

## 海口市热力景观时空格局与分异特征

李玉杰<sup>1,2</sup>, 卢娟<sup>1</sup>, 陈思佳<sup>1</sup>, 付晖<sup>2</sup>

(1. 湖南科技学院 土木与环境工程学院, 湖南永州 425199; 2. 海南大学 林学院, 海南海口 570228)

**摘要:** 【目的】了解海口市热力景观的时空演变特征, 缓解快速城市化引起的城市热环境问题。【方法】以 2000、2005、2010、2015 和 2019 年共 5 期 Landsat 遥感影像为数据源, 采用单窗算法反演地表温度研究热环境时空演变; 基于地理信息系统 (GIS) 平台, 结合地统计学和景观格局指数法定量分析城市热岛时空分异特征。【结果】热岛强度等级面积曲线符合正态分布特征, 其中较弱冷岛、弱冷岛和弱热岛斑块始终占主导格局; 热岛等级中心集中区由西海岸分别向江东新区和西南老城方向扩散转移。温度剖面分析可知: 中心城区始终是“高原”区, 工业区、美兰机场区域多“高峰”值, 大面积水域、林地处通常出现“谷”值。2000–2010 年高温区扩张快, 热岛斑块不断缩小, 大型斑块逐渐分解, 斑块形状愈加复杂, 热岛效应不断增强; 2010–2019 年扩张慢, 热岛斑块不断扩张, 小版块逐渐连接成片, 斑块形状变化趋于平稳, 热岛效应不断减弱。研究期间, 同类别热力斑块连通性始终较高。【结论】海口热力景观演变与城市发展阶段相对应, 基于等级理论的热力景观格局指数分析, 有助理解热力景观的时空演变趋势, 为生态可持续城市发展规划提供理论依据。图 7 表 3 参 20

**关键词:** 城市热岛; 温度剖面; 热场变异指数; 热力景观格局指数; 海口

中图分类号: Q147 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)04-0712-11

## On the spatial-temporal patterns and differentiation characteristics of thermal landscape in Haikou City

LI Yujie<sup>1,2</sup>, LU Juan<sup>1</sup>, CHEN Sijia<sup>1</sup>, FU Hui<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Technology, Yongzhou 425199, Hunan, China; 2. Forestry College, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

**Abstract:** [Objective] With an analysis of the temporal and spatial evolution characteristics of the thermal landscape in Haikou City, this study is aimed at solutions to the urban thermal environment problems that attribute to the rapid urbanization. [Method] With the five-phase Landsat remote sensing images of 2000, 2005, 2010, 2015 and 2019 gathered as the data source, a single-window algorithm was utilized to invert the surface temperature to study the temporal and spatial evolution of the thermal environment. Employing GIS platform and the method of geostatistics and landscape pattern index, we have conducted a quantitative analysis of the spatial and temporal differentiation characteristics of urban heat island. [Result] The area curve of the heat island intensity conforms to the normal distribution characteristics, and the patches of weaker cold island, weak cold island and weaker heat island persist in their dominant patterns. The heat island intensity reduces from the central concentration area to Jiangdong New District near the west coast and the old urban area in the southwest. In the temperature profile, the principal urban area is always a “plateau” area, with the industrial area

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2021-01-26

基金项目: 海南省自然科学基金资助项目 (318QN194); 海南省哲学社会科学规划项目〔HNSK(QN)18-06〕

作者简介: 李玉杰 (ORCID: 0000-0001-8525-3987), 从事景观生态规划与风景园林规划设计研究。E-mail: liyujie1124@126.com。通信作者: 付晖 (ORCID: 0000-0002-0580-8215), 副教授, 博士, 从事景观生态规划研究。E-mail: iflying@126.com

and the Meilan Airport area often displaying “peak” values, and the large area of waters and forest land showing “valley” values. During the period from 2000 to 2010, with the rapid expansion of the high temperature, the heat island plaques continued to shrink, while the large plaques gradually decomposed, making the shape of the plaques continuously enhanced. During the period from 2010 to 2019, with the expansion slowing down, the heat island plaques continued to expand, and the small plates gradually fitting together, making the change of patch shape stable, and the heat island effect continuously weakened. Throughout the study, the connectivity of thermal plaques of the same category was consistently high. [Conclusion] The evolution of Haikou’s thermal landscape is consistent with the different stages of urban development and the analysis of thermal landscape pattern index based on hierarchy theory is conducive to understanding the temporal and spatial evolution of thermal landscape, providing a theoretical basis for ecologically sustainable urban development planning. [Ch, 7 fig. 3 tab. 20 ref.]

**Key words:** urban heat island; temperature profile; thermal field variation index; thermal landscape pattern index; Haikou

城市化以及随之而来的人口增长和土地表面变化，增加了人为放热和下垫面对太阳辐射吸收，导致城市热岛 (urban heat island, UHI)<sup>[1]</sup>。较高的城市温度会对能源消耗、室外热舒适度、空气质量、人类健康等造成不利影响<sup>[2]</sup>，产生一系列生态环境问题，进而影响社会可持续发展。过去几十年对城市热岛的研究集中在时空分异特征、机制与模拟、影响因子、减缓策略以及与城市化响应等方面<sup>[2-5]</sup>。就气候区而言，对热带低纬度滨海城市的关注较少<sup>[6]</sup>。城市是一个复杂的巨系统，具有离散性等级层次；等级理论认为复杂系统具有“可分解性”，通过赋予系统层次关系，可以便捷地研究和描述系统结构与功能、理解其“尺度感”<sup>[7]</sup>。当前针对城市热岛等级划分的研究较少<sup>[3, 8-9]</sup>，随着景观生态学理论引入城市热岛研究，“城市热力景观”格局研究出现了新思路。陈云浩等<sup>[10]</sup>建立了热力景观格局评价体系，陈爱莲等<sup>[11]</sup>筛选出能较准确描述热力景观格局的景观格局指数，邓睿等<sup>[12]</sup>和杨丽萍等<sup>[13]</sup>引入景观格局指数描述了热力景观的时空演变特征，池腾龙等<sup>[14]</sup>使用热环境变化指数、热力景观格局指数和地理信息系统(GIS)标准差椭圆分析描述了武汉市热环境时空演变规律。可见，景观格局指数对热力景观格局评价具有适应性。海口是中国典型热带岛屿型省会城市，热岛具有典型性；随着城镇化不断深入，海口城市规模不断扩大，城市热岛问题日益凸显。王中正<sup>[15]</sup>使用单期 Landsat-8 影像论证了温度反演方法，但未对海口热岛时空分异特征进行分析。本研究采用单窗算法对海口 5 期 Landsat 遥感影像进行地表温度反演，利用标准化处理构建热场变异指数并划分热岛等级强度，结合目视分析和地理剖面分析研究热环境时空演变，用地统计学分析和景观格局指数法量化热力景观时空分异特征，旨在为人居环境改善、城市生态可持续发展提供理论依据。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究区概况

海口地处海南岛北部、低纬度热带北缘，陆域面积 2 284.49 km<sup>2</sup>，海岸线 136.23 km，陆域大部为海拔 100 m 以下的台地和平原，属热带海洋性季风气候，年均降水量 2 607 mm，年均日照时数 2 000 h 以上，年平均气温 24.3 ℃。城市热岛效应在 6-8 月最为显著。2019 年常住人口 232.79 万人，非农业人口 183.39 万人，城镇化率 78.8%。生态环境问题严重，对居民生活与城市可持续发展造成了不利影响。

### 1.2 数据来源与预处理

数据来源为美国地质调查局(USGS)官网。选取原则：低云量、气象状况良好、气温接近、时间统一集中(6-8 月)；每期由三景影像拼接而成，且以行代号 12446 的一景为主，其面积占 95% 以上。详细参数信息见表 1。预处理：影像辐射定标；FLASH 模型大气校正；以谷歌地球(Google Earth)高分影像和海口市总体规划图为参照，进行几何精校正，误差控制在 0.5 个像元内。

表1 海口市遥感影像数据信息

Table 1 POI data classification statistics

行代号	传感器	获取日期(年-月-日)	陆地云量/%	行代号	传感器	获取日期(年-月-日)	陆地云量/%
12446	LANDSAT_5TM	2000-06-19	13.00	12446	LANDSAT_8OLI_TIRS	2015-06-26	0.78
12446	LANDSAT_5TM	2005-06-17	11.00	12446	LANDSAT_8OLI_TIRS	2019-06-21	0.48
12446	LANDSAT_5TM	2010-07-27	8.00				

### 1.3 研究方法

1.3.1 地表温度反演 参照王中正<sup>[15]</sup>方法基于单窗算法进行地表温度 (land surface temperature, LST) 反演, 获取海口市地表温度数据集; 地面气温参数源于国家气象科学数据共享服务平台。单幅影像利用 ENVI 5.0 处理生成 LST 图, 各期 3 幅 LST 图导入 Erdas 8.6 进行交叉边界裁剪、融合, 之后基于行政边界进行裁剪, 生成分辨率 为 30 m 的 LST 栅格数据 (图 1), 精度可满足研究需求<sup>[16-17]</sup>。由于大面积云层及阴影会干扰后续分析, 因此 2000 和 2005 年分别裁剪掉 65.662 6 和 19.359 0 km<sup>2</sup> 的异常低温区域。

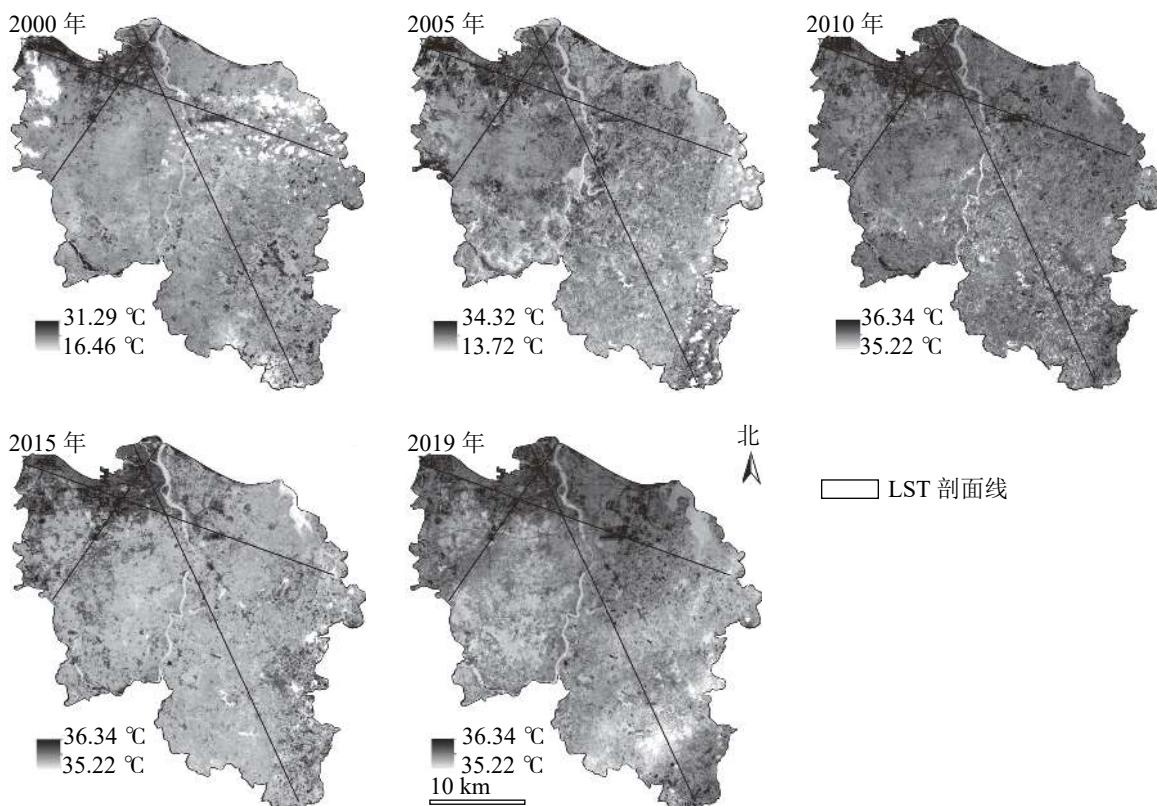


图1 研究区地表温度反演结果示意图

Figure 1 Inversion results of land surface temperature

1.3.2 热岛强度计算及等级划分 采用热场变异指数 (heat index, HI) 界定热岛强度<sup>[16]</sup>, 标准化处理后, 对热环境景观的时空格局进行纵向比较与分析 (图 2)。计算公式为:  $I_H = (T_n - T_{\text{mean}})/T_{\text{mean}}$ 。其中,  $I_H$  表示相对地表温度, 无量纲;  $T_n$  表示研究区域内第  $n$  点的地表温度;  $T_{\text{mean}}$  表示研究范围内的平均地表温度。根据武鹏飞等<sup>[17]</sup>研究, 基于自然断点法划分 10 个热岛强度空间等级: I 表示极强冷岛, II 表示较强冷岛, III 表示中等冷岛, IV 表示较弱冷岛, V 表示弱冷岛, VI 表示弱热岛, VII 表示较弱热岛, VIII 表示中等热岛, IX 表示较强热岛, X 表示极强热岛。

1.3.3 地表温度图像剖面线分型 基于 ArcGIS 平台的 3D Analyst 工具, 绘制地表温度剖面图。分析剖面线的城市热岛时空分异规律, 推断城市热岛在空间方向上的发展态势; 结合地物特征, 分析“山脊”“谷”“高原”“盆地”和“高峰”及其波动变化的原因<sup>[18]</sup>, 判读热岛景观格局的时空异质性。

1.3.4 热环境演变特征指标 ①热环境变化指数。热力景观变化主要包括速度与强度, 可用变化速度指

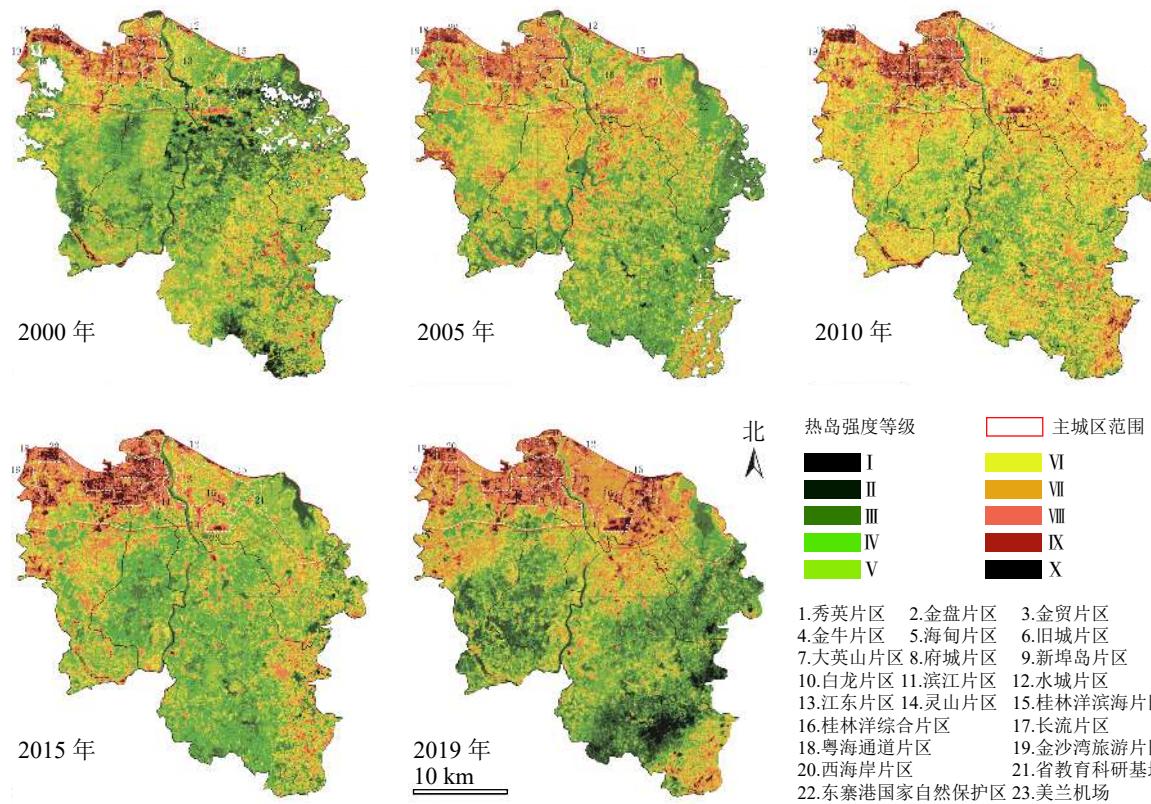


图2 研究区热场变异指数分布格局示意图

Figure 2 Distribution pattern of heat index

数 (change speed index,  $I_{CS}$ ) 和变化强度指数 (change intensity index,  $I_{CI}$ ) 进行量化, 单位均为 %。其中,  $I_{CS}$  表征变化速度与趋势;  $I_{CI}$  是通过空间单元将扩张速度标准化, 以描述单位面积可承受的最大强度<sup>[14]</sup>。 $I_{CS}$  和  $I_{CI}$  越大, 表明相对高温区域扩张速度越快, 趋势越明显, 热环境效应越强。计算公式为:  $I_{CS} = (\Delta A_{ij}/A_i \Delta t) \times 100\%$ ,  $I_{CI} = (\Delta A_{ij}/S \Delta t) \times 100\%$ 。其中,  $\Delta A_{ij}$  表示相对高温区从第  $i$  年到第  $j$  年间的变化面积;  $A_i$  表示第  $i$  年的相对高温区域面积;  $\Delta t$  表示研究的时间长度;  $S$  表示研究区域总面积。②热力景观格局指数。使用 30 m 精度的栅格数据, 基于 Fragstats 4.2 软件平台计算热力景观格局指数。结合研究需求从斑块类型水平上选取斑块密度 (PD)、平均斑块面积 (AREA\_MN)、最大斑块指数 (LPI)、面积加权平均形状指数 (SHAPE\_AM)、斑块内聚力指数 (COHESION)、景观形状指数 (LSI) 和聚合度 (AI) 等 7 个指标, 从景观水平上选取斑块数量 (NP)、PD、AI、AREA\_MN、SHAPE\_AM、多样性指数 (SHDI) 和均匀度指数 (SHEI) 等 7 个指标, 从数量、形状和结构角度表征热力景观格局时空变化<sup>[11-12]</sup>。

**1.3.5 不透水面数据获取** 热力景观演变与城市发展密切相关, 结合 Landsat 与谷歌地球影像数据目视解译, 得到 5 个时段不透水面的格局变化图 (图 3), 以与热力景观格局相呼应。

## 2 结果与分析

### 2.1 热岛强度时空分布与结构

**2.1.1 热岛强度面积特征** 斑块尺度与时空分布是景观要素研究的重要参数, 可为景观水平的生态保护研究提供理论依据<sup>[19]</sup>。依据热场变异指数划分的热岛强度等级面积拟合曲线, 由图 4 可知: 5 期均为“中间大, 两头小”的正态分布特征, 峰值均集中在 IV、V、VI 等 3 个等级, 3 级之和依次占总面积的 67.51%、68.19%、60.52%、68.05% 和 50.25%, 表明 19 a 间 IV、V、VI 等 3 个等级占主导格局地位; I、II、IX、X 等 4 级之和依次占总面积的 8.74%、3.93%、6.83%、6.69% 和 13.98%, 同时 I 和 X 之和占比依次为 1.72%、0.37%、1.70%、2.04% 和 3.24%, 表明存在冷、热岛强度等级中心。

**2.1.2 热岛强度等级斑块空间分布特征** 综合热场变异指数空间分布 (图 2) 与不透水面分布 (图 3) 发

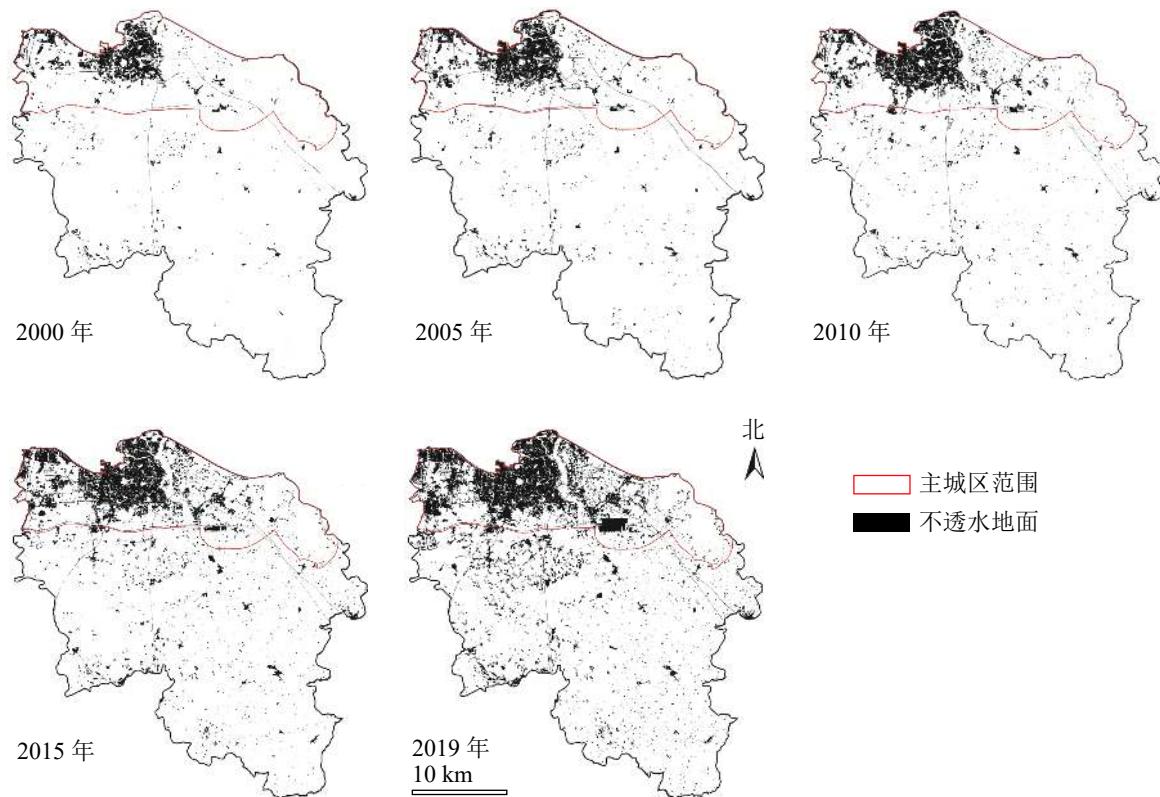


图3 研究区不透水面分布示意图

Figure 3 Impervious surface distribution

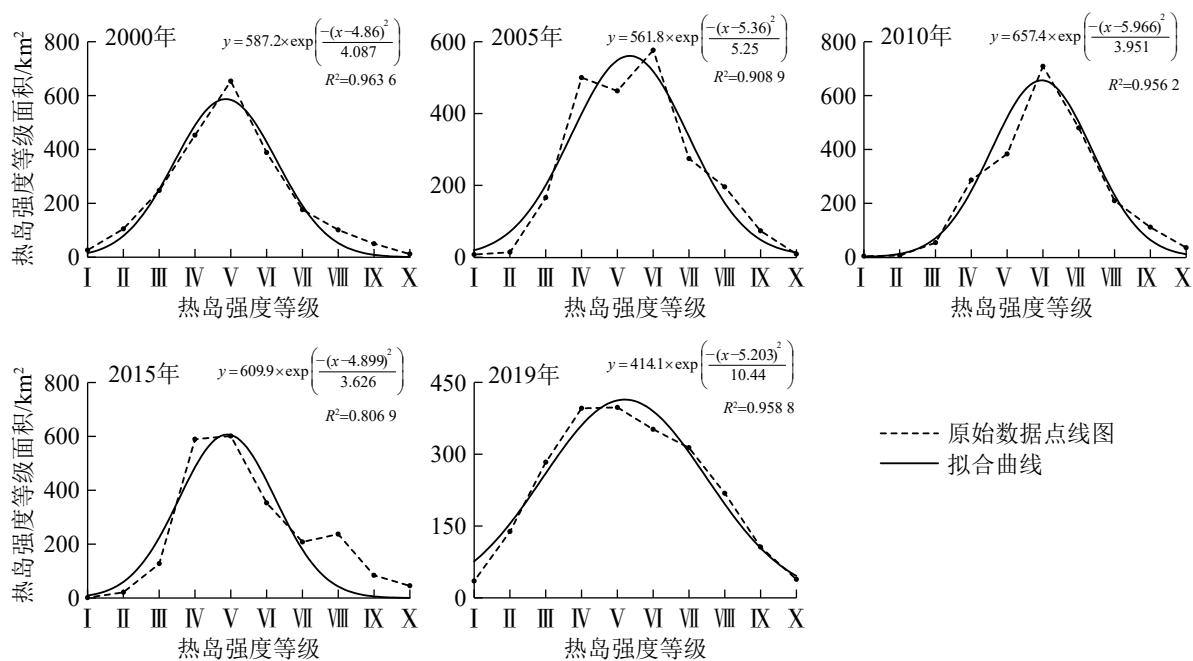


图4 热岛强度等级面积拟合曲线

Figure 4 Heat island intensity grade area fitting curve

现：5期热岛强度等级斑块主要与其城乡建设用地分布相吻合，集中在开发强度大的工商业集中区、人口密集区和部分裸地区域，热场变异指数以这些区域为核心向郊区不断降低，但5期热场变异指数等级内部有明显的时空差异。2000年热岛等级中心呈“单一连片中心主导，多中心散布”形式；“单一连片中心”分布于粤海通道、金沙湾和西海岸片区，是因这一区域正处于开发建设期；“多中心”于主城区主要在旧城、中心商务、水城和灵山片区、药谷和金盘工业园、狮子岭开发区及美兰机场，郊区主要在

乡镇镇区和裸露河滩。2005年为“多中心散布”；主城区主要在粤海通道、金沙湾、西海岸、金贸、海甸、中心商务、水城和桂林洋滨海片区、药谷和金盘工业园，2000年的“单一连片中心”依然是高温集中区，但不再连结成片；郊区中心较2000年减少很多。2010年呈“单一中心主导，多次中心集中”及“多中心”的形式；“单一中心”指金沙湾和西海岸片区的高强度开发带；“多次中心”集中于中心城区的秀英、金盘片、大英山和府城片区，城建活动频繁且分布广致使裸地增多、热岛中心集中；“多中心”在主城区有新埠岛、水城、灵山和桂林洋综合片区，狮子岭开发区、火车南站下方的裸地、美兰机场和省教育科研基地，这些区域同样处于快速建设阶段，“多中心”在郊区分布同前。2015年呈“连片中心主导，多中心散布”形式；“连片中心”指中心城区主要片区都存在热岛中心，表明中心城区产热量大、散热不足；“多中心”在主城区有狮子岭开发区、水城片区及其西侧的开发用地、灵山、桂林洋综合片区、美兰机场，郊区主要是各集中居民点、裸露河滩，郊区绿地多、散热功能较城区更好，因而无大片极强热岛。2019年呈“主城区多中心集中，郊区多中心散布”的形式；“主城区多中心”指除灵山片区以外的主要功能区都有极端热岛分布，尤以江东新区极端热岛增长最为显著，其城建范围与速度增长均较快，形成新的热岛集中区，这与海口“东优”发展战略、国际自贸港建设的政策导向相吻合；“郊区多中心”指极端热岛与较集中的聚居点或高强度开发的地点相一致。综上，从2000到2019年热岛等级中心集中区呈“西海岸→建成区→江东新区”和“西海岸→西南老城方向”的转移态势，且不断向城乡交错带扩散，呈范围扩散、速度递增的趋势。极强热岛在郊区分散于主要镇区或者裸地，未形成规模。可见，主要热岛中心分布在主城区，与城镇扩张模式与城市发展阶段密切相关，“摊大饼”式的主城区扩张模式使得人口、建筑密集、城市绿化不足，导致自然散热条件差，因此形成极端热岛集中区；而卫星城镇的密集式开发，亦会形成小型热岛中心。

**2.1.3 热力景观格局温度剖面分析** 结合海口市不透水面扩散与转移方向(图3)，设置3条地表温度剖面，其中，样线的“谷”和“盆地”多表示密林、水域、湿地或生长期稻田，稻田生长阶段不同会导致其LST差别明显；而“山脊”“高原”和“高峰”则多为密集建筑区、裸地和工业区，尤其人口密集的市中心热辐射较严重。由北—南地表温度剖面图(图5A)可知：2000、2010和2015年地表温度呈“减—增—波动”的特征，2005年整体“递减”，2019年为“减—增—减—增”态势。具体来看，0~15 km的主城区段一直处于“高原”区，5期均波动递减，“谷”出现在3.1 km处的海甸溪、8.7 km

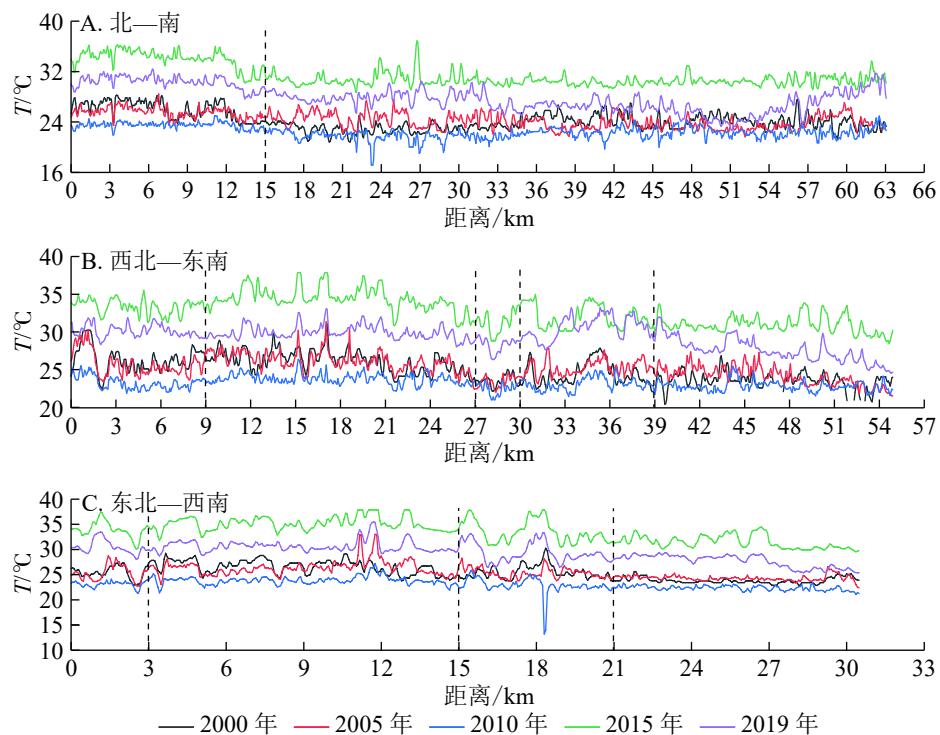


图5 地表温度空间剖面对照

Figure 5 Spatial profile control for land surface temperature

处的五公祠附近和14.8 km处的玉龙泉湿地公园，“高峰”各期均不一致；0~15 km的郊区段各年变化均不一致，但“谷”和水域、密林等冷岛区域对应，“高峰”与乡镇镇区或裸地对应。2000年18~36 km呈“盆地”特征，36~66 km段“山脊”“谷”“高峰”交替出现。2005年36~66 km段波动无明显规律，结合热遥感影像可知，此时该段农田大量裸露，60~63 km出现的“山脊”属异常值。2010年22~31 km段集中出现“谷”。2019年整体平稳，28 km处的“高峰”与热岛强度等级中心对应。由西北—东南地表温度剖面图(图5B)可知：5期在0~39 km区段上变化较一致，均为“减—增—减—增—减”的特征；西海岸段(0~15 km)递减，主城区段(9~27 km)是“高原”区，南渡江流域(27~30 km)为“谷”，美兰机场区域(30~39 km)是“高峰”密集区。区别在于2000~2010年西海岸段(0~15 km)处于高速开发阶段，有明显“高峰”，而到2015~2019年随着老城区更新、江东新区开发热，“高峰”消失；三江镇区域(39~54 km)耕地、林地和养殖塘交叉分布，且耕地或采收或处于生长期，5期特点各不相同。由东北—西南地表温度剖面图(图5C)可知：5期在0~18 km区段上变化规律类似，均为“减—增—减”趋势；新埠岛(0~3 km)由“高峰”(西坡新村)骤降到“谷”(横沟河)；中心城区(3~15 km)是“高原”区，多“高峰”在金盘工业园；狮子岭开发区(15~21 km)未连成片，与河流、坑塘、林地和耕地相交错，因而“高峰”“谷”交替出现。

## 2.2 热力景观格局指数变化特征

2.2.1 热环境变化指数分析 将Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ等3个等级作为相对高温区量化热岛转移特征。由表2可知：2000~2005年和2005~2010年高温斑块扩张较多， $I_{CS}$ 和 $I_{CI}$ 也较高；2010~2015年 $I_{CS}$ 和 $I_{CI}$ 很小，2015~2019年甚至成为负值。结合海口新增高温斑块时空变化(图6)与不透水面分布(图3)可知：就主城区而言，2000~2005年高温斑块扩张主要发生在西海岸、长流、金盘和秀英片区及狮子岭和金鹿工业区、省教育科研基地，2005~2010年主要发生在长流、海甸、府城、滨江和白龙片区及狮子岭和金鹿工业区，2010~2015年主要发生在长流片区及西南老城方向，2015~2019年主要发生在江东片区的美兰机场到桂林洋滨海片区一带及西南老城方向。2000~2005年和2005~2010年郊区温斑块扩张较多，主要是观澜湖地区开发，其次是小型城镇、耕地或河滩的扩张。

2.2.2 斑块类型水平上的热力景观格局演变分析 由图7可知：海口热力景观格局在2000~2019年变化较大。就斑块密度来看，Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ等5个等级都在2010年达到峰值，之后逐渐减小；表明在城市化过程中，热岛斑块先缩小后扩张，由大而集中到小而分散再到大而集中，热力景观斑块破碎度随之体现为先增加后减小。对于平均斑块面积而言，Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ都在2010年达到谷值，之后逐渐增大，2019年数值分别是2010年的11、19、18倍，说明热岛斑块先逐渐分解后连接成片。5期数据中，最大斑块指数分别出现在V、VI、VI、IV、IV级，表明IV、V和VI优势度最大；X级的最大斑块指数由2000年的0.13增加到2010年的0.24再减小到2019年的0.15，即优势度先增大后减小，反映了研究期间海口热岛效应先增强后减弱。由面积加权平均形状指数来看，5期数据形状最复杂的分别是IV、IV、IV、VI、VII级，表明非极端冷、热岛始终占据主导格局；各期由IV到VII的变化规律不一致，但最值均由弱冷岛向弱热岛转移，表明建设活动在一定程度上加剧了热力景观的复杂性。测定各期斑块内聚力指数，Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ级变化各不相同，与热岛集中区的转移扩散密不可分，说明海口热岛效应具有阶段性。不同热力等级景观形状指数IV、V、VI、VII级较大；Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ级较小，热力景观斑块也较简单规则，且皆以2010年为界先递增、后平稳波动。5期数据中聚合度变化整体呈增大趋势，Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ级变化最为显著，表明虽然面积有限，但高温斑块连通性增强，有较强的空间聚合趋势，易出现连片热岛。

2.2.3 景观水平上的热力景观格局演变分析 由表3可知：斑块数、斑块密度和聚合度以2010年为界，先递减后递增，平均斑块面积波动增大，三者共同反映了海口热力景观破碎度先递增后锐减；海口

表2 海口市高温斑块扩张的变化速度指数和变化强度指数

Table 2  $I_{CS}$  and  $I_{CI}$  of high-temperature plaque expansion in Haikou

时间段	扩张面积/km <sup>2</sup>	$I_{CS}/\%$	$I_{CI}/\%$
2000~2005	105.136 2	12.87	0.92
2005~2010	87.588 0	10.87	1.28
2010~2015	12.588 3	0.59	0.09
2015~2019	-5.462 1	-0.37	-0.06
平均值	49.962 6	5.99	0.56

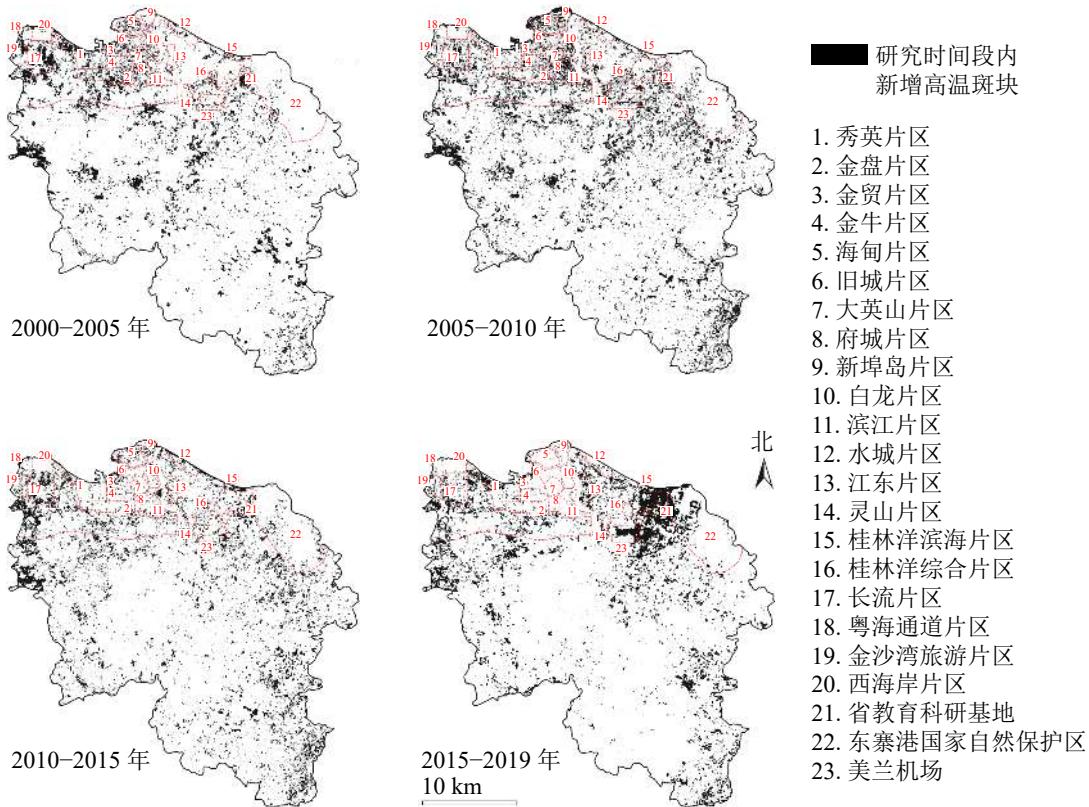


图 6 海口 4 个时间段新增高温斑块分布示意图

Figure 6 Distribution of new high-temperature plaques in 4 time periods in Haikou

老城区更新、西海岸与长流一带以及江东新区的阶段性开发，导致高温热岛斑块出现阶段性的聚集与扩散，相应斑块复杂性先增大后减小。面积加权平均形状指数呈波动上升的趋势，斑块复杂性波动上升。斑块内聚力指数均大于 98.5，表明同类别型斑块具有高连通性。多样性指数和均匀度指数皆以 2010 年为界，先递减后递增，表明等级斑块均匀度先增加后减小，热力景观丰度、复杂性和异质性先提升后下降。总体上，热力景观破碎度、连通性与聚合度的阶段性变化反映了海口热岛集中区转移、扩散。

### 3 结论与讨论

研究发现：5 期热岛强度等级均符合正态分布规律，其中较弱冷岛、弱冷岛和弱热岛斑块占主导格局，但极强冷、热岛“两头小”的景观格局依然存在。与陈康林等<sup>[3]</sup>发现广州市弱冷岛、弱热岛面积之和约占总面积的 58%，且极强热、冷岛等级存在的结果较吻合，表明热岛强度等级会对局域热环境产生作用。热岛强度等级中心由西海岸分别向江东新区和西南老城方向转移，与不透水面扩张方向保持一致。结合热环境变化指数分析可知：2000–2010 年高温区扩张最快，主要集中在中心城区和西海岸；2010–2019 年扩张很慢，高温中心转移到江东新区和西南老城方向，且在美兰机场附近形成连片热岛。与雷金睿等<sup>[20]</sup>发现海口主城区热岛空间质心分布基本一致；直到 2019 年，江东新区快速开发导致出现连片热岛，与雷金睿等<sup>[20]</sup>发现质心仅向西南方向转移不完全一致，是因为研究时间不同。可见，城市扩张具有极强的政策导向性，相关部门应将热环境问题纳入城市发展范畴，以避免江东新区热岛与中心城区接连成片。

地表温度剖面分析表明：中心城区始终是“高原”区，19 a 来无显著改善，西海岸的“高峰”随着城市建设重心的东移逐渐消失，狮子岭等工业区、美兰机场区域多“高峰”，“谷”通常出现在水域、林地等降温效果明显的地物周边，进一步验证了等级理论。从斑块类型水平来看，2000–2010 年海口热岛斑块不断缩小、大型板块逐渐分解、斑块形状愈加复杂、热岛效应不断增强；2010–2019 年热岛斑块不断扩张、小版块逐渐连接成片、斑块形状变化趋于平稳、热岛效应不断减弱；研究期间热岛斑块连通

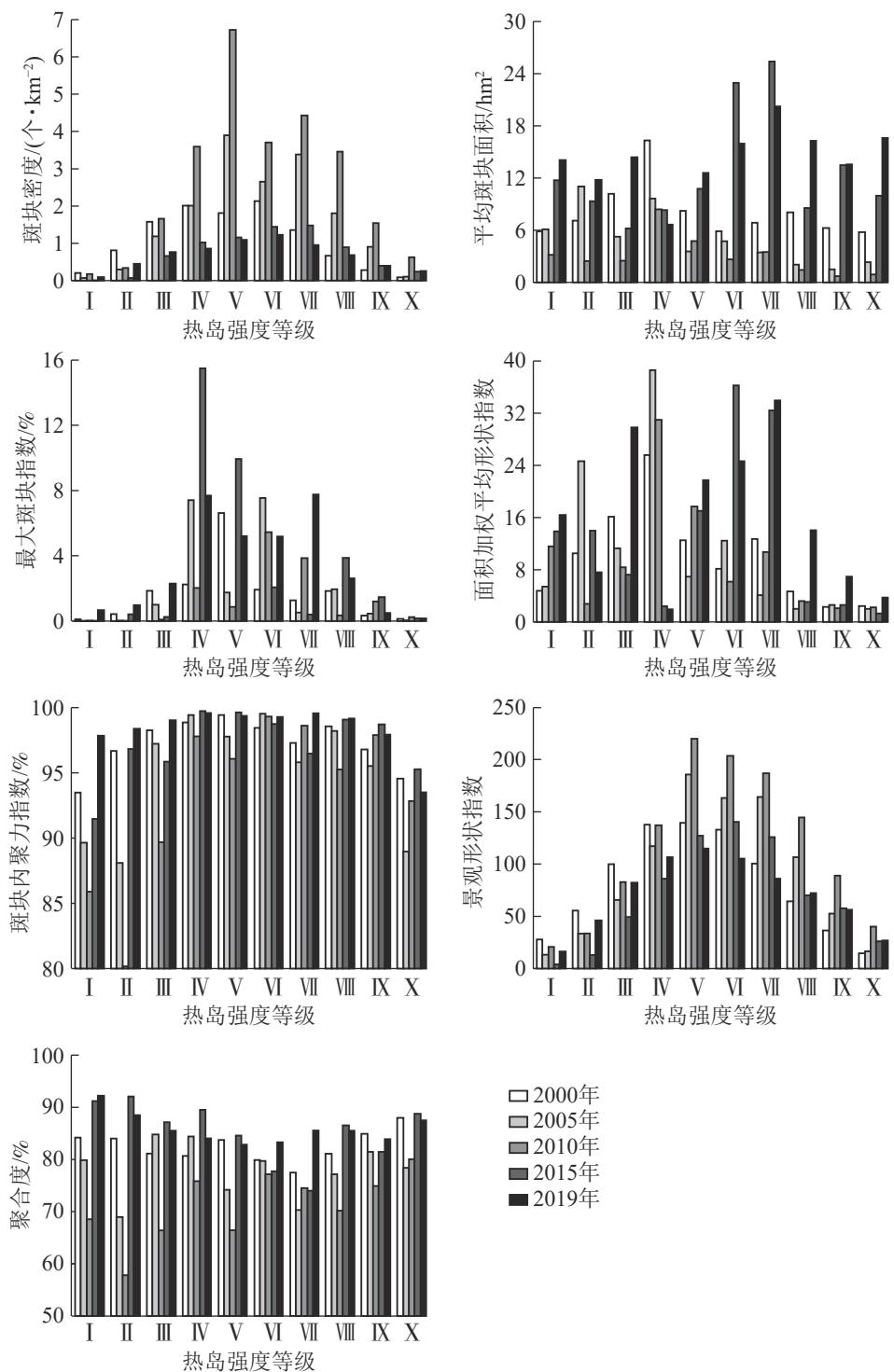


图7 热力景观在斑块类型水平上的景观指数变化

Figure 7 Change of landscape index on the level of patch type in thermal landscape

表3 热力景观在景观水平上的景观指数变化

Table 3 Landscape index change of thermal landscape at landscape level

年份	斑块数/个	斑块密度/(个·hm <sup>-2</sup> )	聚合度/%	平均斑块面积/hm <sup>2</sup>	面积加权平均形状指数	斑块内聚力指数/%	多样性指数	均匀度指数
2000	24 202	10.932 5	81.598 0	15.830 2	15.830 2	98.894 3	1.889 2	0.820 5
2005	36 831	16.306 7	78.642 7	20.079 1	20.079 1	98.994 7	1.818 4	0.789 7
2010	59 845	26.257 6	73.606 5	17.391 4	17.391 4	98.542 5	1.796 9	0.780 4
2015	16 777	7.361 1	84.217 8	23.567 3	23.567 3	99.387 7	1.856 5	0.806 3
2019	15 432	6.770 9	84.702 0	21.835 3	21.835 3	99.355 7	2.100 5	0.912 2

性不断增强、聚合度越来越高，易出现连片热岛。从景观水平看，2000–2010年冷热岛斑块破碎度、复杂性和均匀度不断增大，2010–2019年不断减小；研究期间同类别热力斑块连通性很高。与邓睿等<sup>[12]</sup>发现重庆2001–2014年各景观指数单续递增或递减的规律不一致，表明两市发展水平及阶段不同。

综上，等级理论为描述热力景观的细节变化奠定了基础，热力景观格局指数利于揭示其空间布局、组成多样性及时空分异特征，是分析热力景观格局的重要工具。当然，热力景观格局是具有尺度依赖性与变异性的，需通过不同幅度下的热力景观进一步比较研究。深入理解城市热岛在经济发展、城市规划建设的不同阶段的时空变化，对改善城市热环境、建设生态宜居城市意义重大。

## 4 参考文献

- [1] SANTAMOURIS M, DING L, FIORITO F, et al. Passive and active cooling for the outdoor built environment: analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects [J]. *Solar Energy*, 2017, **154**: 14–33.
- [2] QI Jinda, DING Lan, LIM Samsung. Ontology-based knowledge representation of urban heat island mitigation strategies [J]. *Sustainable Cities Soc*, 2020, **52**: 101875. doi: [10.1016/j.scs.2019.101875](https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101875).
- [3] 陈康林, 龚建周, 陈晓越. 广州市热岛强度的空间格局及其分异特征[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(3): 792–799.  
CHEN Kanglin, GONG Jianzhou, CHEN Xiaoyue. Spatial pattern and differentiation characteristics of urban heat island intensity in Guangzhou City [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(3): 792–799.
- [4] 白杨, 王晓云, 姜海梅, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(2): 101–106.  
BAI Yang, WANG Xiaoyun, JIANG Haimei, et al. Progress of urban heat island effect [J]. *J Meteorol Environ*, 2013, **29**(2): 101–106.
- [5] HUANG Qunfang, LU Yuqi. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis [J]. *Theor Appl Climatol*, 2017, **131**(3/4): 1055–1067.
- [6] KOTHARKAR R, RAMESH A, BAGADE A. Urban heat island studies in South Asia: a critical review [J]. *Urban Clim*, 2018, **24**: 1011–1026.
- [7] 邬建国. 景观生态学: 概念与理论[J]. 生态学杂志, 2000, **19**(1): 42–52.  
WU Jianguo. Landscape ecology: concepts and theories [J]. *Chin J Ecol*, 2000, **19**(1): 42–52.
- [8] 王清川, 郭立平, 张绍恢. 不同气象条件下廊坊城市热岛效应变化特征[J]. 气象与环境学报, 2009, **25**(6): 44–48.  
WANG Qingchuan, GUO Liping, ZHANG Shaohui. Urban heat island effect under different meteorological conditions over Langfang, Hebei Province [J]. *J Meteor Environ*, 2009, **25**(6): 44–48.
- [9] 李丽光, 王宏博, 贾庆宇, 等. 辽宁省城市热岛强度特征及等级划分[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(5): 1345–1350.  
LI Liguo, WANG Hongbo, JIA Qingyu, et al. Urban heat island intensity and its grading in Liaoning Province of Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(5): 1345–1350.
- [10] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 上海城市热环境的空间格局分析[J]. 地理科学, 2002, **22**(3): 317–323.  
CHEN Yunhao, LI Xiaobing, SHI Peijun, et al. Study on spatial pattern of urban heat environment in Shanghai City [J]. *Sci Geogr Sin*, 2002, **22**(3): 317–323.
- [11] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2077–2086.  
CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Lidong, et al. Applicability of traditional landscape metrics in evaluating urban heat island effect [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(8): 2077–2086.
- [12] 邓睿, 刘亮, 徐二丽. 基于Landsat时间序列数据的重庆市热力景观格局演变分析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(8): 1349–1357.  
DENG Rui, LIU Liang, XU Erlie. Study on the evolution of thermal landscape pattern in Chongqing City based on time-series landsat data [J]. *Ecol Environ Sci*, 2017, **26**(8): 1349–1357.
- [13] 杨丽萍, 王乐, 孙晓辉, 等. 基于遥感的西安市热力景观格局演变[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(1): 250–255, 264.  
YANG Liping, WANG Le, SUN Xiaohui, et al. Evolution of the thermal landscape patterns in Xi'an City based on remote sensing [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2017, **24**(1): 250–255, 264.
- [14] 池腾龙, 曾坚, 刘晨. 近30年武汉市热环境格局演化机制及扩散模式研究[J]. 国土资源遥感, 2017, **29**(4): 197–204.

- CHI Tenglong, ZENG Jian, LIU Chen. A study of evolution mechanism and diffusion mode pattern of thermal environment for Wuhan City in the past 30 years [J]. *Remote Sensing Land Resour*, 2017, **29**(4): 197 – 204.
- [15] 王中正. 基于遥感影像的城市热岛效应研究及系统的设计: 以海口为例[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- WANG Zhongzheng. *Urban Heat Island Effect Research and System Design based on Remote Sensing Image: A Case Study of Haikou City* [J]. Haikou: Hainan Univeristy, 2018.
- [16] 李军, 赵彤, 朱维, 等. 基于 Landsat 8 的重庆主城区城市热岛效应研究[J]. 山地学报, 2018, **36**(3): 452 – 461.
- LI Jun, ZHAO Tong, ZHU Wei, et al. Urban heat island effect based on Landsat 8 image in urban districts of Chongqing, China [J]. *Mount Res*, 2018, **36**(3): 452 – 461.
- [17] 武鹏飞. 基于 TM 影像的北京市城市热岛效应及其影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- WU Pengfei. *Study on Urban Heat Island and Its Influence in Beijing City based on TM Images* [J]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [18] 姚玉龙, 刘普幸, 陈丽丽. 基于遥感影像的合肥市热岛效应时空变化特征及成因[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(12): 3351 – 3359.
- YAO Yulong, LIU Puxing, CHEN Lili. Spatiotemporal variation characteristics and causes of urban heat islands in Hefei City, Anhui Province of China based on remote sensing [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **32**(12): 3351 – 3359.
- [19] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观中斑块大小的分布特征[J]. 植物学报, 1999, **41**(2): 199 – 205.
- LIU Canran, CHEN Lingzhi. Distribution characteristics of patch sizes in the vegetation landscape in Beijing [J]. *Acta Bot Sin*, 1999, **41**(2): 199 – 205.
- [20] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 1989–2015 年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(4): 1734 – 1743.
- LEI Jinrui, CHEN Zongzhu, WU Tingtian, et al. Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989 – 2015 [J]. *China Environ Sci*, 2019, **39**(4): 1734 – 1743.