

基于局地气候分区的城市热环境分析 ——以北京市为例*

马永欢¹⁾ 鹿琳琳^{2)†} 肖达^{2,3)} 蔡萌⁴⁾ 任超⁵⁾ 周美玲³⁾ 惠文华³⁾ 李庆亭⁶⁾

(1) 中华人民共和国自然资源部信息中心, 100812, 北京;

2) 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 100094, 北京;

3) 长安大学地质工程与测绘学院, 710054, 陕西西安;

4) 香港中文大学建筑学院, 999077, 香港;

5) 香港大学建筑学院, 999077, 香港;

6) 中国科学院空天信息创新研究院航空遥感中心, 100094, 北京)

摘要 局地气候分区(local climate zone, LCZ)是一种用于城市热岛研究的地表分类系统框架。本文基于卫星遥感影像、建筑物矢量等多源数据,开展了北京市中心城区局地气候分区分类制图,探讨了不同LCZ类型的特征及季节差异:1)根据城市建筑矢量、地物覆盖分类数据,利用多层次分类方法构建研究区LCZ地图;2)利用Landsat 8卫星遥感影像和辐射传输方程法,反演得到研究区逐月地表温度数据;3)结合LCZ地图和多时相地表温度数据,分析不同局地气候分区各月份及季节间的热表现及差异。结果表明:研究区建筑以中低层为主,且多为开阔类型,自然地地表覆盖中低植被区LCZ D占主要比例;LCZ 1-3密集建筑类型较其他建筑类型地表温度更高,且随着建筑高度的降低温度依次增加,除水体外,LCZ A/B林区是所有类型温度较低的区域;夏季各LCZ分区之间温度差异显著,7月份热岛强度达到全年最大值。研究结果能够为城市规划提供设计参考,助力于城市的可持续健康发展。

关键词 城市热岛效应;局地气候分区;地表温度;Landsat;北京;城市可持续发展

中图分类号 TP79

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021200

根据联合国报道,全球城市人口比例从1950年低于30%增至2018年的55%,2050年这一比例预计达68%^[1]。城市人口的增长与城市化的推进,造成城市下垫面发生剧烈变化,进而影响了地表与大气的能量交换过程,导致城市热环境的变化^[2]。在这种情况下,城市中心地区的地表温度通常都高于周边农村地区的相应温度,该现象被称为城市热岛(urban heat island, UHI)^[3]。城市热岛能够带来空气污染加剧、能耗增加、居民健康风险上升等一系列负面影响,近年来引起了国内外学者的广泛关注^[4-5]。

为充分理解热岛及其影响因素,研究人员分别从城市扩张、土地覆盖、景观格局和城市形态等角度分析其与地表温度的相关性^[6-7]。但长久以来没有统一标准量化城市热岛强度,已有研究通常指定特定区域为“城市”和“乡村”,以二者温度的差异来衡量热岛效应^[8-9]。虽然城市和乡村的定义可以与实地景观相关联,但城市和乡村的界定缺乏公认的方法和标准,

多由研究人员主观决定^[10]。为了采用标准化的方法研究城市热岛并开展多城市对比,Stewart等^[11]提出了局地气候分区(local climate zone, LCZ)的概念,用更标准、客观和量化的方案描述城市和农村地区的形态和功能。LCZ指水平尺度从数百米到数千米的一个具有均质地表覆盖、结构、材质和人类活动的区域,其分类系统中有17个标准类型,包括10种建成景观类型和7种自然覆盖类型。有学者探究了应用LCZ研究城市热岛效应的科学性:Stewart等^[12]采用地表大气模式的温度观测和模拟结果来评估LCZ的概念划分,结果表明不同类型的LCZ都存在热差异,这种差异主要受建筑高度和间距、透水表面比例、树木密度和土壤湿度的影响;Geletić等^[13]分析了捷克的2个最大城市布拉格和布尔诺LCZ与地表温度(land surface temperature, LST)之间的关系,证实了LCZ的独立性以及LST之间的差异性;Wang等^[14]分析了美国2个干旱区城市的局地气候区的温度并对

* 中国科学院先导专项项目(XDA19090130);国家自然科学基金资助项目(42071321, 41732066)

† 通信作者:鹿琳琳(1984—),女,副研究员。研究方向:城市遥感与可持续发展。E-mail: lull@radi.ac.cn

收稿日期:2021-08-24

比了 LCZ 物理量与参考值之间的差异. 我国学者在基于 LCZ 的城市热岛研究中也开展了诸多尝试^[15-17]: 林中立等^[16]利用 LCZ 分类体系分析了福州的城市热岛强度和分布状况; 金珊合等^[17]分析了大连市区的不同局地气候分区对地表温度的影响. 此外, LCZ 还被应用于能耗、空气污染分布模式和热舒适性等研究领域^[18-20].

LCZ 方案提出后, 众多研究致力于利用遥感影像和地理信息数据构建 LCZ 地图^[21-23]. 目前, 以可免费获取的遥感影像为主要数据源的 LCZ 分类制图方法取得了较大进展. 世界城市数据库和访问门户工具 (world urban database and access portal tools, WUDAPT) 提出了采用 Landsat 8 遥感影像的 LCZ 分类方法, 用于更好地理解全球城市的形态和功能^[24-25]. 但该方法达到的分类精度为 60%~90%, 且极大依赖训练样本的选取. Qiu 等^[26]结合全球城市脚印、开放街区地图、夜间灯光数据、Sentinel-2 和 Landsat 8 多光谱 5 种数据进行 LCZ 分类, 发现多种数据的使用可以有效提高 LCZ 分类精度. 基于多时相 Sentinel-2 卫星影像、卷积神经网络等深度学习技术的应用, 将 LCZ 分类精度较基于像元和纹理的随机森林分类方法提高了 4.8%~16.5%^[27]. 由于全球城市区域存在较大的多样性和异质性, 发展具备鲁棒性且高精度的 LCZ 制图方法仍是局地气候分区研究关注的热点. 与以往城市土地覆盖分类不同, 不同 LCZ 类型的区分需要考虑天空开阔度、粗糙度、建筑高度和人为热通量等因素. 遥感数据源中通常缺乏这些信息, 而城市地理信息数据能够提供城市冠层参数信息. 基于地理信息数据的 LCZ 分类方法, 通过设定基本的分析单元, 计算其中的城市冠层参数, 利用基于规则的分类方法

和冠层参数值进行分类. 因数据获取困难, 全球仅 20 多座城市开展了基于地理信息数据的 LCZ 分类案例研究^[28]. 根据实际的城市环境, 研究者对 LCZ 分类结构进行局部调整, 并尝试了模糊规则分类、贝叶斯分类器、K 均值聚类等多种方法^[28].

针对城市局地气候分区分类数据获取的困难, 本文尝试使用开放的多源地理信息数据构建北京市中心城区局地气候分区图, 结合遥感影像反演的地表温度, 比较和分析不同 LCZ 类型的地表温度特征及其月份及季节性变化. 分析结果为制定城市规划和设计策略以减缓热岛效应的负面影响提供参考.

1 研究区与数据源

1.1 研究区 北京地区平均海拔约 43.5 m, 地形西北高东南低. 西部为西山属太行山脉, 北部和东北部为军都山属燕山山脉. 北京属于温带大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 年平均温度约 13 ℃, 夏季气温炎热 (常达 40 ℃), 冬季平均温度基本保持 ≤ 0 ℃. 随着城市化的发展, 城区建设用地面积急剧增加, 出现了较为显著的热岛现象^[29-30]. 本文选择的研究区主要包括北京市五环路内的中心城区 (图 1), 总面积约为 1 821.5 km².

1.2 数据源 主要选用 2 种类型的数据: 1) 遥感影像数据, 用于研究区地表温度反演; 2) 地理信息数据, 用以局地气候分区分类 (表 1).

为分析局地气候分区的热特性, 选用覆盖全年各月份的 Landsat 8 卫星遥感影像. 在辐射定标、大气纠正预处理后, 采用第 10 波段热红外数据进行地表温度的反演. 研究区建筑矢量数据 (building vector data,

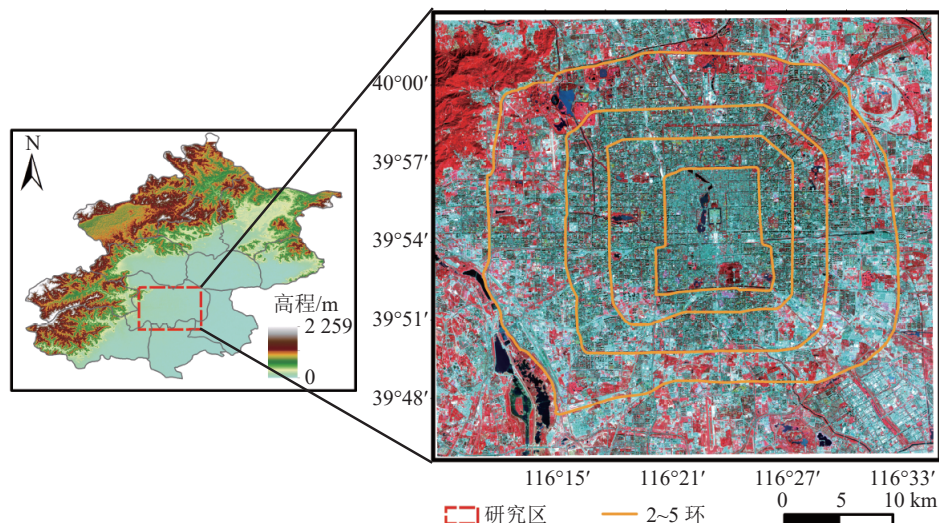


图 1 研究区概况

BVD)包含建筑的轮廓以及建筑的高度信息,用于建筑物三维形态数据的获取.开放街道地图计划(open street map, OSM)数据是可免费获取的众源地理信息数据,其路网数据定期发布,在城市中心区具备较高的质量和现势性.土地利用和土地覆盖分类(land use

and land cover, LULC)来自清华大学(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)FROM-GLC数据集.该数据集是基于 Landsat TM/ETM+影像生产的全球 30 m 分辨率土地覆盖数据,用以计算分类参数和区分局地气候分区中不同植被类型.

表 1 本研究采用的数据源

数据类型	影像ID	获取时间	季节	来源	分辨率/m
Landsat 8 OLI/TIRS	LC81230322017063LGN00	2017-03-04T10:53:21			
	LC81230322018098LGN00	2018-04-08T10:52:54	春		
	LC81230322019133LGN00	2019-05-13T10:53:04			
	LC81230322017191LGN00	2017-07-10T10:53:19			
	LC81230322019165LGN00	2019-06-14T10:53:20	夏		
	LC81230322019165LGN00	2019-08-17T10:53:39		USGS(https://glovis.usgs.gov/)	15(全色波段)、 30(多光谱波段)、 100(热红外波段)
	LC81230322019261LGN00	2019-09-18T10:53:48			
	LC81230322019293LGN00	2019-10-20T10:53:54	秋		
	LC81230322019309LGN00	2019-11-05T10:53:54			
	LC81230322017031LGN00	2017-01-31T10:53:34			
LC81230322018034LGN00	2018-02-03T10:53:23	冬			
LC81230322019341LGN00	2019-12-07T10:53:50				
BVD	—	2019	—	高德地图	—
OSM	—	2019	—	open street map	—
LULC	—	2017	—	清华大学	30
DEM	—	2009	—	地理空间数据云	30

2 理论方法

2.1 局地气候分区分类 局地气候分区分类框架把地表分为 17 种类型,可采用表征地表覆盖、结构、辐射特性、热力特性和人类活动特征的标准化参数进行区分^[11].本文选择 5 种地表形态参数进行研究区 LCZ 制图^[31-32],包括建筑占地面积比率(building surface fraction, BSF)、透水面比率(perVIOUS surface fraction, PSF)、不透水面比率(impervious surface fraction, ISF)、天空开阔度(sky view factor, SVF)和平均几何高度(height of roughness elements, HRE). BSF 指分析单元内建筑物占地比例; PSF 指透水面如裸土、植被、水体等占地的比例,通过地表覆盖分类数据获得; ISF 指不透水表面即硬质铺地的占地比例,除去建筑和透水面所剩余的部分; SVF 指地面可见的天空半球数量的平均比率,使用地形可视化工具箱^[33]计算; HRE 指分析单元内建筑物高度的几何平均值.利用 OSM 路网数据划分街区单元,作为各参数计算的最小分析单元.

不同局地气候分区类型的地表形态特征参数的值域范围如表 2. 考虑研究区存在参数值超过表格中

给定的值域范围的情况,本研究增加了极其开阔高层建筑 LCZ 4A($0.1 \leq BSF < 0.2$, $HRE \geq 25$ m)和极其开阔中层建筑 LCZ 5A($0.1 \leq BSF < 0.2$, $10 \text{ m} \leq HRE < 25 \text{ m}$),用以表示介于 LCZ 4、LCZ 5 和 LCZ A 之间的建筑类型.

采用分层次分类法对研究区 LCZ 类型进行划分.首先,设置 $BSF < 10\%$ 的阈值条件区分出 LCZ 1~9 和 LCZ A~G,将研究区分为自然覆盖类型和建筑类型.针对 LCZ 1~9,以 $HRE \geq 25$ m 代表高层建筑,包括 LCZ 1、LCZ 4 和 LCZ 4A 这 3 类; $10 \sim < 25$ m 代表中层建筑,包括 LCZ 2、LCZ 5 和 LCZ 5A 这 3 类; $2 \sim < 10$ m 代表低层建筑,有 LCZ 3、LCZ 6、LCZ 7、LCZ 8 和 LCZ 9 这 5 类.对于中层建筑和高层建筑,进一步加入 BSF 规则区分为不同类别.对于平均建筑高度为 $2 \sim < 10$ m 的低层建筑类型,加入透水面比率 PSF、不透水面比率 ISF 和天空开阔度 SVF 进一步细分.最后,采用逐象元方式评价 LCZ 分类结果的精度.在研究区选择随机分布的样本点,结合高分辨率遥感影像、天地图、百度街景等数据及实地考察,根据专家知识判断样本点 LCZ 类型.基于验证样本数据,建立

表 2 LCZ 参数表

局地气候分区	BSF	ISF	PSF	SVF	HRE/m
	%				
LCZ 1	40~60	40~60	<10	0.2~0.4	≥25
LCZ 2	40~70	30~50	<20	0.3~0.6	10~<25
LCZ 3	40~70	20~50	<30	0.2~0.6	3~<10
LCZ 4	20~40	30~40	30~40	0.5~0.7	≥25
LCZ 5	20~40	30~50	20~40	0.5~0.8	10~<25
LCZ 6	20~40	20~50	30~60	0.6~0.9	3~<10
LCZ 7	60~90	<20	<30	0.2~0.5	2~4
LCZ 8	30~50	40~50	<20	>0.7	3~<10
LCZ 9	10~20	60~80	<20	>0.8	3~<10
LCZ 10	20~30	20~40	40~50	0.6~0.9	5~15
LCZ A	<10	<10	>90	<0.4	3~30
LCZ B	<10	<10	>90	0.5~0.8	3~15
LCZ C	<10	<10	>90	0.7~0.8	<2
LCZ D	<10	<10	>90	>0.9	<0.25
LCZ E	<10	>90	<10	>0.9	<0.25
LCZ F	<10	<10	>90	>0.9	<0.25
LCZ G	<10	<10	>90	>0.9	—

混淆矩阵, 计算总体精度(overall accuracy, OA)、制图精度(producers' accuracy, PA)、用户精度(users' accuracy, UA)以及 Kappa 系数等, 定量评价 LCZ 分类结果的精度。

2.2 城市热环境分析

2.2.1 遥感地表温度反演 采用辐射传输方程法进行地表温度的反演。因其具有坚实的物理基础以及较高的反演精度, 辐射传输方程法是一种较为常用的地表温度反演方法^[34]。该方法的核心思想为传感器接收到的热红外辐射亮度 L_s , 包含经过大气上行辐射亮度 L_1 、大气下行辐射亮度 L_2 及地面辐射经过大气传输后到达传感器的辐射亮度 3 部分^[34]。因此, 卫星接收到的热红外辐射亮度 L_s 表示为

$$L_s = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_2] \cdot \tau + L_1, \quad (1)$$

式中: ε 为地表比辐射率; $B(T_s)$ 为真实温度为 T_s 的黑体辐射亮度, T_s 单位为 $^{\circ}\text{C}$; τ 表示大气透射率; 大气上行辐射亮度 L_1 和大气下行辐射亮度 L_2 的单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

对式(1)求解可以得到 $B(T_s)$, 再根据普朗克的反函数可以计算出地表温度 T_s 。

$$B(T_s) = \frac{L_s - L_1 - \tau(1 - \varepsilon)L_2}{\tau\varepsilon}, \quad (2)$$

$$T_s = \frac{K_2}{\ln(K_1/B(T_s) + 1)}, \quad (3)$$

式中 K_1 、 K_2 是传感器定标常数, 对应于 Landsat 8 影像第 10 波段。

通过上述公式可知, LST 反演预知的已知条件为 L_1 、 L_2 、 τ 、 ε , 其中前 3 个参数可以由 NASA 大气校正参数网站查询得到(<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)。根据覃志豪等^[35]提出的方法进行计算, 依据归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)设定阈值, 进而分类别计算不同地物的 ε 值。

2.2.2 局地气候分区热效应分析 不同局地气候分区类别的建筑材料、透水面比率、不透水面比率、天空开阔度等的不同, 会造成不同的比热容和热效应。基于局地气候分区评估城市热环境, 可以更客观、准确地描述热岛强度的变化。基于 LCZ 的热岛强度(urban heat island intensity, UHII)通常以 LCZ 1~10 建筑类型的平均地表温度与 LCZ A、B、C、D、G 自然类型的平均地表温度的差值表示, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

3 结果分析

3.1 局地气候分区分类 LCZ 分类结果显示北京一环内密集低层 LCZ 3 占主要比例, 建筑类型多为高度较低的胡同老建筑(图 2)。这类建筑分布密集, 下垫面是不透水且散热慢的混凝土地面, 植被覆盖度较低, 因此, 在这些地方一般夏季闷热, 冬季寒冷。随着环路增加, LCZ 类型的分布呈现一定的规律性, 大致的趋势是 2~4 环以 LCZ 5 为主, 向外扩散到 4、5 环时以 LCZ 6、LCZ 9 为主, 其余 LCZ 建筑类型在其间零散分布。

研究区建筑类型 LCZ 总占比 71.83%, 其中: 占比最多的是开阔中层 LCZ 5, 其次是稀零建筑 LCZ 9, 然后是大型低层 LCZ 8 和开阔低层建筑 LCZ 6(表 3)。在建筑类型 LCZ 中密集型建筑(LCZ 1~3)的占比总计为 7.78%。整体上北京的建筑高度以中低层为主, 且多为开阔类型。LCZ 地表覆盖类型中, 低植被区 LCZ D 占主要比例, 主要分布在北京的西南和东北方向。高低密度林区 LCZ A/B 主要分布在北京西北山区和各公园林区。硬化地面 LCZ E 由北京的主要道路、公园广场、水泥地面等组成。水体 LCZ G 由北京各大水库、河流、湖泊组成。

3.2 分类精度 根据分类混淆矩阵, LCZ 分类总体精度达到 84.9%, $K=0.83$ 。不同 LCZ 类型分类精度差别较大。基于规则的 LCZ 分类方法对原始数据中的噪声较为敏感。自然覆盖类型中 LCZ D 低矮植被和 LCZ E 硬化地面分类精度较低, LCZ 9 稀疏建筑较多错分为了这 2 类。由于分类过程中设定了 $\text{BSF} < 10\%$ 的规则, 这可能由采用的建筑轮廓数据存在遗漏所导

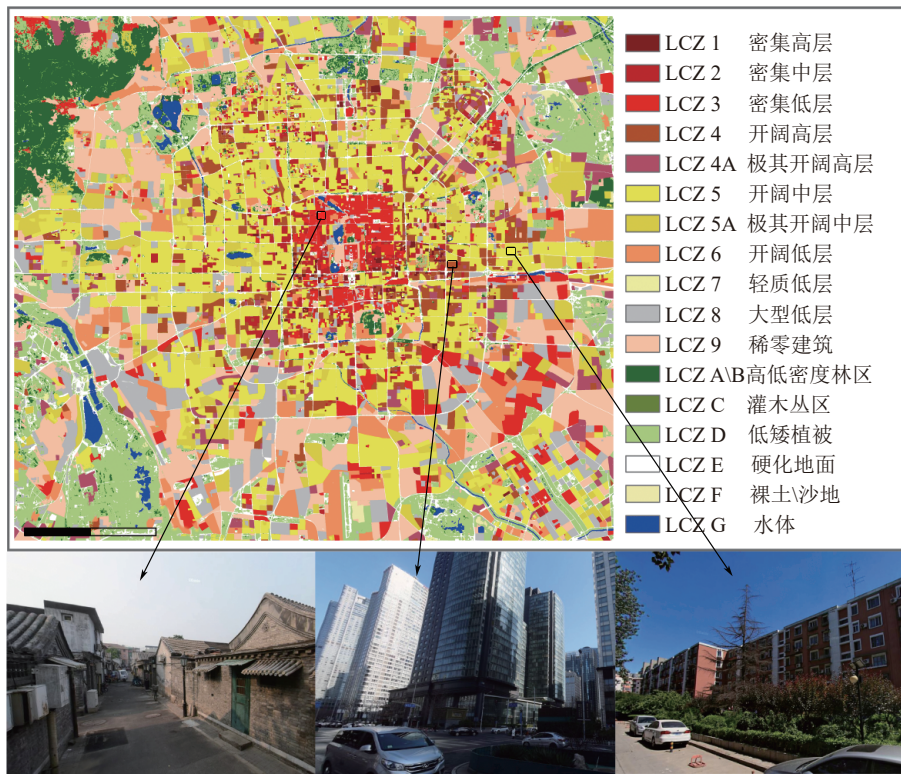


图 2 研究区 LCZ 分类结果

表 3 各 LCZ 面积占比

局地气候分区	面积占比/%	局地气候分区	面积占比/%
LCZ 1	0.42	LCZ 8	7.72
LCZ 2	2.07	LCZ 9	15.66
LCZ 3	5.29	LCZ A/B	5.06
LCZ 4	4.49	LCZ C	0.38
LCZ 4A	3.54	LCZ D	13.9
LCZ 5	19.03	LCZ E	7.37
LCZ 5A	6.69	LCZ F	0.30
LCZ 6	7.17	LCZ G	1.16
LCZ 7	0.04		

致。建筑类型 LCZ 1、7 和 5/5A 分类精度较低, 其中 LCZ 4 较多错分为了 LCZ 1. LCZ 1 密集高层建筑与 LCZ 4 开阔高层建筑平均高度值域相同, 主要以建筑占地面积比例区分. LCZ 8 大型低层建筑易错分为 LCZ 5 开阔高层建筑, 二者 BSF 值域相似, 主要以建筑物平均高度的不同来区分. 因此, 原始数据存在噪声时这些类型容易产生混淆和错分. 今后可考虑添加街谷纵横比等决策规则及提高数据源精度, 进一步提高 LCZ 分类精度.

3.3 热环境分析 从国家气象科学中心获取接近 Landsat 卫星影像获取时间的气象站点实测温度, 计算其与像元温度之间的平均偏差、标准差和均方根

误差, 验证遥感反演的地表温度的精度, 发现其与实测温度的偏差为 0.5~2.1 °C, 可满足城市热环境分析的需求^[36]. 由于受气象条件、人为热释放、绿地等季节性变化影响, 城市热岛存在显著的季节性规律^[37-38]. 基于 LCZ 分类图和地表温度反演数据, 逐像元统计并比较各月份不同 LCZ 类型的地表温度数据分布情况(图 3). 结果表明 LCZ 1~3 较其他建筑类型地表温度更高, 与基于 LCZ 的全球 50 个城市的热岛强度对比分析研究结论相一致, 大部分城市密集建筑类型(LCZ 1~3)和商业/工业建筑类型(LCZ 8/10)较开阔建筑类型(LCZ 4~6)具有更高的热岛强度^[39]. 此外, LCZ 1~3 呈现随着建筑高度的降低, 温度依次升高的现象, 其中 LCZ 3 的温度是每个月份地表温度的最高值. 建筑越高阴影面积越大, 地面接收到的太阳辐射越少, 有助于形成地面风环流现象, 形成冷却效果, 在深圳增加建筑物高度可以降低地表温度^[40]. 而在大连市对于相同密度的建筑, 多层建筑高度覆盖区地表温度较高^[17].

春季各 LCZ 分区的温度差异不大, 建筑与自然 LCZ 类型平均温度相近. 春季地表温度的最小值出现在自然类型的 LCZ A/B 和 LCZ G 中, 建筑类型 LCZ 3 和 LCZ 4 之间的温度出现断档现象. 秋季各 LCZ 类型的热特性与春季相似. 夏季各 LCZ 之间 LST 的差异较明显, 自然类型的 LCZ 温度明显低于建筑类型

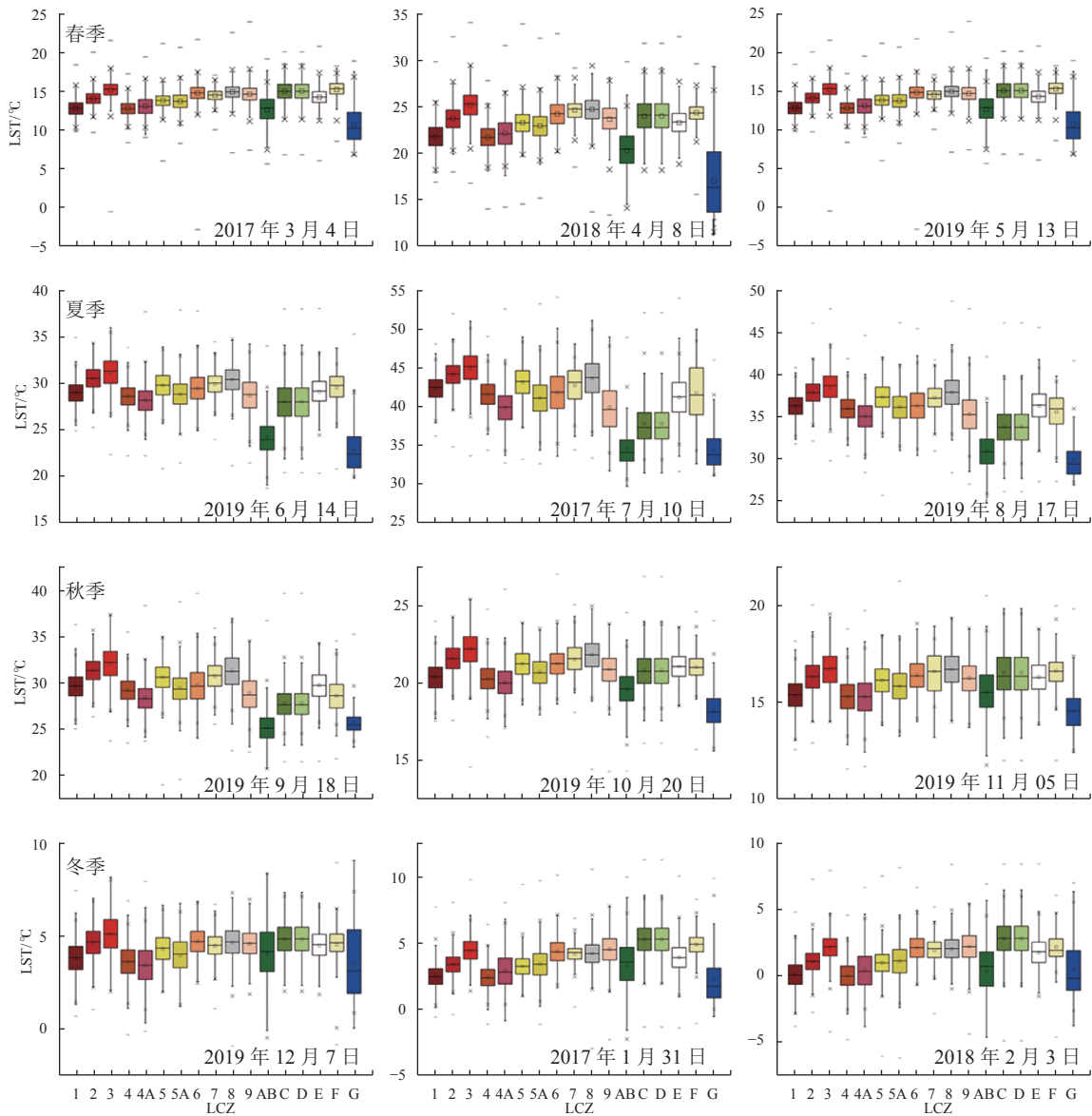


图 3 各季节不同 LCZ 分区的地表温度

LCZ. 最小温度值出现在 LCZ A/B 和 LCZ G 之间, 说明林区和水体可以更好地缓解热岛效应. 大型低层建筑 LCZ 8 的温度值也较高, 与 LCZ 3 相近, 这可能是大型低层建筑的材料和不透水面比例高所致. 硬化地面 LCZ E 和裸地 LCZ F 的温度也高于其他自然 LCZ 类型. 冬季出现了与夏季相反的现象, 建筑类型 LCZ 的温度略低于自然类型 LCZ, 产生了冷岛效应.

在得到逐月 LCZ 分区平均温度后, 分别计算其热岛强度 UHII(图 4). 其中, 建筑类型 LCZ 与 LCZ A/B 之间的热岛强度是 4 种中最大的. 根据每个月的动态热岛强度可知, 6—9 月热岛强度较高, 其中 7 月热岛效应为最强, 在 11—次年 1 月 $UHII < 0^{\circ}\text{C}$ 出现冷岛效应. 此外, 春季末转夏季时的热岛强度增加最快, 夏季末转秋季的热岛强度减弱也最快, 全年的热岛强度变化近似于 7 月份对称. LCZ 3 与 LCZ A/B、

LCZ C、LCZ D 和 LCZ G 的热岛强度相对于其他分区最大, 因此改建密集低层建筑可以有效减轻研究区热岛效应.

4 结论与展望

利用多源 GIS 和遥感数据, 通过计算地表形态特征参数, 利用层次分类法构建了北京市街区尺度的局地气候分区地图. 然后采用辐射传输方程法和 Landsat 8 卫星遥感数据反演得到研究区逐月地表温度. 在此基础上, 分析了北京市主城区局地气候分区的空间特征及不同季节各 LCZ 的热效应和热岛强度变化. 结果表明: 研究区建筑类型以开阔中层 LCZ 5 为主, 地表覆盖中低植被区 LCZ D 占主要比例; 密集建筑类型(LCZ 1~3)具有较高的热岛强度, 且随着建筑高度的降低地表温度依次增加, 除水体外 LCZ

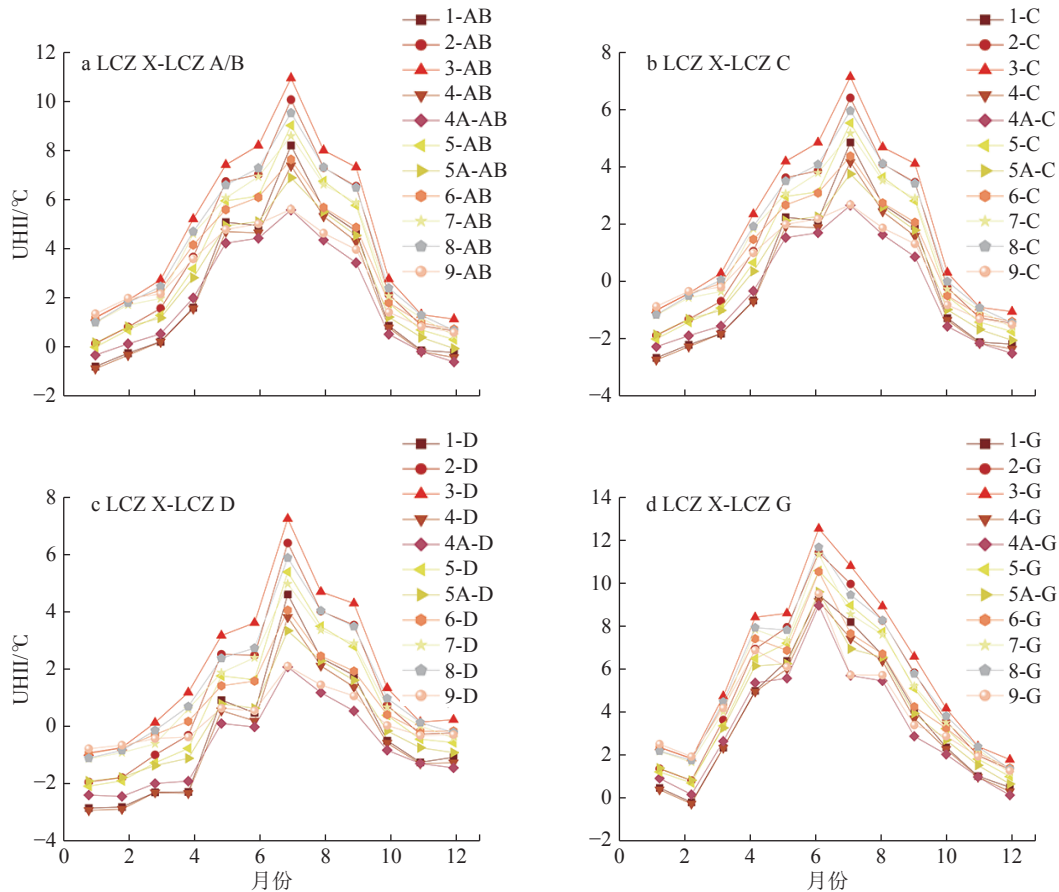


图4 不同LCZ分区的热岛强度

A/B 林区是所有类型温度最低的区域; 夏季不同 LCZ 分区的温度差异较其他季节显著, 7 月份热岛强度达到全年最大. 因此, 在北京城市建设规划方案中, 应考虑适当降低建筑密度, 扩大林地、水体等自然植被的覆盖面积, 将有助于热岛效应的缓解. 本文提出的局地气候分区制图及热岛季节性特征分析方法可应用于其他城市. 此外, 今后可以在 LCZ 框架下开展城市热环境与影响因素关系研究, 深入分析热岛形成的过程和机制.

5 参考文献

- [1] UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS P D. World Urbanization Prospects: the 2018 Revision[J]. New York United Nations May, 2018
- [2] ZHAO L, LEE X, SMITH R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat Islands[J]. Nature, 2014, 511(7508): 216
- [3] OKE T R. City size and the urban heat island[J]. Atmospheric Environment (1967), 1973, 7(8): 769
- [4] WENG Q H. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(4): 335
- [5] PATZ J A, CAMPBELL-LENDRUM D, HOLLOWAY T, et al. Impact of regional climate change on human health[J]. Nature, 2005, 438(7066): 310
- [6] 胡嘉懿, 朱启疆. 城市热岛研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 186
- [7] 冯素云, 张凯选, 鹿琳琳. “海上丝绸之路”超大城市环境变化遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(5): 602
- [8] STEWART I D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(2): 200
- [9] 程雨婷, 刘昭华, 鹿琳琳, 等. 一带一路沿海超大城市热岛时空特征遥感分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1197
- [10] 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
- [11] STEWART I D, OKE T R. Local climate zones for urban temperature studies[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(12): 1879
- [12] 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

- [13] GELETIČ J, LEHNERT M, DOBROVOLNÝ P. Land surface temperature differences within local climate zones, based on two central European cities[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 788
- [14] WANG C Y, MIDDEL A, MYINT S W, et al. Assessing local climate zones in arid cities: the case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 141: 59
- [15] CAI M, REN C, XU Y, et al. Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature using an improved WUDAPT methodology: a case study of Yangtze River Delta, China[J]. *Urban Climate*, 2018, 24: 485
- [16] 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
- [17] 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[J]. *测绘通报*, 2019(4): 87
- [18] YANG X S, PENG L L H, JIANG Z D, et al. Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in Nanjing[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114279
- [19] ZIAUL S, PAL S. Modeling the effects of green alternative on heat island mitigation of a meso level town, West Bengal, India[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(7): 1789
- [20] UNGER J, SKARBIT N, KOVÁCS A, et al. Comparison of regional and urban outdoor thermal stress conditions in heatwave and normal summer periods: a case study[J]. *Urban Climate*, 2020, 32: 100619
- [21] GELETIČ J, LEHNERT M. GIS-based delineation of local climate zones: the case of medium-sized Central European cities[J]. *Moravian Geographical Reports*, 2016, 24(3): 2
- [22] MITRAKA Z, DEL FRATE F, CHRYSOULAKIS N, et al. Exploiting Earth Observation data products for mapping Local Climate Zones: IEEE, 2015[J]. *Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 2015: 1
- [23] QIU C P, MOU L C, SCHMITT M, et al. Local climate zone-based urban land cover classification from multi-seasonal Sentinel-2 images with a recurrent residual network[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 154: 151
- [24] BECHTEL B, ALEXANDER P J, BECK C, et al. Generating WUDAPT Level 0 data - Current status of production and evaluation[J]. *Urban Climate*, 2019, 27: 24
- [25] CHING J, MILLS G, BECHTEL B, et al. WUDAPT: an urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(9): 1907
- [26] QIU C P, SCHMITT M, MOU L C, et al. Feature importance analysis for local climate zone classification using a residual convolutional neural network with multi-source datasets[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1572
- [27] ROSENRETER J, HAGENSIEKER R, WASKE B. Towards large-scale mapping of local climate zones using multitemporal Sentinel 2 data and convolutional neural networks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111472
- [28] QUAN S J, BANSAL P. A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies[J]. *Building and Environment*, 2021, 196: 107791
- [29] 曹广真, 侯鹏, 毛显强. 北京市城市化对地表温度时空特征的影响[J]. *气象*, 2010, 36(3): 19
- [30] 王耀庭, 孟春雷, 苗世光, 等. 基于人口和能耗数据估算北京人为热排放[J]. *干旱气象*, 2020, 38(1): 89
- [31] ZHENG Y S, REN C, XU Y, et al. GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong[J]. *Urban Climate*, 2018, 24: 419
- [32] QUAN J L. Enhanced geographic information system-based mapping of local climate zones in Beijing, China[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(12): 2243
- [33] ZAKŠEK K, OŠTIR K, KOKALJ Ž. Sky-view factor as a relief visualization technique[J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(2): 398
- [34] 段四波, 茹晨, 李召良, 等. Landsat卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(8): 1591
- [35] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星TM6波段范围内地表比辐射率的估计[J]. *国土资源遥感*, 2004, 16(3): 28
- [36] 王亚维, 宋小宁, 唐伯惠, 等. 基于FY-2C数据的地表温度反演验证: 以黄河源区玛曲为例[J]. *国土资源遥感*, 2015, 27(4): 68
- [37] 葛荣凤, 张力小, 王京丽, 等. 城市热岛效应的多尺度变化特征及其周期分析: 以北京市为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(2): 210
- [38] 杨玉婷, 汤家法, 边金虎, 等. 加尔各答市地表温度与不透水面比例季相相关性研究[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(1): 79
- [39] 卢阳, 杨建思, 黄昕, 等. 面向局部气候带的城市形态对地表温度的影响[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(9): 1412
- [40] BECHTEL B, DEMUZERE M, MILLS G, et al. SUHI analysis using Local Climate Zones: a comparison of 50 cities[J]. *Urban Climate*, 2019, 28: 100451

Urban thermal environment analysis by local climate zone in Beijing

MA Yonghuan¹⁾ LU Linlin²⁾ XIAO Da^{2, 3)} CAI Meng⁴⁾ REN Chao⁵⁾
ZHOU Meiling³⁾ HUI Wenhua³⁾ LI Qingting⁶⁾

(1) Information Center of Ministry of Nature Resources of the P. R. China, 100812, Beijing, China;

2) Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 100094, Beijing, China;

3) College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, 710054, Xi'an, Shaanxi, 710054, China;

4) School of Architecture, The Chinese University of Hong Kong, 999077, Hong Kong, China;

5) Faculty of Architecture, The University of Hong Kong, 999077, Hong Kong, China;

6) Airborne Remote Sensing Center, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 100094, Beijing, China)

Abstract Local climate zone(LCZ) is a classification scheme to study urban heat island effect. Multi-source data were used for local climate zone mapping in Beijing. The thermal characteristics and seasonal differences in different LCZ types were discussed. A hierarchical classification method was developed to construct the local climate zone map. Radiation transfer equation method was applied to Landsat 8 satellite remote sensing images to retrieve monthly land surface temperature. Thermal behavior and differences in local climate zones were analyzed for each month using local climate zone map and multi-temporal land surface temperature data. The buildings in Beijing are mainly of medium and low-rise, and most are open types. Local climate zone D of the middle and low vegetation areas occupied the majority of natural land cover. The compact-type built types (local climate zone 1-3) were found to generally have higher surface temperature than other types. Land surface temperature of LCZ 1-3 increased with the decrease of building height. The forest areas of local climate zone A/B showed the lowest temperature except water bodies. There were significant differences in surface temperature for each local climate zone type in summer. Urban heat island intensity reached the highest value in July. The present work can provide reference for urban planning and design and contribute to the sustainable and healthy urban development.

Keywords urban heat island effect; local climate zone; land surface temperature; Landsat; Beijing; urban sustainable development

【责任编辑:刘先勤】