

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.02.007

基于卫星资料的合肥市热岛效应时空演变及其影响因子分析

赵强^{1,2}, 谭璐^{1*}, 方潜生^{1,2}, 刘常瑜¹, 马可¹, 朱曙光^{1,2}

(1 安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601;
2 安徽省建设领域碳达峰碳中和战略研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为研究合肥市近二十年的城市格局演变和热岛效应变化, 基于 2005、2009、2015、2020 年每年 10 月份的 Landsat 卫星影像对合肥地区进行了土地分类以及地表温度反演, 并提取归一化差值裸地与建筑指数 (NDBBI)、植被覆盖度 (FVC)、改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 以及人口密度进行了多元回归分析, 进而建立数学模型对合肥主城区的热岛效应及影响因子进行了分析。结果表明: (1) 从 2005 年到 2020 年, 强热岛区增加了 15.03 km²。热岛标准差椭圆分布方向为东北-西南方向, 椭圆的范围逐年扩大, 热岛质心集中在蜀山经开区, 且 81.90% 的强热岛区为较高与高核密度工业区。(2) 地理探测器分析结果表明各影响因子对地表温度的解释力从大到小为: NDBBI (0.542)、MNDWI (0.409)、FVC (0.379) 和人口密度 (0.018)。(3) 岭回归处理后的多元线性模型 ($R^2 = 0.654$) 研究结果表明, 影响地表温度的主要因子为 NDBBI, 而人口密度的影响则较小。(4) 地理加权回归模型 (GWR) 的分析表明, 各点的相关系数 R^2 在 0.489~0.667 之间, 建筑物与道路密集的城建区 R^2 最高。NDBBI 高值集中在经开区等地, 最高值达到 0.9 以上, 在 GWR 模型中人口的系数依然很小, FVC 系数高值区集中在植被覆盖率高的区域, 而 MNDWI 高值区则主要分布于水域。

关键词: 地表温度; 热岛效应; 地理探测器; 岭回归; 多元回归模型

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)02-153-015

Analysis of spatiotemporal evolution and influencing factors of heat island effect in Hefei based on satellite data

ZHAO Qiang^{1,2}, TAN Lu^{1*}, FANG Qiansheng^{1,2}, LIU Changyu¹, MA Ke¹, ZHU Shuguang^{1,2}

(1 School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2 Anhui Institute of Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality in Urban-Rural Development, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to study the evolution of urban pattern and the change of heat island effect in Hefei in recent 20 years, land classification and land surface temperature inversion were carried out based on the Landsat satellite images of October 2005, October 2009, October 2015 and October 2020. The normalized difference between bare land and building index (NDBBI), fraction vegetation coverage (FVC), modified

基金项目: 安徽省教育厅重大项目 (KJ2017ZD41), 国家自然科学基金项目 (41005016), 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目 (gxyqZD2020036), 安徽省高校优秀科研创新团队项目 (2022AH010018), 2021 年安徽省大学生创新训练项目

作者简介: 赵强 (1981 -), 安徽合肥人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事环境遥感技术以及城市空间信息技术应用方面的研究。

E-mail: rommel99@163.com

收稿日期: 2021-10-11; 修改日期: 2022-01-12

*通信作者。E-mail: 18605654950@163.com

normalized difference water index (MNDWI) and population density were extracted for multiple regression analysis, and then a mathematical model was established to analyze the heat island effect and its influencing factors in the main urban area of Hefei. The results show that: (1) From 2005 to 2020, the strong heat island area has increased by 15.03 km². The distribution direction of standard deviation ellipse of heat island is from northeast to southwest, and the scope of the ellipse is expanding year by year. The mass center of heat island is concentrated in Shushan Economic Development Zone, and 81.90% of the strong heat island areas are high-density industrial areas, indicating a good corresponding relationship between the strong heat island areas and high-density industrial areas. (2) The analysis results of geographical detector show that the explanatory power of each influencing factor on land surface temperature from large to small is, NDBBI (0.542), MNDWI (0.409), FVC (0.379) and population density (0.018). (3) The results of multivariate linear model ($R^2 = 0.654$) indicate that the main factors affecting land surface temperature is NDBBI, while the population density has little effect. (4) The analysis of geographical weighted regression (GWR) model shows that the R^2 of each point is in the range of 0.489-0.667, and the R^2 of urban construction area with dense buildings and roads is highest. The high value of NDBBI coefficient is concentrated in the economic development zone and other places, with the highest value reaching more than 0.9, the coefficient of population density is still very small, the high value areas of FVC coefficient are concentrated in areas with high vegetation coverage, while MNDWI high value areas are distributed in water areas.

Key words: surface temperature; heat island effect; geographic detector; ridge regression; multiple regression model

0 引言

城市热岛效应作为一种城市化加剧带来的“城市病”,指的是城区温度高于郊区温度,并形成城市风环流的现象。随着我国快速的城市化进程,城市建成区面积也迅速扩张,城市热岛效应不断加剧。沥青、混凝土、水泥等材料将自然表面转变为建筑物下垫面,降低了蒸腾速率、雨水截留率,并改变表面的反射率^[1],从而产生不良的热影响。城市用地白天吸收太阳辐射,并在夜间缓慢地再辐射吸收的热能。这导致在城市区域产生热岛,与邻近区域相比,温度值较高。一年之中,夏季地表温度的升高促使大气温度升高,严重影响了人体舒适度。冬季严重的雾霾天气也会和热岛效应产生协同作用,导致冬季环境恶化^[2]。

目前,国内外学者选择 Landsat 卫星、MODIS 卫星和 AIRS 红外卫星等卫星资料用于地表温度反演^[3,4]。曹畅等^[2]认为导致城市热岛效应的主要原因有:城市中大量人工建造物(如建筑物,道路等)使得地面反射率降低,下垫面热力性质改变,比热容降低;城市受到大量人工热源的影响;严重的大气污染加剧了热岛效应,尤其是在夜间;密集的建筑种群导致漫反射增强且不利于热扩散。王猛等^[5]提取了合肥市区的不透水面信息,并对其和城市热岛效应进行了回归分析,结果表明两者具有较好的相关性。另外,花利忠等^[6]研究了水体和植被占比较大的公园对城市的冷岛效应,其中水体和植被与地表温度呈显著的负相关。杨智威等^[7]研究粤港澳大湾区城市热岛效应时发现单位人口密度对其贡献值最大。熊鹰和章芳^[8]、葛静茹等^[9]分别对十二个、

十七个热环境效应影响因子进行主成分分析,取得了较好的效果。

上述研究成果为探究不同影响因子对热岛效应的响应机制提供了诸多有益借鉴,但仍存在不足,例如,在数学建模时,数据的处理没有考虑到多重共线性,影响到模型准确性。本文采取地理探测器和岭回归建模,可以得到精度更高的数学模型。此外,上述研究仅仅着眼于建筑物、植被、水体等土地利用类型,未能做到精细化分析。故此,可以利用Python爬取兴趣点,根据工业区兴趣点衍生的工业区核密度,可以为探究强热岛区的形成提供更为精确的成因分析。合肥市作为长三角一体化城市之一,也是新晋“火炉城市”,近十年发展迅速,城市建筑年速扩张。随着经济开发区和滨湖新区的建设,高强度的城市发展加剧了城市热岛效应,有必要在长时间序列上对其城市格局演化和城市热岛效应进行研究和分析。本文通过提取归一化差值裸地与建筑指数(NDBBI)、植被覆盖度(FVC)、改进的归一化差异水体指数(MNDWI)三种指数以及单元人口密度(PD)对合肥市区近二十年的热岛效应进行相关性分析,建立数学模型,以探究城市热岛效应症结所在,并为后续探究合肥市碳排放与城市升温关系提供数据支撑。

1 研究区域概况和数据源

1.1 研究区概况

合肥市位于安徽省中部,属于亚热带季风气候,常年平均温度在 $15.7\sim 18.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。自2016年被纳入长三角城市群,近些年合肥依托长三角和科教基地发展迅速,城市建成区迅速扩张,城镇人口从2005年的258万人增长到2020年的770.44万人,汽车保有量和能源消耗总量不断攀升。2017年,中国气象局发布的夏季十大炎热城市中,合肥排在第九名。逐年上升的温度和城市热岛效应息息相关,改善城市布局,继而改善人居环境,是合肥市当前面临的现实问题之一。

本工作以合肥市主城区($117^{\circ}11' \text{ E}\sim 117^{\circ}22' \text{ E}$, $31^{\circ}48' \text{ N}\sim 31^{\circ}58' \text{ N}$) (图1)为研究对象进行研究。该区域包括蜀山区、庐阳区、瑶海区、包河区四个行政区域。作为合肥市主城区,该研究区域是建筑与交通道路等城市用地最为集中的地区,人口也相对密集。

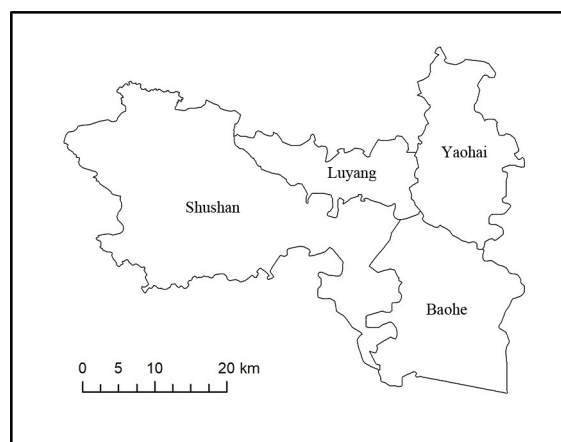


图1 合肥市主城区行政区划图

Fig. 1 Administrative division map of main urban area of Hefei

1.2 数据源

使用的数据源信息如表1所示,选择2005—2020年四组时间相近且云量低于10%的Landsat卫星影像数据进行地表温度反演,人口密度数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心。

表 1 数据来源与用途

Table 1 Data source and purpose

Data serie	Data name	Data Source	Purpose	Time
Remote sensing data	Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI TIRS	https://earthexplorer.usgs.gov	Retrieve surface temperature and extract surface information	2005-10-31, 2009-10-26, 2015-10-15, 2020-10-24,
Vector data	Vector data of the administrative boundary of the main urban area of Hefei	http://www.geodata.cn	Extract the boundary of the study area	2016
Population density	Hefei population density	http://www.resdc.cn	Provide population density data	2015

2 研究方法

采取图2所示的技术路线, 基于2005、2009、2015、2020年每年10月份的Landsat卫星影像对合肥地区进行土地分类以及地表温度反演, 开展土地利用和热岛面积的时空变化分析, 并提取NDBBI、FVC、MNDWI以及人口密度进行地理加权回归和多元回归分析, 建立数学模型。综合利用标准差椭圆、Python、以及地理探

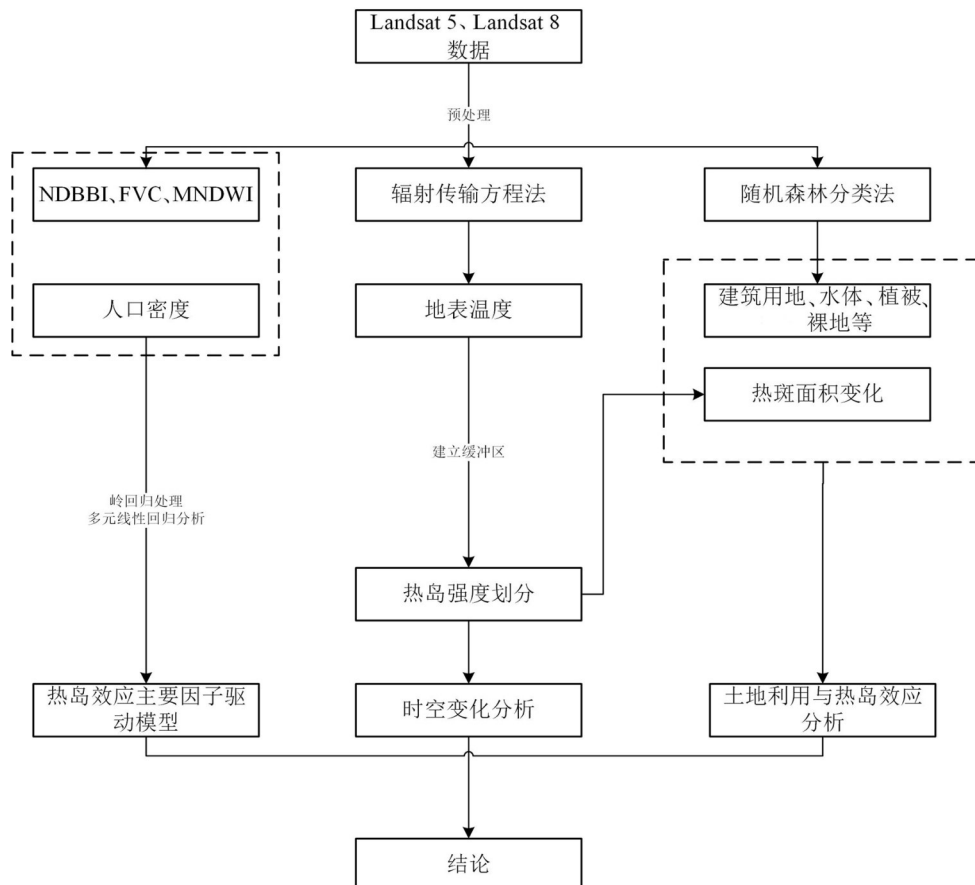


图 2 合肥市热岛效应及其影响因子研究技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap for research on Hefei heat island effect and its influencing factors

测器等方法对合肥主城区的热岛效应及影响因子进行分析。

2.1 遥感数据处理

2.1.1 地表温度反演

在ENVI5.3中对Landsat卫星数据进行预处理,包括辐射定标和大气校正,然后对地表温度进行反演。王猛等^[5]研究发现对于Landsat 8 TRIS波段10,辐射传输方程法比其他方法精度更高,效果更好。因此本研究采取辐射传输方程法进行温度反演,其基本方法和详细步骤参考相关文献^[10]。去除异常点后,反演的平均温度分别与MODIS温度产品以及地面固定点观测数据对比,误差分别不超过1℃和1.5℃,具有较高的一致性。

2.1.2 城市热环境效应响应因子的选择

下垫面热力性质改变是导致热岛效应的主要因素,选择3种典型的下垫层属性因子(NDBBI、FVC、MNDWI)以及PD作为城市热环境效应响应因子,用来分析它们与热岛效应的关系。

1) 归一化差值裸地与建筑指数 I_{NDBB} 的计算公式为

$$I_{\text{NDBB}} = \frac{1.5\rho_{\text{SWIR2}} - (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{GREEN}})/2}{1.5\rho_{\text{SWIR2}} + (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{GREEN}})/2}, \quad (1)$$

式中 ρ_{GREEN} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别对应Landsat遥感影像的第3、5、6、7波段的反射率。

2) 植被覆盖度 V_{FC} 即地面植被叶片的垂直投影面积占计算总面积的比例^[11]。其计算公式为

$$I_{\text{NDV}} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}, \quad (2)$$

$$V_{\text{FC}} = \left(\frac{I_{\text{NDV}} - I_{\text{NDV}_{\text{min}}}}{I_{\text{NDV}_{\text{max}}} - I_{\text{NDV}_{\text{min}}}} \right)^2, \quad (3)$$

式中 ρ_{RED} 对应Landsat遥感影像的第4波段。

3) 改进的归一化差异水体指数 I_{MNDW} 是在NDWI的基础上,修改了其波长组合。MNDWI更适合提取城镇水体,更容易区分阴影和水体^[12]。其计算公式为

$$I_{\text{MNDW}} = \frac{\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{SWIR1}}}. \quad (4)$$

4) 人口密度数据源于中国科学院地理科学与资源研究所。

用于建立数学模型的数据均源于2015年Landsat 8卫星影像。

2.1.3 城市热岛强度划分方法

缓冲法即在城市区面积150%的范围建立缓冲区,作为温度背景值,热岛强度 ΔT 的计算公式为

$$\Delta T = T_{i,j} - \bar{T}_{\text{Boundary}}, \quad (5)$$

式中 $T_{i,j}$ 为城区每个像元的温度, $\bar{T}_{\text{Boundary}}$ 为缓冲区平均温度。

根据温度反演结果和热舒适度指数^[13]将研究区划分为冷岛区、次热岛区、热岛区和强热岛区。对应的热岛强度分别为0℃及以下、0~3℃、3~6℃、6~9℃,对应的人体舒适等级为:舒适、较舒适、不舒适、不适应。

2.2 地理探测器

在分析数据的过程中,发现各个影响因子之间存在很强的共线性和空间分异性。基于地理探测器对于

共线性免疫的优势,采取由王劲峰和徐成东提出的地理探测器^[14]引入热岛效应研究来探究各影响因子对地表温度的解释力。对各个影响因子进行定量分析,得出各影响因子对地表温度的解释力强弱。影响因子对地表温度的影响程度值 q 的表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{S_{SW}}{S_{ST}} \\ S_{SW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \\ S_{ST} = N \sigma^2 \end{array} \right. \quad (6)$$

式中 S_{SW} 为层内方差之和, S_{ST} 为全区总方差, q 的值域为 $[0, 1]$, q 越大,自变量对因变量的解释力越强。根据地理探测器的原理,将 I_{NDBB} 、人口密度、 V_{FC} 、 I_{MNDW} 作分级处理,在ArcGIS软件中基于自然间断点分级法将上四类因子分为5级。考虑到 V_{FC} 和 I_{MNDW} 与地表温度呈负相关,将两者的级数取反。

2.3 多元回归分析

2.3.1 多重共线性检测

利用ArcGIS中随机取点工具在研究区内生成800个随机点进行后续分析,在数据分析过程中,再利用Marquardt^[15]提出的方差膨胀因子来检验数据的多重共线性,发现各个影响因子间具有多重共线性,无法直接利用多元线性回归进行分析。

2.3.2 岭回归分析

采取由Hoerl和Kennard提出的岭回归法^[16]来消除数据多重共线性,岭回归估计表达式为

$$\hat{C} = (A^T A + \beta I)^{-1} A^T B, \quad (7)$$

式中 I 表示单位矩阵, β 表示岭回归系数。通过岭回归分析得到合适的系数 a_k, b_k, \dots, g_k 。

2.4 地理加权回归模型分析

不同地区各影响因子贡献具有较大空间异质性,引入地理加权回归模型(GWR)^[17]分析各因子在各地区的影响力。将随机点导入地理加权回归模型开源软件GWR4中进行地理回归分析,再将结果导入ArcGIS中实现可视化。

3 反演结果与分析

3.1 土地利用与热岛转移结果及分析

基于转移矩阵^[18]研究各年的土地利用变化和各级热岛区的变化。运用随机森林法对五年的土地利用状况进行分类,结果见图3。Kappa系数均大于0.87,进一步与Google Earth Engine中的高分辨率影像进行对比检测,总体精度超过90.4%。由图3以及土地利用类型转移矩阵(表2、表3)可知:城市用地主要集中在中部较为平坦的地区;耕地及裸地主要集中在西部和靠近巢湖的区域;林地等植被主要分布在大蜀山以及巢湖周围。2005—2009年,14.02%的植被与6.15%的裸地/耕地转化成城市用地。2009—2020年,38.59%的植被和23.85%的裸地/耕地转化为城市用地。城市用地向西南扩张,主要在滨湖新区和经济开发区,且主城区的城市建筑密度也在不断增大。

由图4和表4—7可知,2005—2020年,研究区域内受影响区(除冷岛区外的其他区域)变化不大且有减

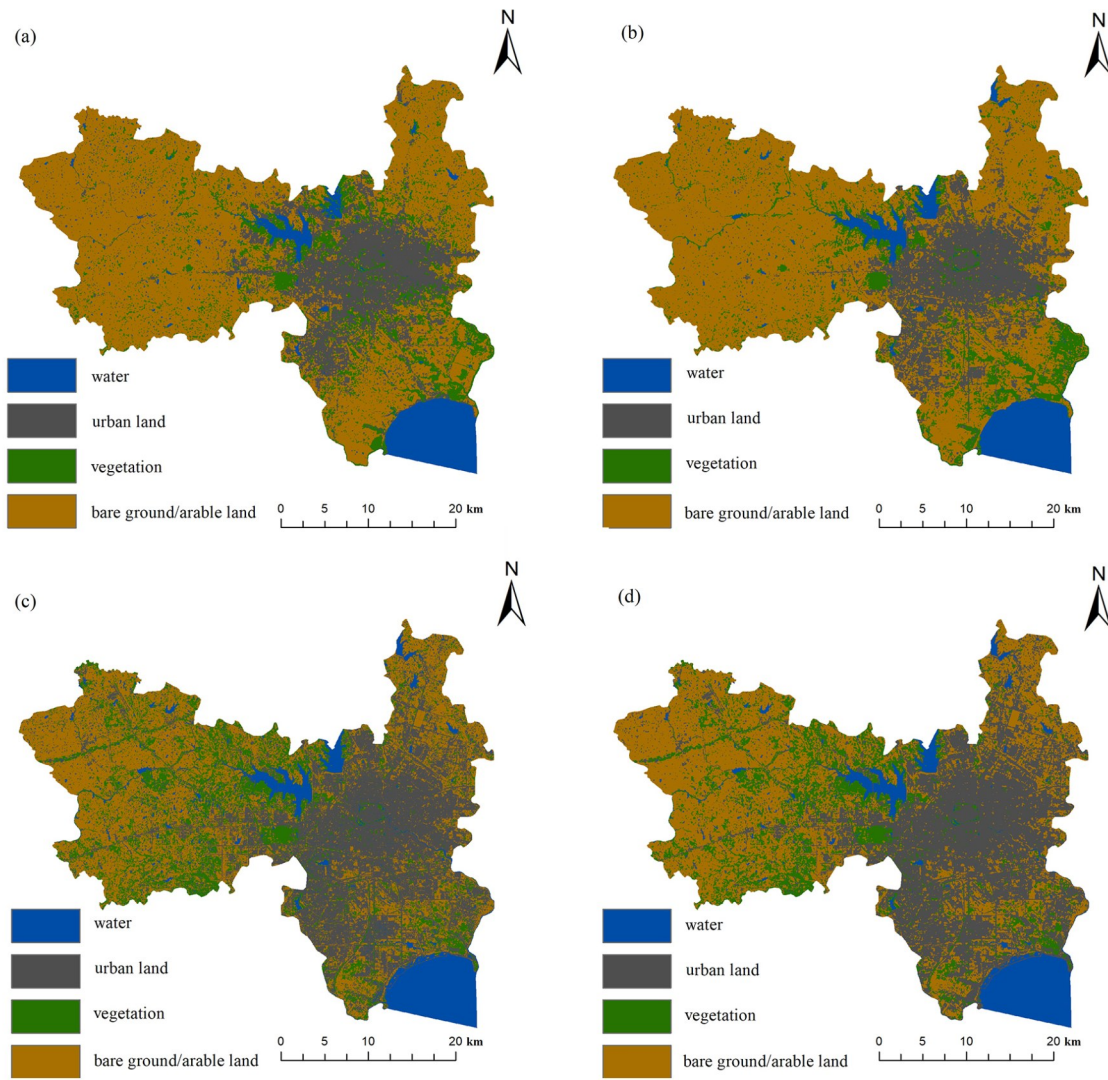


图 3 合肥市土地利用分类。(a) 2005 年; (b) 2009 年; (c) 2015 年; (d) 2020 年
 Fig. 3 Classification of land use in Hefei. (a) 2005; (b) 2009; (c) 2015; (d) 2020

表 2 2005—2009 年合肥市土地利用转移面积 (km²)

Table 2 Transfer area land use in Hefei from 2005 to 2009 (km²)

	Water	Urban land	Vegetation	Bare ground/arable land
Water	92.69	1.04	4.14	0.20
Urban land	2.53	65.88	14.02	6.15
Vegetation	3.03	7.31	42.88	7.88
Bare ground/arable land	1.72	25.73	38.86	85.73

少的趋势。但 2009—2015 年, 强热岛区增加了 7.21 km², 增幅为 748.13%。2015—2020 年, 强热岛区增加了 7.7 km², 增幅为 94.12%。热岛质心向经济开发区转移, 近五年来出现了稳定的强热岛区, 主要集中在经开区和滨湖新区, 主要原因是该区新建了许多工厂和居民区。热岛斑块转移与城市用地的转移基本一致, 两者呈现明显的正相关。而城市的冷岛区多出现在公园和湿地地带, 如: 大蜀山森林公园、天鹅湖公园、董铺水库、湿地公园、环城—南淝河城市绿带等地。

表 3 2009—2020 年合肥市土地利用转移面积 (km²)Table 3 Transfer area land use in Hefei from 2009 to 2020 (km²)

	Water	Urban land	Vegetation	Bare ground/arable land
Water	93.96	0.89	2.93	0.30
Urban land	4.40	90.72	38.59	23.85
Vegetation	1.13	2.62	32.16	16.89
Bare ground/arable land	0.47	5.74	26.22	58.90

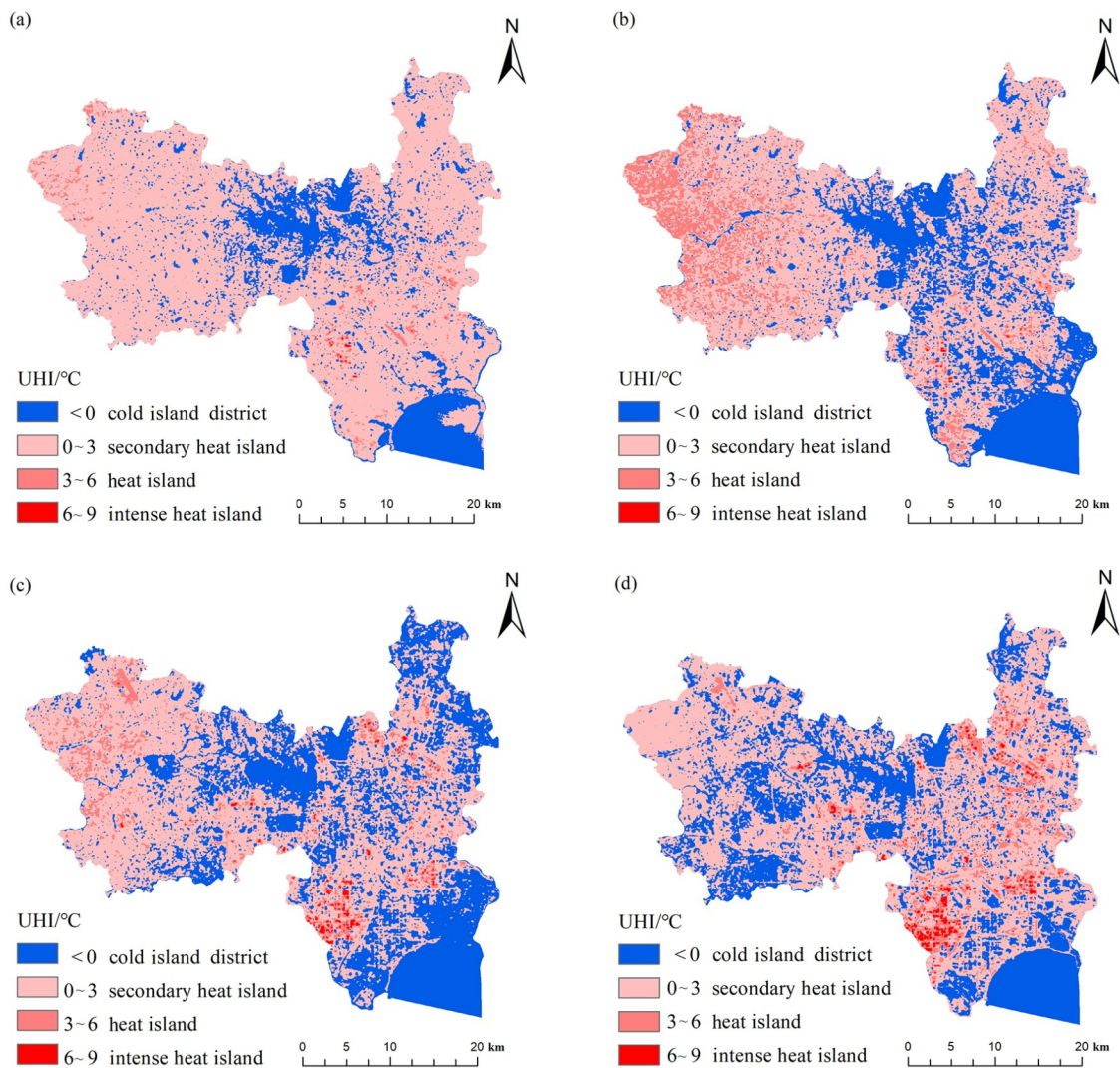


图 4 合肥市热岛空间分布图。(a) 2005 年; (b) 2009 年; (c) 2015 年; (d) 2020 年

Fig. 4 Spatial distribution map of heat islands in Hefei. (a) 2005; (b) 2009; (c) 2015; (d) 2020

利用 Python 爬取工业区兴趣点 (POI)^[9], 绘制 2020 年合肥市工业区核密度分布图, 利用 ArcGIS 自然间断点分级法将 POI 数据分为 5 个等级, 等级越高, 说明工业区越密集, 如图 5 所示。对比 2020 年热岛效应图 [图 4 (d)] 可知, 强热岛区多与高核密度及以上工业区重叠。利用 ArcGIS 工具分析可知, 81.90% 的强热岛区属于高核密度及以上工业区, 强热岛区与之呈现很好的对应关系; 高温中心点多分布于工业区核密度较高的地区, 出现了多个高温中心点如明珠广场、海尔工业园、水安集团工业园、江淮汽车重工业基地、瑶海工业园等,

表 4 2005—2009 年合肥市热岛区转移面积 (km²)Table 4 Transfer area of heat island in Hefei from 2005 to 2009 (km²)

	Cold island region	Secondary heat island region	Heat island region	Intense heat island region
Cold island region	96.58	17.36	2.95	0.64
Secondary heat island region	3.32	70.22	34.10	1.50
Heat island region	0.08	12.38	62.11	41.37
Intense heat island region	0.00	0.02	0.81	56.46

表 5 2009—2015 年合肥市热岛区转移面积 (km²)Table 5 Transfer area of heat island in Hefei from 2009 to 2015 (km²)

	Cold island region	Secondary heat island region	Heat island region	Intense heat island region
Cold island region	93.74	25.32	12.56	0.37
Secondary heat island region	5.89	68.90	66.64	1.12
Heat island region	0.30	5.44	18.25	9.33
Intense heat island region	0.06	0.32	2.53	89.16

表 6 2015—2020 年合肥市热岛区转移面积 (km²)Table 6 Transfer area of heat island in Hefei from 2015 to 2020 (km²)

	Cold island region	Secondary heat island region	Heat island region	Intense heat island region
Cold island region	89.01	16.85	3.74	0.11
Secondary heat island region	10.65	74.54	44.77	3.99
Heat island region	0.31	8.36	42.41	11.38
Intense heat island region	0.02	0.24	9.06	84.51

表 7 2005、2009、2015、2020 年合肥市受影响区和强热岛区面积变化 (km²)Table 7 Area change of the affected districts and intense heat island districts of Hefei in 2005, 2009, 2015, and 2020 (km²)

	2005	2009	2015	2020
Affected area	1066	938.1	824	891.7
Intense heat island region	0.83	0.96	8.17	15.87

这些地区均有建筑密集、水体与植被覆盖较少的特点。

利用 ArcGIS 中的标准差椭圆工具绘制 2005—2020 年合肥市城市热岛质心^[20]迁移图, 如图 6 所示, 标准差椭圆的主轴基本保持为东北—西南走向, 且椭圆分布范围逐年扩大。2005—2009 年, 热岛质心向东南方向偏移 1.48 km, 偏转角为 18°。2009—2015 年, 热岛质心向西北方向偏移 4.2 km, 偏转角为 39°。2015—2020 年, 热岛质心向东北方向偏移 1.6 km, 偏转角为 61°。结合谷歌地图分析, 热岛质心转移和热岛标准椭圆面积扩张的主要原因源于蜀山经开区的快速发展, 特别是工业园区的快速扩张。研究区的城市热环境变化与城市用地扩张建设存在明显的联系。

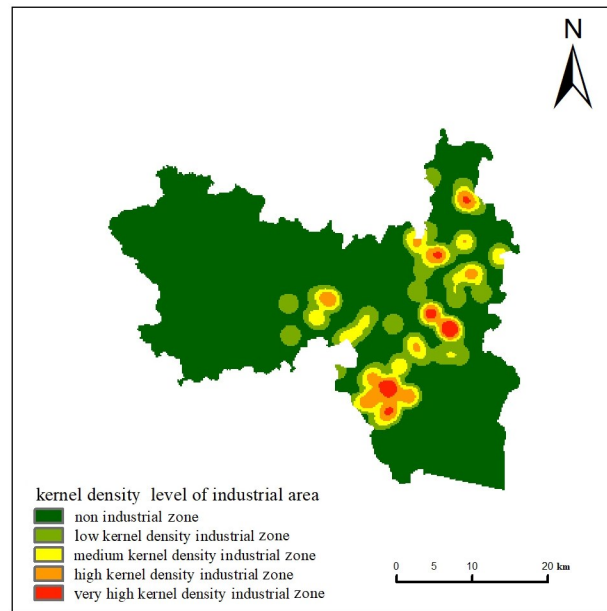


图 5 合肥市 2020 年工业区核密度分布图

Fig. 5 Kernel density distribution map of Hefei industrial zone in 2020

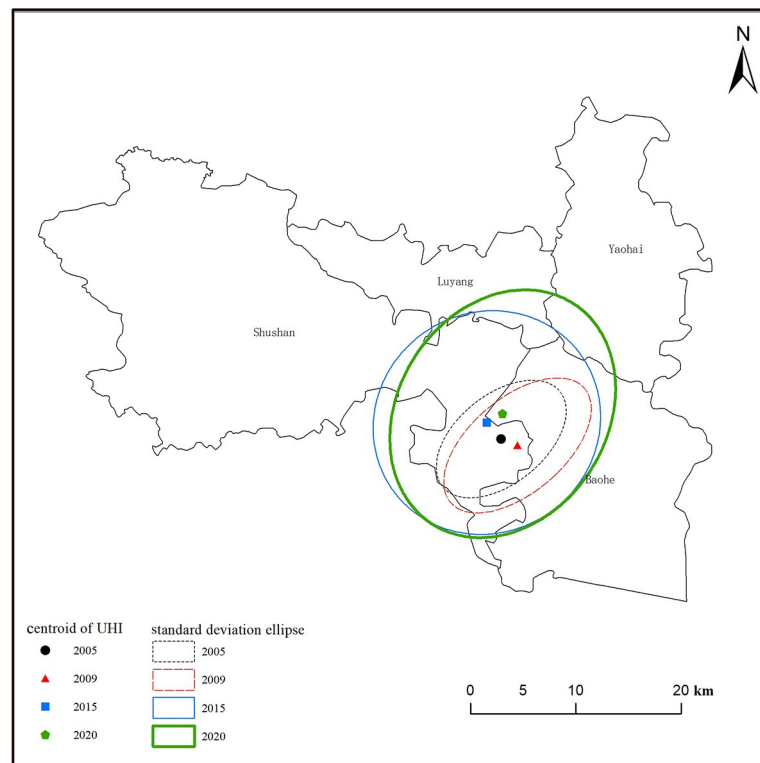


图 6 2005、2009、2015、2020 年合肥市热岛发展趋势与质心转移

Fig. 6 Development trend and centroid transfer of heat island in Hefei in 2005, 2009, 2015 and 2020

3.2 地理探测器分析结果

地理探测器探测结果如表8所示。由表可知:各影响因子对热岛效应强度解释力从大到小依次为:NDBBI (0.542)、MNDWI (0.409)、FVC (0.379)和PD (0.018)。在该研究区域内,建筑与裸地(包括十月份未播种的耕地)对城市热岛强度的影响最大,植被和水体具有良好的降温效果,人口密度的影响则较小。

表8 地理探测器结果

Table 8 Result of Geoprobe

Impact factor	NDBBI	PD	MNDWI	FVC
<i>q</i>	0.542	0.018	0.409	0.379

3.3 影响因子多元回归建模

利用 ArcGIS 中取点工具在研究区内生成 800 个随机点,并提取出各影响因子数值以及地表温度数值,再将数据导入 SPSS 26.0 中进行 Pearson 相关性分析,结果如表9所示。

表9 影响因子与地表温度的 Pearson 相关性分析

Table 9 Analysis of the correlation between factors and surface temperature

Impact factor	NDBBI	MNDWI	FVC	PD
Pearson coefficient	0.754**	-0.575**	-0.259**	0.07*

注: **表示相关性在 0.01 水平显著; *表示相关性在 0.05 水平显著

Pearson 相关性分析与地理探测器结果具有一致性,建筑与裸地指数占据了主导地位。各影响因子的方差膨胀系数 (VIF) 均大于 10,表明自变量间具有多重共线性。利用岭回归法处理随机点数据,消除各因子间的多重共线性,进而得到多元回归模型为

$$Y = 0.560X_1 + 0.085X_2 - 0.284X_3 - 0.210X_4, \quad (8)$$

式中 Y 为热岛强度指数, X_1 为建筑与裸地指数, X_2 为人口密度指数, X_3 为水体指数, X_4 为植被覆盖密度指数。该模型的 $R^2 = 0.654$ 。以上各变量每变化 1 个标准单位,城市热岛强度指数将分别变化 0.560、0.085、-0.284、-0.210。

3.4 GWR 处理结果

GWR 分析结果如图7所示,该模型的赤池信息准则值为 -1902,各点的 R^2 在 0.488~0.668 之间,建筑物与道路密集的城建区 R^2 最高。NDBBI 与 PD 的系数均为正值, FVC 与 MNDWI 的系数均为负值。NDBBI 系数高值集中在经开区等地,最高值达到了 0.9 以上,这些区域为工业区核密度较高的地区,也是热岛质心所在地。工业密集,人造地面覆盖物面积较大,这些是引起 NDBBI 系数高的主要因素。在 GWR 模型中人口的系数依然很小。FVC 系数高值区集中在植被覆盖率高的区域,主要分布于大蜀山森林公园和合肥各大城市公园,绿地有着缓解热岛效应的作用。MNDWI 系数高值区则主要分布于水域。

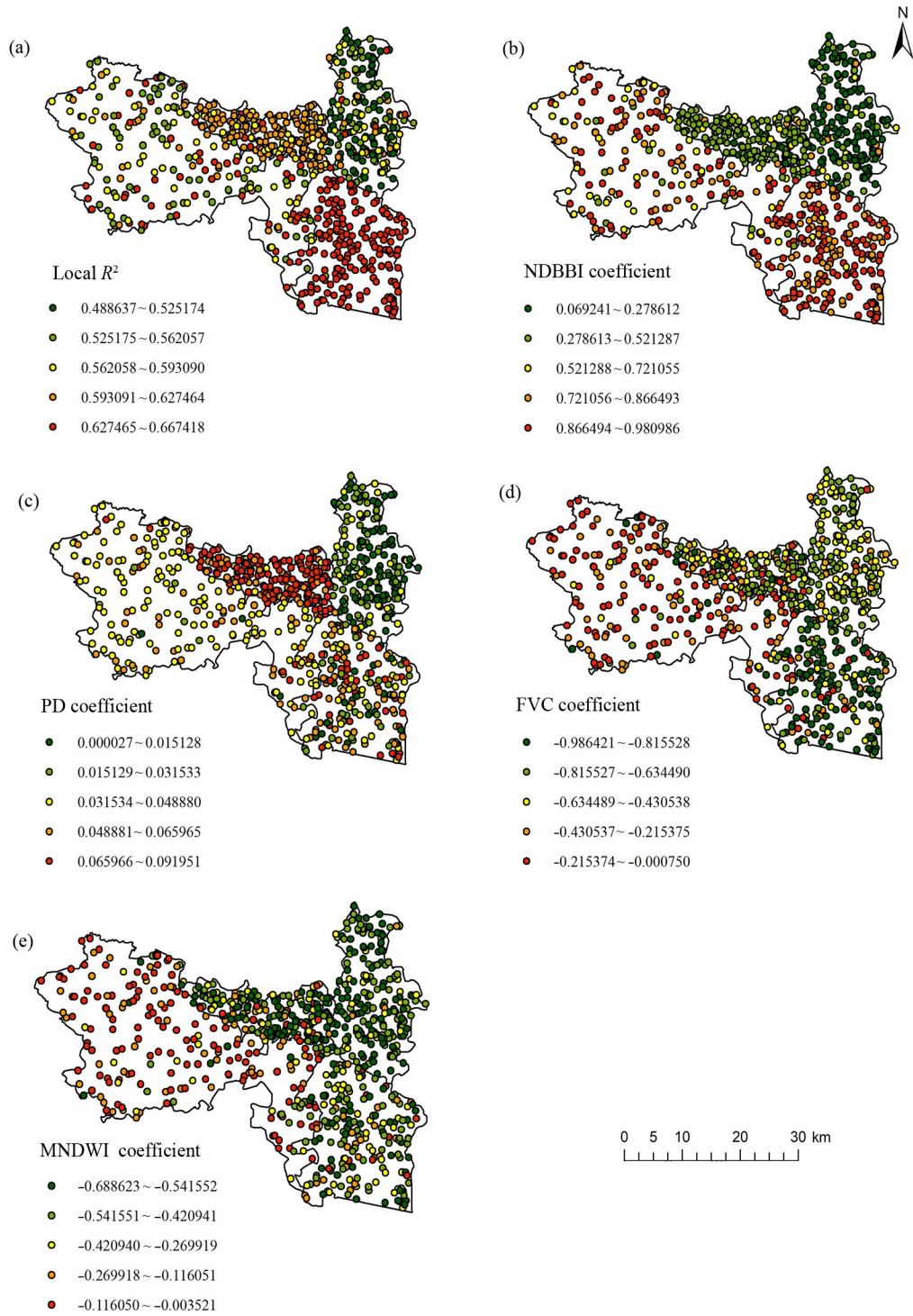


图 7 2015 年合肥市热岛效应及其影响因子 GWR 分析结果。(a) R^2 ; (b) NDBBI 系数;
(c) PD 系数; (d) FVC 系数; (e) MNDWI 系数

Fig. 7 GWR analysis results of Hefei heat island effect and its influencing factors in 2015. (a) R^2 ; (b) NDBBI coefficient;
(c) PD coefficient; (d) FVC coefficient; (e) MNDWI coefficient

4 结 论

城市化的快速推进往往改变了城市土地的固有下垫面特征,通过GIS技术定量分析地表温度与土地覆盖的相关性关系可以揭示城市化进程中出现的问题。探讨人类活动对区域生态安全的影响及其响应机制,从而进一步找出热岛效应症结所在,有助于促进区域环境的可持续发展。本工作应用多源遥感数据对合肥市2005—2020年热岛效应的转移进行了可视化分析,并建立了地表温度及其影响因子的多元回归模型。综合运用了土地转移矩阵、标准差椭圆、Python、GWR、地理探测器以及岭回归分析等方法对合肥市热岛效应时空演变及其影响因子进行了分析,结果表明:

1) 2005—2020年,受影响区(除冷岛区外的其他区域)各级热岛区变化不大且有减少的趋势。2009—2015年,强热岛区增加7.21 km²,增幅为748.13%。2015—2020年,强热岛区增加7.7 km²,增幅为94.12%。标准差椭圆的主轴基本保持为东北—西南走向,且椭圆分布范围逐年扩大。2005—2009年,热岛质心向东南方向偏移1.48 km,偏转角为18°。2009—2015年,热岛质心向西北方向偏移4.2 km,偏转角为39°。2015—2020年,热岛质心向东北方向偏移1.6 km,偏转角为61°。

2) 选取2020年高温点与谷歌高分辨率地图进行对比,发现高温中心点多分布于工业区核密度较高的地区,其中81.90%的强热岛区为较高及高核密度工业区,强热岛区与之呈现很好的对应关系。

3) 地理探测器以及Pearson相关性分析都表明NDBBI指数与地表温度具有明显的正相关,各因子的解释值为:NDBBI(0.542)、FVC(0.379)、MNDWI(0.409)和PD(0.018)。各影响因子间具有多重共线性,在进行岭回归处理后建立多元回归模型,结果表明:NDBBI、PD、MNDWI、FVC每变化1个标准单位,城市热岛强度指数将分别变化0.560、0.085、-0.284、-0.210。建筑与裸地能显著改变城市下垫层,对城市热岛效应影响最大,而人口密度则影响较小。在降低热岛强度的功能上,水体的降温效果优于植被。

4) GWR模型表明:各点的 R^2 在0.488~0.668之间,建筑物与道路密集的城建区 R^2 最高。NDBBI系数高值集中在经开区等地,最高值达到了0.9以上;在GWR模型中人口的系数依然很小;FVC系数高值区集中在植被覆盖率高的区域;MNDWI系数高值区则分布于水域。

整体研究分析表明影响城市热岛效应的主要因素是城市地表下垫面,高密度城市建设用地的增加、绿化用地的匮乏以及水域的减少必然会加剧城市热岛效应。因此,适量控制城市建筑密度增加水体和绿化面积,推进协调、绿色、低碳的土地利用方式,有利于城市高温热环境的缓解。具体而言,依托合肥市“大湖名城”的城市布局特点,加强和维护公园、河道、湿地等生态调节区域的建设,通过建设多个楔形绿地,渗入强热岛区,优化城市空间结构,达到对大面积强热岛区进行斑块分割,降低其热岛强度的目的。此外,适当从城市中心向郊区延伸若干条降温绿化廊道,将郊区的风引入城市内部,可消解强热岛区积累的热量。

受资料、数据等原因限制,后续研究还需进一步深入,如增加绿地核密度、不透水面密度等影响因子的分析以及城市绿地和水体降温范围的研究,使得研究区的热环境影响因子响应机制的建立更加全面。

参考文献:

- [1] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370-384.
- [2] Cao C, Li X H, Zhang M, *et al.* Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 3987-3997.
曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 [J]. 环境科学, 2017, 38(10): 3987-3997.
- [3] Hu D Y, Qiao K, Wang X L, *et al.* Comparison of three single-window algorithms for retrieving land-surface temperature with Landsat 8 TIRS data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(7): 869-876.
胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 等. 利用单窗算法反演Landsat 8 TIRS数据地表温度 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(7): 869-876.
- [4] Zhao Q, Han L, Yang S Z, *et al.* Retrieval of atmospheric profile by hyperspectral infrared satellite data [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11(2): 118-124.
赵强, 韩露, 杨世植, 等. 利用超光谱红外卫星数据反演大气廓线研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(2): 118-124.
- [5] Wang M M, Zhou Z M, Zhang Z M, *et al.* Research on the urban heat island effect of Hefei based on Landsat TM data [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(33): 80-85.
王猛猛, 周志民, 张兆明, 等. 基于TM数据的合肥市城市热岛效应研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 80-85.
- [6] Hua L Z, Sun F Q, Chen J N, *et al.* Quantifying the cool-island effects of urban parks using Landsat-8 imagery in a coastal city, Xiamen, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(22): 8147-8157.
花利忠, 孙凤琴, 陈娇娜, 等. 基于Landsat-8影像的沿海城市公园冷岛效应: 以厦门为例 [J]. 生态学报, 2020, 40(22): 8147-8157.
- [7] Yang Z W, Chen Y B, Wu Z F, *et al.* Spatial pattern of urban heat island and multivariate modeling of impact factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1154-1166.
杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模 [J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1154-1166.
- [8] Xiong Y, Zhang F. Thermal environment effects of urban human settlements and influencing factor based on multi-source data: A case study of Changsha City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2443-2458.
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.
- [9] Ge J R, Wang H J, He S W, *et al.* Seasonal-spatial distribution and driving forces of land surface temperature in the urban development area of Wuhan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(2): 351-360.
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.
- [10] Deng S B, Chen Q J, Du H J. *Remote Sensing Image Processing Method of ENVI* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
邓书斌, 陈秋锦, 杜会建. ENVI遥感图像处理方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [11] Ma W, Zhao Z M, Liu X, *et al.* A quantitative analysis of the relationship between vegetation indices and land surface temperature based on remote sensing: A case study of TM data for Beijing [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010, 22(4): 108-112.
马伟, 赵珍梅, 刘翔, 等. 植被指数与地表温度定量关系遥感分析: 以北京市TM数据为例 [J]. 国土资源遥感, 2010, 22(4): 108-112.
- [12] Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595.
徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究 [J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [13] Hu Y, Li P, Yang J G, *et al.* *Applied Meteorology* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2005.

- 胡毅,李萍,杨建功,等.应用气象学[M].北京:气象出版社,2005.
- [14] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
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.
- [15] Marquardt D W. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation [J]. *Technometrics*, 1970, 12(3): 591-612.
- [16] Hoerl A E, Kennard R W. Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems [J]. *Technometrics*, 2000, 42(1): 80-86.
- [17] Song Y, Wang T T, Zhang Y, *et al.* Spatial pattern evolution and impact factors of location choice of enterprises in northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(7): 1199-1209.
宋颺,王婷婷,张瑜,等.东北三省企业空间格局演化与区位选择因素[J].地理科学,2021,41(7):1199-1209.
- [18] Wu H F, Chen Z Q. Transfer matrix and buffer of the urban heat island effect in Fuzhou [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(3): 69-75.
吴慧凤,陈志强.福州市城市热岛效应的转移矩阵与缓冲区[J].天津师范大学学报(自然科学版),2019,39(3):69-75.
- [19] Pan S D. Spatial coupling between housing development and economic growth based on night light remote sensing and residential POI [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(5): 646-652.
潘思东.基于夜光遥感和小区POI的住宅发展与经济增长的空间耦合研究[J].地球信息科学学报,2017,19(5):646-652.
- [20] Qiao Z, Huang N Y, Xu X L, *et al.* Spatio-temporal pattern and evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 475-489.
乔治,黄宁钰,徐新良,等.2003—2017年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律[J].地理学报,2019,74(3):475-489.