

# 城市形态空间格局与城市热环境关联性研究

## ——以南京市为例

吴子豪, 童滋雨

(南京大学建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093)

**[摘要]** 量化分析城市形态空间格局与城市热环境的关联关系, 将有助于提升城市规划与设计中的形态管控的合理性, 对于改善城市热环境和促进城市可持续发展等具有重要的意义. 本文以南京市为案例, 对其复杂城市形态的空间格局进行量化, 并探究其与城市热环境之间存在的关联性. 主要结论如下: (1) 空间滞后模型更适用于城市热环境关联的研究, 且城市热岛强度(UHII)受到周边区域强度的正向影响. (2) 分季节来看, 城市形态空间格局对 UHII 的影响排序为春季>夏季>秋季>冬季. (3) 所有的建成环境形态类型和 LCZ E(空地)在周边环境中的数量占比在多数季节中均会对城市热环境产生显著的正向升温影响, 其中 LCZ 8(低层大体量建筑)的数量占比的影响程度最大. 而自然环境形态类型则多有利于降温, LCZ G(水体)的作用优于 LCZ A(树林). (4) 从整体布局上看, 周边由单一形态主导的空间格局将有助于带来更低的 UHII. (5) 以空间格局指标为依据, 可以将研究区域分为 9 类具有相似形态组成结构和周边环境特征的分区类型. 不同类型间存在热环境属性差异, 应采取差异化的手段对其进行调控. 研究结论可为构建气候适应性城市提供参考.

**[关键词]** 城市形态, 空间格局, 城市热环境, 城市热岛效应, 局地气候分区

**[中图分类号]** TU984.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2022)02-0016-10

## Study on the Correlation Between the Spatial Patterns of Urban Form and the Urban Thermal Environment: a Case Study of Nanjing

Wu Zihao, Tong Ziyu

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Quantitative analysis of the correlation between the spatial patterns of urban form and the urban thermal environment will help to improve the rationality of morphological control in urban planning and design, which is important for improving the urban thermal environment and promoting sustainable urban development. Taking Nanjing as an example, this paper quantifies the spatial patterns of the complex urban form and explores the correlation with the urban thermal environment. The main conclusions are as follows: (1) The spatial lag model is more applicable to the study of urban thermal environment association, and the urban heat island intensity (UHII) is positively influenced by the UHII of the surrounding environment. (2) By season, the impact of the spatial patterns of the urban form on UHII is ranked as spring > summer > autumn > winter. (3) The proportion of all built environment form types and LCZ E (ground) in the surrounding environment have a significant positive effect on the urban thermal environment in most seasons, with the proportion of LCZ 8 (large low-rise buildings) having the greatest degree of positive influence. In contrast, the natural environmental form type is mostly conducive to cooling, where LCZ G (water) is better than LCZ A (forests). (4) In terms of the overall layout, the spatial patterns of the surrounding environment dominated by a single form will help bring about a lower urban heat island intensity. (5) Based on the spatial pattern indicators, the study area can be divided into 9 zoning types with similar morphological composition structures and characteristics of the surrounding environment. Differences exist among types in thermal environment properties, which should be regulated by differentiated means. The conclusions of the study can provide a reference for the construction of climate-resilient cities.

**Key words:** urban form, spatial pattern, urban thermal environment, urban heat island effect, local climate zone

收稿日期: 2021-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51538005)、国家自然科学基金面上项目(51578277).

通讯作者: 童滋雨, 博士, 教授, 研究方向: 城市形态与微气候. E-mail: tzy@nju.edu.cn

根据政府间气候变化专业委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)的第六次评估报告,在过去的100年里,全球地表平均温度已上升约 $1^{\circ}\text{C}$ ,并且发现未来20年的平均温度,预计将达到或超过 $1.5^{\circ}\text{C}$ 的温度增幅,气候变化所导致的极端高温天气正严重危害着人类日常活动的安全。城市作为人类活动最为集中的地区,不仅是潜在的气候脆弱点,也是造成气候变化问题的重要诱因<sup>[1]</sup>。一方面,城市热环境恶化所体现出的城市热岛效应作用于城市,造成了能源消耗增加<sup>[2]</sup>、空气污染严重<sup>[3]</sup>、疾病发病率上升<sup>[4]</sup>、体感舒适度下降<sup>[5]</sup>和生物多样性降低<sup>[6]</sup>等一系列负面影响,气候变化正严重侵害着城市的正常运作和居民的生活质量;另一方面,快速的城市化过程带来的城市物质形态的剧烈演变<sup>[7]</sup>,本身即是造成城市热环境改变的主要原因之一<sup>[8]</sup>。因此,深入探究城市形态与城市热环境的关联性,将有助于提升城市规划与设计中的形态管控的合理性,对改善城市热环境和促进城市可持续发展具有重要的意义。

目前对城市形态与城市热环境的关联性的研究,主要可以归纳为两种类型:一是通过监督分类方法对遥感影像进行分类处理,并在此基础上以空间格局反映要素的空间分布与配置特征,计算了如绿地、水体、耕地、建设用地和未利用地等特定土地利用和城市形态等要素的空间格局指标,并分析了其对城市热环境的重要影响<sup>[9-12]</sup>;二是通过计算或转换城市形态隐式模型为定量化的形态参数,如建筑密度、建筑高度、天空视域因子、不透水表面比例、归一化植被指数等,再结合相关分析、回归分析等统计学方法分析了其与城市热环境的关联性<sup>[13-16]</sup>。以上研究较为全面地探讨了两者之间的关联性,但仍存在以下不足:前者对城市形态的分类较为粗糙,仅仅将建成区归为一类处理,而忽略了其内部形态的多样性及其与微气候之间存在的复杂关联;而后者仅考虑了单一空间位置处的城市形态作用,而未充分考虑周边环境中的城市形态空间格局特征对城市热环境所施加的潜在影响。

针对现有研究中存在的不足,一方面需要对城市形态进行更加精确细致的描述,另一方面也需要对周边环境中的城市形态的空间格局特征提供合理的量化指标。本研究旨在解决该类问题,并在其基础上进一步分析城市形态空间格局与城市热环境之间的关联性,以期构建气候适应性城市提供参考。

## 1 研究方法

对城市形态空间格局与城市热环境之间的关联性进行分析时,关键的一项步骤是提供一个清晰合理的城市形态空间格局特征定量描述路径。在这一过程中,首先需要构建合理的模型以反映城市形态特征。为了表现城市形态对热环境的作用,具有热环境响应能力的形态特征,包括建筑物的高度、不透水表面比例、天空视域因子等指标应被纳入所构建的形态模型中。在构建模型的基础上,本研究不仅需要考虑形态位置本身对城市热环境的作用,也需要体现周边环境中的城市形态的分布与配置所产生的影响,因此城市形态要素在一定范围内的空间格局特征也需要被特定的指标所反映。结合对城市热环境的表征,回归模型被用于探究两者间关联性,并进一步以存在关联性的格局指标为依据,采用聚类分析划分分区类型且加以解释。图1展示了分析城市形态空间格局与城市热环境关联性的研究方法框架。

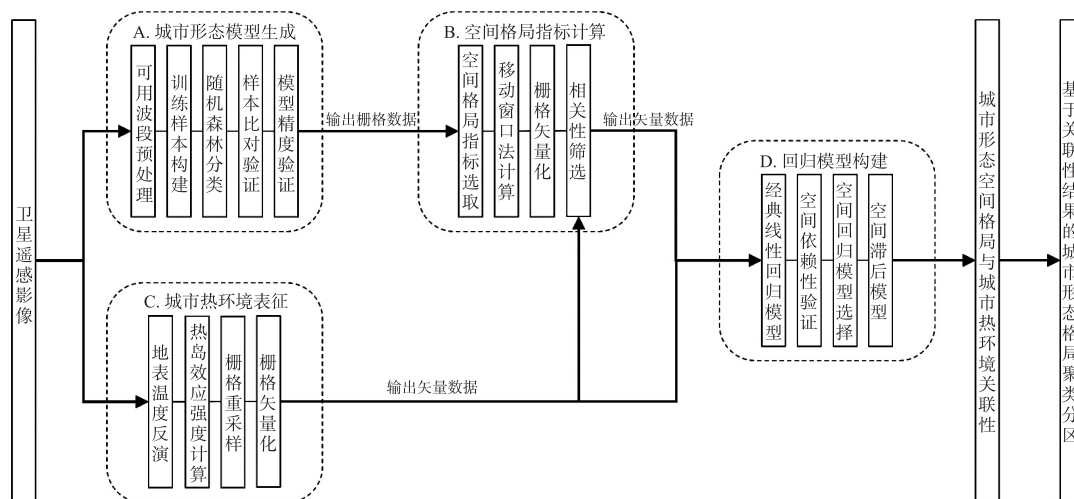


图1 研究方法框架

Fig. 1 Research methodology framework

### 1.1 城市形态模型生成

在定量描述城市形态空间格局特征时,必须考虑的第一个因素是生成具有热环境响应能力的城市形态模型.为此,本研究采用基于世界城市数据库和访问门户工具(world urban database access portal tools, WUDAPT)的局地气候分区分类框架(local climate zone, LCZ),结合遥感影像与网络可用信息以构建城市形态隐式模型. LCZ 是一种针对城市热岛效应提出的城市形态分类框架<sup>[17-18]</sup>. 它将城市环境分为了 17 种形态类型,包括 10 种建成环境类型(LCZ 1- LCZ 10)和 7 种自然环境类型(LCZ A- LCZ G). 每种分区类型具有相似的热环境,且与热环境相关的城市形态、地表覆盖、建筑材料和人类活动等指标在分类标准中均有所体现<sup>[19]</sup>. 具体的生成过程主要包含 5 个步骤:(1)通过 SAGA GIS 软件对遥感影像的相关波段进行预处理,以获取局地尺度下城市特征的光谱信号;(2)基于 LCZ 分类框架和实际情况,对其分区类型进行修正,而后利用 Google Earth 创建矢量化的训练样本;(3)运用监督式机器学习中的随机森林分类法(SAGA GIS 集成模块),以训练样本为基础结合遥感影像对城市形态进行分类;(4)将训练得到的栅格文件导出,载入 Google Earth 中进行比对验证,并对差异较大地区样本重新训练,直至分类结果与观察的实际情况相吻合;(5)进一步构建验证样本集,以判断模型分类精度,当精度满足要求时作为结果输出.

### 1.2 空间格局指标计算

为了描述周边环境的城市形态的空间格局特征,本研究选取景观格局指标进行计算. 这是一种源于景观生态学的方法,由于其能够有效表征要素周边的空间组成和结构特征<sup>[20]</sup>,适宜作为量化城市形态空间格局特征方法使用,目前该方法已被广泛应用于对城市形态和土地利用的量化研究中<sup>[9-12]</sup>,并有部分研究结合景观格局指数计算了与热环境有关的格局指数. 在参考前人研究的基础上,本研究从类型尺度和景观尺度 2 个层面,选取了 4 类景观格局指数来量化城市形态的空间格局,计算过程在 Fragstats 4.2 软件中完成. 在类型尺度中,连续度(CONTIG)度量了某一类型斑块的平均邻近程度,斑块占比(PLAND)度量了某一类型斑块在景观中所占的比例,集聚度(AI)则度量了某一类型斑块的集聚程度;在景观尺度中,香农均匀度指数(SHEI)度量了整体城市形态的多样性和均匀度.

为了量化每一个栅格位置处周边的空间格局,并获取连续的栅格数据,用移动窗口法进行计算. 其原理是构建一个从左上角开始移动的计算窗口,对数据进行依次计算,计算结果以栅格文件的形式输出,并将其进一步矢量化以满足分析需求. 在本研究中,分别计算以 3 到 21 个栅格单元(2 个单元为公差)为窗口尺寸的结果,并采用皮尔逊相关分析计算其与城市热环境指标的关联性,筛选出其中相关性较强的窗口尺寸作为最终纳入到回归模型中的计算尺度.

### 1.3 城市热环境表征

本研究所分析的城市热环境特指城市地表热环境,可以通过遥感影像反演地表温度(land surface temperature, LST),并计算城市热岛强度(urban heat island intensity, UHII)对其进行表征. 研究基于大气校正法(辐射传输方程)的原理,通过集成的地表温度反演插件对地表温度进行反演. 为了考虑不同季节的城市热环境差异性,春、夏、秋、冬 4 个季节的 LST 均被纳入分析. 本研究将城市热岛强度定义为:栅格地表温度减去研究范围内所有自然环境类型栅格的平均地表温度,其计算公式为:

$$UHII_i = LST_i - LST_{Nature\_Average} \quad (1)$$

在计算得到 UHII 栅格数据的基础上,需要进一步将其重采样至与空间格局指标栅格相对应的分辨率,并将其进行矢量化处理.

### 1.4 回归模型构建

为探究城市形态空间格局与城市热环境的关联性,本研究采用了回归模型进行分析,其中包括经典线性回归模型和空间回归模型. 模型中解释变量被设置为景观格局指数,而因变量则为 UHII.

经典线性回归模型是一种最为常见的关联性量化模型,其公式可以表达为:

$$y = X\beta + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n), \quad (2)$$

式中,  $y$  为因变量,  $X$  为自变量,  $\beta$  为自变量对应的回归系数,  $\varepsilon$  为随机误差项.

由于大气流动和热传导、对流、辐射作用,地表温度在空间上发生连续变化<sup>[21]</sup>,在一定尺度内的 UHII 取值不仅取决于其本身的形态格局,也可能受到周边环境要素的影响,此时,需要纳入空间回归模型对其进一步度量. 空间回归模型包括空间滞后模型(spatial lag model, SLM)和空间误差模型(spatial error

model, SEM) 两类。

空间滞后模型主要针对变量存在的空间依赖性所产生的影响,它考虑了空间单元的因变量依赖于其周边空间单元的观测值的情况,并通过加入因变量的空间自相关设置来解决这一问题,其公式可以表达为:

$$y = \rho W y + X \beta + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n), \quad (3)$$

式中,  $W$  为空间权重矩阵,  $\rho$  为空间滞后回归系数。

空间误差模型则主要针对随机误差项存在的空间依赖性所产生的影响,它考虑了模型中存在的不可观测变量的影响,并通过加入随机误差项的空间自相关设置来解决这一问题,其公式可以表达为:

$$y = X \beta + \mu, \quad \mu = \lambda W \mu + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n), \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为空间误差回归系数。

具体的计算过程在 GeoDa 1.6 中完成。首先以 Queen 邻接方式构建空间权重矩阵,并对经典线性回归模型的残差进行空间自相关统计,当统计量显著时,说明可能存在空间依赖性,则考虑空间回归模型。在保证显著性的前提下,比对空间滞后模型和空间误差模型对应的拉格朗日倍数值(lagrange multiplier, LM)。若两者均显著,则进一步比较稳健的拉格朗日倍数值(robust lagrange multiplier, R-LM),选择其中数值较大的作为最终分析的模型。

### 1.5 城市形态格局聚类分区

为了使得研究结果更具备规划层面的可操作性,在用回归模型分析得到城市形态空间格局指标与城市热环境关联性的基础上,研究进一步从城市层面以空间格局指标特征为依据进行聚类分区,并针对每一类分区类型描述其 LCZ 类型组成和 UHI 特征,以此为城市规划设计提供参照。

为此,研究采用了 K-Means 算法进行聚类分析,这是一种常见的无监督聚类算法,具有操作简单、效率较高、聚类效果较优且模型可解释性较强的优势,适合用于本研究中大规模数据集的挖掘。具体的分析操作在 GeoDa 1.6 中完成。

## 2 案例研究

### 2.1 研究案例

本研究选择南京市主城区及其周边区域作为研究案例。南京市是江苏省的省会,也是长江中下游流域的重要城市之一。其经历了快速的城镇化过程,城市形态丰富而复杂,是中国典型的高密度城市。从气候条件上看,南京市四季分明,雨水充沛,春秋季短,夏冬季长,平均气温为 2.7 °C (1 月) ~ 28.1 °C (7 月),亚热带季风气候特征显著,在一定程度上能够代表夏热冬冷地区城市的普遍情况。

具体的研究范围是以南京市政府为中心、外扩 24 km 的方形区域,涵盖了南京市主城区及其周边的自然环境。考虑到在采用移动窗口法计算景观格局指数时,边界区域无法被有效计算,故以中心外扩 30 km 作为缓冲范围(图 2)。

### 2.2 数据来源

本研究所采用的数据源于分辨率为 30 m 的 Landsat 8 卫星遥感影像,这是一种最常见的数据源,具有分辨率适中、覆盖时间范围广和获取、分类、反演难度小的优势。相关文件可以从地理空间数据云网站中下载(<http://www.gscloud.cn/>)。其中,包括了 4 幅采集总间隔不超过 1 年、季节特征显著的遥感影像,采集时间均为上午 10 时,天气均为晴,且云量小于 10%。在本研究中,将采用春、夏、秋、冬 4 个季节的遥感影像分别对城市热环境进行表征;同时考虑到夏季植被特征较为显著,对形态的区分效果较好,故以该时段的影像数据作为输入来源以生成城市形态模型。

### 2.3 南京市城市形态模型

本研究采用 1.1 节中的 LCZ 框架构建南京市城市形态模型。首先,在 SAGA GIS 中对遥感影像波段进行预处理,将其重采样至适用于夏热冬冷地区高密度城市分类的 300 m × 300 m 栅格分辨率<sup>[22]</sup>。然后,在 Google Earth 中基于 LCZ 框架构建训练样本(采样日期:2019-07-21,训练样本数量:1 865 个)。值得注意的是,考虑南京市实际情况,在 LCZ 的 17 种类型基础上对其合并处理,最终保留了 8 种形态类型:建成环境类型 4 种,分别是 LCZ 1(高层建筑)、LCZ 2(中层建筑)、LCZ 3(低层建筑)和 LCZ 8(低层大体量建筑);自然环境类型 4 种,分别是 LCZ A(树林)、LCZ D(灌木农田)、LCZ E(空地)和 LCZ G(水体)。在样本构建



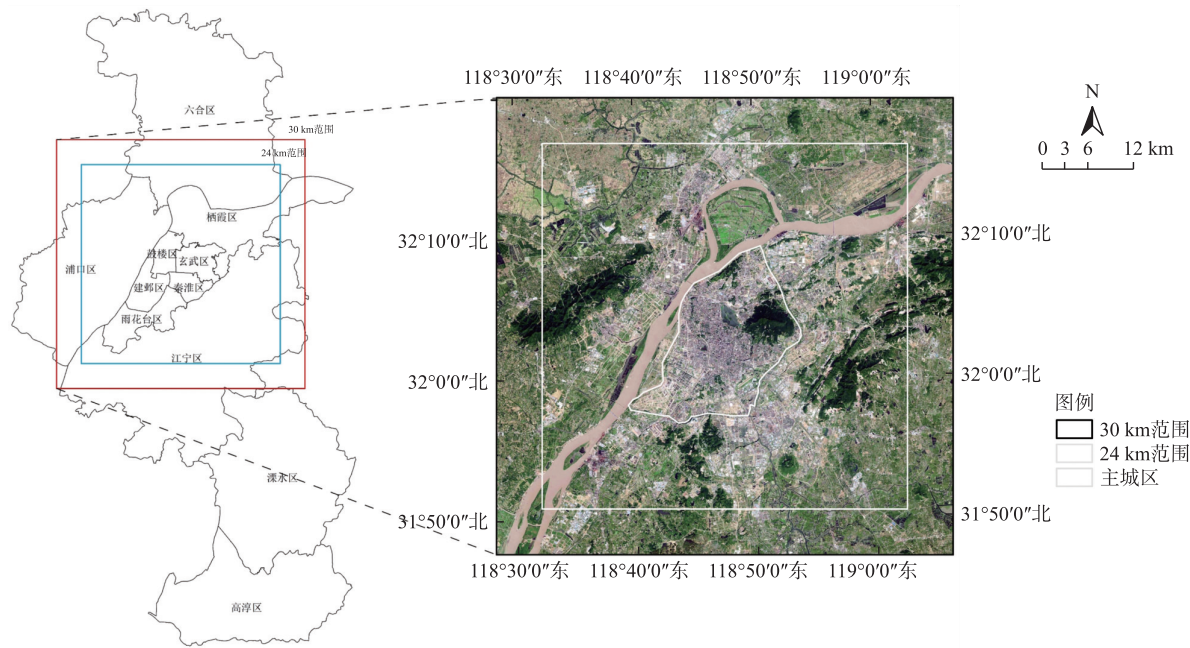


图 2 研究案例范围

Fig. 2 Range of study case

后,研究通过机器学习对遥感影像进行分类,并将识别结果载入 Google Earth 中进行验证,重新训练了差异较大的区域. 最后,采用总体精度(overall accuracy, OA)和 Kappa 系数对模型分类质量进行检测. 结果显示,模型 OA 值为 89.5%,Kappa 值为 0.861,具有较高分类精度,故将基于该分类结果开展分析.

图 3 展示了生成的城市形态模型栅格图像及在研究范围中各 LCZ 类型的数量. 其中,自然环境类型占比较大,并以 LCZ A 和 LCZ D 为主;而在建成环境类型中,4 种类型数量分布较为均匀,LCZ 2 和 LCZ 8

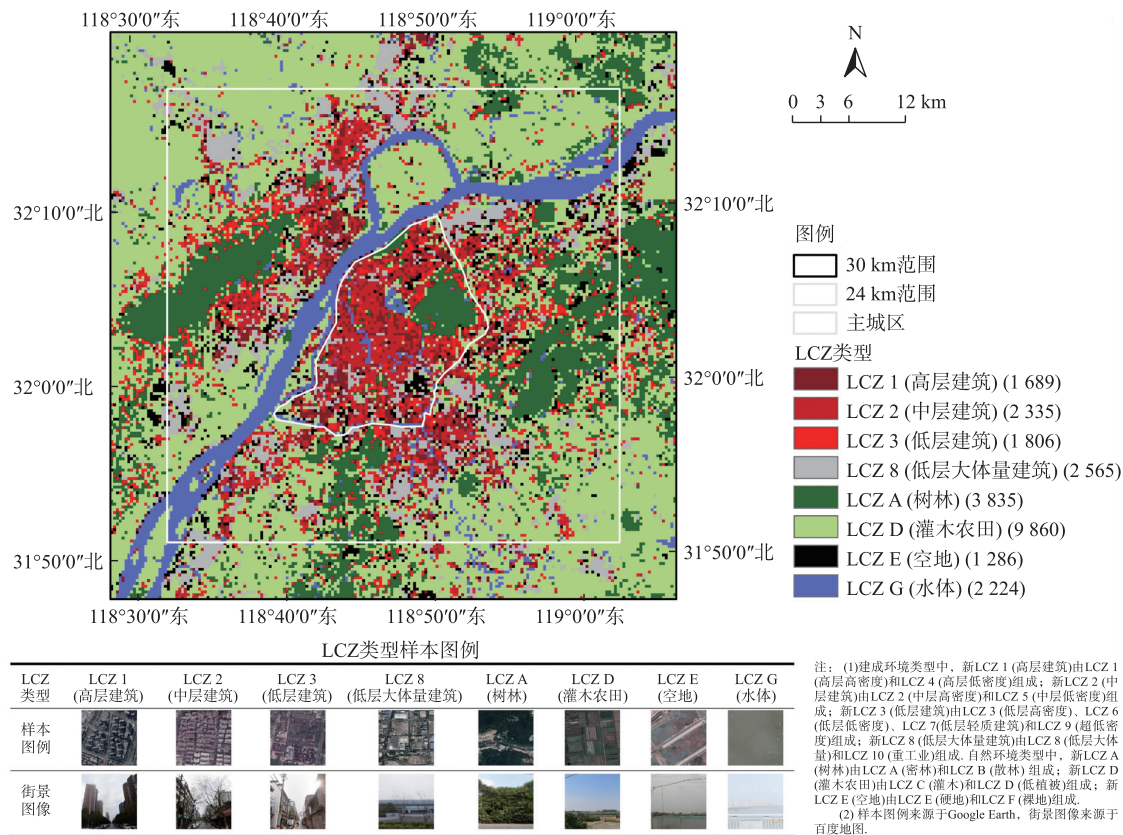


图 3 南京市 LCZ 类型地图

Fig. 3 LCZ map of Nanjing

所占比例较高。

#### 2.4 空间格局指标计算结果

在生成 300 m × 300 m 分辨率的城市形态模型栅格图像的基础上,本研究以 900~6 300 m(600 m 为公差)等 10 个参数为计算窗口尺寸,计算了类型与景观尺度下的 4 类 250 个景观格局指数,生成的栅格分辨率同样为 300 m × 300 m。同时将 UHII 数据也重采样至相同分辨率以进行匹配,并对两者均进行矢量化处理。在此基础上,进一步分析了计算得到的景观格局指数与不同季节 UHII 的相关性,共获得 1 000 个相关性结果。

分析不同窗口尺寸下各类指标的相关性绝对值均值,以选择合理的窗口尺寸纳入回归模型,其结果如图 4 所示。可以看出,大部分的指标相关性在 900 m 或 1 500 m 时(即 3 或 5 个栅格单元为窗口尺寸)达到其最大值,而后趋于下降,说明在该尺度下城市形态空间格局与热环境的关联性最强。尽管部分类型尺度指标在 1 500 m 时有小幅度的上升,但考虑到景观尺度中的 SHEI 指标在 1 500 m 时下降较快,因此本研究综合考虑,采用 900 m 作为空间格局指标的窗口尺寸进行计算,即考虑位置本身及其周边邻接的 8 个单元中城市形态空间格局对城市热环境的作用(如图 5 所示)。

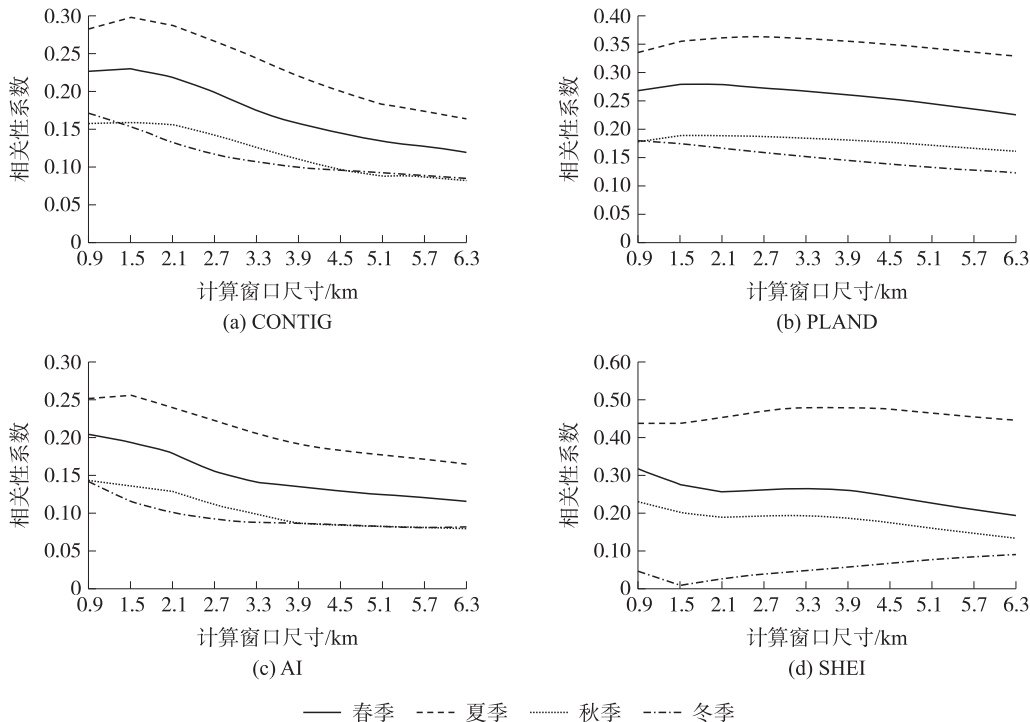


图 4 不同空间格局指标与 UHII 的相关性绝对值均值

Fig. 4 Absolute mean value of correlation between different spatial pattern indicators and UHII

在 900 m 计算窗口尺寸下,对类型尺度的 3 类变量进行相关性分析,发现指标之间的相关系数大部分均大于 0.7,具有较强的相关性,其他采用景观格局指数进行计算的相关研究结果也证实了这一结论<sup>[23]</sup>。因此本研究对指标进行了进一步的删减。由于在类型尺度的 3 类指标中,PLAND 与 UHII 的相关性最强,且在 900 m 的窗口尺寸下,类型集聚或连续所产生的分布状态的可能性均较少,最终仍会以斑块数量占比作为其主要呈现结果,即 PLAND 能集中反映周边环境城市形态空间格局特征,对于其他指标具有一定的替代性,因此研究仅保留了 PLAND 和景观尺度的 SHEI 作为城市形态空间格局的量化指标。

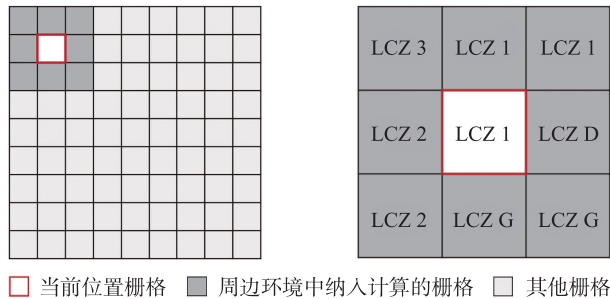


图 5 空间格局指标计算窗口单元图示

Fig. 5 Illustration of the calculation window unit of spatial pattern indicators

2.5 回归模型分析

研究首先通过经典线性回归模型计算了各空间格局指标对城市热环境的影响,并采用 VIF(方差膨胀因子)检验变量间存在的多重共线性. 结果显示,当 PLAND\_D 变量存在时,回归模型存在多重共线性. 故将其剔除后重新构建模型,自变量 VIF 值均小于 2,说明改进后模型自变量之间彼此独立,不存在显著的多重共线性.

对于所构建的经典线性回归模型,春、夏、秋、冬 4 个季节模型的解释系数  $R^2$  分别为 0.688、0.625、0.445、0.289,其中春、夏季模型拟合优度最佳,说明在该季节中所选的空间格局变量对 UHII 具有较高的影响,而在冬季影响则相对较弱. 在此基础上,莫兰指数(Moran' I)被用于计算经典线性模型中残差的空间相关性,在 4 个季节的模型中该指标值均大于 0.25,说明模型存在空间依赖性,需要引入空间回归模型对其关联性进行解释.

为了确定具体空间回归模型的选择,研究采用拉格朗日乘数法(LM 和 R-LM)对模型进行检验,比较了空间滞后模型和空间误差模型的检验统计量和显著性. 结果显示,两者 LM 检验结果均高度显著,而进一步比较 R-LM 值,其中空间滞后模型所对应的 R-LM 值,在春、夏、秋 3 个季节的模型中均大于空间误差模型所对应的值,因此最终选择了空间滞后模型进行分析,回归结果如表 1 所示.

从表 1 中可以对模型结果进行定量解读. 在空间滞后模型中,春、夏、秋、冬 4 个季节模型解释系数  $R^2$  分别为 0.778、0.727、0.629、0.460,相比于线性回归模型,分别有 0.090、0.102、0.184、0.171 的提升,且 AIC(赤池信息量准则)和 SC(施瓦兹准则)相对更小,说明加入了空间变量后模型能够具有更好的拟合优度,是一种更为科学合理的解释模型. 在模型中,空间滞后回归系数  $\rho$  均显著且为正值,说明 UHII 受到了周边区域强度明显的正向影响. 此外通过比较不同季节的  $R^2$  可以发现,城市形态空间格局对 UHII 的影响程度依然是春季>夏季>秋季>冬季,这一结果与经典线性回归模型的结果相同,说明该规律较为稳定.

表 1 回归模型结果  
Table 1 Results of the regression models

因变量	经典线性回归模型				空间滞后模型				空间误差模型			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
PLAND_1	0.020 **	0.130 **	-0.085 **	-0.201 **	0.002	0.045 **	-0.039 **	-0.093 **	0.028 **	0.125 **	-0.049 **	-0.170 **
PLAND_2	0.086 **	0.227 **	-0.021 **	-0.183 **	0.032 **	0.088 **	-0.006	-0.073 **	0.080 **	0.204 **	0.002	-0.144 **
PLAND_3	0.069 **	0.163 **	0.074 **	-0.035 **	0.024 **	0.065 **	0.025 **	-0.015 **	0.040 **	0.105 **	0.033 **	-0.040 **
PLAND_8	0.221 **	0.377 **	0.277 **	0.067 **	0.088 **	0.156 **	0.101 **	0.029 **	0.187 **	0.337 **	0.203 **	0.041 **
PLAND_A	-0.141 **	-0.116 **	-0.029 **	-0.262 **	-0.060 **	-0.049 **	-0.013 **	-0.107 **	-0.134 **	-0.129 **	-0.036 **	-0.214 **
PLAND_E	0.060 **	0.167 **	0.121 **	-0.045 **	0.027 **	0.073 **	0.049 **	-0.018 **	0.053 **	0.128 **	0.078 **	-0.032 **
PLAND_G	-0.688 **	-0.327 **	-0.504 **	-0.486 **	-0.281 **	-0.135 **	-0.182 **	-0.210 **	-0.640 **	-0.316 **	-0.459 **	-0.477 **
SHEI	0.084 **	0.092 **	0.081 **	0.064 **	0.037 **	0.036 **	0.029 **	0.032 **	0.057 **	0.059 **	0.043 **	0.043 **
$\rho$	—	—	—	—	0.638 **	0.634 **	0.684 **	0.623 **	—	—	—	—
$\lambda$	—	—	—	—	—	—	—	—	0.645 **	0.639 **	0.694 **	0.623 **
$R^2$	0.688	0.625	0.445	0.289	0.778	0.727	0.629	0.460	0.771	0.718	0.621	0.457
AIC	42 813.5	47 581.2	57 566.8	63 934.7	35 855.8	41 123.5	49 355.2	58 538.9	36 731.1	41 978.6	49 922.9	58 677.7
SC	42 886.9	47 654.5	57 640.2	64 008.0	35 937.3	41 205.0	49 436.7	58 620.4	36 804.4	42 052.0	49 996.2	58 751.1
LM	—	—	—	—	10 428.6	9 515.0	13 392.0	8 101.7	10 233.7	8 991.4	12 943.8	8 233.5
R-LM	—	—	—	—	679.6	749.0	617.8	64.8	484.7	255.4	169.5	196.6

注:(1)表中系数均为标准化回归系数;(2) \*\* 为 0.01 水平显著, \* 为 0.05 水平显著.

进一步比较各因变量的标准化回归系数,PLAND\_8 的标准化回归系数分别为 0.088、0.156、0.101、0.029,与 UHII 在 4 个季节中均呈正相关,且是其余正相关变量的平均 2 倍以上,这说明该变量所代表的 LCZ 8 的数量占比将会严重影响城市热环境,该类型在周边环境中的数量占比越大,将会导致越高的 UHII. 这是由于 LCZ 8 具有较高的人为热排放和不透水表面比例,受其影响将会造成周边地表温度的持续性升高.

PLAND\_3 和 PLAND\_E 相对次之,其标准化回归系数分别为 0.024、0.065、0.025、-0.015 和 0.027、0.073、0.049、-0.018,总体呈现出与 UHII 的正相关趋势,但在冬季出现了小幅度的负相关,说明其代表的 LCZ 3 和 LCZ E 在周边环境中的数量占比较大时,对城市热环境也将具有一定的升温作用. 在这两类 LCZ



类型中,均缺少树木或建筑等地表覆盖物的遮挡,在日间上午太阳直接辐射更容易到达开阔的地面,地表温度快速上升,导致其同样成为热源,对城市热环境起到升温作用。但这一特性在冬季并不显著,可能是由于太阳辐射量与作用时间共同的减少和太阳高度角的降低减缓了这一升温过程。

PLAND\_1 和 PLAND\_2 对城市热环境的影响具有显著的季节差异性,在春、夏季,其标准化回归系数分别为 0.002、0.045 和 0.032、0.088,与 UHII 呈正相关,对城市热环境体现出明显的升温作用,其中 PLAND\_2 的影响程度大于 PLAND\_3 和 PLAND\_E。一方面,此两种指标所对应的 LCZ 1 和 LCZ 2 具有更高的开发强度,从而造成更剧烈的城市下垫面热力特性的改变和人为热排放的增加,当周边环境此类型占比较大时,将会导致出现明显热源而影响城市热环境;另一方面,此两种类型的地表粗糙度也均高于其他形态类型,对城市通风具有明显限制作用,密集的城市建筑群将使得建成区中的风速显著降低,外部冷却新风难以进入城市,城市内部热量也不易排出,从而加剧城市热岛效应。而在秋、冬两季,PLAND\_1 和 PLAND\_2 的标准化回归系数分别为-0.039、-0.093 和 -0.006、-0.073,与 UHII 呈负相关。初步推测可能由于高耸的街谷形态阻挡了光线的进入,且中高层建筑具有较高的蓄热能力,从而导致地表温度上升迟缓,致使其成为城市冷源而对城市热环境起到一定的降温作用<sup>[24]</sup>,同时建筑群对盛行风的扰动所产生的湍流也在一定程度上改善了局地热环境<sup>[25]</sup>。但这种现象将会是暂时性的,相关数据<sup>[24]</sup>表明,随着时间推移,中高层建筑最终仍会成为热源而非冷岛。由于其内部存在的作用机制较为复杂,对其影响机理还有待进一步的探究。

PLAND\_A 和 PLAND\_G 与 UHII 均呈负相关,其标准化回归系数分别为-0.060、-0.049、-0.013、-0.107 和-0.281、-0.135、-0.182、-0.210。上述结果表明,城市蓝绿空间(LCZ A、LCZ G)在周边环境中的占比越大,将会越有利于周边环境降温,这是由于此类型具有较高的吸热蓄热能力,对城市气候具有重要的调节作用,更多相关研究也提出了相似的观点<sup>[26-27]</sup>。其中 PLAND\_G 的回归系数在 4 个季节中均大于 PLAND\_A,且是后者的平均 3 倍以上,这说明了 LCZ G 在周边环境中的数量占比对城市热环境的降温作用显著高于 LCZ A,是缓解城市热岛效应的最主要的支撑。

景观尺度的变量同样对 UHII 存在一定影响,SHEI 代表了移动窗口范围内整体城市形态的多样性和均匀度,其标准化回归系数为 0.037、0.036、0.029、0.032,与 UHII 均呈正相关。说明在栅格周边邻接 900 m 范围内的城市形态分布越均匀,其所对应的 UHII 就越强。这同时也意味着在一定范围内由单一形态主导的空间格局将带来更低的 UHII。

## 2.6 南京市形态格局分区类型

研究从关联性的角度出发,采用了 K-Means 聚类分析算法,以回归模型中的空间格局指标为变量、组内平方和为簇个数的选择依据,将研究区域共划分为 9 类分区类型(图 6)。

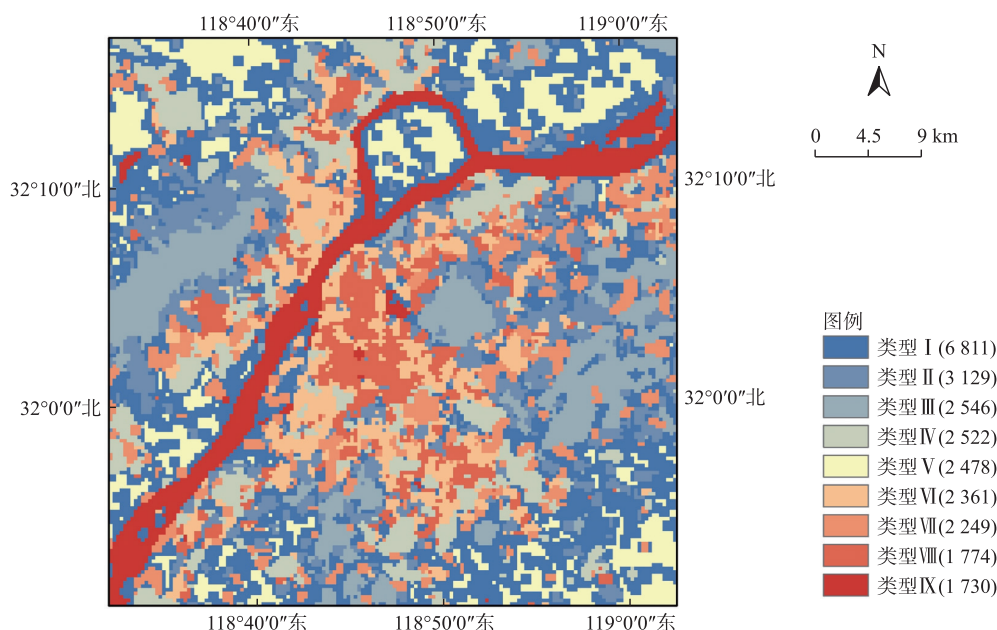


图 6 不同分区类型的空间分布和数量

Fig. 6 Spatial distribution and count of different zoning types



结合 LCZ 类型构成和 UHII 特征,可以看出,由自然环境主导的分区类型包括了类型 I、Ⅲ、V、IX、Ⅶ。在类型 I、V 中 LCZ D 均占主导地位,不同之处在于类型 I 靠近城市边缘,具有相对复杂的组成结构和周边环境;类型 V 则完全由单一类型主导,分布在城市远郊。而类型Ⅶ虽也包含了较高比例的 LCZ D,但同时 LCZ E 比例也较高,由两者共同主导。比较 UHII 可以发现,前两者未形成显著的热、冷岛,而类型Ⅶ的热岛特性则在春、夏季节较为明显,初步认为不透水表面比例的相对上升和缺少植被对太阳辐射的吸收是产生差异的主要原因。类型Ⅲ主要是由城市远郊的树林(LCZ A)组成,类型 IX 以城市中的大型水体(LCZ G)为主,两者 UHII 均呈现明显负值,是城市中需要进行保护的重要冷源。

由建成环境主导的分区类型则包括了类型Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ、Ⅷ。其中,类型Ⅱ主要包括了 LCZ 3、LCZ A 和 LCZ D 等,可以将其视作是城市外围的乡村及其周边区域,其热岛效应相对较弱。类型Ⅳ主要为 LCZ 8 构成的城市工厂及其周边区域,高强度的人为热排放和不透水表面比例使其具有最高的 UHII。而类型Ⅵ和类型Ⅷ的组成则较为混合,包括了 LCZ 1、LCZ 2、LCZ 8 等多种形态类型。但不同之处在于,类型Ⅷ位于城市建成区的中心区域,以 LCZ 2 为主,在春、夏季热岛效应更强;而类型Ⅵ则围绕城市中心区呈扩散式分布,包括了 LCZ 1 和 LCZ 2 等形态,且其自然环境的格局指标较高,热岛效应相对较弱。

针对上述类型,研究认为在未来的城市规划中应采用差异化的手段进行调控。对于分布在城市中心区域且热岛效应显著的类型Ⅷ和强热岛区域类型Ⅳ是需要被重点关注的对象,应采用强有力的针对性管控方式以调节局地微气候,对于其他区域则可采用适应性的城市设计策略以缓解其热负荷。而对于主要的冷源类型Ⅲ、IX,则应当加以保护,并通过构建通风廊道等手段将其洁净新风引入到城市内部以改善热环境。

### 3 结论与展望

研究主要得到的结论如下:(1)空间滞后模型对于解释城市形态空间格局与城市热环境的关联性具有较好的解释效果。模型中空间滞后回归系数  $\rho$  均显著且为正值,说明城市热岛强度(UHII)受到周边区域强度的正向影响。(2)比较不同季节模型  $R^2$ ,城市形态空间格局对 UHII 的影响排序为春季>夏季>秋季>冬季,主要在春、夏两季城市热环境受到城市形态空间格局的影响较大。(3)所有的建成环境形态类型和 LCZ E 在周边环境中的空间格局均会对城市热环境产生显著的正向升温影响,其中 LCZ 8 的数量占比的影响程度最大,其次为 LCZ 2、LCZ 3 和 LCZ E 等。而在自然环境形态类型中,LCZ A 和 LCZ G 在周边环境中的数量占比与 UHII 呈负相关,多有利于降温,其中 LCZ G 具有更强的降温能力。(4)从整体布局上看,在周边由单一形态主导的空间格局将有助于带来更低的 UHII。(5)以空间格局指标为依据,可以将研究区域分为 9 类具有相似形态组成结构和周边环境特征的分区类型。不同分区的热环境属性存在差异,应采取差异化的手段对其进行调控。研究结论证明了城市形态空间格局与城市热环境之间存在紧密的关联,对城市未来可持续发展具有一定的参考价值。

同时,研究也存在一定的不足之处,在未来可以在以下方面展开探索:(1)受到遥感数据源的限制,本研究所分析的城市热环境仅仅局限于日间上午,而无法体现其单日变化,未来研究可以结合更高时间分辨率的数据源(如中尺度天气预报模式、高分卫星等),以进一步提升研究结果的可信性与稳定性。(2)本研究仅分析了城市形态空间格局与城市热环境的关联性,但其作用机制尚不明细,有待后续通过建立理想模型深入研究。(3)受到高分影像的限制,本研究的城市形态模型构建仅考虑了夏季的情况,而忽略了部分类型因植被变化所产生的季节性差异,未来可以对这一特性开展精细化的分析。(4)从应用层面看,结论的落地性尚且不足,针对每种分区类型有待建构可实施性更强的城市设计策略。

#### [参考文献]

- [1] OKE T R, MILLS G, CHRISTEN A, et al. Urban climates[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [2] 朱荣鑫, 赵乃妮, 王清勤, 等. 城市热岛效应对我国不同气候区既有居住建筑采暖空调能耗的影响研究[J]. 南方建筑, 2020(5): 16-20.
- [3] 范晨璟, 田莉, 李经纬. 城市形态对空气质量影响研究的国内外进展[J]. 城市发展研究, 2017, 24(12): 92-100.

- [4] 聂敬娣,张俊华,黄波. 城市热岛效应对人体健康影响研究综述[J]. 生态科学,2021,40(1):200-208.
- [5] 杨峰,钱锋,刘少瑜. 高层居住区规划设计策略的室外热环境效应实测和数值模拟评估[J]. 建筑科学,2013,29(12):28-34,92.
- [6] 毛齐正,马克明,邬建国,等. 城市生物多样性分布格局研究进展[J]. 生态学报,2013,33(4):1051-1064.
- [7] 尚正永. 城市空间形态演变的多尺度研究——以江苏省淮安市为例[D]. 南京:南京师范大学,2011.
- [8] 刘新,刘寿东,赵小艳,等. 南京城市化进程与热岛效应的初步研究[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(12):1543-1549.
- [9] 王耀斌,赵永华,韩磊,等. 西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2621-2628.
- [10] 邹婧,曾辉. 城市地表热环境与景观格局的关系——以深圳市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2017,53(3):436-444.
- [11] 谢启姣,段吕晗,汪正祥. 夏季城市景观格局对热场空间分布的影响——以武汉为例[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(8):1735-1744.
- [12] 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.
- [13] 刘敬,慎利,黄媛,等. 基于局地气候分区的北京夜间热岛强度空间分异特征研究[J]. 地理与地理信息科学,2020,36(5):39-45,64.
- [14] 沈中健,曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究[J]. 地理科学,2020,40(5):842-852.
- [15] GUO J, HAN G, XIE Y, et al. Exploring the relationships between urban spatial form factors and land surface temperature in mountainous area: a case study in Chongqing City, China[J]. Sustainable cities and society, 2020, 61: 102286.
- [16] 何强弟,梁栋栋. 基于城市几何形态的城市热岛模拟——以上海市市长宁区和黄浦区为例[J]. 现代城市研究,2020(8):98-103.
- [17] 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.
- [18] BECHTEL B, ALEXANDER P J, BECK C, et al. Generating WUDAPT Level 0 data-current status of production and evaluation[J]. Urban climate, 2019, 27:24-45.
- [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.
- [20] 杨宇,肖映辉,詹庆明,等. 城市土地利用格局与PM2.5浓度的空间关联研究:以京津冀城市群为例[J]. 城市与区域规划研究,2020,12(2):151-164.
- [21] 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.
- [22] 姚晨阳. 夏热冬冷地区城市局部气候分区划分的网格尺寸的合理性研究[D]. 南京:南京大学,2017.
- [23] 杨鹏,高祺,张艳品,等. 基于Fragstats4的景观格局指数与地表温度的相关性——以石家庄市为例[J]. 气象科技,2021,49(3):464-474.
- [24] 晏海,曾凤,董丽. 北京城市局地空气温度时空变化特征分析[J]. 生态环境学报,2017,26(5):816-823.
- [25] WANG M, XU H. The impact of building height on urban thermal environment in summer: a case study of Chinese megacities[J]. Plos one, 2021, 16(4): e0247786.
- [26] 杜红玉. 特大型城市“蓝绿空间”冷岛效应及其影响因素研究[D]. 上海:华东师范大学,2018.
- [27] WANG Y, ZHAN Q, OUYANG W. How to quantify the relationship between spatial distribution of urban waterbodies and land surface temperature? [J]. Science of the total environment, 2019, 671:1-9.

[责任编辑:丁 蓉]