

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.04.008

基于 MGWR 模型的城市景观与热环境关系分析

李 斌¹, 邢汉发^{1,2}, 刘烨菲¹

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358; 2. 华南师范大学 地理科学学院, 广东 广州 510631)

摘要: 随着城市化进程的加快,城市热环境问题日益受到人们的关注。在分析城市景观与城市热环境的关系方面,地理加权回归模型(GWR)得到了广泛的应用。然而,一方面,目前有关城市多层次景观的讨论较少,另一方面,地理加权回归方法假设所有建模过程都在相同的空间尺度下运行,不足以解释多尺度的热环境效应。针对这些问题,本文以深圳市为实验区,基于面向对象分割技术构建斑块-类别-地块三个层次的城市景观体系,并引入多尺度地理加权回归模型(MGWR)分析城市景观与热环境的关系。结果表明:不同层次的城市景观对城市热环境有不同的作用尺度;在本研究中, MGWR 模型比传统的普通最小二乘法和 GWR 模型具有更好的拟合优度;不同城市景观热环境效应的空间格局差异性明显。该研究结果有助于深入理解多层次的城市景观格局与城市热环境的关系。

关键词: 多尺度地理加权回归模型; 城市景观; 城市热环境

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)04-0517-09

Analysis of the relationship between urban landscape and thermal environment based on MGWR model

LI Bin¹, XING Hanfa^{1,2}, LIU Yefei¹

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: With the urbanization accelerating, urban thermal environment issues are receiving increasing attention. Geographically weighted regression models (GWR) have been widely used in analyzing the relationship between urban landscape and urban thermal environment. However, there are few discussions of urban multi-level landscapes on the one hand; on the other hand, the geographically weighted regression approach assumes that all modeling processes operate at the same spatial scale, which is insufficient in explaining the multi-scale thermal environment effects. To address this issue, this paper takes Shenzhen as the experimental area, constructs a three-level urban landscape system for patch-category-plot based on the object-oriented segmentation technique, and introduces a multi-scale geographically weighted regression model (MGWR) to analyze the relationship between urban landscape and thermal environment. The results show that urban landscapes at different levels have different scales of action on the urban thermal environment, that the MGWR model has a better fit than the traditional ordinary least squares and GWR models in this study, and that the spatial pattern of thermal environment effects in different urban landscapes is significantly different. The results of this study contribute to an in-depth understanding of the relationship between multi-level urban landscape patterns and the urban thermal environment.

Key words: MGWR; urban landscape; urban thermal environment

收稿日期: 2021-04-28; 网络出版日期: 2021-07-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210719.1554.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41971406)

第一作者: 李斌,男,硕士生,研究方向为城市遥感与大数据。E-mail: giserlibin@163.com

通信作者: 邢汉发,男,博士,教授,研究方向为城市景观与地理时空大数据。E-mail: xinghanfa@sdu.edu.cn

随着快速的城市化进程,城市热环境逐渐成为备受关注的城市现象之一^[1]。特别是在热带亚热带地区,由于其显著高温会对城市生态系统和公共健康产生重大不利影响^[2-3],该问题已经引起了城市规划和政策制定者的广泛关注。已有研究表明,城市景观对地表热变化有显著影响,了解城市景观对于改善城市的生态和可持续发展至关重要^[4],因此,深入分析城市景观与城市热环境的关系具有重要意义^[5]。

城市热环境本身是一种复杂的物理现象,涉及一系列的环境参数^[6]。随着遥感技术的发展,热红外遥感在城市气候与环境研究中得到了广泛的应用^[7-8],地表温度成为表征城市热环境的一个普遍而重要的参数^[9]。目前,已有热环境研究主要集中在热环境效应^[10]、影响因素^[11]、时空特征^[12]、微气候模拟^[13]等领域。针对城市景观与热环境的关系研究,有学者分析了微观地块尺度上各种自然景观、社会因素与城市热环境的相关性^[14];也有学者针对单一景观要素如水体、绿地等,研究其产生的不同热效应^[15-16]。但实际上,城市景观具有明显的层次性^[17],上述研究一方面并没有将城市景观作为一个多层次的分析体系,忽略了城市景观在斑块、类别等尺度上的差异性,另一方面大都将影响因素看作全局变量,采用相关性分析、全局回归等方法研究两者关系,忽略了影响因素的空间差异性。鉴于此,有学者引入GWR模型,分析景观影响因子的空间异质性问题^[18]。然而,传统GWR模型作用尺度单一,忽略了多个景观因子之间不同的尺度效应。尽管改进型的半参数地理加权模型能在一定程度上处理异

质性的尺度问题^[19],但其只能细分为全局和局部,仍然无法进一步处理多尺度效应的问题,且其拟合结果还存在较大噪声和误差。近两年来,MGWR被逐渐应用于各种分析影响因素空间异质性的实证研究中^[20],有学者基于该模型探讨了二手房房价的影响机制^[21],证明了该模型对空间分异和空间尺度差异的研究具有较好效果。由于该模型能捕捉不同影响因子的作用尺度,本文拟将该模型引入到多层次城市景观与城市热环境的关系研究中。

上述研究背景下,本文基于MGWR构建了一种多层次城市景观与城市热环境的关系分析方法。首先,基于Landsat-8遥感影像反演地表温度,用于表征城市热环境;然后,利用路网数据划分地块,基于面向对象分割技术划分地表对象边界与类别,从而构建斑块-类别-地块多层次的城市景观指标体系;最后,利用MGWR分析多层次景观的多尺度热环境效应。采用该研究方法对深圳市进行评价分析,以期丰富有关城市的多层次景观热效应研究,同时为评价城市景观多尺度热效应的空间异质性提供一种新的思路。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

本文以深圳市为研究区域,如图1所示。深圳市属于亚热带海洋性气候,全年光线充足且热量充沛,近年来随着城市化的发展,该地区城市热岛现象日益严重;同时,该地区复杂多样的地表覆盖信息可反映出多样化的城市景观。因此,本文以深圳市为研究区,应用MGWR模型分析多层次城市景观的热环境效应。

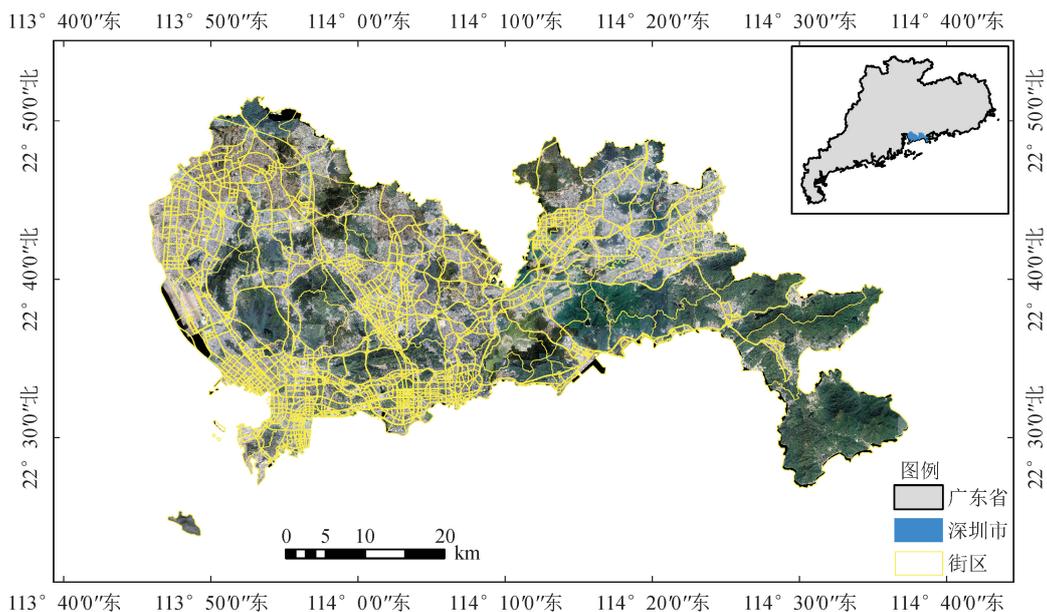


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

所需实验数据集包含 Landsat-8 遥感影像、矢量路网数据以及建筑物数据。其中,影像数据来源于地理空间数据云;路网数据则通过 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>) 获得;建筑物数据来源于深圳市规划和国土资源委员会(市海洋局)。

Landsat-8 影像空间分辨率为 30m, 共由 11 个光谱带组成, 其中包括两个热红外波段, 这是目前用于反演地表温度最为常用的数据源之一。考虑到数据的可用性, 本文获取了北京时间 2019 年 11 月 14 日上午 10:52 的深圳市 Landsat-8 遥感影像数据, 该日深圳最高气温为 32 °C, 天气晴, 西南风三级, 能够满足应用需求。OpenStreetMap 数据是一款由网络大众共同打造的众源地理数据, 本文主要利用路网数据划分了 2 017 个地块。建筑物数据包含建筑物高度与面积等信息, 基于上述数据获取地表温度, 并构建多层次的城市景观指标体系。

2 研究方法

本文研究方法如图 2 所示: 首先基于 OSM 路网划分地块, 地块的划分结果作为城市景观的最大研究尺度; 继而基于 Landsat-8 遥感影像, 一方面经由预处理与辐射传输方程法反演地表温度, 另一方面采用面向对象分割的方法划分斑块, 作为城市景观的最小研究尺度; 最后基于地表温度与城市景观指标体系(见表 1)构建 MGWR 模型, 分析城市多层

次景观与城市热环境的关系。

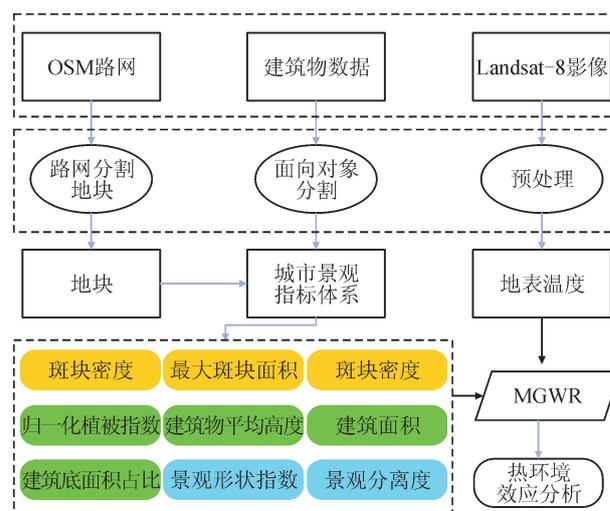


图 2 总体研究思路图

Fig. 2 Overall research idea map

2.1 基于 Landsat-8 遥感影像的城市热环境反演

本文采用辐射传输方程算法反演地表温度, 它是基于大气辐射传输模型的地表反演传统算法。该算法能够从卫星传感器观测到的总热辐射中减去大气影响的偏差值, 将表面热辐射强度转换为相应的表面温度。其计算公式为:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right)} \quad (1)$$

$$B(T_s) = \frac{[L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \epsilon)L_\downarrow]}{\tau} \quad (2)$$

表 1 多层次城市景观指标体系

Tab. 1 Multi-level urban landscape index system

变量尺度	变量名称	变量	变量描述
斑块层次	斑块数目	NP	地块范围内面向对象分割斑块的数目
	最大斑块面积	MPA	地块范围内最大斑块的占地面积
	斑块密度	PD	地块内斑块数目与地块面积之比
类别层次	归一化植被指数	$NDVI$	$NDVI = (DN_{NIR} - DN_{NR}) / (DN_{NIR} + DN_{NR})$, DN_{NIR} 为近红外波段; DN_{NR} 为红外波段。
	建筑物平均高度	BH	地块范围内建筑物的平均高度
	建筑面积	BA	地块范围内建筑物的总面积
	建筑底面积占比	BD	地块建筑物底面积之和与地块面积之比
地块层次	景观形状指数	LSI	$LSI = \frac{0.25 \sum_{k=1}^m e_k}{\sqrt{A}}$, m 为地块内斑块数目; e_k 为第 k 个斑块的周长; A 为地块总面积。
	景观分离度	$Division$	$Division = [1 - \sum_{k=1}^m \left(\frac{a_k}{A} \right)^2]$, a_k 为第 k 个斑块的面积。

其中, T_s 是陆地表面真实温度; $B(T_s)$ 是黑体辐射率; ϵ 是地表比辐射率; τ 是热红外波段大气透射率; L_λ 是图像辐射校准; L_\uparrow 是大气向上辐射强度; L_\downarrow 是大气向下辐射强度; K_1 和 K_2 是系数。

在 Landsat-8 热红外波段中, $K_1 = 774.885 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1321.079 \text{ K}$ 。在 NASA 网站 (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) 上, 可以获得 τ 、 L_\uparrow 、 L_\downarrow 的值分别为 0.72、2.18、3.46。

2.2 基于面向对象分割的多尺度城市景观测算

为降低遥感影像像素尺度光谱异质性的影响, 便于构建斑块-类别-地块多层次的量化指标, 本文采用面向对象的方法来有效分割遥感图像, 并基于斑块的几何光谱纹理特征划分阈值, 共分为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地六类。分割尺度的选择采用目视解译法, 对于建成区与非建成区, 分别以建筑物和自然地表的均匀划分为准则, 交界处则以合理捕捉两种用地类型的对象单元为准则。最终, 经过优化对比分割结果, 确定三种分割尺度分别为 130、90、100。

2.3 多尺度地理加权回归模型的构建

GWR 扩展了全局回归模型, 允许估计局部参数而不是全局参数^[22], 虽然 GWR 在一定程度上捕捉了影响因素的空间异质性, 但它是在假设“所有协变量在相同空间尺度上变化”的情况下实现的, 不足以解释不同城市景观影响因素的空间异质性水平。MGWR 则放宽了“相同空间尺度”的假设, 允许对协变量特定带宽进行优化, GWR 和 MGWR 的公式分别为:

$$y_i = \sum_{j=0}^m \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \quad (3)$$

$$y_i = \sum_{j=0}^m \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \quad (4)$$

其中, x_{ij} 是独立变量 x_j 在 i 点的值; (u_i, v_i) 表示地块 i 的质心坐标; $\beta_j(u_i, v_i)$ 是 i 点上的第 k 个回归参数, 是地理位置的函数, 当 $j=0$ 时, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为 i 点的回归常数; m 为回归系数的总个数; β_{bwj} 为校准第 j 个回归关系所用的最佳带宽; ϵ_i 是随机误差。

对比可知, MGWR 通过推导出响应变量和不同预测变量之间的条件关系的单独带宽, 允许不同的过程在不同的空间尺度上运行。MGWR 使用反向拟合算法进行校准, 用 GWR 参数估计初始化反拟合过程。基于这些初始值, 校准过程以迭代的方式工作, 在每次迭代中, 所有的局部参数估计和最优带宽都被评估。当连续迭代的参数估计的差值收敛于指定阈值时, 迭代终止。本研究中, 收敛阈值取

为 10^{-5} 。

3 实验结果及分析

3.1 城市热环境结果分析

地表温度反演结果如图 3 所示。温度范围为 $12.4 \text{ }^\circ\text{C} \sim 41.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低地表温度位于水体表面, 最高地表温度位于建筑物表面。区域之间由于较大温差产生的复杂热环境为本研究提供了便利。

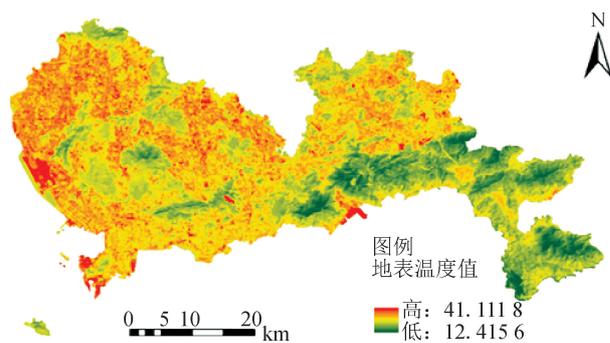


图 3 地表温度反演结果图

Fig. 3 Land surface temperature retrieval result map

为验证应用地理加权回归模型的可行性, 基于局部 Moran' I(LISA)挖掘城市热环境的空间自相关特性, 如图 4 所示。深圳市热环境有着明显的空间自相关性, 其主要集聚方式为“高-高”集聚与“高-低”集聚。在宝安区、龙华新区、光明新区有着明显的“高-高”集聚现象, 地表温度较高且分布集中; 而福田区、罗湖区、南山区等经济中心区域则由于城市绿化、公园广场的建设等治理措施以“高-低”集聚现象为主。

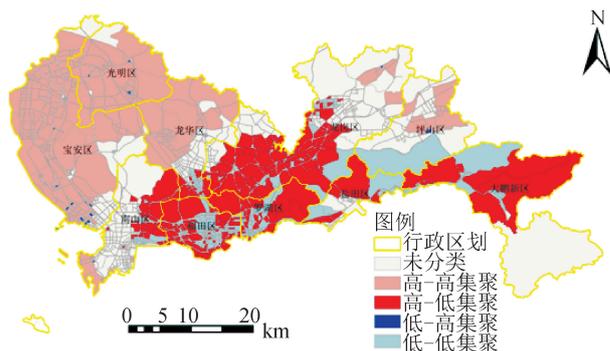
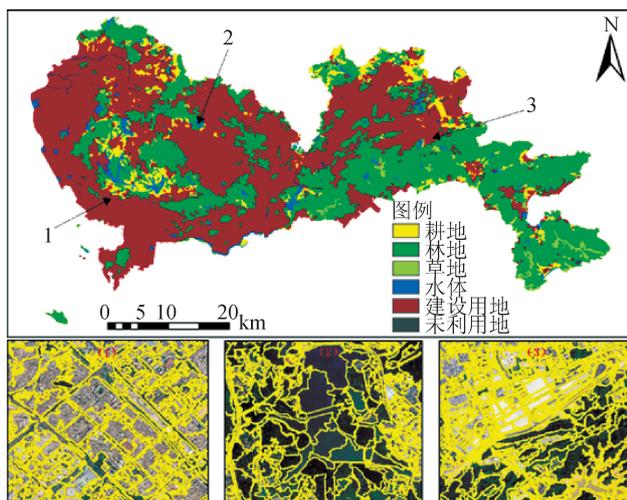


图 4 深圳市地表温度 LISA 图

Fig. 4 LISA map of Shenzhen's land surface temperature

3.2 城市景观要素结果

利用面向对象分割技术获得深圳市对象斑块共计 41 497 个, 土地利用分类结果与斑块分割实例如图 5 所示。由图可知, 水体、林地及建设用地结合处的对象分割结果(依据目视分割准则)均较为清晰, 满足多尺度景观指标的计算要求。



1—建成区分割结果;2—非建成区分割结果;
3—建成区与非建成区交界处分割结果。

图 5 土地利用分类与斑块分割实例结果

Fig. 5 Land use classification and patch segmentation example results

3.3 MGWR 结果分析

3.3.1 相关性分析

本文采用皮尔逊相关分析法验证地表温度与城市景观指标之间的关系,如表 2 所示。

表 2 景观指标与地表温度的相关性

Tab. 2 Correlation result of landscape indicators and surface temperature

变量	相关系数
<i>NP</i>	0.419**
<i>MPA</i>	0.420**
<i>PD</i>	-0.221**
<i>NDVI</i>	-0.225**
<i>BH</i>	0.045**
<i>BA</i>	0.493**
<i>BD</i>	0.286**
<i>LSI</i>	-0.319**
<i>Division</i>	0.438**

注:“**”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

由表 2 可知,景观指标均在 0.01 水平(双侧)上与地表温度呈显著相关。其中,*PD*、*NDVI*、*LSI* 与地表温度呈显著负相关;*NDVI* 能够对热环境起到缓解作用,这与以往的研究结果一致;*PD*、*LSI* 等描述地块形态的指标表明,斑块密度越高、地块形态越趋近于标准形态,地表温度反而越低,这在林地分布密集的大区域地块尤为明显。其余指数均表现为显著正相关,其中 *NP*、*MPA*、*BA*、*Division* 的相关系数达

到 0.4 以上,表明人造地表的热环境效应是造成热岛效应的主要原因。

3.3.2 模型精度对比

为了更好地体现多种回归模型的差异性,本文对比了普通最小二乘法(OLS)、GWR 与 MGWR 三种模型的精度结果。首先,为避免因景观指标之间的相互影响而导致的回归结果偏差,对景观指标进行了共线性检验,如表 3 所示,每个变量的方差膨胀因子均小于 5,条件索引均小于 15,表明本文选择的变量指标之间不存在共线性关系;其次,进一步比较了普通最小二乘法、GWR 与 MGWR 的性能,如表 4 所示,模型的 AICc 值、残差平方和均呈阶梯式递减,而拟合优度 R^2 显著递增,表明引入的 MGWR 取得了更接近于真实值的拟合效果,说明 MGWR 是一种有效的研究城市景观热环境效应的建模方法。

表 3 共线性检验结果

Tab. 3 Collinearity test results

变量	方差膨胀因子	容差	条件索引
<i>NP</i>	2.435	0.411	1.768
<i>MPA</i>	1.852	0.540	2.170
<i>PD</i>	1.966	0.509	3.160
<i>NDVI</i>	1.085	0.921	3.617
<i>BH</i>	1.393	0.718	4.290
<i>BA</i>	1.945	0.514	5.080
<i>BD</i>	1.699	0.589	6.168
<i>LSI</i>	2.002	0.500	7.710
<i>Division</i>	1.532	0.653	13.734

表 4 回归模型性能对比

Tab. 4 Performance comparison of regression models

性能指标	OLS	GWR	MGWR
拟合优度 R^2	0.440	0.684	0.779
AICc 值	4 568.391	3 866.283	3 545.241
残差平方和	1 124.912	526.225	445.302

3.3.3 模型尺度分析

模型处理结果如表 5 所示。经典 GWR 的拟合最佳带宽为 130,占总样本量的 6.4%,在研究区中约为 128 km²,对于福田区、南山区等建成环境较好的区域,该作用尺度明显偏大。MGWR 则能反映变量之间不同的作用尺度。其中,最大的作用带宽为 *PD*、*LSI*、*Division*,均达到了 2 015,而 *NP*、*BD* 的最佳带宽仅为 44。

表 5 GWR 与 MGWR 带宽对比结果
Tab. 5 GWR and MGWR bandwidth comparison results

变量	MGWR 带宽	GWR 带宽
NP	44	130
MPA	362	130
PD	2 015	130
NDVI	200	130
BH	482	130
BA	722	130
BD	44	130
LSI	2 015	130
Division	2 015	130

由表 5 可知,景观指标的最佳拟合带宽由小到大依次为 NP、BD, NDVI, MPA, BH, BA, PD、LSI、Division,不同变量的作用带宽差异较为明显。

1) NP、BD 的作用带宽为 44,远小于其他指标,占总样本量的 2.1%,在研究区中约为 43 km²,接近于城市规划意义上的地块尺度。一方面说明斑块的数量以及建筑物的密度空间异质性明显,超出其作用尺度后,回归系数会发生明显的变化;另一方面也侧面说明了地表温度对于建筑物的分布非常敏感。

2) MPA 与 BH 的作用带宽基本相同,分别为 362 与 482,在研究区内,该尺度近似于行政区划中的社区尺度,这揭示了在不同的社区范围内,最大的分割斑块面积与建筑物高度差异性较大,超出作用范围后,拟合效果会剧烈变化。

3) BA 的作用带宽为 722,占总样本量的 35.7%,BA 的作用范围与深圳市建筑物分布的面积大致相同,证明了其在建成区与非建成区的作用尺度上表现良好,超出该作用尺度后系数未知性变大。

4) PD、LSI、Division 的作用尺度达到 2 015,几乎等同于全局变量,在全局上表现平稳,这揭示了在该尺度上,斑块密度与地块尺度上的景观量化指标几乎不存在空间异质性。

与经典 GWR 相比,MGWR 取得了更接近于真实值的结果,并提供了不同景观指标作用尺度的可解释性,揭示了不同层次的城市景观在不同尺度的热效应。

3.3.4 回归系数空间格局分析

在 MGWR 模型的计算结果中,每个景观指标因子对不同区域的影响具有特定的回归系数。回归

系数的统计信息如表 6 所示,包含最小值、最大值、平均值、标准差、正值比率和负值比率共 6 个统计值。系数的空间分布如图 6 所示。

表 6 MGWR 模型各景观指标因子回归系数的统计信息
Tab. 6 Statistical information on regression coefficients of each landscape indicator factor of MGWR model

景观指 标因子	回归系数的统计信息					
	最小值	最大值	平均值	标准差	正值比 率/%	负值比 率/%
NP	-0.237	5.513	1.125	0.849	98.86	1.14
MPA	-0.177	0.302	0.092	0.085	82.30	17.70
PD	0.018	0.019	0.018	0.006	100	0
NDVI	-0.344	0.021	-0.127	0.071	0.90	99.10
BH	-0.143	0.090	-0.049	0.049	15.72	84.28
BA	-0.219	0.074	-0.036	0.078	38.03	61.97
BD	-0.490	1.271	0.211	0.245	83.94	16.06
LSI	-0.116	-0.104	-0.107	0.003	0	100
Division	0.123	0.132	0.130	0.003	100	0

基于此,对各因子回归系数的空间格局进行分析。

1) NP:斑块数量有着显著的正向效应,其回归系数的正值比率达到 98.86%。该系数取值位于 -0.237 至 5.513 之间,平均值为 1.125,标准差 0.849,说明斑块数量每增加一个单位,地表温度平均升高 1.125 °C,影响程度较强。如图 6(a)所示,斑块密度正向作用较强的区域位于福田区、南山区等地区,该区域建筑物密度高,斑块主要为建筑物对象,分割斑块数量较多。

2) MPA:最大斑块面积回归系数正值比率达到 82.30%,说明地块范围内最大斑块面积越大,该系数正向效应越强。该系数取值位于 -0.177 至 0.302 之间,平均值为 0.092,标准差 0.085,表明 MPA 每增加一个单位,地表温度平均增加 0.092 °C,且整体空间差异不大。如图 6(b)所示,龙岗区、盐田区工业用地分布较为集中,地表温度较高,分割斑块面积也较大,导致该系数正向效应较强;而在宝安区住宅用地较为集中的区域,斑块多为单体建筑物,最大斑块面积往往是公园等公共设施用地,产生了对热环境的负面效应。

3) PD:斑块密度在全局上对城市热环境均有着正向作用,从绝对数值来看,斑块密度的影响强度极低。该系数取值位于 0.018 至 0.019 之间,平均值为 0.018,标准差 0.006,表明斑块密度每增加 1,温度变化平均仅为 0.018 °C。如图 6(c)所示,斑块

密度正向效应较强的区域位于南山区与宝安区,该区域内建筑用地密集,斑块较为破碎,密度较高。

4) *NDVI*:归一化植被指数回归系数负值比率达到 99.10%,这与以往的植被热环境效应研究相一致。该系数取值位于 -0.344 至 0.021 之间,平均值为 -0.127 ,标准差 0.071 ,其最佳带宽为 200 ,表明 $NDVI$ 每增加一个单位,地表温度平均降低 0.127°C ,负向效应最强的区域最多可降低 0.344°C 。如图 6(d)所示, $NDVI$ 的负向影响区域主要位于建

设用地区域,在该区域植被的降温效应更加显著。

5) *BH*:建筑物平均高度回归系数取值位于 -0.143 至 0.090 之间,平均值为 -0.049 ,标准差 0.049 ,负值比率达到 84.28% ,表明建筑物平均高度对地表温度的影响强度极低,且主要为负向效应。如图 6(e)所示,在城市外围以及大鹏新区,该系数较为敏感,由遥感影像可知,深圳市建成区建筑物虽然密集,但建筑物之间相隔的距离设计良好,通风情况较好,高层建筑物并未对热环境产生较大影响。

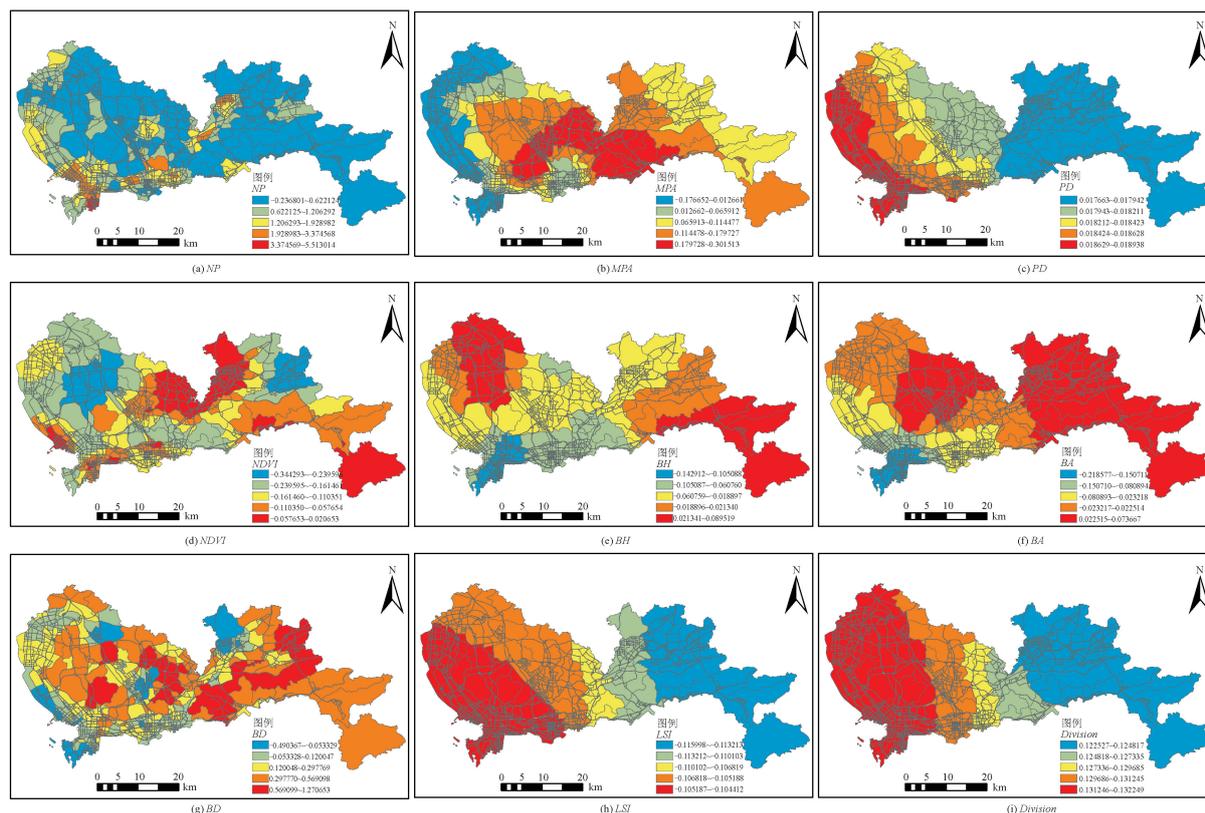


图 6 MGWR 模型各景观指标因子回归系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of regression coefficients of each landscape indicator factor of MGWR model

6) *BA*:建筑面积回归系数取值位于 -0.219 至 0.074 之间,平均值为 -0.036 ,标准差 0.078 ,负值比例相对较高,这与已有研究结果有所差异。如图 6(f)所示,该系数正向效应高值区域主要分布于龙华区、坪山区、大鹏新区,该区域植被覆盖率相对较高,建设用地分布较为分散,人工开发强度、地表温度均较低,受其他负向效应系数影响较大。

7) *BD*:建筑底面积占比回归系数取值位于 -0.490 至 1.271 之间,平均值为 0.211 ,标准差 0.245 ,正值比率达到 83.94% ,该系数在全球上主要对地表温度产生正向效应,且在正向效应最强的区域, BD 每增加一个单位,地表温度升高 1.271°C 。如图 6(g)所示,从全局来看,该系数正向效应高值区分布较为分散,主要分布在坪山区、龙岗区,该区

域覆盖有大面积的工业用地,建筑物底面积较大,且工业用地的热效应往往较强;其他区域也主要是正向效应分布。

8) *LSI*:从全局来看,景观形状指数主要对地表温度产生负向效应,该回归系数取值位于 -0.116 至 -0.104 之间,平均值为 -0.107 ,表明 LSI 每增加一个单位,地表温度平均降低 0.107°C ,标准差仅为 0.003 ,表明域上影响差异并不大。如图 6(h)所示,该回归系数呈扇状分布,西部区域由于建筑物较多,所以斑块多呈较为规则的方形分布;东部区域因工业用地、林地较多,分割斑块逐渐偏离规则形状,回归系数也逐渐降低。

9) *Division*:景观分离度回归系数取值位于 0.123 至 0.132 之间,平均值为 0.130 ,标准差 0.003 ,该

系数对地表温度只存在正向效应,当 *Division* 升高,地表温度也随之升高,且影响强度较大,*Division* 每增加一个单位,地表温度平均上升 0.13 °C。如图 6(i)所示,该系数的正向效应自西向东逐渐减弱,宝安区、南山区正向效应最强,东部新区的正向效应较弱。

4 结 论

已有研究普遍证明了城市景观有着重要的热环境效应,但对不同景观因素空间异质性的尺度差异研究仍然较少。相较于传统的 GWR, MGWR 的多带宽模式产生了更接近于真实情况的模拟过程,因此它具有较大潜力,可用于城市景观的多尺度热效应研究。

1) 深圳市地表温度冷热点区域明显、景观差异较大,其中宝安区等地区地表温度有着明显的“高-高”集聚现象,总体来说热岛效应明显,且城市景观的空间差异较大。

2) 模型结果表明, MGWR 能够避免传统单一尺度研究方法产生的较多噪声和误差,模型的拟合优度显著提升,相较于普通最小二乘法, MGWR 更适于研究城市景观热环境效应。

3) 分析结果表明,不同影响因素的影响力有着明显的空间异质性, *PD*、*LSI*、*Division* 几乎等同于全局变量对热环境产生的影响, *MPA*、*NDVI*、*BH*、*BA* 作用尺度中等, *BD*、*NP* 作用尺度最小。本文还分析了具体指标在具体区域的作用强度,因此,在制定热环境对策时,可以考虑不同指标影响程度的空间差异,以使决策的针对性更强。

此外,该研究仍然存在一些不足:由于数据获取受限,地块尺度的划分结果、城市景观的量化指标仍然存在可改进的空间;同时,并未涉及影响因素在时间尺度上的差异,未来可加入时间尺度进行探究。

参考文献:

- [1] WEBER N, HAASE D, FRANCK U. Zooming into temperature conditions in the city of Leipzig: how do urban built and green structures influence earth surface temperatures in the city? [J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 496: 289-298.
- [2] MEENU R, PAVAN K, PREM C P, et al. Multi-temporal NDVI and surface temperature analysis for urban heat island inbuilt surrounding of sub-humid region: a case study of two geographical regions[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018, 10: 163-172.
- [3] TOPARLAR Y, BLOCKEN B, MAIHEU B, et al. A review on the CFD analysis of urban microclimate[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1613-1640.
- [4] CHEN Youjun, YU Shixiao. Impacts of urban landscape patterns on urban thermal variations in Guangzhou, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2017, 54: 65-71.
- [5] WU Zhifeng, YAO Lei, REN Yin. Characterizing the spatial heterogeneity and controlling factors of land surface temperature clusters: a case study in Beijing[J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 106598.
- [6] ZHU Xinming, WANG Xuhong, YAN Dajiang, et al. Analysis of remotely-sensed ecological indexes' influence on urban thermal environment dynamic using an integrated ecological index: a case study of Xi'an, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40 (9): 3421-3447.
- [7] STREUTKER D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(3): 282-289.
- [8] WENG Qihao. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(4): 335-344.
- [9] YANG Chaobin, HE Xingyuan, WANG Ranghu, et al. The effect of urban green spaces on the urban thermal environment and its seasonal variations[J]. *Forests*, 2017, 8(5): 153.
- [10] 岳文泽,徐建华,徐丽华. 基于遥感影像的城市土地利用生态环境效应研究——以城市热环境和植被指数为例[J]. *生态学报*, 2006, 26(5):1450-1460.
- [11] YUE Wenze, XU Jianhua, XU Lihua. An analysis on eco-environmental effect of urban land use based on remote sensing images: a case study of urban thermal environment and NDVI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1450-1460.
- [12] KONARSKA J, UDDLING J, HOLMER B, et al. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(1): 159-72.
- [13] PENG Jian, XIE Pan, LIU Yanxu, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [14] SHARMIN T, STEEMERS K, MATZARAKIS A. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 34: 293-308.

- [14] 李洪忠,陈劲松,韩宇,等. 微观尺度城市热环境影响因素分析研究——以深圳市罗湖区为例[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8):1622-1631.
LI Hongzhong, CHEN Jinsong, HAN Yu, et al. Micro-scale research of the impact factors on urban thermal environment: a case study of Luohu District, Shenzhen [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(8): 1622-1631.
- [15] IMAM SYAFII N, ICHINOSE M, KUMAKURA E, et al. Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: a scale model study[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 34: 79-89.
- [16] HAI Yan, FAN Wu, LI Dong. Influence of a large urban park on the local urban thermal environment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622-623: 882-891.
- [17] XING Hanfa, MENG Yuan. Integrating landscape metrics and socioeconomic features for urban functional region classification[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2018, 72:134-145.
- [18] ZHANG Y, MIDDEL A, TURNER B L. Evaluating the effect of 3D urban form on neighborhood land surface temperature using Google Street View and geographically weighted regression[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(3): 681-697.
- [19] 古恒宇,孟鑫,沈体雁,等. 中国城市流动人口居留意愿影响因素的空间分异特征[J]. 地理学报, 2020, 75(2): 240-254.
GU Hengyu, MENG Xin, SHEN Tiyan, et al. Spatial variation of the determinants of China's urban floating population's settlement intention [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(2): 240-254.
- [20] FOTHERINGHAM A S, YANG Wenbai, KANG Wei. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107(6): 1247-1265.
- [21] 沈体雁,于瀚辰,周麟,等. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理, 2020, 40(3): 75-83.
SHEN Tiyan, YU Hanchen, ZHOU Lin, et al. On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: scale law of spatial heterogeneity [J]. Economic Geography, 2020, 40(3): 75-83.
- [22] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.

(责任编辑 周 蓓)

(上接第 477 页)

- [29] 申宇,赵静梅. 吃喝费用的“得”与“失”——基于上市公司投融资效率的研究[J]. 金融研究, 2016(3): 140-156.
SHEN Yu, ZHAO Jingmei. The gains and losses of eating and drinking corruption: evidence from investment and financing efficiency of Chinese listed companies[J]. Journal of Financial Research, 2016(3): 140-156.
- [30] 林晚发,钟辉勇,李青原. 高管任职经历的得与失? ——来自债券市场的经验证据[J]. 金融研究, 2018(6): 171-188.
LIN Wanfa, ZHONG Huiyong, LI Qingyuan. The gains and losses of senior management experience? Evidence from the bond market[J]. Journal of Financial Research, 2018(6): 171-188.
- [31] PERSSON P, ZHURAVSKAYA E. The limits of career concerns in federalism: evidence from china[J]. Journal of the European Economic Association, 2016, 14(2): 338-374.
- [32] 余明桂,潘红波. 政府干预、法治、金融发展与国有企业银行贷款[J]. 金融研究, 2008(9):1-22.
YU Minggui, PAN Hongbo. Government intervention, legal enforcement, financial development and bank loans to state-owned enterprises[J]. Journal of Financial Research, 2008(9):1-22.
- [33] 周广肃,张牧扬,樊纲. 地方官员任职经历、公共转移支付与居民消费不平等[J]. 经济学(季刊), 2020, 19(1): 61-80.
ZHOU Guangsu, ZHANG Muyang, FAN Gang. Career background, public transfer and consumption inequality[J]. China Economic Quarterly, 2020, 19(1): 61-80.

(责任编辑 周 蓓)