

DOI: 10.20103/j.stxb.202310222297

杨俊,任嘉义,于文博.局地气候分区视角下城市气候与人居环境研究进展.生态学报,2024,44(11):4489-4506.

Yang J, Ren J Y, Yu W B. Research progress on urban climate and human settlement environment from the perspective of Local Climate Zone. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4489-4506.

局地气候分区视角下城市气候与人居环境研究进展

杨 俊^{1,2,*}, 任嘉义¹, 于文博¹

¹ 东北大学文法学院, 沈阳 110000

² 东北大学江河建筑学院, 沈阳 110000

摘要:城市气候与人居环境交互影响。局地气候分区(Local Climate Zone, LCZ)推动了城市形态刻画与气候演变规律探索,为城市气候与人居环境研究提供了统一框架。学术界对其研究大多聚焦在城市热环境和气候风险方面,正在向多要素气候模拟和考虑社会经济因素方向发展。审查了主题、方法和主要结论,发现“局地气候分区”、“城市热岛”、“地表温度”、“管理”和“社区”出现频率最高。采用文献计量和专题分析方法,梳理并总结了2012—2023年6月LCZ城市气候与人居环境研究在LCZ制图、相互作用和适应性策略三方面的进展,并展望了未来的研究重点。结果表明,①全球已在超过280座城市开展了LCZ研究,LCZ全球数据集的推广扩大了研究尺度且丰富了研究内容;②大多研究分析了风热环境为主的气候要素在局地尺度上的时空特征,探讨产生异质性的原因及其对人居环境的作用机理,揭示了城市蓝绿空间对于优化冷却效果、防范和治理热源等缓解性策略的重要性。其中自2018年起LCZ热环境研究向多元化发展,研究区域开始出现大都市圈或城市群;③LCZ能够辅助识别人居环境中高度暴露和脆弱的地区,近年来的研究趋向于在气候/生态风险评估中寻找适应性策略,且更加关注易感人群和低收入者。综述将有利于LCZ框架下城市气候与人居环境研究现状和发展趋势的宏观把握,为后续研究提供思路。

关键词:局地气候分区;城市气候;人居环境;热风险;适应性策略

Research progress on urban climate and human settlement environment from the perspective of Local Climate Zone

YANG Jun^{1,2,*}, REN Jiayi¹, YU Wenbo¹

¹ School of Humanities and Law, Northeastern University, Shenyang 110000, China

² Jangho Architecture College, Northeastern University, Shenyang 110000, China

Abstract: Urban climate and human settlement environment interact with each other. Local Climate Zone (LCZ) promotes the description of urban morphology and the exploration of climate change, and provides a unified framework for the urban climate and human settlement environment studies. Much of the academic research has focused on urban thermal environment and climate risk, and is developing towards multi-factor climate simulation and consideration of socio-economic factors. This study reviewed themes, methods and main conclusions, found that "local climate zone", "urban heat island", "land surface temperature", "management" and "community" appeared most frequently. Using the bibliometrics and thematic analysis methods, the progress of urban climate and human settlements research from 2012 to June 2023 in terms of LCZ mapping, interactions, and adaptive strategies is compiled and summarized, and future research priorities are prospected. The results showed that (1) LCZ studies have been carried out in more than 280 cities around the world, and the popularization of LCZ global dataset has expanded the research scale and enriched the research content; (2) Most

基金项目:国家自然科学基金项目(41771178,41671151);辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2017017);辽宁省教育厅项目(H201783628)

收稿日期:2023-10-22; **网络出版日期:**2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjun8@mail.neu.edu.cn

studies have analyzed the spatio-temporal characteristics of climate factors dominated by urban wind/thermal environment on the local scale, explored the causes of heterogeneity and their mechanism on human settlements, and revealed the importance of urban blue-green space for mitigation strategies such as optimizing cooling effect, preventing and controlling heat sources. Since 2018, LCZ thermal environment research had been diversified, and the research area had begun to appear metropolitan areas or urban agglomerations; (3) LCZ can assist in identifying areas of extreme exposure and vulnerability in human settlements. Recent studies tend to look for adaptive strategies in climate/ecological risk assessment and pay more attention to vulnerable and low-income populations. This review will be conducive to the macro-grasp of the research status and development trend, and provide ideas for subsequent research.

Key Words: local climate zone; urban climate; human settlement environment; thermal risk; adaptive strategy

大自然是人居环境的基础,人的生产生活以及基础建设离不开广阔的自然背景^[1]。然而,随着人类聚居程度加深,大肆消耗自然资源和排放污染物等行为严重干扰了原有能量平衡,气候系统受到直接影响,导致人类住区的宜居性和舒适性降低^[2-3]。城市气候与人居环境研究逐渐受到重视,如何将局地气候思维融入人居环境规划、通过自然力量和人为手段建设气候适宜性城市,成为重要议题。

了解人居环境中的气候问题是主动改善和提升的首要条件。这在传统研究中已有大量成果,如基于“城-郊”二元框架计算城市热岛强度并探讨城郊热力差异^[4-6];结合土地利用/土地覆被分析城市热力景观时空特征^[7-9];分析长时间序列下极端天气、热浪事件发生频率和持续时间^[10-12];探究空气污染与城市功能区的耦合关系^[13-15];以及定量评价气候变化导致的热风险和生态风险等^[16-18]。研究普遍以城市行政边界或人口梯度为基准,忽视了相似地理单元的空间特性。2012年 Stewart 和 Oke 提出将局地气候分区(Local Climate Zones, LCZ)作为城市气候研究的通用框架^[19],填补了传统气候分类在中/微观尺度研究中的局限,得到广泛运用。

局地气候分区根据城市形态、地表覆盖、地表结构及材质等差异,将城市下垫面划分为 17 个基本区域,包括 10 个建筑类型和 7 个自然类型。每个 LCZ 都有特定范围的相关气候参数,不同 LCZ 类型具有不同的局部气候条件(图 1)。LCZ 分类体系提出用两个 LCZ 之间的温差定义并计算城市热岛强度^[19-20],克服了传统研究中城乡的刻板边界。同时建立了城市气候研究基础框架,规范了全球城市气候研究范式。目前世界各地研究绘制了丰富的 LCZ 地图,本研究将对往期文献中 LCZ 地图制作数据源、方法和已有 LCZ 数据集进行全面梳理。

城市气候是影响人居环境质量的重要方面,LCZ 体系充分考虑了人居环境是由“人-建筑-环境”构成的地表空间,大大推动了城市气候与人居环境研究进展。然而,目前对 LCZ 框架下城市气候与人居环境研究仍缺乏系统性总结,主要体现在:①以风热环境为主的局地气候与人居环境相互作用研究成果丰富,但缺乏概括,尤其是在研究方法、数据获取和成果对比方面比较杂乱。②城市热暴露、热脆弱性等潜在热风险的增加对人居环境的影响有待深入研究。③与联合国可持续发展目标相对应,气候变化背景下人居环境面临的生态风险可进一步挖掘。这些问题阻碍了城市气候与人居环境研究的有序进行,影响到 LCZ 框架下全球和区域研究的可对比性和连续性。

在详细梳理 LCZ 应用案例和研究现状的基础上,下载 2012 年至 2023 年 6 月 Web of Science 和 CNKI 数据库中城市气候与人居环境研究文献,利用 VOSviewer 文献计量软件,通过统计分析和专题分析,对国内外 LCZ 框架下热岛效应、热暴露、热脆弱性、生态风险等方面研究进展进行综述,探讨现有研究不足之处,分析当下研究热点和未来方向,为后续研究提供思路。

1 研究进展

1.1 LCZ 应用案例及研究现状

LCZ 概念自 2012 年被 Stewart 和 Oke 在《美国气象学会公报》上提出^[19],因其“气候本质、局部规模、分区

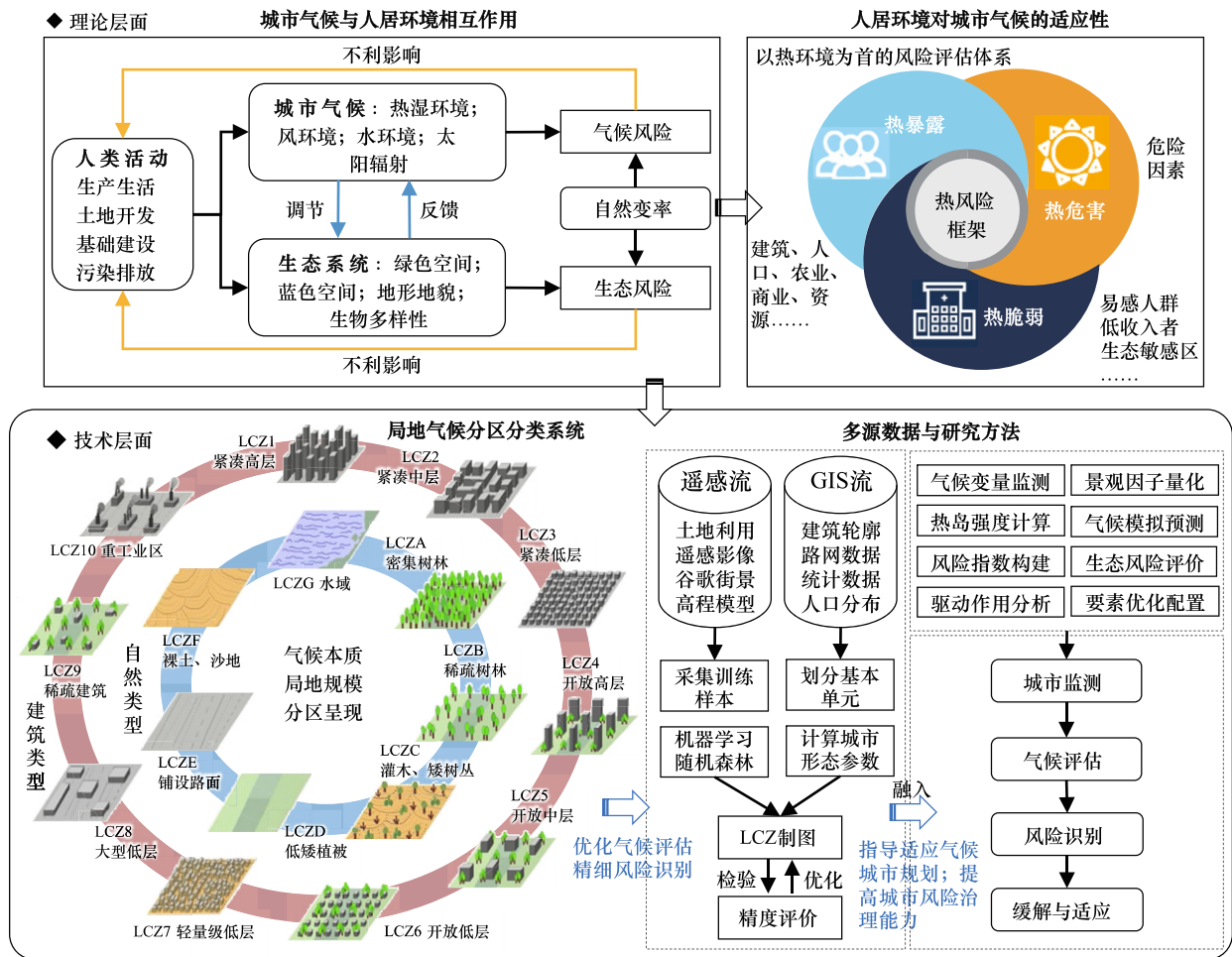


图1 LCZ框架下的城市气候与人居环境研究概况

Fig.1 Overview of urban climate and human settlement environment research under the LCZ framework

LCZ:局地气候分区 Local climate zones; LCZ1:紧凑高层; LCZ2:紧凑中层; LCZ3:紧凑低层; LCZ4:开放高层; LCZ5:开放中层; LCZ6:开放低层; LCZ7:轻量级低层; LCZ8:大型低层; LCZ9:稀疏建筑; LCZ10:重工业区; LCZA:密集树林; LCZB:稀疏树林; LCZC:灌木、矮树丛; LCZD:低矮植被; LCZE:铺设路面; LCZF:裸土、沙地; LCZG:水域; GIS:地理信息系统

呈现”的优势获得广泛关注。目前全球已有超过 280 座城市验证了 LCZ 分类体系的普适性,且大多分布在亚洲和欧洲(图 2),相关论文常发表在 *Urban Climate*、*Building and Environment*、*Remote Sensing*、*Sustainable Cities and Society*(图 2)等期刊上。

在 Web of science 中以“Local climate zone”为主题词进行检索,时间设定为 2012 年至 2023 年 6 月,逐篇浏览摘要进行筛选,得到与 LCZ 相关的外文文献 365 篇。经过整理发现,LCZ 研究具有阶段性特征:2014 年以前,少数开创性研究将 LCZ 制图从现场观测扩展到城市规模,主要为欧洲、亚洲的特大城市;2014 年之后,LCZ 体系的推广得益于 WUDAPT 项目的公开,对全球范围内中小城市的研究显著增加。其中包含热环境在内的城市气候研究占主导地位,其次为 LCZ 制图和精度提升,以及一些研究用 LCZ 模型代替土地利用和城市景观表征城市形态,描述城市发展等;2020 年以来,对非洲和美洲城市的研究显著增加,且关注区域由单一城市转向城市群。值得注意的是,由于减缓气候变化和提升人居环境舒适度的需求不断增加,LCZ 框架下城市气候的研究重点有向热风险、生态风险应对方案转移的趋势。

在中国知网以“局部(地)气候区”“Local climate zone”为关键词进行检索,共得到在国内发表的期刊/硕博论文 122 篇,其中 47% 拥有国家自然科学基金资助,12% 为国家重点研发计划。有关 LCZ 的中文文献最早

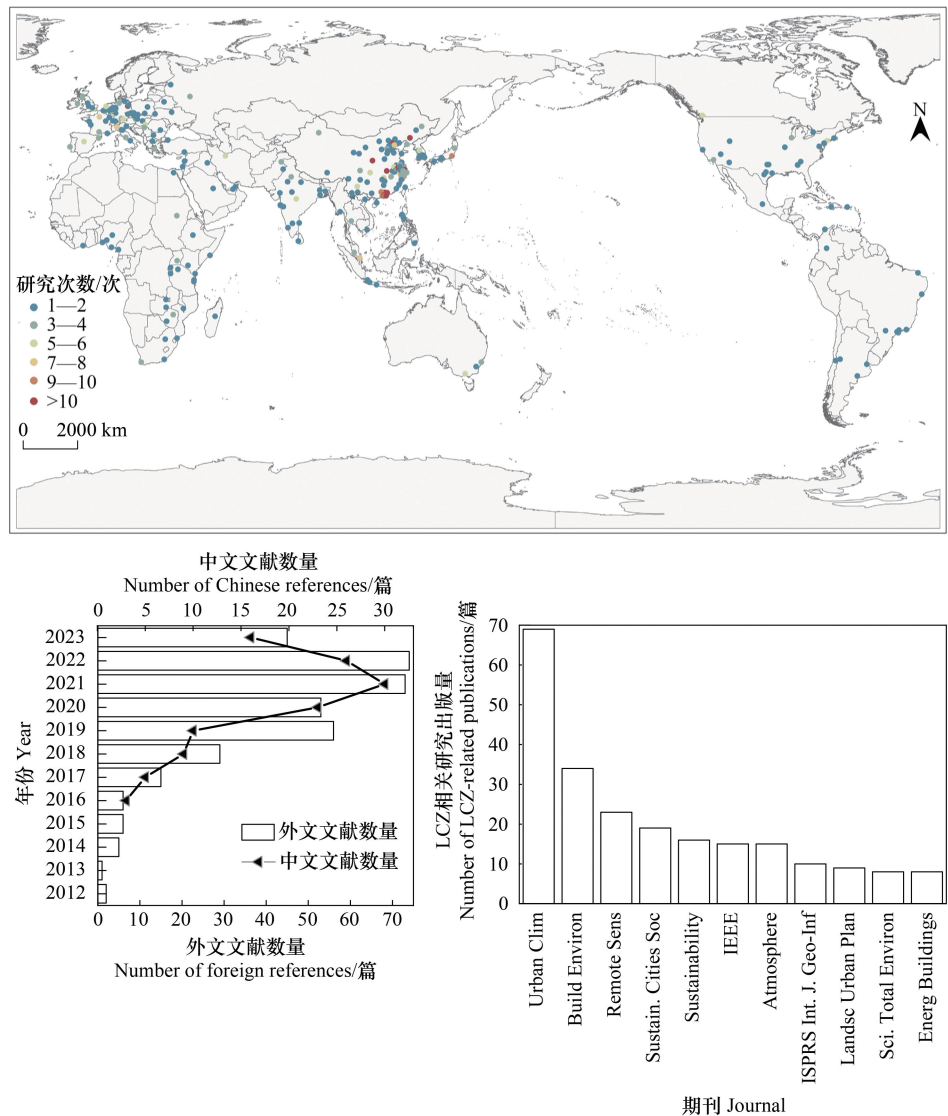


图 2 LCZ 框架下开展气候研究城市的地理分布、中外文献数量及期刊发文量

Fig.2 Global distributions of the cities, the number of researches and journal publications that LCZ-based urban climate research

该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1667 号的标准地图制作,底图无修改

出现在 2016 年(图 2)。北京、武汉和广州等高密度城市是热门研究区,三大城市群、湿热地区和山地城市也备受关注。国内研究主要包含 LCZ 框架下描述城市热、湿、风环境及其驱动因素,以及针对气候适应的人类住区规划策略两个方面。

LCZ 分类是制约研究精确度的关键。Stewart 和 Oke 首次利用地表—大气模型进行温度观测和模拟,将结果用于 LCZ 划分^[21]。后来的研究中考虑利用城市三维建筑和植被剖面划分 LCZ,但难以测量。因此大量研究致力于改进 LCZ 分类方法和提升制图精度,目前主要包括地理信息系统(GIS 流)和遥感(RS 流)两种手段。其中,GIS-LCZ 方法主要依据 LCZ 概念中特定几何和地表覆盖属性(如建筑高度/密度、粗糙度、天空开阔度、建筑表面分数、可渗透表面分数等)划分^[22–24]。在建筑密集且形态复杂的城市(如中国香港),GIS 方法具有参数全面性,分类准确性和结果标准化的优势。但碍于数据可获取性和城市结构差异大,难以推广至全球城市的内部结构映射和 LCZ 类型比较。RS-LCZ 方法能够满足全球城市制图需求。该方法旨在通过图像分析或监督分类直接从卫星观测数据中提取 LCZ 信息,常用的 RS 数据源有 Landsat、ASTER、Sentinel 及合成孔

径雷达等^[25-27]。谷歌地球引擎(GEE)已被用于处理多源 RS 数据。世界城市数据库和访问门户工具(WUDAPT, <http://www.wudapt.org/>)使用 Landsat 图像通过随机森林方法实现了 LCZ 全球制图,一些研究直接使用来自 WUDAPT 的训练样本^[28-29]。但 RS-LCZ 方案中 LCZ 划分精度依赖于训练区域的选取,且在明确建筑物高度信息方面不及 GIS-LCZ。自 2017 年以来,研究中引入了深度学习模型以提高分类精度,如利用改进的卷积神经网络评估基于遥感影像的 LCZ 映射方案^[30-32],越来越多基于 RS-LCZ 的制图方法被开发出来。研究指出在相同的训练条件下基于对象比基于像素的分类精度更高,且在深度学习视角下将 GIS 和 RS 方法结合能够大大提高 LCZ 划分精度^[33-35]。表 1 列出了用于 LCZ 制图的常用数据源和已有 LCZ 数据集。全球 LCZ 数据的完善和共享验证了地方分类模型的可转移性。

表 1 LCZ 制图的数据源和已有的 LCZ 数据集

Table 1 Data sources for LCZ mapping and existing LCZ data sets

制图方案 Mapping scheme	数据源 Data sources	来源 Sources	说明 Descriptions
遥感流	Landsat-5, 7, 8	http://glovis.usgs.gov	用于识别地表覆盖
RS-LCZ	Sentinel-1, 2	https://scihubcopernicus.eu/	用于 LCZ 制图映射,常用于生成训练区域
	MODIS 产品	https://search.earthdata.nasa.gov/search	构建气候模型,纳入 LCZ 分类参与验证
	谷歌街景	Google Maps	详细的街景地图,为 LCZ 划分提供参考
	高程	Google Earth Engine	检索建筑物高度,提升建筑类型 LCZ 划分精度
	全球人工不透水面	http://data.ess.tsinghua.edu.cn/	记录了全球城市化数据,为 LCZ 划分提供参考
GIS 流	WUDAPT 训练样本	WUDAPT/Google Earth	用于 LCZ 划分
GIS-LCZ	Open Street Map/ 路网数据	http://www.openstreetmap.org/	包含道路类别、长度和宽度信息,可以用于分割卫星图像以获得分类单元的地块,提高分类精度。
	建筑轮廓数据	百度地图,当地政府	包含建筑高度、密度信息,用于建筑类型 LCZ 划分。
已有数据集	So1SatLCZ v0.100	http://doi.org/10.14459/2018mp1483140	通过深度学习融合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 卫星数据产生全球 42 个城市训练集 ^[36] ,总体置信度达到 85%。
Existing datasets	LCZ 训练数据集		
	Demuzere 等 ^[37] 绘制的全球 LCZ 地图	https://doi.org/10.5281/zenodo.6364594	考虑微观尺度土地覆盖及其物理属性,将大量训练区和遥感影像输入随机森林模型而生成,分辨率为 100m
	Zhu 等 ^[38] 提供的 So2Sat Global Urban LCZ 数据集	https://doi.org/10.14459/2021mp1633461	利用一种新的深度学习和大数据分析,融合 Sentinel-1, 2 卫星数据,考虑到人口密度,创建全球城市 LCZ 分类。
	任超等 ^[39]	http://www.wudapt.org/	从 Sentinel-1 数据检索城市高程模型,在 WUDAPT 优化建筑分类,为中国 50 多个城市开发 LCZ 地图,整体精度为 76%

RS:遥感 Remote sensing; MODIS:中分辨率成像光谱仪 Moderate-resolution imaging spectroradiometer; WUDAPT:世界城市数据库和访问门户工具 World urban database and access portal tools; LCZ:局地气候分区 Local climate zones

1.2 基于 LCZ 的城市气候与人居环境研究进展

城市气候来源于地理背景和自然气候,是影响人居环境的重要方面。专题分析能够确定个案研究的关键要素和视角,有助于发现规律和寻找共性。对 LCZ 框架下城市气候与人居环境的每项研究进行了仔细审查,并确定了主题、方法和主要结论。由 VOSviewer 揭示的关键词共现图谱(图 3)表明,关键词频率最高的 5 个节点分别为“局地气候分区(Local climate zone, LCZ)”、“城市热岛(Urban heat island, UHI)”、“地表温度(Land surface temperature, LST)”、“管理(Management)”和“社区(Community)”。

由此可见,LCZ 研究通常根据热环境时空特征分析城市地表景观或人类活动对其驱动机制,开展以热岛效应为主的都市气候研究,探讨规划策略和措施,以提高人类住区在气候变化下的适应性和减少脆弱性为最终目的。统计结果表明,地表温度、城市热岛和热舒适度在 LCZ 研究中受到极大关注,尤其是在 2017 年,国内外有关出版物大幅增加;城市通风、降水与热环境联系密切,也成为研究重点;另外可以观察到近年来 LCZ

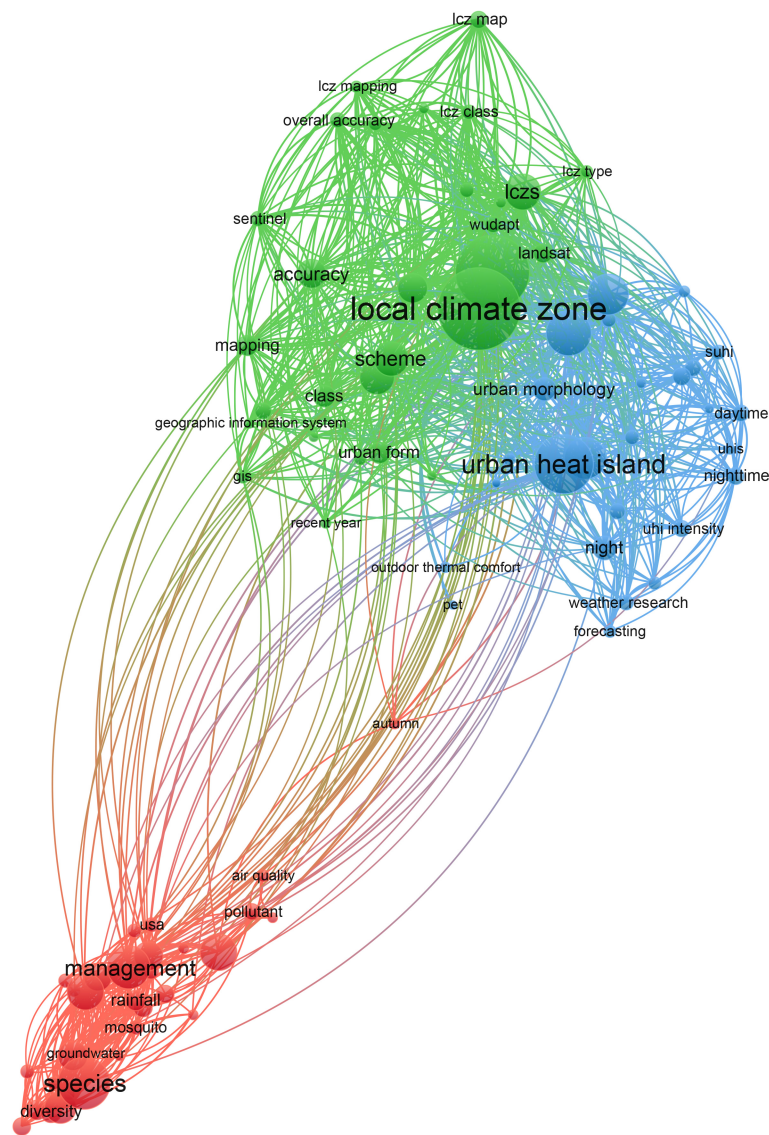


图 3 关键词共现图谱

Fig.3 Keyword co-occurrence map

研究主题发生明显变化,2022 年城市热岛研究减少,热浪研究增加,对户外热风险和生态风险的研究增加(图 4),其中建筑能耗、空调负荷被归入热舒适度)。下文将从 LCZ 框架下城市气候与人居环境的相互作用、人居环境对城市气候的适应性研究两个方面进行综述。

1.2.1 城市气候与人居环境的相互作用

城市气候和人居环境交互影响。热湿环境、风环境、水环境等共同构成了人居环境中的当地气候环境,决定着人居环境适宜性乃至人类生存。同时城市建筑布局、基础设施和人类生产活动等又会给城市气候带来直接或间接影响。深入了解城市气候与人居环境的相互作用有助于趋利避害,一时成为研究热点。研究过程通常涵盖 3 点:① 根据气象条件或多源数据构建指标,量化 LCZ 差异,分析气候要素在局地尺度上的时空特征及演变规律;② 分析城市形态与气候要素的相关关系,探讨城市气候时空异质性的原因及其对人居环境的作用机理;③ 将 LCZ 纳入气候模型,进行精细化的气候评估和预测,以指导区域发展与城市规划。

(1) 热环境与人居环境

受城市化和人为活动的影响,城市热环境在空间上呈现出明显的非均匀分布特征,并且随着气候、地形、

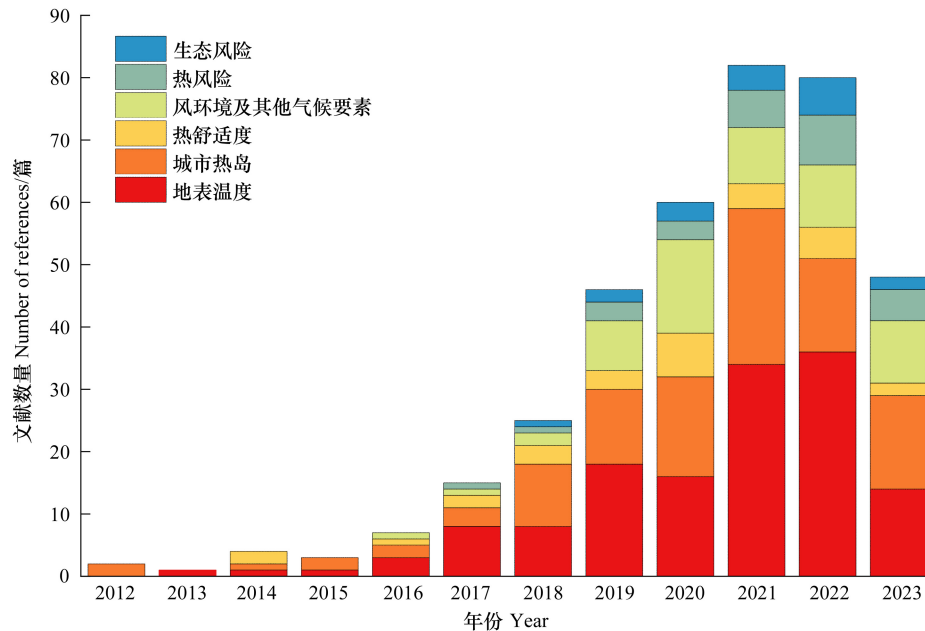


图4 LCZ 框架下城市气候与人居环境研究文献数量逐年变化

Fig.4 Literature number of LCZ-based urban climate and human settlement environment changes by year

建筑、植被和人口等因素而变化。因此,城市热环境成为影响人居环境的关键。传统的气候分区往往只考虑大范围的气候模式,局地气候分区考虑了城市独特的建筑形态和地表特征,以提供更具准确性、精细化的气候评估。Stewart 和 Oke 明确了每个局地气候分区的几何特征和温度范围^[19],并用各类别与 LCZD 之间的温差定义热岛强度,后衍生为不同类型 LCZ 的温差,从而为城市气候研究提供了一个通用框架。在全球使用 LCZ 概念进行热环境分析的研究中,原位测量、移动测量、地表测量、建模等温度获取方法运用最广泛^[40—42]。

LCZ 体系使城市热环境时空格局研究(如 UHI/SUHI 强度)不再局限于城乡温差,更加关注 LCZ 内部和 LCZ 间的热差异^[43]。主要内容有热岛效应与城市结构、绿地与城市热环境、建筑热环境与能耗以及人体热舒适与健康等方面。其中,时间维度通常为昼夜或季节^[44—46]。研究表明相同环境背景下,LCZ4 和 LCZ8 是强 UHI 的发生地^[47];夜晚 UHI 普遍强于白天^[48],且夜晚 LST 最大值出现在 LCZ4 和 LCZ5 中^[49];夏秋季节 LCZ 的 UHI 强于春冬季节^[50—52]。空间维度证明了 LCZ 方案在宏观气候区(干旱、热带、温带和寒带)中城市热环境研究的适用性^[53]。全球来看,基于 LCZ 体系对温带城市的研究最多(图 2),一些研究特别关注了干旱区和气候敏感型城市;此外,研究尺度还包括分析单一城市或其内部社区/街道热特征,以及对相似城市或不同背景气候中的城市进行比较^[54]等。自 2018 年起 LCZ 热环境研究向多元化发展,研究区域开始出现大都市圈或城市群(图 5)。

在热环境驱动机制研究中,LCZ 分类通常为人居环境模型提供数据,并解释获得的结果。LCZ 之间热差异明显^[55—57],且人体对其热感知不同^[58—59]。建筑类型 LCZ 比自然类型 LCZ 更温暖^[60],其中高层和紧凑型 LCZ 比低层和开放型 LCZ 具有更强的储热性能^[61]。一方面,LCZ 框架下的城市物理形态对热环境产生直接影响,如建筑表面反照率、天空开阔度、不透水/透水表面分数、街道峡谷的高宽比、植被覆盖度等^[62—63]。研究证明不透水表面分数和建筑物密度增加将加剧地表变暖^[64]。结合景观格局指数研究发现,自然类型 LCZ 显著影响城市尺度的热环境变化^[65—66]。在大多数温带城市中,植被能够吸收太阳辐射和调节空气温度,提供阴凉并降低热岛强度。但热带地区地表温度升高将限制植被生长^[67]。另一方面,社会经济因素和人类活动是热环境变化的重要驱动因子。LCZ 结合能源模型分析建筑能耗、空调负荷和汽车尾气对热环境的影响,以及利用 LCZ 体系对城市碳排放进行时空建模,为城市减热策略提供了可靠可行的技术流程^[68—70]。研究表明人

口密度高和具备工厂的 LCZ 类型表现出明显的高温,且中心商务区的距离与地表温度成反比^[71-72]。

LCZ 体系推动了寻找城市形态共性与热环境演变规律。目前国内外热环境研究不再局限于 LST 和 UHI,开始从人体感知视角进行。如在 LCZ 框架下利用生理等效温度(PET)和通用热气候指数(UTCI)评估室外热舒适度,研究结果表明绿地和凉爽屋顶能够缓解行人对高温环境的不适感^[73-74]。基于 LCZ 体系评估热浪时期城市内的温度模式,发现热浪对热岛有增强作用^[75]。另外,LCZ 结合城市功能区开发新的城市温度分区系统,将更有利于城市管理和气候治理的落地实施^[76],印证了 LCZ 体系在城市气候研究中的可拓展性。

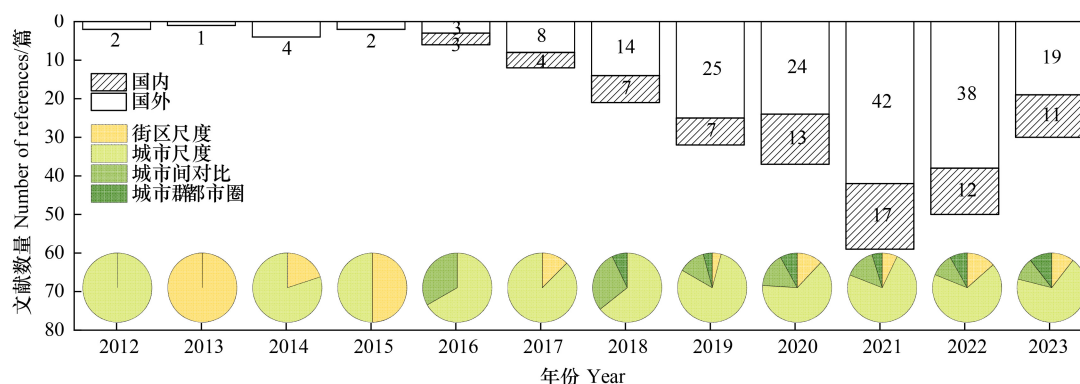


图 5 LCZ 框架下城市热环境研究的文章数量和内容变化

Fig.5 Visualization of the literature content and number on the urban thermal environment under LCZ framework

(2) 风环境及其他气候要素与人居环境

风环境是城市气候的重要组成部分,城市内良好的通风有助于空气污染物稀释和热量扩散。在提供局部风环境信息(风速、风向、风力等)的基础上,基于 LCZ 框架的风环境研究主要内容包括建筑风环境模拟、通风廊道评估、灾害风险预测等。一方面,将 LCZ 分类体系纳入城市气候模型,明晰地表建筑和景观特征,以提升模型精度,预测城市发展对人居环境的潜在影响。其中天气预报模型(WRF)被广泛应用并不断拓展。研究区域则更加关注位于湿热、盆地地区或沿海等气候敏感型城市,这些区域往往空气流通不畅、市内热空气积聚,加剧 UHI 现象的恶性循环;二是关注城市形态的空气动力学特性^[77],针对气候敏感型城市打造通风廊道。利用 LCZ 分类体系模拟地面障碍物,解释大规模气流运动对城市冠层的直接影响,旨在通过合理配置空间形态提升城市气候适宜性。例如 Song 等^[78]指出良好的城市空间形态有利于市内通风,缓解热岛效应可以通过沿河建设中低层建筑区实现。

图 4 显示,LCZ 框架下的风环境及其他气候研究在 2020 年达到最多。之后,LCZ 理论被更多地应用于城市水环境、空气质量以及综合气候评估等研究(表 2)。Mohsen 等^[88]将水文过程参与到气候模型计算中,改进了对 LCZ 热差异的预测;Patel 等^[89]首次对比了强降雨事件中是否将 LCZ 纳入 WRF 模型的模拟结果,验证了 LCZ 提升模型精度的优势;Dunjić 等^[90]研究表明空气湿度与气温显著相关,城市干岛(UDI)效应最常出现在 LCZ2 中,且预计热浪将增加其强度;空气质量研究侧重于量化大气污染物($PM_{2.5}$, PM_{10} , 臭氧等)在 LCZ 中的时空变化,为城市气候精准治理提供依据。总之,LCZ 分类为城市气候和人居环境研究提供了精细化框架。随着城市气候模型的不断完善,学者意识到对城市气候的全面模拟需要充分考虑大气和地表的能量交换,因此越来越多研究开始在 LCZ 基础上将综合气象要素纳入模型。

1.2.2 人居环境对城市气候的适应性研究

极端气候事件增大了人类住区和生态系统的脆弱性。LCZ 分类明确了城市空间形态和内部结构,能够辅助识别高度暴露和脆弱的地区,以指导适应气候变化措施制定。LCZ 框架下探索人居环境对气候风险和生态风险的适应性路径,能够为提高气候风险治理能力提供支撑。

表 2 LCZ 框架下的风环境及其他气候要素应用案例

Table 2 Wind environment and other climate model application cases under LCZ framework

类型 Type	模型/方法 Model/method	城市 Study area	概述 Descriptions	来源 References
风环境 Wind environment	网格尺度分析 LST 与 FAI 关系	沈阳	LST, FAI 和 LCZ 建筑区域之间存在显著正相关关系,然而夏季盛行风难以穿透中心城区,冷风效果难以发挥作用	Li 等 ^[79]
	利用 FAI 构建通风廊道	大连	LCZ 框架下评估通风对 UHI 的影响,验证通风廊道的有效性	Shi 等 ^[80]
	众包风速数据	阿姆斯特丹	分析不同 LCZ 的风速分布	Droste 等 ^[81]
	仿真软件模拟住宅建筑的自然通风潜力	达尔文、悉尼、墨尔本	生成了 LCZ 内自然通风控制策略,表明维持室内热舒适度的最佳选择是利用自然通风	Tan 等 ^[82]
	基于 LCZ 计算城市形态参数和热舒适指数	格拉斯哥	调查了市中心不同朝向的三条街道中与开放性(天空视图系数和纵横比)和表面属性(反照率)相关的 LCZ 参数与城市发展计划和街道设计提案的兼容性,以确定将这些参数用于气候敏感型街道设计的可能性	Maharoor 等 ^[83]
	WRF 结合 LCZ 地图分析城市空间热平衡机制	仙台	定量揭示城市发展与海风影响力的变化,表明 LCZ6 和 LCZ9 转化为了 LCZ6,导致海风(降低空气温度和增加湿度)的影响分别降低了 5 % 和 10 %	Xie 等 ^[84]
	WRF-UCM 耦合模型模拟风场	温州市	LCZ 作为模型下垫面数据,提升了城市台风风廓线模拟精度	Zhang 等 ^[85]
水文 Hydrology	垂直城市天气生成器 (VCWG v2.0.0)	温哥华 巴塞尔	水文过程纳入城市微气候模型,改进了 LCZ 显热和潜热通量的预测	Mohsen 等 ^[86]
降水 Precipitation	比较四次强降雨事件中 LCZ 是否纳入 WRF 模型的模拟结果	孟买	LCZ 框架体现了城市形态特征的异质性,有助于小尺度研究,将 LCZ 纳入 WRF 可显著提高城市地区强降雨模型的可靠性,	Patel 等 ^[87]
湿度 Humidness	在 LCZA 设置参考站点进行实地测量	诺维萨德	分析建筑类型 LCZ 中空气湿度与气温的时空分布及耦合关系,表明 UDI 效应最常出现在密集城市化的 LCZ2,且预计热浪期间时其强度将增加	Dunjić 等 ^[88]
	在 LCZD 设置参考站点进行实地测量	南京	分析了 LCZ 站点之间的气温 (ΔT_{X-D})、相对湿度 (ΔRH_{X-D}) 和湿度比 (ΔW_{X-D}) 差异,表明相对湿度与气温成反比关系	Yang 等 ^[89]
	基于 WUDAPT 的 LCZ 地图,采用 WRF 模型研究城市湿岛的时空变化模式	香港	湿岛效应可以增加区域热风险,超过 37.5% 的社区处于极端脆弱级别。湿岛对人体热舒适的影响在低密度低层地区 (LCZ5, 8, 10) 的白天和高密度高层地区 (LCZ1, 2) 的夜晚占主导地位	Du 等 ^[90]
	多源数据结合机器学习方法	柏林	绘制城市蒸散地图,分析 LCZ 间蒸散变化规律以支持城市规划	Vulova ^[91]
空气质量 Air quality	使用模糊机器学习检测 LCZ 及其对 PM ₁₀ 的影响	德黑兰	平均 PM ₁₀ 含量最高出现在 LCZ10 中,最低在 LCZG,增长最快的是 LCZ4	Maleki 等 ^[92]
	使用 WRF-Chem 模型模拟多层建筑环境,考虑 LCZ 地表覆盖	圣保罗	比较 LCZ 层面的模拟结果与空气质量监测站的测量结果,对臭氧进行分析	Pellegatti ^[93]
	采用 LCZ 和 WUDAPT 0 级数据库作为计算景观指标的基础,通过指标解释 PM _{2.5} 的空间变化	香港	紧凑的土地利用类型在建成区 (LCZ1、LCZ2 和 LCZ4) 的蔓延大大降低了污染扩散潜力。提高邻近地区 LCZ 多样性能够改善空气质量,即使是城市中的稀疏植被也有助于改善空气质量	Shi 等 ^[94]
综合气候环境 Comprehensive climate environment	ENVI-met	南京	计算 9 个 LCZ 类型的天空开阔度,结合小气候和热舒适指数,(气温、地表温度、相对湿度、风速、平均辐射温度和人体舒适度),表明即使在低风速条件下城市形态参数也会影响热舒适性	Lyu 等 ^[95]
	综合气象数据,模拟当前和未来气候情景模式下的气候指数	布尔诺	在已经变暖且人口稠密的中层和/紧凑开发类型 (LCZ2, 3, 5) 中气候指数的增量将更高,而森林地区 (LCZA) 的增量则更低	Geletic 等 ^[96]

FAI:迎风面指数 Frontal area index; WRF:天气研究与预报模型 Weather research and forecasting model; WUDAPT; UCM:城市冠层模型 Urban canopy model; WRF-Chem:区域气象-大气化学在线耦合模式 Weather research and forecasting model coupled to chemistry

(1) 以热风险为首的城市气候风险研究

随着全球气候变化和城市化持续推进,极端高温引起城市居民的热应激增加,尤其是夏季热浪期间脆弱人群(年龄、身体健康状态、体能、社会经济状况等方面)将面临更严峻的高温风险。需要新的指标和方法以确定高度暴露和脆弱的区域,为城市规划实践提供信息,应对城市热环境问题^[97]。特别地,在城市热风险研究中使用 LCZ 体系,不仅能反映地表属性,更强调了其社会意义,体现了居民的社会地位。

早期,IPCC 用暴露、敏感和适应描述热脆弱框架^[98]。热脆弱是指人类处于高温环境时,因缺乏应对和适应能力而产生热应激或受到不利影响的倾向。Cai 等^[99]用归一化地表温度、建筑年龄和房价分别表征热暴露、敏感性和适应性,结果表明 LCZ10 热环境最脆弱,紧凑型 LCZ 比开放型 LCZ 更脆弱,低层建筑比中层/高层建筑更脆弱。在 IPCC 第五次评估报告中实施了关于风险的概念框架,其中风险是危害、暴露和脆弱性的函数。热暴露(Heat Exposure)、热脆弱(Heat Vulnerability)和热危害(Heat Hazards)都能反映高温环境对人体健康产生的不利影响,共同表征城市热风险水平(图 1)。

热暴露是指人类长期处在高温环境中易受到热危害(引发热应激和热相关疾病等)的情况^[100],其强度和时空特征通常由气温、地表温度或热舒适指标结合静态/动态人口数据进行评估。在人口密度大且流动频繁的大城市(如北京、西安、特拉维夫、巴塞罗那),不同 LCZ 类型的热暴露风险存在差异,由高到低通常为低层(密集型)>高层>自然类型^[101-102]。研究表明,时空分布上,LCZ3 在白天的热暴露强度高于 LCZ1 和 LCZ2,但夜间热暴露风险从城市中心向外扩散^[103];驱动因素上,紧凑型建筑(LCZ1—LCZ3)对热暴露风险有正向贡献^[104],风险强度与蓝绿空间可达性成显著负相关关系^[103],所有 LCZ 中南北朝向的街道气温比东西朝向低 2℃^[105]。此外,评估热暴露空间异质性与邻里环境和死亡风险的关联表明,年轻人、非白人和低收入人群更容易遭受热风险^[101]。热危害是指除人体热应激以外,由高温环境导致的对基础设施、生态系统、环境资源等方面的危险、损害。热危害描述了可能引起风险的事物,通常用历史温度上升趋势、测量值或预测值衡量。

将地表景观映射到 LCZ 框架有助于寻找城市热源,实现热风险定点治理。通过构建热风险指数,探究不同 LCZ 城市形态、经济功能、人口密度和热风险水平的关联模式。研究表明,LCZ1—LCZ5 中至少 60%为高风险区域,LCZ7 中 90%以上的面积和居民将遭受热风险^[106],而城市规划中的热危害缓解和气候适应策略将从 LCZ6 中受益更多^[107]。在世界气候研究计划耦合模式工作组的支持下,耦合模式比较计划开始实施,旨在更好的分析过去、现在和未来的气候变化。先后开发了典型浓度排放路径(Representative Concentration Pathway, RCP)和共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathway, SSPs)两种情景。基于此,结合 UTCI 指标和社会经济数据,评估人口和社会经济在高温中的脆弱性,绘制 LCZ 热风险分布图,预测脆弱性和热暴露将大大增加未来城市的热风险^[108-109]。

全球气候变化和人类活动增加了人居环境的脆弱性,已有研究方法和成果有助于深入理解城市遭受风险和应对风险的可能性。本研究整理得到 LCZ 框架下有关人居环境与城市热风险研究文献共 15 篇,大多从完善监测网络(技术层)、风险识别和评估(方法层)以及具体的缓解与适应策略(决策层)方面给出理论指导(图 6)。首先,需要加强气候变量和极端天气事件的监测和预警能力,重点关注室外环境变化和脆弱人群分布;其次,制作热风险可视化地图,进行热风险时空异质性评估,将城市气候数据映射到 LCZ 或社区以定位城市热点,进行热风险初步识别。复杂的市区导致人类受到不均匀的热风险,建筑密集地区(LCZ1—3)遭受热风险概率更高^[110],而白天最舒适的是开放高层建筑区(LCZ4)^[103]。Chen 等^[104]根据热风险强度划定紧急优先区(LCZ1, LCZ2),高优先区(LCZ3, LCZ5),中优先区(LCZ6, LCZ8)和低优先区(LCZA, LCZB, LCZD),提出风险分区治理;Yang 等^[111]根据分区面积和人口规模给出了热舒适最佳的 LCZ 组合。最后,将风险评估与人居环境规划过程相结合,对于减缓城市变暖至关重要。研究表明当增加 60%树木数量与凉爽地面材料(反照率增加 0.4)相结合时空气温度可降低 0.96℃^[112];在 LCZ6 中增加 20%的行道树和灌木能够有效缓解热风险^[113]。此外,凉爽屋顶、绿地和垂直绿化以及增加冷源之间的连通性或蓝绿空间的可达性等均可提升室外热舒适性,绿化策略在人群密集的 LCZ3 和 LCZ9 中更有效^[114];构建通风廊道降温效果显著^[115];考虑到居民

的热脆弱性,有必要加强高温工作者的保障工作,保护易感群体。在基础设施方面应该在城市热点处安装供水点,提供紧急救助和医疗服务等。因此,LCZ 框架对改善热环境的启示在于防范和治理热源、优化冷却效果两方面。

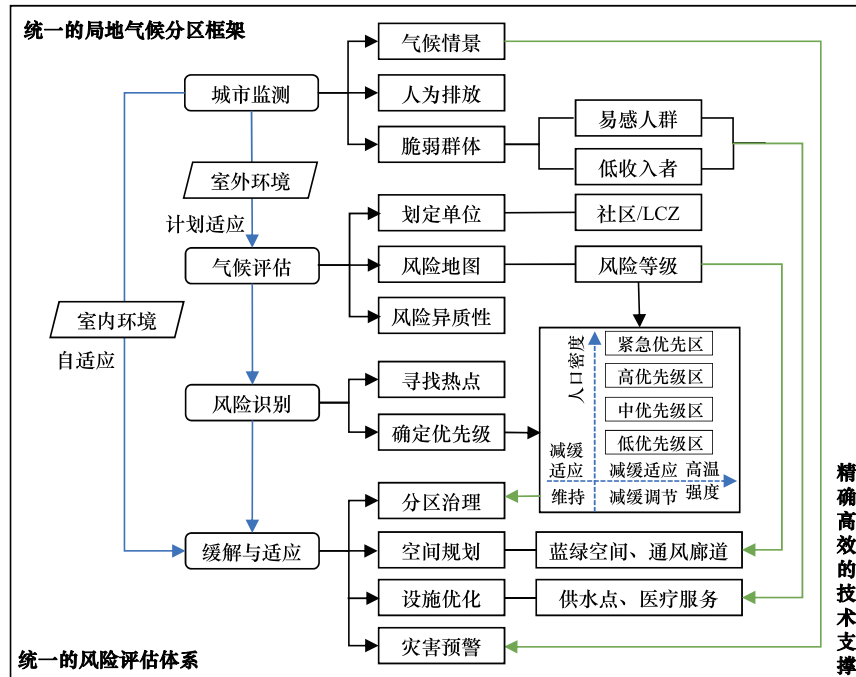


图6 缓解气候变化和人居环境问题可行性策略

Fig.6 Feasible strategies for mitigation of climate change and human settlements

(2) 由气候风险衍生的城市生态风险研究

LCZ 为研究城市气候与生态系统交互模式和动态变化提供了独特的分析框架,为确定生态保护敏感区域提供支持。该类研究最近开始崭露头角,旨在理清人居环境可能存在的生态风险及其对居民健康的影响,探索如何通过减缓气候风险应对城市生态风险,以实现城市可持续发展和生态安全(图7)。

目前,LCZ 框架下的城市生态风险研究有三个特点:强调植被生长的自然特性;更加关注欠发达地区城市;建模与社会调查相结合。主要内容包括以下方面:

其一,探究植被物候规律。用植被生长季节开始(SOS)、结束(EOS)和长度(LOS)三个指标表征植被物候,表明城市化引起的局地气候变化对植物物候产生影响^[116];基于 LCZ 研究植被物候与城市形态、与市中心距离和地表温度的关系,发现区别于温带城市,热带城市中地表温度升高导致植被 LOS 显著缩短^[67]。因此,热带城市在制定缓解策略时,要考虑植被对热岛的敏感性。

其二,深入分析蓝绿空间在生态系统中的作用,印证构建蓝绿基础设施的必要性。不同 LCZ 内增强植被指数和 LST 的空间相关性研究表明不同的 LCZ 需要不同类型的干预措施,且蓝绿基础设施在不同 LCZ 发挥

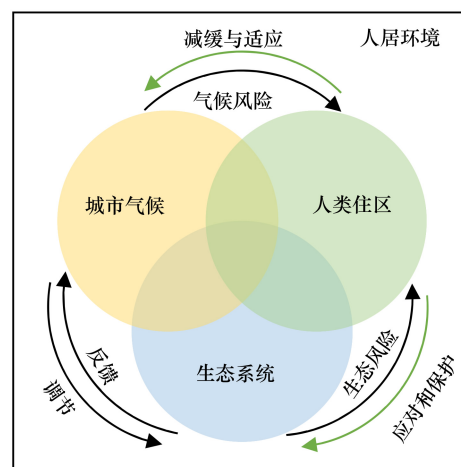


图7 LCZ 框架下的人居环境研究主旨

Fig.7 Main purpose of human settlements research under LCZ framework

作用的潜力具有差异;将水文特征和地形坡度考虑到 LCZ 划分中,便于城市对生态水文特性变化做出反应^[81,117]。

其三,认识到土地对于生态系统的重要性,从土地视角分析生态系统对城市人居环境的响应。研究指出,气候变量通常直接影响人居环境适宜性,但地表景观造成的影响是潜移默化的,合理规划土地能够间接减少气候变化造成的不利影响^[118]。Chen 等首次将 LCZ 体系运用于不同 SSP 情境下的土地利用预测,证明了与人类活动密切相关的城市扩张(LCZ1—LCZ10 面积增加)在土地变化中的主导作用,以及植树造林(LCZA, LCZB 面积增加)等生态管理措施的重要性^[119]。

其四,生态风险将增加社会经济风险,一些研究特别关注了非洲城市。LCZ 的风险感知(恐惧、态度和信任)和心理距离(地理、社会、时间和不确定性)存在显著负相关关系,倡导建筑环境在塑造公众对气候变化风险的认识方面的重要性^[120];在模拟非洲城市 LCZ 疟疾流行率发现,城市地区低于农村地区,以 LCZ7(轻质低层)为代表的非正式住区比其他密集的住宅区患病率更高^[121],该案例讨论了在高度动态的城市环境中更好地理解城市气候与城市内健康问题之间联系的应用。

2 讨论与展望

2021 年以来,有关 LCZ 的综述类文章开始出现^[122—123]。以往综述文章详细整理了 LCZ 发展历程、制图经验及应用现状,然而专题分析普遍局限于 LCZ 在城市热环境中的应用,且具有过程简略、内容单一的特点。本文是对 LCZ 框架下城市气候与人居环境研究的全面总结,内容涵盖 LCZ 已有数据集、以风热环境为主导的城市气候研究、由气候风险衍生的生态风险研究等方面,突出了 LCZ 体系广阔的应用前景。经过梳理,LCZ 框架下城市气候与人居环境研究可从以下方面继续深入:① 从人体感受视角分析 LCZ 中人居环境的热舒适性;② 将 LCZ 代表的地表景观纳入气象模型模拟气候变化,提升气候风险预测准确度,其中对高层建筑的识别精度有待提高;③ 将应对气候变化融入城市规划设计,利用自然和人为方式改善人居环境。

城市气候与人居环境之间的相互作用是复杂而密切的。首先,相关研究在数据获取方面朝向多源化发展,众包数据库^[124]和 GEE 平台增加了数据可获取性和处理效率。LCZ 分类方法的不确定性对研究结果造成一定影响,例如 Yu 等^[35]基于不同网格尺度分析 LCZ 类间地表温度差异,发现 LST 差异在 320 m 尺度下不显著,在 160 m 尺度下显著。目前 LCZ 分类精度大多在 70%—90%之间,建筑类型 LCZ 分类精度较低,未来可通过多源数据融合、机器学习等方法进一步改善。此外,由于人口密度和定居方式是衡量城市发展动力和模式的重要指标,在 LCZ 制图时建议考虑人口分布和社会经济特征,以实现更综合的 LCZ 应用;LCZ 表达的城市形态逐渐成为气候建模的标准,在解释城市功能分区与能耗的关系方面具有潜力^[125];大量个案研究已经证实了 LCZ 分类方案对城市气候和人居环境研究的适用性^[53],洲际对比或全球性研究逐步开展,有必要在统一方法框架下寻找城市气候与人居环境的作用规律和一致性特征。值得注意的是,随着 LCZ 制图方法的普及,LCZ 概念出现滥用现象,研究中不应只关注 LCZ 表达的城市形态特征,更应该回归到其气候本质。

将气候变化思维纳入城市规划对于减少人居环境遭受的风险至关重要。LCZ 体系正在被广泛应用于“热脆弱性”、“气候适应性”研究中,且更加注重考虑社会经济影响。一方面,局部气候变化是全球气候变化和人类社会经济活动对城市人居环境影响的综合表征,解决人居环境问题的关键是将城市气候变化融入城市规划与发展战略之中。在全球气候变化背景下,合理的气候风险治理应结合自然力量 and 人为手段,基于景观格局和土地利用方式综合预测局部气候环境,优化治理单元。另一方面,除气候和生态系统外,城市脆弱性还体现在社会经济层面,经济排名靠后的国家更易遭受高温风险。研究表明居住在 LCZ7(轻质低层建筑)的贫穷人群比 LCZ4 和 LCZ6(开放高层与低层建筑)的富有人群热舒适感更差^[126]。城市内部热暴露的不平等现象增加了低收入区域的挑战,其脆弱性研究值得被关注。总之,根据 LCZ 体系反映的社区经济差异,通过合理的城市规划保护脆弱性社区和人群,这将与联合国可持续发展目标相契合。

3 结论

本研究采用文献计量和专题分析方法,梳理并总结了 LCZ 框架下的城市气候与人居环境研究在 LCZ 制图、相互作用以及适应性三方面的进展,并展望了未来的研究重点。迄今为止全球已在超过 280 座城市开展了 LCZ 相关研究,且大多聚焦在城市热环境和气候风险方面,正在向多要素气候模拟和考虑社会经济因素方向发展。主要结论如下:

(1) 在 LCZ 制图方面:基于 GIS 流程和基于 RS 流程的 LCZ 制图方案各有利弊,将两者结合能够大大提高分类精度。LCZ 全球数据集的推广扩大了研究尺度且丰富了研究内容,为全球城市气候与人居环境研究统一框架提供了有力支撑。此外,将水文和区域社会经济水平考虑到 LCZ 分类中是有必要的。

(2) 在以风热环境为主的城市气候研究方面:个案研究分析了气候要素在局地尺度上的时空特征及演变规律,探讨城市气候时空异质性的原因及其对人居环境的作用机理。目前开始关注城市(群)间的对比乃至更大区域,且随着气候模型的不断完善,越来越多研究开始在 LCZ 城市形态的基础上将综合气象要素纳入模型。

(3) 在应对城市气候风险方面:LCZ 分类明确了城市空间形态和内部结构,能够辅助识别高度暴露和脆弱的地区。基于城市气候与人居环境相互作用的研究成果,近年来的研究更加关注落后贫穷地区,趋向于提供缓解气候变化和人居环境问题的可行性策略,同时揭示适应性策略在城市应对气候变化中的重要性。

本综述将有利于 LCZ 框架下城市气候与人居环境研究现状和发展趋势的宏观把握,有望为后续研究提供思路。

参考文献(References):

- [1] 吴良镛. 人居环境科学导论. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] Tuholske C, Caylor K, Funk C, Verdin A, Sweeney S, Grace K, Peterson P, Evans T. Global urban population exposure to extreme heat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(41): e2024792118.
- [3] Oke T R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*; 1967, 1973, 7(8): 769-779.
- [4] Chang Y, Xiao J F, Li X X, Zhou D C, Wu Y P. Combining GOES-R and ECOSTRESS land surface temperature data to investigate diurnal variations of surface urban heat island. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153652.
- [5] Tayyebi A, Shafizadeh-Moghadam H, Tayyebi A H. Analyzing long-term spatio-temporal patterns of land surface temperature in response to rapid urbanization in the mega-city of Tehran. *Land Use Policy*, 2018, 71: 459-469.
- [6] 江颂, 彭建, 董建权, 程雪雁, 丹宇卓. 地表城市热岛效应的概念内涵与定量刻画. *地理学报*, 2022, 77(9): 2249-2265.
- [7] Li Y T, Li Z L, Wu H, Zhou C H, Liu X Y, Leng P, Yang P, Wu W B, Tang R L, Shang G F, Ma L L. Biophysical impacts of earth greening can substantially mitigate regional land surface temperature warming. *Nature Communications*, 2023, 14: 121.
- [8] Saha S, Saha A, Das M, Saha A, Sarkar R, Das A. Analyzing spatial relationship between land use/land cover (LULC) and land surface temperature (LST) of three urban agglomerations (UAs) of Eastern India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 22: 100507.
- [9] 乔治, 黄宁钰, 徐新良, 孙宗耀, 吴晨, 杨俊. 2003—2017 年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律. *地理学报*, 2019, 74(3): 475-489.
- [10] An N, Dou J J, Gonzalez-Cruz J E, Bornstein R D, Miao S G, Li L. An observational case study of synergies between an intense heat wave and the urban heat island in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2020, 59(4): 605-620.
- [11] Jiang S J, Lee X H, Wang J K, Wang K C. Amplified urban heat islands during heat wave periods. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(14): 7797-7812.
- [12] 耿树丰, 任嘉义, 杨俊, 国安东, 席建超. 局地气候区视角下的城市热环境研究. *生态学报*, 2022, 42(6): 2221-2227.
- [13] Yang J, Fu X R, Qiao L P, Yao L, Zhang F, Li W Y. Characteristics of atmospheric pollution in a Chinese megacity: insights from three different functional areas. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2429.
- [14] Savinda Heshani A L, Winijkul E. Numerical simulations of the effects of green infrastructure on PM_{2.5} dispersion in an urban park in Bangkok, Thailand. *Heliyon*, 2022, 8(9): e10475.

- [15] Chen Y, Yang J, Yang R X, Xiao X M, Xia J H. Contribution of urban functional zones to the spatial distribution of urban thermal environment. *Building and Environment*, 2022, 216: 109000.
- [16] Bastos A, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S, Pongratz J, Fan L, Wigneron J P, Weber U, Reichstein M, Fu Z, Anthoni P, Arneth A, Haverd V, Jain A K, Joetzer E, Knauer J, Lienert S, Loughran T, McGuire P C, Tian H, Viovy N, Zaehle S. Direct and seasonal legacy effects of the 2018 heat wave and drought on European ecosystem productivity. *Science Advances*, 2020, 6(24): eaba2724.
- [17] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9: 3034.
- [18] Kogo B K, Kumar L, Koech R. Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(1): 23-43.
- [19] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [20] Stewart I, Oke T. Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites. Ninth symposium on urban environment, Keystone, CO. 2010: 2-6.
- [21] Stewart I D, Oke T R, Krayenhoff E S. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 1062-1080.
- [22] Oliveira A, Lopes A, Niza S. Local climate zones in five southern European cities: an improved GIS-based classification method based on Copernicus data. *Urban Climate*, 2020, 33: 100631.
- [23] Geletič J, Lehnert M. GIS-based delineation of local climate zones: the case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports*, 2016, 24(3): 2-12.
- [24] Quan J L. Enhanced geographic information system-based mapping of local climate zones in Beijing, China. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(12): 2243-2260.
- [25] Pradhesta Y F, Nurjani E, Arijuddin B I. Local Climate Zone classification for climate-based urban planning using Landsat 8 Imagery (a case study in Yogyakarta Urban Area). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 303(1): 012022.
- [26] Wang Z Y, Cao S S, Du M Y, Song W, Quan J L, Lv Y. Local climate zone classification by seasonal and diurnal satellite observations: an integration of daytime thermal infrared multispectral imageries and high-resolution night-time light data. *Remote Sensing*, 2023, 15(10): 2599.
- [27] Mouzourides P, Eleftheriou A, Kyprianou A, Ching J, Neophytou M K A. Linking local-climate-zones mapping to multi-resolution-analysis to deduce associative relations at intra-urban scales through an example of Metropolitan London. *Urban Climate*, 2019, 30: 100505.
- [28] 陈方丽, 黄媛. 基于 WUDAPT 方法的成都市局地气候分区地图构建及其规划应用研究. *城市建筑*, 2018(20): 29-32.
- [29] Demuzere M, Kittner J, Bechtel B. LCZ generator: a web application to create local climate zone maps. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 637455.
- [30] Huang X, Liu A L, Li J Y. Mapping and analyzing the local climate zones in China's 32 major cities using Landsat imagery based on a novel convolutional neural network. *Geo-spatial Information Science*, 2021, 24(4): 528-557.
- [31] Qiu C P, Schmitt M, Mou L C, Ghamisi P, Zhu X. Feature importance analysis for local climate zone classification using a residual convolutional neural network with multi-source datasets. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1572.
- [32] Zhou L, Shao Z F, Wang S G, Huang X. Deep learning-based local climate zone classification using Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 multispectral imagery. *Geo-spatial Information Science*, 2022, 25(3): 383-398.
- [33] Cao R, Liao C, Li Q, Tu W, Zhu R, Luo N X, Qiu G P, Shi W Z. Integrating satellite and street-level images for local climate zone mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 119: 103323.
- [34] Hammerberg K, Brousse O, Martilli A, Mahdavi A. Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(S1): e1241-e1257.
- [35] Yu W B, Yang J, Wu F, He B J, Yu H S, Ren J Y, Xiao X M, Xia J H. Downscaling mapping method for local climate zones from the perspective of deep learning. *Urban Climate*, 2023, 49: 101500.
- [36] Zhu X X, Hu J L, Qiu C P, Shi Y L, Kang J, Mou L C, Bagheri H, Haberle M, Hua Y S, Huang R, Hughes L, Li H, Sun Y, Zhang G C, Han S Y, Schmitt M, Wang Y Y. So2Sat LCZ42: a benchmark data set for the classification of global local climate zones[software and data sets. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(3): 76-89.
- [37] Demuzere M, Kittner J, Martilli A, Mills G, Moede C, Stewart I D, van Vliet J, Bechtel B. A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 2022, 14(8): 3835-3873.
- [38] Zhu X X, Qiu C P, Hu J L, Shi Y L, Wang Y Y, Schmitt M, Taubenböck H. The urban morphology on our planet-Global perspectives from space. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 269: 112794.

- [39] Ren C, Cai M, Li X W, Zhang L, Wang R, Xu Y, Ng E. Assessment of local climate zone classification maps of cities in China and feasible refinements. *Scientific Reports*, 2019, 9: 18848.
- [40] Pacifici M, Rama F, de Castro Marins K R. Analysis of temperature variability within outdoor urban spaces at multiple scales. *Urban Climate*, 2019, 27: 90-104.
- [41] Leconte F, Bouyer J, Claverie R, Pétrissans M. Analysis of nocturnal air temperature in districts using mobile measurements and a cooling indicator. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130(1): 365-376.
- [42] 江斯达, 占文凤, 杨俊, 刘紫涵, 黄帆, 赖佳梦, 李久枫, 洪发路, 黄媛, 陈吉科, 李旭辉. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展. *地理学报*, 2020, 75(9): 1860-1878.
- [43] Mushore T D, Odindi J, Mutanga O. Controls of land surface temperature between and within local climate zones: a case study of Harare in Zimbabwe. *Applied Sciences*, 2022, 12(24): 12774.
- [44] Dong P, Jiang S D, Zhan W F, Wang C L, Miao S Q, Du H L, Li J F, Wang S S, Jiang L. Diurnally continuous dynamics of surface urban heat island intensities of local climate zones with spatiotemporally enhanced satellite-derived land surface temperatures. *Building and Environment*, 2022, 218: 109105.
- [45] Reis C, Lopes A, Santos Nouri A. Assessing urban heat island effects through local weather types in Lisbon's Metropolitan Area using big data from the Copernicus service. *Urban Climate*, 2022, 43: 101168.
- [46] 金珊合, 张育庆, 杨俊. 城市局部气候分区对地表温度的影响——以大连市为例. *测绘通报*, 2019(4): 87-90.
- [47] Wang R, Cai M, Ren C, Bechtel B, Xu Y, Ng E. Detecting multi-temporal land cover change and land surface temperature in Pearl River Delta by adopting local climate zone. *Urban Climate*, 2019, 28: 100455.
- [48] Xia H P, Chen Y H, Song C H, Li J X, Quan J L, Zhou G M. Analysis of surface urban heat islands based on local climate zones via spatiotemporally enhanced land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 273: 112972.
- [49] Dimitrov S, Popov A, Iliev M. An application of the LCZ approach in surface urban heat island mapping in Sofia, *Bulgaria*. *Atmosphere*, 2021, 12(11): 1370.
- [50] Han L Y, Lu L L, Fu P, Ren C, Cai M, Li Q T. Exploring the seasonality of surface urban heat islands using enhanced land surface temperature in a semi-arid city. *Urban Climate*, 2023, 49: 101455.
- [51] 刘诗喆, 谢苗苗, 武蓉蓉, 王亚男, 李新宇. 地理单元划分对城市热环境响应规律的影响——以北京为例. *地理科学进展*, 2021, 40(6): 1037-1047.
- [52] 陈亚萍, 郑伯红, 谢杨辉, 曾祥平. 局地气候区框架下的城市热岛特征及缓解策略——以郴州市为例. *城市规划*, 2023, 47(12): 106-116.
- [53] Eldesoky A H M, Gil J, Pont M B. The suitability of the urban local climate zone classification scheme for surface temperature studies in distinct macroclimate regions. *Urban Climate*, 2021, 37: 100823.
- [54] Lemoine-Rodríguez R, Inostroza L, Zepp H. Does urban climate follow urban form? Analysing intraurban LST trajectories versus urban form trends in 3 cities with different background climates. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154570.
- [55] Yang X S, Yao L Y, Zhu C L, Jin T, Peng L L. Analysis of Local Heat Islands in Nanjing, China, based on the Local Climate Zone Scheme. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 2501-2508.
- [56] Nurwanda A, Honjo T. Analysis of land use change and expansion of surface urban heat island in bogor city by remote sensing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(5): 165.
- [57] Beck C, Straub A, Breitner S, Cyrus J, Philipp A, Rathmann J, Schneider A, Wolf K, Jacobeit J. Air temperature characteristics of local climate zones in the Augsburg urban area (Bavaria, southern Germany) under varying synoptic conditions. *Urban Climate*, 2018, 25: 152-166.
- [58] Ren J Y, Yang J, Zhang Y Q, Xiao X M, Xia J C, Li X M, Wang S H. Exploring thermal comfort of urban buildings based on local climate zones. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130744.
- [59] Lam C K C, Shooshtarian S, Kenawy I. Assessment of urban physical features on summer thermal perceptions using the local climate zone classification. *Building and Environment*, 2023, 236: 110265.
- [60] Unal Cilek M, Cilek A. Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69: 102877.
- [61] O'Malley C, Kikumoto H. An investigation into heat storage by adopting local climate zones and nocturnal-diurnal urban heat island differences in the Tokyo Prefecture. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 83: 103959.
- [62] Wu Y H, Mashhoodi B, Patuano A, Lenzholzer S, Narvaez Zertuche L, Acred A. Heat-prone neighbourhood typologies of European cities with temperate climate. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104174.
- [63] Kotharkar R, Bagade A, Ramesh A. Assessing urban drivers of canopy layer urban heat island: a numerical modeling approach. *Landscape and*

- Urban Planning, 2019, 190: 103586.
- [64] Mushore T D, Mutanga O, Odindi J. Estimating urban LST using multiple remotely sensed spectral indices and elevation retrievals. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78: 103623.
- [65] Yan H, Yang S M, Guo X H, Wu F, Wu R W, Shao F, Bao Z Y. Impact of land cover composition and structure on air temperature based on the local climate zone scheme in Hangzhou, China. *Atmosphere*, 2021, 12(8): 936.
- [66] Zhang L, Nikolopoulou M, Guo S J, Song D Y. Impact of LCZs spatial pattern on urban heat island: a case study in Wuhan, China. *Building and Environment*, 2022, 226: 109785.
- [67] Kabano P, Lindley S, Harris A. Evidence of urban heat island impacts on the vegetation growing season length in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 206: 103989.
- [68] Kotharkar R, Ghosh A, Kapoor S, Reddy D G K. Approach to local climate zone based energy consumption assessment in an Indian city. *Energy and Buildings*, 2022, 259: 111835.
- [69] Yang X S, Peng L L H, Jiang Z D, Chen Y, Yao L Y, He Y F, Xu T J. Impact of urban heat island on energy demand in buildings: local climate zones in Nanjing. *Applied Energy*, 2020, 260: 114279.
- [70] Zhou X L, Yamamoto M, Yan S T, Ishida Y, Cai M, Ji Q F, Makvandi M, Li C C. Exploring the impacts of heat release of vehicles on urban heat mitigation in Sendai, Japan using WRF model integrated with urban LCZ. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 82: 103922.
- [71] Zhang Y T, Li D L, Liu L B, Liang Z, Shen J S, Wei F L, Li S C. Spatiotemporal characteristics of the surface urban heat island and its driving factors based on local climate zones and population in Beijing, China. *Atmosphere*, 2021, 12(10): 1271.
- [72] Cai Z, Tang Y, Zhan Q M. A cooled city? Comparing human activity changes on the impact of urban thermal environment before and after city-wide lockdown. *Building and Environment*, 2021, 195: 107729.
- [73] Fernandes M E, Masiero R. Relationship between outdoor thermal comfort and Local Climate Zones. *urbe. Revista Brasileira de Gesto Urbana*, 2020, 12: e20190247-e20190247.
- [74] 姜之点, 彭立华, 杨小山, 姚灵烨, 朱春磊. 街区尺度屋顶绿化热效应及其与城市形态结构之间的关系. *生态学报*, 2018, 38(19): 7120-7134.
- [75] Molnár G, Gyöngyösi A Z, Gál T. Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1): 1139-1158.
- [76] Yu Z W, Jing Y C, Yang G Y, Sun R H. A new urban functional zone-based climate zoning system for urban temperature study. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 251.
- [77] Nagel T, Schoetter R, Bourgin V, Masson V, Onofri E. Drag coefficient and turbulence mixing length of local climate zone-based urban morphologies derived using obstacle-resolving modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 2023, 186(3): 737-769.
- [78] Song B, Park K. Mountain valley cold air flow interactions with urban morphology: a case study of the urban area of Changwon, South Korea. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 233: 104703.
- [79] Li L G, Zhao Z Q, Wang H B, Shen L D, Liu N W, He B J. Variabilities of land surface temperature and frontal area index based on local climate zone. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 2166-2174.
- [80] Shi Z P, Yang J, Zhang Y Q, Xiao X M, Xia J C. Urban ventilation corridors and spatiotemporal divergence patterns of urban heat island intensity: a local climate zone perspective. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(49): 74394-74406.
- [81] Droste A M, Heusinkveld B G, Fenner D, Steeneveld G J. Assessing the potential and application of crowdsourced urban wind data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(731): 2671-2688.
- [82] Tan Z J, Deng X. Assessment of natural ventilation potential for residential buildings across different climate zones in Australia. *Atmosphere*, 2017, 8(9): 177.
- [83] Maharoo N, Emmanuel R, Thomson C. Compatibility of local climate zone parameters for climate sensitive street design: influence of openness and surface properties on local climate. *Urban Climate*, 2020, 33: 100642.
- [84] Xie Y H, Ishida Y, Watanabe H, Mochida A. Impacts of urban development between 2002 and 2022 on the effects of sea breezes in Sendai, Japan—analyzing heat balance mechanism in urban space. *Atmosphere*, 2023, 14(4): 677.
- [85] Zhang Y X, Cao S Y, Zhao L, Cao J X. A case application of WRF-UCM models to the simulation of urban wind speed profiles in a typhoon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 220: 104874.
- [86] Moradi M, Kravynhoff E S, Aliabadi A A. A comprehensive indoor-outdoor urban climate model with hydrology: the Vertical City Weather Generator (VCWG v2.0.0). *Building and Environment*, 2022, 207: 108406.
- [87] Patel P, Karmakar S, Ghosh S, Niyogi D. Improved simulation of very heavy rainfall events by incorporating WUDAPT urban land use/land cover in WRF. *Urban Climate*, 2020, 32: 100616.

- [88] Dunjić J, Milošević D, Kojić M, Savić S, Lužanin Z, Šećerov I, Arsenović D. Air humidity characteristics in “local climate zones” of Novi sad (serbia) based on long-term data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(12): 810.
- [89] Yang X S, Peng L L H, Chen Y, Yao L Y, Wang Q Q. Air humidity characteristics of local climate zones: a three-year observational study in Nanjing. *Building and Environment*, 2020, 171: 106661.
- [90] Du R Q, Song J Y, Huang X J, Wang Q, Zhang C, Brousse O, Chan P W. High-resolution regional modeling of urban moisture island: mechanisms and implications on thermal comfort. *Building and Environment*, 2022, 207: 108542.
- [91] Vulova S, Rocha A D, Meier F, Nouri H, Schulz C, Soulsby C, Tetzlaff D, Kleinschmit B. City-wide, high-resolution mapping of evapotranspiration to guide climate-resilient planning. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 287: 113487.
- [92] Maleki M, Asadi M, Naghadehi S Z, Khosravi A, Wang J Y, Stewart I D, Shakeryari M. Detecting local climate zone change and its effects on PM₁₀ distribution using fuzzy machine learning in Tehran, Iran. *Urban Climate*, 2023, 49: 101506.
- [93] Pellegatti Franco D M, de Fatima Andrade M, Ynoue R Y, Ching J. Effect of Local Climate Zone (LCZ) classification on ozone chemical transport model simulations in Sao Paulo, Brazil. *Urban Climate*, 2019, 27: 293-313.
- [94] Shi Y, Ren C, Lau K K L, Ng E. Investigating the influence of urban land use and landscape pattern on PM_{2.5} spatial variation using mobile monitoring and WUDAPT. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 15-26.
- [95] Lyu T, Buccolieri R, Gao Z. A numerical study on the correlation between sky view factor and summer microclimate of local climate zones. *Atmosphere*, 2019, 10(8): 438.
- [96] Geletič J, Lehnert M, Dobrovolný P, Žuvela-Aloise M. Spatial modelling of summer climate indices based on local climate zones: expected changes in the future climate of Brno, Czech Republic. *Climatic Change*, 2019, 152(3): 487-502.
- [97] 陈恺, 唐燕. 城市局部气候分区研究进展及其在城市规划中的应用. *南方建筑*, 2017(2): 21-28.
- [98] Estoque R C, Ooba M, Seposo X T, Togawa T, Hijioka Y, Takahashi K, Nakamura S. Heat health risk assessment in Philippine cities using remotely sensed data and social-ecological indicators. *Nature Communications*, 2020, 11: 1581.
- [99] Cai Z, Tang Y, Chen K, Han G F. Assessing the heat vulnerability of different local climate zones in the old areas of a Chinese megacity. *Sustainability*, 2019, 11(7): 2032.
- [100] Leichter T, Kühn M, Droin A, Beck C, Hiete M, Taubenböck H. Quantifying urban heat exposure at fine scale-modeling outdoor and indoor temperatures using citizen science and VHR remote sensing. *Urban Climate*, 2023, 49: 101522.
- [101] Liu S J, Wu A M, Ho H C. Spatial variability of diurnal temperature range and its associations with local climate zone, neighborhood environment and mortality in Los Angeles. *Urban Climate*, 2023, 49: 101526.
- [102] Gilabert J, Deluca A, Lauwaet D, Ballester J, Corbera J, Llasat M C. Assessing heat exposure to extreme temperatures in urban areas using the Local Climate Zone classification. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(1): 375-391.
- [103] Yuan B, Zhou L, Hu F N, Zhang Q. Diurnal dynamics of heat exposure in Xi'an: a perspective from local climate zone. *Building and Environment*, 2022, 222: 109400.
- [104] Chen B, Xie M M, Feng Q Q, Wu R R, Jiang L. Diurnal heat exposure risk mapping and related governance zoning: a case study of Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 81: 103831.
- [105] Moshe M, Michal F, Noa M, Oded P. Urban spatial patterns and heat exposure in the Mediterranean city of tel aviv. *Atmosphere*, 2020, 11(9): 963.
- [106] Zhou Y, Zhang G L, Jiang L, Chen X, Xie T Q, Wei Y K, Xu L, Pan Z H, An P L, Lun F. Mapping local climate zones and their associated heat risk issues in Beijing: based on open data. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 74: 103174.
- [107] Ma L, Huang G A, Johnson B A, Chen Z J, Li M C, Yan Z Y, Zhan W F, Lu H, He W Q, Lian D J. Investigating urban heat-related health risks based on local climate zones: a case study of Changzhou in China. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 91: 104402.
- [108] Paranunzio R, Dwyer E, Fitton J M, Alexander P J, O'Dwyer B. Assessing current and future heat risk in Dublin city, Ireland. *Urban Climate*, 2021, 40: 100983.
- [109] Verdonck M L, Demuzere M, Hooyberghs H, Priem F, Van Coillie F. Heat risk assessment for the Brussels capital region under different urban planning and greenhouse gas emission scenarios. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109210.
- [110] Savić S, Marković V, Šećerov I, Pavić D, Arsenović D, Milošević D, Dolinaj D, Nagy I, Pantelić M. Heat wave risk assessment and mapping in urban areas: case study for a midsized Central European city, Novi Sad (Serbia). *Natural Hazards*, 2018, 91(3): 891-911.
- [111] Yang J, Wang Y C, Xiu C L, Xiao X M, Xia J H, Jin C. Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 123767.
- [112] Chen Y P, Zheng B H, Hu Y Z. Numerical simulation of local climate zone cooling achieved through modification of trees, albedo and green roofs—a case study of Changsha, China. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2752.

- [113] Yao Y B, Wang Y F, Ni Z B, Chen S Q, Xia B C. Improving air quality in Guangzhou with urban green infrastructure planning: an i-Tree Eco model study. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 369: 133372.
- [114] Kotharkar R, Bagade A, Singh P R. A systematic approach for urban heat island mitigation strategies in critical local climate zones of an Indian city. *Urban Climate*, 2020, 34: 100701.
- [115] Wu J S, Liu C, Wang H L. Analysis of Spatio-temporal patterns and related factors of thermal comfort in subtropical coastal cities based on local climate zones. *Building and Environment*, 2022, 207: 108568.
- [116] Zhao C H, Weng Q H, Wang Y G, Hu Z M, Wu C Y. Use of local climate zones to assess the spatiotemporal variations of urban vegetation phenology in Austin, Texas, USA. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1): 393-409.
- [117] Kopp J, Frajer J, Novotná M, Preis J, Dolejš M. Comparison of ecohydrological and climatological zoning of the cities: case study of the city of pilsen. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(5): 350.
- [118] Jung S H, Kim A R, An J H, Lim C H, Lee H, Lee C S. Abnormal shoot growth in Korean red pine as a response to microclimate changes due to urbanization in Korea. *International Journal of Biometeorology*, 2020, 64(4): 571-584.
- [119] Chen G, Xie J, Li W, Li X, Chung LCH, Ren C, Liu X. Future "local climate zone" spatial change simulation in Greater Bay Area under the shared socioeconomic pathways and ecological control line. *Building and Environment*, 2021, 203.
- [120] Aslam A, Ahmad Rana I. Impact of the built environment on climate change risk perception and psychological distancing: empirical evidence from Islamabad, Pakistan. *Environmental Science & Policy*, 2022, 127: 228-240.
- [121] Brousse O, Georganos S, Demuzere M, Dujardin S, Lennert M, Linard C, Snow R W, Thiery W, van Lipzig N P M. Can we use local climate zones for predicting malaria prevalence across sub-Saharan African cities? *Environmental Research Letters: ERL [Web Site]*, 2020, 15(12): 124051.
- [122] Aslam A, Ahmad Rana I. The use of local climate zones in the urban environment: a systematic review of data sources, methods, and themes. *Urban Climate*, 2022, 42: 101120.
- [123] Lehnert M, Savić S, Milošević D, Dunjić J, Geletić J. Mapping local climate zones and their applications in European urban environments: a systematic literature review and future development trends. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(4): 260.
- [124] Brousse O, Simpson C, Walker N, Fenner D, Meier F, Taylor J, Heaviside C. Evidence of horizontal urban heat advection in London using six years of data from a citizen weather station network. *Environmental Research Letters: ERL [Web Site]*, 2022, 17(4): 044041.
- [125] Bansal P, Quan S J. Relationships between building characteristics, urban form and building energy use in different local climate zone contexts: an empirical study in Seoul. *Energy and Buildings*, 2022, 272: 112335.
- [126] Villadiego K, Velay-Dabat M A. Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: a field study in Barranquilla. *Building and Environment*, 2014, 75: 142-152.