

城市气象研究国际前沿动态综述

于淼¹ 窦晶晶¹ 苗世光¹ 楚艳丽¹ 孙丹²

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

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

关键词: 城市气候, 城市环境, 国际城市气候会议, 国际前沿

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.003

Advances of Urban Meteorological Research: International Conference on Urban Climate

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

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

2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

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

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

0 引言

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

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

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

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

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

1 重点研究进展

1.1 弹性城市的知识合作

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

1.2 规划亚洲健康城市

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

总体规划气候可行性论证技术等行业标准。

1.3 城市化引发的科学问题

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

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

1.4 城市海洋研究新前沿

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

1.5 城市气象研究与应用的结合

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

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

2 主要研究进展

2.1 城市气候过程

2.1.1 风切变在城市边界层中的作用

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

2.1.2 社区层面城市内部热剖面研究

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

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

2.1.3 局部气候带对地表热岛 - 冠层热岛关系的影响

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

2.2 城市环境对气候变化的适应与应对

2.2.1 气候可适应城市的塑造

通过创新、多尺度和适应性缓解设计方法, 塑造可适应气候变化的城市。

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

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

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

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

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

同时隔离碳。

2.2.2 互联基础设施的优化管理

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

2.3 最新城市气象探测技术

2.3.1 城市局部云覆盖监测

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

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

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

2.3.2 树木和建筑对北美郊区重粒子扩散的影响

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

2.3.3 小型城市风场研究

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

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

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

2.4 城市环境数值模拟

2.4.1 高分辨率植被模型

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

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

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

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

2.4.2 城区复杂植被的能量和湿度

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

2.4.3 城市树木对污染物扩散的影响

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

2.5 城市遥感

2.5.1 城市化影响的评估

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

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

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

2.5.2 城市气候模型的评价

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

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

2.5.3 利用地面热成像观测城市热各向异性

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

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

2.6 城市地区极端天气

2.6.1 高分辨率热浪预测

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

2.6.2 降雨观测与模拟

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

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

2.6.3 热浪和热岛的城市空间特征

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

3 城市气象研究思考与展望

3.1 城市气象未来发展

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

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

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

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

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

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

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

3.2 应对策略

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

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

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

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

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

4) 加强城市人为气溶胶对城市区域气候影响的研究。

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

参考文献

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