

# 基于遥感影像的城市建筑空间分布格局对热环境的影响研究——以济南市中心城区为例

王竹依<sup>1</sup>, 樊彦国<sup>1\*</sup>, 单宝艳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580;

<sup>2</sup>山东建筑大学测绘地理信息学院, 山东 济南 250101

**摘要** 针对城市热环境研究中研究尺度选择不足、研究维度不全面导致研究结论与实际情况有差异的问题,提出一种定量分析和研究城市建筑空间分布格局与城市热环境相关性的方法。首先基于 Landsat8 遥感影像提取研究区的地表温度(LST),构建研究区城市建筑空间分布格局定量表达体系,然后利用相关分析(CA)和双变量局部空间自相关分析(BLSAA)方法探究 1 km 和 2 km 尺度下城市建筑空间分布格局对热环境的影响。所提方法对济南市中心城区热环境的研究结果表明:一、二、三维城市空间结构指标对研究尺度变化非常敏感,且一、三维城市空间结构指标尤其敏感;1 km 尺度下的研究结果置信度比 2 km 尺度高;一、二、三维城市空间结构指标对城市热环境的影响主要为正相关,且正相关指标的个数随维度增长而递增;相比于二维城市空间结构指标,一、三维城市空间结构指标与城市热环境的相关程度较大。

**关键词** 遥感影像; 城市建筑空间分布格局; 相关分析; 双变量局部空间自相关分析; 热环境; 济南市

中图分类号 TP79

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212721

## Impact of Urban Building Spatial Distribution Pattern on Thermal Environment Based on Remote Sensing Images: A Case of Jinan City Center

Wang Zhuyi<sup>1</sup>, Fan Yanguo<sup>1\*</sup>, Shan Baoyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China;

<sup>2</sup>School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China

**Abstract** Aiming at the challenges of difference between the research conclusion and actual situation resulting from inadequate selection of research scale and incomplete research dimension in the study of the urban thermal environment, an approach of quantitative analysis for the correlation between urban building spatial distribution pattern and urban thermal environment is suggested. First, from Landsat8 remote sensing images, the land surface temperature (LST) in the research area is extracted. Then, the quantitative expression system of urban building spatial distribution pattern in the research area is built. Next, correlation analysis (CA) and bivariate local spatial autocorrelation analysis (BLSAA) are employed to investigate the effect of urban building spatial distribution patterns on the thermal environment at 1- and 2-km scales. The investigation findings of the suggested approach to the thermal environment of the central urban area of Jinan demonstrate that one-, two-, and three-dimensional urban spatial structure indicators are sensitive to the change in research scale; one- and three-dimensional urban spatial structure indicators are extremely sensitive. The confidence of investigation findings on the 1-km scale is higher than that on the 2-km scale. The one-, two-, and three-dimensional urban spatial structure indicators' effect on the urban thermal environment is a primarily positive correlation, and the number of positive correlation indicators increases with the increase in dimension. The two- and three-dimensional urban spatial structure indicators have a greater correlation with the urban thermal environment compared with the one-dimensional urban spatial structure indicator.

**Key words** remote sensing image; urban building spatial distribution pattern; correlation analysis; bivariate local spatial autocorrelation analysis; thermal environment; Jinan city

收稿日期: 2021-10-13; 修回日期: 2021-11-17; 录用日期: 2021-11-29; 网络首发日期: 2021-12-10

基金项目: 山东省重点研发计划(2019GHY112017)

通信作者: \*fanyanguo2003@163.com

# 1 引言

2000 年以来,我国的城市化进入了快速发展阶段,城市化进程的快速推进与热环境之间的矛盾日益突出,甚至上升到国家安全层面<sup>[1]</sup>。城市热环境是指城市地表热量在自然环境和人工环境共同作用下形成的空间。因此,植被覆盖程度、城市空间形态、建筑材料的热传导性能及人工热源等因素对城市热环境的影响十分显著<sup>[2-3]</sup>。对于敏感人群,城市热环境的恶化会导致他们循环系统、呼吸系统、心脑血管等方面疾病的频发<sup>[4]</sup>,而对于人类赖以生存的生态环境,城市热环境的形成会导致空气质量明显下降<sup>[5-6]</sup>、生态环境质量快速恶化<sup>[7]</sup>,从而严重威胁城市居民的健康和居住环境。因此,分析城市建筑空间分布格局对热环境的影响具有重要的理论和现实意义。

对于城市建筑分布格局对热环境的影响,国内外学者提出了大量研究方法和理论,可归结为三类:一是通过分类比较的方法,即对研究区按照不同依据进行分类,如按照土地覆盖指标、建筑物物理形态、城市空间形态<sup>[8-12]</sup>进行分类,分类后进行各区域的分类依据与城市热环境效应的相关性分析;二是利用统计分析的方法,即通过相关分析、回归分析等统计学方法进行分析,如选取不透水面覆盖面积比例、建筑布局 and 建筑密度、建筑空间分布的三维形态结构指标<sup>[13-15]</sup>等作为影响因素,研究它们与城市热环境效应的关联;三是建立相关模型的方法,既可以对城市热环境建立仿真模型<sup>[16]</sup>,也可以通过相关模型验证城市建筑物理形态对热环境的影响<sup>[17]</sup>。

随着传感器与计算机技术的飞速发展<sup>[18-20]</sup>,将遥感和地理信息分析技术应用于城市热场的研究方法越来越多元化,研究涉及的范围越来越宽泛。但是当前关于对城市热环境的影响因素的研究仍存在许多问题,如随着城市的发展,城市的建筑物不断更新,且关于城市热环境的研究多基于二维空间,多集中在城市热环境现状与演变规律方面,关于城市建筑空间分布格局与城市热环境之间的关系方面的研究却较少涉及<sup>[21-22]</sup>。本研究以济南市中心城区作为研究区,济南市位于山东省中西部,为山东省的省会,近年来经济高速发展。济南市夏季温度高,高温持续时间长,地势南高北低,东西长南北窄,城市建筑呈东西分布,特点明显,对研究城市热场具有代表性。

鉴于此,本文基于城市热环境研究现状与演变规律,提出了建立多维度城市建筑空间分布格局定量表达体系的发展构想,并利用 Landsat8 卫星获取的遥感影像提取济南市中心城区地表温度(LST)。然后,基于多种空间尺度,采用相关分析方法研究城市建筑空间分布格局对城市地表温度的影响,采用局部空间自相关分析方法研究城市地表温度与周边建筑分布格局

的空间相关性,为济南市空间规划提供参考依据。

# 2 数据来源与研究方法

## 2.1 数据源

以济南市中心城区(槐荫区、天桥区、市中区、历下区、历城区)为研究区,所使用的数据主要包括 Landsat8 影像、建筑数据和数字高程模型(DEM),其中遥感影像数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。选取了 4 期 Landsat8 影像,行/列号为 122/35,日期为 2013-07-24、2014-07-27、2017-07-03 和 2017-08-04。济南市每年从 6 月开始,气温呈现持续上升的趋势,高温期主要持续在 7 月至 9 月,此时城市热岛效应相对显著,因此优先选择 6 月至 9 月的影像数据作为数据来源。所选影像研究区内基本无云层覆盖,地表温度反演效果最佳。建筑数据来源于百度大数据,是包括建筑面积和建筑高度信息的矢量数据。DEM 来源于 Google Earth,空间分辨率为 9.55 m。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 LST 反演模型

选用大气校正法进行研究区的 LST 反演,该方法需要先预估地表热辐射受大气的影 响程度,再利用卫星传感器获得的总热辐射量数据减去受大气影响的地表热辐射量,即可得到地表热辐射量,对其进行转换,得到 LST<sup>[13]</sup>。辐射传输方程可以描述为

$$L_{\text{sensor}} = \tau[\epsilon B + (1 - \epsilon)L_{\downarrow}] + L_{\uparrow}, \quad (1)$$

式中: $L_{\text{sensor}}$ 为卫星传感器接收的热红外辐射亮度值; $\tau$ 为大气在热红外波段的透过率; $\epsilon$ 为地表比辐射率; $B$ 为黑体热辐射亮度; $L_{\downarrow}$ 为大气向下辐射到达地面后反射的能量; $L_{\uparrow}$ 为大气向上辐射亮度。 $\tau$ 、 $L_{\uparrow}$ 和  $L_{\downarrow}$ 数据源于 NASA(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)。转换式(1),得黑体辐射亮度  $B$ ,公式为

$$B = [L_{\text{sensor}} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \epsilon)L_{\downarrow}] / \tau\epsilon. \quad (2)$$

利用普朗克函数可以得到地表真实温度,公式为

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B + 1], \quad (3)$$

式中: $T_s$ 为地表真实温度,单位为 K; $K_1$ 、 $K_2$ 为定标参数,存储在\*\_MTL.txt 元数据文件中。

### 2.2.2 城市建筑空间分布格局定量表达体系

城市建筑是城市空间形态的重要组成部分,而城市的空间形态与城市的微气候息息相关。因此,本研究构建了城市建筑空间分布格局定量表达体系,该体系从三个维度出发进行构建。一维城市建筑空间分布格局定量表达指标是有关高度的指标,二维城市建筑空间分布格局定量表达指标是有关平面的指标,三维城市建筑空间分布格局定量表达指标是有关空间的指标。其中一维城市建筑空间分布格局定量表达指标是有关地形高程、建筑物高度、建筑物绝对高度的相关指标,具体如表 1 所示。

表 1 一维城市建筑空间分布格局定量表达指标

Table 1 Quantitative expression index of one-dimensional urban building spatial distribution pattern

Indicator name	Calculation formula	Meaning
Average DEM ( $E$ )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$	It reflects the elevation level in the region. The higher the value, the higher the terrain.
DEM standard deviation ( $E_s$ )	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - E)^2}$	It reflects the state of topographic relief in the region. The greater the value, the greater the topographic relief.
Average building height ( $H$ )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$	It reflects the average height of buildings in the region. The higher the value, the higher the height of buildings generally.
Standard deviation of building height ( $H_s$ )	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - H)^2}$	It reflects the difference degree of building height in the region. The greater the value, the greater the building height difference.
Average absolute height of buildings ( $H_{ab}$ )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i + H_i)$	It reflects the average elevation level of the top of buildings in the region. The higher the value, the higher the elevation of the top of buildings.
Standard deviation of absolute height of buildings ( $H_{abs}$ )	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i + H_i - H_{ab})^2}$	It reflects the height fluctuation degree of the building top in the region. The greater the value, the greater the elevation difference of the building top.

Notes:  $E_i$  is the elevation value in the DEM of the  $i$ th building;  $H_i$  is the height of the  $i$ th building

建筑数据包含建筑基底面积、建筑平面分布、建筑物间距等二维平面信息,基于此类信息构建二维城市建筑空间分布格局定量表达指标,这指标是有关建筑

基底面积、建筑密度、户外活动面积比、建筑集聚度的相关指标,具体如表 2 所示。

表 2 二维城市建筑空间分布格局定量表达指标

Table 2 Quantitative expression index of two-dimensional urban building spatial distribution pattern

Indicator name	Calculation formula	Meaning
Average value of building base area ( $A_{jd}$ )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{jdi}$	It reflects the average level of building base area in the region. The larger the value, the larger the building base area generally.
Standard deviation of building base area ( $A_{jds}$ )	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{jdi} - A_{jd})^2}$	It reflects the dispersion degree of building base area in the region. The greater the value, the greater the difference between the base area values of different buildings.
Total building base area ( $A_{jdz}$ )	$\sum_{i=1}^n A_{jdi}$	It reflects the amount of building land in the land use in the region. The greater the value, the more building land.
Building density ( $D_{bd}$ )	$A_{jdz}/A_{rea}$	It reflects the density of buildings in the region. The greater the value, the denser the buildings, and the greater the degree of land use.
Outdoor activity area ratio ( $R_{out}$ )	$(A_{rea} - A_{jdz})/A_{rea}$	It reflects the level of outdoor activity range in the region. The greater the value, the greater the outdoor activity range and the greater the land development potential.
Building distribution agglomeration ( $C_{lst}$ )	$\min \{L_{jzi}\}$	It reflects the aggregation degree of building distribution in the region. The greater the value, the greater the spacing of buildings and the sparse distribution of buildings.

Notes:  $A_{jdi}$  is the base area of the  $i$ th building;  $A_{rea}$  is the grid area of the study scale;  $L_{jzi}$  is the distance between two adjacent buildings

建筑数据包含建筑高度、建筑层数等三维空间信息,基于此类信息构建三维城市建筑空间分布格局定量表达指标,这指标是有关建筑体积、占空比和容积率的相关指标,具体如表 3 所示。

### 2.2.3 相关分析

相关分析(CA)可用于测定要素间的密切程度,揭示要素之间的相互关系。本研究采用 Pearson 相关系数分析法<sup>[23]</sup>进行城市建筑空间分布格局定量表达指标与城市热环境相关性的分析,计算公式为

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

式中: $R_{xy}$ 为要素  $x$  与要素  $y$  之间的相关系数; $x_i$ 为要素  $x$  的样本值; $y_i$ 为要素  $y$  的样本值; $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别表示要素  $x$  与要素  $y$  的样本值的平均值。相关系数  $R_{xy}$  的值介于  $[-1, 1]$ , 当  $R_{xy} > 0$ , 为正相关, 当  $R_{xy} < 0$ , 为负相关;



表 3 三维城市建筑空间分布格局定量表达指标

Table 3 Quantitative expression index of three-dimensional urban building spatial distribution pattern

Indicator name	Calculation formula	Meaning
Average building volume ( $V_{\text{build}}$ )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{\text{jd}} \times H_i)$	It reflects the size of the volume of a single building in the region. The larger the value, the larger the volume of a single building.
Standard deviation of building volume ( $V_{\text{bs}}$ )	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{\text{jd}} \times H_i - V_{\text{build}})^2}$	It reflects the size of building volume difference in the area. The larger the value, the greater the size difference of different buildings.
Floor area ratio ( $R_{\text{FA}}$ )	$\frac{A_{\text{jd}} \times H \times A_{\text{rea}}}{3}$	It reflects the intensity of land use in the region. The smaller the value, the smaller the intensity of land use and the better the living comfort.
Duty cycle ( $R_{\text{du}}$ )	$V_{\text{jz}} / [\max \{H_i\} \times A_{\text{rea}}]$	It reflects the spatial utilization degree in the region. The larger the value, the higher the spatial utilization rate and the higher the development degree.

Notes:  $V_{\text{jz}}$  is the total volume of the building

$|R_{xy}|$  越大, 相关程度越大,  $|R_{xy}|$  越小, 相关程度越小。每两个变量之间相关系数的置信度用  $P$  表示, 本研究取  $P=0.05$ , 当  $P<0.05$ , 为通过相关系数检验, 当  $P>0.05$ , 为未通过相关系数检验。

### 2.2.4 双变量局部空间自相关分析

双变量局部空间自相关分析(BLSAA)可用于探究空间中两要素的密切程度, 揭示某要素的分布与另一邻近要素之间的相互关系。本研究采用 Anselin<sup>[24]</sup>提出的双变量局部空间自相关分析, 探究周围格网的城市建筑空间分布格局定量表达指标与中心格网热环境的局部空间的相互关系, 如图 1 所示, 其计算公式为

$$I_{kl}^i = z_k^i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_l^j, \quad (5)$$

式中:  $w_{ij}$  为空间单元  $i, j$  之间的空间连接矩阵;  $z_k^i = \frac{x_k^i - \bar{x}_k}{\sigma_k}$ ,  $z_l^i = \frac{x_l^i - \bar{x}_l}{\sigma_l}$ ,  $x_k^i$  是空间单元  $i$  属性  $k$  的值,  $x_l^i$  是空间单元  $i$  属性  $l$  的值;  $\bar{x}_k, \bar{x}_l$  是属性  $k, l$  的平均值;  $\sigma_k, \sigma_l$  是属性  $k, l$  的方差。

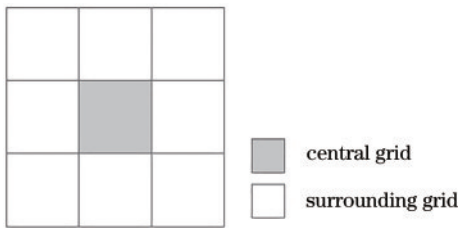


图 1 周围格网与中心格网示意图

Fig. 1 Schematic of surrounding grids and central grid

采用 Moran's  $I$  指数描述局部空间自相关性, 在 Moran's  $I$  的散点图中,  $|I|$  的值介于  $[-1, 1]$ 。当  $|I|>0$  时, 为正相关, 当  $|I|<0$  时, 为负相关;  $|I|$  越大, 局部空间自相关程度越大,  $|I|$  越小, 局部空间自相关程度越小。

## 3 结果与分析

### 3.1 济南市中心城区 LST 反演结果

根据 LST 反演方法进行 4 期遥感影像的 LST 反

演, 考虑到单期遥感影像 LST 反演结果受随机因素影响较大, 反演结果不够客观, 因而采取对 4 期遥感影像 LST 反演结果求均值的方法计算济南市中心城区夏季 LST。

济南市中心城区的中部地区(历下区、市中区、天桥区南部)建筑区域多, 建筑密度大, 人口密度大, 人类的生产生活活动多, LST 最高, 最高温度达  $45^\circ\text{C}$ ; 北部地区(天桥区、历城区北部)建筑区域相对较多, 建筑密度相对较大, 黄河流经此区域, 进行了天然的降温增湿, 因而 LST 比中部地区低; 南部区域(市中区东部、历城区南部)大部分属于济南南部山区地区, 地势较高, 植被覆盖度大, 建筑区域少, 人口数量少, 人类的生产生活活动少, 因而 LST 最低, 出现了大面积低于  $30^\circ\text{C}$  的地区。由此说明不同的城市建筑空间分布格局对城市热环境有显著不同的影响。

### 3.2 城市建筑空间分布格局对城市热环境的影响

城市建筑空间分布格局定量表达体系从不同空间维度定量表达城市建筑的空间分布, 对研究区按照不同尺度进行相关分析和双变量局部空间自相关分析, 定量分析城市建筑空间分布格局对城市热环境的影响。选择 1 km 和 2 km 尺度进行网格化分析, 此尺度为平衡人的肉眼分辨能力、数据采集工具的精度、数据的大小特征值、市区建筑的占地面积的最佳选择。

#### 3.2.1 一维城市空间结构指标对城市热环境的影响

以  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  和  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$  网格为研究单元, 分别进行一维城市空间结构指标与城市热环境的 CA 和 BLSAA, 计算其相关程度并进行显著性分析, 具体结果如图 2 所示。其中  $\blacksquare$  表示通过了 0.05 的置信度检验, 但未通过 0.01 的置信度检验;  $\blacktriangledown$  表示未通过置信水平检验; 通过了 0.01 置信度检验的指标未作标注。

从尺度为 1 km 的 CA 中可以得到:  $E_s, H_{\text{ab}}, H_{\text{abs}}$  与城市热环境呈负相关, 其余指标与城市热环境呈正相关, 所有指标均通过了 0.01 的置信度检验; 其中  $E, E_s, H_s, H_{\text{abs}}$  与城市热环境的相关程度及对城市热环境的影响显著。从尺度为 2 km 的 CA 中可以得到:  $H, H_s, H_{\text{abs}}$  与城市热环境呈显著正相关, 且通过了 0.01 的置

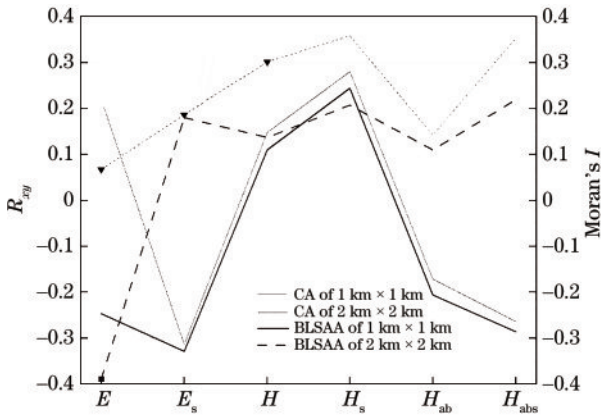


图 2 一维城市空间结构指标对城市热环境的影响  
Fig. 2 Influence of one-dimensional urban spatial structure index on urban thermal environment

信度检验;  $E$ 、 $E_s$ 、 $H_{ab}$  未通过置信水平检验, 无法确定其对城市热环境的影响。

从尺度为 1 km 的 BLSAA 中可以得到:  $H$  和  $H_s$  与城市热环境呈正相关,  $E$ 、 $E_s$ 、 $H_{ab}$ 、 $H_{abs}$  与城市热环境呈负相关, 指标均通过了 0.01 的置信度检验; 其中  $E$ 、 $E_s$ 、 $H_s$ 、 $H_{ab}$ 、 $H_{abs}$  与城市热环境的相关程度及对城市热环境的影响显著。从尺度为 2 km 的 BLSAA 中可以得到: 一维城市空间结构指标均与城市热环境呈正相关, 其中  $E$  通过了 0.05 的置信度检验, 其余指标通过了 0.01 的置信度检验;  $H_s$  和  $H_{abs}$  与城市热环境相关程度及对城市热环境的影响显著。

综合上述分析发现: 1 km 尺度下, 不同研究方法得到的结果较为统一; 2 km 尺度下, 不同研究方法得到的结果相差很大; 相比于 1 km 尺度的研究, 2 km 尺度下的研究结果置信度较低。因此, 一维城市空间结构指标对城市热环境有影响且对研究尺度敏感度较高。

### 3.2.2 二维城市空间结构指标对城市热环境的影响

二维城市空间结构指标对城市热环境影响的研究方法与一维相同, 具体结果如图 3 所示。其中 ■ 表示通

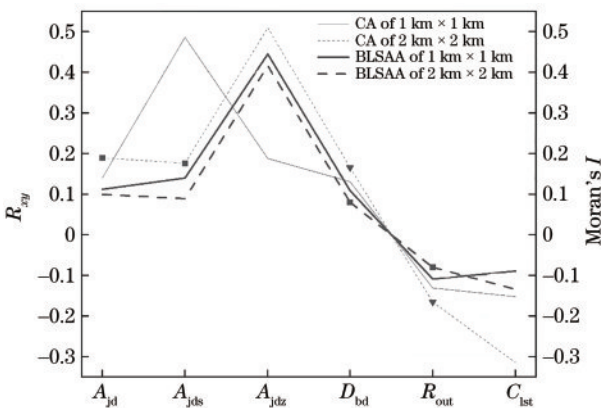


图 3 二维城市空间结构指标对城市热环境的影响  
Fig. 3 Influence of two-dimensional urban spatial structure index on urban thermal environment

过了 0.05 的置信度检验, 但未通过 0.01 的置信度检验; ▼ 表示未通过置信水平检验; 通过了 0.01 置信度检验的指标未作标注。

从尺度为 1 km 的 CA 中可以得到:  $R_{out}$  和  $C_{lst}$  与城市热环境呈负相关, 其余指标与城市热环境呈正相关, 指标均通过了 0.01 的置信度检验; 其中  $A_{jds}$  与城市热环境的相关程度及对城市热环境的影响显著。从尺度为 2 km 的 CA 中可以得到:  $C_{lst}$  与城市热环境呈负相关,  $A_{jd}$ 、 $A_{jds}$ 、 $A_{jdz}$  与城市热环境呈正相关, 其中  $C_{lst}$  和  $A_{jdz}$  通过了 0.01 的置信度检验,  $A_{jd}$  和  $A_{jds}$  通过了 0.05 的置信度检验;  $A_{jdz}$  和  $C_{lst}$  与城市热环境相关程度及对城市热环境的影响显著;  $D_{bd}$  和  $R_{out}$  未通过置信水平检验, 无法确定其对城市热环境的影响。

在进行尺度为 1 km 和 2 km 的 BLSAA 时, 得到这两种尺度下分析结果较为统一的结论。在影响程度上,  $R_{out}$  和  $C_{lst}$  与城市热环境呈负相关, 其余二维城市空间结构指标与城市热环境呈正相关, 其中  $A_{jdz}$  对城市热环境的影响显著。在置信水平上, 大部分二维城市空间结构指标通过了 0.01 的置信度检验, 只有 2 km 尺度的双变量自相关分析中  $D_{bd}$  和  $R_{out}$  通过了 0.05 的置信度检验。

综合上述分析发现: 1 km 尺度的 BLSAA 与 2 km 尺度的 CA 和 BLSAA 的结果较为统一; 1 km 尺度的 CA 与上述三个结果相差很大; 相比于 1 km 尺度的研究, 2 km 尺度下研究的结果置信度较低。因此, 二维城市空间结构指标对城市热环境影响显著且对研究尺度敏感度较高。

### 3.2.3 三维城市空间结构指标对城市热环境的影响

三维城市空间结构指标对城市热环境影响的研究方法与一维、二维相同, 具体结果如图 4 所示, 其中 ■ 表示通过了 0.05 的置信度检验, 但未通过 0.01 的置信度检验; 通过了 0.01 置信度检验的指标未作标注。

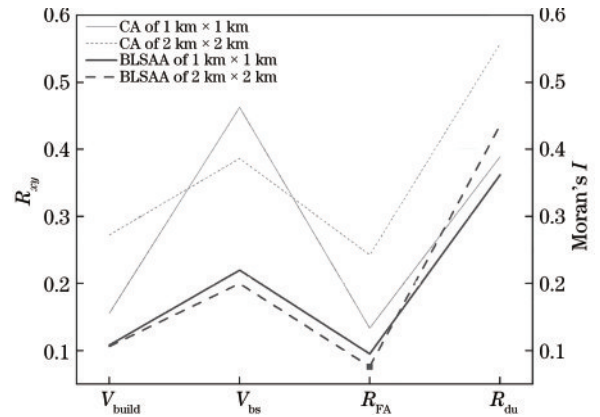


图 4 三维城市空间结构指标对城市热环境的影响  
Fig. 4 Influence of three-dimensional urban spatial structure index on urban thermal environment

从尺度为 1 km 的 CA 中可以得到: 三维城市空间结构指标与城市热环境均呈正相关, 且通过了 0.01 的

置信度检验;其中  $V_{bs}$  和  $R_{du}$  与城市热环境的相关程度及对城市热环境的影响显著。从尺度为 2 km 的 CA 中可以得到:三维城市空间结构指标与城市热环境均呈显著正相关,且通过了 0.01 的置信度检验。即相比于 1 km 尺度,2 km 尺度下三维城市空间结构指标与城市热环境相关程度更高。

从尺度为 1 km 的 BLSAA 中可以得到:三维城市空间结构指标与城市热环境均呈正相关,且通过了 0.01 的置信度检验;其中  $V_{bs}$  和  $R_{du}$  与城市热环境的相关程度及对城市热环境的影响显著。从尺度为 2 km 的 BLSAA 中可以得到:三维城市空间结构指标与城市热环境均呈显著正相关,大部分三维城市空间结构指标通过了 0.01 的置信度检验,只有  $R_{FA}$  通过了 0.05 的置信度检验;其中  $R_{du}$  与城市热环境的相关程度及对城市热环境的影响显著。

综合上述分析发现:1 km 尺度下,不同研究方法得到的结果较为统一且相关程度较大;2 km 尺度下,不同研究方法得到的结果相差很大;相比于 1 km 尺度,2 km 尺度下研究的结果置信度较低。可以得出三维城市空间结构指标对城市热环境影响显著且对研究尺度敏感度较高。

### 3.2.4 一、二、三维城市空间结构指标对城市热环境的影响

汇总 1 km 尺度和 2 km 尺度下 CA 和 BLSAA 方法研究的一、二、三维城市空间结构指标对城市热环境影响的结果,具体如图 5 所示。其中■表示通过了 0.05 的置信度检验,但未通过 0.01 的置信度检验;通过了 0.01 置信度检验的指标未作标注。

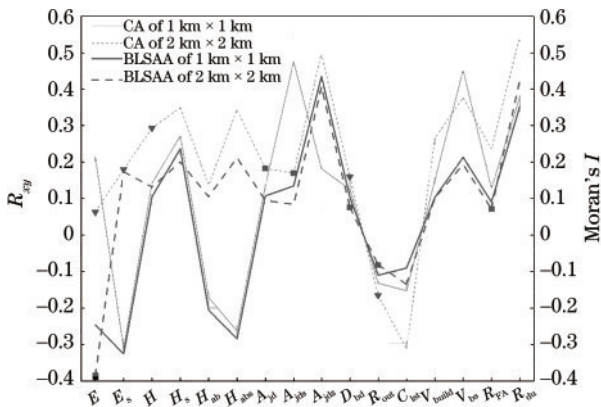


图 5 一、二、三维城市空间结构指标对城市热环境的影响  
Fig. 5 Influence of one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional urban spatial structure index on urban thermal environment

比较不同维度、不同研究尺度城市空间结构指标对城市热环境的影响程度,可以发现:在尺度为 1 km 时,一维城市空间结构指标的 CA 结果和 BLSAA 结果一致性非常高,二、三维城市空间结构指标的 CA 结果和 BLSAA 结果比较一致,仅在  $A_{jds}$ 、 $A_{jdz}$  和  $V_{bs}$  相差较

大;当研究尺度为 2 km 时,二维城市空间结构指标的 CA 结果和 BLSAA 结果一致性较高,仅在  $C_{lst}$  存在较大差距,然而该尺度下一、三维城市空间结构指标的 CA 结果和 BLSAA 结果存在显著差别。因此,一、二、三维城市空间结构指标对研究尺度变化非常敏感,且一、三维城市空间结构指标相比于二维城市空间结构指标对研究尺度变化尤其敏感。此外,在对影响程度进行置信水平检验时,可以得到不论进行 CA 还是 BLSAA,相比于 1 km 尺度的研究结果,2 km 尺度下的研究结果置信度较低的结论。

比较不同维度城市空间结构指标对城市热环境的影响程度,可以发现:一维城市空间结构指标对城市热环境的影响主要呈正相关,且相关程度相对较小;二维城市空间结构指标对城市热环境的影响很大一部分呈正相关,且相关程度相对较大;三维城市空间结构指标对城市热环境的影响呈显著正相关,且相关程度较大。

## 4 结 论

针对城市热环境研究中研究尺度选择不足、研究维度不全面导致研究结论与实际情况有差异的问题,提出一种定量分析城市建筑空间分布格局与城市热环境关系的方法。以 Landsat8 的影像为数据源,采取大气校正法提取了济南市中心城区的 LST,同时构建了一、二、三维城市建筑空间分布格局定量表达体系,对城市建筑空间分布进行定量分析。在 1 km 尺度和 2 km 尺度下,利用 CA 和 BLSAA 方法对城市建筑空间分布格局与城市热环境的关系进行系统性的研究。研究表明:一、二、三维城市空间结构指标对研究尺度变化非常敏感,且一、三维城市空间结构指标尤其敏感;1 km 尺度下研究结果的置信度比 2 km 尺度高。造成该结果的物理原因有待进一步探讨。一、二、三维城市空间结构指标对城市热环境的影响主要为正相关,且正相关指标的个数随维度增长而递增。此外,相比于二维城市空间结构指标,二、三维城市空间结构指标与城市热环境的相关程度较大。

相比以往通过统计分析的方法,所提方法对城市建筑相关因子与城市热环境的相关性进行研究,解决了以往城市热环境研究中研究尺度选择不足、研究维度不全面导致的研究结论与实际情况有差异等诸多问题,对于明确地表能量空间流动过程、缓解城市热岛效应进而对城市未来实际发展有着积极的指导意义。今后研究中,可以增加城市空间结构指标选用数量,探讨更多的城市空间结构指标与 LST 的关系。

## 参 考 文 献

[1] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 等. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 441-452.  
Yang T R, Kuang W H, Liu W D, et al. Optimizing the



- layout of eco-spatial structure in Guanzhong urban agglomeration based on the ecological security pattern[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 441-452.
- [2] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. *生态环境*, 2005, 14(4): 574-579.  
Peng S L, Zhou K, Ye Y H, et al. Research progress in urban heat island[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 574-579.
- [3] 孙仲秋, 赵云升. 基于地表偏振反射模型的植被冠层偏振反射特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 102802.  
Sun Z Q, Zhao Y S. Polarized reflectance characteristics of vegetation canopies based on polarization reflection model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 102802.
- [4] Tan J G, Zheng Y F, Tang X, et al. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54(1): 75-84.
- [5] Li M M, Wang T J, Xie M, et al. Modeling of urban heat island and its impacts on thermal circulations in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(3/4): 999-1013.
- [6] Hu Y F, Dai Z X, Guldmann J M. Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons: a boosted regression tree approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 266: 110424.
- [7] 孙喆. 高密度城区形态要素对热环境的影响作用: 以北京市五环内区域为例[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 2020-2027.  
Sun Z. Impact of urban morphology factors on thermal environment in high density urban areas: a case of Beijing within 5th ring road[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 2020-2027.
- [8] Feng X, Myint S W. Exploring the effect of neighboring land cover pattern on land surface temperature of central building objects[J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 346-354.
- [9] Zhan Q, Meng F, Xiao Y. Exploring the relationships of between land surface temperature, ground coverage ratio and building volume density in an urbanized environment [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, XL-7/W3: 255-260.
- [10] Wang J, Zhan Q M, Guo H G, et al. Characterizing the spatial dynamics of land surface temperature-impervious surface fraction relationship[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 45: 55-65.
- [11] Adachi S A, Kimura F, Kusaka H, et al. Moderation of summertime heat island phenomena via modification of the urban form in the Tokyo metropolitan area[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(8): 1886-1900.
- [12] Zhou B, Rybski D, Kropp J P. The role of city size and urban form in the surface urban heat island[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4791.
- [13] 魏雪梅, 马卫春, 孔丽. 中小城市地表温度变化与下垫面关系[J]. *遥感信息*, 2019, 34(3): 115-119.  
Wei X M, Ma W C, Kong L. Relationship between change of land surface temperature and land surface characteristics in medium and small cities[J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(3): 115-119.
- [14] Chun B, Guldmann J M. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 76-88.
- [15] Berger C, Rosentreter J, Voltersen M, et al. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193: 225-243.
- [16] Noro M, Lazzarin R. Urban heat island in Padua, Italy: simulation analysis and mitigation strategies[J]. *Urban Climate*, 2015, 14: 187-196.
- [17] Qiao Z, Xu X L, Wu F, et al. Urban ventilation network model: a case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 526-535.
- [18] Sannomiya H, Takada N, Sakaguchi T, et al. Real-time electroholography using a single spatial light modulator and a cluster of graphics-processing units connected by a gigabit Ethernet network[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(2): 020902.
- [19] Tong Z S, Liu Z T, Hu C Y, et al. Preconditioned deconvolution method for high-resolution ghost imaging [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): 1069-1077.
- [20] Zhao M T, Zhang D W, Zheng L L, et al. Rapid quantitative detection of mineral oil contamination in vegetable oil by near-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(4): 043001.
- [21] 李海峰, 李永树, 卢正. 基于 L5/L8 影像成都市热环境特征分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 032801.  
Li H F, Li Y S, Lu Z. Study on urban thermal environment of Chengdu City based on L5 and L8 images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 032801.
- [22] 周伟奇, 田韞钰. 城市三维空间形态的热环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 416-427.  
Zhou W Q, Tian Y Y. Effects of urban three-dimensional morphology on thermal environment: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 416-427.
- [23] 徐建华. 计量地理学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014.  
Xu J H. *Quantitative geography*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [24] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 2010, 27(2): 93-115.