

文章编号:1000-1638(2025)01-0088-12

DOI:10.13484/j.nmgdxzbk.20250110

# 喀斯特山地城市热环境时空演变及其土地利用响应 ——以贵阳市为例\*

熊琼兵,吴学成,唐明贵

(贵州商学院旅游管理学院,贵阳 550014)

**摘要:**随着城市化和工业化的加快,城市热环境越来越恶化,在此背景下,研究不同时期的城市热环境时空演变与土地利用的影响对防范热射病发生、改善人居环境质量和缓解措施制定具有重要意义。基于2002、2011和2019年3期的Landsat遥感卫星数据,在反演贵阳市中心城区地表温度(LST)的基础上,剖析城市热环境空间分布特征、发展方向和运动轨迹,再从土地利用的类型、结构和格局三个视角,解析LST对土地利用的响应。结果表明:(1)土地利用空间格局显著改变,热环境空间布局呈现不规则分布,且从建成区向四周辐射。热岛区多分布于云岩区、南明区及其白云区的建成区,冷岛区主要分布于水域、林地和草地区域。热岛区的空间发展主轴保持在西南—东北方向,且扩张方向与建成区的扩张方向基本一致。(2)“热岛”现象加剧,呈现“上升-下降”模式。2002—2011年、2011—2019年和2002—2019年热岛区的面积分别增加了103.85 km<sup>2</sup>、-10.61 km<sup>2</sup>和40.62 km<sup>2</sup>。(3)LST不仅受土地利用类型、结构和格局三者的影响,而且伴随城市化的加快,土地利用格局对LST的影响越来越强。从时序来看,除草地外,其他地类的LST均升高,建设用地、耕地和草地的贡献指数呈现“上升-下降”模式。热岛区的建设用地占比增加,耕地减少,林地增加。随时间推移,斑块密度、最大斑块指数、香农多样性指数和蔓延度指数对LST的综合影响越来越强。

**关键词:**地表温度;城市热岛;时空演变;土地利用;贵阳市

**中图分类号:**X87 **文献标志码:**A

持续的全球变暖和快速的城市化进程(城市的自然植被、水体和其他自然表面被大量不透水表面取代,如建筑物、道路和广场)的综合影响,导致了城市热环境日益恶化<sup>[1-2]</sup>。目前,城市热岛效应已成为城市热环境的具体表现形式,也是城市生态环境恶化最为显著的特征之一<sup>[3]</sup>。不仅对城市居民的失眠率、患呼吸道和心血管疾病造成极大负面影响<sup>[4]</sup>,而且还会引起各种热浪灾害<sup>[5]</sup>,现已成为城市地理学、城市生态学和城市规划等多个相关领域的研究热点<sup>[6]</sup>。因此,研究城市热环境时空演变及其土地利用响应对改善人居环境、应对城市气候变化及其预防热辐射疾病发生具有一定现实意义。

随着遥感信息技术与地理空间信息技术不断发展,为地表温度(Land surface temperature, LST)的反演和土地利用、土地覆被解译提供了有效的技术支撑,这也进一步加快了对城市热环境及其土地利用响应的研究步伐。目前,国内外学者的研究主要集中于以下3个方面:一是土地利用、土地覆被方面,剖析了土地利用和土地覆被类型、结构或格局对LST的影响及关联关系。Bokaie等<sup>[7]</sup>研究了

\* 收稿日期:2024-01-22;修回日期:2024-05-06

基金项目:贵州省哲学社会科学规划课题(21GZZD13)

作者简介:熊琼兵(1986—),男,贵州长顺人,讲师,博士。主要从事城市热环境、国土空间规划和旅游经济方面的研究。E-mail:xqbiywn@163.com

通信作者:唐明贵(1978—),男,贵州岑巩人,教授,博士。主要从事旅游与区域发展研究。E-mail:277529186@qq.com

德黑兰大都市区的裸地、绿地、森林公园、水体等 7 种土地覆被类型与 LST 的关系。Soydan<sup>[8]</sup>研究了土耳其尼代的绿地和不透水地表类型及其结构与 LST 之间的关系。张周逸林等<sup>[9]</sup>研究了夏季和冬季上海市外环内外土地利用类型对地表温度的影响。二是遥感生态指数方面,探究了表征不同土地利用和土地覆被类型的指标,如归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、改进型归一化差值水体指数(Modified normalized difference water index, MNDWI)等对 LST 的影响。Karnieli 等<sup>[10]</sup>研究了北美大陆地区夏季生长季在不同湿度、气候和辐射条件下,归一化植被指数(NDVI)与 LST 之间的关系。王美雅等<sup>[11]</sup>研究了 NDVI、MNDWI 和归一化差值不透水面指数(Normalized difference impervious surface index, NDISI)3 种土地覆盖类型与城市热环境之间的关系。三是研究尺度方面,主要集中于国内外社会经济发达地区、特大城市或城市群的研究。Estoque 等<sup>[12]</sup>研究了菲律宾马尼拉、泰国曼谷和印度尼西亚雅加达等大城市。国内学者探究了杭州市<sup>[13]</sup>、武汉市<sup>[14]</sup>、京津冀城市群<sup>[15]</sup>等地区。尽管当前研究取得了丰硕成果,但对于特色地域的喀斯特山地城市热环境研究尚未得到充足的认识,而且缺乏从土地利用和土地覆被的类型、结构和格局三个视角的深入研究。

伴随“西部大开发”的快速推进,喀斯特山地城市化进程加快,城市土地利用与土地覆被的特征显著改变<sup>[16]</sup>,促使喀斯特山地城市热环境分布格局发生显著改变<sup>[17-18]</sup>。而且喀斯特山地城市因特殊的地形地貌,也会表现出不同的城市热环境分布格局<sup>[19]</sup>。为此,本文以喀斯特山地城市贵阳市为研究对象,基于 2002、2011 和 2019 年 3 期的 Landsat 遥感卫星数据,采用单窗口算法反演贵阳市中心城区 LST 的基础上,利用均值-标准差法和标准差椭圆法分析了城市热环境空间分布特征、发展方向和运动轨迹,最后利用贡献指数(Contribution index, CI)和景观指数,从土地利用的类型、结构和格局三个视角,探究了 LST 对土地利用的响应,以期缓解贵阳市城市热岛效应,合理配置土地资源,改善人居生态环境等提供科学依据。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区域

贵阳市作为中国西南地区重要中心城市之一,位于云贵高原东端、长江流域与珠江流域分水岭地带,东南与瓮安县、龙里县、惠水县、长顺县接壤,西靠平坝区和织金县,北邻黔西市、金沙县和播州区(106°07'~107°17'E, 26°11'~26°55'N)<sup>[20]</sup>。城市地处黔中山原丘陵中部,以山地、丘陵地形为主,地势西南高、东北低。喀斯特地貌极为发育,属于亚热带湿润温和型气候,夏无酷暑,夏季平均温度为 23.2℃,最高温度在 25~28℃之间,年平均总降水量为 1129.5 mm,年平均相对湿度为 77%<sup>[21]</sup>。根据三调数据,现有耕地 191008.23 hm<sup>2</sup>,林地 419000.42 hm<sup>2</sup>,草地 4459.15 hm<sup>2</sup>,湿地 267.81 hm<sup>2</sup>,城镇村及工矿用地 80670.84 hm<sup>2</sup>,交通运输用地 26878.46 hm<sup>2</sup>,水域及水利设施用地 17633.42 hm<sup>2</sup><sup>[22]</sup>。以贵阳市中心城区为研究区,包括云岩区、南明区、白云区、乌当区、观山湖区和花溪区的部分区域,见图 1。伴随中心城区人口大幅度增长,快速的土地城镇化、土地利用格局的剧烈变化,继而导致城区的“热岛”现象加剧<sup>[23]</sup>。

### 1.2 数据来源与处理

(1) 通过地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)下载贵阳市 Landsat 系列遥感影像,条带号为 127,行号为 42,分辨率为 30 m×30 m,其中 Landsat 5 TM 成像时间为 2002 年 8 月 30 日,云量为 0.00%; Landsat 7 ETM+ 成像时间为 2011 年 8 月 31 日,云量为 0.00%; Landsat OLI/TIRS 成像时间为 2019 年 8 月 13 日,云量为 14.17%,但研究区清晰可见。在运用 ENVI 5.3 软件对 3 期遥感影像进行条纹修复、辐射定标、去云处理、大气校正等预处理基础上,反演 LST。为检验反演结果的精度,采用气象监测站点实测温度数据(图 1)与反演 LST 进行比较与分析。为更好地反映热环境空间分布的真实情况,对其进行划分。

(2) 土地利用数据来源于中国土地覆盖数据集<sup>[24]</sup>,该数据集的分类精度达 80%以上,但该数据

土地覆盖分类体系与《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)存在差异,为此将该数据重新划分为建设用地、耕地、林地、草地、水域和裸地 6 大类土地用途。

(3) 其他数据包括地理空间数据云下载的高程数据(<http://www.gscloud.cn/>)、国家气象科学数据中心获取的气温监测数据(<https://data.cma.cn/>)以及自然资源部标准地图服务网站(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)和贵州省自然资源厅获取的行政区地图。

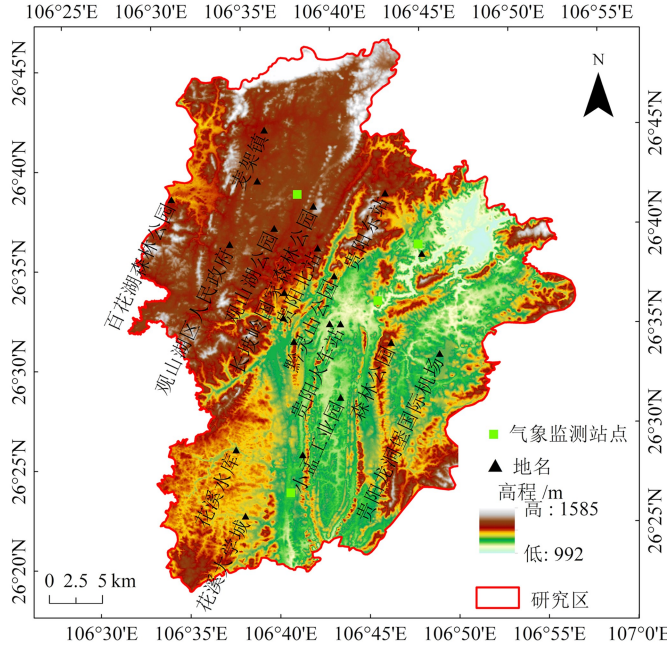


图1 研究区位置图

Fig.1 Geographical location of the study area

### 1.3 研究思路与方法

首先,在利用 ENVI 5.3 软件对 3 期遥感影像数据进行条带修复、辐射定标、大气校正等处理过程的基础上,采用单窗口算法反演 LST;其次,利用实测温度数据与反演 LST 进行对比分析,验证 LST 的精度;接着,利用均值-标准差法将 LST 划分为 5 个等级,以反映热环境空间分布特征,并利用标准差椭圆反映城市热岛空间分布特征的发展方向与运动轨迹;最后,利用贡献指数和景观指数<sup>[25]</sup>,从土地利用的类型、结构和格局三个视角,分析土地利用对 LST 的影响。

#### 1.3.1 地表温度反演及其等级分类

采用具有简化模型、计算效率高、所需参数少等优点的单窗口算法对 3 期 Landsat 处理后的数据进行 LST 的反演<sup>[26]</sup>,其表达式为  $LST = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda T_B}{\rho}\right) \ln \epsilon} - 273.15$ ,  $\rho = hc/\delta$ ,  $T_B = K_2/\ln(1 + K_1/L_\lambda)$ ,

式中, $LST$  为地表温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $\epsilon$  为地表比辐射率; $T_B$  为辐射亮温(K); $L_\lambda$  为热红外波段辐射亮度值; $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$ ;  $\delta$  为玻尔兹曼常数, $\delta = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $h$  为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ;  $c$  为光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; 273.15 为开氏温度和摄氏温度转换常数<sup>[27]</sup>。 $\lambda$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  为常量,其中 Landsat 5 TM band 6 的  $\lambda$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  分别为  $11.5 \mu\text{m}$ 、 $607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 、 $1260.56 \text{ K}$ ; Landsat 7 ETM+band 6 的  $\lambda$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  分别为  $11.5 \mu\text{m}$ 、 $666.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 、 $1282.71 \text{ K}$ 。地表比辐射率( $\epsilon$ )是参考 Sobrino 等<sup>[28]</sup>与 Estoque 等<sup>[12]</sup>的研究计算获取的。

为直观反映热环境空间分布特征,采用均值-标准差法<sup>[29]</sup>将研究区 LST 划分为高温区、次高温区、中温区、次低温区和低温区 5 个等级<sup>[30]</sup>,并将次高温区和高温区定义为热岛区<sup>[25]</sup>,而次低温区和低温区为冷岛区,如表 1 所示。

表 1 地表温度等级划分

Table 1 Classification of land surface temperature

温度等级	低温区	次低温区	中温区	次高温区	高温区
温度区间	$LST < \mu - 1.5SD$	$\mu - 1.5SD \leq LST < \mu - 0.5SD$	$\mu - 0.5SD \leq LST < \mu + 0.5SD$	$\mu + 0.5SD \leq LST < \mu + 1.5SD$	$LST \geq \mu + 1.5SD$

注： $\mu$  代表地表平均温度， $SD$  代表地表温度的标准差。

1.3.2 标准差椭圆法

标准差椭圆法是研究空间数据分布特征和方向差异的空间计量分析方法，其中心反映要素空间重心的相对位置及其变化，长半轴反映空间分布的方向，短半轴反映空间分布的离散程度，偏转角的角度反映空间数据变化的主导趋势方向<sup>[29,31]</sup>。本文使用标准差椭圆法分析 2002、2011、2019 年 3 期热环境标准差椭圆，以揭示城市热岛运动轨迹及其发展方向。

1.3.3 贡献指数

采用贡献指数(CI)量化不同土地利用类型对 3 期热环境的贡献程度<sup>[32-33]</sup>，其表达式为  $CI = (LST_i - LST_A) \times (S_i/S)$ ，式中， $LST_i$  为  $i$  土地利用类型的  $LST$  均值， $LST_A$  为整个研究区的  $LST$  均值， $S_i$  为  $i$  土地利用类型的面积， $S$  为整个研究区的面积。

1.3.4 景观指数

在以往的景观格局分析中，景观指数常用来反映其结构的组成和空间配置某些方面特征的简单定量指标<sup>[13]</sup>。为此，本文通过 Fragstats 4.2 软件的景观水平选择斑块密度(Patch density, PD)、最大斑块指数(Largest patch index, LPI)、景观形状指数(Landscape shape index, LSI)、香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)、蔓延度指数(Contagion, CONTAG)和景观分割指数(Landscape division index, DIVISION)表征土地利用格局<sup>[25,34]</sup>，以分析土地利用格局与  $LST$  的关系。

考虑  $LST$  的栅格精度及其土地利用格局的适宜研究尺度，利用 Fragstats 4.2 软件中移动窗口设置不同尺度进行测算及对比分析，并结合已有的研究成果，最终采用适宜研究尺度  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  窗口提取景观指数<sup>[20]</sup>，得到各景观指数栅格图。运用 ArcGIS 10.2 软件，统计各窗口单元的  $LST$  和景观指数均值，并采用 R 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 城市热环境时空演变特征

2.1.1 城市热环境空间分布特征

采用单窗口算法反演得到贵阳市中心城区 2002、2011 和 2019 年的  $LST$  空间分布，见图 2。

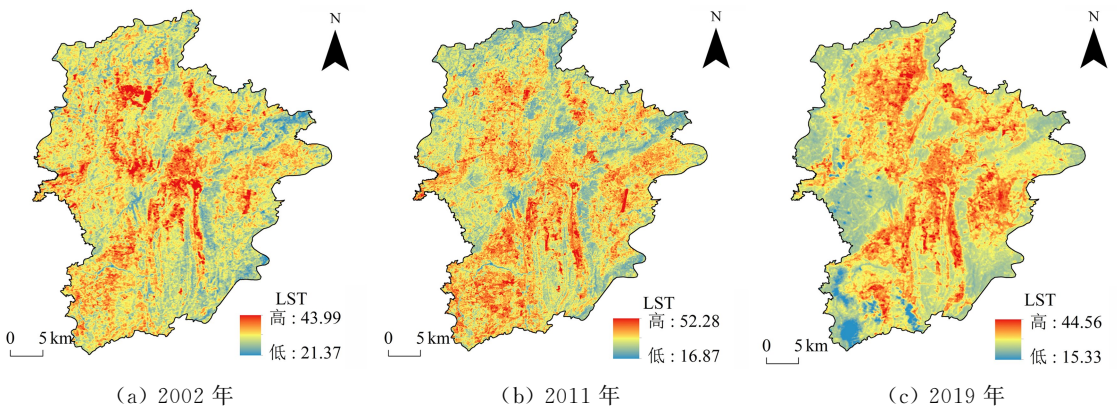


图 2 不同时期的地表温度空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of land surface temperature in different periods

为验证反演 LST 的精度,采用研究区中气象监测站点(图 1)的 2002 年 8 月 30 日、2011 年 8 月 31 日和 2019 年 8 月 13 日实测温度与反演 LST 进行验证(表 2)。从表 2 可以看出,气象监测站点的反演 LST 与实测温度的相对误差的置信区间为 $[-1.44\%, 1.75\%]$ ,表明反演 LST 的精度较好,可用于研究区热环境时空演变规律的研究。

表 2 实测温度与反演 LST 对比结果

Table 2 Comparison of the measured temperature and the inversion LST

气象监测站点	实测温度/°C	反演温度/°C	绝对误差	相对误差/%
贵阳市	26.70	26.60	-0.10	-0.37
	27.70	28.09	0.39	1.41
	28.40	28.71	0.31	1.09
白云区	24.70	24.87	0.17	0.69
	29.50	29.70	0.20	0.68
	31.10	31.26	0.16	0.51
乌当区	26.80	27.27	0.47	1.75
	30.30	30.25	-0.05	-0.17
	30.80	31.00	0.20	0.65
花溪区	23.70	24.10	0.40	1.69
	30.00	30.18	0.18	0.60
	32.70	32.23	-0.47	-1.44

3 个时期的土地利用空间格局显著改变(图 3),导致热环境空间分布呈现不规则分布,且整体上从建成区向四周辐射(图 4)。2002 年建成区面积小,引发“热岛”现象不显著,其热岛区仅占 27.57%,多分布于白云服务区、贵州轮胎厂和贵阳火车站周边的建成区;反之,冷岛区突出,多分布于水域、林地和草地区域,如花溪公园、黔灵公园、河滨公园、东山公园等。

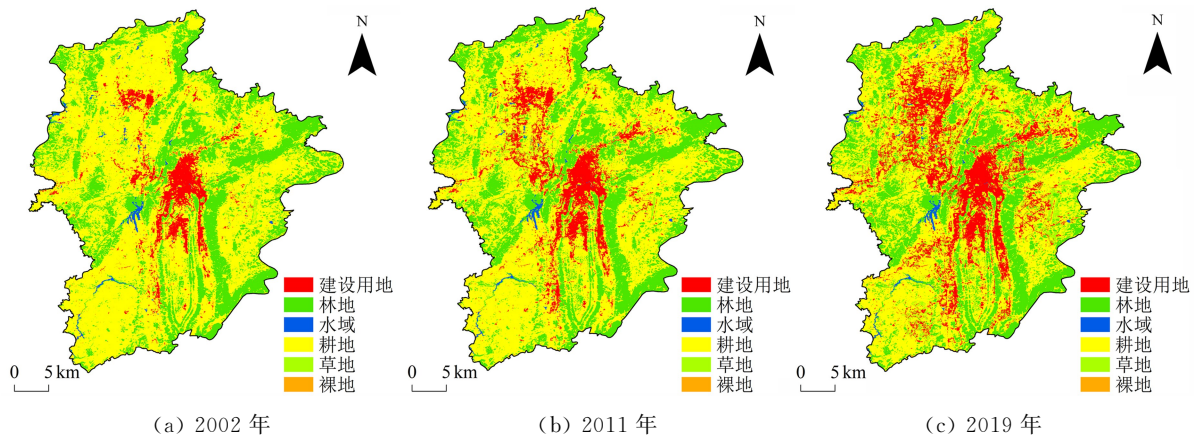


图 3 不同时期的土地利用空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of land use in different periods

2011 年建成区扩张,散落分布,导致“热岛”现象呈现零星、多斑块分布,如观山湖公园周边、龙洞堡机场、花溪大学城、贵阳火车站和小孟工业园区等地区;相比于 2002 年,热岛区正在向花溪区、观山湖区转移,且“热岛”现象较为突出。2019 年,随着建成区不断向外扩张、延伸,特别是白云区、观山湖区、花溪区及贵阳东站周边的大量耕地、林地被吞噬,建设用地增加,促使建成区的“热岛”现象加

剧,见图 4 和图 5。总之,随着时间推移,城市热岛区的延伸与扩张方向和贵阳市中心城区建成区的延伸与扩张方向基本一致<sup>[16]</sup>。

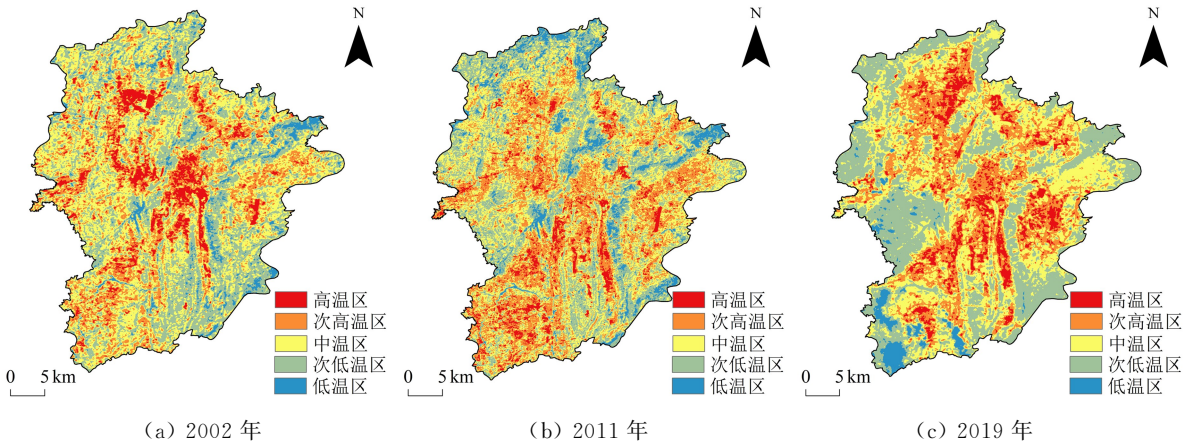


图 4 不同时期的热岛空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heat islands in different periods

从图 5 可知,2002—2019 年热岛区空间发展长主轴保持在西南—东北方向,短主轴保持东南—西北方向,但 2002—2011 年热岛质心向西南偏移了 1.68 km,偏转角度为 62.84°,这是由于小孟工业园、花溪大学城的耕地、林地快速向建设用地转移,致使这些区域的“热岛”现象发生转移;2011—2019 年热岛质心向东北偏移了 2.68 km,偏转角度为 62.99°,这是由于贵阳北站、高新区的规划布局 and 快速建设,改变了“热岛”现象的空间分布格局。总之,热环境空间分布格局与贵阳市中心城区的规划布局、建设强度有密切关系。

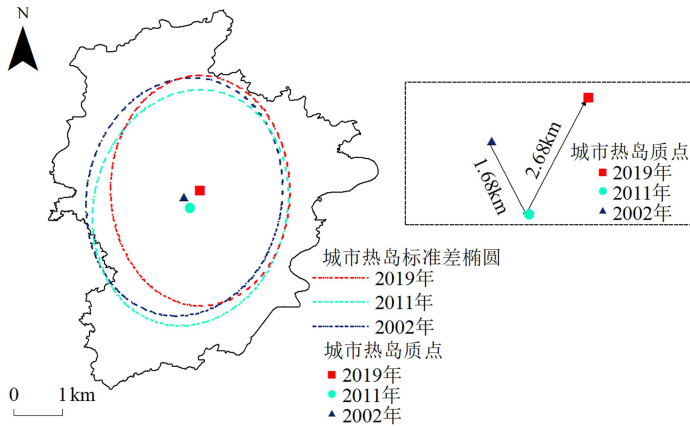


图 5 不同时期的热岛发展方向与质心迁移

Fig. 5 Development direction and centroid migration of heat islands in different periods

### 2.1.2 城市热环境时间演变特征

如图 6 所示,从 3 个时期热岛转移变化可知,2002—2011 年、2011—2019 年和 2002—2019 年热岛区不变面积为 155.24 km<sup>2</sup>、161.78 km<sup>2</sup> 和 126.15 km<sup>2</sup>;变化最显著的是次低温区的转入,依次转入面积为 117.11 km<sup>2</sup>、101.27 km<sup>2</sup> 和 143.56 km<sup>2</sup>;中温区转变为次低温区最多,其次是转变为次高温区。从 3 个时序来看,2002—2011 年、2011—2019 年和 2002—2019 年次高温区的面积增加分别为 69.74 km<sup>2</sup>、-30.35 km<sup>2</sup> 和 39.39 km<sup>2</sup>,而高温区的面积增加分别为 34.11 km<sup>2</sup>、19.74 km<sup>2</sup> 和 1.23 km<sup>2</sup>。整体来看,贵阳市中心城区“热岛”现象加剧,且呈现“上升-下降”模式。

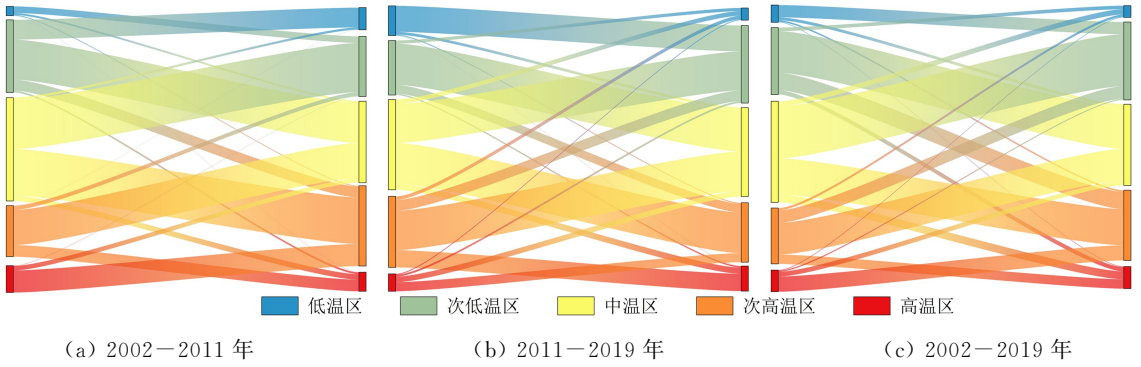


图6 不同时期的热岛转移变化图

Fig. 6 Sankey diagram of heat islands in different periods

## 2.2 土地利用对城市热环境的影响

### 2.2.1 土地利用类型的影响

如图7所示,通过分析各土地利用类型的LST和CI可知,2002—2011年,各土地利用类型的平均LST升高,但建设用地、草地、裸地和耕地四者最高,这是由于四者地表较为裸露,地表热容小,吸热快,导致LST升温迅速。2011—2019年,裸地、水域和林地的LST持续升高,但建设用地、草地和耕地均降温,这是由于夏季的降雨量较多,三者的地表大量积水,吸收和存储较多的热量,导致LST快速降温。耕地和建设用地CI值大于0,这是由于两者的面积占比最多,致使升温显著;裸地CI值最小,这是由于其面积占比最小,致使无降温或升温变化;林地和水域CI值为负,表明降温显著。从时序来看,建设用地、耕地和草地升温的贡献,以及林地和水域降温的贡献都呈现“上升-下降”模式。

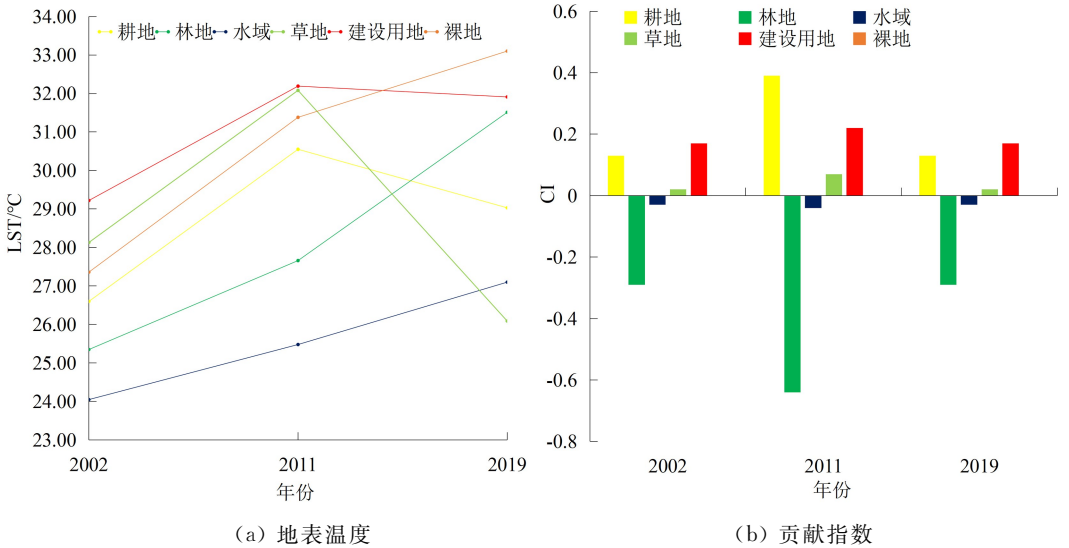


图7 不同时期土地利用类型的地表温度与贡献指数

Fig. 7 Land surface temperature and contribution index of land use types in different periods

### 2.2.2 土地利用结构的影响

2002—2019年高温区和次高温区主要为耕地和建设用地,而低温区和次低温区主要为水域和林地,见图8。随着时间推移,中温区、次低温区和低温区的林地占比减少,水域、耕地占比增多,这是由于夏季降雨充沛,耕地种植绿色作物繁多、水分充足,而水域的蒸发作用显著,导致冷岛区由林地转移到水域和耕地。高温区、次高温区的建设用地占比增加,耕地占比减少,反映了热岛区由耕地向主城区建设用地转移。林地在次高温区和高温区的占比增加,表明部分林地受城区“热岛”现象的影响显著,导致LST升高。

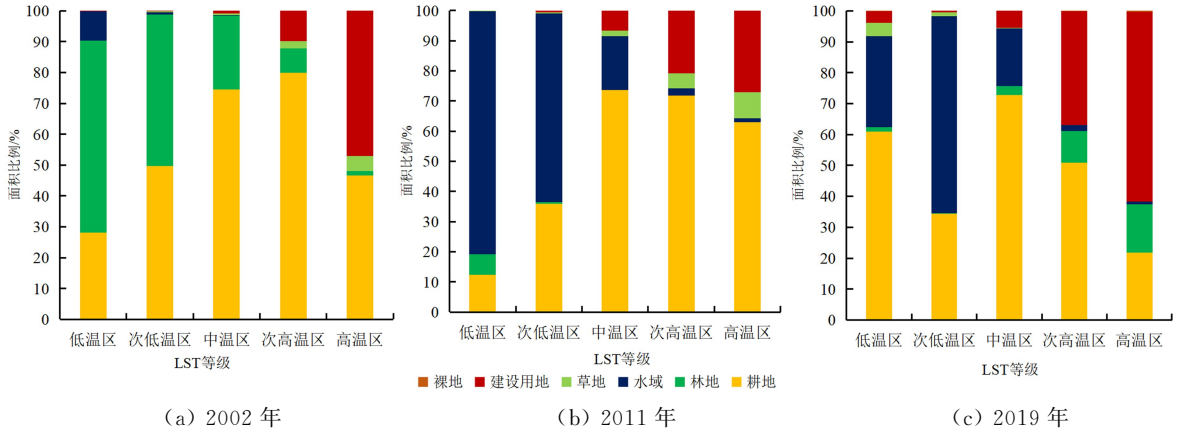
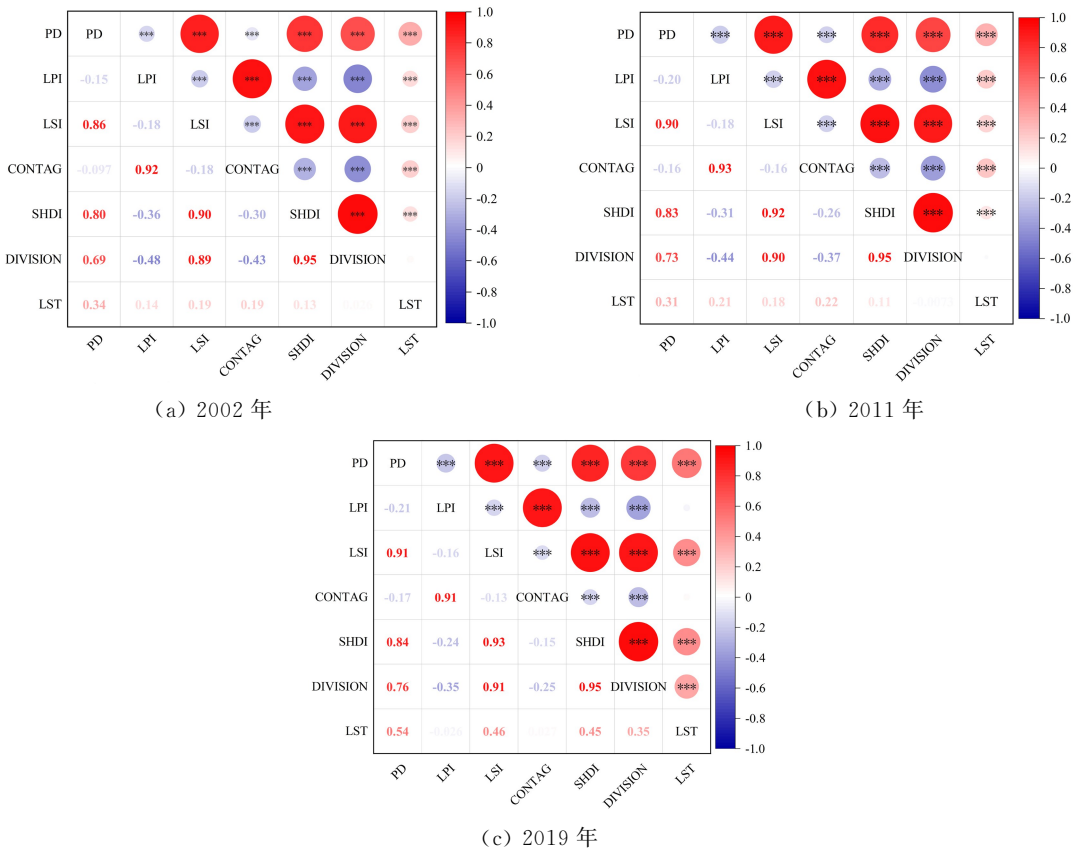


图 8 不同时期热岛的土地利用结构

Fig. 8 Land use structure of heat islands in different periods

### 2.2.3 土地利用格局的影响

为进一步探究土地利用格局对热环境的影响,利用斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、香农多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(CONTAG)和景观分割指数(DIVISION)来表征土地利用格局,分析其对LST的影响。以1 km×1 km的网格为研究单元,采用Pearson相关分析揭示土地利用格局与LST之间的关系,再进一步运用逐步回归分析揭示土地利用格局对LST的影响。从图9可知,土地利用的PD、LSI、SHDI与LST的相关系数介于0.31~0.54且是显著的,这说明LST不仅受到土地利用类型、结构的影响,还受到土地利用格局的影响。



\*  $P \leq 0.05$ , \*\*  $P \leq 0.01$  和 \*\*\*  $P \leq 0.001$

图 9 不同时期的土地利用景观指数与LST的相关性

Fig. 9 Correlation between land use landscape index and LST in different periods

从时序来看,PD、LSI 和 SHDI 的相关系数分别从 0.34 增加到 0.54、0.19 增加到 0.46、0.13 增加到 0.45,而 LPI 和 CONTAG 的相关性不显著, DIVISION 的相关系数为 0.35,说明随城市化加快,土地利用破碎化程度越高,异质性和多样性越复杂以及分割、肢解越严重<sup>[35]</sup>,LST 越高,但最大斑块的优势性和优势斑块的连通性对 LST 的影响将不显著。如表 3 所示,从回归分析结果可以看出,城市热环境不仅受到土地利用多样性的影响,还受到土地利用的破碎化、优势度及其蔓延度的影响。从时序来看, $R^2$  值从 0.435 增加到 0.555,说明 PD、LPI、SHDI 和 CONTAG 对 LST 的解释能力越来越强,表明土地利用的破碎化、优势度和多样性及其蔓延度对 LST 的综合影响逐渐增强。

表 3 不同时期的土地利用景观指数与 LST 的回归模型

Table 3 Regression model of land use landscape index and LST in different periods

年份	回归模型	$R^2$
2002	$LST=0.09PD-0.006LPI+0.016CONTAG-1.352SHDI+25.228$	0.435
2011	$LST=0.115PD+0.003LPI+0.021CONTAG-2.602SHDI+27.948$	0.468
2019	$LST=0.089PD-0.014LPI+0.033CONTAG-0.133SHDI+26.133$	0.555

### 3 讨论

为确保反演 LST 的科学性与可行性,本文采用贵阳市气象监测站点的实测温度数据,并结合绝对误差和相对误差,对 LST 的反演精度进行评估。相对误差的绝对值都小于 1.41%,说明反演的 LST 可用于贵阳市中心城区热环境时空演变规律研究,与重庆市悦来新城反演 LST 精度验证具有相似性<sup>[17]</sup>。此外,本文在分析热环境空间分布特征基础上,剖析了热岛区的空间发展方向、运动轨迹及其转移变化情况。从空间分布特征来看,高温区多分布于云岩区、南明区的建成区,与相关研究结果具有一致性<sup>[23]</sup>;低温区多分布于水域、林地和草地区域,如花溪公园、黔灵公园等,与安顺市西秀区研究结果具有相似性<sup>[18]</sup>。从热岛区的空间发展方向、运动轨迹及其转移变化情况来看,热岛区面积增加,空间发展方向保持东北—西南,运动轨迹为东南—东北变化,与贵阳市建成区的延伸、扩张及城市开发建设密切相关<sup>[16]</sup>,同时该结果与长沙市人居热环境的时空演变规律具有相似性<sup>[29]</sup>。

从土地利用类型、结构和格局三个视角,探究了其对城市热环境的影响。从土地利用类型来看,建设用地、耕地和草地的 LST 均值升高,呈现“上升-下降”模式,林地和水域持续升高,建设用地与耕地的 CI 值和林地与水域的 CI 绝对值也呈现“上升-下降”模式,这与厦门市的研究结果相违背<sup>[25]</sup>,这归因于贵阳市属于亚热带(副热带)高原季风湿润气候区,夏无酷暑、热量丰富、雨量充沛、雨热同季、多云日照少、风速较小、相对湿度较大、立体气候较明显<sup>[36]</sup>。从土地利用结构来看,热岛区的建设用地占比增加,耕地减少,体现出热岛区的耕地向建成区转移,而林地占比增加,体现了部分林地受城区“热岛”现象的影响显著,这一结果与珠江三角洲地区的研究结果具有相似性<sup>[32]</sup>。从土地利用格局来看,对 LST 的影响不仅只是土地利用类型、结构,还有土地利用格局的影响<sup>[33]</sup>,而且伴随城市化加快,土地利用格局对 LST 的影响会逐渐增强,这一结果与已有研究具有相似性<sup>[13]</sup>。从  $R^2$  值来看,土地利用格局对 LST 的解释程度明显强于厦门市的研究<sup>[25]</sup>,这进一步反映了研究区城市热环境受土地利用的影响是最重要的关键因素,而其他因素对研究结果影响较小<sup>[37]</sup>。

虽然本文发现了土地利用对城市热环境的影响是最重要的,但仅从二维层面进行了研究,仍有不足。特别是没有考虑三维层面<sup>[38-39]</sup>、多因素综合<sup>[6,37,40-41]</sup>、绿地景观格局<sup>[14,18]</sup>对城市热环境的影响。此外,由于研究区气候的原因,导致清晰可见、云量较小的高分辨率遥感影像较为缺乏,为此对 LST 季节差异方面缺乏深入的研究。为弥补这一不足,未来将会进一步开展这些方面的研究。

### 4 结论

(1) 2002—2019 年贵阳市中心城区土地利用空间格局显著改变,而热环境空间分布呈现不规则

分布,且从建成区向四周辐射。热岛区多分布于白云服务区、贵州轮胎厂和贵阳火车站周边的建成区,冷岛区主要分布于水域、林地和草地区域,如花溪公园、黔灵公园、东山公园等。2002—2019年贵阳市中心城区热岛区域空间发展主轴保持在西南—东北方向,2002—2011年热岛质心向西南偏移了1.68 km,偏转角度为 $62.84^\circ$ ;2011—2019年热岛区质心向东北偏移了2.68 km,偏转角度为 $62.99^\circ$ ,这是由于花溪区、观山湖区、高新区的快速发展,改变了“热岛”现象的空间分布格局。城市热岛区的扩张方向与贵阳市中心城区的建成区扩张方向基本一致。

(2) 2002—2019年贵阳市中心城区“热岛”现象加剧,且呈现“上升-下降”模式。从时序来看,2002—2011年、2011—2019年和2002—2019年热岛区的面积分别增加了 $103.85\text{ km}^2$ 、 $-10.61\text{ km}^2$ 和 $40.62\text{ km}^2$ 。

(3) LST不仅受到土地利用类型、结构的影响,还受到土地利用格局的影响,而且随着城市化加快,土地利用格局对LST的影响越来越明显。2002—2019年,除草地外,其他土地利用类型LST均升高,但建设用地、耕地和草地呈现“上升-下降”模式。建设用地、耕地和草地的CI值与林地和水域的CI绝对值都呈现“上升-下降”模式。热岛区的建设用地面积占比增加,耕地减少,林地增加;冷岛区的林地面积占比减少,而水域、耕地增加。土地利用的PD、LPI、SHDI、CONTAG对LST的解释能力越来越强,即土地利用的破碎化、优势度、多样性和蔓延度对LST的综合作用逐渐增强。

## 参考文献:

- [1] DEILAMI K, KAMRUZZAMAN M, LIU Y. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 67: 30-42.
- [2] KOTHARKAR R, RAMESH A, BAGADE A. Urban heat island studies in south Asia: A critical review[J]. *Urban Climate*, 2018, 24: 1011-1026.
- [3] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147.
- [4] JOHNSON H, KOVATS S, MCGREGOR G, et al. The impact of the 2003 heat wave on daily mortality in England and Wales and the use of rapid weekly mortality estimates[J]. *Eurosurveillance*, 2005, 10(7): 168-171.
- [5] WARD K, LAUF S, KLEINSCHMIT B, et al. Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569-570: 527-539.
- [6] ZHOU D, ZHAO S, LIU S, et al. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 51-61.
- [7] BOKAIE M, ZARKESH M K, ARASTEH P D, et al. Assessment of urban heat island based on the relationship between land surface temperature and land use/land cover in Tehran[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 23: 94-104.
- [8] SOYDAN O. Effects of landscape composition and patterns on land surface temperature: Urban heat island case study for Nigde, Turkey[J]. *Urban Climate*, 2020, 34: 100688.
- [9] 张周逸林, 申广荣, 张婧颖, 等. 2007—2017年夏冬季上海市内外圈层土地覆盖与地表温度的定量关系[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 88-96.
- [10] KARNIELI A, AGAM N, PINKER R, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(3): 618-633.
- [11] 王美雅, 徐涵秋. 超大城市土地覆盖与热环境的随机森林回归模型研究[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(2): 379-388.
- [12] ESTOQUE R C, MURAYAMA Y, MYINT S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of southeast Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 349-359.
- [13] 苟睿坤, 赵选, 卜元坤, 等. 杭州市城区热岛效应与景观格局的动态研究[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 316-322, 329.

- [14] KE X L, MEN H L, ZHOU T, et al. Variance of the impact of urban green space on the urban heat island effect among different urban functional zones: A case study in Wuhan[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 62:127159.
- [15] 孙硕, 李君, 王一旭, 等. 京津冀城市群土地利用变化对地表热环境的影响研究[J]. *西安理工大学学报*, 2022, 38(1):1-12.
- [16] 母浩江, 崔文刚, 鲁霞. 典型喀斯特山地城市不透水面时空格局[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(1):34-40, 61.
- [17] 张沁, 张守平, 杨清伟. 重庆市悦来新城土地利用/覆被变化对地表温度的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(1):206-215.
- [18] 伍斌, 王志杰. 喀斯特山地城市内山体绿地对城市热岛的减温效应:以安顺市西秀区为例[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(3):855-863.
- [19] 胡泽银, 王世杰, 白晓永, 等. 贵州省地表温度的遥感反演评价及时空分异规律[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(9):2794-2807.
- [20] HU C Y, WU W, ZHOU X X, et al. Spatiotemporal changes in landscape patterns in karst mountainous regions based on the optimal landscape scale: A case study of Guiyang city in Guizhou province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 150:110211.
- [21] CHEN X T, WANG Z T, BAO Y. Cool island effects of urban remnant natural mountains for cooling communities: A case study of Guiyang, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71:102983.
- [22] 贵阳市自然资源和规划局. 贵阳市第三次全国国土调查成果主要数据正式发布[EB/OL]. (2022-01-24)[2023-11-22]. [http://zyghj.guiyang.gov.cn/newsite/zmhd/hygq/202201/t20220124\\_72400217.html](http://zyghj.guiyang.gov.cn/newsite/zmhd/hygq/202201/t20220124_72400217.html).
- [23] 蔡宏, 刘沛, 宋建波, 等. 典型喀斯特地区城市热岛效应遥感反演研究:以喀斯特山区城市贵阳为例[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2):246-250.
- [24] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [25] 沈中健, 曾坚, 任兰红. 2002—2017年厦门市景观格局与热环境的时空耦合关系[J]. *中国园林*, 2021, 37(3):100-105.
- [26] WENG Q H, LU D S, SCHUBRING J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4):467-483.
- [27] 张殿江, 周滨, 李宏伟, 等. 基于马尔科夫链模型的城市热岛扩散趋势预测:以天津滨海新区为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(S2):321-325.
- [28] SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUNOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal*, 2004, 90(4):434-440.
- [29] 熊鹰, 章芳. 基于多源数据的长沙市人居热环境效应及其影响因素分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(11):2443-2458.
- [30] 李海峰, 郭科, 但尚铭, 等. 基于 COST 模型的热岛效应时空演变特征分析[J]. *测绘科学*, 2012, 37(2):164-166.
- [31] 于琛, 胡德勇, 曹诗颂, 等. 近 30 年北京市 ISP-LST 空间特征及其变化[J]. *地理研究*, 2019, 38(9):2346-2356.
- [32] YU Z W, YAO Y W, YANG G Y, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995—2015) of southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674:242-254.
- [33] XIONG Q B, CHEN W B, LUO S Q, et al. Temporal and spatial variation of land surface temperature in recent 20 years and analysis of the effect of land use in Jiangxi province, China[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(8):1278.
- [34] 项颂, 庞燕, 储昭升, 等. 入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例[J]. *环境科学*, 2016, 37(8):2947-2956.
- [35] 赵新正, 梁家宁. 黄河流域中心城市空间扩张对景观格局的影响:以西安市为例[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(3):391-401.
- [36] 杨毅, 武伟, 刘洪斌. 贵阳市近 40 年气候变化趋势分析[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 32(2):82-87.

- [37] 纪王迪,黄晓军,包微,等. 关中地区人类活动强度与地表温度的时空关联特征及其驱动作用[J]. 干旱区地理, 2024,47(6):967-979.
- [38] ZHOU R,XU H C,ZHANG H, et al. Quantifying the relationship between 2D/3D building patterns and land surface temperature;Study on the metropolitan Shanghai[J]. Remote Sensing,2022,14(16):4098.
- [39] YU S Y,CHEN Z Q,YU B L, et al. Exploring the relationship between 2D/3D landscape pattern and land surface temperature based on explainable eXtreme Gradient Boosting tree:A case study of Shanghai,China[J]. Science of the Total Environment,2020,725:138229.
- [40] CHAI J,ZHANG Z B,CHEN L, et al. Analysis of the spatial and temporal evolution characteristics and driving forces of the surface thermal environment in Lanzhou city[J]. Sustainability,2023,15(9):7700.
- [41] WANG Y N,YI G H,ZHOU X B, et al. Spatial distribution and influencing factors on urban land surface temperature of twelve megacities in China from 2000 to 2017[J]. Ecological Indicators,2021,125:107533.

(责任编辑 张 庆)

## Spatial-Temporal Evolution of the Thermal Environment and Its Land Use Response in Karst Mountainous Cities: Taking Guiyang City as an Example

XIONG Qiongbing, WU Xuecheng, TANG Minggui

(School of Tourism Management, Guizhou University of Commerce, Guiyang 550014, China)

**Abstract:** Urbanization and industrialization are worsening the urban thermal environment, leading to increased heat stroke incidents and poor human settlement quality. Understanding the spatial and temporal evolution of the urban thermal environment and the impact of land use is crucial for developing mitigation measures. We analyzed the spatial distribution, development direction, and trajectory of the urban thermal environment. We aimed to explore the response of LST to land use type, structure, and pattern. Using Landsat data from 2002, 2011, and 2019, we retrieved the land surface temperature (LST) in central Guiyang City. The results showed: (1) The spatial pattern of land use had changed significantly. The thermal environmental spatial distribution was irregular, radiating from the built-up area to surrounding areas. Heat islands were mainly in the built-up areas of Yunyan, Nanming, and Baiyun districts. Cold islands were mainly in water bodies, forests, and grasslands. The main development axis of heat island was in the southwest-northeast direction, consistent with the built-up area's expansion. (2) The heat island effect intensified, showing an 'up-down' pattern. The heat island area increased by 103.85 km<sup>2</sup> from 2002 to 2011, decreased by 10.61 km<sup>2</sup> from 2011 to 2019, and increased by 40.62 km<sup>2</sup> from 2002 to 2019. (3) LST was influenced by land use type, structure, and pattern. With urbanization, the impact of land use patterns on LST grew stronger. Over time, LST increased for all land types except grassland, and the contribution index for construction land, cultivated land, and grassland showed an 'up-down' pattern. In the heat island area, the proportion of construction land increased, cultivated land decreased, and forest land increased. The impact of patch density, largest patch index, Shannon's diversity index, and contagion index on LST also grew stronger over time.

**Key words:** land surface temperature; urban heat island; spatial-temporal evolution; land use; Guiyang City