

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.020



南京夏季城市局地气温时空变化特征

杨小山¹, 姚灵焯², 金涛¹, 姜之点¹, 彭立华¹, 叶燕华¹

(1. 南京工业大学 建筑学院, 南京 211816; 2. 华南理工大学 建筑学院, 广州 510641)

摘要:城市局地气候分区(Local Climate Zone, 简称为 LCZ)是一套用于城市气温研究的客观、标准、通用的局地热气候分类方法。基于 LCZ 方法对南京城市气温进行观测,分析了 2016 年夏季时段(7—9 月)分布于南京城区至郊区的 12 个不同类型 LCZ 地块的气温时空变化特征,包括热岛日变化特征、平均热岛强度、日最高/最低温度差异、升温/冷却率差异。结果表明:各 LCZ 地块的热岛强度在日落迅速增加,日落后 3~5 h 达到最大值,然后逐渐减小,这一现象与各 LCZ 地块的升温/冷却率变化特征相对应;城市化强度越高的 LCZ 地块热岛强度越大;午间部分地块出现城市冷岛现象;水域区(LCZ G)在白天有一定的降温效果,夜间则会产生热岛效应;各 LCZ 地块的夜间平均热岛强度差异明显,日最低气温差异显著高于日最高气温差异。

关键词:城市热岛;局地气候分区;现场实测;局地尺度

中图分类号:TU119.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)01-0160-09

Temporal and spatial variations of local temperatures in the summer of Nanjing

Yang Xiaoshan¹, Yao Lingyao², Jin Tao¹, Jiang Zhidian¹, Peng Lihua¹, Ye Yanhua¹

(1. School of Architecture, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China;

2. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China)

Abstract: The Local Climate Zone (LCZ) scheme aims to provide an objective and standardized classification protocol for urban temperature studies in any city. The field temperature data (Jul.-Sept., 2016) from 12 LCZ sites located in urban and rural areas of Nanjing, China, was used to evaluate the LCZ scheme. For the 12 LCZ sites, the features of heat island and the differences of daily max/min temperature and heating/cooling rate were analyzed. The UHI intensity increases rapidly after sunset, reaching at maximum about three to five hours later, and then declines gradually, which is the result of the variation of the heating/cooling rates of a LCZ site. It was observed that the higher level of urbanization the stronger heat island effect for the LCZ sites. The heat island magnitudes may even be negative during the midday period. It was shown that the water area (LCZ G) produces cooling effect during the daytime as expected while shows warming effects during the night time. The daily maximum temperature difference between urban and rural occurs in the minimum rather than in the maximum. Distinct differences in air temperature among the LCZ sites reflect the thermal effects of local surrounding properties.

收稿日期:2018-06-18

基金项目:国家自然科学基金(51408303,41871189);江苏省自然科学基金(BK20161547)

作者简介:杨小山(1981-),男,博士,副教授,主要从事城市热气候与建筑能耗研究,E-mail: xs.yang@qq.com。

Received:2018-06-18

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51408303,41871189); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20161547)

Author brief: Yang Xiaoshan (1981-), PhD, associate professor, research interests: urban thermal climate and building energy performance, E-mail: xs.yang@qq.com.

Keywords: urban heat island; local climate zone; field observation; local-scale

城市热岛效应(Urban Heat Island Effect)是指城市中的气温明显高于外围郊区的现象,对城市居民的生活和工作及社会经济发展有着重要影响。传统的城市热岛研究方法是分析“城市”与“郊区(乡村)”之间的气温差异特征。Stewart等^[1]对大量的城市热岛研究文献梳理分析后指出,传统的“城乡二元法”研究城市热岛现象过于简单和模糊,一方面是对测点位置的选择无统一标准且通常缺乏对测点周围环境以及天气条件的详细描述;另一方面是无法科学深入地解释城市因子与热岛强度之间的关系。对此,他们针对城市气温研究建立了一套客观、标准、通用的城市局地气候分区(Local Climate Zone, LCZ)体系。

根据文献^[1],一个LCZ分区定义为最小半径200~500 m的区域,该区域内的物理特征(下垫面、空间形态、材料构造及人类活动等)应基本一致且分布均匀,在晴朗、微风、少云的天气条件下,同类局地气候分区表现出相似的气温特征。与传统的“城乡二元法”相比,LCZ分区方法定义清晰明确,划分标准规范统一,更有利于理清城市各物理因子与气温时空分布之间的关系。LCZ分区方法已在欧洲、北美、日本、印度等地的多个城市得到检验和应用^[2-4],但这些城市在规模、形态、下垫面等方面与中国城市有较大不同。中国基于LCZ体系的城市热岛研究尚处于起步阶段。林中立等^[5]基于LCZ分类体系,结合卫星遥感数据对福州城市地表温度进行归类分析;刘琳等^[6]利用LCZ方法对深圳华侨城的局地气候进行观测,分析不同城市地表形态对局地气候的影响。以上研究结果初步表明,各LCZ分区的热气候与地块特征参数有较强的相关性,显示了LCZ方法的基本合理性及其在城市热气候研究方面的应用潜力。本文尝试将LCZ分区方法应用于南京,检验其合理性与适用性,并分析在夏季少云、弱风的典型天气条件下,南京城市局地气温时空变化特征。

1 研究方法

1.1 基于LCZ的南京城市气温观测

南京(E 118°48', N 32°49')是长三角地区特大城市,城区面积860 km²,人口超过800万。气候特征为夏热冬冷,全年日平均温度在28.6℃(7月)至2.2℃(1月)之间^[7]。南京地形包括山、丘陵、平原、河流和湖泊。长江流经城区的西侧和北侧;市区内面积较大的水体有玄武湖、莫愁湖和秦淮河;主要城区位于长江南侧,地势较平坦,海拔在3~21 m之

间,多为密集建筑区;城市周边主要为平坦的农业用地^[8]。

局地气候分区(LCZ)的基本类型包含10个建成环境型(built types, LCZ 1~10)和7个自然环境型(land cover types, LCZ A~G),共17类LCZ类型^[1]。结合定性和定量两方面内容来判断一个地块所属的LCZ类型。定性方面是指通过检视卫星影像和实景照片及实地调查等方法分析地块的形态和功能;定量方面是根据地块特征参数值所处的范围划分LCZ类型,特征参数包括:天空视角系数、高宽比、平均建筑高度、地表粗糙等级、建筑密度、透水/不透水地面面积比、地表热导纳、地表反射率、人为热通量这10个与地块热环境密切相关的指标,分别表征了地块的空间形态、地表覆盖、材料构造和人类活动等物理属性。

LCZ地块的挑选过程分为两步:1)根据文献^[1]的示例,通过查看卫星影像、实景照片及实地调查等方法,初步选出若干LCZ地块,各地块的空间形态、下垫面、建筑功能、材料构造和植被覆盖情况等作为LCZ分类的补充信息;2)计算出所选各地块的特征参数值,确定各地块的LCZ类型。地块各特征参数计算方法如下:基于文献^[9]的方法,利用Google Earth影像中的建筑阴影长度来推算建筑高度;街谷高宽比、建筑密度、透水/不透水地面面积比例等通过在高分辨率卫星影像上手动描图并统计获得;天空视角系数(Sky View Factor, SVF)利用德国三维微气候软件ENVI-met^[10]对地块建模计算得出;树高通过现场抽样测量计算。地表热导纳、反射率、人为热通量这3个参数由于缺少数据未能得出。

通过上述方法,选择了12个不同类型的LCZ地块进行长期气温观测。所选12个LCZ地块分布于南京中心城区至郊区。表1列出所选12个LCZ地块的类型、卫星图像、实地照片及特征参数值。其中,有3个地块的空间形态和特征参数值未完全符合任何单一LCZ类型的标准,根据文献^[1]中LCZ主类组合子类的分类方法,将这3个地块分别命名为LCZ 2_E、LCZ 3₂和LCZ 6₅(下标代表次级LCZ类型)。

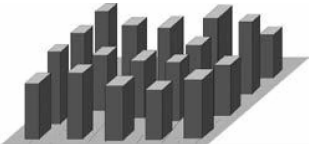


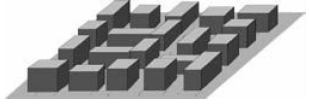

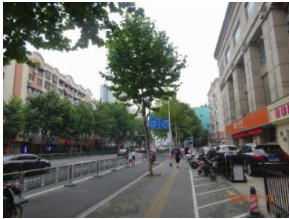






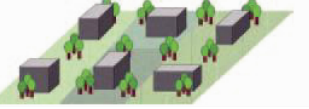



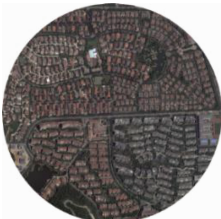

在每个LCZ地块的核心区(半径100 m范围内)设置3个固定观测点,每个测点安装一个带原装防辐射罩的HOBO温湿度自记录仪(型号U23-001,精度±0.2℃,产地:美国)。自记录仪固定于路灯杆上,距地2.3~2.7 m。自记录仪采样频率为1次/h,

数据存储于仪器内存中,每隔数月去测点现场下载数据。为更准确全面地反映地块的空间温度值,以每个 LCZ 地块核心区 3 个测点的平均温度值作为




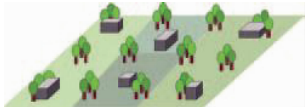




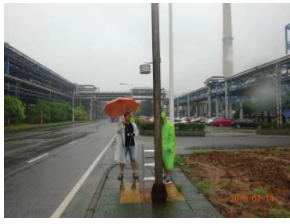
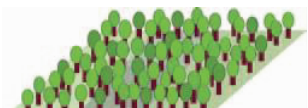






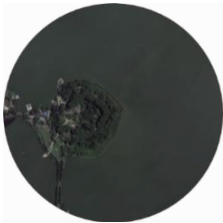

该 LCZ 地块的温度代表值。现阶段已有的数据时段为 2016-07-21 至 2016-09-15,涵盖南京主要夏季时段。

表 1 所选 LCZ 地块的城市形态和特征参数值

Table 1 Values of geometric and surface cover properties for the selected local climate zones

地块实际 LCZ 类型	卫星图像 (半径均为 500 m)	实地照片	特征参数值	
			地块实际值 ^a	所属 LCZ 主类 指标范围 ^[1]
 LCZ 1: 紧凑高层建筑区 (compact high-rise)			H/W: 1.26 * SVF: 0.36 BSF: 34% * ISF: 58% HRE: 44 m	>2 0.2~0.4 40%~60% 40%~60% >25 m
 LCZ 2 _E : 高硬地面比例的紧凑中层建筑区 (compact mid-rise with paved)			H/W: 0.68 SVF: 0.41 BSF: 31% ISF: 61% HRE: 16 m	0.75~2 0.3~0.6 40%~70% 30%~50% 10~25 m
 LCZ 3 ₂ : 紧凑中低层建筑区 (compact low-rise with compact mid-rise)			H/W: 0.90 SVF: 0.39 BSF: 36% * ISF: 46% HRE: 11 m	0.75~1.5 0.2~0.6 40%~70% 20%~50% 3~10 m
 LCZ 4: 开敞高层建筑区 (open high-rise)			H/W: 0.97 SVF: 0.52 BSF: 12% * ISF: 54% * HRE: 36 m	0.75~1.25 0.5~0.7 20%~40% 30%~40% >25 m
 LCZ 5: 开敞中层建筑区 (open mid-rise)			H/W: 0.71 SVF: 0.41 * BSF: 17% * ISF: 51% * HRE: 23 m	0.3~0.75 0.5~0.8 20%~40% 30%~50% 10~25 m
 LCZ 6 ₅ : 开敞中低层建筑区 (open low-rise with open mid-rise)			H/W: 0.71 SVF: 0.42 * BSF: 23% ISF: 34% HRE: 14 m	0.3~0.75 0.6~0.9 20%~40% 20%~50% 3~10 m

续表 1

地块实际 LCZ 类型	卫星图像 (半径均为 500 m)	实地照片	特征参数值	
			地块实际值 ^a	所属 LCZ 主类 指标范围 ^[1]
 LCZ 8:大型低层建筑区 (large low-rise)			$H/W: 0.25$ $SVF: 0.68^*$ $BSF: 31\%$ $ISF: 48\%$ $HRE: 11\text{ m}^*$	$0.1 \sim 0.3$ > 0.7 $30\% \sim 50\%$ $40\% \sim 50\%$ $3 \sim 10\text{ m}$
 LCZ 9:稀疏建筑区 (sparsely built)			$H/W: 0.23$ $SVF: 0.69^*$ $BSF: 8\%^*$ $ISF: 23\%^*$ $HRE: 17\text{ m}^*$	$0.1 \sim 0.25$ > 0.8 $10\% \sim 20\%$ $< 20\%$ $3 \sim 10\text{ m}$
 LCZ 10:重工业区 (heavy industry)			$H/W: 0.35$ $SVF: -$ $BSF: 26\%$ $ISF: 57\%^*$ $HRE: 12\text{ m}$	$0.2 \sim 0.5$ $0.6 \sim 0.9$ $20\% \sim 30\%$ $20\% \sim 40\%$ $5 \sim 15\text{ m}$
 LCZ A:稠密树木区 (dense trees)			$H/W: > 1$ $SVF: -$ $BSF: 1\%$ $ISF: 2\%$ $HRE: 8\text{ m}$	> 1 < 0.4 $< 10\%$ $< 10\%$ $3 \sim 30\text{ m}$
 LCZ D:低矮植被区 (low plants)			$H/W: < 0.1$ $SVF: 0.90$ $BSF: 2\%$ $ISF: 5\%$ $HRE: < 1\text{ m}$	< 0.1 > 0.9 $< 10\%$ $< 10\%$ $< 1\text{ m}$
 LCZ G:水域区 (water)			$H/W: -$ $SVF: 0.83^*$ $BSF: 0\%$ $ISF: 1\%$ $HRE: -$	< 0.1 > 0.9 $< 10\%$ $< 10\%$ $-$

注:^a H/W 为街谷或建筑间的平均高宽比; SVF 为地面平均天空视角系数(Sky View Factor); BSF 为建筑密度(Building Surface Fraction); ISF 为不透水地面积比(Impervious Surface Fraction); HRE 为建筑按投影面积加权的平均高度(Height of Roughness Elements)。* 该值偏离对应 LCZ 类型给定的特征参数值范围。

1.2 典型气象日选取

少云弱风的天气条件适合城市热岛效应的发展。采用 Oke 提出的天气因子 Φ_w (weather factor)^[11] 来甄选出具有少云、弱风天气特征的典型气象日

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

式中: u 为风速, m/s; n 为云量, %; 系数 k 根据云的种类取值^[12]。 $\Phi_w = 0$ 代表无热岛效应, $\Phi_w = 1$ 表明有最大的热岛效应。逐时风速来源于国家南京气象站, 逐时云量和云的种类数据来源于中国气象局气象数据中心^[13]。甄选标准: 1) 排除降雨日及其后 2 d (消除降雨的影响); 2) 计算夜间时段 (18:00—06:00) 每小时的 Φ_w 值, 再求其平均值, 选取 $\Phi_w \geq 0.7$ 的天数^[2]。对于研究时段 (7 月 21 日—9 月 15 日), 共有 17 d 符合甄选标准 (7 月 5 d, 8 月 7 d, 9 月 5 d)。

2 结果分析

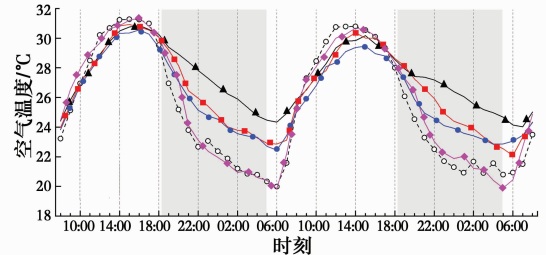
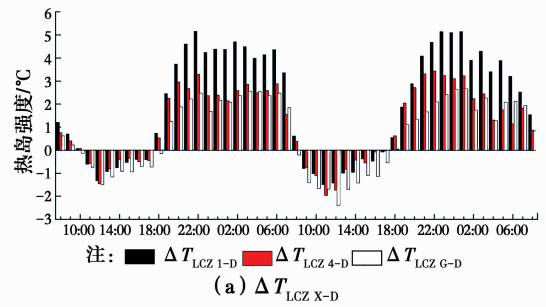
在结果分析前, 进行以下概念界定: 1) 将代表典型郊区形态的地块 LCZ D (低矮植被区) 作为比较基准, 将热岛强度定义为其他 LCZ 类型与 LCZ D 之间的气温差, 例如 $\Delta T_{LCZ 1-D}$ 表示 LCZ 1 (紧凑高层建筑区) 与 LCZ D 之间的气温差; 2) 以下分析中的一日是指 08:00—07:00 (次日), 原因是该时段涵盖了一个完整的“白天升温—夜间降温”热过程。

2.1 热岛强度日变化特征

前人研究显示^[12]: 在少云弱风的天气条件下, 城市热岛强度一般在日落后迅速增加, 日落后 3~5 h 达到最大值, 然后减小, 日出后热岛效应逐渐消失, 甚至会出现“弱冷岛”现象。选取 2016 年 8 月 29 日—31 日期间 LCZ 1、4、9、G 地块来观察热岛强度及气温的日变化特征 (见图 1)。该时段天气特征为晴朗弱风, 天气因子平均值是 0.8, 是适合热岛效应发展的典型气象日。从 12 个 LCZ 地块中选择 LCZ 1、4、9、G 地块进行分析的原因是: LCZ 1、4、9 地块分别代表了城市化强度由高到低的水平 (由紧凑高层建筑区到稀疏建筑区); LCZ G-水体则通常被认为是可以缓解热岛效应的因素。

由图 1(a) 可知, 所选地块在 19:00—07:00 期间均出现了热岛现象, 在 10:00—17:00 期间均出现了冷岛现象, 热岛强度明显大于冷岛强度, 日变化规律清晰。

在 19:00—07:00 期间, 各地块热岛强度变化规律与前人的研究结论^[12] 一致, 即日落后迅速增加, 日落后 3~5 h 达到最大值, 然后逐渐减小。其中, LCZ 1 (紧凑高层建筑区) 的最大热岛强度达 5.2



注: 阴影区为日落到日出时段, LCZ-D (低矮植被区) 为比较基准。

图 1 2016 年 8 月 29—31 日, LCZ 1、4、G 地块的逐时热岛强度

Fig. 1 Hourly heat island magnitudes

°C, 大多数时刻 LCZ 1 的热岛强度显著高于 LCZ 4 (开敞高层建筑区), 反映了城市化强度越高则热岛效应越强的规律。值得注意的是, LCZ G (水域区) 在 19:00—07:00 期间也出现了明显的热岛现象, 最大热岛强度达 2.7 °C。其原因是: 水的比热容大, 热稳定性高, 日落后水体表面温度的下降速度较慢, 使得邻近空气的温度下降亦较慢, 从而形成热岛效应。Yang 等^[14] 在广州的夏季实测结果间接说明了这一点: 日落后水体表面温度开始高于草地表面温度, 0:00 后水体表面温度开始高于空气温度 (即向邻近空气输出热量), 上述状态持续至第 2 天日出。

在 10:00—17:00 期间, 地块 LCZ 1、4、G 的冷岛强度先逐渐增加, 在午间达到最大值, 然后逐渐减小。其中, LCZ G 的冷岛强度高于其余两个地块, 最大冷岛强度达 2.4 °C, 说明水体白天的降温效果显著。有研究也报告了与地块 LCZ 1、4 类似的“城市日间冷岛现象”^[15-16], 并将形成这一现象的可能原因归结为街谷的遮阴作用^[17]; 有研究^[18] 从大气边界层的角度提出另一个可能原因: 城区大气边界层的厚度通常显著大于郊区, 上午升温过程中城区所需加热的边界层大气总体积量大于郊区, 从而导致城区比郊区升温慢, 形成冷岛效应。总的来说, 与城市热岛研究相比, 对城市冷岛的形成原因和机理研究仍相对较少, 有待进一步深入研究。

从图 1(a) 可以看出, 从日落到日出后约 2 h 期间, 各地块之间的气温差异明显, LCZ 1 的气温最

高,LCZ G 的气温与 LCZ 4 相近,LCZ 9 和 LCZ D 的气温接近并最低;日出后 2 h 到日落期间,各地块的气温差异相对较小。值得注意的是,LCZ 9(稀疏建筑区)与 LCZ D(低矮植被区)全天气温均相近,这是因为 LCZ 9 的物理特征参数值与 LCZ D 接近(见表 1),这与 LCZ 分区理论中“相近或同类局地气候分区应表现出相似的气温特征”这一规律相符。

2.2 平均热岛强度

从热岛强度日变化特征可以看出,热岛效应一般在夜间 0:00 前后 1~2 h 的时段内较显著,冷岛效应一般在午间 12:00 前后 1~2 h 的时段内较显著,故分别分析夜间 22:00—02:00 和日间 10:00—14:00 这两个时段内各 LCZ 地块的平均热岛(冷岛)强度。

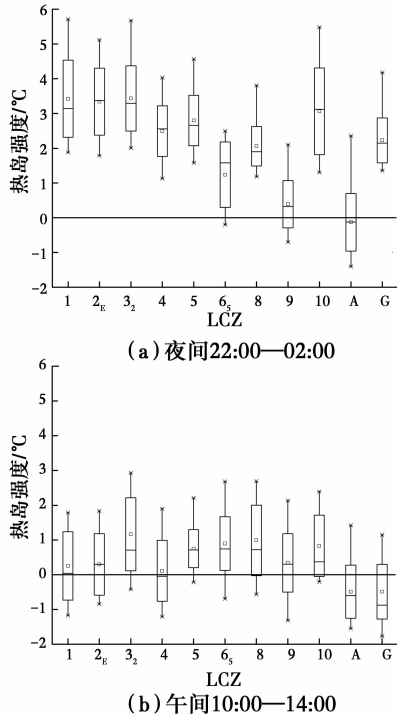
图 2(a)为所选 17 个典型气象日各 LCZ 地块的夜间(22:00—02:00)平均热岛强度($\Delta T_{LCZ \times D}$)箱线图。由图可知:各 LCZ 地块的夜间热岛强度差异明显,紧凑建筑区(LCZ 1、 2_E 、 3_2)的热岛强度趋于最高,平均为 3.3~3.4 °C;其次是开敞建筑区和大型低层建筑区(LCZ 4、5、8),热岛强度平均值为 2.1~2.8 °C;开敞且绿地率较高的地块(LCZ 6_S 、9)的热岛强度相对较小,平均为 0.4~1.2 °C;LCZ 10(重

工业区)由于石化厂生产时释放大量废热,造成该地块的夜间热岛强度较大,平均为 3.1 °C,接近 LCZ 1 的热岛强度水平;LCZ A(稠密树木区)的夜间平均热岛强度为-0.1 °C,并没有表现出较强的冷岛效应,原因是夏季浓密树冠对地面长波辐射的遮挡以及稠密树林带来的通风不畅一定程度地降低了夜间冷却速率;LCZ G(水域区)的夜间热岛效应显著,平均热岛强度为 2.2 °C,原因见上节分析。

图 2(b)为所选 17 个典型气象日各 LCZ 地块的午间(10:00—14:00)平均热岛强度($\Delta T_{LCZ \times D}$)箱线图。观察到属于城市形态的各 LCZ 地块(LCZ 1~10)的热岛效应不显著,平均强度最大值为 1.2 °C(LCZ 3_2),各地块之间的差异也较小;LCZ A 与 LCZ G 在午间有一定的降温效果,均出现了弱冷岛现象,平均热岛强度均为-0.5 °C。

2.3 日最高/最低温度差异

图 3 为所选 17 个典型日各 LCZ 地块与 LCZ D 之间的日最高/最低气温差值($\Delta T_{\max LCZ \times D} / \Delta T_{\min LCZ \times D}$)。由图可知:各 LCZ 地块与 LCZ D 之间的日最低气温差异显著高于日最高气温差异。除 LCZ A 外其余各 LCZ 地块与 LCZ D 的平均日最低气温差异在 0.9~3.0 °C 之间,其中 LCZ 1、 2_E 、 3_2 (紧凑建筑区)以及 LCZ 10 与 LCZ D 的平均日最低气温差值最大;需要注意的是 LCZ G 与 LCZ D 的平



注: LCZ-D(低矮植被区)为各LCZ地块的比较基准。(矩形箱包含了50%的数据,箱内的水平线为中位数,小正方形为平均值,竖线的两个端点分别代表最大/最小值)

图 2 南京夏季(2016-07-21—2016-09-15)17 个典型气象日的平均热岛强度($\Delta T_{LCZ \times D}$)箱线图

Fig. 2 Box plots of mean heat island magnitudes ($\Delta T_{LCZ \times D}$)

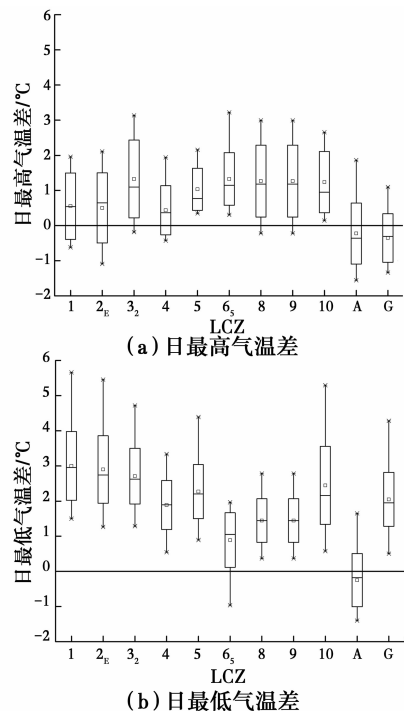


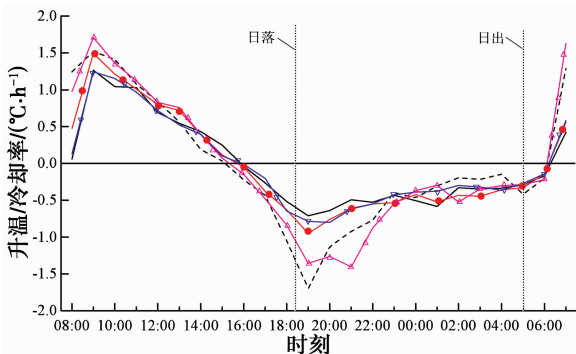
图 3 南京夏季(2016-07-21—2016-09-15)17 个典型气象日期间各 LCZ 地块与 LCZ D 的日最高/最低气温差值箱线图

Fig. 3 Box plots of differences in daily maximum and minimum temperatures

均日最低气温差异达 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。日最低气温反映的是一个地块该日最终可冷却到的程度。代表郊区形态的 LCZ D 具有开敞度高 ($\text{SVF} > 0.9$)、透水地面面积比例高 ($> 90\%$)、通风顺畅 (均为低矮植物) 等特征, 这些特征从长波辐射散热、被动蒸发降温 and 大气平流等物理过程均强化了夜间降温效果。与之相反, 代表城市形态的各 LCZ 地块的物理特征越不利于以上降温过程, 则日最低气温越高; 水城区则由于其高热稳定性导致日最低气温亦较高。各 LCZ 地块与 LCZ D 的平均日最高气温差异较小, 在 $-0.4 \sim 1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 说明在白天气温较高时段, 城区与郊区的差异不大; LCZ A 和 G 表现出一定的降低日最高气温的效果。

2.4 升温/冷却率差异

城市热岛(冷岛)效应本质上是由于城区-郊区之间的升温/冷却率差异引起的^[12], 类似的, 不同 LCZ 类型的升温/冷却率也存在差异, 进而引起局地气温的变化差异。图 4 为所选 17 个典型气象日期间 LCZ 1、4、9、G、D 地块的平均逐时冷却率。



注: --- LCZD — LCZ1 —●— LCZ4 —▲— LCZ9 —■— LCZG

图 4 南京夏季(2016-07-21—2016-09-15)17 个典型气象日期间 LCZ 1、4、9、D、G 地块的平均逐时(08:00—07:00)冷却率

Fig. 4 Diurnal variation of the mean hourly cooling rates for LCZ 1, 4, 9, D, G for the 17 ideal days

日升温/冷却率总体变化规律总结如下: 1) 气温上升阶段: 上午 06:00—09:00 期间, 升温率迅速增加, 气温上升速度快; 10:00—15:00 期间, 升温率逐渐降低到接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 气温逐步上升达到日最大值; 2) 气温下降阶段: 16:00—19:00 期间, 冷却率迅速增加, 气温下降速度快; 20:00—06:00 冷却率逐渐降低到接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 气温逐步降低至日最低值。

从各 LCZ 地块之间的升温/冷却率差异来看, 存在两个差异较大的时段: 第 1 个差异较大的时段是 07:00—10:00, 这一时段 LCZ 1、4、G 的升温率显著小于 LCZ D, 产生的后续影响是这 3 个 LCZ 地块

的气温开始低于 LCZ D, 形成冷岛效应; 第 2 个差异较大的时段是 18:00—21:00, 这一时段 LCZ 1、4、G 的冷却率显著小于 LCZ D, 产生的后续影响是这 3 个地块的气温逐渐高于 LCZ D, 形成热岛效应并逐渐增强。总的来说, 相较于其他 LCZ 地块, LCZ D 升温快降温也快。

图 4 所展现的各 LCZ 地块升温/冷却率差异日变化特征与图 1 所展示的热岛强度日变化特征形成了清晰的对应关系, 一定程度地解释了热岛强度日变化规律, 但更深层次的物理过程和机制仍有待进一步探索。LCZ 9(稀疏建筑区)的升温/冷却率全天与 LCZ D 相近, 这是因为两个地块的物理特征数值相近。

3 讨论

如何缓解热岛效应是城市规划与城市设计的重要内容之一, 这需要加强城市气候研究与规划设计实践之间的联系^[19]。LCZ 分区方法初步建立了地块特征参数(空间形态、地表特征、材料构造、人为热等)与局地热环境之间的明确联系, 为城市气候对接规划设计提供了新思路。现根据上一节的分析结果, 尝试提出一些针对城市规划、城市设计以及城市更新改造的思考。

1) 可将 LCZ 分区方法应用于城市环境气候图的绘制。通过观测发现, 不同 LCZ 类型的地块可形成稳定、规律的热岛强度变化特征, 与其他学者^[2-4]在欧洲、北美、日本等地应用 LCZ 方法得出的研究结论基本一致。因此, 可将 LCZ 分区方法应用于城市环境气候图的绘制, 辅助评估城市设计、小区规划、街区更新对局地热岛强度的影响, 为制定相应的缓解措施提供参考。

2) 可从提高地块的透水下垫面比例和开敞度这两个方面来降低局地热岛强度。研究结果表明, 地块的建筑群紧凑度和不透水下垫面比例越高, 则热岛效应越强, 例如: 紧凑建筑区(LCZ 1、2_E、3₂)的热岛强度平均大于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 开敞建筑区(LCZ 4、5)的热岛强度平均大于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 开敞且绿地率较高的地块(LCZ 6₅、9)的热岛强度相对较小, 平均为 $0.4 \sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。故对于高硬地面比例的紧凑建成区, 在进行更新改造时, 应考虑通过采用透水铺装、发展屋顶绿化等方式增加地块的透水面积比, 此外, 应尽量开辟一定数量的小公园和小广场并分散布置, 以提高地块的平均开敞度。

3)可将 LCZ 分区方法与城市通风设计相结合。研究表明,不同类型 LCZ 地块的夜间热岛强度差异显著,且地块特征差异越大则气温差值也越大。由于空气总是从冷的区域向热的区域流动且温差愈大流动驱动力愈强,在城市规划时可考虑将特征差异较大的地块相邻或交错布置,以加强城市内部不同地块之间的空气交换效率,改善通风,充分利用热岛强度较低的 LCZ 类型的夜间冷却效应。

4)应综合全面考虑水体的热效应。通常水体被视为缓解城市热岛效应的有利元素,观测结果则表明水域区(LCZ G)白天降温效果较好但夜间热岛效应明显,因此,在规划设计时需综合全面地考虑水体的热效应,以便更加合理地布置水体。

4 结论

城市局地气候分区(Local Climate Zone, LCZ)是一套用于城市气温研究的客观、标准、通用的局地气候分类方法。根据 LCZ 分区方法,选取分布于南京中心城区至郊区的 12 个不同类型的 LCZ 地块进行气温观测,初步检验了 LCZ 方法的合理性与适用性。对南京夏季晴朗、少云、弱风的典型天气条件下所选 LCZ 地块的局地气温时空变化特征进行了分析,分析内容包括热岛强度日变化特征、平均热岛强度、日最高/最低温度差异和地块升温/冷却率差异,得出结论如下:

1)各 LCZ 地块的热岛强度在日落后迅速增加,日落后 3~5 h 达到最大值,然后逐渐减小,变化规律与前人的研究结论一致;午间时段,各 LCZ 地块出现弱冷岛效应;各 LCZ 地块的日最低气温差异显著高于日最高气温差异,反映出各地块该日最终可冷却到的程度存在较大差异;各 LCZ 地块的热岛强度及气温日变化规律与地块的升温/冷却率变化特征相吻合。

2)不同类型 LCZ 地块的夜间平均热岛强度差异明显,地块的建筑群紧凑度和不透水下垫面比例越高则热岛效应越强,强度值与地块物理特征有较强的相关性。其中,紧凑建筑区(LCZ 1、2_E、3₂)的热岛强度趋于最高,平均大于 3 °C;其次是开敞建筑区和大型低层建筑区(LCZ 4、5、8),平均大于 2 °C,开敞且绿地率较高的地块(LCZ 6₅、9)热岛强度较小,平均为 0.4~1.2 °C;LCZ 10(重工业区)的热岛强度与 LCZ 1(紧凑高层建筑区)相当。

3)水体和树林一般被视为缓解城市热岛效应的

有利元素,观测结果表明:水域区(LCZ G)在白天有较好的降温效果,但夜间热岛效应显著;稠密树木区(LCZ A)在全天均有一定的降温效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] STEWART I D, OKE T R, KRAYENHOFF E S. Evaluation of the "local climate zone" scheme using temperature observations and model simulations [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34 (4): 1062-1080.
- [3] LECONTE F, BOUYER J, CLAVERIE R, et al. Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment; Evaluation of the method using mobile measurements [J]. Building and Environment, 2015, 83: 39-49.
- [4] THOMAS G, SHERIN A P, ANSAR S, et al. Analysis of urban heat island in Kochi, India, using a modified Local Climate Zone classification[J]. Procedia Environmental Sciences, 2014, 21: 3-13.
- [5] 林中立,徐涵秋. 基于 LCZ 的城市热岛强度研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 713-722.
LIN Z L, XU H Q. A study of urban heat island intensity based on "Local Climate Zones"[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(5): 713-722. (in Chinese)
- [6] 刘琳,刘京,林姚宇,等. 多种城市地表形态的局地气候分析[J]. 建筑科学, 2017(2): 8-14.
LIU L, LIU J, LIN Y Y, et al. Local climatic analysis of multiple urban surface morphology [J]. Building Science, 2017, 33(2): 8-14. (in Chinese)
- [7] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Meteorological Bureau, Climate Information Center, Climate Data Office and Tsinghua University, Department of Building Science and Technology. China standard weather data for analyzing building thermal conditions[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [8] Google earth[EB/OL]. [2017-08-22]. <https://earth.google.com/web/>.
- [9] QI F, WANG Y. A new calculation method for shape coefficient of residential building using Google Earth [J]. Energy and Buildings, 2014, 76: 72-80.

- Automation, 2008, 25 (1):3353-3358.
- [24] SUN C Y, SONG J Y, LI L F. Implementation of hybrid short-term load forecasting system with analysis of temperature sensitivities [J]. *Soft Computing*, 2008, 12(7):633-638.
- [25] TOMONBU S, HIROKAZU S, YOSHINORI T. Next-day load curve forecasting using neural network based on similarity [J]. *Electric Machines & Power Systems*, 2001, 29(10):939-948.
- [26] PAUDEL S, ELMITRI M, COUTURIER S. A relevant data selection method for energy consumption prediction of low energy building based on support vector machine [J]. *Energy & Buildings*, 2017, 138: 240-256.
- [27] YAU Y H, HASBI S. A comprehensive case study of climate change impacts on the cooling load in an air-conditioned office building in malaysia [J]. *Energy Procedia*, 2017, 143:295-300.
- [28] 王蓓蓓,朱峰,嵇文路. 中央空调降负荷潜力建模及影响因素分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(19):44-52.
WANG B B, ZHU F, JI W L. Load cutting potential modeling of central air conditioning and analysis on influencing factors [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(19):44-52. (in Chinese)
- (编辑 王秀玲)
-
- (上接第 167 页)
- [10] BRUSE M, FLEER H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 1998, 13: 373-384.
- [11] OKE T R. An algorithmic scheme to estimate hourly heat island magnitude[C]// 2nd Urban Environment Symposium, 1998, Albuquerque, NM.
- [12] OKE T R. *Boundary layer climates* [M]. London: Routledge, 2015.
- [13] China Meteorological Data Service Center [EB/OL]. [2017-06-22]. <http://data.cma.cn/en>.
- [14] YANG X, ZHAO L. Diurnal thermal behavior of pavements, vegetation, and water pond in a hot-humid city. *Buildings*, 2016, 6: 1-12.
- [15] CHOW W T L, ROTH M. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore [J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 26(15): 2243-2260.
- [16] SANG J, LIU H, LIU H, et al. Observational and numerical studies of wintertime urban boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 87(2): 243-258.
- [17] OKE T R. The energetic basis of the urban heat island [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108: 1-24.
- [18] THEEUWES N E, STEENEVELD G J, RONDA R J, et al. Cool city mornings by urban heat [J]. *Environmental Research Letters*, 2015:1-9.
- [19] 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 [J]. *南方建筑*, 2017(2):21-28.
CHEN K, TANG Y. Research progress of local climate zones and its applications in urban planning [J]. *South Architecture*, 2017 (2): 21-28. (in Chinese)
- (编辑 胡玲)