

城市热环境发展及缓解方案研究综述

官雨洁¹ 吴滨²

(1 福州市气象局, 福州 350008; 2 福建省气候中心, 福州 350008)

摘要: 城市热环境问题日益严重, 通过对已有热环境的研究结果进行分析, 进而探讨改善热环境的相应措施具有重要实践意义。从城市热环境的影响因子、观测方法、研究手段、降温原理以及降温效果等方面对城市热环境的发展和缓解进行总结。深入分析当前主要的研究手段和缓解措施, 包括遥感技术和数值模拟的使用, 绿色屋顶、绿色建材、城市灌溉、城市结构、通风廊道和人为热的降温效应。针对现有研究的不足, 提出对未来的研究建议, 为改善城市热环境提供理论依据。

关键词: 热环境, 全球气候变暖, 城市气温, 综述

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.01.002

Summary of Research on Urban Thermal Environment Development and Mitigation Plan

Guan Yujie¹, Wu Bin²

(1 Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou 350008 2 Fujian Climate Center, Fuzhou 350008)

Abstract: The problem of urban thermal environment is becoming more and more serious. By analyzing the research results of the existing thermal environment, and then discussing the corresponding measures to improve the thermal environment has important practical significance. The development and mitigation of urban thermal environment are summarized from the aspects of urban thermal environment influencing factors, observation methods, research methods, cooling principles and cooling effects. In-depth analysis of current main research methods and mitigation measures, including remote sensing technology, the use of numerical simulation, green roofs, green building materials, urban irrigation, urban structure, ventilation corridors and the cooling effect of man-made heat. Aiming at the shortcomings of existing research, put forward suggestions for the future, and provide theoretical basis for improving the urban thermal environment.

Keywords: thermal environment, global warming, urban temperature, review

0 引言

近年来随着城市化进程加快, 快速增加的建筑物和人口使供热制冷负荷加大, 从而导致城市温度升高。城市的高层建筑阻止了空气的流动, 加剧了城市热岛, 使城市热环境状况严峻, 给人们的正常生活带来了严重威胁^[1]。虽然城市高温不会像热带气旋、暴雨等强烈天气那样直接造成重大的自然灾害, 但会通过改变局地的能量平衡、水循环过程、大气边界层结构、污染物传播和扩散规律等对人类生产生活产生间接的危害^[1-2]。城市热环境与人们生活密切相关, 从目前的研究现状来看, 城市热环境已发展成为一个跨学科领域的问题^[3], 不仅是大气科学研究关注的焦点, 还受到环境、地理、水文、生态、卫生和城镇规划等方面的关注。国内外学者对城市热环境问题以及人类

与城市环境的相互影响进行了大量的监测和研究。为全面了解城市热环境现状, 本文梳理了目前城市热环境发展及缓解方案的研究进展, 力求为深刻理解、准确评估城市热环境对区域甚至全球环境效应提供一定理论支撑。

1 城市热环境的影响因子

影响城市热环境的因子可分为五类: 城市形态结构、社会经济、气象条件、生物物理学和生物化学。

1.1 城市形态结构因子

城市形态结构因子主要包括建筑物高宽比、天穹可见度等^[4]。建筑物高宽比是建筑物遮挡效应的指示因子, 其值越高表示建筑物越高, 街道宽度越窄, 对地面的遮挡效应也就越明显。天穹可见度将天空作为净长波辐射的能量汇, 城市中任意一点所能见到的天空范围会直接影响城市冠层的冷却效率。城市形态结构对城市热环境的影响主要在3个方面^[4]: 1) 建筑物遮挡导致城市冠层内部多次反射增加太阳短波辐射吸

收稿日期: 2020年9月15日; 修回日期: 2021年3月18日

第一作者: 官雨洁(1993—), Email: 409664580@qq.com

资助信息: 福建省气象局城市气候效应适应性研究创新团队

收; 2) 建筑物遮挡导致感热湍流交换效率降低, 不利于城市冠层热量扩散; 3) 建筑物遮挡导致地表长波辐射限制在城市冠层内部, 不利于地表降温。

1.2 社会经济因子

社会经济因子一般通过人口、城市面积等表示。Oke^[5]针对北美、欧洲21个城市研究发现, 城市热岛强度在静风无云的夜间, 与人口存在显著正相关关系, 由此验证城市热岛强度与城市大小之间存在紧密联系的假设。Zhao等^[3]研究发现北美地区夜间城乡温差与人口呈现显著正相关性。但是, 各个社会经济因素与城市热环境的关系不应孤立看待, 城市的地理位置、地形和气候因素等方面的影响也需考虑。

1.3 气象相关影响因子

气象影响因子主要包括风速、云量和降水。城市气温随风速和云量降低而升高, 风速和云量可作为湍流和辐射传输的表征^[4], 且与大气稳定度相关。静风、少云的夜间城市地区大气稳定度高, 不利于热量传输, 导致城市气温上升。云量较少或者无云的夜间, 城乡之间地表辐射降温差异愈加明显。强风、暴雨能迅速带走城市产生的热量使城市气温下降。

1.4 生物物理学因子

生物物理学因子一般从城市地表能量平衡入手。城市建筑物墙体、道路等材料使城市地区白天会吸收更多的太阳短波辐射, 夜间会释放出更多的储热量, 因此相比乡村地区城市昼夜高温明显。城市地区植被覆盖率较低, 不透水面积较大, 与乡村相比通过植被蒸腾、土壤蒸发等作用导致的潜热交换效率降低, 不利于城市地区的热量扩散。此外, 人为热排放是城市地区所特有的额外能量来源^[4], 也是影响城市热环境的关键因子, 其主要由建筑物耗能排放、交通排放和人体新陈代谢三个部分组成^[6]。

1.5 生物化学因子

生物化学因子主要表现在气溶胶对城市热环境的影响。早在1981年, Oke^[6]就将空气污染列为城市热岛的影响因素之一。他指出大气污染物会通过吸收入射太阳短波辐射和地表长波辐射造成大气增温, 增加向下长波辐射从而进一步增强城市热岛。很多城乡同期长波辐射对比观测试验均证实了城市向下长波辐射比乡村地区要高的观点。加拿大Brandon地区1979年春、夏季13次夜间辐射观测显示, 城市地区平均比乡村地区多接收10.7%的向下长波辐射^[7]。2011年全年北京城市地区白天比乡村地区的向下长波辐射多3%~15%^[8]。气溶胶是大气污染物的重要成分, 一方面气溶胶颗粒散射太阳短波辐射, 从而削弱到达地面的太阳辐射导

致地表吸收净辐射量减少; 另一方面气溶胶颗粒散射地表长波辐射, 从而造成向下长波辐射量增加, 而这—效应在大气透明窗波段(8~12 μm)尤为明显^[9]。值得注意的是, 气溶胶光学辐射特性与气溶胶成分、区域排放源密切相关, 气溶胶对城市热环境的影响应该受到足够的重视。

2 城市热环境的研究方法

城市热环境的研究方法经历了从传统观测至遥感技术应用, 再到模型模拟几个阶段, 研究的时空分辨率有了很大提高。

2.1 定点观测资料的分析

早期城市热环境的研究主要是根据定点观测的城乡气温资料进行的^[5]。定点观测平台通常为地面气象台站或者移动观测车。通过对城市站点进行不同时段观测以及对多个城乡站点进行对比观测, 得到城市热环境日变化、分布和强度等信息。此方法因受限于地面气象站点的选择及其周围环境的变化问题, 较难满足各类城市热环境问题的研究, 目前城市热环境研究中单纯依赖传统观测的研究越来越少。

2.2 遥感技术应用

遥感资料观测目前已为城市热环境研究的主力。Rao^[10]于1972年最早使用这一方法研究了城市热岛, 之后遥感观测方法逐渐受到青睐。遥感方法是一种间接手段, 其主要原理是通过卫星或机载平台搭载的传感器接收地表辐射信息并进一步转化为地表温度, 在此期间不考虑任何可能影响长波辐射从地表发射传输至传感器的因素, 最终的地表温度需要对大气传输系数、地表发射率等进行校正^[11]。地表温度数据包括地表辐射、热动力特性信号, 利用遥感观测得到的地表温度数据需量化后再进行城市热环境研究。遥感观测除去易受到云量影响的限制外, 相比于地面观测具有空间覆盖范围大、时空分辨率高的特点, 有利于进行不同地区的同时期城市热环境比较。

遥感资料主要用于三个方面^[11]。第一方面是采用遥感观测数据研究城市热环境及其和地表特性的关系。利用AVHRR、Landsat等影像结合土地覆盖类型数据评估地表温度的空间变化, 研究其变化特征与地表特征因子如天穹可见度^[12]、地表材料^[13]以及归一化植被指数(NDVI)^[14]的关系。第二方面是将遥感观测数据应用于城市能量平衡研究。这个通常需要结合城市气候模式, 例如将遥感观测的地表温度数据耦合到大气模型中来估算地表能量通量或者通过输出模式的地表特性(热扩散率、水汽含量)来进一步研究其与地表温度的关系^[15-16]。之前广泛应用于农田、植被表

面基于遥感数据的热量传输 (bulk heat transfer) 方法也被应用于城市地区^[17]。第三方面是将遥感观测应用于大气城市热岛 (Atmospheric Urban Heat Island) 和地表城市热岛 (SUHI) 相互联系的研究中。很多研究将同期近地面气温和遥感地表温度结合起来揭示地表温度-空气温度的关系^[13, 18]。其中不少研究是基于一个科学假设: 遥感地表温度相比于气温可以更准确地监测城市热岛并且修正城市因素对气温的影响^[19-20]。

2.3 模型模拟研究

利用模型模拟城市热环境不仅可以有力地支持观测分析, 而且能加深对具体物理过程的理解。早期城市地表模型主要专注于调整地表特征因子例如粗糙度长度、反照率、热导率等, 之后研究者开始考虑城市形态结构对城市能量和辐射过程的影响^[21]。直到本世纪初耦合城市参数化方案的陆面过程模型才开始逐渐发展起来。Masson^[22]将城市参数化方案分为三大类: 经验模型、将植被模型修改调试应用于城市冠层的模型、包含三维城市冠层的单层或多层模型。经验模型主要指通过观测数据建立统计关系, 例如LUMPS (Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme) 模型^[23], 这一方法很大程度上受制于观测期间的条件。植被模型通过重点调试地表特性参数如反照率、粗糙度、零平面位移、地表发射率、热容量等, 使其适用于城市地区的模拟。前两种模型较为简单, 但是无法全面地揭示城市对气候影响的基础过程。Masson^[24]和Kusaka^[25]最早建立单层城市冠层模型 (UCM), 该模型已经被广泛嵌套到MM5、WRF等中尺度模式并进行调试^[26]。单层冠层模型具有较多优点如计算代价小、充分考虑城市形态参数和人类活动影响、可与陆面模式耦合^[27]。多层城市冠层模型相对于单层城市冠层模型更为复杂, 计算量大, 但考虑到的因素更多^[27] (即对城市冠层进行分层计算使得模型对城市特征的描述更加精准)。其中耦合了单层城市冠层模型的模拟被广泛运用于城市热环境研究。Oleson等^[28]将城市通量塔观测到的气温、通量数据分别与模型结果进行对比并表明该模型可以较为准确模拟城市辐射和能量交换过程。苗世光等^[29]发现耦合城市冠层模式后可在一定程度上改善近地层气象要素的预报效果, 有效提高模式对城市气象要素的模拟能力。气候模式, 比如NCAR的Community Earth System Model (CESM) 中也耦合了单层城市冠层模型。

3 缓解城市热环境的主要方案

在气候变化背景下, 人类不但面临全球增温的负面影响还经历着城市高温热胁迫等考验, 为了改善人

类的生存环境, 城市热环境的缓解方案研究开始成为焦点。

3.1 增加城市地区反照率

增加城市地区反照率具体方法就是增加建筑物屋顶、墙体以及道路等表面的反照率, 使得进入城市冠层的太阳短波辐射减少。美国芝加哥市在1995年通过比较实施前后的城市热环境发现增加屋顶反照率可有效降低热岛强度^[30]。大多数冷屋顶的研究方案都将注意力放在减少可见光波段的太阳辐射, 但其实近红外波段 (700~2500 nm) 的太阳辐射占到达地表总太阳辐射的52%左右, 比可见光波段 (400~700 nm) 所占比例还要高9%。因此有研究者开始关注冷色屋顶材料, 用于有效反射近红外波段太阳辐射^[31], 涂刷这种冷色染料在屋顶上或者再覆盖一层高可见光反照率的材料, 可起到冷却屋顶的作用。此外还可采用热变色材料, 其对温度敏感, 在高温情况下其反照率会随之变高^[32]。但这些材料均存在使用年限的问题, 由于外界环境风化导致材料老化、烟灰沉降覆盖在材料表面等原因, 会使得材料高反照率性能降低。除屋顶外, 道路也是城市表面的重要组成部分, 大多数道路材料是沥青或者水泥, 反照率都相对较低。Pomerantz等^[33]分析了多种材料包括冷色、高反照率水泥、种草砖、渗透砖的反射特性, 其中一些高性能材料已经用于铺设美国部分城市的道路。高反照率道路还能提高夜间道路照明性能, 节省路灯照明的能源消耗, 如普通沥青路需要每千米24盏固定路灯才能达到夜间标准照明等级, 而采用一种高反照率的水泥材料只需要17盏固定路灯即可^[34]。在较冷的气候或供暖超过制冷季节的气候中, 高反射率材料可能会导致供暖热负荷显著增加, 因此冷却屋顶适用于具有较长的制冷季节和较短的供热季节的气候区^[31-32]。

3.2 增加城市地区蒸发量

要增加城市地区蒸发量, 首先要扩大城市绿地、森林覆盖面积。植被蒸散有利于潜热扩散, 降低城市温度, 同时, 植被通过光合作用吸收二氧化碳, 可以有效控制城市温室气体排放, 降低温室效应。在屋顶上种植植被来缓解城市热环境的方法通常称为绿色屋顶, 绿色屋顶通过降低屋顶表面温度, 有利于城市建筑节能, 同时还能改善建筑物周边微气象环境。绿色屋顶对城市热环境的缓解效应已经在很多城市如纽约、新加坡、欧洲部分城市以及台北展开应用^[35-39]。通过栽种爬墙植物从而覆盖城市建筑物墙壁也可以起到缓解城市热环境的作用, 新加坡有研究发现绿色墙壁可使最高温度降低10 K^[40]。

城市公园作为城市地区植被最为集中的区域,降温效果十分明显。很多研究表明城市公园的降温效果可以延伸至其外围数百米甚至上千米的区域^[41],在不同气候区城市与市区公园的温度差异对比都发现城市公园是明显的“冷岛”^[42-43]。

3.3 节能减排

节能减排狭义而言,指节约能源和减少环境有害物质排放。缓解城市热环境最基本的措施就是减少人为热排放,可从生活方式的改变以及相关方面的技术革新入手。如采取适当的生活出行方式减少空调、汽车等使用,改进工业设备等来减少热排放。我国各大城市均已展开太阳能、风能、水能等可再生资源的开发和利用,大力推广节能型电器设备;合理控制私家车出行数量,注重发展城市公共交通,并逐步开始用电作为车辆燃料;建筑物采用反射、遮光玻璃起到保温隔热的作用等等。此外,将排放的废热重新利用也可在一定程度上缓解城市热环境,如有效回收空调系统的废热废能并再次利用来满足城市集中供暖等从而减少人为热排放。

3.4 城市通风廊道

城市通风廊道的建设能有效减小建筑设施对风的消减作用,增加城市内部与城市冷源之间的空气交换,促进空气流动,改善城市热环境。风对城市形态极为敏感,建筑物高度、密度、街道的长高比、纵横比和方向都对城市通风起着重要作用^[44-45]。城市通风廊道的研究是以大气候环境为背景,通过对城市建设及地形地貌等相互作用所形成的复杂场来了解城市不同区域的通风潜力,从而衡量空气流通效率对缓解城市热环境的贡献程度。由于研究空间范围较大,一般通过相关矢量或者栅格数据进行分析。Ren等^[46]通过WRF模型为成都设计城市通风廊道以缓解城市热压力;武汉打造通风廊道利用自然风和水体流动性带走中心城市湿热空气,改善中心城区微气候,使武汉夏季最高温度平均下降1~2℃^[47];合肥市为保持城市的通风效益,在城市东南侧保留了未开发的农田保护区作为东南风的引风口,引入冷平流来调节市区温度^[48]。但在建筑物、街道范围内,所评估的城市通风性能大多是基于理想化模型展开的,实际上通风廊道只是给出一个大致方向,效果存在不稳定性、不连续性且受环境因素影响大,具有一定的随机性。

4 结语与展望

本文总结了近些年来城市热环境方面的研究成果,概述了城市热环境的观测、研究方法以及缓解方案的研究进展。目前,我国关于城市热环境的研究在

深度和广度上有了一定的扩展,但与国际的相关工作相比,除了具有挑战性的研究问题外,还需做大量的基础性工作以便得到更长远的研究发展。

1) 完善城市基础数据资料库。利用卫星遥感资料建立有关地形、土地使用、植被、土壤的城市地表信息库,在代表性城市开展地表通量、城市冠层特征和生态环境的综合观测以建立交通、建筑物、树木、公园以及人口分布的城市类型数据库,使得城市模拟更符合实际,以便给出优化的城市规划方案,建设生态型城市。

2) 城市群及复杂地形区的热环境监测。城市之间的距离不断缩短,使城市热环境不再是一个局地天气现象,城市群间的热环流与能量平衡、边界层结构、盛行风向风速之间的关系不容忽视。依山临水而建的城市热环境会不可避免地受到海陆风和地形环流的影响,从而改变城市湍流能量、地表温度、湿度、风场等,如何区分它们带来的影响也值得深入思考。

3) 实行多样的缓解措施。单一的改善措施在提供降温效果的同时可能存在一些负面影响,而各种措施联合作用所产生的影响效果评估目前较少。如何利用城市热环境的变化规律来采取相对应的生态措施,探索多种降温措施联合使之向有利于城市居民生活和工业生产的方向发展也是未来研究应关注的问题之一。

4) 不断拓展研究尺度。针对某一尺度的研究结果在不同的时间和空间尺度上有很大差异,针对单个建筑、小区域或全球尺度的模拟研究所需的数值模型区别很大,参数也明显不同,因此需要不断拓展各尺度的研究,建立多尺度城市系统,从而了解城市热的(非)周期性变化和地区差异变化对城市气候的影响。

参考文献

- [1] Li D, Bou-Zeid E. Synergistic interaction between urban heat islands and heat waves: the impact in cities is larger than the sum of its parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52: 2051-2064.
- [2] Cao C, Lee X, Liu S, et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nature Communications*, 2016, 7: 12509.
- [3] Zhao L, Lee X, Smith R, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511: 216-219.
- [4] Oke T. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 1988, 11: 103-113.
- [5] Oke T. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 1973, 7(8): 769-779.
- [6] Oke T. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(455): 1-24.
- [7] Suckling P. Nocturnal observations of incoming longwave radiation and the urban heat island for a small city. *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology Ser B*, 1981, 29: 23-27.
- [8] Wang L, Gao Z, Miao S, et al. Contrasting characteristics of the surface energy balance between the urban and rural areas of Beijing. *Advances in Atmospheric Science*, 2015, 32: 505-514.
- [9] Jacobson M. Studying the effects of aerosols on vertical photolysis rate coefficient and temperature profiles over an urban airshed.

- Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 10593-10604.
- [10] Rao P. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972, 53: 647-648.
- [11] Voogt J, Oke T. Thermal remote sensing of urban climate. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 370-384.
- [12] Eliasson I. Infrared thermography and urban temperature patterns. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13: 869-879.
- [13] Caselles V, López García M J, Meliá J, et al. Analysis of the heat-island effect of the city of Valencia, Spain through air temperature transects and NOAA satellite data. *Theoretical and Applied Climatology*, 1991, 43: 195-203.
- [14] Julien Y, Sobrino J A, Verhoef W. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 43-55.
- [15] Carlson T, Dodd J K, Benjamin S G, et al. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1981, 20: 67-87.
- [16] Hafner J, Kidder S. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38: 448-465.
- [17] Voogt J, Grimmond C. Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 1679-1699.
- [18] Stoll M, Brazel A. Surface-air temperature relationships in the urban environment of Phoenix. *Arizona Physical Geography*, 1992, 13: 160-179.
- [19] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析. *环境科学*, 2017, 38(10): 3987-3997.
- [20] Gallo K, Adegoke J, Owen T, et al. Satellite-based detection of global urban heat island temperature influence. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: 4776.
- [21] Martilli A, Clappie A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-layer Meteorology*, 2002, 104: 261-304.
- [22] Masson V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 84: 35-45.
- [23] Grimmond C, Oke T. Turbulent heat fluxes in urban area: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41: 792-810.
- [24] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 94, 357-397.
- [25] Kusaka H. A simple single layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and Slab models. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 101(3): 329-358.
- [26] Miao S, Chen F, LeMone M A, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 484-501.
- [27] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. *气象学报*, 2010, 70(3): 338-353.
- [28] Oleson K Bonan G, Feddema J, et al. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *International Journal of Climatology*, 2011, 31: 1848-1865.
- [29] 苗世光, 王迎春. 基于用户需求的城市气象研究: 进展与展望. *气象科技进展*, 2014, 4(1): 6-14.
- [30] Fischer E, Oleson K W, Lawrence D M. Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L03705.
- [31] Mackey C, Lee X, Smith R. Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 2012, 49: 348-358.
- [32] Akbari H, Touchaei A. Modeling and labeling heterogeneous directional reflective roofing materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 124: 192-210.
- [33] Pomerantz M, Akbari H, Harvey J T. Cooler reflective pavements give benefits beyond energy savings: durability and visibility. *Proceedings of the 2000 ACEE Summary Study on Energy Efficiency in Buildings*, Vol 8, Pacific Grove, CA, 2000.
- [34] Stark R. Road Surface's Reflectance Influences Lighting Design. *Lighting Design Application*, 1986.
- [35] Alexandri E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 2008, 43: 480-493.
- [36] Rosenzweig C, Solecki W D, Parshall L, et al. Mitigating New York city's heat island: integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90: 1297-1312.
- [37] Wong N H, Jusuf S K, Win A, et al. Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. *Building and Environment*, 2007, 42: 2949-2970.
- [38] Skoulika F, Santamouris M, Kolokotsa D, et al. On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece. *Landscape Urban Planning*, 2014, 123: 73-86.
- [39] Sun C. The relationship between green roofs and the thermal environment in Taipei city. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2010, 138: 77-88.
- [40] Wong N H, Tan A, Tan P Y, et al. Perception studies of vertical greenery systems in Singapore. *Journal of Urban Planning and Development*, 2010, 136: 330-338.
- [41] Ca V T, Asaeda T, Abu E M. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. *Energy and Buildings*, 1998, 29: 83-92.
- [42] Kolokotroni M. London's urban heat island: impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and Buildings*, 2012, 47: 302-311.
- [43] Bencheikh H, Ameer R. The effects of green spaces (palme trees) on the microclimate in arid zones, case study: Ghardaia, Algeria. *Architecture Research*, 2012, 2: 60-67.
- [44] Shareef S, Abu-Hijleh B. The effect of building height diversity on outdoor microclimate conditions in hot climate. A case study of Dubai-UAE. *Urban Climate*, 2020, 32: 100611.
- [45] Hsieh C M, Huang H C. Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. *Computers Environment and Urban Systems*, 2016, 57: 130-143.
- [46] Ren C, Yang R, Cheng C, et al. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan-The implementation in Chinese cities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 182: 170-188.
- [47] 洪亮平, 余庄, 李鹏. 夏热冬冷地区城市广义通风道规划探析—以武汉四新地区城市设计为例. *中国园林*, 2011, (2): 39-43.
- [48] 吴息, 陈万隆, 刘春岩, 等. 合肥东南引风口对城区热岛调节作用的评估. *南京气象学院学报*, 2003, 26(6): 768-772.