DOI：10.19789/j.1004-9398.2023.05.011
文献引用：李雨露，孟丹，郭晓彤，等.北京市地表温度的季节变化及其驱动因素空间异质性分析[J].首都师范大学学报（自然科学版），2023，44（5）：69-79. LI Y L，MENG D，GUO X T，et al. Seasonal variation of land surface temperature and the spatial heterogeneity of its driving factors in Beijing[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2023，44（5）：69-79.

北京市地表温度的季节变化及其驱动因素空间异质性分析*

李雨露，孟　丹**，郭晓彤，宋加颖

（首都师范大学资源环境与旅游学院，北京　100048；水资源安全北京实验室，北京 100048；
北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地，北京 100048；
资源环境与地理信息系统北京市重点实验室，北京 100048）

摘要：探究城市地表温度（LST）的驱动机制，对于缓解城市热岛效应、构建健康舒适的城市人居环境具有重要意义。本研究利用2020—2021年4期的Landsat遥感影像反演北京市LST，探讨了城市热岛效应的季节变化，并采用地理探测器分析地表覆盖、地形、社会经济和气象4种驱动因素对LST的解释程度。进一步采用地理加权回归（GWR）模型分析LST驱动因素的空间分异性，结果表明：（1）北京市的城市热岛效应随季节变化明显，夏、秋2个季节热岛区集中分布于城区，春、冬2个季节热岛区分布较为分散；（2）LST的驱动因素存在季节变化，春季LST的主要驱动因素由高到低排序为归一化植被指数（NDVI）、改进的归一化差异水体指数（MNDWI）、数字高程模型（DEM），夏季LST的主要驱动因素由高到低排序为NDVI、DEM、MNDWI，秋季LST的主要驱动因素由高到低排序为DEM、夜间灯光、气温，冬季LST的主要驱动因素由高到低排序为气温、夜间灯光、MNDWI；（3）夏季LST驱动因素的空间异质性显示，NDVI、MNDWI和不透水面比例与LST之间的关系空间变异较小，道路密度、夜间灯光、DEM、风速、湿度和气温与LST之间的关系空间变异较大。

关键词：地表温度；地理探测器；地理加权回归模型；驱动因素；空间异质性
中图分类号：X16　　**文献标识码**：A

Seasonal variation of land surface temperature and the spatial heterogeneity of its driving factors in Beijing*

LI Yulu，MENG Dan**，GUO Xiaotong，SONG Jiaying

（College of Resources Environment and Tourism，Capital Normal University，Beijing　100048；
Beijing Laboratory of Water Resource Security，Beijing 100048；State Key Laboratory Incubation
Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation，Beijing 100048；Beijing
Municipal Key Laboratory of Resources Environment and GIS，Beijing 100048）

Abstract：Exploring the driving mechanism of urban Land Surface Temperature（LST）is of great significance to alleviating the Urban Heat Island（UHI）effect and building a healthy and comfortable

收稿日期：2022-09-12
* 北京市社会科学基金重大规划项目（21ZDA04）
** 通信作者：mengdan@cnu.edu.cn

urban living environment. Four Landsat remote sensing images representing the four seasons in 2020 and 2021 were used in the paper to invert the LST of Beijing, then the seasonal changes of the UHI effect were discussed. Then geographical detector model was used to analyze the interpretation degree of LST by four types of driving factors including land cover, topography, social economy, and meteorology. Furthermore, the Geographically Weighted Regression (GWR) model was used to analyze the spatial heterogeneity of LST's driving factors. The results showed that: (1) the UHI effect in Beijing varied obviously with seasons. The heat island areas were concentrated in urban areas in summer and autumn, and most of the heat island areas were scattered in the whole study area in spring and winter. (2) The driving factors for LST varied with seasons. The main driving factors of LST in spring were ranked from high to low as normalized difference vegetation index (NDVI), modified normalized difference water index (MNDWI), digital elevation model (DEM); the main driving factors of LST in summer were ranked from high to low as NDVI, DEM, MNDWI; the main driving factors of LST in autumn were ranked from high to low as DEM, nighttime light, air temperature; the main driving factors of LST in winter were ranked from high to low as air temperature, nighttime light, MNDWI. (3) Took exploring the spatial heterogeneity of the driving factors for LST in summer as an example, the results showed that the relationships between NDVI, MNDWI, the proportion of impervious surface and LST had little spatial variation, the relationships between road density, nighttime light intensity, DEM, wind speed, humidity, air temperature and LST had great spatial variation.

Keywords: land surface temperature; geographic detector; geographic weighted regression model; driving factors; spatial heterogeneity

CLC: X16 **DC**: A

0 引 言

城市热岛(urban heat island, UHI)效应是一种由于城市建筑及人类活动导致热量在城区空间范围内聚集的现象,是城市气候最显著的特征之一[1]。城市热岛通过改变城市热环境,不仅会影响生态环境,如区域气候、植被生长、城市水文和空气质量等,而且会影响人类健康[2-3]。因此,围绕UHI的驱动机制展开研究,对缓解UHI效应,提高人居生活质量具有重要意义。通过遥感热红外波段对地表温度(land surface temperature, LST)进行反演,可快速高效获得大范围LST信息,所以目前遥感已成为监测UHI的主要手段[4]。

UHI的驱动因素可概括为地表覆盖、社会经济、地形和气象4个方面。地表覆盖状况的变化导致地表反照率、表面热、湿度、粗糙度和发射率产生变化,从而导致地表温度变化,研究中常用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、归一化建筑指数(normalized difference built-up index, NDBI)、改进归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)、不透水面比例以及绿地比例等来表征地表覆盖因素[5-9],近来也有研究用城市空间形态指数表征地表覆盖情况[10];社会经济的发展会增加人为热排放,从而引起LST的改变,研究中常用夜间灯光数据[11]、人口密度数据[12]和国内生产总值(gross domestic product, GDP)[13]来表征社会经济因素;地形因素中海拔高度的升高导致LST的改变[14],特别对于山地城市来说,城市表面高程对于LST有全局性约束力[15];气象因素中的风速、湿度和气压对LST存在一定的影响[16],且研究表明气压对于冬季UHI具有主导作用[17]。目前,学者们采用回归分析[18]、皮尔逊相关分析法[19-20]、偏相关分析法[21]、空间主成分分析法[7]、地理探测器[22-23]和地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型[24]等多种方法,从不同的时间尺度探究UHI与驱动因素之间的关系。其中地理探测器和GWR模型由于其考虑了地理现象特有的空间异质性,近年来在UHI的驱动机制分析中广泛使用。Zhou等[25]使用地理探测器方法分析了驱动因素及其相互作用对长江三角洲温度过程的影响;葛静茹等[8]采用GWR模型分析武汉市都市发展区、生态绿楔以及主城区4个季

节的LST和各驱动因素的作用机制。地理探测器是对地理现象归因进行全局性分析,GWR模型则是对地理现象进行局部回归分析,GWR模型与地理探测器结合能更精确地分析驱动因素的作用方式,所以也有学者将二者结合起来对地理现象进行归因分析[26]。

UHI的时空分布变化明显,不仅在长时间序列上存在变化[27-29],还有昼夜差异[30]和季节性差异[31-32]。UHI的驱动因素中,地表覆盖和气象因素季节差异明显。尽管许多研究探讨了UHI的驱动机制,但目前的研究中较少分析不同驱动因素的季节差异及其空间异质性。本研究选取北京作为研究区域,基于2020—2021年不同季节的Landsat8 OLI/TIRS影像,分析UHI效应在不同季节的空间分布情况;采用地理探测器分析地表覆盖、社会经济、地形和气象4种驱动因素对LST的解释程度,并进一步采用GWR模型分析探讨LST驱动因素的空间异质性,以期为制定缓解首都UHI效应的政策,提供一定的参考。

1　研究区与数据源

1.1　研究区概况

北京位于华北平原北部,背靠燕山,毗邻天津市和河北省,总面积约为1.64万km^2。北京的西部、北部和东北部为山地(海拔1 000~1 500 m),东南部为平原(海拔20~60 m)。平原地区以农田和建设用地覆盖为主,山地地区以植被覆盖为主,植被类型随海拔变化。北京的气候为暖温带半湿润半干旱季风气候,年均降水470~660 mm,四季分明,冬季干燥,春季多风,夏季多雨,秋季晴朗温和,年平均气温10~12 ℃。北京作为超大城市,生产总值长期位于全国前列,社会经济发展水平高。本文的研究区包括了北京市大部分范围(受Landsat8单景遥感影像覆盖范围所限),如图1中遥感影像覆盖区域。

1.2　数据源及预处理

本研究使用的数据包括遥感影像数据、道路及水系矢量数据、土地利用数据、数字高程模型(digital elevation model,DEM)和夜间灯光数据等。(1)遥感影像数据为Landsat8影像(http://www.gscloud.cn),选择2020年4月13日、10月22日、12月25日和2021年6月19日共4期(云量均<1.00%),用于反演LST以及计算地表覆盖指数。(2)道路及水系矢量数据源于OpenStreet MAP网站(https://www.openstreetmap.org),用于计算道路密度与水系密度。

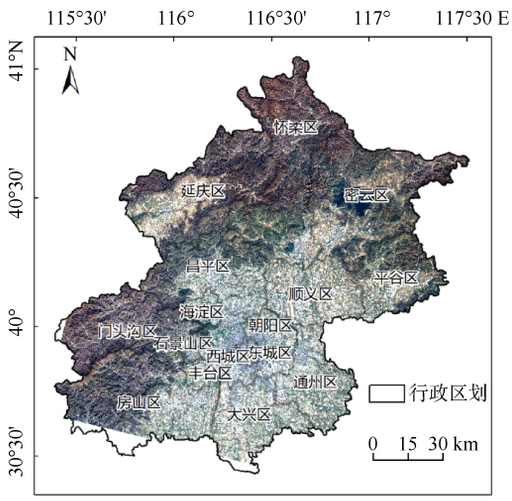


图1　研究区(底图为2021年6月19日Landsat 8真彩色遥感影像数据)

(3)土地利用数据选择2020年度Globaland30数据集(http://www.globallandcover.com),用于计算不透水面比例。(4)DEM选择航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)数据(http://www.gscloud.cn),表征地面高程。(5)夜间灯光数据选择中科院版2019年地球夜间灯光数据集产品——火石(Flint)数据集(https://pan.baidu.com/s/17UqS7P66_6AMdr-a4sfUXA),该产品是基于NPP/VIIRS数据而整理得到,相对于原有的产品,该产品具有更高的准确性与稳定性[33],表征社会经济的发展水平。(6)采用2020年4月13日、10月22日、12月25日和2021年6月19日上午11时的北京383个自动气象观测站的气温、风速和湿度数据,表征气象驱动因子。

2　研究方法

2.1　LST的反演算法

本研究采用大气校正法[34]反演LST。大气校正法原理是首先估计大气对地表热辐射的影响,然后把这部分大气影响从卫星传感器所观测到的热辐射总量中减去,从而得到地表热辐射强度,再把热辐射强度转化为相应的LST。计算公式为

$$L_{\text{surface}}=\frac{L_{\text{TOA}}-L_{\text{upper}}-\tau(1-\varepsilon)L_{\text{down}}}{\tau\varepsilon},\qquad(1)$$

式中:L_{surface}是地表辐射亮度;L_{TOA}是传感器端辐射亮度;L_{upper}、L_{down}是大气上、下行辐射亮度;τ为大气在热红外波段的透过率,可从NASA网站上(http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/)查询到;ε为地表比辐射率。ε使用Sobrino和Raissouni[35]提出的NDVI阈值法计

算,公式为:

$$\varepsilon = 0.004 \times P_{\mathrm{v}} + 0.986, \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{v}} = \frac{I_{\mathrm{NDV}} - I_{\mathrm{NDV_{soil}}}}{I_{\mathrm{NDV_{veg}}} - I_{\mathrm{NDV_{soil}}}}, \tag{3}$$

式中:I_{NDV}为归一化植被指数;$I_{\mathrm{NDV_{soil}}}$为完全是裸土或无植被覆盖区域的NDVI值;$I_{\mathrm{NDV_{veg}}}$则代表完全被植被所覆盖的像元的NDVI值,即纯植被像元的NDVI值。取经验值$I_{\mathrm{NDV_{veg}}}$= 0.70和$I_{\mathrm{NDV_{soil}}}$=0.05,即当某个像元的I_{NDV}>0.70时,P_{v}取值为1;当I_{NDV}<0.05,P_{v}取值为0。再根据普朗克黑体辐射定律和地表发射率,把地表辐射亮度转化为相应的温度值,计算公式为

$$T_{\mathrm{LS}} = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_{\mathrm{surface}}}\right)}, \tag{4}$$

式中K_1、K_2为常数。对于TIRS_{10}波段而言,K_1 = 774.89 W/(m²·μm·sr),K_2 = 1321.08 K。

2.2 LST分级标准

本研究采用均值-标准差法[36]对LST分区进行等级划分。均值-标准差法以LST相对于平均温度的变异程度为依据进行热场划分。划分标准如表1所示,高温区和次高温区则为热岛区。

2.3 LST的驱动因素分析

2.3.1 驱动因素筛选及计算

考虑到研究区地形复杂,社会经济发展不均匀的特点,本研究从地表覆盖因素(NDVI、NDBI、MNDWI、道路密度、水系密度、不透水面比例),地形因素(DEM),社会经济因素(夜间灯光强度),气象因素(风速、相对湿度、气温)4个方面11个因子指标用于分析LST驱动机制,详情如表2所示。

表1 LST分区划分标准

温度分区等级	LST范围
低温区	$< \mu - \sigma$
次中温区	$[\mu - \sigma, \mu - 0.5\sigma)$
中温区	$[\mu - 0.5\sigma, \mu + 0.5\sigma)$
次高温区	$[\mu + 0.5\sigma, < \mu + \sigma)$
高温区	$\geqslant \mu + \sigma$

注:表中LST为地表温度,μ为平均温度,σ为标准差。

2.3.2 地理探测器

对于具有空间自相关性质的地理现象来说,地理探测器[37]是探测空间分异性,及揭示其背后驱动力的一种有效方法。本研究将研究区域划分为1 km × 1 km的网格,采用自然间断法对不同的驱动因素进行重分类,分为9类,提取网格中心点的驱动因素类别,使用地理探测器中因子探测模块,分析各驱动因素对LST的解释程度。公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2}, \tag{5}$$

式中:L为驱动因素X的分层数,N_h和N分别为层h和研究区的单元数,σ_h^2和σ^2分别是层h和研究区的Y值的方差。q的值域为[0,1],值越大说明驱动因素X对因变量Y的解释程度越高,反之则越低。

表2 UHI效应的驱动因素

驱动因素类别	驱动因素	数据获取	备注
地表覆盖因素	NDVI	$(R_{\mathrm{NIR}} - R_{\mathrm{Red}})/(R_{\mathrm{NIR}} + R_{\mathrm{Red}})$	R_{NIR},R_{Red}分别表示近红外、红光波段的反射率
	NDBI	$(R_{\mathrm{MIR}} - R_{\mathrm{NIR}})/(R_{\mathrm{MIR}} + R_{\mathrm{NIR}})$	R_{MIR},R_{NIR}分别表示中红外、近红外波段的反射率
	MNDWI	$(R_{\mathrm{Green}} - R_{\mathrm{MIR}})/(R_{\mathrm{Green}} + R_{\mathrm{MIR}})$	R_{Green},R_{MIR}分别表示绿光、中红外波段的反射率
	道路密度	每平方千米内道路的总长度	单位为km/km²
	水系密度	每平方千米内水系的总长度	单位为km/km²
	不透水面比例	每平方千米内不透水面的面积占比	单位为%
地形因素	高温	DEM	单位为m
社会经济因素	夜间灯光强度	DN	DN值表示夜间灯光强度值
气象因素	风速	将DEM数据作为协同数据,通过协同克里金插值法,将气象站点数据处理为30 m×30 m的栅格数据,得到风速、湿度、气温数据	单位为m/s
	湿度		相对湿度,单位为%
	气温		近地2 m气温,单位为℃

注:NDVI为归一化植被指数;NDBI为归一化建筑指数;MNDWI为改进归一化差异水体指数;DEM为数字高程模型;DN为像元亮度值。

2.3.3　GWR模型

GWR模型是由Brunsdon等[38]针对变量空间非平稳性提出的建模方法,通过建立空间范围内每个点处的局部回归方程,来探索研究对象在某一尺度下的空间变化及相关驱动因素。GWR模型作为一种局部回归模型,可以分析不同驱动因素在不同区域中对于LST的影响程度。GWR模型公式为

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{k=1}^{n} \beta_k(\mu_i, v_i) x_{ik} + \theta_i, \qquad (6)$$

式中:y_i为因变量;$\beta_0(\mu_i, v_i)$为采样点在坐标(μ_i, v_i)上的回归常数;$\beta_k(\mu_i, v_i)$是采样点的第k个局部回归参数,n为驱动因素个数;x_{ik}为自变量在该样本点的值;θ_i为误差项。

GWR本质上是多元线性回归,且LST驱动因素的多元复杂性和相关性,因此在回归分析之前需要解决多重共线性问题;方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检验是最简洁的变量筛选方法[39]。本研究通过使用VIF < 7.5原则[31]筛选变量来解决多重共线性问题。

3　结果分析

3.1　北京地区4个季节的LST空间分布特征

3.1.1　LST反演结果

春、夏、秋、冬4个季节的LST空间分布如图2所示,具有明显的季节变化。春季的LST空间分布显示东南部温度略高于其他区域,夏季和秋季的LST呈现出较明显的东南部温度高,西部和北部温度低的分布特征,冬季LST则是全区域处于低温的状态。在统计上,地表温度由高到低排序为夏季、春季、秋季、冬季,平均地表温度及标准差依次为(36.31±5.05)、(30.33±3.91)、(14.76±3.28)、(0.95±2.89)℃。

3.1.2　LST分级结果分析

采用均值-标准差法对LST进行等级划分,结果见图3。总体而言,低温区主要分布在西北部山区,而高温区的分布在不同季节的空间分布差异较大。春季的高温区零星分布,聚集性不明显,中低温区主要分布在研究区西部、北部山区;夏季时,各温区

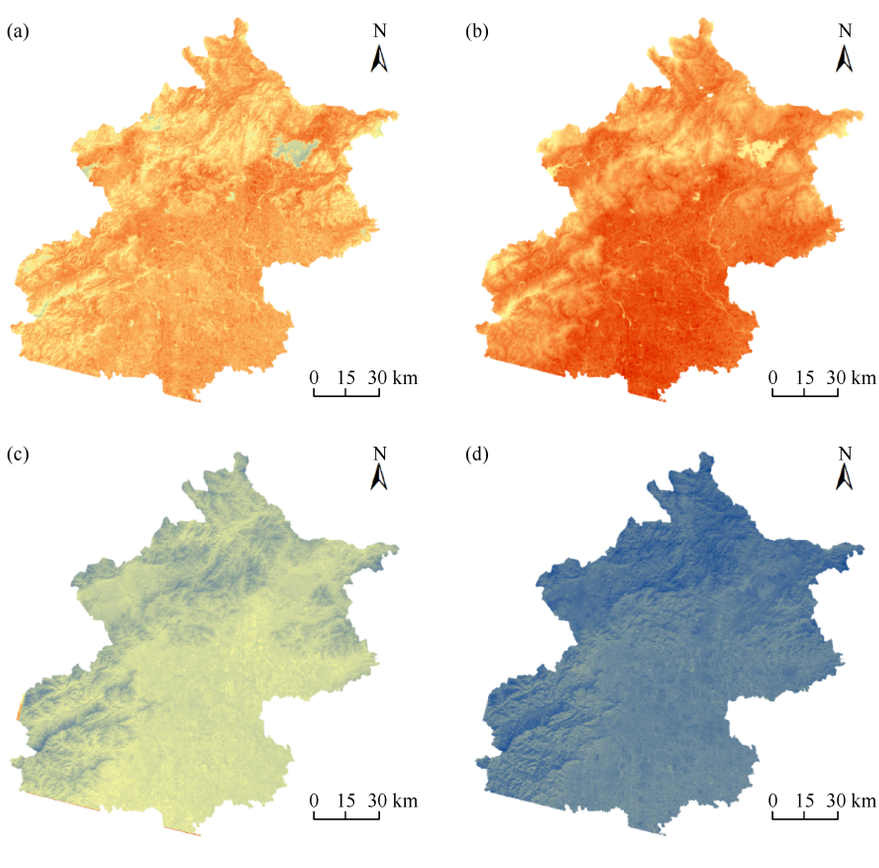


图2　北京市4个季节的LST空间分布

(a)春;(b)夏;(c)秋;(d)冬

的分布比较集中,次高-高温区大部分聚集在城区,低-次低温区分布在西部和北区山区;秋季的高温区也是大部分分布在城区,不过同夏季相比,秋季城区的高温区占比较少,次高温区和中温区也是城区的重要组成部分,低-次低温区分布在山地地区;在冬季,高温区较少分布于城区,主要分布于西部山区和北京的南部,中温区则主要分布于城区,低-次低温区主要分布于北部的山区。北京市4个季节LST分级面积统计见表3,中温区面积在4个季节里所占比例都是最高,春、夏、秋、冬分别为42.19%、35.06%、35.42%、39.76%;另外,高温区所覆盖的面积在夏季最大,为2 818.67 km^2。

3.2　LST驱动因素及其解释程度

3.2.1　LST驱动因素提取结果

本研究选用11个指标作为LST的驱动因素,其中,NDVI、NDBI、MNDWI、气温、风速和相对湿度存在季节变化,以夏季为例的结果见图4。NDVI均值为0.58,高值主要分布在西部、北部和东北部山地地区;NDBI均值为−0.27,西部、北部山地区域的值略微低于东南部;MNDWI均值为−0.40,在水域分布区域的值高,其他区域都较低。从东南平原到西北山区,研究区气温呈现逐渐降低的趋势;风速的高值区域分布于西部山地区域,往南风速逐步降低;相对湿度在城区最低,高值主要分布于研究区

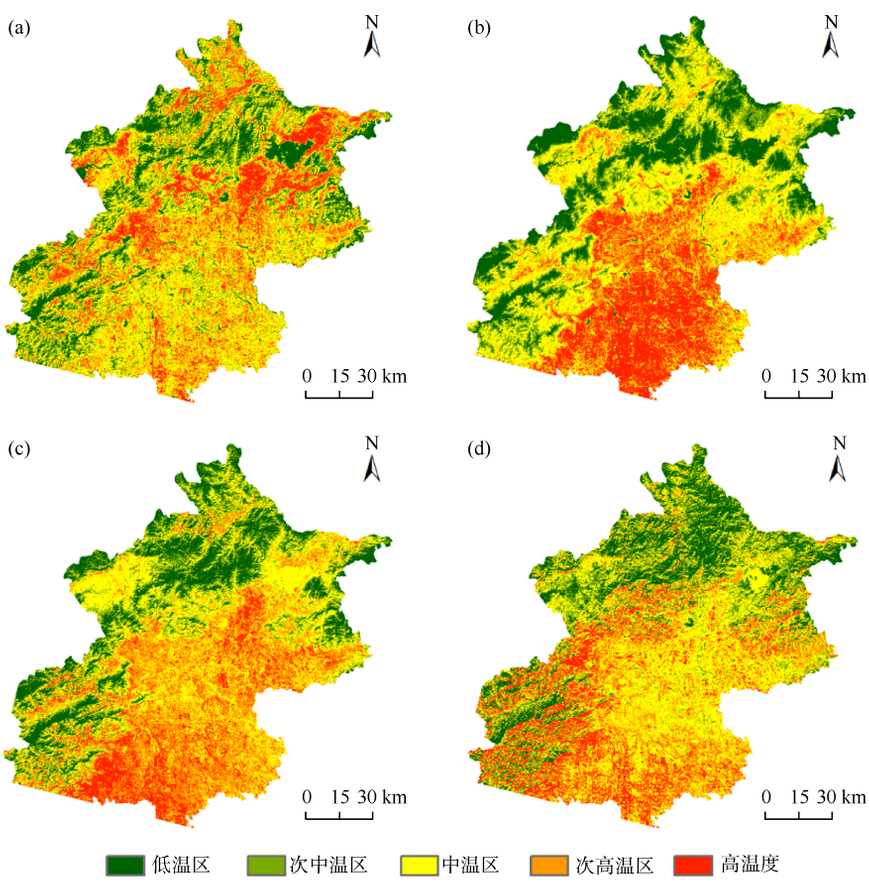


图3　LST等级空间分布

(a)春;(b)夏;(c)秋;(d)冬

表3　北京市4个季节的LST分级面积统计

温度分区等级	春		夏		秋		冬	
	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%
低温区	2 337.50	14.43	2 659.73	16.45	2 735.45	16.94	2 666.10	16.50
次低温区	1 905.04	11.76	2 350.44	14.54	1 637.72	10.14	1 825.77	11.30
中温区	6 834.16	42.19	5 668.84	35.06	5 719.93	35.42	6 423.56	39.76
次高温区	2 981.38	18.41	2 673.02	16.53	4 220.06	26.14	3 054.96	18.91
高温区	2 138.87	13.21	2 818.67	17.43	1 833.72	11.36	2 186.69	13.53

北部和西部区域。

基于本研究选用的数据,道路密度、水系密度、不透水面比例、DEM 和夜间灯光 5 个驱动因素视为无季节变化(图 5)。其中:道路密度、不透水面比例和夜间灯光的空间分布与 LST 的空间分布有一定相似性,高值区域集中分布于城区,反映了北京的城市化建设;水系密度的高值区域呈线状分布,具有连通性,在北部及东北部分布较稀疏,反映了水系在北京的分布情况;DEM 高值集中于西部、北部和东北部山区,东南平原较低。

3.2.2　驱动因素对于 LST 的解释程度

利用地理探测器的单因子探测分析 11 个驱动因素对 LST 的解释程度,用 q 值来衡量(图 6)。由图 6 可以看出,各因素对于 LST 的 q 值 0.004~0.617。在不同季节,驱动因素对 LST 的影响并不相同。春、夏、秋、冬对 LST 解释程度最高的 3 个驱动因素分别依次为 NDVI、MNDWI、DEM,NDVI、DEM、MNDWI,DEM、夜间灯光、气温,气温、夜间灯光、MNDWI。

相较于其他驱动因素,DEM 和社会经济因素夜间灯光在 4 个季节中 q 值较高,对于 LST 都存在较强的影响,说明人类活动对 LST 存在持续性的影响。而地表覆盖因素对于 LST 的解释程度在一定程度上都受到了季节的影响。其中,不透水面比例、道路密度和水系密度对于 LST 的解释程度在夏、秋季节较高,春、冬季节较低。NDVI、MNDWI 和 NDBI 对于 LST 的解释程度则受季节影响较大,在春、夏季节 NDVI 对 LST 的影响最大,证明了植被可以在城市温度调节中起重要作用;在秋、冬季节,植被对于 LST 的影响不明显。NDVI 的季节性作用可能是由于北京大部分植被为落叶类,秋、冬季节叶子较少,NDVI 值较低的缘故。MNDWI 对于 LST 的解释程度也是春夏较高,秋、冬季节较低。而 NDBI 仅在夏季对 LST 的解释程度较高,其他季节都较低。气象因素对 LST 的解释程度季节性变化明显,气温在夏、秋、冬 3 个季节对 LST 的解释程度高,在春季解释程度低。风速在夏季对 LST 的解释程度高,其他季节解释程度低。湿度在夏、秋季节对 LST 的解释程度高,在春、冬季节解释程度低。

3.3　LST 驱动因素的空间异质性探究

驱动因素对于不同季节 LST 的解释程度表明,各驱动因素对夏季 LST 的解释程度最高。故针对夏季,探究驱动因素对 LST 影响的空间异质性。由于水系密度对 LST 的解释程度低,在后续的分析不将其作为驱动因子参与分析。经共线性检验,NDVI、NDBI 和 MNDWI 存在多重共线性,去除解释程度最低的 NDBI 因素后通过共线性检验(VIF<7.5),最终选取不透水面比例(3.24)、道路密度(2.03)、夜间灯光(5.99)、DEM(3.5)、MNDWI(4.46)、NDVI

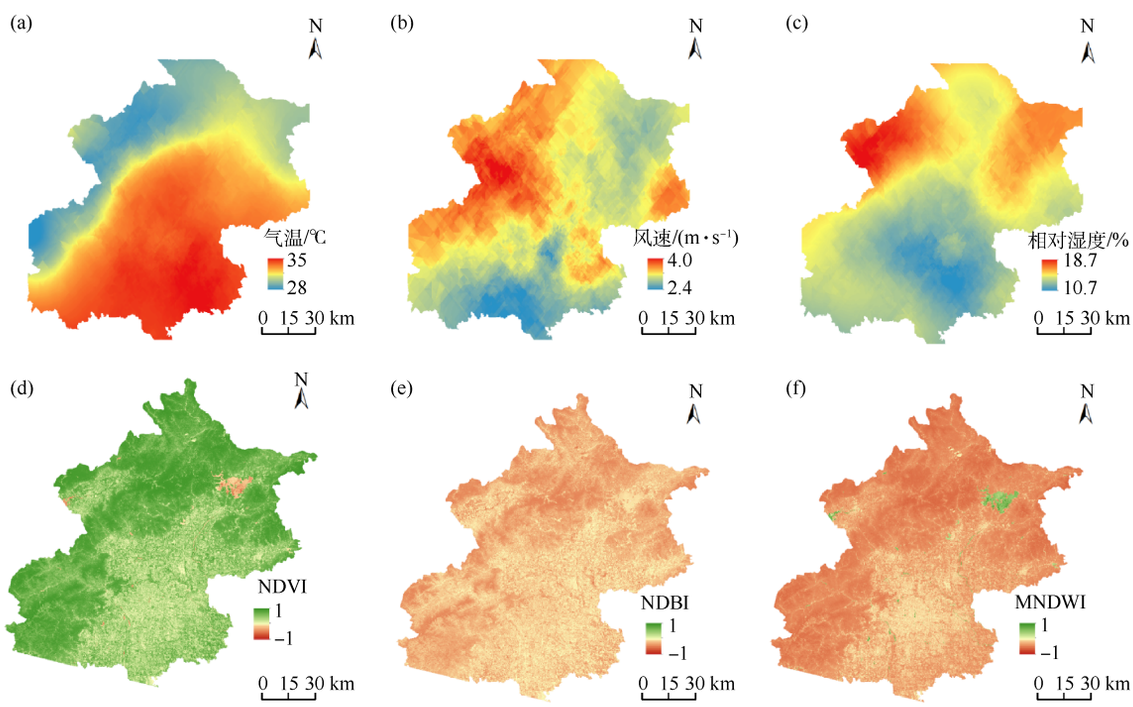


图 4　季节性驱动因素提取结果(以夏季为例)

(a)气温;(b)风速;(c)相对湿度;(d)NDVI;(e)NDBI;(f)MNWI

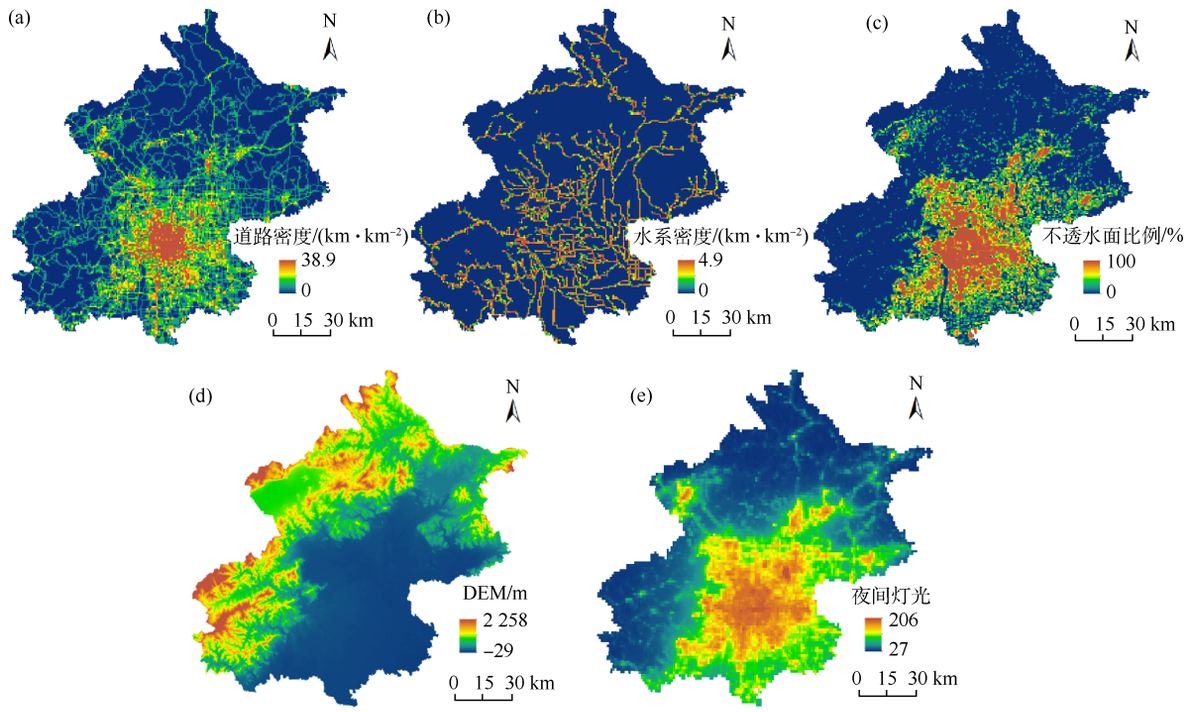


图5　非季节性驱动因素提取结果

(a)道路密度;(b)水系密度;(c)不透水面比例;(d)DEM;(e)夜间灯光

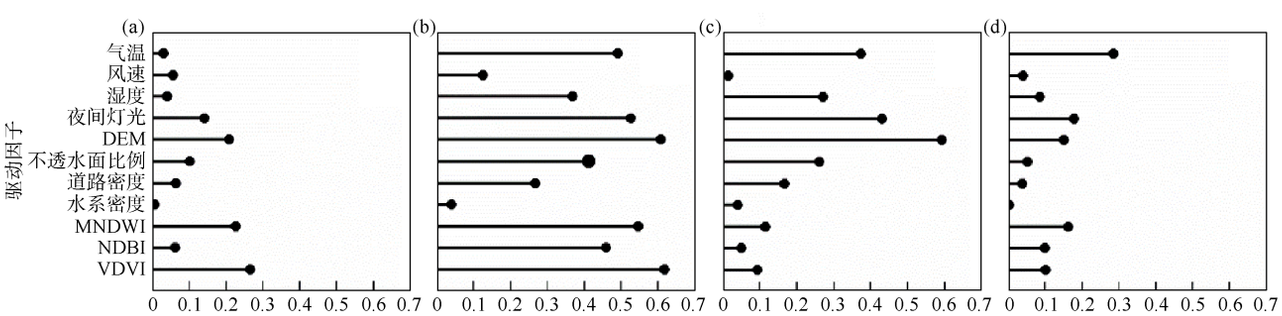


图6　北京市4个季节LST单因子探测q值

(a)春;(b)夏;(c)秋;(d)冬

(5.04)、风速(1.57)、湿度(3.14)和气温(6.9)共9个驱动因素。将LST及选取的驱动因素均重采样至1 km×1 km的空间分辨率,进行LST与其驱动因素的GWR分析。由于GWR分析之前需要诊断模型拟合效果,局部决定系数local R^2如图7所示。可见GWR模型的局部决定系数local R^2为0.11~0.88,高值主要分布在西部,北部山地区域,东南部较低。

各驱动因素的回归系数如图8所示,由图可见,各驱动因素与LST之间关系的空间异质性。在地表覆盖因素中,不透水面比例、MNDWI、NDVI与LST之间的关系比较稳定。不透水面比例与LST主要呈现正相关关系,而MNDWI、NDVI与LST之间的关系以负相关为主。而道路密度对LST的影响空间异质性明显,在城中心区域,道路密度与LST呈现负相关关系,而在郊区山地区域,道路密

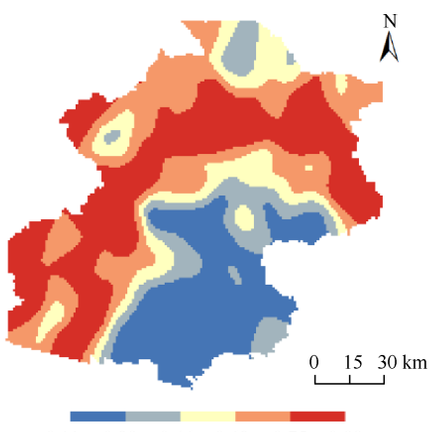


图7　GWR模型局部决定系数

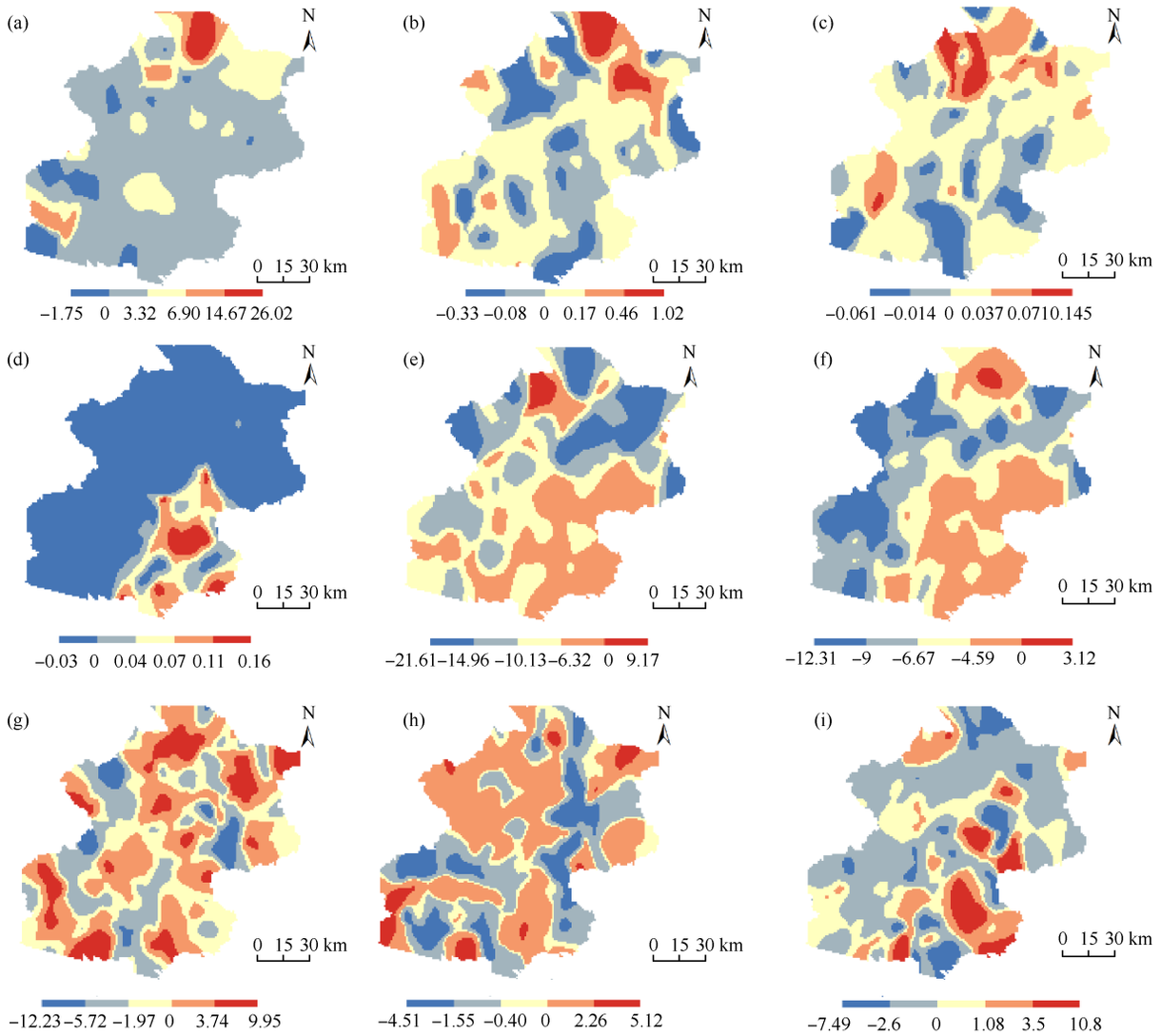


图 8　夏季 LST 各驱动因素的回归系数

(a)不透水面;(b)道路密度;(c)夜间灯光;(d)DEM;(e)MNDWI;(f)NDVI;(g)风速;(h)湿度;(i)气温

度与 LST 呈现正相关关系。夜间灯光与 LST 的关系存在空间异质性,在大部分区域(包括郊区,以及城区的部分区域),夜间灯光与 LST 呈现正相关关系,在东部和南部的部分区域,夜间灯光与 LST 呈现负相关关系。DEM 与 LST 的关系也具有明显的空间异质性,在东南部 DEM 与 LST 呈现正相关关系,而在西部、北部区域 DEM 与 LST 呈较弱的负相关关系。气象因素风速、湿度和气温与 LST 之间的关系也呈现出了明显的空间异质性。造成该空间异质性的原因,值得进行进一步的探究。

4　讨　论

本研究使用地理探测器、GWR 模型探究了北京地区各季节 LST 的主要驱动因素及其空间异质性,与其他研究结果还是存在一定的差异,如本研究表明春、夏季节 LST 的主导因素以地表覆盖因素为主,而秋、冬季节 LST 以社会经济和气象因素为主要驱动因素。Hu 等[40]研究了北京城区 LST 的季节变化及其驱动因素,结果表明地表覆盖中的 NDVI、NDBI 对春、夏、秋 3 个季节 LST 都起着主导作用,对冬季的 LST 影响不大。秋季 LST 的主导因素与本研究不太一致,其原因可能有 2 个方面,其一是该研究以 11 月 18 日影像数据代表秋季,本研究以 10 月 22 日影像数据代表秋季,获取影像时间不同从而导致分析结果存在差异;其二是该研究针对城区进行分析,本研究不仅包含城区,还包含郊区,在郊区山地地区 NDVI、NDBI 对于 LST 的主导性较弱,从而影响了本研究整体的分析结果。此

外,GWR模型分析结果表明对于夏季LST及其驱动因素来说,虽然GWR模型总体拟合程度较好,特别是在西部,北部山区,但是在东南城区的拟合程度不高。孙喆[24]使用GWR模型研究了夏季北京五环内城区形态要素与城市热环境之间的关系,局部拟合较好。说明对于高密度建成区的夏季城市热环境来说,城市空间形态也是重要的驱动因素。

本研究选取的驱动因子选取比较全面,包含了地表覆盖、地形、社会经济和气象因素,但是在驱动因素选择方面还是存在一定的不足。比如社会经济因素夜间灯光,由于杂散光污染,中高纬度地区5—8月像元失真严重,故本研究未采用月度数据,而是采用了2019年尺度数据进行分析,未能反映出社会经济因素的季节性变化。另外,地理探测器分析结果表明,夏季LST单因子探测q值较高,而其他季节的LST单因子探测q值较低,说明在春季、秋季和冬季,除了本研究所选的驱动因子之外,还有LST影响因子没有考虑到。有研究表明CO、SO_2和NO_2等大气污染物与UHI强度呈正相关[41],这些驱动因素对于LST以及UHI的影响,是下一步研究的方向。

5 结 论

本研究基于北京地区2020—2021年4期遥感影像,探讨北京地区LST在不同季节的空间分布,进而利用地理探测器和GWR模型探讨地表覆盖特征、地形、社会经济和气象因素对LST的影响,得出以下主要结论:

(1)北京市的LST和UHI强度的空间分布呈现出明显的季节变化特征。夏、秋季节,热岛区(高温区及次高温区)集中分布于城区,其中夏季高温区面积多于秋季高温区面积;而春、冬季节,城区内的UHI效应不显著。

(2)经地理探测器的单因子探测分析,发现驱动因素对于LST的解释程度受季节影响,根据不同季节的q值范围,夏季各驱动因素对于LST的解释程度最高,其次为秋季、春季和冬季。根据单驱动因素对LST的解释程度,一年四季DEM、夜间灯光强度对于LST都有较高的解释程度;NDVI仅在夏季和秋季对LST的解释程度高。

(3)LST与其驱动因素的GWR分析结果表明,MNDWI、NDVI和不透水面比例与LST关系的空间异质性不明显。DEM、道路密度、夜间灯光、风速、湿度和气温与LST的关系存在明显的空间异质性。

参 考 文 献

[1] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等.城市热岛的生态环境效应[J].生态学报,2005(8):2055-2060.

[2] 姚远,陈曦,钱静.城市地表热环境研究进展[J].生态学报,2018,38(3):1134-1147.

[3] ZISKA L H, BUNCE J A, GOINS E W. Characterization of an urban-rural CO_2/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession[J]. Oecologia, 2004, 139(3): 454-458.

[4] RAO P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972, 53(7): 647-648.

[5] YAO L, LI T, XU M, et al. How the landscape features of urban green space impact seasonal land surface temperatures at a city-block-scale: an urban heat island study in Beijing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 52: 126704.

[6] 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.

[7] 熊鹰,章芳.基于多源数据的长沙市人居热环境效应及其影响因素分析[J].地理学报,2020,75(11):2443-2458.

[8] 葛静茹,王海军,贺三维,等.武汉市都市发展区地表温度季节性空间分布与驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):351-360.

[9] 刘思煜,吴焱,许娟,等.延安市地表热环境与下垫面指数的关系研究[J].西北林学院学报,2022,37(6):207-214+265.

[10] 蔡智,韩贵锋.山地城市空间形态的地表热环境效应:基于LCZ的视角[J].山地学报,2018,36(4):617-627.

[11] 邓玉娇,杜尧东,王捷纯,等.粤港澳大湾区城市热岛时空特征及驱动因素[J].生态学杂志,2020,39(8):2671-2677.

[12] ZHAO X, LIU J, BU Y. Quantitative analysis of spatial heterogeneity and driving forces of the thermal environment in urban built-up areas: a case study in Xi'an, China[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1870.

[13] CHEN L, WANG X, CAI X, et al. Seasonal variations of daytime land surface temperature and their underlying drivers over Wuhan, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(2), : 323.

[14] 孙艳伟,王润,郭青海,等.基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析[J].环境科学,2021,42(1):501-512.

[15] 汪洋,杨丹,闵婕,等.山地高密度城市热岛效应的多约束因子格局分析与定量探测:重庆都市区案例研究[J].地理研究,2021,40(3):856-868.

[16] HUANG C, TSAI H, CHEN H. Influence of weather

factors on thermal comfort in subtropical urban environments[J]. Sustainability,2020,12(5):2001.

[17] 向炀,周志翔.基于地理探测器的城市热岛驱动因素分析:以武汉市为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(8):1768-1779.

[18] NIU L, TANG R, JIANG Y Z, 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.

[19] YANG C B, YAN F Q, LEI X L, et al. Investigating seasonal effects of dominant driving factors on urban land surface temperature in a snow-climate city in China [J]. Remote Sensing,2020,12(18):3006.

[20] 刘诗喆,谢苗苗,武蓉蓉,等.地理单元划分对城市热环境响应规律的影响:以北京为例[J].地理科学进展,2021,40(6):1037-1047.

[21] LI X, YANG B, XU G, et al. Exploring the impact of 2-D/3-D building morphology on the land surface temperature: a case study of three megacities in China [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2021,14:4933-4945.

[22] 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[J].中国环境科学,2021,41(8):3842-3852.

[23] 阴瑜鑫,张华,安慧敏,等.基于GEE的长江经济带城市群热岛特征及影响因素[J].生态学杂志,2023,42(1):160-169.

[24] 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.

[25] ZHOU C, ZHU N N, XU J H, et al. The contribution rate of driving factors and their interactions to temperature in the Yangtze River Delta region[J]. Atmosphere, 2020, 11(1):32.

[26] 韩静,芮旸,杨坤,等.基于地理探测器和GWR模型的中国重点镇布局定量归因[J].地理科学进展,2020,39(10):1687-1697.

[27] CHI Y, SUN J K, SUN Y G, et al. Multi-temporal characterization of land surface temperature and its relationships with normalized difference vegetation index and soil moisture content in the Yellow River Delta, China [J]. Global Ecology and Conservation,2020,23:e01092.

[28] LIU W X, MENG Q Y, ALLAM M, et al. Driving factors of land surface temperature in urban agglomerations: a case study in the Pearl River Delta, China[J]. Remote Sensing,2021,13(15):2858.

[29] ZHANG M H, DONG S C, CHENG H, et al. Spatio-temporal evolution of urban thermal environment and its driving factors: case study of Nanjing, China[J]. PLoS ONE,2021,16(5):e0246011.

[30] 牛陆,张正峰,彭中,等.中国地表城市热岛驱动因素及其空间异质性[J].中国环境科学,2022,42(2):945-953.

[31] KE L N, YANG R X, ZHI Y, et al. Analysis of land surface temperature driving factors and spatial heterogeneity research based on geographically weighted regression model[J]. Complexity,2020:2862917.

[32] ZHANG Q, WU Z X, YU H Q, et al. Variable urbanization warming effects across metropolitans of China and relevant driving factors[J]. Remote Sensing, 2020,12(9):1500.

[33] 艾丽娅,马勇,陈甫,等.2012—2017年呼包鄂城市群夜间灯光动态变化特征及其驱动因素分析[J].遥感信息,2021,36(1):77-86.

[34] SOBRINO J A, JIMENEZ-MUNOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5[J]. Remote Sensing of Environment,2004,90(4):434-440.

[35] SOBRINO J A, RAISSOUNI N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco [J]. International Journal of Remote Sensing,2000,21(2):353-366.

[36] 陈松林,王天星.等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J].地球信息科学学报,2009,11(2):145-150.

[37] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[38] 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.

[39] CHEN X Y, LI F, ZHANG J D, et al. Spatiotemporal mapping and multiple driving forces identifying of PM2.5 variation and its joint management strategies across China [J]. Journal of Cleaner Production,2020,250:119534.

[40] HU D, MENG Q Y, SCHLINK U, et al. How do urban morphological blocks shape spatial patterns of land surface temperature over different seasons? A multifactorial driving analysis of Beijing, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2022,106:102648.

[41] NGARAMBE J, JOEN S J, HAN C H, et al. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO_2, NO_2, O_3 and urban heat island in Seoul, Korea [J]. Journal of Hazardous Materials,2021,403:123615.

(责任编辑:李拓宇)