

城市空间结构对城市热场的影响 ——以济南市夏季为例

王俊凝, 单宝艳*, 刘洋洋, 张智璇

山东建筑大学 测绘地理信息学院, 济南 250101

摘要: 建筑是城市空间结构的主要构成要素, 其在空间上的立体拓展, 不但改变着城市下垫面, 也影响着城市空间的能量平衡和空气流动, 进而对城市热场的分布产生影响。文章以济南市中心城区为研究区域, 基于 Landsat 8 遥感影像数据, 首先使用大气校正法反演城市地表温度, 以此表示城市热场, 并基于建筑、绿地和水体构建多维城市空间结构指标体系; 然后运用相关分析和双变量空间自相关方法, 基于不同空间尺度, 研究城市空间结构指标对城市热场的影响。结果表明: (1) 城市热场与大多数空间结构指标的相关性较为显著, 不同研究尺度下, 两者的相关性及空间相关性略有差异, 尺度越小, 相关性越显著。(2) 城市空间结构指标中建筑密度、建筑基底面积总和、容积率、占空比和建筑体积总和这五项指标与地表温度的正相关性最为显著, 空间正相关性也最显著, 表明城市地表温度既受到本区域该五项指标的重要影响, 也受到周边区域该五项指标的重要影响。(3) 地表温度与 DEM 标准差、建筑平均绝对高度、DEM 平均值、建筑绝对高度标准差和户外活动面积比这五项指标的负相关性最为显著, 研究区高程是影响城市地表温度的重要指标。建筑的立体分布及在平面上的延伸直接影响城市热场, 优化城市空间结构可以在一定程度上缓解城市热岛效应。

关键词: 城市空间结构; 城市热场; 相关分析; 双变量空间自相关

The influence of urban spatial structure on urban thermal field—a case study of Jinan in summer

WANG Junning, SHAN Baoyan*, LIU Yangyang, ZHANG Zhixuan

School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Architecture is the main component of urban spatial structure. Its three-dimensional expansion in space not only changes the underlying surface of the city, but also affects the energy balance and air flow of the urban space, thereby affecting the urban thermal field effect. This study mainly discusses the correlations between the surface temperature of Jinan and the urban spatial structure indicators. The central urban area of Jinan in summer was considered as the research area, and buildings were considered as the primary research objects to construct the urban spatial structure indicator system. *Materials and methods* This study used the atmospheric correction method to inverse Landsat 8 remote sensing image data, and the retrieved

收稿日期: 2021-06-22; 录用日期: 2021-09-17; 网络出版: 2021-09-30

Received Date: 2021-06-22; Accepted Date: 2021-09-17; Online first: 2021-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608309); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(12YJA790019)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (51608309); Humanities and Social Science Foundation of Ministry of Education of the People's Republic of China (12YJA790019)

通信作者: 单宝艳, E-mail: shan7066@163.com

Corresponding Author: SHAN Baoyan, E-mail: shan7066@163.com

引用格式: 王俊凝, 单宝艳, 刘洋洋, 等. 2022. 城市空间结构对城市热场的影响——以济南市夏季为例 [J]. 地球环境学报, 13(1): 100–109.

Citation: Wang J N, Shan B Y, Liu Y Y, et al. 2022. The influence of urban spatial structure on urban thermal field—a case study of Jinan in summer [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(1): 100–109.

surface temperature was used to represent the urban thermal field. A multi-dimensional urban spatial structure index system was constructed based on buildings, green spaces, and water bodies. Following this, correlation analysis and bivariate spatial autocorrelation methods were used to study the impact of spatial structure indicators on urban thermal fields at different spatial scales. **Results** The results showed that: (1) The correlations between the urban thermal field and many of the spatial structure indicators were significant. At different research scales, there were certain differences in their correlations and spatial correlations. (2) The five urban spatial structure indicators, including building density, the summation of the base area of the foundation, plot ratio, duty cycle, and the summation of the building volume, had the most significant positive correlations and spatial positive correlations with surface temperature. (3) Surface temperature had the most significant negative correlations with five indicators: the standard deviation and the average of the digital elevation model (DEM) value, the building absolute height value and its standard deviation, and the outdoor activity area ratio. **Discussion** These results suggest that the urban surface temperature was not only affected by the indicators in a region, but also by the five indicators in the surrounding area. The elevation of the study area was an important indicator that affected urban surface temperature. The correlation between the urban spatial structure and urban thermal field strongly depended on the scale of the selected spatial research unit. Their correlation was more evident at smaller research scales. The combined effect of the extension of the building on the plane and the extension of the three-dimensional space changed the urban thermal field. **Conclusions** Urban surface temperature was most affected by the five indicators of building density: the summation of the base area of the foundation, plot ratio, duty cycle, and the summation of the building volume in the area and the surrounding areas. The surface temperature increased with an increase in the values of these five indicators. The influence of elevation factors on the surface temperature was also extremely significant. The surface temperature was lower in areas with higher terrain and larger topography. This was more evident in smaller-scale spatial research units. **Recommendations and perspectives** The three-dimensional distribution characteristics of buildings and their extension on the plane would directly affect the urban thermal field, and optimizing the urban spatial structure can alleviate the urban thermal field effect to a certain extent.

Key words: urban spatial structure; urban thermal field; correlation analysis; bivariate spatial autocorrelation

随着全球城市化进程飞速提升,城市人口急剧增加,城市建筑用地短缺与人口剧增的矛盾日益显著,城市发展不仅局限于二维平面扩张,在三维空间上也不断拓展(Zheng et al, 2017; Zhou et al, 2017; 贾琦, 2018; Qian et al, 2018)。由此诸多城市生态环境问题开始显现,其中,城市热岛效应逐渐成为最明显的城市生态环境问题之一(范晨璟等, 2017)。由城市热环境、风环境等组成的城市微环境较大程度地影响着人们的生产生活和居住舒适程度。尽管目前的相关研究还无法揭示城市二维形态和三维空间形态对城市热场和微环境的具体影响程度(Srivanit and Kazunori, 2011; Chun and Guldman, 2014; Berger et al, 2017; Zheng et al, 2019),但有研究表明三维空间形态对城市热场和微环境的影响比较显著(Oke, 1981; Unger, 2004; 陈利顶等,

2013)。

关于城市形态对城市微环境影响的研究由关注城市的二维结构转向注重三维空间形态对城市生态健康的影响(周伟奇和田韞钰, 2020),通过分析城市三维空间结构研究城市微环境逐渐成为研究热点(丁沃沃等, 2012)。有学者通过分析城市主城区建筑物的二维平面面积及三维高度、体积等特征总结了对热环境影响最大的建筑物属性(曾鹏和孙宗耀, 2019)。城市景观格局在空间分布上的差异也会较大程度地影响着城市地表温度和空气环境(尹昌应等, 2015),目前与城市热场等研究相关的景观因子主要集中在植被覆盖率、人口分布、土地利用类型、水域等方面(梁益同等, 2010; 岳文泽和徐丽华, 2013)。除上述因子外,建筑物对于城市热场的影响也不容忽视。已有研究多数从建筑物的单一属性进行

研究,如建筑密度、建筑容积率、建筑高度等,但因不同空间分布特征的建筑对于城市热场的影响机制不同,影响的程度也会有较大差异。因此,基于多维度、多角度对建筑物及其三维空间分布与城市热场的关系进行研究非常必要。

目前关于城市形态(空间结构)对城市热场影响的相关研究主要采用统计分析方法,采用较多的分别是相关分析法和多元回归分析法(Scarano and Mancini, 2017; Alavipanah et al, 2018)。有学者采用多元回归分析方法发现上海城市亮温与建筑物的高度呈现负相关关系(芮建勋, 2007)。较多的研究是通过建立合适的空间三维结构指标体系,利用相关分析法探究其对城市热场的影响(Berger et al, 2017; 周伟奇和田韞钰, 2020)。而研究城市空间结构指标与其周围区域热场间相互作用的文献极少。且在城市空间结构与城市热场相关性的研究过程中,空间单元大小的选择十分重要。空间形态与热场的相关性研究结果会由于空间研究单元尺度的不同而有所差异,空间依赖性较强(Berger et al, 2017; 周伟奇和田韞钰, 2020)。空间研究单元尺度过大就会无法详细地反映城市内部的空间三维结构特征和气温的差异;若研究单元尺度过小,对于较大的建筑物而言,其空间三维结构将会被分割到多个研究单元中,无法详细地反映真实的内部结构特征。而目前的研究尚未得出最为合适的研究空间尺度(陈爱莲等, 2012)。因此,根据研究区域的实际情况选择合适的研究单元至关重要。伴随着城市建设和经济发展,济南中心城区建成区面积不断扩大,城市热岛效应逐年加剧,热岛强度数值已从 1988 年的 1.17 增加到 2014 年的 4.36(王林申等, 2019)。且中心城区建筑分布密集,随着经济中心和高新技术产业的东移,东部地区的超高层建筑逐渐增多,以济南市为例研究城市空间结构对城市热场的影响更具代表性。鉴于此,本文以济南市中心城区(天桥区、槐荫区、市中区、历下区、历城区)为研究对象,基于建筑和绿地水体共同构建城市空间结构指标体系,运用相关分析、双变量空间自相关分析等方法,基于多维度、多尺度视角,既研究城市空间结构指标对城市热场的影响,又探索城市空间结构指标对周边区域热场的影响作用,以期为城市建筑布局、城市规划与建设提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况和数据来源

本文以济南市中心城区为研究区域,包括槐荫区、市中区、历下区、历城区和天桥区,总面积约为 2094 km²。文中所用的济南市行政边界矢量数据来源于山东天地图(<http://www.sdmap.gov.cn/>),DEM 数据来源于 Google Earth,空间分辨率为 9.55 m。济南市中心城区的建筑矢量数据来源于百度大数据,共有 12 余万个建筑数据。遥感影像数据来源于美国地质勘探局官网(<https://earthexplorer.usgs.gov/>) Landsat 8 卫星获取的遥感影像,下载的遥感影像日期分别为 2017 年 6 月 1 日、2017 年 6 月 17 日、2017 年 7 月 3 日、2017 年 8 月 4 日,云量分别为 2.04%、1.55%、3.53%、19.19%。绿地和水体矢量数据通过对高分一号遥感卫星影像进行解译得到。对于济南市中心城区边界矢量数据、建筑矢量数据、绿地和水体矢量数据、DEM 数据和 Landsat 8 遥感影像数据统一采用 2000 国家大地坐标系(CGCS2000),投影坐标为 CGCS2000_3_Degree_GK_CM_117E,并以天地图矢量数据为基准进行地理配准和空间校正。

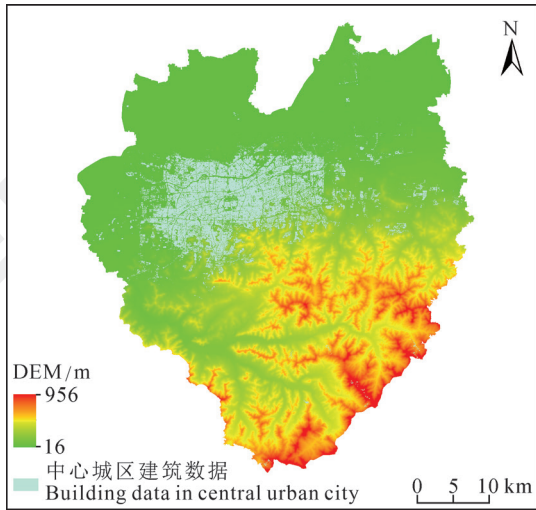
根据济南市中心城区地域面积、建筑物空间分布特点将济南市划分成两种空间单元进行研究,大尺度的空间研究单元为 2 km×2 km,小尺度的空间研究单元为 1 km×1 km,利用 ArcGIS 10.5 中的创建渔网功能实现。济南市中心城区建筑矢量数据、DEM 数据如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 城市地表温度遥感反演方法

地表温度是城市热场的重要指标,在区域气候、全球变化等研究中得到广泛应用(李召良等, 2016)。使用热红外遥感获取一个区域地表温度的时空分布是较为可行的研究手段(Li et al, 2013)。目前常用的地表温度反演方法主要有三种:大气校正法、分裂窗算法和单通道算法。其中,大气校正法是最基本的地表温度反演的方法,可适用于任何波段的热红外遥感(毛克彪等, 2007),文章选用大气校正法对济南市中心城区的地表温度进行反演。该法主要采用大气模型估计大气对于地表辐射的影响,并将此影响所观察到的大气对热辐射的吸收量以及大气自身上、下行的辐射量在卫星高度传感器所接受到的热辐射

总强度中减去, 从而得到地表的热辐射量, 并将地表热辐射量转化为地表温度。



地图矢量文件来源于山东天地图 (<http://www.sdmap.gov.cn/>), 审图号: GS(2021)3715 号 (版权: 自然资源部) 鲁 SG(2021)013 号 (版权: 山东省自然资源厅)。

图 1 研究区概况图

Fig. 1 The overview of the study region

大气校正法中, 地表温度可根据普朗克函数计算 (毛克彪等, 2007):

$$G(T_s) = \frac{[C_2 - C_1 - \tau(1 - \varepsilon)C_1]}{\tau\varepsilon} \quad (1)$$

$$T_s = B_2 / \ln[B_1 / G(T_s) + 1] - 273 \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中: ε 表示地表比辐射率, C_1 为大气向下的辐射亮度值, C_2 为大气向上的辐射亮度值, $G(T_s)$ 表示黑体的热辐射亮度, C_k 表示卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值, τ 表示大气在热红外波段中的透过率, T_s 为根据公式获取的地表温度 ($^{\circ}\text{C}$)。 B_1 和 B_2 通常在源文件中获取 (魏雪梅等, 2019), 本文所使用影像文件中 $B_1 = 774.89 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})^{-1}$, $B_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。大气上、下行辐射亮度值及透过率均可通过 NASA 大气计算器获取, 其他值均通过影像数据获取。

1.2.2 相关分析方法

相关分析方法是对要素之间的相关程度进行研究, 相关系数法是最为常用的相关分析方法之一。由于研究对象不同, 相关系数有多种定义方式, 较为常用的是皮尔逊相关系数。该相关系数主要研究变量之间的线性相关程度。皮尔逊相关系数的取值为 $[-1, 1]$, 数值趋近于 1 (或 -1), 两个因子之间线性正相关 (负相关) 程度越强,

数值趋近于 0, 表示两个因子相关性越弱。其显著性主要通过 P 值进行检验。皮尔逊相关系数计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式 (3) 中: R 为相关系数值, n 表示因子的样本数量, $\bar{x}$ 为 x 变量的平均值, $\bar{y}$ 为 y 变量的平均值。文章中 x 为城市空间结构指标, y 为由大气校正法反演得到的济南市地表温度。

1.2.3 双变量局部空间自相关法

双变量局部空间自相关是在空间自相关指数 (Moran's I 指数) 基础上提出的, 旨在解决多个变量的空间关联性问题。该方法可以对多个变量之间的空间相关性进行探究与分析, 可以揭示某个空间研究单元的一个属性与邻近的空间研究单元的另一个属性的相关程度。具体计算如下所示 (敖荣军等, 2018; 方叶林等, 2020):

$$I_{ll}^p = \frac{Y_l^p - \bar{Y}_l}{\sigma_l} \sum_{q=1}^n Z_{pq} \frac{Y_l^q - \bar{Y}_l}{\sigma_l} \quad (4)$$

式 (4) 中: I_{ll}^p 为空间单元 p 的双变量空间自相关系数, Y_l^p 表示空间单元 p 的第 l 项的属性值, Y_l^q 表示空间单元 q 的第 l 项的属性值, $\bar{Y}$ 为属性的均值, σ 为属性的方差, Z_{pq} 为基于邻接关系建立的空间单元 p 、 q 之间的权重矩阵。文章中的 Y_l^p 分别为空间单元 p 内的城市空间结构的各项量化指标属性值, Y_l^q 的数值为空间栅格 q 内的地表温度值。双变量空间自相关系数 I_{ll}^p 采用 Z 值及其对应的 P 值进行检验, $|Z|$ 为 1.96、2.58, 对应的 P 值分别为 0.05、0.01。一般当 $|Z| \geq 1.96$ 时, 两个变量的空间相关性显著。该方法可以探索各研究单元中地表温度与其周边区域城市空间结构指标的空间相关性。

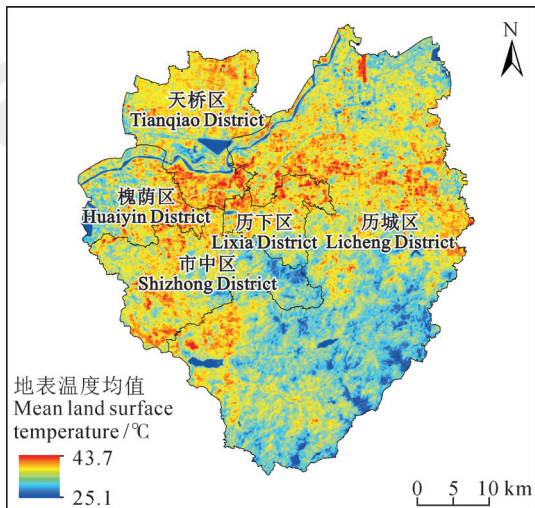
2 地表温度反演与城市空间结构指标体系构建

2.1 济南市中心城区地表温度反演

城市热场通常由城市地表温度和气温共同反映 (周伟奇和田韞钰, 2020)。气温与地表温度相互作用, 在两者的共同作用下影响着居民的日常生活及舒适程度。气温主要是通过移动或固定的气象监测仪器进行获取, 但在实际操作中, 气温获取的值通常是离散的、不连续的点数据或者线性数据, 在空间上不具有连续性。而经过大气

校正等方法反演得到的地表温度在空间上具有较强的连续性,且空间分辨率较高(陈爱莲等,2012)。因此,文章采用经过反演的地表辐射温度表示城市热场。

采用大气校正法,利用 ENVI 软件经过辐射定标、归一化植被指数计算、植被覆盖度计算、地表比辐射率计算、黑体辐射亮度的计算等步骤后得出济南市中心城区的夏季地表温度。为避免出现单次反演受云量等随机因素的影响,较真实地反映城市热场,分别选取了 2017 年 6 月 1 日、2017 年 6 月 17 日、2017 年 7 月 3 日和 2017 年 8 月 4 日的 Landsat 8 卫星遥感影像数据进行地表温度反演,并将四次反演结果进行均值计算,得出济南夏季的平均地表温度,结果如图 2 所示。



地图矢量文件来源于山东天地图 (<http://www.sdmap.gov.cn/>), 审图号: GS(2021)3715 号(版权:自然资源部)鲁 SG(2021)013 号(版权:山东省自然资源厅)。

图 2 济南市中心城区地表温度分布图

Fig. 2 Distribution map of surface temperature in the Jinan urban area

由图 2 可知:济南市中心城区夏季地表温度整体差异较大,差值约为 18.6°C 。济南市地形特征为东高西低,南高北低,历城区的中南部及市中区东部为山区,植被覆盖茂密、水域较为密集,这些地方温度较低。天桥区中部、槐荫区西部、历下区西部及历城区东北部温度较低的地方均为水域。天桥区南部、槐荫区中西部、历城区中北部、市中区中西部及整个历下区温度较高,并在此区域温度达到了最高点。除地形因素和土地利用类型差异的影响外,由图 1 和图 2 可知,建筑物的分布特征与城市热场的分布特征有着较强的

关联,建筑物越密集,地表温度越高。整体而言,济南市中心城区中心位置温度最高,南北部温度差距较大,北部地区的温度高于南部地区,东西部温度差距较小。

将反演得到的济南市中心城区平均地表温度的栅格数据,采用 ArcGIS 10.5 的栅格分析工具箱中的“以表格显示分区统计功能”,分别在 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 、 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 两种空间尺度的格网内对其求平均值,作为下一步相关性分析采用的地表温度数据。

2.2 城市空间结构指标体系

由于城市空间结构与热场的关系研究逐渐转向三维空间结构层面,城市三维空间结构的量化研究成为研究的前提和基础(Unger, 2004; Oke, 1981)。由于城市建筑物增多,较大程度改变了城市下垫面性质,加之城市建筑物在三维空间上的不断延伸和扩展打破了城市空间上的连续性(曾鹏和孙宗耀,2019),导致地表能量失衡并阻碍了城市上空的空气流动(王蕾等,2016),由此改变了城市热场的分布,使城市热岛效应进一步加剧。在济南中心城区内,城市绿地和水域面积所占的比例较高,城市绿地和水域在一定程度上影响着城市地表温度。因此,文章既选择建筑物作为主要研究对象,又结合城市绿地和水体共同表达城市三维空间结构。

三维空间结构是二维空间结构在高度上的延伸,但其并不只包括了高度信息,还包括了由高度延伸出的许多其他特征(周伟奇和田韞钰,2020)。因此文章从城市地形、建筑平面分布、立体布局、多维空间组合等方面构建城市三维空间结构指标体系,主要包括三类:一维高度指标、二维平面指标、三维空间指标。同时结合城市生态绿化指标共同表达城市三维空间结构。具体指标如表 1 所示。

以上各指标的数值获取均通过 ArcGIS 10.5 的空间分析功能实现。对于栅格数据($x1$ 、 $x2$),采用 ArcGIS 10.5 的栅格分析工具箱中的以表格显示分区统计功能,分别统计到 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 和 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 的相应格网中。对于矢量数据($x11$)采用生成近邻表功能实现;对于所有矢量数据的统计指标($x3$ — $x18$),首先采用 ArcGIS 10.5 叠加分析工具中的标识功能分别将 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 和 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 格网的 ID 号赋值给相应建筑(水体、

绿地), 然后根据建筑(水体、绿地)新 ID 号计算其面积、体积等指标。

表 1 城市空间结构指标体系
Tab. 1 Quantitative expression indicators of urban three-dimensional spatial structure

指标分类 Index classification	具体指标 Specific index
一维高度指标 One-dimensional height indicators	x1 DEM 平均值 DEM average value
	x2 DEM 标准差 Standard deviation of DEM
	x3 建筑物平均高度 Average height of buildings
	x4 建筑高度标准差 Standard deviation of building height
	x5 建筑平均绝对高度 Average absolute height of buildings
	x6 建筑绝对高度标准差 Absolute height standard deviation of buildings
二维平面指标 Two-dimensional plane indicators	x7 平均建筑基底面积 Average the base area of foundation
	x8 建筑基底面积总和 Summation of the base area of foundation
	x9 建筑基底面积标准差 Standard deviation of the base area of foundation
	x10 户外活动面积比 Outdoor activity area ratio
	x11 建筑临近距离均值 Mean distance between buildings
	x12 建筑密度 Building density
三维空间指标 Three-dimensional space indicators	x13 平均建筑体积 Average building volume
	x14 建筑体积总和 Summation of building volume
	x15 建筑体积标准差 Standard deviation of building volume
	x16 占空比 Duty cycle
	x17 容积率 Volume rate
城市绿化生态指标 Urban greening ecological indicators	x18 绿地水体的总面积 Summation of the area of green land and water bodies

3 结果与讨论

3.1 城市空间结构对城市地表温度的影响

采用皮尔逊相关系数(公式(3))研究城市空间结构指标对城市地表温度的影响。首先分别基

于 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 和 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 格网的 ID 号将城市空间结构指标与城市地表温度进行属性链接; 然后采用公式(3), 运用 MATLAB 软件计算济南市中心城区地表温度与城市空间结构指标相关系数 R , 并进行显著性检验。相关系数采用 P 值进行检验, 一般 P 值小于 0.05, 两者之间的相关性显著。具体计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知: 在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 研究单元视角和 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 研究单元视角下, 与城市地表温度呈正相关的一维高度指标有建筑高度标准差、建筑平均高度, 二维平面指标有建筑密度、建筑基底面积总和、建筑基底面积标准差、平均建筑基底面积, 所有的三维空间指标均与城市地表温度呈正相关, 且所有指标均达到了 0.001 以上的置信水平。其中, 建筑密度、建筑基底面积总和、容积率、占空比和建筑体积总和这五项指标与城市地表温度在空间上的正相关程度极为显著, 城市地表温度随这五项指标的增大而提升的效果较为明显。

与城市地表温度呈负相关的一维高度指标有建筑绝对高度标准差、DEM 标准差、建筑平均绝对高度和 DEM 平均值, 二维平面指标有建筑临近距离均值和户外活动面积比, 城市绿化生态指标与地表温度也呈现出一定的负相关性, 且所有指标均达到了 0.05 以上的置信水平。在这些指标中, 建筑绝对高度标准差、DEM 标准差、建筑平均绝对高度、DEM 平均值和户外活动面积比这五项指标与地表温度的负相关性最为显著, 随着这五项指标的增加, 城市地表温度降低的程度比较明显。

综合来看, 与地表温度呈显著正相关关系的指标均为建筑的二维平面及三维空间指标。城市热场改变, 地表温度提升的主要原因即建筑在二维平面上的不断延伸及在空间上建筑体量的不断增大。与地表温度呈显著负相关关系的指标主要为建筑的高度指标, 表明地表温度受地形影响最为明显。但除去地形因素外, 户外活动面积比越大, 即区域内建筑基底面积越小, 地表温度越低。同样, 建筑在二维平面上的延伸越少, 地表温度越低。而不同空间研究单元结果的差别在于, $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 研究单元城市空间结构内各项指标与地表温度相关系数的显著性均强于 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 研究单元的结果。可见, 城市空间结构各指标与地

表温度在空间上相关性的显著程度与选择的研究单元尺度有关。在城市地表温度与城市空间结构

的研究尺度上来说, 研究单元越小, 两者的相关性越强。

表 2 地表温度与城市空间结构指标的相关系数 R 及其检验的 P 值
Tab. 2 The R value of the correlation coefficient between the land surface temperature and the urban spatial structure indicators and its tested P value

具体指标 Specific index	1 km×1 km		2 km×2 km	
	相关系数 R	P 值	相关系数 R	P 值
建筑高度标准差 Standard deviation of building height	0.2434	8×10^{-11}	0.3547	3×10^{-8}
建筑物平均高度 Average height of buildings	0.1043	5×10^{-3}	0.1891	4×10^{-3}
建筑绝对高度标准差 Absolute height standard deviation of buildings	-0.3720	3×10^{-24}	-0.5450	3×10^{-19}
DEM 标准差 Standard deviation of DEM	-0.3925	6×10^{-27}	-0.5611	1×10^{-20}
建筑平均绝对高度 Average absolute height of buildings	-0.4517	4×10^{-36}	-0.5526	7×10^{-20}
DEM 平均值 DEM average value	-0.4746	3×10^{-40}	-0.5792	4×10^{-22}
建筑密度 Building density	0.4390	5×10^{-34}	0.5097	1×10^{-16}
建筑基底面积总和 Summation of the base area of foundation	0.4391	5×10^{-34}	0.5099	1×10^{-16}
建筑基底面积标准差 Standard deviation of the base area of foundation	0.2256	2×10^{-9}	0.3587	2×10^{-8}
平均建筑基底面积 Average the base area of foundation	0.1795	2×10^{-6}	0.3506	4×10^{-8}
建筑临近距离均值 Mean distance between buildings	-0.1179	2×10^{-3}	-0.1268	5×10^{-2}
户外活动面积比 Outdoor activity area ratio	-0.4390	5×10^{-34}	-0.5097	1×10^{-16}
容积率 Volume rate	0.4027	1×10^{-27}	0.4953	2×10^{-15}
建筑体积总和 Summation of building volume	0.3973	1×10^{-27}	0.4901	2×10^{-15}
占空比 Duty cycle	0.3766	8×10^{-25}	0.5051	2×10^{-16}
建筑体积标准差 Standard deviation of building volume	0.2514	2×10^{-11}	0.3885	1×10^{-9}
平均建筑体积 Average building volume	0.1392	2×10^{-4}	0.2202	7×10^{-4}
绿地水体的总面积 Summation of the area of green land and water bodies	-0.1496	8×10^{-5}	-0.1765	7×10^{-3}

3.2 城市地表温度受相邻区域空间结构指标的影响

采用双变量空间相关分析 (公式 (4)) 研究城市地表温度受周边相邻区域城市空间结构指标的影响。运用 GeoDa 软件进行计算, 使用其双变量 Moran's I 工具, 以地表温度为主变量 (X_1), 以城市空间结构指标分别作为周边区域变量 (X_2), 对地表温度与城市空间结构指标进行空间相关分析。计算的 Moran's I 值及其检验的 Z 值如表 3 所示。

城市空间结构指标与地表温度的双变量局部空间相关分析揭示了区域内的地表温度受其邻近区域的城市空间结构指标的影响程度。由表 3 可知: 城市地表温度与城市空间结构存在空间相关性。在 1 km×1 km 的研究单元中, 地表温度与相邻区域内的建筑高度标准差、建筑平均高度、建筑密度、建筑基底面积总和、建筑基底面积标准差、平均建筑基底面积、容积率、建筑体积总和、占空比、建筑体积标准差和平均建筑体积等城市空间结构指标呈正相关, 且均达到了 0.01 以上的置信水平。其中, 地表温度与相邻区域内的建筑密度、建筑基底面积总和、容积率、占空比、建筑体积总

和这五项指标的空间正相关程度尤为显著。地表温度与相邻区域内的建筑绝对高度标准差、DEM 标准差、建筑平均绝对高度和 DEM 平均值、建筑临近距离均值、户外活动面积比和绿地水体总面积这七项空间结构指标呈负相关关系。在这些指标中, 地表温度与相邻区域内的 DEM 标准差、建筑平均绝对高度、DEM 平均值和户外活动面积比这四项指标呈现出较为显著的负相关性, 即地表温度较高的地区, 其相邻区域的内的这四项指标值较低。

基于 2 km×2 km 的研究单元视角, 地表温度与其相邻区域的建筑绝对高度标准差、DEM 标准差、建筑平均绝对高度、DEM 均值、户外活动面积比及绿地水体总面积这六项指标呈现出极为显著的空间相关性 (负相关)。除与建筑临近距离均值指标相关性不显著外, 与其余指标的空间相关性均达到了 0.01 以上的置信水平。

由此可知, 地表温度与相邻区域内建筑的覆盖率、总建筑面积及总体积等因素的大小密切相关, 这些建筑指标的增大会提升周围区域的地表温度。在较小的研究范围内, 地表温度不仅受周

围区域地形因素的影响较大, 户外活动面积比也是影响周围区域地表温度的重要指标。而在较大的研究范围内, 相邻区域的地形因素是地表温度最为重要的影响因素, 地形与建筑物高度所叠加的综合因素对于地表温度的影响最为明显, 地势

越高, 地形起伏程度越大的区域其相邻区域的地表温度越低。绿地与水体也会在一定程度上缓解城市的热效应。在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的研究单元中, 地表温度与相邻区域的空间结构指标的相关性较为显著。

表 3 地表温度与城市空间结构指标的双变量空间自相关数据
Tab. 3 Bivariate spatial autocorrelation data of land surface temperature and urban spatial structure indicators

具体指标 Specific index	1 km×1 km		2 km×2 km	
	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	2 km×2 km	<i>Z</i>
建筑高度标准差 Standard deviation of building height	0.1928	11.62	0.2670	9.03
建筑物平均高度 Average height of buildings	0.0583	3.61	0.1251	4.31
建筑绝对高度标准差 Absolute height standard deviation of buildings	-0.3531	-20.87	-0.5562	-18.72
DEM 标准差 Standard deviation of DEM	-0.3718	-21.86	-0.5686	-18.95
建筑平均绝对高度 Average absolute height of buildings	-0.4057	-23.66	-0.5145	-16.79
DEM 平均值 DEM average value	-0.4289	-24.87	-0.5358	-17.34
建筑密度 Building density	0.3973	21.78	0.3973	12.58
建筑基底面积总和 Summation of the base area of foundation	0.3973	21.78	0.3975	12.57
建筑基底面积标准差 Standard deviation of the base area of foundation	0.1611	10.02	0.2560	8.98
平均建筑基底面积 Average the base area of foundation	0.1295	7.96	0.2721	9.57
建筑临近距离均值 Mean distance between buildings	-0.0704	-4.31	-0.0108	-0.41
户外活动面积比 Outdoor activity area ratio	-0.3973	-21.78	-0.3973	-12.58
容积率 Volume rate	0.3700	20.90	0.3975	12.55
建筑体积总和 Summation of building volume	0.3689	20.90	0.3952	12.51
占空比 Duty cycle	0.3428	19.83	0.4023	12.58
建筑体积标准差 Standard deviation of building volume	0.1896	11.99	0.2840	9.73
平均建筑体积 Average building volume	0.0840	5.28	0.1492	5.14
绿地水体的总面积 Summation of the area of green land and water bodies	-0.1971	-12.16	-0.1927	-6.82

4 结论

(1) 在探究不同尺度上城市空间结构指标与地表温度的相关性分析中, 发现两者的关系对于空间的依赖性较高, 不同尺度的研究单元所得结果存在一定差异。较小的研究单元中空间结构与城市热场的相关性更为显著。

(2) 探究不同的城市空间指标对城市热场的影响时, 两种分析方法均表明: 建筑密度、建筑基底面积总和、容积率、占空比和建筑体积总和这五项指标与地表温度的正相关性最为显著, 空间正相关程度最高。这五项指标综合作用程度较高的市中心区域的地表温度普遍高于周边区域的地表温度。

(3) 两种分析方法结果均表明: 地表温度与 DEM 标准差、建筑平均绝对高度、DEM 平均值、建筑绝对高度标准差和户外活动面积比这五项指标呈显著负相关, 空间相关性也极为显著 (负相关)。除去地形因素外, 户外活动区域所占比例

较高、建筑物所占空间较少的区域地表温度较低。

参考文献

- 敖荣军, 梅琳, 梁鸽, 等. 2018. 湖北省县域人口迁入与工业集聚的空间关联性研究 [J]. 长江流域资源与环境, 27(3): 514–522. [Ao R J, Mei L, Liang G, et al. 2018. Interactive relationship between population mobility and industrial agglomeration: based on county panel data of Hubei Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(3): 514–522.]
- 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 2012. 基于景观格局的城市热岛研究进展 [J]. 生态学报, 32(14): 4553–4565. [Chen A L, Sun R H, Chen L D. 2012. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(14): 4553–4565.]
- 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 2013. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展 [J]. 生态学报, 33(4): 1042–1050. [Chen L D, Sun R H, Liu H L. 2013. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses,

- problems, and perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(4): 1042–1050.]
- 丁沃沃, 胡友培, 窦平平. 2012. 城市形态与城市微气候的关联性研究 [J]. *建筑学报*, (7): 16–21. [Ding W W, Hu Y P, Dou P P. 2012. Study on interrelationship between urban pattern and urban microclimate [J]. *Architectural Journal*, (7): 16–21.]
- 范晨璟, 田 莉, 李经纬. 2017. 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*, 24(12): 92–100. [Fan C J, Tian L, Li J W. 2017. Research progress of impacts of urban form on air quality [J]. *Urban Development Studies*, 24(12): 92–100.]
- 方叶林, 程雪兰, 王 芳. 2020. 空气污染与旅游经济的时空关系及影响机理 [J]. *经济管理*, 42(1): 140–154. [Fang Y L, Cheng X L, Wang F. 2020. The time-space relationship of air pollution between tourism economy and its influence mechanism [J]. *Business and Management Journal*, 42(1): 140–154.]
- 贾 琦. 2018. 城市三维空间形态及其热环境效应研究进展 [J]. *建筑与文化*, (2): 58–59. [Jia Q. 2018. Research process on urban three-dimensional space shape and thermal environmental effects [J]. *Architecture & Culture*, (2): 58–59.]
- 梁益同, 陈正洪, 夏智宏. 2010. 基于 RS 和 GIS 的武汉城市热岛效应年代演变及其机理分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 19(8): 914–918. [Liang Y T, Chen Z H, Xia Z H. 2010. Decades change and mechanism of the urban heat island effect in Wuhan based on RS and GIS [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19(8): 914–918.]
- 李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 2016. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展 [J]. *遥感学报*, 20(5): 899–920. [Li Z L, Duan S B, Tang B H, et al. 2016. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 899–920.]
- 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 2007. 用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 43(4): 12–17. [Mao K B, Tang H J, Zhou Q B, et al. 2007. Retrieving land surface temperature from MODIS data by using radiance transfer equation [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 43(4): 12–17.]
- 芮建勋. 2007. 上海市高层建筑的城市热力景观效应研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 23(1): 104–108. [Rui J X. 2007. Study on the effect of high buildings on urban thermal landscape in Shanghai [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 23(1): 104–108.]
- 王 蕾, 关燕宁, 郭 杉, 等. 2016. 城市地表要素的地表能量响应特征及其关系研究 [J]. *地球信息科学学报*, 18(12): 1684–1697. [Wang L, Guan Y N, Guo S, et al. 2016. Urban surface energy's responses to land surface element types and interactive relationship [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 18(12): 1684–1697.]
- 王林申, 付 佳, 贾 琦, 等. 2019. 济南市地表参数变化及其热岛效应响应 [J]. *干旱区资源与环境*, 33(1): 148–152. [Wang L S, Fu J, Jia Q, et al. 2019. Response of land surface parameter changes to heat island effect in Jinan [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 33(1): 148–152.]
- 魏雪梅, 马卫春, 孔 丽. 2019. 中小城市地表温度变化与下垫面关系 [J]. *遥感信息*, 34(3): 115–119. [Wei X M, Ma W C, Kong L. 2019. Relationship between change of land surface temperature and land surface characteristics in medium and small cities [J]. *Remote Sensing Information*, 34(3): 115–119.]
- 尹昌应, 石忆邵, 王贺封, 等. 2015. 城市地表形态对热环境的影响——以上海市为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 24(1): 97–105. [Yin C Y, Shi Y S, Wang H F, et al. 2015. Impacts of urban landscape form on thermal environment at multi-spatial levels [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(1): 97–105.]
- 岳文泽, 徐丽华. 2013. 城市典型水域景观的热环境效应 [J]. *生态学报*, 33(6): 1852–1859. [Yue W Z, Xu L H. 2013. Thermal environment effect of urban water landscape [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(6): 1852–1859.]
- 曾 鹏, 孙宗耀. 2019. 天津市核心区建筑物属性与热环境相关性影响尺度研究 [C]// 中国城市规划学会. 2019 中国城市规划年会论文集 (08 城市生态规划). 北京: 中国建筑工业出版社: 172–181. [Zeng P, Sun Z Y. 2019. Research on correlation and influence scale of building attributes and thermal environment in Tianjin core area [C]// Urban Planning Society of China. Proceedings of the 2019 China urban planning annual conference (08 urban ecological planning). Beijing: China Architecture and Building Press: 172–181.]

- 周伟奇, 田韞钰. 2020. 城市三维空间形态的热环境效应研究进展 [J]. *生态学报*, 40(2): 416–427. [Zhou W Q, Tian Y Y. 2020. Effects of urban three-dimensional morphology on thermal environment: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2): 416–427.]
- Alavipanah S, Schreyer J, Haase D, et al. 2018. The effect of multi-dimensional indicators on urban thermal conditions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 177: 115–123.
- Berger C, Rosentreter J, Voltersen M, et al. 2017. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature [J]. *Remote Sensing of Environment*, 193: 225–243.
- Chun B, Guldmann J M. 2014. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities [J]. *Landscape and Urban Planning*, 125: 76–88.
- Li Z L, Tang B H, Wu H, et al. 2013. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 131: 14–37.
- Oke T R. 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations [J]. *Journal of Climatology*, 1(3): 237–254.
- Qian Y G, Zhou W Q, Hu X F, et al. 2018. The heterogeneity of air temperature in urban residential neighborhoods and its relationship with the surrounding greenspace [J]. *Remote Sensing*, 10(6): 965. DOI: 10.3390/rs10060965.
- Scarano M, Mancini F. 2017. Assessing the relationship between sky view factor and land surface temperature to the spatial resolution [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 38(23): 6910–6929.
- Srivani M, Kazunori H. 2011. The influence of urban morphology indicators on summer diurnal range of urban climate in Bangkok metropolitan area, Thailand [J]. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 11(5): 34–46.
- Unger J. 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach [J]. *Climate Research*, 27: 253–264.
- Zheng Z, Zhou W Q, Wang J, et al. 2017. Sixty-year changes in residential landscapes in Beijing: a perspective from both the horizontal (2D) and vertical (3D) dimensions [J]. *Remote Sensing*, 9(10): 992. DOI: 10.3390/rs9100992.
- Zheng Z, Zhou W Q, Yan J L, et al. 2019. The higher, the cooler? Effects of building height on land surface temperatures in residential areas of Beijing [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 110: 149–156.
- Zhou W Q, Wang J, Cadenasso M L. 2017. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: a comparative study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 195: 1–12.