

刘火胜,李思韬,宛浩凯,等.基于局地气候分区的武汉市城市热岛时空分异特征[J].华中农业大学学报,2023,42(4):98-106.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.011

基于局地气候分区的武汉市城市热岛时空分异特征

刘火胜¹,李思韬²,宛浩凯²,余乾慧¹,吴昌广²

1. 武汉市公共气象服务中心,武汉 430040; 2. 华中农业大学园艺林学院,武汉 430070

摘要 为精细化评估武汉市城市热岛时空分异特征以辅助气候适应性设计工作,基于局地气候分区(local climate zone,LCZ)体系对武汉中心城区气温进行观测,分析了连续3 a夏冬时段的6类建筑空间和3类自然空间热岛强度(urban heat island intensity,UHII)的时空分异,并探讨了不同LCZ类型的日平均UHII差异、逐时UHII变化及同种LCZ类内UHII差异及其影响因素。结果显示:各LCZ在夏冬两季可保持稳定日平均UHII类间差异,其中建筑高度越高的LCZ类型其UHII越高,特别是开阔高层(LCZ 4)和开阔中层(LCZ 5),而稀疏树林(LCZ B)、茂密树林(LCZ A)、开阔低层(LCZ 6)和零散建筑(LCZ 9)总体保持0℃以下;UHII逐时变化方面,LCZ A与其他LCZ类型存在明显差异,日出后8 h范围内LCZ A表现为快速上升后下降,其他类型则呈快速下降后稳定上升趋势;单日内,各LCZ的UHII呈“夏强冬弱、昼弱夜强”的特性,其中LCZ 9与LCZ A能够长时间维持“城市冷岛”效应以缓解局部热环境,而LCZ 4是唯一夏冬两季UHII均保持在0℃以上的类型;具有中层高度特征的LCZ 2和LCZ 5表现出显著的类内UHII差异,同类LCZ位于城区中部地块受城市冠层通风阻碍的影响其UHII比城区边界地块高。研究结果表明,LCZ类间UHII差异在夏冬两季稳定存在,而LCZ类内UHII显著性差异主要受武汉城市空间结构的驱动,密集的中心城区由于通风效能低下和人为热排放频繁而更易于导致局部高温。

关键词 局地气候分区; 城市热岛; 空气温度; 热岛强度

中图分类号 P463.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0098-09

城市热环境是主导城市生态环境的重要因素之一,其最明显的特征就是城市热岛效应^[1]。随着城市持续高速发展和人为热排放快速增加,城市热岛效应不断加剧,在导致城市高温问题频发的同时还伴随着城市大气污染物聚集、户外热舒适性下降等诸多环境问题,严重影响了城市居民生活质量^[2]。阐明城市热岛效应的时空变化特征,揭示其形成机制并提出适应性对策成为气候变化和城市化研究的热点问题^[3-4]。

城市热岛强度(urban heat island intensity,UHII)通常指城市与其周围郊区气温的差值,UHII在一定程度上消除局地气候变化的影响,因而用于反映城市化对城乡温度的影响程度^[2, 5-6],其计算方法主要包含遥感反演和气象站资料法^[7]。借助遥感反演技术,以往研究重点关注于解析二维空间格局对城市

热岛效应分布的影响^[8]。Yang等^[9]研究了城市建设强度对地表热环境的驱动规律,发现紧凑密集的建筑群更容易导致区域高温。黄亚平等^[10]利用城市管理单元分析了武汉地表温度的空间分异,识别了城市高温区的空间分布及其发展趋势。考虑到遥感观测在反演精度和时间连续性上的局限^[11],有研究利用局地观测数据,通过空间插值法以分析城市下垫面要素对热岛效应时空分异的影响。骆杨等^[12]发现杭州市主体城市热岛强度最大并向外逐渐减弱,且这一特性会受到居民活动的影响而在每周的周末更为强烈。孟凡超等^[13]探讨了天津市UHII时空分布规律,在空间维度上,市中心为强热岛区并向四周辐射,绿地和水体对UHII增强具有一定缓解作用;在时间维度上,冬季UHII高于其他季节,并以22:00到次日06:00的夜间UHII更为强烈。

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 湖北省气象局科技发展基金项目(2021Y12); 武汉市园林和林业局科技基金项目(WHGF2022A05); 中央高校基本科研业务费专项(2662022YLYJ002)

刘火胜,E-mail:liu376752469@163.com

通信作者: 吴昌广,E-mail:wcg@mail.hzau.edu.cn

城市下垫面空间是高度异质且复杂的,由于相关研究难以清晰地描述城市内部异构组成与UHII的关系,使得现有结论仍难以有效运用于基于局部热环境改善的城市规划设计过程。因此,对于空间形态高度异质性发展的大中型城市,有必要精细化区分城市三维空间类型从而有效研究城市复杂下垫面空间对热环境的影响^[14-15]。Stewart等^[16]提出一种基于局地气候区(local climate zone, LCZ)的分类体系,根据地表覆盖、结构、材质和人类活动等因素将城市下垫面划分为10类建筑环境型空间(LCZ 1~10)和7类自然环境型空间(LCZ A~G),为标准化地分析城市内部的热岛效应时空分异特征提供了新思路。相关研究广泛分析了LCZ类型在复杂空间背景和多种时间尺度下的热环境差异,显示了方法的基本合理性^[17],但仍存在局限。首先,由近地表气温表征的“冠层热岛”对揭示三维空间要素对热环境的综合影响至关重要^[18],但目前在城市范围内将LCZ与高密度气象资料相结合的工作仍非常有限,这不利于充分理解真实城市内LCZ的热岛强度时空异质性特征。同时,相关研究通常聚焦于评估“LCZ类间”的热环境大小关系以指导规划设计工作,而对“LCZ类内”差异的探索还不够充分^[17],忽略了外部城市空间结构、建筑布局及自然环境等多种因素对LCZ热环境的潜在影响。

随着我国地面自动气象站布设工作的推进,连续多年的气象观测资料为城市热岛精细化气候特征研究提供了数据基础^[13]。本研究以我国中部重要的大型现代城市武汉市为例,利用城市气象观测网络

分析武汉市多种LCZ类型在夏冬两季的类间和类内UHII时空分异,为城市热岛效应缓解措施的制定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

武汉市属亚热带季风性气候,具有冬冷夏热和四季分明的特点。随着城市化建设不断推进,武汉形成了以中心城区为核心,6个城市新城环绕的空间格局。中心城区具有“圈层式”的空间结构模式,是市域内城市化程度最高的区域,面积约为905.52 km²,常住人口达700万^[19]。与深圳、杭州等大型城市的快速城市化过程相似^[20-21],为适应有限的城市用地和人口增长,近年来更加密集的建筑布局和新建高层建筑使得武汉中心城区的下垫面三维空间形态呈现显著异质化特征,进而导致城市内部热环境时空分布特征的高度复杂。

1.2 数据来源

所用气象观测资料来源于武汉市气象部门,包括武汉市中心城区范围内自动气象站2019—2021年夏(6月至8月)冬(12月至次年2月)两季逐时气温资料(图1)。为尽可能保证气象观测过程的准确性,中心城区所选气象站统一海拔为20~30 m,且气象站数据采集信息丢失率低于0.5%^[21-23]。基于此,共选择22处自动气象站点。结合Stewart等^[16]对LCZ空间范围的定义及Zhang等^[24]在武汉市LCZ分区过程中提出的适宜基底单元尺寸,以站点0.5 km直径范围内的缓冲区域进行LCZ分类。结合Landsat-8城



图1 武汉市22处城市气象站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of 22 urban weather stations in Wuhan

市高清卫星影像及基于QGIS提取的城市三维空间信息,22处区域气象站点所处空间类型分别对应于9种LCZ,其中6种为建筑空间类LCZ(包含LCZ 2、

LCZ 3、LCZ 4、LCZ 5、LCZ 6和LCZ 9),3种为自然空间类LCZ(分别为LCZ A、LCZ B、LCZ D),涵盖了中心城区常见的空间形态类型(表1)。

表1 武汉市22处气象站点及其LCZ类型

Table 1 A description of 22 weather stations and their LCZ types in Wuhan

No.	站点影像 Image	类型 Type	描述 Description	No.	站点影像 Image	类型 Type	描述 Description	No.	站点影像 Image	类型 Type	描述 Description	No.	站点影像 Image	类型 Type	描述 Description
1		LCZ 2 密集集中层建筑	密集中层建筑(6~9层),少量开敞空间分布	7		LCZ 3 密集低层建筑	连栋、致密的低层建筑(2~3层)	13		LCZ 5 开阔中层建筑	中层建筑(3~5层),开敞的建筑间距	19		LCZ 9 零散建筑	少量建筑分布,内部有集中的大型绿色空间
2		LCZ 2 密集集中层建筑	密集中层建筑(6~9层),建筑布局均匀	8		LCZ 3 密集低层建筑	连栋、致密的低层建筑(2~3层)	14		LCZ 5 开阔中层建筑	中层建筑(4~6层),集中的开敞空间	20		LCZ A 茂密树林	处于森林公园内部,密集的乔木分布
3		LCZ 2 密集集中层建筑	密集中层建筑(6~9层),建筑布局均匀	9		LCZ 4 开阔高层建筑	高层建筑(20~30层),开敞的建筑间距	15		LCZ 5 开阔中层建筑	中层建筑(3~5层),开敞的建筑间距	21		LCZ B 稀疏树林	乔木和绿地为主,内部包含多处大型开敞空间
4		LCZ 2 密集集中层建筑	密集中层建筑(4~6层),少量开敞空间分布	10		LCZ 4 开阔高层建筑	高层建筑(15~20层),开敞的建筑间距	16		LCZ 5 开阔中层建筑	中层建筑(3~6层),开敞的建筑间距	22		LCZ D 低矮植被	耕地内分布多处灌木,空间开敞
5		LCZ 2 密集集中层建筑	密集中层建筑(4~6层),内部空间紧凑	11		LCZ 5 开阔中层建筑	中层建筑(3~5层),开敞的建筑间距	17		LCZ 6 开阔低层建筑	低层建筑(1~3层),内部有多处大型开敞空				
6		LCZ 3 密集低层历史街区	密集低层历史街区(1~2层)	12		LCZ 5 开阔中层建筑	中层建筑(3~6层),集中的开敞空间	18		LCZ 9 零散建筑	少量建筑分布,内部有集中的大型绿色空间				

1.3 典型气象日选取

城市热岛效应与气象背景条件关系密切,少云、微风的天气条件更适合观测和分析城市热岛的时空变化。本研究采用Oke^[25]提出的天气因子(weather factor, Φ_w)快速选取符合上述天气特征的气象日,计算公式如式(1)所示:

$$\Phi_w = v^{-1/2} (1 - kn^2) \quad (1)$$

式(1)中 v 为风速, n 为云量, 系数 k 则根据云的种类取值^[26]。其中, $\Phi_w = 0$ 代表无热岛效应, 而 $\Phi_w = 1$ 表明有最大热岛效应。逐时风速来源于武汉气象站, 逐时云量和云种类数据来源于中国气象局气象数据中心(<https://data.cma.cn/>)。参考相关筛选标准^[27-28], 依据 $\Phi_w \geq 0.7$ 且无降水的标准进行典型气象日选取, 2019—2021年夏冬两季分别有 157 d(夏 77 d、冬 80 d)、155 d(夏 80 d、冬 75 d) 和 164 d(夏 83 d、冬 81 d) 符合选取标准。

1.4 数据分析

LCZ 的 UHII 时空分异特征评估包含类间差异和类内差异 2 个层面。对于类间差异, 不同年份分别统计夏冬两季的 LCZ 日平均 UHII 及逐时 UHII 变化。其中, 基于 LCZ 体系的 UHII 计算如式(2)所示:

$$I_{UHII(LCZ_x)} = T_{LCZ_x} - T_{LCZD} \quad (2)$$

其中, T_{LCZ_x} 为中心城区内各 LCZ 类型的气温,

T_{LCZD} 为 LCZ D 的气温。

对于 LCZ 类内 UHII 差异, 首先结合 ArcGIS 平台定性识别中心城区夏冬两季平均 UHII 的空间分布特征。在此基础上, 采用单因子方差分析(one-way ANOVA)量化评估同类 LCZ 的类内热环境差异。由于方差分析包含正态性和方差齐性的前置条件, 因此, 分析前需在 95% 的置信水平进行正态性检验和方差齐性检验, 以评估正态性假设。本研究验证了温度分布的正态性, 即各站点在典型气象日所记录的逐时气温数据均符合正态分布, 且所选测量数据均符合方差齐性, 具有统计学意义。由于单因子方差分析无法明确评估具体站点间的差异, 因而针对类内热环境差异显著的 LCZ 类型, 进一步采用 Tukey-HSD(honest significant difference)事后分析对比类内不同站点的 UHII, 识别并分析具有显著类内差异的关键站点。

2 结果与分析

2.1 夏冬两季 LCZ 热岛强度类间差异

1) 日平均 UHII 变化特征。为比较不同 LCZ 类型的 UHII 差异, 首先绘制了各 LCZ 于 2019—2021 年夏冬两季的逐日平均 UHII 箱形统计图(图 2)。由

图2可知,除2019年夏及2020年冬,不同LCZ类型保持了稳定的日平均UHII类间差异。对于建筑类空间,开阔高层型(LCZ 4)的热岛效应最为显著,其次是开阔中层型(LCZ 5)、密集中层型(LCZ 2)和密集低层型(LCZ 3)。LCZ 4的日平均UHII最高,该类空间主要为新建的高层现代小区或商业区域;LCZ 5和LCZ 2的日平均UHII略低,主要对应为中

层居住区和校园等。与其他建筑类空间不同,开阔低层型(LCZ 6)及零散建筑型(LCZ 9)的日平均UHII总体低于自然类空间,尤其是LCZ 9的日平均UHII低至-0.6℃及以下。对于自然类空间,茂密树林型(LCZ A)的平均UHII最低,其次是稀疏树林型(LCZ B),而低矮植被型(LCZ D)的UHII则接近建筑类的密集低层(LCZ 3)。

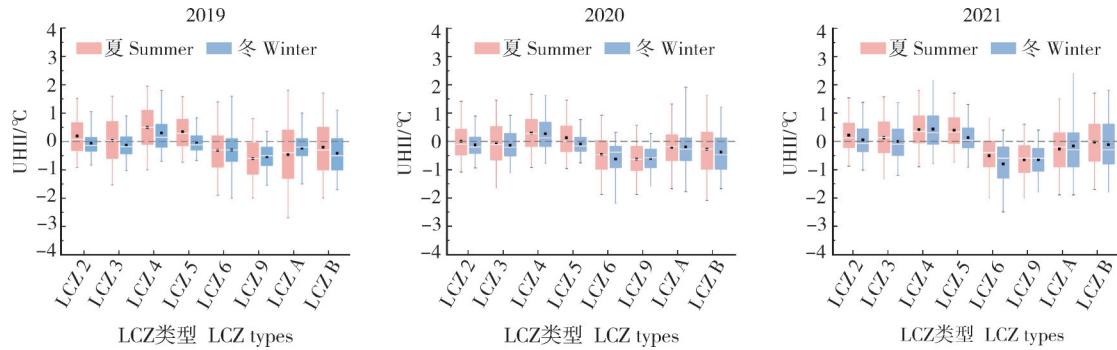


图2 各LCZ类型于2019—2021年夏冬两季的日平均热岛强度

Fig.2 Daily mean UHII of LCZs in summer and winter from 2019 to 2021

2)逐时UHII变化规律。由图3可知,夏季LCZ A和其他类型的变化趋势存在显著差异,且这一差异在昼间尤其显著。LCZ A呈先上升[00:00—12:00]后下降[12:00—24:00]的变化趋势;其他LCZ类型总体呈缓慢下降[20:00至次日05:00]、快速下降[05:00—09:00]、快速上升[09:00—20:00]的多段变化。冬季LCZ的UHII变幅在缩小的同时,其变化趋势更加复杂。其中LCZ 2、LCZ 3、LCZ 4、

LCZ 5、LCZ B属先降后升型;LCZ 9、LCZ A属先升后降型;LCZ 6则呈连续2次先下降后上升的变化。此外,LCZ 6和LCZ A在不同年份的日平均UHII变化存在明显区别,LCZ A在昼间08:00—13:00的变化趋势存在不规律的波动,最大UHII表现出不稳定特征。

不同LCZ类型夏冬两季平均UHII日变化呈现“夏强冬弱、昼弱夜强”的特点。夏季,部分LCZ类型

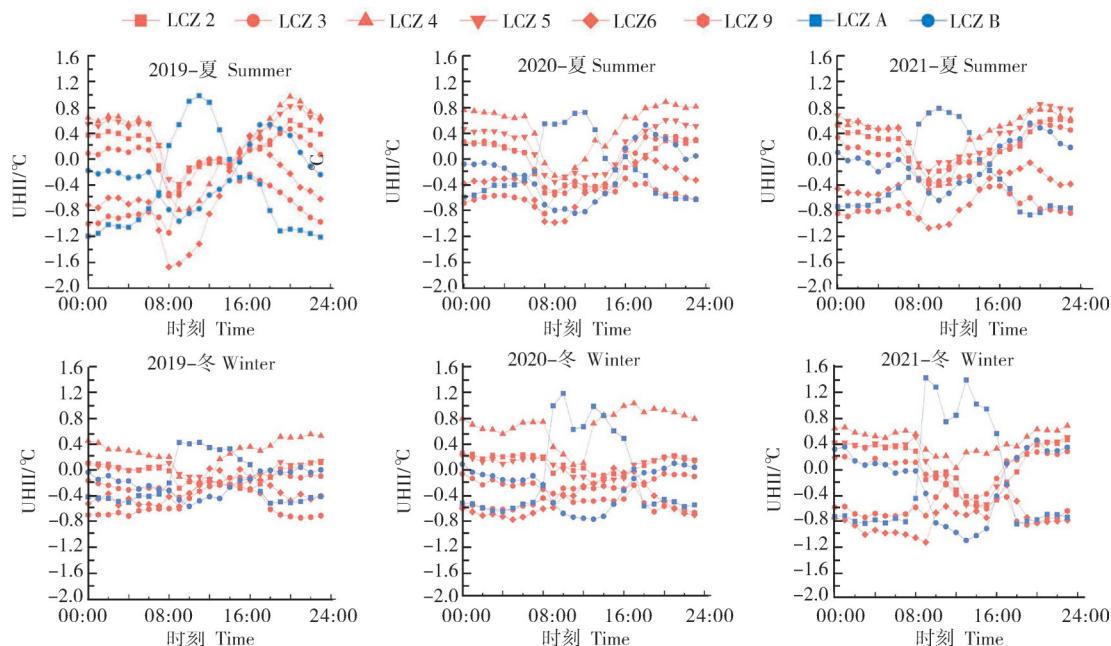


图3 2019—2021年各LCZ类型夏冬两季平均UHII的日变化

Fig.3 Diurnal variation of UHII in summer and winter for LCZs from 2019 to 2021

会出现较为稳定的“城市冷岛”效应,其中植被类LCZ A在14:00至次日07:00的UHII低于0℃;建筑类LCZ 9的UHII则基本全日低于0℃。冬季LCZ 4的UHII最高且全日保持在0℃以上;LCZ A在昼间09:00—16:00出现热岛效应;LCZ 2和LCZ 5集中在18:00至次日08:00出现热岛效应。

2.2 夏冬两季LCZ热岛强度类内差异

利用ArcGIS平台绘制中心城区各站点夏冬两

季平均UHII的空间分布,由图4可知,中心城区UHII空间分布呈现由中部向四周逐渐降低的空间发展趋势,如位于城区中部的No.4(LCZ 2类型)及No.12(LCZ 5类型)站点UHII分别为0.4、0.7℃,而位于城区边界的No.2(LCZ 2类型)及No.14(LCZ 5类型)站点UHII则均低于−0.4℃,且该UHII空间分布特征连续3 a保持稳定。

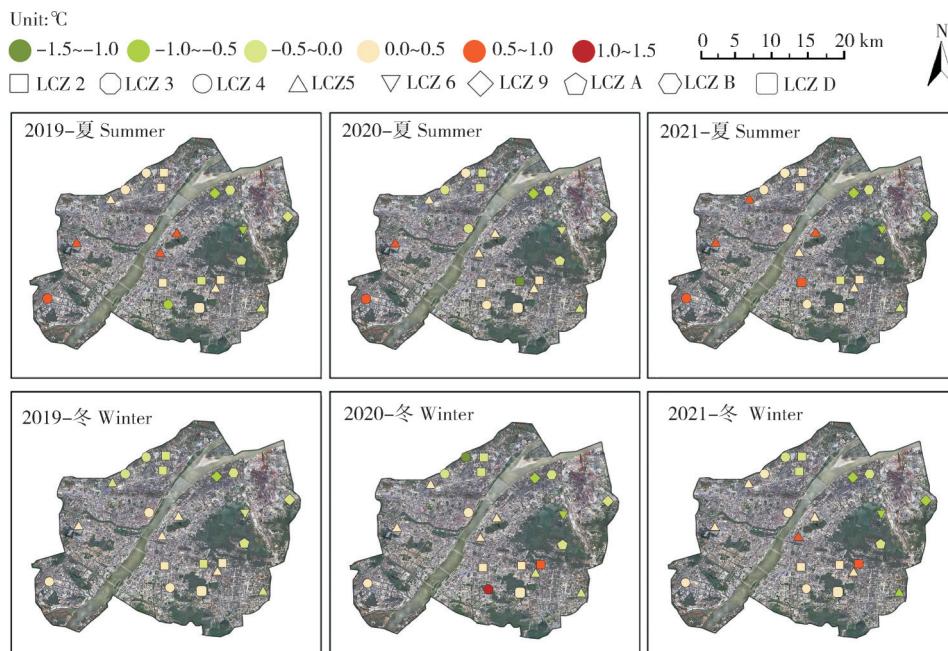


图4 2019—2021年中心城区夏冬两季平均UHII空间分布

Fig.4 Spatial distribution of mean UHII in summer and winter from 2019 to 2021

为量化分析各类LCZ的UHII类内差异,首先对5类建成型LCZ在2019—2021年夏冬两季UHII进行单因子方差分析(表2)。结果显示,除2020年夏季外,各LCZ类型呈现不同程度的类内UHII差异,其

中,LCZ 3未表现出UHII类内差异;LCZ 4和LCZ 9分别在2019年夏季和2020年冬季表现出显著UHII类内差异;LCZ 2和LCZ 5在2020年冬季和2021年冬夏表现出显著或极显著的UHII类内差异。

表2 2019—2021年建筑空间类LCZ夏冬两季UHII方差分析

Table 2 ANOVA results for UHII of built-type LCZ in summer and winter from 2019 to 2021

LCZ类型 LCZ types	2019 UHII				2020 UHII				2021 UHII			
	夏季 Summer		冬季 Winter		夏季 Summer		冬季 Winter		夏季 Summer		冬季 Winter	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
LCZ 2	2.88	0.079 8	4.03	0.033 6*	0.41	0.798 6	16.39	0.000 4**	12.37	0.000 7**	17.80	0.000 2**
LCZ 3	0.02	0.979 7	0.01	0.933 1	0.42	0.674 2	0.85	0.474 5	0.43	0.667 1	0.31	0.598 4
LCZ 4	69.94	0.001 1*	0.10	0.766 6	2.51	0.188 3	2.64	0.179 8	3.12	0.152 1	0.05	0.835 0
LCZ 5	8.58	0.001 2*	4.20	0.019 4*	1.73	0.203 0	6.57	0.003 6*	15.36	0.000 1**	33.71	0.000 0**
LCZ 9	1.60	0.274 0	1.85	0.245 6	6.92	0.058 2	40.55	0.003 1*	0.07	0.797 9	0.26	0.639 3

注:*和**分别表示同种LCZ类型对应站点的UHII平均值存在显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)的类内差异。Note: * and ** indicates the significant differences in UHII of the same LCZ types at 0.05 and 0.01 level, respectively.

进一步统计连续3 a夏冬两季LCZ 2及LCZ 5对应站点的类内UHII差异(表3、4)。夏季,LCZ 2类

型站点中No.3及No.4站点的UHII较高,而No.1站点则较低,二者相差0.6~1.4℃;LCZ 5类型站点中,

No.13 站点 UHII 显著或极显著高于其他站点 0.2~1.3 °C, No.14 站点则极显著低于其他站点 UHII 0.3~1.3 °C。冬季, LCZ 2 类型站点中 No.4 站点 UHII 仍显著或极显著高于其他站点 0.2~0.9 °C, 而 No.2 及 No.5 站点 UHII 低于其他站点 0.2~0.9 °C; LCZ 5 类型站点中 No.12 站点 UHII 最高, 高于其他站点 0.2~1.2 °C, No.14 站点 UHII 极显著低于其他站点 0.4~

1.2 °C。结果表明, LCZ 2 和 LCZ 5 类型站点中 No.3、No.4、No.12 和 No.13 站点的 UHII 明显地高于集中分布于高度密集的城区建成区中部的其他站点; 与之相反, 位于中心城区边界、与耕地或其他生态空间相邻的站点 UHII 则较低, 导致 LCZ 2 和 LCZ 5 整体呈现显著 UHII 类内差异。

表3 LCZ 2 夏冬两季各站点 UHII 差异显著性分析

Table 3 ANOVA results for intra-class UHII difference in summer and winter of LCZ 2

站点 Sites	No.1		No.2		No.3		No.4	
	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter
No.2	0.513 7*	-0.482 0**						
No.3	0.927 3**	-0.046 3	0.413 7	0.435 7**				
No.4	0.892 3**	0.277 0*	0.378 7	0.759 0**	-0.035 0	0.323 3*		
No.5	0.621 3*	-0.331 7*	0.107 7	0.150 3	-0.306 0	-0.285 3*	-0.271 0	-0.608 7**

注: *和**分别表示对应站点间 UHII 平均值存在显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)差异, 下同。Note: * and ** indicates the significant differences in UHII of corresponding sites at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as below.

表4 LCZ 5 夏冬两季各站点 UHII 差异显著性分析

Table 4 ANOVA results for intra-class UHII difference in summer and winter of LCZ 5

站点 Sites	No.11		No.12		No.13		No.14		No.15	
	夏季 Summer	冬季 Winter								
No.12	0.225 7	0.354 3*								
No.13	0.592 7**	0.050 7	0.367 0*	-0.303 7*						
No.14	0.446 0**	-0.494 0**	-0.671 7**	-0.848 3**	-1.038 7**	-0.544 7**				
No.15	0.350 0*	0.074 0	0.124 3	-0.280 3	-0.242 7	0.023 3	0.796 0**	0.568 0**		
No.16	0.012 7	-0.103 3	-0.213 0	-0.457 7**	-0.580 0**	-0.154 0	0.458 7**	0.390 7*	-0.337 3*	-0.177 3

3 讨论

本研究利用城市局部气象观测数据分析了武汉市中心城区内多种 LCZ 类型的夏冬两季 UHII 精细化时空分异特征, 揭示了不同时间尺度下的 LCZ 类间 UHII 差异特征以及受到外部建成环境影响的 LCZ 类内 UHII 差异特征。

LCZ 类间 UHII 差异在不同季节均稳定存在, 各 LCZ 类型的日平均 UHII 在夏冬两季的大小关系表现为开阔高层(LCZ 4)>开阔中层(LCZ 5)>密集中层(LCZ 2)>密集低层(LCZ 3)>低矮植被(LCZ D)>稀疏树林(LCZ B)>茂密树林(LCZ A)>开阔低层(LCZ 6)>零散建筑(LCZ 9)。对于建筑类 LCZ, 随建筑高度和密度的下降, LCZ 的 UHII 不断下降, 这与 Zhang 等^[29]的结论一致。林中立等^[30]同样指出虽然高层建筑由于遮荫作用而存在一定降温效果, 但

对于城市风道的阻挡作用不可忽视。LCZ 内部高层、高密度建筑群所产生的气流阻碍对局地热环境的加剧是显著的。此外, 自然类 LCZ A 和 LCZ B 与建筑类 LCZ 6 和 LCZ 9 均具有一定减缓区域 UHII 的“城市冷岛”效果。这不仅证明了绿色空间对于改善热环境的气候调节价值, 也说明开敞的建筑布局可获得更高的通风效能, 从而综合改善局部热环境。

精细到 UHII 逐时变化层面, 各 LCZ 类间未表现出一致的 UHII 逐时变化趋势, 且该特征在不同季节、年份存在差异, 这与杨小山等^[27]的结果不同。夏季, LCZ A 与其他空间类型的 UHII 逐时变化规律呈现显著差异, 集中体现在 06:00—14:00 时 LCZ A 的 UHII 逐时变化呈先快速上升后快速下降, 而其他类型则表现为快速下降然后稳定上升的 UHII 变化趋势。冬季不同 LCZ 类型的 UHII 变化更为多样, 其中

LCZ 6 还表现出多段复杂变化。部分 LCZ 还表现出稳定的“冷岛效应”，并以零散建筑型(LCZ 9)与茂密树林型(LCZ A)最为突出。研究表明 LCZ A 可以实现几乎覆盖全天的冷岛效应^[28]，本研究中心城区连续 3 a 的统计结果发现 LCZ A 在夏季 08:00—14:00 和冬季 08:00—16:00 的 UHII 可保持在 0 ℃以上，这与树林的蓄温作用相关联。此外，以往基于城郊二分法的 UHII 研究发现夏季正午的 UHII 通常较低且接近于 0 ℃^[4,13]，而通过 LCZ 对城市内部差异更加细致的区分，研究发现在夏季 08:00—13:00 大部分建筑类 LCZ 的 UHII 低于 0 ℃，且该现象与杨小山等^[27]和陈光等^[28]基于 LCZ 体系的 UHII 评估结果相似。导致结论差异的原因可能是 LCZ D 内部低矮、开敞的植被分布更易于受到太阳辐射的直接影响而在日出后具有较高的升温速率，建筑环境则由于遮荫作用其初期的热量积累相对较慢^[31]，使得在 14:00 之后建筑类 LCZ 才开始普遍表现出热岛效应。

部分 LCZ 类型存在显著的 UHII 类内差异，中心城区圈层式的空间结构模式是导致差异化的主要原因。具体而言，中心城区 UHII 呈现中部 LCZ 地块高四周低的特征，同类 LCZ 的 UHII 在城区中部的地块比城区边界的地块高 0.2~1.4 ℃。结合城市下垫面空间特征，发现这一现象与城市空间结构模式相一致。原因在于中心城区的中部区域建设强度更高，而过于致密的中高层建筑在降低冠层内通风效能的同时也加剧了热量的累积，从而导致地块温度的进一步提升^[9,31]。此外，2019 年冬季至 2020 年夏季各 LCZ 类型的类间及类内 UHII 差异都低于其他年份的对应季节，尤其是 2020 年夏季各 LCZ 类型均未发现显著的 UHII 类内差异。结合社会层面分析，该时段正是新冠疫情期间武汉封城抗疫的关键阶段，更低的人为热排放量缓解了城区中部密集建成环境的热岛效应，进而缩小了 LCZ 的 UHII 类内差异^[12]。

由于城市气象站点通常布设在建设强度较低的开敞区域，导致本研究依然难以在武汉中心城区的有限范围内对所有 LCZ 类型的 UHII 进行评估和比较。同时，武汉中心城区河湖广布的地理特征还使得自然类 LCZ 的观测点通常集中于城市滨水地区，不可避免地影响气温观测结果。因此，后续研究可将场地实测和数值模拟等方法相结合以更加精细化地揭示城市热环境时空分异的内在规律。

参考文献 References

- [1] WANG Q, WANG X N, ZHOU Y, et al. The dominant factors and influence of urban characteristics on land surface temperature using random forest algorithm [J/OL]. Sustainable cities and society, 2022, 79: 103722 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103722>.
- [2] WARDEH Y, KINAB E, ESCADEILLAS G, et al. Review of the optimization techniques for cool pavements solutions to mitigate urban heat islands [J/OL]. Building and environment, 2022, 223: 109482 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109482>.
- [3] YAN H, FAN S X, GUO C X, et al. Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: the case of Beijing, China [J]. Building and environment, 2014, 76: 44-53.
- [4] 毛成忠, 张明, 刘云鹏, 等. 基于自动气象站资料的宜昌城市热岛分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(1): 103-110. MAO C Z, ZHANG M, LIU Y P, et al. Analysis of Yichang urban heat island based on automatic weather station data [J]. Desert and oasis meteorology, 2021, 15(1): 103-110 (in Chinese with English abstract).
- [5] 牛陆, 张正峰, 彭中, 等. 中国地表城市热岛驱动因素及其空间异质性 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 945-953. NIU L, ZHANG Z F, PENG Z, et al. China's surface urban heat island drivers and its spatial heterogeneity [J]. China environmental science, 2022, 42(2): 945-953 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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 Y X, ZHANG D L. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta meteorologica sinica, 2012, 70(3): 338-353 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型 [J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7769-7780. LIU Y X, PENG J, WANG Y L. Relationship between urban heat island and landscape patterns: from city size and landscape composition to spatial configuration. Acta ecological sinica, 2017, 37(23): 7769-7780 (in Chinese with English abstract).
- [8] 周伟奇, 田韫钰. 城市三维空间形态的热环境效应研究进展 [J]. 生态学报, 2020, 40(2): 416-427. ZHOU W Q, TIAN Y Y. Effects of urban three-dimensional morphology on thermal environment: a review [J]. Acta ecologica sinica, 2020, 40(2): 416-427 (in Chinese with English abstract).
- [9] YANG J Y, SHI B X, ZHENG Y, et al. Urban form and air pollution disperse: key indexes and mitigation strategies [J/OL]. Sustainable cities and society, 2020, 57: 101955 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101955>.
- [10] 黄亚平, 卢有朋, 单卓然, 等. 武汉市主城区热岛空间格局及其影响因素研究 [J]. 城市规划, 2019, 43(4): 41-47, 52.

- HUANG Y P, LU Y P, SHAN Z R, et al. Study on spatial layout and influencing factors of heat island in the main urban area of Wuhan [J]. *City planning review*, 2019, 43(4): 41-47, 52 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李冉, 王猛猛, 张正加, 等. 遥感地表温度产品时空融合方法研究综述 [J]. *遥感学报*, 2022, 26(12): 2433-2450. LI R, WANG M M, ZHANG Z J, et al. A review of spatiotemporal fusion methods for remotely sensed land surface temperature [J]. *National remote sensing bulletin*, 2022, 26(12): 2433-2450 (in Chinese with English abstract).
- [12] 骆杨, 周锁铨, 孙善磊, 等. 杭州城市热岛空间分布及时域-频域多尺度变化特征 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2200-2205. LUO Y, ZHOU S Q, SUN S L, et al. Characteristics of multi-scale temporal-spatial distribution of urban heat island in Hangzhou [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2009, 18(6): 2200-2205 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孟凡超, 黄鹤, 郭军, 等. 天津城市热岛强度的精细化时空分布特征研究 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1822-1829. MENG F C, HUANG H, GUO J, et al. Analysis of fine-scale spatial and temporal characteristics of Tianjin urban heat island intensity [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2020, 29(9): 1822-1829 (in Chinese with English abstract).
- [14] CAO Q, LUAN Q Z, LIU Y P, et al. The effects of 2D and 3D building morphology on urban environments: a multi-scale analysis in the Beijing metropolitan region [J/OL]. *Building and environment*, 2021, 192: 107635 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107635>.
- [15] 向易睿, 张宇峰, 石玉蓉. 空间形态高度异质性城市LCZ地图制作方法研究 [J]. *建筑科学*, 2020, 36(4): 62-69, 113. XIANG Y R, ZHANG Y F, SHI Y R. Study on local climate zone mapping in highly spatially heterogeneous city [J]. *Building science*, 2020, 36(4): 62-69, 113 (in Chinese with English abstract).
- [16] STEWART I D, OKE T R. Local climate zones for urban temperature studies [J]. *Bulletin of the American meteorological society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [17] 江斯达, 占文凤, 杨俊, 等. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展 [J]. *地理学报*, 2020, 75(9): 1860-1878. JIANG S D, ZHAN W F, YANG J, et al. Urban heat island studies based on local climate zones: a systematic overview [J]. *Acta geographica sinica*, 2020, 75(9): 1860-1878 (in Chinese with English abstract).
- [18] 黄群芳. 城市空间形态对城市热岛效应的多尺度影响研究进展 [J]. *地理科学*, 2021, 41(10): 1832-1842. HUANG Q F. Effects of urban spatial morphology on urban heat island effect from multi-spatial scales perspectives [J]. *Scientia geographica sinica*, 2021, 41(10): 1832-1842 (in Chinese with English abstract).
- [19] CAO Q, HUANG H, HONG Y N, et al. Modeling intra-urban differences in thermal environments and heat stress based on local climate zones in central Wuhan [J/OL]. *Building and environment*, 2022, 225: 109625 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109625>.
- [20] LIU X Q, HUANG B, LIR R, et al. Wind environment assessment and planning of urban natural ventilation corridors using GIS: Shenzhen as a case study [J/OL]. *Urban climate*, 2022, 42: 101091 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101091>.
- [21] YIN S, PENG L H, FENG N Y, et al. Spatial-temporal pattern in the cooling effect of a large urban forest and the factors driving it [J/OL]. *Building and environment*, 2022, 209: 108676 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108676>.
- [22] YANG P, REN G Y, LIU W D. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity [J]. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2013, 52(8): 1803-1816.
- [23] REN Y Y, REN G Y. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends [J]. *Journal of climate*, 2011, 24(13): 3179-3189.
- [24] ZHANG L, NIKOLOPOULOU M, GUO S J, et al. Impact of LCZs spatial pattern on urban heat island: a case study in Wuhan, China [J/OL]. *Building and environment*, 2022, 226: 109785 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109785>.
- [25] OKE T R. *Boundary layer climates* [M]. Abingdon, Oxon: Taylor and Francis, 2002.
- [26] YANG X S, YAO L Y, JIN T, et al. Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China [J]. *Building and environment*, 2018, 137: 171-184.
- [27] 杨小山, 姚灵烨, 金涛, 等. 南京夏季城市局地气温时空变化特征 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 160-167, 174. YANG X S, YAO L Y, JIN T, et al. Temporal and spatial variations of local temperatures in the summer of Nanjing [J]. *Journal of civil and environmental engineering*, 2019, 41(1): 160-167, 174 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈光, 李楠, 蔡云楠, 等. 基于LCZ的广州夏季热岛强度特征分析 [J]. *建筑科学*, 2021, 37(6): 96-104. CHEN G, LI N, CAI Y N, et al. Analysis of the characteristics of heat island intensity based on LCZ in the summer of Guangzhou [J]. *Building science*, 2021, 37(6): 96-104 (in Chinese with English abstract).
- [29] ZHANG Y W, ZHANG J L, ZHANG X Q, et al. Analyzing the characteristics of UHI (urban heat island) in summer daytime based on observations on 50 sites in 11 LCZ (local climate zone) types in Xi'an, China [J/OL]. *Sustainability*, 2020, 13(1): 83 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.3390/su13010083>.
- [30] 林中立, 徐涵秋. 基于局地气候分区体系的福州城市热环境研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(1): 189-200. LIN Z L, XU H Q. A study of urban thermal environmental of Fuzhou based on "local climate zones" [J]. *Journal of geo-information science*, 2022, 24(1): 189-200 (in Chinese with English abstract).
- [31] ANJOS M, TARGINO A, KRECL P, et al. Analysis of the ur-

ban heat island under different synoptic patterns using local climate zones [J/OL]. Building and environment, 2020, 185: 107268 [2023-02-14]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107268>.

Spatial-temporal differentiation characteristics of urban heat island in Wuhan City based on local climate zone

LIU Huosheng¹, LI Sitao², WAN Haokai², YU Qianhui¹, WU Changguang²

1. Wuhan Public Meteorological Service Center, Wuhan 430040, China;

2. College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The air temperature in the central urban area of Wuhan City was observed based on the local climate zone (LCZ) scheme to accurately evaluate the spatial-temporal differentiation characteristics of urban heat island (UHI) in Wuhan City and assist in the design of climate adaptability. The spatial-temporal variation of urban heat island intensity (UHII) in six types of architectural spaces and three types of natural spaces during three consecutive summer and winter periods were analyzed. Explored the daily average UHII differences, hourly UHII variation, and UHII differences within the same LCZ type among different LCZ types, as well as their influencing factors were investigated. The results showed that each LCZ maintained stable daily average inter-type differences of UHII in summer and winter. The LCZ type with more high-rise building had a higher UHII, especially the open high-rise (LCZ 4) and open mid-rise (LCZ 5). However, sparse forests (LCZ B), dense forests (LCZ A), open low-rise (LCZ 6), and scattered buildings (LCZ 9) remained below 0 °C in general. There was a significant difference in the hourly variation of UHII between LCZ A and other LCZ types. LCZ A showed a rapid increase followed by a decrease within 8 hours after sunrise, while other LCZ types showed a rapid decrease followed by a stable increase. Within a single day, the UHII of each LCZ exhibited a characteristic of “strong in summer and weak in winter, weak in day and strong at night”. LCZ 9 and LCZ A were able to maintain the urban cold island effect for a long time to alleviate local heat environment, while LCZ 4 was the only type maintaining UHII above 0 °C in both summer and winter. Both LCZ 2 and LCZ 5 with mid-rise characteristics exhibited significant intra-type UHII differences. Similar LCZ plots located in the central part of the urban area were affected by the obstruction of urban canopy ventilation, and their UHII was higher than those on the urban boundary plots. The results indicated that UHII difference among LCZs were stable in summer and winter, while intra-class significant differences of the same LCZ were mainly driven by the spatial structure of Wuhan City, with densely urban core area being more prone to localized high temperatures due to poor ventilation performance and frequent anthropogenic heat emissions.

Keywords local climate zone; urban heat island; air temperature; urban heat island intensity

(责任编辑:葛晓霞)