



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2305843

引用格式:郝学军,朱烨,周海珠.城市街谷热岛效应研究进展[J].科学技术与工程,2024,24(16):6576-6591.

Hao Xuejun, Zhu Ye, Zhou Haizhu. Research progress of urban street valley heat island effect[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6576-6591.

环境科学、安全科学

城市街谷热岛效应研究进展

郝学军¹, 朱烨¹, 周海珠^{2*}

(1. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 102600; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100000)

摘要 随着城市化水平不断提高及城市空间密度日益增加,城市热岛效应不断加剧,导致极端气候发生范围和强度增加,对城市居民的身心健康构成威胁。城市热岛效应现已成为多学科研究关注的热点。对现有尺度下热岛效应研究方法的技术发展进行了梳理,分析其优缺点以及在不同尺度上的适用性;此外,对街谷尺度下热岛效应的影响因素进行分析;最后,就当前研究过程中存在的问题,从数据及评价方法等方面提出街谷尺度下城市热岛的研究进展与发展趋势。研究成果为紧凑型城市发展模式背景下,深入研究城市街谷热岛效应提供了参考,为缓解城市热岛效应提供了有效途径。

关键词 街谷; 热岛效应; 技术方法; 影响因素

中图分类号 X169;

文献标志码 A

Research Progress of Urban Street Valley Heat Island Effect

HAO Xue-jun¹, ZHU Ye¹, ZHOU Hai-zhu^{2*}

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102600, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100000, China)

[Abstract] With the continuous improvement of urbanization level and the increasing urban spatial density, the urban heat island effect is intensifying, resulting in the increasing range and intensity of extreme climate, which poses a threat to the physical and mental health of urban residents. Urban heat island effect has become a focus of multidisciplinary research. The technical development of existing methods for studying heat island effect at different scales was reviewed, their advantages and disadvantages, and their applicability at different scales were analyzed. In addition, the influence factors of heat island effect on street and valley scale were analyzed. Finally, according to the existing problems in the current research process, the research progress and development trend of urban heat island at street valley scale were proposed from the aspects of data and evaluation methods. The research results provide a reference for the in-depth study of urban street valley heat island effect under the background of compact city development model, and to provide an effective way to mitigate urban heat island effect.

[Keywords] street valley; heat island effect; technical methods; influencing factor

受人为因素影响,城市地表的局部温度、湿度、空气对流等因素发生改变,导致城市的小气候变化,出现城市中心温度高于郊区的现象,引发热岛效应。英国气候学家 Lake Howard 在 1833 年首次发现了热岛效应^[1],并在其著作《伦敦的气候》记载。一方面,城市热岛效应受城市化影响较大^[2],包括下垫面物理性质的改变、人为热的大量释放、水气影响、空气污染、绿地减少、城市人口聚集等多方面的因素^[3]。这些城市内部的变化,对城市热岛现象的强度和变化规律产生了最根本的影响。另

一方面,外界大气环境随着二氧化碳等温室气体的增加产生了“温室效应”^[4-5],导致夏季高温天气频繁发生,使得城市居民更加依赖于建筑的供冷系统,城市热岛效应因而变得更加明显,并与建筑能耗呈现正相关的因果关系^[6-7]。

严重的城市热岛效应不但影响了人们的身心健康,还成为了人们生活质量进一步提高和城市进一步发展的制约因素^[8]。城市高温不仅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因素改变城市微气候^[9],

收稿日期: 2023-08-01 修订日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(52078475)

第一作者: 郝学军(1968—),男,汉族,河北成安人,硕士,教授。研究方向:暖通空调。E-mail:1620143510@qq.com。

* 通信作者: 周海珠(1983—),男,汉族,山东郓城人,博士,高级工程师。研究方向:暖通空调。E-mail:zhzhnm@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

还会提高城市居民的患病风险,增加心脏疾病和呼吸系统疾病的发病率^[10-11],使城市居民的死亡率和患病率明显上升^[12-13]。在城市气候研究中发现,除与城郊区独有的热岛效应以外,城市气候效应还有干岛效应、湿岛效应、雨岛效应和混浊岛效应^[14-15]。“五岛效应”造成各种异常城市气象,如暖冬、暴雨以及大气环境的污染等等,并且呈现逐年增加的趋势^[16-17]。

针对城市热岛对城市热环境带来的各类潜在危害,大量研究人员都提出了不同的降低城市热岛强度的措施。目前,城市热岛的缓减措施主要分为:优化城市土地利用,包括城市规划设计的优化^[18-19];增加地表上的植被覆盖,如屋顶和道路绿化,建设城市公园等^[20-21];增加城市建筑表面的反照率,如屋顶或建筑立面采用新型材料或浅色喷涂等^[22-24];减少人为热,包括建筑能耗、交通能耗和工业能耗^[25-26]。

当前在对城市热岛效应的研究中,其主要问题或研究热点集中了特殊城市热岛效应、复合热岛效应、热岛与污染物传播、热岛与城市能耗4个方面^[3]。目前,已经有很多文献报道了世界各地主要大陆内部的诸多城市的热岛现象,并对其形成机理和减缓措施提出了讨论。但对于沿海、多山、高原等城市具有其独特的本地气候特性的城市,热岛效应还需要进一步研究^[27]。当今世界的城市化发展,许多地方出现了城市群,热岛环流效应相互影响^[28-29]。此时,城市的气温、湿度、大气污染物等不仅与本地建筑和布局等因素有关,还与周围城市的热岛效应有很大的相关。城市中的交通工具、居民或工业都会产生大量的污染物和温室气体,城市热岛效应对城市污染物传播产生了重要影响^[30]。蒋子琪等^[31]利用地温、气温、气溶胶光学厚度、PM_{2.5}数据,基于空间耦合性分析和归因量化估算方法,对2003—2020年西安市辐射效应下地表/冠层城市热岛效应与大气/近地表城市污岛效应相互作用及影响机制进行研究。随着模拟工具和能源系统的升级,城市热岛与建筑能源之间的研究将成为一个越来越重要的学术问题^[32]。Magli等^[33]分析了城市热岛现象对建筑能耗的各种影响因素,包括太阳辐射、植物蒸腾作用和建筑物的反馈。

1 热岛效应研究方法

街谷热岛效应的研究对象本身具有复杂性和差异性,如工业化、气候背景、发展程度及地域空间的复杂性,这些特性均会影响城市街谷热岛效应的作用效果,难以建立准确的街谷热环境定量关系模

型。因此,在对城市热岛进行研究时,必须确定研究尺度,再确定具体的研究方法或策略^[34]。通过梳理中外对城市风热环境研究的相关文献,总结了不同方法的相应成果,详细阐述了在街谷尺度上热岛效应的影响因素、范围以及机制。

1.1 数据实测法

数据实测法主要方式有^[35]:现场直接测量和远程热感方法。两种方式的测试方法及优缺点如表1^[22,26,36-53]所示。现场直接测量方法是最早采用的一种可直接反映热岛强度的方法,多年来,这种方法被普遍应用于各类城市热岛的研究中^[54-57]。20世纪70年代,学者们开始将现场测试方法应用于单体建筑和建筑群的风热环境特性的研究,包括温度、风速、湍流脉动和污染物程度在内的其他参数都会被同时进行监测^[58-60]。但由于直接测量方法中观测点的数量和天气状况会对测量结果产生影响,须在数据处理方法上加以区分^[44,61]。根据周露^[62]对多年城市气象数据的研究指出,城市热岛强度与风速、云量和昼夜密切相关。城市热岛的影响可推广到更宽广的范围,郑培鑫等^[63]综合分析多地的气象站观测记录,研究了城市热岛现象对更广范围的温度序列的影响。蒙泳君等^[64]选取通过热环境实测方法,分析了不同尺度中庭空间的热环境分布状况。

随着测量技术的进步,卫星遥感热波段的数据也被吸纳到数据实测法之中进行使用,如反演地表温度(land surface temperature, LST)被用于宏观监测街谷热岛强度的动态变化和空间分布^[65-67]。此后,遥感技术广受青睐,基于遥感数据资料可对城市热环境及其和地表特性关系开展研究;利用 AVHRR (advanced very high resolution radiometer)、Landsat^[68-70]等影像,再结合土地覆盖类型数据,可用于评估地表温度的空间变化及热力场分布特征。此外,随着无人机技术的日趋成熟,无人机设备在各个领域中的应用也逐渐增多。利用无人机热红外相机采集高分辨率可见光和热红外图像,可精细化探测典型地热区的形态和特点^[52]。近年来, Landsat/TM (thematic mapper) 以及 Terra/ASTER (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer) 技术发展出了较高的空间分辨率,其热红外数据获得中外学者的广泛关注,可为详细分析城市内部热场结构提供先进的手段^[68-69, 71]。基于遥感的地表温度反演方法主要有:辐射传输方程法^[72]、单窗算法^[73]和分裂窗算法^[74]。地表温度的变化特征与遥感观测数据被用于研究城市能量平衡,城市的温度空间变化与地表特征因子(如天穹可

表 1 数据实测法分类及优缺点概述^[22,26,36-53]

Table 1 Classification, advantages and disadvantages of data measurement method^[22,26,36-53]

主要研究方法	方法概述	优点	缺点	适用范围及研究成果
采用现场直接测量	移动监测设备	使用携带气象数据传感器和数据采集器的移动交通工具获取数据	真实准确地收集研究区周围环境的第一手资料、观测所需的设备数量少、灵活性高 ^[36-37]	观测数据受时间同步限制,不利于分析比较,仪器易受移动交通工具、外部环境条件等影响,受人力、物力条件制约 ^[38]
	定点/气象站观测	通过研究区附近的气象站点获得数据,或通过使用便携式气象站等获得研究区数据,包括水平观测和垂直观测 ^[42]	检测数据的种类和完整度高、观测时间尺度较长、可自动设定测量时间步长,节约人力 ^[42]	对建筑周围风场特征和热环境基本的了解 ^[39-41] 。用于研究城市热岛的时空变化规律 ^[36] 。
远程热感方法	航空遥感	采用卫星、空中装置或航空器来远程感知地表面温度 ^[43]	获得数据的分辨率高、可避免不良天气的影响 ^[43]	成本较高、不能获得静态的城市表面图像、远程观察到的表面温度与城市环境中的空气温度有较大的不同
		采用微小型无人机搭载高精度红外热成像设备进行地面精细化测温 ^[52]	可进行地面精细化测温,且成本较低,灵活性较高,可以快速传回数据,获得更为精细、准确的数据	技术难度高,操作复杂,成本较高
	地面遥感	使用红外成像仪等设备进行地面温度检测 ^[53]	成本低、操作简单、红外成像精度高、可获得地面温度的实时动态信息 ^[53]	受时间同步限制性、难以获取大范围的数据

见度、街谷形态、地表材料以及归一化植被指数)^[75]都有着密不可分的关系。相较于直接测量大气温度,遥感地表温度更能准确地监测城市热岛强度与分布情况,修正城市因素对大气温度的影响,进一步揭示地表温度与大气温度的关系。

1.2 缩小比例模型法

缩小比例模型法是一种采用小规模实验研究的方法^[76],主要是通过仿制实际城市街区缩小比例的模型,开展风洞或室外环境实验研究^[77-78]。缩小尺寸模型法对选择关键的边界条件参数有很大意义,可将无意义的无量纲数筛选出去,并且可以确定某些阈值条件来减少无关准则数的影响。大气边界层的风洞模拟是可靠性较高的预测方法。风洞实验通常采用热线或热膜技术^[79]、脉冲热线技术^[80]、探针技术^[81]、激光多普勒风速仪(laser-doppler anemometry, LDA)^[82]、粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)^[83]等测量方法。其中,LDA、PIV 技术可以进行三维实时监测,测量容易并精确,可以控制和复现经常改变的自然条

件;但其成本昂贵,且激光易受缩尺模型遮挡^[84]。此外,在风洞试验中调节入流速度、自由出流等边界条件来仿真实际环境,形成不同的热流分层现象也是相当费时费力。在研究城市热岛时,此方法通常只能被用于研究城市局部区域,即研究中尺度的热岛效应^[85]。对于大规模、建筑结构复杂的城市热岛时空变化,这种方法并不适用。在城市风热环境的研究中,风洞试验已被确定在城市街区尺度上具有适用性^[86],并且在街谷区域内建筑形态和风速关系的研究中,风洞实验也证明了同样的容积率和建筑密度下,高层公寓的平均风速都高于独立式住宅的结构^[87]。日本学者通过风洞实验评估了热力效应下的街谷内小区人行高度风环境^[88]。杨瑛等^[89]基于大尺寸风洞,对不同热力条件下的平均风进行试验研究,获取了热力条件下典型测点的相关性系数。对于地形复杂和风场特性特殊的研究地区,风洞试验可适用于了解海岛的风热环境特性^[85]。郑肖楠等^[90]通过风洞试验对群体建筑表面风荷载进行测验,研究副塔和裙房表面风荷载的变化规律。

1.3 数值模拟法

随着数学建模和数值计算技术的提高,数值模拟方法逐步成为当前学术研究的主流方法,最常用的模型为城市冠层模型和 CFD (computational fluid dynamics) 模型。

城市冠层模型是以两个相对的建筑所形成的街谷来建立能量守恒方程的,在城市冠层模型中,所研究的区域控制体的能量收支参数化处理时考虑了城市表面辐射换热、人为热、湍流流动的潜热和显热换热,各元素的储热和城市表面的水平对流换热的影响,如图 1 所示。在模型的控制体内,能量收支平衡可总结为式(1)。控制体内能量收支平衡基本方程为

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

式(1)中: Q^* 为净辐射热通量, W/m^2 ; Q_F 为人为产热, W/m^2 ; Q_H 为显热通量, W/m^2 ; Q_E 为潜热通量, W/m^2 ; ΔQ_S 为净储热通量, W/m^2 ; ΔQ_A 为净对流热通量, W/m^2 。

净辐射热通量 Q^* 可通过一个面到面的辐射模型来简化,如图 2 所示。

该模型考虑了城市冠层内各表面的热交换过程和空气温度的变化。在城市冠层模型中,可根据

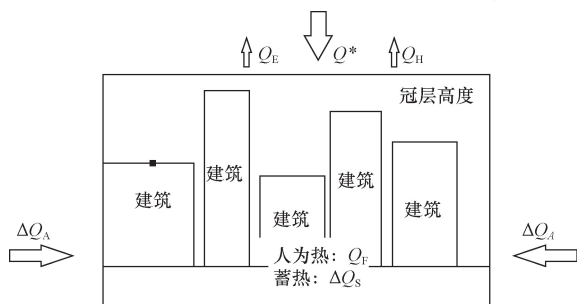


图1 能量平衡收支图

Fig. 1 Energy balance budget diagram

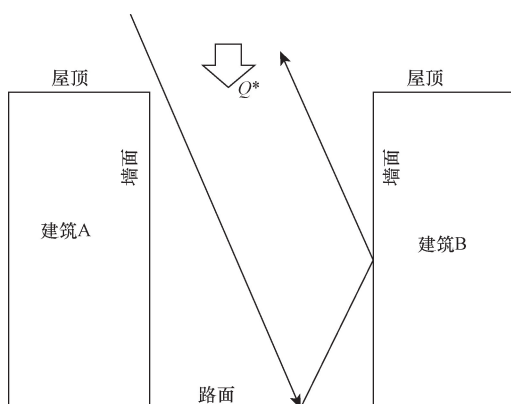


图2 街谷中各表面辐射收支平衡

Fig. 2 Radiation budget balance of each surface in the street valley

实际研究的需要,分别建立一维、二维和三维的空间模型。一般来说,前期研究主要考虑了街谷高度方向和宽度方向的参数变化^[1, 91-94],属于一维或二维模型。近年来,三维模型也越来越多被采用^[95-97]。城市冠层模型的特点是计算速度很快,对有较大建筑规模或能量消耗的城市,进行简化处理后的模型具有可接受的准确度。城市冠层模型的最大不足是缺乏空气速度场的模拟,而实际速度场对研究街谷内气流流型效应极为重要,且对大气气候(降水或分层)及热流量都有很大影响^[98];而根据经验公式假设的空气流动状况往往不能反映街谷内实际速度场与温度场的耦合作用,不适用模拟快速变化的动态热岛效应。因此,在各类城市冠层模型中,往往采用对数律或指数律来假设空气流动速度分布,从而改善能量守恒方程的计算结果。

与城市冠层模型不同,CFD模型可同时解决速度场和温度场的耦合计算问题。CFD模型守恒控制方程中包括质量、动量、位温和空气组分等多个参数^[99-103]。因此,与城市冠层模型相比,CFD模型往往可以得到更为精确的热岛分布信息。在计算技术上,CFD模型须通过大量的控制体或节点来进行计算,其主要困难是物理过程在时间和空间尺度上的匹配。因此,采用CFD模型需确定研究问题的尺度。

CFD模型可分为中尺度模型和微观尺度模型。中尺度模型的关键就是对行星边界层的假设,包括与城市热岛有重要相关性的速度场、温度场和湍流场的物理过程^[104];积云和太阳辐射的相互作用也必须考虑进中尺度模型中^[105]。微观尺度模型采用的CFD计算只需要求解表面层的守恒方程^[106-112]。由于微观尺度模型对具体的城市建筑尺寸细节数据要求太多,所以不适宜推广到整个城市的热岛效应计算。为了解决跨尺度的城市热岛效应模拟问题,尹金方等^[113]提出了一种基于坐标系转换的新方法,用于处理微尺度的CFD模型来升级尺度解决中尺度的城市热岛对流问题。俞布^[114]求解了弱风速条件下的多尺度城市热岛环流问题。

采用中尺度模型来考虑大气分层效应时,对N-S(Navier-Stokes)方程的处理有两种方式:静水压力平衡和非静水压力平衡。采用静水压力平衡时,垂直方向上的运动方程可简化为空气浮力和压力项的平衡方程;采用非静水压力平衡时,垂直方向上的运动方程将是采用全项包含在内的Navier-Stokes方程。由于后者的求解难度大幅增加,当前热岛研究的模型中,多数研究采用的是静水压力平衡^[100-101, 115]。

不能准确地处理湍流流态是CFD模拟的一个

重要弱点,CFD 模拟方法主要有:直接数值模拟、大涡模拟与 Reynolds 时均方程(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)模型。直接模拟需同时解决整个范围的空间和时间尺度的湍流,要求计算机拥有很高的分辨率,所以目前只有少数拥有超级计算机的研究人员对此进行研究;大涡模拟对计算机要求仍然比较高,近年来其研究和应用趋于广泛,但对一般的工程应用来说,时间与计算机资源占用仍然过大,成本过高。RANS 相较于前两种是使用最广泛的方法,其求解均化的 N-S 方程,将瞬态的脉动量通过某种模型在时均化的方程体现出来,其中, k - ε 和 k - ω 格式最为常用^[116-117], k - ε 模型是 RANS 下的两方程模型,求解湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的关系, k - ω 模型类似于 k - ε 模型,不过它求解的是动能耗散的具体速率 ω ,它比 k - ε 模型的非线性程度更大,因此更加难以收敛,并且对于解的初始猜测值相当敏感。但两种格式尾迹区域模拟结果不好^[118]。此外,对湍流中大涡旋的尺度选择,也会严重影响 RANS 的计算结果。文献^[119-120]中给出了一些可靠的 k - ε 格式 CFD 模型。在中尺度模型中,湍流处理的重点是考虑浮力效应。近年来,各类的湍流格式,包括标准的 k - ω 和 k - ε 格式及混合格式 k - ω 都在热岛研究中有所应用^[121-123]。

在模拟研究中,一种中尺度的天气预报模式(weather research and forecasting, WRF)也被应用于城市的风热环境研究,其模拟结果通常可作为 CFD 数值模拟的边界条件,继而开展城市区域的风热环境研究^[124]。WRF 模式的好处在于可结合不同土地利用类型数据搭建模型,研究热岛效应的历史演变与发展趋势^[125],直观地展示城市气象要素水平和垂直的时空分布影响^[126],为后续的定量分析提供数据支撑。WRF-UCM(weather research and forecasting model-urban canopy model)模式下的遥感数据资料可作为数值模拟的边界条件,探讨城市化对热岛效应强度的影响机制^[127],模拟过程中可以通过改变边界条件再进行敏感性分析得出热岛效应的有效的缓解措施。

2 街谷热岛效应

2.1 街谷模型的建立

城市街道是城区的重要组成部分。街道路面和两侧的建筑群构成了街谷。街谷作为城市居民户外活动空间的重要部分,其良好的物理环境是提高室外行人舒适度、增强城市活力的重要前提条件^[128]。了解和掌握城市街谷风热环境,在营造良好城市微气候、缓解城市空气污染、改善建筑新风

品质、降低建筑能耗以及保障行人健康和安全等方面具有重要的学术意义。

导致热岛现象形成的因素非常复杂,这些因素的尺度差距很大^[129]。根据城市热岛效应的特点,研究对象在水平空间尺度的划分主要包括宏观尺度、中尺度和微观尺度。宏观尺度主要面向城市的气候效应和城市热岛环流等过程,关注城市下垫面对大气的影响^[130];中尺度研究主要讨论城市冠层内部的空气流动、热量传递等过程^[131],即街谷内的城市风、热环境;微观尺度则主要研究单体建筑的表面特性,如热性质、几何尺寸和辐射特性及建筑群落形成的局地环境气候。研究城市热岛现象往往需要同时整合这些不同尺度的因素。然而,目前还没有一种普遍可行的方法^[132-133]。宏观尺度的热岛效应研究范围过于庞大,实验数据难以全面覆盖,在模拟中难以准确的表述;而微观尺度又过于单一。中尺度研究则包括了城市中影响热岛效应的大部分因素,既缩小了研究范围,又具有代表性,对城市规划、改善微气候环境有重要的参考价值。在中尺度研究中,认为道路布局、建筑构造等几何条件及下垫面^[127,134]、建筑材料^[135]的物理性质对于城市冠层内部热环境的形成具有重要作用,其参数将被作为边界条件来模拟分析街谷的空气温度^[136]、风环境^[137]、建筑表面温度^[138]、街道表面温度^[139]等。街谷热岛效应的研究主要集中在建筑的空间形态^[140]、建筑群规划布局^[22]、城市通风情况、下垫面性质^[129]、街道植物配置^[141]等方面,同时对于单体建筑还需要考虑建筑结构^[130]、建筑表面特性等因素的影响。

研究街谷热岛效应时,按照能量和动量的参数处理方式,可将模型分为单层(single-layer) UCM(urban canopy model)模型、多层(multiple-layer) UCM 模型和表面层(surface-layer) UCM 模型。由于表面层模型使用范围受限,只介绍单层和多层城市冠层模型。

单层模型中建筑物会被采用对称、有限长度等二维处理方法,但辐射计算依然会采用三维方式。在多层模型中,建筑物会被采用对称、有限长度、高度方向变化的三处理维方法,精度会显著提高,但参数化处理和计算难度会增加。当区域内的建筑物高度差异性不大时,宜采用单层模型,既可以获得较高的精度,又能够降低计算难度。

2.2 街谷热岛效应的影响因素

街谷热岛效应受地形、下垫面表面性质、植被与水体、城市规划布局影响。基于城市热岛效应的各类研究方法,探究其影响因素的量化指标如表 2^[142-150]所示。

表 2 影响因素的评价指标和量化结果^[142-150]

Table 2 Evaluation indicators and quantitative results of influencing factors^[142-150]

影响因素	评价指标	量化结果
表面特性	归一化建筑指数 NDBI	增加 0.1,地表温度增加 2.85 ℃ ^[142]
	归一化植被指数 NDVI	增加 0.1,地表温度降低约 1.72 ℃ ^[142]
	归一化水体指数 NDEI	增加 0.1,地表温度降低约 1.56 ℃ ^[142]
	地表材料反射率	每提高 10%,空气温度可降低 0.75 ℃ ^[143]
地理形态	地表高程值	平均每增高 100 m,地表温度值下降约 0.925 ℃(黄河地区) ^[144]
植物配置	乔木率	每增加 10%,热岛强度可降低 0.3 ℃ ^[145]
	郁闭度	每增加 1%,空气温度可降低 0.14 ℃ ^[146]
	城市绿化覆盖率	达到 33% 时可降低空气温度 1 ℃ ^[147]
规划布局	天穹开阔度 SVF	和大气温度的相关性,相关系数 0.33 ^[148]
	街谷高宽比 H/W	当街道高宽比为 1.0 时,路面(墙体)反射率从 0.15 提高至 0.65,街谷反射率从 0.15 升高至 0.35 ^[149]
		街谷高宽比增加一个数值,WBGT(湿球黑球温度指数)降低约 1 ℃,热岛强度则降低约 1.3 ℃ ^[140]
	地块总架空率	单体建筑的首层架空率为 50% 时,将使整个街区的总体架空率提高 22.5%,进而引起热岛强度下降 0.03 ℃ ^[148]
	迎风面指数	与空间地表温度的白天相关系数为 0.371,夜间为 0.335,但这种线性关系可能受其他因素影响并不绝对 ^[150]

2.2.1 地形及下垫面性质

地形和下垫面对热岛效应的影响是分区域的:在城市中,下垫面表面通常是以显热排放为主,而郊区则表现为潜热作用占主导;城市地表储热以及空调废热在夜晚会被释放到大气中,这也是城市热岛形成的一个重要原因^[134, 151]。辐射热量的收支影响着地表储热量,有研究发现辐射收支各分量日总量在不同纬度和不同季节随坡度(对坡地)或地形遮蔽的正交可蔽视角(对谷地) α 的变化而变化^[152]。并且,热岛效应与城市面积增加、地表面自然环境变化都存在关系^[153]。成都平原内 17 年内不透水面面积增加 763.33 km²,强热岛面积同时增加了 610 km²,面积增加量相近^[127];而对于多山地区,城市热岛效应往往与地面高程存在着负相关关系:海拔越高,温度越低,热景观的破碎程度也就越高;在海拔较低的平原低洼地区温度较低,热景观破碎程度也较低^[129]。对于地形复杂的新疆,LST(land surface temperature)总体分布情况与山脉及盆地走向保持高度相关性,呈现出显著的相间分布特点^[154]。康紫薇等^[154]分析了年际时空变化特征、季节时空变化特征及季节时空变化特征,但数据的离散程度较高。此外,地表热场与城市建筑用地面积、植被覆盖度都存在较为密切的关系,城市不透水面面积增加时,往往会导致强热岛面积增加^[155],沥青路面热反射涂层性质对热岛强度也有一定的影响^[156]。从多元线性回归模型建立的结果发现,如果区域有 10% 的不透水面转为植被,地表温度将下降约 1 ℃;如果区域有 10% 的不透水面转为水体,地表温度将下降约 1.5 ℃^[157]。

2.2.2 植被与水体

地表温度与植被覆盖度之间具有非常显著的负相关关系,城市绿化作用下的植被面积增长有助于缓解城市整体热岛效应^[158-159]。郑文亨等^[160]通过非线性拟合和正交试验研究步道高宽比、植物排布形式和乔木冠层尺寸对微气候的贡献度关系。通常情况下,绿地化程度与热岛效应的降低效果成正比,乔木率每增加 10%,热岛强度可降低 0.3 ℃^[145]。殷若晨等^[161]也得出相似的结论:绿化程度较高的城市公园能够在 90 m 范围内产生显著的降温作用,最大降温范围可达 500 m。植被与水体反映的是土地覆盖类型,为了研究热岛效应与土地覆盖类型的关系,通常会将建筑指数和植被指数进行归一化处理^[162]。研究表明,归一化后建筑指数(normalized difference built-up index, NDBI)所引起的升温效果大于归一化后植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)所带来的降温效果^[162]。因此,增加城市的绿地覆盖率和水体面积可有限缓解城市热岛效应;对于规模大于 3 hm² 且绿化覆盖率达到 60% 以上的集中绿地,其内部的热辐射强度会明显降低^[163]。北京地区数据显示:NDVI、植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)、植被覆盖度(modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)、植被覆盖度(green normalized difference vegetation index, GNDVI)及植被覆盖度(ratio vegetation index, RVI)均与地表温度呈负相关关系,其中,FV 的相关系数最大,RVI 最小^[164],不同地区地表温度与植被遥感指数之间的关系不同,还需进一步探讨。

2.2.3 街谷的规划设计

在城市形态几何因素的研究中发现,城市的几何形态对缓城市热岛效应的起着重要作用^[148]。随着高宽比 H/W 的增加,气流速度会更加缓慢^[165];在天穹开阔度(sky view factor, SVF)较小、 H/W 较大的区域,环境温度更低,且温度受 SVF 的影响更大。同一街道类型的热环境与该街谷中 SVF 呈线性相关;当人行道上的 SVF 相同时,建筑阴影提供的降温效率更高^[166]。街谷朝向对墙体的太阳辐射量也存在显著影响:在夏季,朝向 N-S(东西向街道)的建筑墙体可降低太阳能辐射照度,而在冬季则正好相反。Pearlmutter 等^[167]将街谷内详尽的观测数据(风向、风速、温度、太阳辐射以及表面温度等)与人体表面能量平衡模式相结合,分析街谷因子与人体舒适度之间的关系。Johansson^[168]通过收集摩洛哥菲斯市城的系列数据,比较并分析城市形态参数(建筑高度、朝向、间距、街谷高宽比等)与微气候参数(如气温、湿度、风速等)之间的关系,发现较大长宽比的街谷空间能在外部空间温度过高时,保证街谷内部的微气候质量。通过多元线性回归分析验证高/中/低强度城市片区中街谷平均空气温度变化率(ATCR)与建筑密度、容积率、街谷高宽比、平均天空可视率、植被覆盖率、不透水地面率存在着显著的线性关系^[169]。

2.2.4 街谷的风环境

文献^[170]选取 2017 年上海市典型城市和乡村进行逐时气象观测,发现城市热岛效应有明显的日变化规律:晴朗微风或者静风条件最有利于城市热岛的形成,城市热岛强度最高可达 7℃。Okeil^[171]研究发现,当街谷风向为平行或垂直流向时,街区内的高层建筑有助于提高风速,降低城市中心的热岛效应。在城市街谷风热环境的研究中,檀姊静^[172]研究发现,街谷表面热力作用与来流动力作用方向呈现出一定的规律,影响街谷内涡旋结构。当风速大于 2 m/s 时,街道高宽比为 1.5 的街谷内将形成稳定的顺时针涡旋^[173]。当城市开放空间(特别是绿地体系)遭到连续性破坏,导致城市外部的气流难以顺畅地进入城市内部,造成整体通风能力减弱,使城市风环境受损^[174]。Meng 等^[175]通过采集气象站的数据,研究了西安古城不同 U 形街谷周围的风热环境,并对行人水平的空气质量进行了现场评估。

2.2.5 街谷的植物配置

带状绿地有降温增湿的作用,不同空间结构类型道路带状绿地的温湿度效应不同^[176],其降温幅度可达 2.19 ~ 3.87℃,增湿幅度可为 6.95% ~ 11.25%。其中,4 种空间结构类型带状绿地在降温

增湿方面的作用大小为:乔灌木 > 乔木广场 > 草坪 > 硬化广场。朱春阳等^[177]研究发现,草坪的降温增湿效应不显著,灌-草、乔-草和乔-灌-草绿地的降温增湿效果相对显著;当郁闭度超过 44% 时,绿地的降温增湿效果开始显著;当郁闭度超过 67% 时,绿地的降温增湿效果趋于稳定。曹利娟等^[178]通过数值模拟的方法分析了绿化对热环境的影响,发现优化植物配置类型对改善热环境的效果最好,其次是增加绿化面积;但其对于中高层小区的热环境屋顶绿化改善效果不佳。

2.2.6 建筑表面特性及建筑能耗

对建筑能耗量化影响的研究表明^[179],开敞型街区的建筑总冷负荷要比紧凑型街区的更低,紧凑型街区的空间形态不利于降低建筑总冷负荷;居住建筑冷负荷对街区空间形态变化的敏感性更强,利用 WRF 系统模拟了建筑围护结构热工性能对城市热岛强度的影响,发现当建筑围护结构传热系数减小时,日间和夜间气温分别可降低约 0.15 K 和 0.61 K;当建筑屋面反照率由 0.2 增至 0.6 时,屋面温度最大降幅为 5.50 K,近地面气温可降低 0.15 K^[180]。付艳鹏^[181]构建了沈阳市局地气候分区地图,分析了当地气候分区空间分布特征,研究发现居住建筑年累计能耗值大小有明显区别;高能耗的区域主要分布在市中心四环之内的东部地区,具有极高的热岛强度趋势。曾宪策^[182]对岭南地区气候适应性进行研究,发现可通过采用控制建筑高宽比例、减小建筑进深、建筑底部进行全部或局部架空、建筑形体的中部或高部开洞等措施,来提升该地区集约型教学建筑空间的气候适应性。

3 不足与展望

不同尺度规模下的已知理论和模型,对城市热岛现象的分析仍然缺乏完备性。在研究范围上,学者们往往对街谷内的各影响因素进行着重分析,未能考虑街谷周边的影响因子,在后续的研究中应将外部因素与内部因素进行耦合研究,深入理解宏观尺度上热岛效应的影响机制。在研究方法上,先前的研究多采用单一尺度,但城市热岛现象的形成是一系列复杂因素造成的,这些因素的尺度差距很大。因此,未来应探索一种能够整合各尺度因素的城市热岛研究方法,同时,在选用模型的边界条件时,应与现有的精准监测系统与预测模型相结合。通过数值模拟的方法对街谷热岛效应的影响因素进行敏感性分析,深入了解各类影响因子的相互作用机制,进而从建筑布局规划、城市景观绿化等多个方面进行优化设计。在评价方法上,学者的研究目的多数是针对城市规划

提出优化方案,应加强对室外人体热舒适性的探讨。基于以上不足,针对目前研究城市街谷热岛领域的研究现状提出4点建议。

3.1 结合街谷外部影响因素的统计分析模型研究

在近地面尺度上,街谷热岛效应的研究多集中于街谷内部因子的物理性质和建筑规划布局。除此之外,目前热岛效应的研究还缺乏空气动力学、城市气候效应以及自然人文多维因子对热环境的影响路径分析。未来还需在街谷热岛效应的研究中拓展城市气候效应研究的时空范围、探索城市气候效应的相互作用和机理。在街谷热岛效应研究时应深入研究城市化对气候变化的反馈,系统研究气候变化对街谷热岛效应的影响机制,包括城市气候效应的季节性变化、局地天气气候条件、城市化进程等多方面。同时,在技术方面应加强室外空气温度的监测评估技术研究,在城市气候效应研究的方法和技术等方面取得进展和突破,集成利用卫星遥感、地理信息系统、对比观测试验,并开发新一代的地基、空基和天基相结合的立体观测系统,开展各种城市气候效应长期演变及其驱动机制的定量分析和耦合研究。利用各类影响因素的参数监测数据,通过统计模型拟合影响因素与街谷热岛效应的统计关系,揭示城市热环境的主要影响因素并量化其直接和间接效应,能更有效地缓解街谷尺度下的热岛效应。

3.2 与地面或数据实测相结合的数值模拟研究

明晰城市热岛效应相关概念内涵、厘清其定量刻画方法是有效开展热岛效应研究的重要基础。未来研究应整合多维度数据以突破单一地表城市热岛监测途径,发展大尺度地表城市热岛定量刻画方法以拓展定量研究的广度,认知连通化地表城市热岛空间形态以挖掘范围识别研究的深度。数值模型模拟通过数学和力学模型,在一定程度上能够解释街谷风热环境影响下一定范围内的城市热岛效应作用机制,但跨尺度综合分析需要一个包含城市地形、地貌、人工建筑等几乎所有城市内部细节的详细数据库。其模拟结果受输入边界条件及计算范围的影响较大,未来可通过地面观测、遥感监测及数值模式模拟的研究手段,利用不同时相的遥感热红外数据来获取不同年份、不同季节、不同月份的地面温度数据,以形成一个完整的时间序列,结合当地的气候特征,制定一份“城市环境气候图”,同时提高各种模型的分辨率与精度,准确的量化分析城市街谷热岛效应的影响机制研究,从而为城市街谷的规划设计提供科学的理论依据和设计指引。为城市规划人员、建筑师提供一个进行城市

或建筑设计规划时的参考工具。

3.3 进行城市热岛预测模型的扩展研究

对于整个城区大尺度的城市热岛效应研究,可通过街区尺度下多条城市街谷相互连接的方式进行整合研究。城市热岛在街道内的气温分布具有“气流通道”的特点,郊区空气可通过街道向城市内部快速扩散,这种通过街道的郊区和市区的空气混合可有效降低城市热岛强度。基于基尔霍夫定律街谷网络节点法来计算多条街谷相互影响时城市局部区域的热岛效应,可对街区尺度下的城市热岛效应进行快速的数值模拟。这种方法可有效考虑多条街谷在连接点处的水平通量分配,对区域内有不同朝向和拓扑连接结构的街谷网络进行更快速准确的数值模拟,街谷网络节点法可为城市冠层模型将单条街谷模拟扩展到多条街谷提供了解决方案。利用街谷网络节点法,可进一步提出街谷网络结构、街区网络结构、城区网络结构,形成3个不同尺度的城市热岛模型,互为边界条件,解决不同尺度的扩展和嵌套研究问题。

3.4 室外热舒适性的提升诉求与城市微更新的形式相结合

随着城市化进程加速,城市夏季气温明显升高,炎热天气和极端热应激的持续时间变长和频率增加。随着人们对美好生活品质的向往愈发强烈,从提高微气候舒适性的角度出发,应将室外热舒适性的评价标准与城市微更新的形式相结合。当前大量关于热岛效应的研究发现,街谷因子是影响热岛效应的重要因素之一,街谷形态几何因子、下垫面性质、通风情况等是交互作用和影响的,会在不同程度上对街谷室外热舒适性产生影响。这些因素间的差异构成了各不相同的区域微气候与热环境。未来可对街谷热环境进行人体热舒适性评价分析,通过相关性分析、回归分析等方法对影响城市街谷热环境与人体热舒适的相关空间形态指标进行筛选。量化描述相关影响因子和它们之间的关系,采取城市形态的经典分析方法,系统性地分解城市的空间形体要素,利用气候学、建筑物理等多样化理论和技术,结合不同街谷现状构建模型,探讨街谷空间形态要素对街谷热环境的影响机制,从规划应用层面确定适用于不同地区街谷空间形态的优化策略;结合可持续发展领域和人体热舒适性评价标准,在提高人体舒适度的同时,进一步拓展城市形态的理论与实践研究,为城市热岛效应的气候规划提供理论指导。

4 结论

通过梳理中外相关研究文献,详细分析了关于

热岛效应的研究方法、内容及结论。通过对现有的评价指标进行梳理,并对热岛效应的各影响因素进行量化总结。最后对于现有的街谷热岛研究在技术、范围、方法、和评价方面提出未来趋势展望。可为城市热岛效应提供明确的研究方向和指导意见,为尽快实现国家“双碳”战略目标提供重要的参考依据和理论支撑。

参考文献

- [1] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24.
- [2] 任玉玉, 任国玉, 张爱英. 城市化对地面气温变化趋势影响研究综述[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1301-1310.
Ren Yuyu, Ren Guoyu, Zhang Aiyang. A review of the impact of urbanization on the change trend of surface temperature[J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1301-1310.
- [3] 连欣欣, 刘兴沼. 基于 CiteSpace 的城市热岛研究进展与热点分析[J]. 四川建筑, 2021, 41(2): 20-23.
Lian Xinxin, Liu Xingzhao. Research progress and hotspot analysis of urban heat island based on CiteSpace[J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(2): 20-23.
- [4] Pachauri R K. Climate change 2007: synthesis report contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Speculum, 2007, 77(2): 586-588.
- [5] Uk P S. Climate change 2014: mitigation of climate change, contribution of working group III to the fifth assessment report of the IPCC [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2007.
- [6] Asimakopoulou D A, Santamouris M, Farrou I, et al. Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century[J]. Energy & Buildings, 2012, 49: 488-498.
- [7] Kapsomenakis J, Kolokotsa D, Nikolaou T, et al. Forty years increase of the air ambient temperature in Greece: the impact on buildings[J]. Energy Conversion Management, 2013, 74: 353-365.
- [8] 李外宾, 汤军, 高贤君, 等. 石家庄市主城区热岛特征及变化分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11858-11867.
Li Wailbin, Tang Jun, Gao Xianjun, et al. Analysis of heat island characteristics and changes in the main urban area of Shijiazhuang [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11858-11867.
- [9] 米晓楠, 白林燕, 赵永强, 等. 基于多源卫星资料的太原市城市热岛效应分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13650-13658.
Mi Xiaonan, Bai Linyan, Zhao Yongqiang, et al. Analysis of urban heat island effect in Taiyuan City based on multi-source satellite data [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(32): 13650-13658.
- [10] Curriero F C, Heiner K S, Samet J M, et al. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States[J]. American Journal of Epidemiology, 2002, 155: DOI: 10.1093/aje/155.1.80.
- [11] Giuseppe M, Ugo F, Cristiana V, et al. Pattern and determinants of hospitalization during heat waves: an ecologic study[J]. BMC Public Health, 2007, 7: DOI: 10.1186/1471-2458-7-200.
- [12] Ferreira B, Alfésio L, Zanobetti A, et al. The time course of weather-related deaths[J]. Epidemiology, 2001, 12(6): DOI: 10.1097/00001648-200111000-00014.
- [13] 冯雷, 李旭东. 高温热浪对人类健康影响的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(2): 182-188.
Feng Lei, Li Xudong. Research progress on effects of heat wave on human health[J]. Journal of Environmental Health, 2016, 33(2): 182-188.
- [14] 周淑贞. 上海城市气候中的“五岛”效应[J]. 中国科学(化学), 1988, 1(11): 1226-1234.
Zhou Shuzhen. The “Five Islands” effect in the urban climate of Shanghai[J]. Scientia Sinica(Chimica), Agronomy and Medical Geoscience, 1988, 1(11): 1226-1234.
- [15] 付瑜, 赵红颖, 赵帅阳, 等. 2002—2018 年北京市通州区城市热岛(冷岛)效应时空分异规律及其影响因素[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9509-9520.
Fu Yu, Zhao Hongying, Zhao Shuaiyang, et al. Spatial and temporal variation of urban heat island (cold island) effect and its influencing factors in Tongzhou District, Beijing from 2002 to 2018[J]. Science Technology and Engineering 2020, 20(23): 9509-9520.
- [16] 顾丽华. 南京市城市气候效应的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
Gu Lihua. Study on urban climate effect in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008.
- [17] 顾鸿宇, 许东, 李丹, 等. 地下水对城市地下空间开发的制约及机理[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6533-6545.
Gu Hongyu, Xu Dong, Li Dan, et al. Constraints and mechanisms of groundwater on urban underground space development[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(16): 6533-6545.
- [18] Tan Z, Lau K K L, Ng E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment[J]. Energy & Buildings, 2016, 114: 265-274.
- [19] Wong N H, Jusuf S K, Syafii N I, et al. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption[J]. Solar Energy, 2011, 85(1): 57-71.
- [20] 赵松婷, 李新宇, 刘秀萍, 等. 首都功能核心区城市森林公园冷岛效应评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 857-862.
Zhao Songting, Li Xinyu, Liu Xiuping, et al. Evaluation on cold island effect of urban forest park in the functional core area of capital [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 857-862.
- [21] 周宏轩, 炎欣焯, 李童欣, 等. 基于绿化指标的城市绿地降温效应研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12706-12715.
Zhou Hongxuan, Yan Xinye, Li Tongxin, et al. Research progress of urban green space cooling effect based on greening index[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 12706-12715.
- [22] 张乃心, 杨树文, 张萌生, 等. 彩钢板建筑聚集密度对城市热岛效应影响分析——以兰州市为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2185-2192.
Zhang Naixin, Yang Shuwen, Zhang Mengsheng, et al. Analysis on the influence of concentration density of colored steel plate buildings on urban heat island effect: a case study of Lanzhou City[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2185-2192.
- [23] 栗培龙, 魏晓风, 朱德健, 等. 基于谱图量化的能源相关路面研究热点分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(4): 1610-1616.
Li Peilong, Wei Xiaofeng, Zhu Dejian, et al. Analysis of research

- hotspots of energy-related pavement based on spectral quantification[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(4): 1610-1616.
- [24] 郭良辰,王咏薇,张艳晴. 冷却屋顶对南京夏季高温天气的缓解作用[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(21): 16-23.
Guo Liangchen, Wang Yongwei, Zhang Yanqing. Effect of cooling roof on summer high temperature in Nanjing[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(21): 16-23.
- [25] Kuznik F, David D, Johannes K, et al. A review on phase change materials integrated in building walls[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 379-391.
- [26] Abahri K, Belarbi R, Trabelsi A. Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials[J]. *Building and Environment*, 2010, 46(7): 1354-1360.
- [27] 程迪,王咏薇,刘寿东,等. 1959—2012年夏季珠三角地区高温热浪的时空分布特征及其城市热岛效应的影响分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(1): 273-283.
Cheng Di, Wang Yongwei, Liu Shudong, et al. Spatial and temporal distribution of high temperature and heat waves in the Pearl River Delta region from 1959 to 2012 and its impact on urban heat island effect[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(1): 273-283.
- [28] 李维亮,刘洪利,周秀曦,等. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2003, 1(2): 97-104.
Li Weiliang, Liu Hongli, Zhou Xiuxi, et al. Analysis of the influence of urban heat island and Taihu Lake on local circulation in the Yangtze River Delta[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2003, 1(2): 97-104.
- [29] 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, 1(5): 663-671, 715.
Xu Xiangde, Ding Guo'an, Bian Linggen, et al. Characteristics and influence of atmospheric environment in the boundary layer of urban building communities in BECAPEX scientific experiment[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 1(5): 663-671, 715.
- [30] Doyon B, Bélanger D, Gosselin P. The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Québec, Canada[J]. *International Journal of Health Geographics*, 2008, 7(1): 1-12.
- [31] 蒋子琪,王旭红,冯子豪,等. 西安市热岛效应与污岛效应的相互作用研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(6): 1768-1781.
Jiang Ziqi, Wang Xuhong, Feng Zihao, et al. Study on the interaction between heat island effect and pollution island effect in Xi'an City[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(6): 1768-1781.
- [32] 贺敏杰. 城市热岛效应对居住建筑能耗的影响研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
He Minjie. Study on urban heat island effect on residential building energy consumption[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [33] Magli S, Lodi C, Lombroso L, et al. Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption[J]. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2015, 228: 109878.
- [34] Mirzaei P A, Haghighat F. Approaches to study urban heat island-abilities and limitations[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(2): 413-433.
- [35] 徐振东. 城市热岛效应成因的研究与分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
Xu Zhendong. Research and Analysis on the causes of urban heat island effect[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [36] 李艳红,李智才,周晋红,等. 基于自动站资料的太原城市热岛研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(12): 173-179.
Li Yanhong, Li Zhicai, Zhou Jinhong, et al. Study on urban heat island in Taiyuan based on automatic station data[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(12): 173-179.
- [37] 刘宇峰,原志华,孔伟,等. 1993—2012年西安城区城市热岛效应强度变化趋势及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(6): 974-985.
Liu Yufeng, Yuan Zhihua, Kong Wei, et al. Change trend and influencing factors of urban heat island effect intensity in Xi'an City from 1993 to 2012[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 974-985.
- [38] 张东方. 建筑环境中的有效风能利用研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
Zhang Dongfang. Research on effective wind energy utilization in built environment[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2010.
- [39] 刘海鸿. 基于 CFD 的城市中尺度区域风环境模拟分析及优化策略研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
Liu Haihong. Simulation analysis and optimization strategy of urban mesoscale regional wind environment based on CFD[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [40] Stathopoulos T, Storms R. Wind environmental conditions in passages between buildings[J]. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 1986, 24(1): 19-31.
- [41] Murakami S, Iwasa Y, Morikawa Y. Study on acceptable criteria for assessing wind environment at ground level based on residents' diaries[J]. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 1986, 24(1): 1-18.
- [42] Johansson E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco[J]. *Building & Environment*, 2006, 41(10): 1326-1338.
- [43] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 2009, 64(4): 335-344.
- [44] Santamouris M. Heat island research in Europe: the state of the art[J]. *Advances in Building Energy Research*, 2007, 1(1): 123-150.
- [45] 向炆,周志翔. 蓝绿空间景观格局对城市热岛的影响[J]. *中国园林*, 2023, 39(1): 105-110.
Xiang Yang, Zhou Zhixiang. Effect of blue-green spatial landscape pattern on urban heat island[J]. *Chinese Journal of Landscape Architecture*, 2023, 39(1): 105-110.
- [46] 张乃心,杨树文,付昱凯,等. 兰州市彩钢板建筑时空聚集特征及其对城市热岛效应影响分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(3): 43-49.
Zhang Naixin, Yang Shuwen, Fu Yukai, et al. Spatial and temporal aggregation characteristics of colored steel plate buildings in Lanzhou City and its influence on urban heat island effect[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2022, 38(3): 43-49.
- [47] 赵选. 西安城市热环境效应及绿地缓解作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.

- Zhao Xuan. Study on urban thermal environment effect and mitigation effect of green space in Xi'an [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [48] 张君枝, 梁雅楠, 王冀, 等. 1981—2020年北京城市热岛效应时空特征及其影响因素分析[J]. 大气科学学报, 2023, 1(1): 1-15.
- Zhang Junzhi, Liang Yanan, Wang Ji, et al. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of urban heat island effect in Beijing from 1981 to 2020[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 1(1): 1-15.
- [49] 谢启姣. 武汉城市热岛特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 462-469.
- Xie Qijiao. Characteristics and influencing factors of urban heat island in Wuhan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(3): 462-469.
- [50] 池腾龙, 曾坚, 刘晨. 近30年武汉市热环境格局演化机制及扩散模式研究[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(4): 197-204.
- Chi Tenglong, Zeng Jian, Liu Chen. Study on the evolution mechanism and diffusion model of thermal environment pattern in Wuhan City in recent 30 years[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2017, 29(4): 197-204.
- [51] 杨星卫, 周红妹, 楼萌. 卫星资料在上海浦东新区热力场分析中的应用[J]. 应用气象学报, 1994, 1(3): 369-373.
- Yang Xingwei, Zhou Hongmei, Lou Meng. Application of satellite data to thermal field analysis in Pudong New Area of Shanghai [J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 1(3): 369-373.
- [52] 高彦彦. 基于多源热红外遥感技术的地热探测[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
- Gao Yanyan. Geothermal exploration based on multi-source thermal infrared remote sensing technology[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2022.
- [53] Yang L, Li Y. City ventilation of Hong Kong, China at no-wind conditions[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(19): 3111-3121.
- [54] Deosthali V. Impact of rapid urban growth on heat and moisture islands in Pune City, India[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(17): 2745-2754.
- [55] Kolokotroni M, Giannitsaris I, Watkins R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies [J]. Solar Energy, 2005, 80(4): DOI: 10.3390/en14185799.
- [56] 曾侠, 钱光明, 潘蔚娟. 珠江三角洲城市群城市热岛效应初步研究[J]. 气象, 2004, 1(10): 12-16.
- Zeng Xia, Qian Guangming, Pan Weijuan. A preliminary study on urban heat island effect in the Pearl River Delta[J]. Meteorology, 2004, 1(10): 12-16.
- [57] 郑文亨, 闻旭强, 王嘉琪. 桂北山区乡村民居热环境实测与分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5715-5722.
- Zheng Wenheng, Wen Xuqiang, Wang Jiaqi. Thermal environment measurement and analysis of rural residential buildings in mountainous area of northern Guangxi[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5715-5722.
- [58] Kikagawa Y, Genchi Y, Kondo H, et al. Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning [J]. Applied Energy, 2005, 83(6): 649-668.
- [59] Pigeon G, Zibouche K, Bueno B, et al. Improving the capabilities of the town energy balance model with up-to-date building energy simulation algorithms: an application to a set of representative buildings in Paris[J]. Energy & Buildings, 2014, 76: 1-14.
- [60] Taha H. The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas[J]. Solar Energy, 2013, 91: 358-367.
- [61] Amfield A J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island[J]. 2003, 23(1): DOI: 10.1002/joc.859.
- [62] 周露. 城镇化过程的气候效应及管理系统研发[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- Zhou Lu. Research and development of climate effect and management system in urbanization process [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [63] 郑培鑫, 邓帆, 李志远, 等. 近20年太原城市群热岛演变遥感研究[J/OL]. (2023-06-02) [2023-07-20]. <https://doi.org/10.13451/j.sxu.ns.2023104>.
- Zheng Peixin, Deng Fan, Li Zhiyuan et al. Remote sensing study on heat island evolution in Taiyuan urban agglomeration in recent 20 years [J/OL]. (2023-06-02) [2023-07-20]. <https://doi.org/10.13451/j.sxu.ns.2023104>.
- [64] 蒙泳君, 何江, 赵雪秀, 等. 热湿气候盆地居民不同尺度中庭夏季热环境实测与分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 9035-9042.
- Meng Yongjun, He Jiang, Zhao Xuexiu, et al. Measurement and analysis of summer thermal environment of different scale atriums of residential houses in hot and humid climate basin[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 9035-9042.
- [65] Gravelle C, Mecikalski J, Line W, et al. Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972, 53(7): 69-84.
- [66] 梁萍萍, 刘绥华, 贺中华, 等. 基于地表裸露度和地表反照率影响的喀斯特地区热环境变化分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2376-2383.
- Liang Pingping, Liu Suihua, He Zhonghua, et al. Analysis of thermal environment change in Karst area based on the influence of surface exposure and surface albedo[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6): 2376-2383.
- [67] 伍明飞, 林杰. 基于 Landsat 影像的杭州市主城区地表温度和热岛效应研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10812-10817.
- Wu Mingfei, Lin Jie. Study on land surface temperature and heat island effect in Hangzhou City based on Landsat image[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10812-10817.
- [68] Liu L, Zhang Y. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: a case study in Hong Kong, China[J]. Remote Sensing, 2011, 3(7): 1535-1552.
- [69] Deng C, Wu C. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: a spectral unmixing and thermal mixing approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 262-274.
- [70] Meng F, Shan B, Liu M. Remote-sensing evaluation of the relationship between urban heat islands and urban biophysical descriptors in Jinan, China[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 133-146.
- [71] Meng F, Shan B, Liu M. Remote-sensing evaluation of the rela-

- tionship between urban heat islands and urban biophysical descriptors in Jinan, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083693.
- [72] 罗仁. 城市下垫面地表温度反演方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- Luo Ren. Research on inversion method of urban underlying surface surface temperature[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [73] 金点点, 宫兆宁. 基于 Landsat 系列数据地表温度反演算法对比分析——以齐齐哈尔市辖区为例[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(5): 830-841.
- Jin Diandian, Gong Zhaoning. Comparative analysis of land surface temperature inversion algorithms based on Landsat series data: a case study of Qiqihar municipal district[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(5): 830-841.
- [74] 薛丹, 李成范, 雷鸣, 等. 基于 MODIS 数据的上海市热岛效应的遥感研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013, 36(4): 1-3.
- Xue Dan, Li Chengfan, Lei Ming, et al. Remote sensing research on heat island effect in Shanghai based on MODIS data[J]. *Surveying, Mapping and Spatial Geographic Information*, 2013, 36(4): 1-3.
- [75] 张亮, 蒋军. 基于 MODIS-NDVI 的地表植被时空变化特征及其与环境因子的关系[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(4): 57-63.
- Zhang Liang, Jiang Jun. Spatio-temporal changes of land surface vegetation based on MODIS-NDVI and their relationship with environmental factors[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(4): 57-63.
- [76] Meroney R, Lindley D, Bowen A J. Physical modelling of flow over complex terrain[M]. Amsterdam: Elsevier, 1980.
- [77] Uehara K, Murakami S, Oikawa S, et al. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(10): 1553-1562.
- [78] Flor F S D L, Dominguez S A. Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings[J]. *Energy & Buildings*, 2004, 36(5): 403-413.
- [79] Camp D W, Kaufman J W. Comparison of full-scale and wind tunnel wind speed measurements in the commerce court plaza[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1975, 75(6): 1117-1121.
- [80] Castro I P, Wiggs G F S. Pulsed-wire anemometry on rough surfaces, with application to desert sand dunes[J]. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 1994, 52: 53-71.
- [81] Monteiro J P, Viegas D X. On the use of Irwin and Preston wall shear stress probes in turbulent incompressible flows with pressure gradients[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1996, 64(1): 15-29.
- [82] Blocken B, Stathopoulos T, van Beeck J P A J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment[J]. *Building Energy Efficiency*, 2016, 44(5): 1-10.
- [83] Reyes V A, Sierra-Espinosa F Z, Moya S L, et al. Flow field obtained by PIV technique for a scaled building-wind tower model in a wind tunnel[J]. *Energy & Buildings*, 2015, 107: 424-433.
- [84] Lo L J, Banks D, Novoselac A. Combined wind tunnel and CFD analysis for indoor airflow prediction of wind-driven cross ventilation[J]. *Building and Environment*, 2013, 60: 437-449.
- [85] 罗啸宇, 聂铭, 邹云峰, 等. 海岛微地形风洞试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(25): 11018-11023.
- Luo Xiaoyu, Nie Ming, Zou Yunfeng, et al. Wind tunnel test on island microtopography[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(25): 11018-11023.
- [86] 冯博, 邱新法, 李梦溪, 等. 建筑群风环境分层优化策略[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(19): 18-26.
- Feng Bo, Qiu Xinfu, Li Mengxi, et al. Stratified optimization strategy for wind environment of architectural buildings[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(19): 18-26.
- [87] Kubota T, Miura M, Tominaga Y, et al. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods[J]. *Building & Environment*, 2008, 43(10): 1699-1708.
- [88] Ishizaki H, Narihito K. Influence of adjacent buildings to wind[J]. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, 1971, 1(1): 459-468.
- [89] 杨瑛, 胡嘉懿, 沈炼, 等. 热力效应作用下小区风环境风洞试验研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2023, 40(1): 103-111.
- Yang Ying, Hu Jiayi, Shen Lian, et al. Experimental study on wind tunnel in residential wind environment under the action of thermal effect[J]. *Journal of Building Science and Engineering* 2023, 40(1): 103-111.
- [90] 郑肖楠, 崔会敏, 刘庆宽. 超高层建筑表面风压及行人风环境研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(S1): 223-227.
- Zheng Xiaonan, Cui Huimin, Liu Qingkuan. Research on surface wind pressure and pedestrian wind environment of super tall buildings[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(S1): 223-227.
- [91] Oke T R. Boundary layer climates[M]. 2nd ed. Berlin: Springer International Publishing, 1979.
- [92] Oke T R, Johnson G T, Steyn D G, et al. Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night part 2: diagnosis of causation[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 56(4): 339-358.
- [93] Johnson G T, Oke T R, Lyons T J, et al. Simulation of surface urban heat islands under? IDEAL? conditions at night part 1: theory and tests against field data[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 56(3): 275-294.
- [94] Mills G M. Simulation of the energy budget of an urban canyon-I model structure and sensitivity test[J]. *Atmospheric Environment Part B Urban Atmosphere*, 1993, 27(2): 157-170.
- [95] Roulet Y A, Martilli A, Rotach M W, et al. Validation of an urban surface exchange parameterization for mesoscale models: 1D case in a street canyon[J]. *American Meteorological Society*, 2005, 44(9): 1484-1498.
- [96] Masson V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 84(1/3): 35-45.
- [97] Kanda M, Kawai T, Kanega M, et al. A simple energy balance model for regular building arrays[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 116(3): 1-7.
- [98] Tong H, Walton A, Sang J, et al. Numerical simulation of the ur-

- ban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(19): 3549-3563.
- [99] Ashie Y, Ca V T, Asaeda T. Building canopy model for the analysis of urban climate[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1999, 81: 237-248.
- [100] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model part I: formulation and evaluation for two cities[J]. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 2006, 47(4): 1038-1060.
- [101] Pielke R A, Cotton W R, Walko R L, et al. A comprehensive meteorological modeling system? RAMS[J]. *Meteorology Atmospheric Physics*, 1992, 49(1): DOI: 10.1007/BF01025401.
- [102] Murakami S. Environmental design of outdoor climate based on CFD[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2006, 38(2/3): 108-126.
- [103] Mochida A, Murakami S, Ojima T, et al. CFD analysis of mesoscale climate in the greater Tokyo area[J]. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 1997, 67-68: 459-477.
- [104] Raupach M R. Drag and drag partition on rough surfaces[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 60(4): 445-468.
- [105] Tao W K, Simpson J. The Goddard cumulus ensemble model part 1: model description [J]. *Terratmosceasci*, 1993, 4(1): 35-72.
- [106] Emeis S. Observational techniques to assist the coupling of CWE/CFD models and meso-scale meteorological models[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2015, 144: 24-30.
- [107] Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J, et al. Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment; an overview[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2011, 4(2): 157-184.
- [108] Furlotto R, Cambuli F, Mandas N, et al. Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building facade[J]. *Energy & Buildings*, 2009, 42(1): 1-8.
- [109] Blocken B. 50 years of computational wind engineering: past, present and future[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2014, 129: DOI: 10.1016/j.jweia.2014.03.008.
- [110] Balogh M, Kristóf G. Fine scale simulation of turbulent flows in urban canopy layers[J]. *Idojaras*, 2010, 114(1/2): 135-148.
- [111] Gál T, Unger J. Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area[J]. *Building and Environment*, 2008, 44(1): 198-206.
- [112] Ganbat G, Baik J J. A numerical study of the interactions of urban breeze circulation with mountain slope winds [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 120: 123-135.
- [113] 尹金方, 黄洁, 史永强, 等. Nudging地面加密观测改进数值模式对城市效应及其触发对流的模拟: 一次夜间个例试验[J]. *热带气象学报*, 2022, 38(3): 331-342.
- Yin Jinfang, Huang Jie, Shi Yongqiang, et al. The simulation of urban effects and their triggered convection using an improved numerical model based on Nudging ground densification observation: a nighttime case study[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2022, 38(3): 331-342.
- [114] 俞布. 杭州地区近地面风场特征及其在城市规划中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- Yu Bu. The characteristics of near surface wind field in Hangzhou area and its application in urban planning[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Technology, 2021.
- [115] Yasunobu A, Takashi A, Thanh C V. Building canopy model for the analysis of urban climate[J]. *Journal of Wind Engineering*, 1999, 81(1/3): 237-248.
- [116] Xie X, Liu C H, Leung D Y C. Impact of building facades and ground heating on wind flow and pollutant transport in street canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(39): 9030-9049.
- [117] Hiroaki K, Kazutake A, Takayuki T, et al. Numerical analysis of diffusion around a suspended expressway by a multi-scale CFD model-ScienceDirect[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(16): 2852-2859.
- [118] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. *Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10): DOI: 10.3130/aijt.7.119_1.
- [119] Lund T S, Wu X, Squires K D. Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1998, 140(2): 233-258.
- [120] Murakami S, Iizuka S, Ooka R. CFD analysis of turbulent flow past square cylinder using dynamic LES [J]. *Journal of Fluids Structures*, 1999, 13(7/8): 1097-1112.
- [121] Yamada T, Bunker S. Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT brush creek data simulation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27(5): 562-578.
- [122] Ferrero E, Castelli S T, Anfossi D. Turbulence fields for atmospheric dispersion models in horizontally non-homogeneous conditions [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(17): 2305-2315.
- [123] Vu T C. A *k-e* turbulence closure model for the atmospheric boundary layer including urban canopy[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 102(1): 459-490.
- [124] 蒋理, 刘超, 舒谦. 应用 WRF-UCM 模型分析城市绿色廊道对热岛效应的影响——以上海市为例[J]. *建筑节能*, 2019, 47(10): 89-96.
- Jiang Li, Liu Chao, Shu Qian. Application of WRF-UCM model to analyze the influence of urban green corridors on heat island effect: a case study of Shanghai[J]. *Building Energy Efficiency*, 2019, 47(10): 89-96.
- [125] 梁锦. 城市化进程及屋顶反照率对杭州市热岛效应影响的模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Liang Jin. Simulation study on the influence of urbanization process and roof albedo on heat island effect in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [126] 周晓宇, 王咏薇, 孙绩华, 等. 昆明城市热岛效应的数值模拟研究[J]. *大气科学*, 2022, 46(4): 921-935.
- Zhou Xiaoyu, Wang Yongwei, Sun Jihua, et al. Numerical simulation of urban heat island effect in Kunming[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(4): 921-935.
- [127] 孙世杰, 张小玲, 樊晋. 高温背景下城市下垫面扩张对于成都市热岛效应的数值试验[J]. *成都信息工程大学学报*, 2023, 38(3): 358-364.
- Sun Shijie, Zhang Xiaoling, Fan Jin. Numerical experiment on the effect of urban underlying surface expansion on heat island in Chengdu City under high temperature[J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2023, 38(3): 358-364.
- [128] 郭尚霖, 孙一民. 广州地区街道微气候模拟及改善策略研究

- [J]. 城市规划学刊, 2016, 1(1): 56-62.
- Wu Shanglin, Sun Yimin. Study on street microclimate simulation and improvement strategy in Guangzhou[J]. Urban Planning Forum, 2016, 1(1): 56-62.
- [129] 张莉. 城市三维热岛效应变化分析[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.
- Zhang Li. Change analysis of three-dimensional urban heat island effect[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017.
- [130] 吴小姣. 不同来流风特征条件下典型高层建筑行人高度处风环境研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- Wu Xiaojiao. Study on wind environment at pedestrian height of typical high-rise buildings under different inlet wind characteristics[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [131] 赵利磊. 城市街谷风环境与颗粒物扩散的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
- Zhao Lilei. Study on wind environment and particulate matter diffusion in city streets and valleys[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.
- [132] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 338-353.
- Shou Yixuan, Zhang Dalin. Research progress and prospect of urban heat island effect[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 338-353.
- [133] Chow W T L, Salamanca F, Georgescu M, et al. A multi-method and multi-scale approach for estimating city-wide anthropogenic heat fluxes[J]. Atmospheric Environment, 2014, 99: 64-76.
- [134] 王咏薇, 翟雪飞, 齐德莉, 等. 城市下垫面扩张对局地热力环流影响的模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(3): 16-28, 35.
- Wang Yongwei, Zhai Xuefei, Qi Deli, et al. Simulation of effect of urban underlying surface expansion on local thermal circulation[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(3): 16-28, 35.
- [135] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征——以深圳市为例[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 961-971.
- Liu Zhenhuan, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Characteristics of urban land cover pattern based on impervious surface index: a case study of Shenzhen[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 961-971.
- [136] 周海珠, 朱能, 王清勤. 基于城市冠层改进模型的三亚城市热岛效应模拟[J]. 生态城市与绿色建筑, 2021(1): 18-23.
- Zhou Haizhu, Zhu Neng, Wang Qingqin. Simulation of urban heat island effect in Sanya based on improved canopy model[J]. Ecological City and Green Building, 2021(1): 18-23.
- [137] 胡啸峰, 黄弘, 申世飞. 基于城市冠层模型的放射性物质大气扩散模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(6): 711-718.
- Hu Xiaofeng, Huang Hong, Shen Shifei. Atmospheric dispersion simulation of radioactive materials based on urban canopy model[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2014, 54(6): 711-718.
- [138] 王雨辰. 改进 BEM 及其与 CLMU 模型耦合的城市热环境研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- Wang Yuchen. Study on urban thermal environment with improved BEM and its coupling with CLMU model[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2019.
- [139] 丁圆圆, 赵健赞, 杨静, 等. 黄河源永曲河流域地表温度与土地覆盖的时空变化特征分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2592-2600.
- Ding Yuanyuan, Zhao Jianyun, Yang Jing, et al. Spatial and temporal variation of land surface temperature and land cover in Yongqu River Basin, source of the Yellow River[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2592-2600.
- [140] 郑自海, 陈佳捷. 街谷几何形态及绿化对夏季热环境的影响探究[J]. 现代园艺, 2017(18): 164.
- Zheng Zihai, Chen Jiajie. Study on the influence of geometric form of street valley and greening on summer thermal environment[J]. Modern Horticulture, 2017(18): 164.
- [141] 张朔川, 汤军, 高贤君. 秦皇岛市 2001—2020 年植被覆盖动态变化及预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13254-13261.
- Zhang Shuochuan, Tang Jun, Gao Xianjun. Dynamic change and prediction of vegetation cover in Qinhuangdao City from 2001 to 2020[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13254-13261.
- [142] 张翠峰, 万计, 罗含之, 等. 基于遥感技术的长沙城市热岛效应特征分析[J]. 城市勘测, 2022(5): 90-95.
- Zhang Cuifeng, Wan Ji, Luo Hanzhi, et al. Analysis of urban heat island effect characteristics based on remote sensing technology in Changsha[J]. Urban Survey, 2022(5): 90-95.
- [143] Alchapar N L, Correa E N. The use of reflective materials as a strategy for urban cooling in an arid "OASIS" city [J]. Sustainable Cities and Society, 2016, 27(1): 1-14.
- [144] 唐太斌, 周保, 金晓媚, 等. 黄河源区夏季地表温度变化研究[J]. 干旱区地理, 2023, 1(1): 1-14.
- Tang Taibin, Zhou Bao, Jin Xiaomei, et al. Study on summer surface temperature change in the source region of the Yellow River[J]. Arid Land Geography, 2023, 1(1): 1-14.
- [145] 杜晓寒, 陈东, 吴杰, 等. 街谷几何形态及绿化对夏季热环境的影响[J]. 建筑科学, 2012, 28(12): 94-99.
- Du Xiaohan, Chen Dong, Wu Jie, et al. Effect of geometric form of street valley and greening on thermal environment in summer[J]. Building Science, 2012, 28(12): 94-99.
- [146] 张思涵, 徐丽华. 城市绿地植物对热舒适影响的研究进展[J]. 绿色科技, 2023, 25(7): 29-34, 58.
- Zhang Sihan, Xu Lihua. Research progress on the effects of urban green space plants on thermal comfort[J]. Green Science and Technology, 2023, 25(7): 29-34, 58.
- [147] Beniston M, Berkovic S, Yezioro A, et al. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: an experience from Hong Kong, China[J]. Building & Environment, 2012, 31: 256-271.
- [148] 郑浪涛. 城市几何形态因子对广州市热岛效应的影响研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.
- Zheng Langtao. Study on the influence of urban geometric form factors on heat island effect in Guangzhou[D]. Guangzhou: Jinan University, 2020.
- [149] 谭康豪. 街道峡谷形式和表面材料影响城市热岛效应的机制[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- Tan Kanghao. The mechanism of street canyon form and surface material influencing urban heat island effect[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.

- [150] 冯章献, 王士君, 金珊合, 等. 长春市城市形态及风环境对地表温度的影响[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 902-911.
Feng Zhangxian, Wang Shijun, Jin Shanhe, et al. Effects of urban morphology and wind environment on land surface temperature in Changchun City [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 902-911.
- [151] 孙永, 王咏薇, 高阳华, 等. 复杂地形条件下城市热岛及局地环流特征的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2019, 42(2): 280-292.
Sun Yong, Wang Yongwei, Gao Yanghua, et al. Numerical simulation of urban heat island and local circulation characteristics under complex terrain conditions[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 42(2): 280-292.
- [152] 傅抱璞. 不同地形下辐射收支各分量的差异与变化[J]. 大气科学, 1998, 1(2): 50-62.
Fu Baopu. Differences and changes of components of radiation budget under different terrain[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 1(2): 50-62.
- [153] 许辉熙. 成都平原中等城市的热岛效应动态特征对比研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(1): 13-19.
Xu Huixi. Comparative study on dynamic characteristics of heat island effect in medium-sized cities in Chengdu Plain[J]. Surveying, Mapping and Spatial Geographic Information, 2015, 38(1): 13-19.
- [154] 康紫薇, 张正勇, 刘琳, 等. 基于 MODIS 的新疆地表温度时空变化特征分析[J]. 地理研究, 2022, 41(4): 997-1017.
Kang Ziwei, Zhang Zhengyong, Liu Lin, et al. Spatial and temporal variation of land surface temperature in Xinjiang based on MODIS[J]. Geographical Research, 2022, 41(4): 997-1017.
- [155] 宋云帆, 闵文彬, 彭骏. 成都城市下垫面变化对地表热场的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 197-206.
Song Yunfan, Min Wenbin, Peng Jun. Effect of urban underlying surface variation on surface heat field in Chengdu [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(7): 197-206.
- [156] 孙斌祥, 黄尹泰, 沈航, 等. 沥青路面热反射涂层的降温性能研究综述[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3446-3456.
Sun Binxian, Huang Yintai, Shen Hang, et al. Research review on cooling performance of heat reflective coatings on asphalt pavement[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3446-3456.
- [157] 樊智宇, 詹庆明, 刘慧民, 等. 武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 226-235.
Fan Zhiyu, Zhan Qingming, Liu Huimin et al. Spatial and temporal distribution of urban heat island and impervious surface warming intensity in Wuhan City in summer[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(2): 226-235.
- [158] 谢军飞, 丛日晨, 王月容, 等. 北京通州地表温度的时空分布特征与绿化作用[J]. 中国园林, 2021, 37(4): 41-45.
Xie Junfei, Cong Richen, Wang Yuerong, et al. Spatial and temporal distribution of land surface temperature and its greening effect in Tongzhou, Beijing[J]. Chinese Journal of Landscape Architecture, 2021, 37(4): 41-45.
- [159] 梁变凤, 何志强, 崔虎亮. 城市森林公园不同植物群落特征对环境效应的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11174-11181.
Liang Bianfeng, He Zhiqiang, Cui Huliang. Effects of plant community characteristics on environmental effects in urban forest park[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11174-11181.
- [160] 郑文亨, 李翀潇, 冯荣奕, 等. 基于 ENVI-met 绿化形式对夏季微气候及热舒适影响的研究: 以桂林市为例 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15370-15380.
Zheng Wenheng, Li Chongxiao, Feng Rongyi, et al. Effect of ENVI-met greening on summer microclimate and thermal comfort: a case study of Guilin City [J]. Science Technology and Engineering 2023, 23(36): 15370-15380.
- [161] 殷若晨, 方家, 朱丹, 等. 城市公园降温效益的测度与气候适应性设计策略[J]. 中国园林, 2022, 38(6): 121-126.
Yin Ruochen, Fang Jia, Zhu Dan, et al. Measurement of cooling efficiency and climate adaptive design strategy for urban parks [J]. Chinese Journal of Landscape Architecture, 2022, 38(6): 121-126.
- [162] 张明月. 沈阳市热岛效应与土地覆盖类型的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
Zhang Mingyue. Study on heat island effect and land cover type in Shenyang[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.
- [163] 李延明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究[J]. 中国园林, 2004, 1(1): 77-80.
Li Yanming, Zhang Jihe, Gu Runze. Study on the relationship between urban greening and heat island effect in Beijing [J]. Chinese Journal of Landscape Architecture, 2004, 1(1): 77-80.
- [164] 马伟, 赵珍梅, 刘翔, 等. 植被指数与地表温度定量关系遥感分析——以北京市 TM 数据为例 [J]. 国土资源遥感, 2010, 1(4): 108-112.
Ma Wei, Zhao Zhenmei, Liu Xiang, et al. Quantitative relationship between vegetation index and land surface temperature: a case study of TM data in Beijing [J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2010, 1(4): 108-112.
- [165] 张振. 街道设计与城市小气候研究——分析街道几何形状和朝向对城市小气候的影响[J]. 智能城市, 2019, 5(21): 18-20.
Zhang Zhen. Study on street design and urban microclimate: analysis of the influence of street geometry and orientation on urban microclimate [J]. Smart City, 2019, 5(21): 18-20.
- [166] 殷实. 湿热地区近代城市街区形态的气候适应机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
Yin Shi. Study on climate adaptation mechanism of modern urban block morphology in hot and humid region [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [167] Pearlmuter D, Bitan A, Berliner P. Microclimatic analysis of "compact" urban canyons in an arid zone[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(24/25): 4143-4150.
- [168] Johansson E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco[J]. Building and Environment, 2006, 41(10): 1326-1338.
- [169] 石俊杰. 街区空间形态对夏季街谷热环境时空分布特征的影响分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Shi Junjie. Analysis of the influence of block spatial morphology on spatial and temporal distribution characteristics of heat envi-

- ronment in summer street valley[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [170] 黄群芳, 颜敏. 典型气象条件下城市热岛效应逐时变化特征[J]. 气象科学, 2022, 42(3): 402-409.
- Huang Qunfang, Yan Min. Temporal variation of urban heat island effect under typical meteorological conditions [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2022, 42(3): 402-409.
- [171] Okeil A. A holistic approach to energy efficient building forms [J]. Energy Buildings, 2010, 42(9): 1437-1444.
- [172] 檀姊静. 城市街谷风热环境及污染物分布的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- Tan Zijing. Numerical simulation of wind and heat environment and pollutant distribution in urban streets and valleys [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [173] Kikumoto H, Ooka R. A study on air pollutant dispersion with bimolecular reactions in urban street canyons using large-eddy simulations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104-106: 516-522.
- [174] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005, 1(S1): 145-155.
- Wang Guangtao, Wang Xiaoyun, Miao Shiguang, et al. Research and application of multi-scale assessment technology system for urban planning atmospheric environmental impact [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2005, 1(S1): 145-155.
- [175] Meng X Z, Cui D J, Kwok K C S, et al. On-site evaluation of pedestrian-level air quality at a U-type street canyon in an ancient city[J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2017, 168: 322-333.
- [176] 牛凯, 李华威, 何瑞珍, 等. 郑州市带状绿地不同空间结构类型温湿度效应分析[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 237-241.
- Niu Kai, Li Huawei, He Ruizhen, et al. Analysis on temperature and humidity effects of different spatial structure types of belt green space in Zhengzhou [J]. Journal of Northwest Forestry College, 2015, 30(6): 237-241.
- [177] 朱春阳, 李树华, 纪鹏. 城市带状绿地结构类型与温湿效应的关系[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1255-1260.
- Zhu Chunyang, Li Shuhua, Ji Peng. Relationship between the structure type of urban belt green space and the temperature and humidity effect [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1255-1260.
- [178] 曹利娟, 杨英宝, 张宁宁, 等. 绿地对居住区热环境的改善效果研究[J]. 地理空间信息, 2016, 14(2): 15-17, 7.
- Cao Lijuan, Yang Yingbao, Zhang Ningning, et al. Study on the improvement effect of green space on residential thermal environment[J]. Geospatial Information, 2016, 14(2): 15-17, 7.
- [179] 黄家豪. 街区空间形态对湿热地区建筑能耗的量化影响及优化研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- Huang Jiahao. Quantitative Influence and optimization of block spatial form on building energy consumption in hot and humid area [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [180] 周文倩, 李祥立, 端木琳, 等. 建筑围护结构热工性能对城市热岛强度影响研究[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(5): 485-492.
- Zhou Wenqian, Li Xiangli, Duanmu Lin, et al. Study on the influence of thermal performance of building envelope on urban heat island intensity[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(5): 485-492.
- [181] 付艳鹏. 基于LCZ系统的沈阳市居住建筑区域能耗及碳排放模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- Fu Yanpeng. Simulation study on energy consumption and carbon emission of residential buildings in Shenyang based on LCZ system [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [182] 曾宪策. 岭南高校集约型教学建筑气候适应性设计策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Zeng Xiance. Research on climate adaptive design strategy of intensive teaching buildings in Lingnan universities [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.