验,利用新型地基遥感设备对温度、湿度、风、水凝物、气溶胶等气象要素垂直廓线进行连续观测,增强了对天气过程空间立体结构的认识,提高了超大城市中小尺度气象灾害预报和服务水平^[44]。为探究中国东北地区大气污染特征与形成机制,2016—2020年沈阳大气环境研究所在东北城市群多次实施大气边界层污染天气综合立体观测试验,重点研究了大气气溶胶光化学特性,污染物分布特征及其与气象要素关系,边界层结构特征及其对空气污染过程影响机理等方面,并获得重要进展,为当地大气污染防治提供科学依据^[24]。此外,为丰富气象观测业务,一些省、市气象部门也相继开展了高影响要素观测和观测适应性试验,极大提高了气象服务的针对性^[45]。通过开展这些大型外场观测试验,为城市天气预报预测、气象服务与研究提供有效观测数据保障,为应对超大城市气象灾害提供坚实基础。

3 城市气象观测研究进展

3.1 城市化气候效应

随着人口和经济的快速发展,城市化已成为人类社会发展的必然趋势。然而,在城市化不断发展和全球气候逐渐变暖的背景下,快速城市化极大地改变了城市下垫面,引起气象要素的变化,从而导致明显的城市化气候效应,比如城市热岛效应、干湿岛效应、雨岛效应、浊岛效应等^[2]。其中,热岛效应是城市化气候效应最直接的表现,即城市地表和大气温度高于周围郊区。历史上可追溯到1833年,Luke Howard发现伦敦市中心的气温明显高于周边^[46]。自这项开创性工作开展

以来,国内外学者使用不同研究方法(气象资料观测、遥感监测、数值模拟等)对不同规模城市热岛的强度、时空变化特征、影响因素及机制等进行研究^[2,47-48]。几乎所有研究都将热岛效应量化为热岛强度,大多数城市都表现出正的热岛效应,但阿联酋首都阿布扎比、中国新疆奇台及甘肃张掖等干旱气候城市则相对特殊,这些城市城区温度低于周围裸地或沙漠,呈现“冷岛效应”^[49]。目前,大量研究已得到了城市热岛随时间在二维或三维空间上的变化规律,热岛强度的日变化一般表现为白天弱、夜间强(晴朗无风天气),最低值出现在14:00—16:00;季节变化多数表现为秋冬季较强,夏季较弱;年际变化表现为近10 a呈增加趋势^[48,50-51]。但由于各城市地形、位置、气候等因素不同,并不是所有城市都符合上述一般规律,热岛强度也存在非周期性,如有研究发现春季成都和重庆的热岛强度远高于其他季节^[52]。从空间分布来看,热岛强度在人口和建筑物密集的区域较高,而在植被和水域较多的区域较低;热岛强度按照市中心、扩展区域、郊区/农村的顺序逐渐降低^[48,53]。有研究发现,中国东北、华南和华东的东南部地区白天城市热岛强度高于华北、西北的北部地区,夜间结果则相反^[54]。总的来说,城市热岛受到各种复杂的自然和人为因素综合影响,自然因素主要包括地理位置、太阳辐射和气象条件,人为因素包括城市下垫面、城市绿地和水体规模、土地利用、城市形态、人为热排放和空气污染等^[55]。例如,Xiong和Zhang^[56]研究表明长沙市城市景观格局、城市建设强度和地形地貌是影响该地区城市热岛空间格局变化的主要因素,并且人为因素对热岛效应形成的促进作用明显大于自然因素。Huang等^[57]研究发现相对湿度、云量和风速是决定上海夜间热岛强度大小的最重要气象因子,平静、干燥和晴空环境是最大热岛强度形成的最佳环境。由此可见,随着城市不断扩张,在众多因素的相互作用下,热岛效应变化情况和形成机制极其复杂。

大部分研究指出城市化有使城区尤其下风向降水增多的效应,即城市雨岛效应^[42,58]。Shepherd等^[58]发现城市下风向30~60 km范围内的

月降雨量平均增加28%。赵文静等^[42]发现长三角城市群中心区域与周围平原相较降水明显增多,且夏季降水高值区在城市群下风向,其中上海市表现最突出,降水高值区距离上海市中心下风向为60~70 km。目前,主要有四种机制被认为与城市雨岛效应有关^[59]。一是城市热岛效应。热岛效应可使城市上空建立不稳定层结,易产生对流云和对流性降水^[13]。一些研究认为城市热岛效应相关的边界层扰动是城市下风区降水增强的主要原因^[4,58]。二是城市下垫面变化。城市垂直结构普遍增加了城市空气动力学粗糙度,导致表面阻力和尾流湍流增强,城市增加的阻力和湍流比周围农村更显著降低了风速,可能会产生局部辐合风场^[4]。因此,由于城市表面粗糙度增加而增强的辐合可以增强城市某些地区的降水。Thielen等^[60]提出城市粗糙度长度与下风向降水呈正相关。三是城市景观对现有降水系统的改变。城区建筑物的存在和热岛环流是改变城市降水系统结构和传播的障碍^[2]。四是城市气溶胶效应。气溶胶可以改变城市辐射平衡(气溶胶-辐射相互作用),同时气溶胶粒子可以作为云凝结核在云形成中起一定作用(气溶胶-云相互作用),但城市气溶胶导致降水增强还是抑制取决于多种因素(如云类型、气溶胶浓度、环境条件)^[13]。与此同时,还有一些研究认为城市化对降水没有明显影响,或导致城区降水减少^[61-62]。Kaufmann等^[61]利用气象站和卫星观测资料分析城市化对珠三角降水的影响,结果表明城市化造成当地降水减少,这种减少可能是地表水循环变化引起的。因此,城市化对降水的影响结果存在差异,这可能与城市气候类型、气象条件、地形、城市化程度和气溶胶影响等有关。

除城市热岛和雨岛效应,城市干岛或湿岛效应也是城市化气候效应的重要体现,用来衡量城市空气与郊区空气之间的水分含量差异。与热岛和雨岛相比,关于城市干湿岛效应的系统研究较少,主要集中在单个城市或特定的城市化区域。以往研究发现城区湿度往往低于周围郊区(农村),这种现象被称为城市干岛,最早在德国柏林和慕尼黑发现^[63],随后在欧洲,以及美国、日本、

中国等国家的一部分城市也开展了此类研究。Liu等^[64]研究发现城市化效应降低了北京城区的相对湿度和水汽压。Luo和Lau^[65]报道了城市扩张显著加剧长三角城市群的干岛效应,且对城区的大气湿度降低和水汽压差增加的贡献达50%。一些研究表明,城郊湿度差异的日变化很大,特别是在暖季^[64,66]。周淑贞^[66]发现上海市相对于周边乡村夜间湿润,白天干燥,将其分别称为城市湿岛效应和干岛效应,并且暖季夜间城区易形成凝露湿岛。城市干岛或湿岛效应也存在季节差异,主要体现在冬季趋向于湿岛,夏季趋向于干岛^[67]。但不同研究结论仍不统一,可能是城市差异、人为水源、区域水汽输送等造成,也可能是由于湿度指标及其在时间尺度上的变化存在差异。

3.2 城市大气污染

大气污染是世界范围内的一个重要环境问题,主要污染物包括颗粒物($PM_{2.5}$ 和 PM_{10})、臭氧(O_3)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)和挥发性有机物(VOCs)^[68]。其中, $PM_{2.5}$ 和 O_3 是影响中国空气质量的两大主要污染物,严重危害人体健康^[69]。 $PM_{2.5}$ 是空气动力学直径小于 $2.5\ \mu m$ 的细颗粒物,可由人类活动直接排放,也可由 NO_x 、 SO_2 、VOCs等气态物质经过物理化学反应二次生成^[70]。 O_3 是一种二次污染物,主要是在波长 $200\sim 300\ nm$ 的太阳辐射下VOCs与 NO_x 发生一系列复杂化学反应而生成^[71]。国外针对 $PM_{2.5}$ 、 O_3 污染和控制研究起步较早^[72-74],国内相关研究则起步较晚,主要从 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染的时空变化特征、气象条件、来源解析、数值模拟等方面开展,集中在京津冀、长三角、珠三角、四川盆地和汾渭平原等大型城市群^[71,75-77]。张智胜等^[75]通过采集2009—2010年成都各季节典型月份 $PM_{2.5}$ 样品,发现成都城区 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度为 $165.1\ \mu g\cdot m^{-3}$,是国家环境空气质量标准限值的4.7倍, $PM_{2.5}$ 及其主要化学成分浓度在季节上表现为秋冬季高、春夏季低的变化特征,是污染源与天气条件的综合影响结果。赵卉伊褶等^[76]研究发现西安市 $PM_{2.5}$ 浓度季节变化规律为冬季高、夏季低,且具有周末、节假日高于工作日的“周末效应”,日变化表现为上午

和凌晨高、下午低的双峰模式,在空间上则具有城北高于城南、城区高于城郊县区的特征。刘建等^[71]报道了珠三角 O_3 浓度月变化呈单峰趋势,10月达到峰值;日变化也为单峰分布,午后16:00达到峰值;发现高温低湿条件有利于 O_3 形成;并当珠三角盛行偏西风时下风向地区 O_3 浓度最高,盛行偏北风时下风向地区 O_3 浓度最低。王雪松等^[77]研究发现北京市城近郊区 O_3 生成主要受VOCs控制,而远郊区县、农村 O_3 生成对 NO_x 更为敏感。根据这些研究可以得出, $PM_{2.5}$ 在冬季普遍存在,而 O_3 在夏季占主导地位。

2013年以来,中国采取了一系列措施来降低 $PM_{2.5}$,虽然 $PM_{2.5}$ 污染明显减少,但地面 O_3 浓度迅速上升,在此背景下,中国大气污染已从上述单一污染($PM_{2.5}$ 或 O_3)向 $PM_{2.5}-O_3$ 复合污染转变^[78-79]。 $PM_{2.5}$ 除受前体物、大气氧化性影响外,还受气象条件影响,风速和大气边界层高度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著负相关,而温度和光照强度与 O_3 浓度呈显著正相关^[80]。已有研究表明,晴空、高温和低湿有利于 O_3 生成,弱风、高湿和近地表逆温则有利于 $PM_{2.5}$ 生成^[81-82]。区域传输也对 $PM_{2.5}-O_3$ 复合污染形成有一定影响,但地区间存在差异。如唐山市春季 $PM_{2.5}-O_3$ 复合污染主要受南部气团短距离传输影响,夏季受渤海湾和南部沿海城市气团短距离传输影响,秋季则受西南内陆城市气团短距离传输影响^[83];河北南部城市夏季 $PM_{2.5}-O_3$ 复合污染受南部边界相邻城市气团短距离传输影响较大,而冬季和春季受由北向南长距离气团传输影响较大^[84]。除此之外, $PM_{2.5}$ 和 O_3 的二次成分通过它们共同的气态前体物(NO_x 和VOCs)紧密相连,在大气中通过不同的来源相互作用,引起非线性响应^[81]。 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的相互作用主要受光化学反应影响。 $PM_{2.5}$ 通过直接散射和吸收太阳辐射,最终降低光解速率,抑制 O_3 生成;而 O_3 会影响大气的氧化能力,从而促进 $PM_{2.5}$ 中二次污染物的形成^[83,85]。 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的相互作用导致观测浓度存在一定相关性;然而,观测到的相关性在不同季节和不同地区可能存在差异。Xu等^[86]发现北京市 $PM_{2.5}$ 浓度与 O_3 浓度在2003年2月呈负相关($r=-0.51$),但在

8月没有发现相关性。Wang等^[87]研究表明四川盆地冬季PM_{2.5}浓度与O₃浓度呈负相关。PM_{2.5}和O₃的协同污染主要出现在暖季,表现为高浓度PM_{2.5}和高浓度O₃同时出现,且呈显著正相关,例如上海、南京等地区^[88-89]。由此可见,PM_{2.5}-O₃复合污染机制极其复杂,其演化不仅受两者相互作用影响,而且还受排放源、气象条件和区域传输等综合作用影响。

4 展望

过去几十年,国内外城市气象观测与研究已取得了实质性进展,但仍存在一些不足。一是小尺度灾害性天气的观测能力欠缺,存在小尺度不精确问题,因此气象观测站网的分辨率仍需进一步提高;二是在城市气象观测与观测数据处理方面,一些新技术的应用(如人工智能、大数据挖掘)仍处于起步、发展阶段,未来需加强新技术应用的广度和深度;三是随着利用新型探测设备进行大气垂直探测的能力不断提升,城市地区新型观测资料的同化应用值得进一步探索与研究;四是PM_{2.5}和O₃污染存在极其复杂的耦合作用机制,对两者相互作用仍缺乏较为全面、系统性的认识,未来需进一步加强PM_{2.5}-O₃复合污染机制研究。

参考文献:

- [1] CHEN F, BORNSTEIN R, GRIMMOND S, et al. Research priorities in observing and modeling urban weather and climate[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(11): 1725-1728.
- [2] QIAN Y, CHAKRABORTY T C, LI J F, et al. Urbanization impact on regional climate and extreme weather: Current understanding, uncertainties, and future research directions[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(6): 819-860.
- [3] TAO W, LIU J, BAN-WEISS G A, et al. Effects of urban land expansion on the regional meteorology and air quality of eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(15): 8597-8614.
- [4] SHEM W, SHEPHERD M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 92(2): 172-189.
- [5] MULLER C L, CHAPMAN L, GRIMMOND C S B, et al. Sensors and the city: a review of urban meteorological networks[J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(7): 1585-1600.
- [6] 苗世光, 蒋维楣, 梁萍, 等. 城市气象研究进展[J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 477-499.
- [7] 国务院. 国务院关于印发气象高质量发展纲要(2022—2035年)的通知[J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2022(16): 11-16.
- [8] 中国气象局综合观测司. 高质量推进观测站网统一规划建设[N]. *中国气象报*, 2022-09-07(4).
- [9] 中国气象局综合观测司, 中国气象局预报司. 观测司 预报司关于印发《城市气象观测能力建设指导意见》的通知: 气测函〔2022〕233号[A/OL]. (2023-01-03)[2024-02-27]. http://10.1.65.66/pub/cma-head/fwfd/sfw/202301/t20230104_5242316.html.
- [10] 李炬, 窦军霞. 北京城市气象观测试验进展[J]. *气象科技进展*, 2014, 4(1): 36-45.
- [11] LIANG X, MIAO S, LI J, et al. SURF: understanding and predicting urban convection and haze[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(7): 1391-1413.
- [12] ALLWINE K J, SHINN J H, STREIT G E, et al. Overview of urban 2000: a multiscale field study of dispersion through an urban environment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(4): 521-536.
- [13] 谈建国, 顾问. 城市化降水效应研究进展[J]. *气象科技进展*, 2015, 5(6): 17-22.
- [14] CAMUFFO D. History of the long series of daily air temperature in Padova (1725—1998)[J]. *Climatic Change*, 2002, 53(1/2/3): 7-75.
- [15] 李红梅. 谱写气象强国建设新篇章[N]. *人民日报*, 2024-12-26(1).
- [16] TAN J G, YANG L M, GRIMMOND C S B, et al. Urban integrated meteorological observations: practice and experience in Shanghai, China[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(1): 85-102.
- [17] 高伟, 陈浩君, 谈建国. 上海城市气象综合观测网应用及展望[J]. *气象科技进展*, 2017, 7(6): 99-104.
- [18] 王博妮, 濮梅娟, 田力, 等. 江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究[J]. *气*

- 象,2016,42(2):192-202.
- [19] 沈叶民,盛颖智,徐冰焯,等. 浅谈浙江省大气复合污染立体监测网络[J]. 环境与可持续发展,2018,43(4):52-54.
- [20] 毛夏,江崑,庄红波,等. 深圳城市气象综合探测系统简介[J]. 气象科技进展,2013,3(6):13-18.
- [21] 吴蒙,吴兑,范绍佳,等. 珠江三角洲城市群大气污染与边界层特征研究进展[J]. 气象科技进展,2014,4(1):22-28.
- [22] 程麟钧,唐桂刚,刘宇,等. 京津冀及周边地区大气污染综合立体观测网支撑作用[J]. 环境科学研究,2021,34(1):11-19.
- [23] LI X L, WANG Y F, SHEN L D, et al. Characteristics of boundary layer structure during a persistent haze event in the central Liaoning city cluster, Northeast China[J]. Journal of Meteorological Research,2018,32(2):302-312.
- [24] 李晓岚,马雁军,王扬锋,等. 东北城市群大气污染立体观测与研究进展[J]. 气象与环境学报,2023,39(3):140-153.
- [25] 刘郁珏,胡非,程雪玲,等. 北京 325 米气象塔上 CO₂ 梯度观测数据质量控制与评价[J]. 大气科学,2016,40(2):390-400.
- [26] 谢洁岚,卢超,高瑞泉,等. 深圳 356 米气象塔观测数据的质量控制方法和空气动力学参数研究[J]. 热带气象学报,2020,36(2):189-198.
- [27] GRIMMOND C S B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere [J]. Theoretical and Applied Climatology,2006,84(1/2/3):3-22.
- [28] ZIOMAS I C. The mediterranean campaign of photochemical tracers-transport and chemical evolution(MEDCAPHOT-TRACE):an outline[J]. Atmospheric Environment,1998,32(12):2045-2053.
- [29] ALLWINE K J, LEACH M J, STOCKHAM L W, et al. Overview of Joint Urban 2003:an atmospheric dispersion study in Oklahoma City[C]//The 84th AMS Annual Meeting. Seattle, Washington, USA: American Meteorological Society,2004:74349.
- [30] ORVILLE R E, CAREY L, NIELSEN-GAMMON J, et al. The Houston Environmental Aerosol Thunderstorm(HEAT) Project-2005 [C]//The 85th AMS Annual Meeting. San Diego, California, USA: American Meteorological Society, 2005: 85317.
- [31] CROS B, DURAND P, CACHIER H, et al. The ESCOMPTE program; an overview [J]. Atmospheric Research,2004,69(3/4):241-279.
- [32] ROTACH M W, VOGT R, BERNHOFER C, et al. BUBBLE-an urban boundary layer meteorology project[J]. Theoretical and Applied Climatology,2005,81(3/4):231-261.
- [33] ARNOLD S J, APSIMON H, BARLOW J, et al. Introduction to the DAPPLE Air Pollution Project [J]. Science of the Total Environment,2004,332(1/2/3):139-153.
- [34] NAKATANI T, MISUMI R, SHOJI Y, et al. Tokyo metropolitan area convection study for extreme weather resilient cities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96 (8): ES123 - ES126.
- [35] KOSKINEN J T, POUTIAINEN J, SCHULTZ D M, et al. The Helsinki Testbed;a mesoscale measurement, research, and service platform[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2011,92(3):325-342.
- [36] PARK M S, PARK S H, CHAE J H, et al. High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea[J]. Atmospheric Measurement Techniques,2017,10(4):1575-1594.
- [37] 徐祥德,丁国安,卞林根,等. BECAPEX 科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响[J]. 气象学报,2004,62(5):663-671.
- [38] 李炬,舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析[J]. 地球物理学报,2008,51(2):360-368.
- [39] 毛敏娟,蒋维楣,吴晓庆,等. 气象激光雷达的城市边界层探测[J]. 环境科学学报,2006,26(10):1723-1728.
- [40] BAKLANOV A, GRIMMOND C S B, CARLSON D, et al. From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services[J]. Urban Climate,2018,23:330-341.
- [41] MIAO S G, DOU J X, CHEN F, et al. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing[J]. Science China Earth Sciences,2012,55(11):1881-1890.
- [42] 赵文静,张宁,汤剑平. 长江三角洲城市带降水特征的卫星资料分析[J]. 高原气象,2011,30(3):

- 668-674.
- [43] 聂安祺,陈星,冯志刚. 中国三大城市带城市化气候效应的检测与对比[J]. 气象科学,2011,31(4):372-383.
- [44] 张志坚,张静,伍光胜,等. 超大城市综合气象观测试验之测风激光雷达数据评估[J]. 热带气象学报,2022,38(2):253-264.
- [45] 汤绪. 超大城市气象观测网的设计与应用[J]. 气象科技进展,2016,6(4):8-17.
- [46] HOWARD L. The climate of London deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it [M]. 2nd ed. London:Harvey and Darton Press,1833.
- [47] 杨萍,刘伟东. 城市热岛效应的研究进展[J]. 气象科技进展,2012,2(1):25-30.
- [48] 任晓娟,李国栋,刘曼,等. 城市热岛效应研究方法的现状与展望[J]. 河南大学学报(自然科学版),2022,52(3):290-304.
- [49] RASUL A,BALZTER H,SMITH C,et al. A review on remote sensing of urban heat and cool islands[J]. Land,2017,6(2):38.
- [50] FOUNDA D,PIERROS F,PETRAKIS M,et al. Interdecadal variations and trends of the urban hat island in Athens(Greece) and its response to heat waves[J]. Atmospheric Research,2015,161/162:1-13.
- [51] 刘施含,曹银贵,贾颜卉,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 安徽农学通报,2019,25(23):117-121.
- [52] 李晓敏,曾胜兰. 成都、重庆城市热岛效应特征对比[J]. 气象科技,2015,43(5):888-897.
- [53] CHEN M X,ZHOU Y,HU M G,et al. Influence of urban scale and urban expansion on the urban heat island effect in metropolitan areas:case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Remote Sensing,2020,12(21):3491.
- [54] 王媛媛. 中国城市热岛与空气质量的时空演变格局及影响因素研究[D]. 上海:华东师范大学,2018.
- [55] RIZWAN A M,DENNIS Y C L,LIU C H,et al. A review on the generation,determination and mitigation of urban heat island[J]. Journal of Environmental Sciences,2008,20(1):120-128.
- [56] XIONG Y,ZHANG F. Effect of human settlements on urban thermal environment and factor analysis based on multi-source data:A case study of Changhai city[J]. Journal of Geographical Sciences,2021,31(6):819-838.
- [57] HUANG Q F,LI L,LU Y Q,et al. The roles of meteorological parameters in Shanghai's nocturnal urban heat island from 1979 to 2013[J]. Theoretical and Applied Climatology,2020,141(1/2):285-297.
- [58] SHEPHERD J M,PIERCE H,NEGRI A J. Rainfall modification by major urban areas:observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite [J]. Journal of Applied Meteorology,2002,41(7):689-701.
- [59] MITRA C,SHEPHERD J M. Urban precipitation:a global perspective[M]. London:Routledge,2015.
- [60] THIELEN J,WOBROCK W,GADIAN A,et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development:a sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale[J]. Atmospheric Research,2000,54(1):15-39.
- [61] KAUFMANN R K,SETO K C,SCHNEIDER A,et al. Climate response to rapid urban growth:evidence of a human-induced precipitation deficit[J]. Journal of Climate,2007,20(10):2299-2306.
- [62] 王娟. 西安城市化气候效应研究[D]. 西安:陕西师范大学,2011.
- [63] KRATZER P A,VIEWEG F,BRAUNSCHWEIG S. The climate of cities[M]. Boston:AMS Press,1956.
- [64] LIU W D,YOU H L,DOU J X. Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing area [J]. Theoretical and Applied Climatology,2008,96(3/4):201-207.
- [65] LUO M,LAU N C. Urban expansion and drying climate in an urban agglomeration of East China [J]. Geophysical Research Letters,2019,46(12):6868-6877.
- [66] 周淑贞. 上海大气湿度的城、郊对比分析[J]. 海洋湖沼通报,1994(2):13-25.
- [67] LUO Z R,LIU J H,ZHANG Y X,et al. Spatio-temporal characteristics of urban dry/wet islands in China following rapid urbanization[J]. Journal of Hydrology,2021,601:126618.
- [68] MANNUCCI P M,FRANCHINI M. Health effects of ambient air pollution in developing countries[J]. International Journal of Environmental Research

- and Public Health, 2017, 14(9):1048.
- [69] 菅月诚, 赵铖博, 朱子博, 等. 聊城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染特征及气象因素影响分析[J]. 环境科学学报, 2023, 43(9):257-267.
- [70] SHEN L J, WANG H L, CHENG M T, et al. Chemical composition, water content and size distribution of aerosols during different development stages of regional haze episodes over the North China Plain[J]. Atmospheric environment, 2021, 245:118020.
- [71] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3):813-820.
- [72] RINEHART L R, FUJITA E M, CHOW J C, et al. Spatial distribution of $PM_{2.5}$ associated organic compound in central California[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(2):290-303.
- [73] KIM H S, HUH J B, HOPKE P K, et al. Characteristics of the major chemical constituents of $PM_{2.5}$ and smog events in Seoul Korea in 2003 and 2004[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(32):6762-6770.
- [74] SCHIPA I, TANZARELLA A, MANGIA C. Differences between weekend and weekday ozone levels over rural and urban sites in Southern Italy[J]. Environmental monitoring and assessment, 2009, 156(1/2/3/4):509-523.
- [75] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区 $PM_{2.5}$ 季节污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11):2947-2952.
- [76] 赵卉伊褶, 周卫健, 牛振川, 等. 西安市 2013—2017 年大气 $PM_{2.5}$ 的时空变化特征及影响因素分析[J]. 地球环境学报, 2019, 10(3):248-256.
- [77] 王雪松, 李金龙, 张远航, 等. 北京地区臭氧污染的来源分析[J]. 中国科学: B 辑 化学, 2009, 39(6):548-559.
- [78] CHEN C R, GAO B B, XU M Q, et al. The spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ - O_3 association and its influencing factors across China: Dynamic Similarity lines[J]. Science of The Total Environment, 2023, 880:163346.
- [79] 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 等. 2015~2020 年中国城市 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染时空演变特征[J]. 环境科学, 2023, 44(4):1830-1840.
- [80] QU Y W, WANG T J, YUAN C, et al. The underlying mechanisms of $PM_{2.5}$ and O_3 synergistic pollution in East China: photochemical and heterogeneous interactions[J]. Science of the Total Environment, 2023, 873:162434.
- [81] QIN Y, LI J Y, GONG K J, et al. Double high pollution events in the Yangtze River Delta from 2015 to 2019: characteristics, trends, and meteorological situations[J]. Science of the Total Environment, 2021, 792:148349.
- [82] JACOB D J, WINNER D A. Effect of climate change on air quality[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(1):51-63.
- [83] 韩力慧, 兰童, 程水源, 等. 唐山市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的演变特征及其对大气复合污染的协同影响[J]. 环境科学, 2024, 45(8):4385-4397.
- [84] 赵淑婷. 河北省南部 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及跨界传输研究[D]. 廊坊: 河北工程大学, 2022.
- [85] WANG D F, ZHOU B, FU Q Y, et al. Intense secondary aerosol formation due to strong atmospheric photochemical reactions in summer: observations at a rural site in eastern Yangtze River Delta of China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 571:1454-1466.
- [86] XU X D, SHI X H, XIE L, et al. Spatial character of the gaseous and particulate state compound correlation of urban atmospheric pollution in winter and summer[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2005, 48(Suppl. 2):64-79.
- [87] WANG P F, QIAO X, ZHANG H L. Modeling $PM_{2.5}$ and O_3 with aerosol feedbacks using WRF/Chem over the Sichuan Basin, southwestern China[J]. Chemosphere, 2020, 254:126735.
- [88] SHI C Z, WANG S S, LIU R, et al. A study of aerosol optical properties during ozone pollution episodes in 2013 over Shanghai, China[J]. Atmospheric Research, 2015, 153:235-249.
- [89] DING A J, FU C B, YANG X Q, et al. Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(11):5813-5830.