

中国地表城市热岛驱动因素及其空间异质性

牛 陆¹,张正峰^{1*},彭 中^{2,3},姜亚珍^{2,3},刘 萌⁴,周孝明⁵,唐荣林^{2,3} (1.中国人民大学公共管理学院,北京 100872; 2.中国科学院地理科学与资源研究所,资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101; 3.中国科学院大学,北京 100049; 4.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业农村部农业遥感重点实验室,北京 100081; 5.兰州理工大学土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于 MODIS 卫星遥感数据,计算了中国 284 个地级市 2018 年的年平均地表城市热岛强度,分析了中国地表城市热岛的空间分布规律和空间集聚模式.结合多元遥感数据、气象数据和社会经济统计数据,利用地理加权回归模型分析了日间和夜间地表城市热岛强度主要驱动因素的空间异质性.结果表明,中国地表城市热岛强度的空间分布存在明显的空间自相关性;地理加权模型相比传统的普通最小二乘模型,极大地提高了驱动因素的解釋程度,日间和夜间的决定系数分别由最小二乘模型的 0.659 和 0.189 提高到了 0.876 和 0.651 并且具有更低的残差平方和以及赤池信息准则值,从驱动因素来看,除日间的植被因素对地表城市热岛强度的影响显著为负外,其余因素的影响方向均会随着地理位置的改变存在结构性的差异.总体来讲,日间的地表城市热岛强度受城乡植被差异的影响最大,而在夜间则更容易受社会经济因素的影响.

关键词: 城市热岛; 城市环境; 热红外遥感; 土地利用; MODIS; 空间异质性; 地理加权回归; 驱动因素

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)02-0945-09

China's surface urban heat island drivers and its spatial heterogeneity. NIU Lu¹, ZHANG Zheng-feng^{1*}, PENG Zhong^{2,3}, JIANG Ya-zhen^{2,3}, LIU Meng⁴, ZHOU Xiao-min⁵, TANG Rong-lin^{2,3} (1.School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2.State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 5.School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). *China Environmental Science*, 2022,42(2): 945~953

Abstract: Based on satellite remote sensing data acquired through Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), not only was the annual mean surface urban heat island intensity of 284prefecture-level cities in 2018 figured out, but spatial distribution patterns and spatial agglomeration models of surface urban heat islands in China were analyzed. Combining multivariate remote sensing data, meteorological data and socioeconomic statistics, a geographically weighted regression model was utilized to analyze spatial heterogeneity in main drivers for surface urban heat island intensity during daytime and nighttime. As demonstrated by relevant results, an obvious spatial autocorrelation existed in spatial distribution of China's surface urban heat island intensity. Compared with the traditional global ordinary least squares (OLS) model, interpretation of the drivers was significantly improved according to the geographically weighted regression model. Moreover, determination coefficients for daytime and nighttime increased from 0.651 and 0.189 in the OLS model to 0.876 and 0.659 respectively. In addition, both the residual sum of squares and the Akaike information criterion were calculated to be lower by the geographically weighted regression model. In terms of the drivers, vegetation placed a significantly negative influence on surface urban heat island intensity during the daytime, while structural differences were proved to exist in directions of influence that was applied by other factors along with geographic position changes. On the whole, surface urban heat island intensity was most significantly affected by differences in urban and rural vegetation in daytime; but at night, it was susceptible to socio-economic factors.

Key words: urban heat island; urban environment; thermal infrared remote sensing; land use; MODIS; spatial heterogeneity; geographically weighted regression; drivers

城市热岛作为城市化进程中人类影响自然环境所导致的最为直观的现象之一,长期以来都备受学者们的关注^[1].传统的城市热岛研究由于数据的限制,通常只能借助由地面站点监测获取的气温对

收稿日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71874196,42077433);中国人民大学 2021 年度拔尖创新人才培养资助计划成果

* 责任作者,教授, zhangzhengfeng@ruc.edu.cn

局部的城市热环境进行描绘和分析(即冠层城市热岛,canopy UHI)^[2].直到20世纪70年代卫星遥感技术的不断兴起,凭借其低成本、全地表观测等诸多优势,才使得大空间尺度的城市热岛研究成为可能.

随着越来越多搭载着热红外传感器的卫星的发射和高质量热红外遥感产品的出现,国内外地表城市热岛(SUHI)的研究在最近10a里取得了飞速的发展^[3-10].研究的重点集中在SUHI的时空分布规律及其驱动因素的分析,主要目的是为城市热岛减缓提供相应的科学参考依据.Peng等^[11]首次基于MODIS地表温度产品对全球419个大城市的地表城市热岛强度进行计算,研究发现日间的SUHI强度低于夜间,而植被是日间城市热岛最主要的驱动因素;Zhou等^[12]则对中国32个主要城市SUHI强度的时空分布规律和驱动因素进行了分析,研究发现日间SUHI强度的空间分布模式与人类热排放、植被活动和气候有关,而夜间则与反照率、人类热排放和建筑强度的关系更密切;Manoli等^[13]则开发了一个连接人口、背景气候和SUHI强度的粗粒度(coarse-grained)模型,发现城乡间蒸散发和对流效率的差异是SUHI的决定因素.尽管上述里程碑式的大空间尺度研究不仅极大提高了人们对于城市热岛现象的理解,也从空气动力学等角度拓展了城市热岛研究的理论基础^[14],但大多是从全局的角度出发对驱动因素进行分析,忽略了相关驱动因素与SUHI关系(即空间过程),的空间异质性,这导致相关的研究结论可能存在着一定程度上的区域间偏误.因此,本文基于MODIS地表温度产品,使用探索性空间数据分析和地理加权回归模型等方法对2018年中国284个地级市的日间及夜间地表城市热岛强度的驱动因素进行分析,研究中国地表城市热岛的空间集聚模式,中国地表城市热岛与其主要驱动因素在空间上的关系的异质性.

1 数据和方法

1.1 研究区及研究数据

本研究选择中国284个地级市为研究区,涵盖了中国约94%的人口,所采用的数据共分为以下几个部分:①地表温度数据.本研究采用2018年中国区域的1km空间分辨率的MODIS 8d合成地表温度产

品(MOD11A2,MYD11A2,Version 006.),来计算日间和夜间的城市地表热岛强度^[15];②土地利用数据.由于地表温度产品空间分辨率(1km)的限制,单纯提高土地利用数据集的分辨率对SUHI强度计算准确性并没有太大提升,综合考虑分类精度和数据的可获得性,本研究采用2018年欧空局气候变化倡议(European Space Agency's Climate Change Initiative)300m空间分辨率的中国区域的土地利用数据(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/>)对城市热岛强度计算中城乡区域进行划定,并计算城市建成区面积;③高程数据.中国数字高程(DEM)空间分布数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘SRTM(SRTM)数据(www.resdc.cn),用来剔除高程对SUHI强度的影响;④归一化植被指数(NDVI)数据.使用2018年中国区域的1km空间分辨率的MODIS 16d合成NDVI数据(MCD11A3v006,<ftp://ladsftp.nascom.nasa.gov>)来计算城乡间植被的差异作为驱动因素;⑤PM_{2.5}数据.使用基于机器学习算法,利用多源卫星及观测数据生产的中国高分辨率空气污染数据集(CHAP)中2018年1km分辨率的PM_{2.5}数据^[16],分析空气污染对SUHI的影响;⑥降水数据.使用中国2018年1km分辨率的逐月降水数据(<http://www.geodata.cn/>),分析气候对SUHI的影响^[17];⑦夜间灯光数据.使用经校正过的2018年中国区域的1km分辨率夜间灯光数据(<https://figshare.com/>),分析城市发展强度对SUHI的影响^[18];⑧地级市尺度的年末总人口数据用于分析人类活动对SUHI强度的影响,数据整理自《中国城市统计年鉴》^[19].

1.2 城市热岛强度计算

从城市热岛本身的概念(即城市温度高于周围郊区的现象)出发计算城市热岛强度是目前城市热岛研究中广泛采用的手段,因此城乡区域的划定成为了SUHI强度计算的核心问题.以往研究通常将土地利用图像中建成区的像元直接或经过空间聚合等操作作为城市区域,得到了广泛的认可和应用.而郊区范围的划定则存在较大的差异,也是造成不同研究计算SUHI强度的结果存在差异的主要原因.第一类划定郊区的算法是缓冲区方法,通常将城市地区1~50km或城市区域面积的50%~300%的缓冲区作为郊区.此类方法最大的问题是难以确定缓冲区的具体大小,不同研究者的划定结果可能相差

几倍甚至几十倍的,这导致其研究的结论也存在明显差异甚至相反^[20].第二类则是固定范围的郊区划定方法,例如 Chakraborty 等^[7]首次利用基于美国橡树岭国家实验室研制的 urban area 数据作为郊区范围基于谷歌地球云计算平台对全球城市热岛强度进行了计算,Lai 等^[2]则将行政区范围作为每个城市的郊区边界计算了中国的城市热岛强度,分析了 SUHI 的典型昼夜模式.与第一类方法相比,使用第二类方法所得到的城市热岛强度物理意义更加明确,即人类活动和城市化对某个边界范围内热环境的扰动.而行政区作为开展城市治理与社会经济统计的基本单位,具有更强的现实意义,基于此得到的城市热岛强度也更有政策指导价值.综合考虑上述因素,本研究采用地级市的行政区边界作为城市热岛强度计算中的郊区范围边界.年平均城市热岛强度的计算公式如下:

$$\text{SUHI} = U_{\text{LST}} - R_{\text{LST}} \quad (1)$$

式中:SUHI 为城市热岛强度,℃; U_{LST} 为城市地区的平均温度,℃; R_{LST} 为行政区内其余地区(即本文所划定的郊区范围)的平均温度,℃;

在计算过程中,为了避免水体和永久冰雪对 SUHI 的影响,剔除了 LST 数据中对应上述 2 种土地利用类型的像元.并且为了减少高程对 SUHI 的影响,同样剔除了郊区中高程值高于或低于城市区域平均高程 50m 的 LST 像元.使用同样的方法计算了 ΔNDVI 和 Δ 降水.

除此之外,为了降低 MODIS 产品本身反演误差对结果的影响,在 SUHI 强度计算之前,参考 Lai 等^[21]对于遥感数据的质量控制对 SUHI 强度影响的研究结论,本文依据 MODIS LST 产品中质量控制波段给出的信息,剔除了部分有云及误差>3K 的影像.

1.3 探索性空间数据分析

为了分析中国 SUHI 强度分布的空间集聚特征,本研究选择经典的全局 Moran's I 指数^[22]检验全国尺度下 SUHI 强度的空间自相关性,当全局 Moran's I 指数显著且大于 0 时,表示 SUHI 强度呈现正向的空间自相关,其数值越大表明 SUHI 强度的集聚性特征越强;当全局 Moran's I 指数显著且小于 0 时,表明 SUHI 呈现的负向的空间自相关,其值越小表明空间离散性特征越强,全局 Moran's I 指数的计算公式如下:

$$I = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \right] / \left[S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right] \quad (2)$$

式中: I 表示全局 Moran's I 指数; n 表示城市个数; x_i 和 x_j 表示城市 i 和城市 j 的年平均 SUHI 强度;

$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$; W 是空间权重矩阵,本研究采用的是距离倒数的空间权重矩阵.

除此之外,本文利用局部 Moran's I 指数进一步探索 SUHI 强度在全国区域的空间集聚位置,识别 SUHI 强度的空间集聚特征.根据局部 Moran's I 指数的显著程度和正负,空间集聚的模式可以被划分为 5 类,即高-高集聚、高-低集聚、低-低集聚和低-高集聚和不显著,分别代表高值周围是高值、高值周围是低值、低值周围是低值、低值周围是高值和无显著集聚 5 种情况,即该城市的 SUHI 与周围地区 SUHI 是否存在空间分布规律上的联系.

1.4 地理加权回归模型

应用经典的线性回归模型(OLS)进行分析时,本质上假定了一个静止的过程,因此自变量对因变量在空间的不同区域也会有同样的影响(即回归方程的系数在空间上保持不变).然而在很多情况下,自变量与因变量之间的关系会在空间上发生变化,地理加权回归就是一种空间变系数的模型,可以分析驱动因素在空间上的异质性.其公式如下:

$$Y_i = \alpha_0(i) + \sum_{k=1}^p \alpha_k(i) X_{ik} + \varepsilon_i, i = 1, \dots, n \quad (3)$$

式中: Y_i 为被解释变量矩阵; X_{ik} 是解释变量矩阵; $\alpha_k(i)$ 为观察点 i 上第 k 个回归系数; ε_i 为模型残差.

从式(3)可以看出,GWR 模型的回归参数 α 可以随着空间位置 i 的变化而变化,其表达式为:

$$\alpha'(i) = (X^T W X(i))^{-1} X^T W(i) Y \quad (4)$$

式中: W 为 GWR 模型中的空间权重矩阵,本文选择 Gauss 形式的核函数来计算 GWR 模型中的空间权重矩阵,表达式如下:

$$W_{ij} = \exp\left[-\frac{(d_{ij}/h)^2}{2}\right] \quad (5)$$

式中: W_{ij} 表示城市 i 和城市 j 之间的权重影响; h 为模型的带宽,带宽越大,则“借点”的个数越多,权重影响随着距离 d_{ij} 的增加,衰减的越慢,反之亦然;带宽 h 是地理加权回归模型中除核函数形式外最为重要的参数,本研究依据赤池信息准则(AICc)来确定模型的最优带宽^[23].

2 结果与讨论

2.1 中国城市热岛的空间分布模式

从图 1 中可以看出,中国的绝大多数城市存在着明显的城市热岛现象,从日间来看,华北和西北地区的 SUHI 强度明显低于南方,甚至部分城市出现了“城市冷岛”的现象,即城市地区温度低于周围郊区.大部分城市的 SUHI 数值处于 1~2℃之间,个别城市超过了 3℃.从夜间来看,SUHI 强度没有明显的纬度差异,绝大多数城市的 SUHI 强度集中在 0.5~1℃之间.

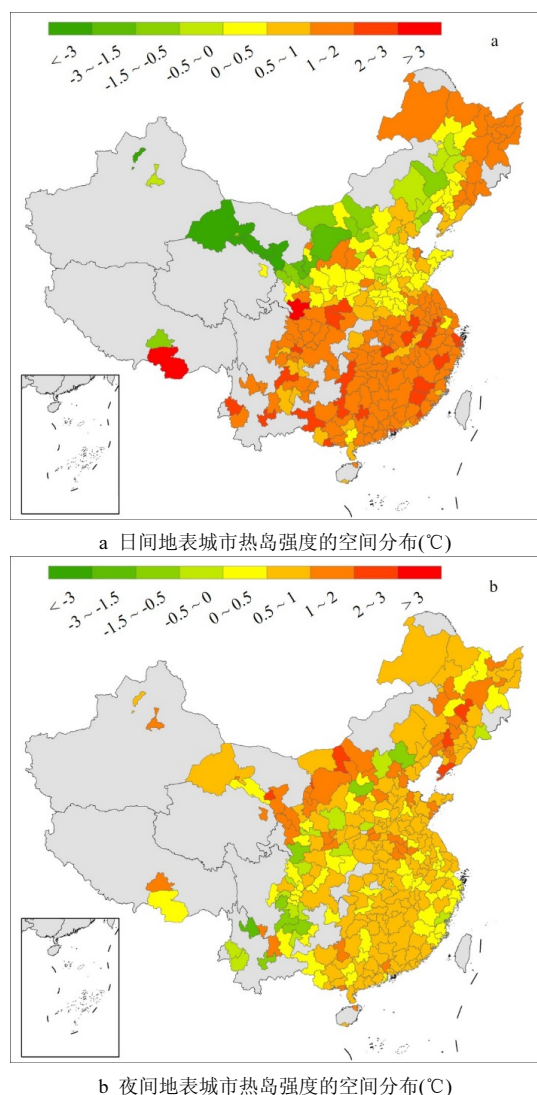


图 1 中国地表城市热岛强度的空间分布模式

Fig.1 Spatial distribution pattern of SUHI intensity in China

审图号:GS(2021)3719 号,灰色表示未纳入计算的地区,下同

为了进一步量化分析 SUHI 强度的空间模式,分别计算了日间和夜间的全球 Moran's I 指数,结果显示日间和夜间的 Moran's I 指数分别是 0.448 和

0.286,对应的 Z 值分别为 17.62 和 10.51.这说明 SUHI 强度具有显著的正向空间自相关性,并且日间明显高于夜间.为了确定出现空间集聚的地区,本文计算了日间和夜间 SUHI 强度的局部 Moran's I 指数,并绘制了其空间分布的 Lisa 聚集分布(图 2.).从图 2 可以看出,日间 SUHI 的高-高集聚主要集中在东南沿海地区及中部地区,而低-低集聚则主要集中在京津冀、内蒙古等华北地区.夜间 SUHI 的空间集聚模式与日间有很大差异,不仅出现显著集聚情况的地区明显减少,集聚的方式也出现相反的特征.低-低集聚仅出现在东南沿海的杭州及其周边地区、西南的川渝及其周边地区,高-高集聚仅出现在中部的开封、阜阳及周边地区、东北的沈阳及其周边地区以及内蒙古的呼包鄂地区.

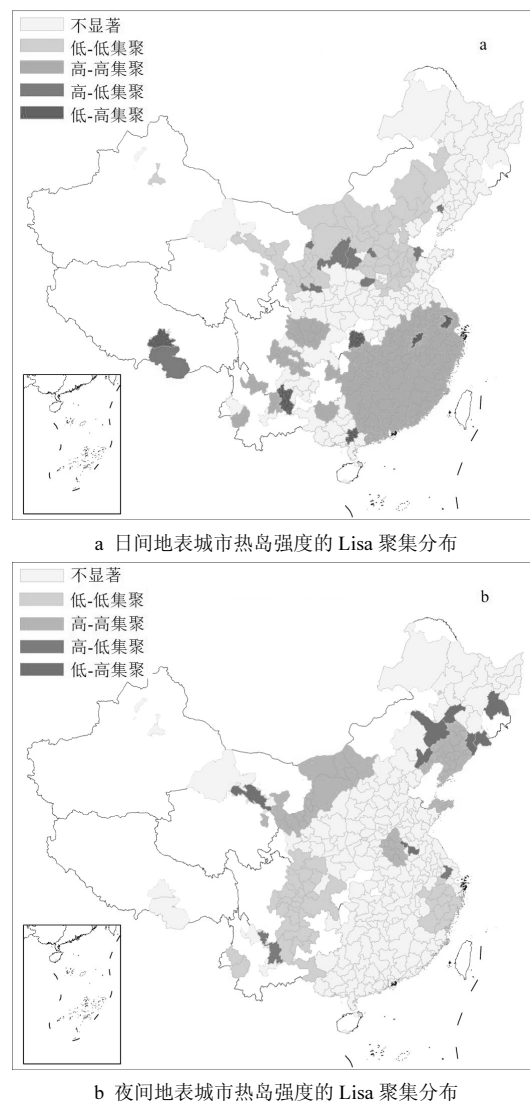


图 2 中国地表城市热岛的空间集聚模式

Fig.2 Spatial clustering pattern of SUHI intensity in China

通过上述对空间特征的分析,发现中国城市空间的 SUHI 强度存在明显的空间自相关,并且日间和夜间的模式也有很大的不同.因此,使用包括普通多元线性回归在内的各种全局模型分析 SUHI 的驱动因素时,难以避免的会忽略其数据本身存在的空间异质性,因此有必要引入地理加权回归模型进行分析.

2.2 地理加权回归结果分析

对于驱动因素的选择,主要依照两项原则:①已有研究使用过且显示为显著;②尽可能精简.因此本文所选取的驱动因素共 6 个,包括 3 个自然因素变量:城乡植被差异 ($\Delta NDVI$)、城乡降水差异 ($\Delta precipitation$)以及城市的空气污染水平($PM_{2.5}$),3 个社会经济因素变量:平均夜间灯光值(NTL)、人口 ($population$)以及建成区面积($built-up\ area$).

表 1 为 GWR 模型运算结果的汇总.为了便于分析各驱动因素对 SUHI 强度的相对贡献大小,本研究对所有数据进行了标准化,因此模型运算得到的回归系数均为无量纲的标准化回归系数,同一模型内可以直接比较不同驱动因素对 SUHI 的相对贡献程度.通过对 GWR 系数结果的整理与统计,共构建了

最大值、最小值、平均值、中位数和标准差 5 项统计指标.模型诊断信息部分汇报了 GWR 模型和对应的 OLS 模型的 决定系数、调整决定系数、赤池信息准则值和残差平方和 4 项,从而分析 GWR 模型相比传统全局模型的优劣.从结果来看,日间和夜间模型的最佳带宽分别为 79 和 80,带宽即 GWR 模型运算中“借点”的个数,相比于模型总体变量数(284)可以大致认为本模型为省级尺度和全国级尺度之间的局部区域模型.日间和夜间 GWR 的模型解释力分别为 0.876 和 0.651,日间模型的解释程度明显高于夜间,并且日间模型也具有更低的 AIC_c 值和更小的残差平方和.但是相比于 OLS 模型,夜间的 GWR 模型明显具有更大的提升,决定系数提升了超过 3 倍,这在一定程度上表明,夜间的 SUHI 强度的空间过程存在更显著的空间变异性.针对具体的驱动因素来看,除日间 GWR 模型中植被的系数均为负值外,其余变量的影响方向会改变,这种情况的出现表明,各驱动因素对 SUHI 的影响会随着空间位置的变化有着结构性的差异.总体来看,植被和建成区面积通常对于 SUHI 具有更显著的影响,但仅从统计表无法分析驱动因素在局部空间的异质性.

表 1 GWR 模型结果汇总
Table 1 GWR model results summary

参数		日间						夜间					
		植被	降水	空气 污染	夜间 灯光	年末总人 口人	建成区 面积	植被	降水	空气 污染	夜间 灯光	年末总人 口人	建成区面 积
回归系 数	最大值	-0.076	0.477	0.301	0.851	0.209	1.841	1.255	0.503	0.682	1.454	1.504	2.402
	中位数	-0.495	0.087	-0.066	0.065	-0.103	0.121	-0.052	0.066	0.218	0.286	0.050	0.037
	最小值	-1.770	-0.191	-0.354	-0.864	-0.563	-0.375	-0.589	-0.556	-0.267	-0.428	-1.886	-0.941
	标准差	0.360	0.130	0.122	0.225	0.321	0.111	0.509	0.185	0.195	0.477	0.493	0.474
	平均值	-0.590	0.111	-0.052	0.033	0.200	-0.007	0.057	0.102	0.211	0.360	0.120	0.039
带宽		79						80					
决定系数		0.876						0.651					
决定系数(OLS)		0.659						0.189					
调整决定系数		0.845						0.569					
调整决定系数(OLS)		0.652						0.171					
赤池信息准则值		357.644						605.099					
赤池信息准则值(OLS)		516.849						762.989					
残差平方和		35.156						99.066					
残差平方和(OLS)		96.815						230.325					

从图 3 中可以看出,日间模型的整体解释程度更高,日间和夜间的决定系数区间分别是 0.28~0.93 以及 0.27~0.78.无论是日间和夜间,模型在中部和西部地区的解释程度相对更高,日间解释程度最低的

地区位于西南云贵地区、东部的浙江地区和北部的山东地区,而夜间解释程度最低的地区则主要集中在东北.这说明上述地区可能由于其相对独特的城市发展模式、建筑特征和能源消费结构等难以量化

的因素对 SUHI 有较大的影响,导致现有模型无法对上述地区 SUHI 强度的变化规律进行良好的解释。

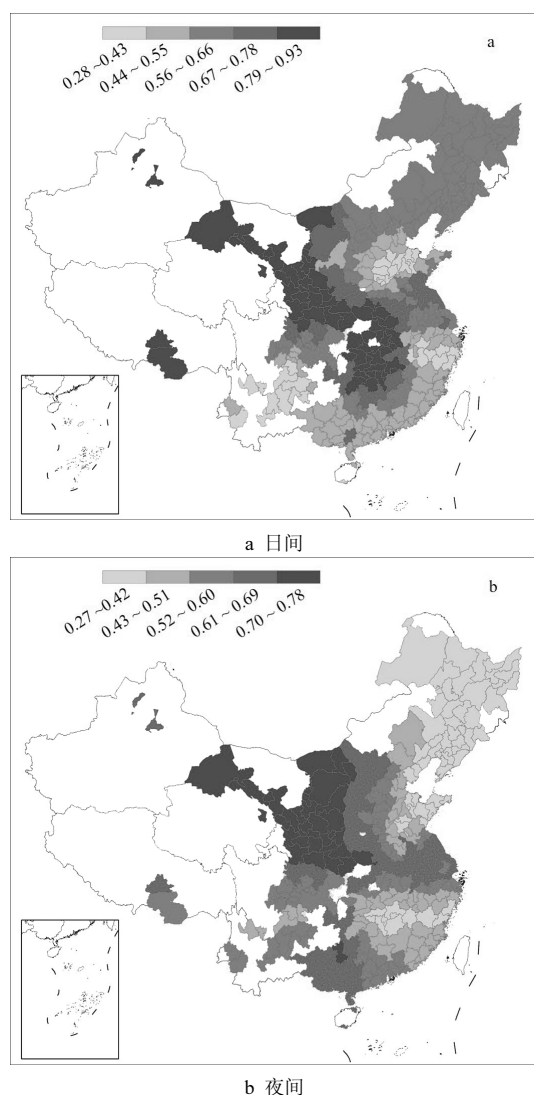


图3 GWR 模型的决定系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the coefficient of determination of the GWR model

2.3 驱动因素的空间异质性分析

图4和图5分别为日间和夜间GWR模型中各个驱动因素系数的空间分布,只对10%的水平上显著的观测样本进行了绘制。

从日间来看,城乡植被的差异基本在全国范围都显著,并且在西北的影响程度明显高于东南地区,这可能是由于西北地区干旱风险的存在极大的提高了植被对SUHI强度的控制作用;空气污染在京津冀、甘肃和内蒙古自治区等北方地区对城市热岛有显著的正向影响,因此针对“2+26”通道城市开展的

PM_{2.5} 治理环境政策同样有助于日间城市热环境的改善,除此之外,PM_{2.5} 在安徽、河南、山东、湖北等中东部地区,广西、湖南等南部地区有着负向的影响,这说明日间城市热岛受PM_{2.5}影响的规律随着纬度变化可能会有所改变,PM_{2.5}浓度的增加并非总会增强SUHI的水平;城乡降水差异对城市热岛的影响在大部分地区均为正向,并且在华中地区有着明显的集聚,这可能是由于城市化进程改变了局地的气候,从而进一步恶化了城市热环境;从社会经济驱动因素的角度来看,人口对城市热岛的影响在部分地区显著为负,这与前人的研究有较大差异,例如Peng等^[11]的研究中发现,人口对SUHI强度的影响在多数情况下为负向但不显著,而Manoli等^[13]的研究则显示人口对SUHI强度通常有正向的影响.造成该结果的原因可能是以统计数据中的年末总人口这项指标表征人类活动强度分析其对SUHI的影响可能存在着一定程度不合理,因此导致包括本文在内多项研究对其分析结果并不稳健,甚至得到相反的结论.但由于本文的研究重点是SUHI强度驱动因素的空间异质性拓展分析,而年末总人口也是大量SUHI驱动因素分析中最常用的指标之一,为了更好的与既往研究相比较,仍然采用了本指标.综合讨论本研究与以往文献对于人口指标的经验分析结果表明,基于目前行政区尺度的人口统计数据,人类活动对城市热岛的影响机制尚不明确,因此大都市人口疏解对区域热环境改善的结果可能需要借助更多公共政策分析的工具才能准确量化.相较而言,建成区面积在大部分地区都对日间SUHI有着正向影响,在甘肃、湖南、湖北及贵州等地区最为显著.这说明部分地区城市建成区的扩张会极大地提高日间SUHI,但并非北京、上海或深圳等经济发达地区,并且在江苏、浙江的部分城市,建成区面积的影响甚至为负,因此通过限制城市面积的扩张对城市热环境的改善作用需根据不同地区具体分析.夜间灯光强度表征着城市化的强度,在上海、甘肃和内蒙古等地区对SUHI具有显著的正向影响,在陕西、湖南和重庆等地区的影响则显著为负,但在北京、深圳和广州等地区的影响则并不显著.这说明城市化水平对SUHI影响的机制十分复杂,应更充分考虑其与其他生态、社会指标的耦合协同控制作用从而进行综合评估.本文对于夜间灯光变量的分析相比于Li等^[24]同样利用本指标

的研究,提供了更多空间细节上的经验证据,可以更 有助于分析特定地区城市化强度对 SUHI 的影响。

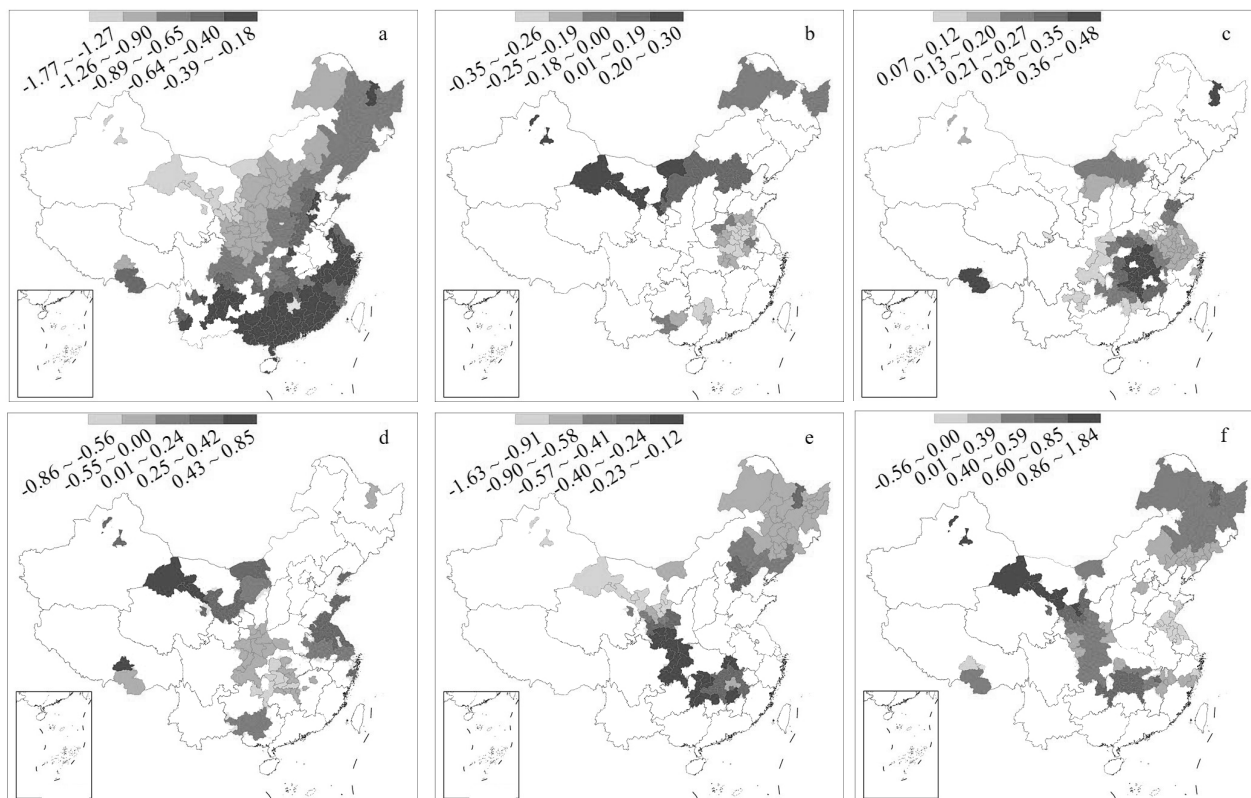


图4 日间 GWR 模型中变量回归系数的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of regression coefficients of variables in the daytime GWR model

a.城乡 NDVI 差异;b.PM_{2.5};c.城乡降水差异;d.夜间灯光;e.人口;f.建成区面积

从夜间来看,植被对 SUHI 的影响明显小于日间,并且在华北、西南和东北等地区存在着显著的正向影响,但是在中部等地区与日间同样存在着负向的影响,这表明植被类型和气候等因素会导致城乡植被的差异对 SUHI 强度的控制方式不同.前人研究通常认为植被对夜间 SUHI 有着负向的影响,但本文发现这种规律在空间上存在着明显的结构上的异质性.PM_{2.5} 对夜间 SUHI 的影响仅在东部和南方的部分地区有着显著的影响,且绝大多数情况下为正值,在安徽和湖北等地区的影响最强,说明 PM_{2.5} 在经济较发达的地区会显著影响夜间热环境,与日间的规律存在着纬度上的差异.而城乡降水差异则在华北和西北地区对 SUHI 有着显著的正向影响,同样与其日间的规律在纬度上来看有很大的不同.上述对 PM_{2.5} 和城乡降水差异与 SUHI 关系的分析说明,自然因素对 SUHI 的控制情况随着太阳辐射强度的改变有着明显差异,甚至存在着截然相反的控制规律,对城乡环境的改善需充分考虑日间和夜间的特点

从而采取不同的措施.社会经济驱动因素对 SUHI 的影响无论是强度和显著的范围相比日间明显有所增大.夜间灯光在北方基本对所有城市均有着显著的影响,且绝大多数地区均为正值,这说明北方地区城市的发展强度显著提高了 SUHI.人口对 SUHI 的影响在西部地区的甘肃、云南、广西等地区显著为负,而在东北地区则显著为正,建成区面积对 SUHI 的影响则恰好相反,在东北地区为负,西部地区为正.这说明人类的活动与城市发展对夜间 SUHI 的影响机制存在较大的差异,针对夜间的城市热岛减缓需要权衡两者之间的关系从而针对不同地区制定相关的国土空间规划或人口政策.

综合分析本研究所涉及的 6 项驱动因素发现,所有因素对 SUHI 影响的空间异质性都十分显著,说明了本研究应用 GWR 模型进行分析的必要性.GWR 模型的结果相比传统的全局线性回归模型提供了大量包含空间位置信息的具体细节,因此对于驱动因素的分析则更侧重于得到不同城市、

地区的针对性结论.但总体来看,植被作为城市温度的调节器对 SUHI 的控制作用最为强烈,日间显著为负,而夜间则根据地理位置的不同在部分地

区存在正向的影响;其次为夜间灯光、人口和建成区等社会经济因素,最后为降水和 $PM_{2.5}$ 等自然和气象因素.

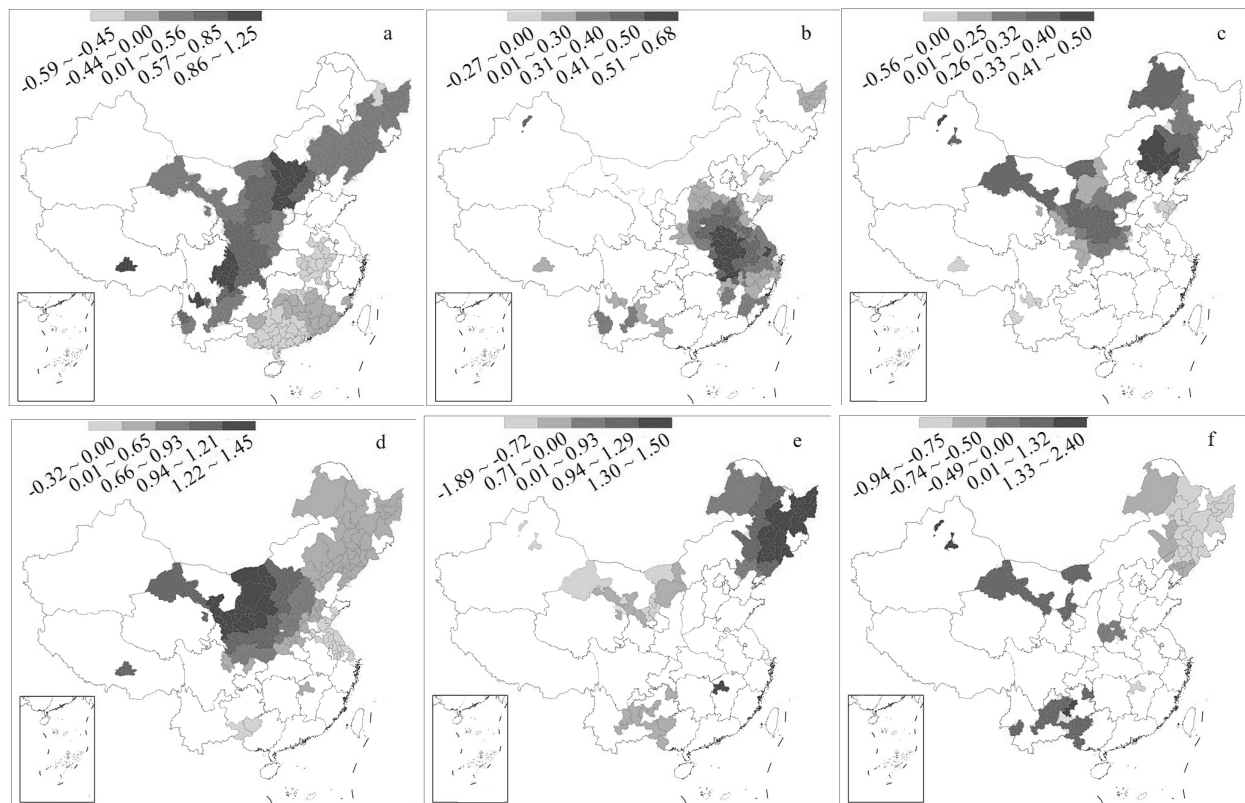


图5 夜间 GWR 模型中变量回归系数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of regression coefficients of variables in the nighttime GWR model

a.城乡 NDVI 差异;b. $PM_{2.5}$;c.城乡降水差异;d.夜间灯光;e.人口;f.建成区面积

3 结论

3.1 中国的地表城市热岛存在着显著的空间自相关性,因此以往利用全局模型忽略了其空间性的驱动因素研究可能存在偏误.而 GWR 模型不仅显著的提高了模型的解释力,并且从空间变系数的角度提供了更丰富的驱动力解释信息.除日间的城乡植被因素差异外,其余驱动因素对地表城市热岛强度的影响方向均存在着结构性的差异.

3.2 总体来讲,植被基本在全国所有地区都是日间城市热岛最主要的驱动力,城乡植被差异的减小可以显著的降低日间的 SUHI,而空气污染和社会经济驱动因素对 SUHI 的影响则根据地理位置的不同有着显著的差异,例如京津冀地区的空气污染水平对 SUHI 有着显著的正向影响.

3.2 城市热环境的影响机制复杂、空间异质性强,

其治理与改善需要社会多方的长期努力.本研究建议无论是面向高质量发展的国土空间布局优化或城市环境改善的具体政策的制定,都应当充分考虑区域间的特点因地制宜的采取不同的举措.例如,限制城区面积的扩张对日间城市热岛的减缓可能在一些中部地区和西北更为有效,而空气污染的协同治理则是中东部地区夜间城市热环境改善的最有效的举措之一.

参考文献:

- [1] Howard L. Climate of London deduced from meteorological observation [J]. Harvey and Darton, 1833,1(3):1-24.
- [2] Lai J, Zhan W, Huang F, et al. Identification of typical diurnal patterns for clear-sky climatology of surface urban heat islands [J]. Remote Sensing of Environment, 2018,217:203-220.
- [3] Schwarz N, Manceur A M. Analyzing the influence of urban forms on surface urban heat islands in Europe [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2015,141(3):A4014003.

- [4] Clinton N, Gong P. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,134:294–304.
- [5] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, et al. The footprint of urban heat island effect in China [J]. *Scientific Reports*, 2015,5(1):1–11.
- [6] Quan J L, Zhan W F, Chen Y H, et al. Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2016,121(6):2638–2657.
- [7] Chakraborty T, Lee X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019,74: 269–280.
- [8] 赵安周,裴 韬,曹 森,等.京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(4):1825–1833.
- Zhao A, Pei T, Cao S, et al. Impacts of urbanization on vegetation growth and surface urban heat island intensity in the Beijing–Tianjin–Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(4):1825–1833.
- [9] 胡李发,谢元礼,崔思颖,等.关中平原城市群夏季城市热岛特征及驱动力分析 [J]. *中国环境科学*, 2021,21(3):45–57.
- Hu L F, Xie Y L, Cui S Y, et al. Characteristics and driving forces analysis of urban heat island in Guanzhong Plain urban agglomeration in summer [J]. *China Environmental Science*, 2021,21(3):45–57.
- [10] 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 J R, Chen Z Z, WU T T, et al. Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989–2015 [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4):1734–1743.
- [11] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2):696–703.
- [12] Zhou D, Zhao S, Zhang L, et al. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016,176:272–281.
- [13] Manoli G, Fatichi S, Schl pfer M, et al. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population [J]. *Nature*, 2019,573(7772):55–60.
- [14] Li D, Liao W, Rigden A J, et al. Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? [J]. *Science Advances*, 2019,5(4):eaau4299.
- [15] Wan Z M. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014,140:36–45.
- [16] Wei J, Li Z, Lyapustin A, et al. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM_{2.5} data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021,252:112136.
- [17] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2019,11(4):1931–1946.
- [18] Li X, Zhou Y, Zhao M, et al. A harmonized global nighttime light dataset 1992–2018 [J]. *Scientific Data*, 2020,7(1):1–9.
- [19] 中国统计出版社《中国城市统计年鉴》[M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
- China Statistics Press. China city statistical year book [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [20] Niu L, Tang R, Jiang Y, et al. Spatiotemporal patterns and drivers of the surface urban heat island in 36 major cities in China: A comparison of two different methods for delineating rural areas [J]. *Sustainability*, 2020,12(2):478.
- [21] Lai J, Zhan W, Huang F, et al. Does quality control matter? Surface urban heat island intensity variations estimated by satellite-derived land surface temperature products [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018,139:212–227.
- [22] Moran P A. Notes on continuous stochastic phenomena [J]. *Biometrika*, 1950,37(1/2):17–23.
- [23] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships [M]. John Wiley & Sons, 2003.
- [24] Li Y, Sun Y, Li J, et al. Socioeconomic drivers of urban heat island effect: Empirical evidence from major Chinese cities [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,63:102425.

作者简介: 牛 陆(1993–),男,内蒙古乌海人,中国人民大学博士研究生,主要从事城市土地管理,城市遥感等方面的研究.发表论文 10 余篇.