

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.008

城市发展对地表热岛效应的影响及其相互关系研究——以合肥市和南昌市为例

盛亮亮, 郝泷*, 崔玉环, 李鹏飞, 许亚洲, 廖聪聪

(安徽农业大学理学院, 安徽合肥 230036)

摘要: 随着城市化的加速,城市热岛效应问题逐渐突显。为研究城市空间扩张和社会经济发展对地表热岛效应的影响,基于2000—2020年共5期Landsat遥感影像,利用辐射传导方程法对合肥和南昌的地表温度进行反演,采用归一化方法将研究区的地表热岛效应分为4个等级,并对两市地表热岛效应的时空演变特征进行分析研究,进而运用地理探测器对热岛效应强度的影响因子进行综合性分析。结果表明:(1)在2000—2015年,合肥市的城市扩展系数由1.70降低到1.08,最后趋于1.25,2015—2020年降低到0.56;在2000—2020年,南昌市的城市扩展系数在1.34~1.60范围内上下波动;合肥市和南昌市分别在2011年和2018年完成了产业结构转型,朝着以第三产业拉动为导向的趋势演进;城市在空间的扩展与社会经济的发展和政府的决策支持密不可分;(2)合肥市和南昌市主城区持续扩展均呈现非线性的增长趋势;合肥地表热岛效应主要在东北和西南方向上扩展,而南昌主要呈现出东南-西北方向的扩展模式;合肥和南昌地表热岛效应面积分别由45.17 km²和40.80 km²增加到351.61 km²和274.07 km²,且热岛发展力度和范围与城市快速发展的规模和方向较为一致;(3)合肥市和南昌市的各影响因子对热岛效应强度的解释力从大到小为:人口密度(0.891/0.844)、建成区面积(0.842/0.810)、人均GDP(0.788/0.773)、第二产业占比(0.679/0.711)、第三产业占比(0.582/0.636),其中人口密度的影响最大,产业结构中第二产业作用高于第三产业;各因素相互作用均比单一因子对地表热岛效应强度的影响程度更大。研究结果能给合肥和南昌市及类似城市的规划提供参考和思路,合理布局建成区的绿色空间以及控制城市人口数量可以有效缓解城市地表热岛效应发展速度。

关键词: 城市地表热岛效应;地表温度;Landsat;地理探测器

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-602-015

Influence of urban development on surface heat island effect and its relationship: A case of Hefei and Nanchang

SHENG Liangliang, HAO Shuang*, CUI Yuhuan, LI Pengfei, XU Yazhou, LIAO Congcong

(School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the problem of urban surface heat island effect is gradually becoming prominent. In order to study the impact of urban spatial expansion and socio-economic development on the heat island effect, based on five periods of Landsat remote sensing images from 2000 to 2020, the surface temperature of Hefei City and Nanchang City, China, is inverted using the radiative

基金项目: 国家自然科学基金(41801332), 国家级大学生创新创业训练项目(202210364036)

作者简介: 盛亮亮(2001年-), 安徽马鞍山人, 主要从事城市发展和热岛研究。E-mail: 1694333283@qq.com

导师简介: 郝泷(1988年-), 河南安阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源监测和区域发展的研究。E-mail: haoshuang@ahau.edu.cn

收稿日期: 2022-08-08; 修改日期: 2022-10-06

*通信作者。

transfer equation method. The heat island effect in the study area is divided into 4 grades using normalization method, the temporal and spatial evolution characteristics of the heat island effect in the two cities are analyzed and studied, and then the influence factors of the heat island effect intensity are comprehensively analyzed using geographic detectors. The results show that: (1) The urban expansion coefficient of Hefei decreases from 1.70 to 1.08 and finally tends to 1.25 from 2000 to 2015, and decreases to 0.56 from 2015 to 2020, while Nanchang fluctuates between 1.34 and 1.60 from 2000 to 2020. Hefei and Nanchang completed their industrial structure transformation in 2011 and 2018, respectively, evolving towards a trend driven by the tertiary industry. The expansion of the cities in space is inseparable from the development of social economy and the decision-making support of the government. (2) The continuous expansion of the main urban areas of Hefei and Nanchang both show a non-linear growth trend. Hefei surface heat island effect mainly expands in the northeast and southwest directions, while Nanchang mainly shows a southeast-northwest expansion pattern. Hefei and Nanchang surface heat island effect areas have increased from 45.17 km² and 40.80 km² to 351.61 km² and 274.07 km² respectively during the period, and the development intensity and scope of heat island are consistent with the scale and direction of rapid urban development. (3) The explanatory power of each influencing factor on the intensity of heat island effect in Hefei and Nanchang from large to small is: population density (0.891/0.844), built-up area (0.842/0.810), per capita GDP (0.788/0.773), proportion of secondary industry (0.679/0.711), proportion of tertiary industry (0.582/0.636), among which population density has the greatest impact, and the role of the secondary industry in the industrial structure is higher than that of the tertiary industry. In the other hand, the interaction of each factor has a greater impact on the intensity of the surface heat island effect than a single factor alone. The research results can provide a reference for the planning of Hefei, Nanchang and similar cities, and it seems that reasonable layout of green space in built-up areas and control of urban population can effectively alleviate the development speed of urban surface heat island effect.

Key words: urban surface heat island effect; surface temperature; Landsat; geographical detector

0 引言

城市地表热岛效应是城市中心区域较郊区温度高的一种现象。近年来,随着我国城市化进程的快速推进,第二与第三产业得到了快速发展,但也带来了一系列的问题,其中城市地表热岛效应就是最严重的问题之一。城市的地表辐射热特性是热岛效应产生的重要诱因^[1],由于城市中大规模的人员聚集流动、工业化的迅速发展、严重的大气污染、街道和楼宇的高温蓄热体和水体绿地变化等原因,使得城市内地表温度远远超过郊区温度^[2]。持续的高温将导致城市能源损耗增大^[3],同时又加剧了城市大气污染,形成恶性循环^[4],使地表热岛效应现象越来越明显^[5]。城市地表热岛不仅会危及人类身体健康^[6,7],还会改变生态环境环保状况^[8],甚至使其失调^[9],引发一系列生态环境问题。因此,对于地表热岛效应研究很有必要。

地表热岛效应通常以地表温度为主要指标^[10],由于城市地表热岛效应的内在原因是城市规模的扩张以及下垫面性质的改变^[11],所以根据传统方法借助气象观测站或者实地测量^[12]等方法获得市内部温度数据来

研究地表热岛效应,很难全面反映整个区域的地表热岛效应变化。而遥感科学技术凭借高度及时性、覆盖面广、空间连续性和可靠性高的优势,可以快速获得城市大范围的地表温度数据,已成为研究地表热岛效应问题的重要技术手段^[13],主要的地表温度反演方法有辐射传输方程法^[14,15]、单窗算法^[16,17]、劈窗算法^[18]和普适性单窗算法^[19]等。针对城市地表热岛与影响因子的关系,研究人员大多研究城市化中的空间结构因子或者环境因子。例如汪洋等^[20]研究了城市热岛效应与归一化植被指数 (NDVI)、城市表面高程 (CSE)、设定天空开阔度 (SVF) 等的关系;王刚等^[21]研究了土地利用、人口密度以及海拔对城市热岛的影响;阴瑜鑫等^[22]进行了 NDVI、土地覆盖类型、参考蒸散发量、空气质量检测等和城市热岛效应的分析。

本研究将从城市化进程的具体指标出发,选取人口密度、建成区面积、第二产业占比、第三产业占比和人均国内生产总值 (GDP) 作为影响因子对地表热岛效应强度进行研究,并综合性分析城市空间扩张和社会经济发展状况。合肥市和南昌市在 2000 年城市化程度和发展状况基本相似,合肥市城区人口数量约 140 万,南昌市城区人口数量约 170 万,建成区面积均近 120 km²,GDP 均超 400 亿元,同作为中部省会城市,又逢中部崛起战略的实施,热岛效应现象更加显著。对比两市二十年来的热岛状况并与实际发展情况相结合,可以有效判断研究结果的准确性。近年来,合肥市成为与杭州、南京并列的长三角副中心城市,城市化进程加快,社会经济发展水平飞速提升,晋升为新一线城市,研究结果可以为其他类似城市提供借鉴;而南昌市如今的发展状况与我国多数二线城市相似,具有代表性。故本研究选取合肥市和南昌市的市区作为研究区,研究结果可为合理规划城市建设、进一步缓解城市热岛提供科学依据。

1 研究区概况和数据源

1.1 研究区概况

合肥 (30°57' N~32°32' N, 116°41' E~117°58' E) 位于安徽省中部,是我国华东地区的重要中心城市之一,城市发展快速。气候属于亚热带湿润性季风气候,四季分明,降雨量适中,气候温润。合肥市现辖 4 区、4 县及 1 个县级市。南昌 (28°10' N~29°11' N, 115°27' E~116°35' E) 位于江西省北部,是长江中游城市群中心城市之一,引领江西省经济发展。气候属于亚热带季风气候,光照充足,雨水充沛,气候湿润。南昌市现辖 6 区和 3 县。研究区如图 1 所示。

1.2 数据源和预处理

采用的 5 期 Landsat 遥感影像包括两地 2000 年、2006 年、2010 年、2015 年和 2020 年的影像数据 (如表 1 所示),影像含云量都在 5% 以下,来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)。

合肥市和南昌市的人口密度、建成区面积、GDP、产业结构等数据,分别来源于安徽省统计局官网的《安徽省统计年鉴》、合肥市统计局官网的《合肥市统计年鉴》和江西省统计局官网的《江西省统计年鉴》、南昌市统计局官网的《南昌市统计年鉴》。

预处理包括:Landsat ETM+传感器在 2003 年发生故障产生了条带数据,所以首先对合肥市 2010 年的数据进行条带修复,之后对所有数据进行辐射定标、大气校正、几何校正、重采样和裁剪等预处理,得到研究区域的地表温度,空间分辨率统一至 30 m。

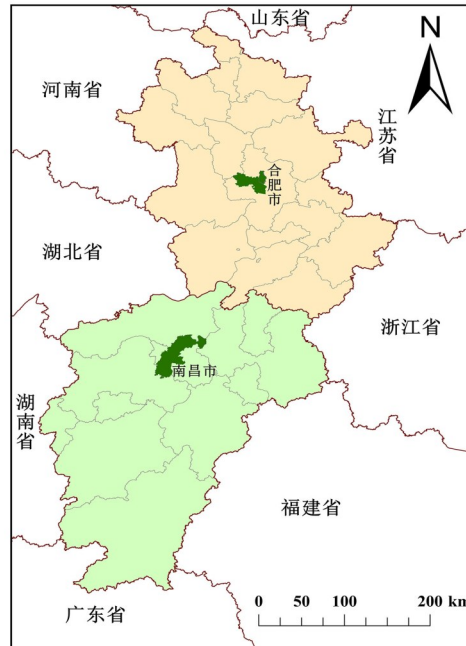


图 1 研究区分布图

Fig. 1 Distribution of study area

表 1 合肥市和南昌市的数据源

Table 1 Data sources of Hefei and Nanchang

City	Satellites and sensors	Date
Hefei		2000-04-08
	Landsat-5 TM	2006-04-17
	Landsat-7 ETM+	2010-04-28
	Landsat-8 OLI-TIRS	2015-04-26
		2020-04-15
Nanchang		2000-04-16
	Landsat-5 TM	2006-04-17
	Landsat-8 OLI-TIRS	2010-03-19
		2015-03-17
		2020-04-15

2 研究方法

2.1 城市扩展弹性系数

城市扩张和人口数增长之间有密切联系,用城市扩展弹性系数就可评估城市扩展的合理性。弹性系数表示了城市面积增长速率和总人口增长率相互之间的比率关系,城市扩展弹性系数 R_i 的计算公式为

$$R_i = \frac{S_i}{P_i}, \tag{1}$$

式中 S_i 为该建成区面积年均增长率, P_i 为人口年均增长率。根据谈明洪等^[23]的研究,当城市扩展弹性系数为1.2时,表示在当前时间段人口正常增长下,城市扩张的速度是相对合理的。如果城市扩展弹性系数过小,则

表示城市扩张速度赶不上人口增长,人地关系紧张,城市资源供给不足:城市扩展弹性系数过大则表示城市扩张的速度已经超过人口增长,造成城市资源耗费、土地利用效率降低。

2.2 辐射传导方程法

辐射传导方程法又称大气校正法。基本思路如下:首先根据与卫星过空时间同步的真实数据(或者使用大气模型:如MODTRAN、ATCOR或6S等)来估算大气对地表热辐射的影响,然后在传感器观测到的热辐射总量中把这部分大气影响清除,获得地表热辐射强度之后,再转换为相应的地表温度^[24]。卫星传感器测得的辐射强度 L 的计算公式为

$$L = [\varepsilon L(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] \tau + L_{\uparrow}, \quad (2)$$

式中 ε 是地表比辐射率; $L(T_s)$ 是表示温度为 T_s 的黑体在热红外波段的辐射亮度,其中 T_s 是地表真实温度(K); τ 是大气透过率; L_{\uparrow} 和 L_{\downarrow} 分别是大气的上行和下行热辐射亮度^[25],和 L 的单位均为 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$ 。因此,求出地表辐射率,就可以由式(2)求解 $L(T_s)$ 。地表真实温度 T_s 的计算公式为

$$T_s = \frac{K_2}{\ln[K_1/L(T_s) + 1]}, \quad (3)$$

式中 K_1 、 K_2 表示卫星在发射前的预设常量。

2.3 地表真实温度反演

(1) 图像辐射定标

辐射定标指通过定量关系将像元的亮度值转化为辐射亮度值的过程。其目的就是减少由于传感器精度下降而带来的辐射失真^[26]。经过辐射定标后 L 的计算公式为

$$L = \alpha D + \beta, \quad (4)$$

式中 α 为增益量, D 为像元亮度值, β 为偏移量。

(2) NDVI

NDVI的计算公式为

$$N = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}, \quad (5)$$

式中 N 代表NDVI的值,对于Landsat TM和ETM+数据,近红外波段的反射值 R_1 和红外波段的反射值 R_2 分别对应Band4和Band3;对于OLI数据, R_1 和 R_2 分别对应Band5和Band4。

(3) 植被覆盖度

基于像元二分模型和NDVI指数构建植被覆盖度 P_v 的^[27,28]计算公式为

$$P_v = \frac{N - N_s}{N_v - N_s}, \quad (6)$$

式中 N_v 和 N_s 分别表示植被和裸地NDVI值。分别取 $N_v = 0.70$ 和 $N_s = 0.05$ 来近似地估计 P_v 。当 $N > 0.70$ 时,将这一像元看作是**被完全覆盖的植被,即 $P_v = 1$;相反,如果 $N < 0.05$,则为完全裸地,即 $P_v = 0$ 。

(4) 地表比辐射率 ε

覃志豪等^[29]指出,除了自然地表,也要考虑城镇与水体这两个地表类型,水体的总比辐射率是0.995,而

城镇的比辐射率 ε_1 与自然表面的比辐射率 ε_2 的计算公式分别为

$$\varepsilon_1 = 0.9608420 + 0.0860322P_v^2 - 0.0671580P_v^3, \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 0.9643744 + 0.0614704P_v^2 - 0.0461286P_v^3. \quad (8)$$

2.4 温度归一化

为了使反演出的不同年份的地表温度结果更具有可靠性和可比性, 对计算出的地表温度进行归一化处理^[30]。归一化后的值 T 的计算公式为

$$T = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad (9)$$

式中 t 、 t_{\max} 和 t_{\min} 分别表示处理之前的地表温度、最大地表温度和最小地表温度。为了更突出地表示热岛的变化特征, 将热岛区和强热岛区合并为热岛区, 即归一化温度值大于 0.5 的区域, 将非热岛区和过渡区合并为非热岛区, 即归一化温度值小于 0.5 的区域, 如表 2 所示。

表 2 热岛效应等级划分

Table 2 Classification of heat island effect

Heat island effect level	Normalized difference temperature value
Level 1 non heat island effect district	0.00~0.25
Level 2 heat island effect transition district	0.25~0.50
Level 3 heat island effect district	0.50~0.75
Level 4 high heat island effect district	0.75~1.00

2.5 地理探测器

地理探测器模型由王劲峰和徐成东^[31]提出, 能够分析各种现象的驱动力和影响因子以及多因子交互作用, 主要用于探测地理要素的空间差异性。本研究主要分析影响城市热岛强度的各因子的相对重要性和空间分异性, 用“因子探测器”分析各因子对城市热岛强度的解释程度, 用交互作用探测器定量分析两个因子交互作用后相对单个因子的影响程度的变化 (模型变量如表 3 所示), 并将数据离散化处理分为 5 级, 转化为类型变量。

表 3 地理探测器模型变量

Table 3 The selected driving factors of geodetector

Variable	Symbol
Proportion of heat island area	y
Population density	x_1
Built up area	x_2
Proportion of secondary industry	x_3
Proportion of tertiary industry	x_4
Per capita GDP	x_5

计算自变量对变量的解释力 q 的具体公式为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad (10)$$

式中 $0 \leq q \leq 1$, $q = 0$ 时, 表明城市热岛强度不受影响因子的驱动, q 值越大, 表示该因素对城市热岛强度的解释力越大; N 为整个区域样本单元数; σ^2 为整个区域因变量的方差; L 为区域内因子的总分层数; $h = 1, 2, \dots, L$, 为变量或因子的分层, 即分类或分区; N_h 为层级为 h 的区域样本单元数; σ_h^2 为次一级区域的方差。

3 结果与分析

3.1 城市发展

城市发展, 是指城市在一定区域内的地位与作用以及吸引力、辐射力的变化增长过程, 是一个满足持续增长的城市人口需求的过程, 分为空间上的扩张和社会经济上的发展。从空间上来说, 是一个存在于一个区域独特的居民点形式, 表现为城市规模的扩大即城市化水平的提高; 从经济上来说, 城市的第二和第三产业是整个区域经济的一个重要部分, 表现为城市功能的增强即现代化水平的提高。

3.1.1 城市空间扩展强度分析

综合人口密度和建成区面积因素, 引入城市扩展弹性系数描述城市在空间扩展上的状况, 两市建成区面积和人口变化曲线如图2所示, 并对合肥市和南昌市2000—2020年各时段的建成区城市弹性扩展系数进行计算, 得到两市的扩展弹性系数如表4所示。由表可知, 合肥市城市扩展弹性系数在2000—2015年由1.70降低到1.08, 最后趋向1.25, 城市扩展弹性系数在1.70时, 建成区扩展速率是高于人口增长速度的, 说明资源没有合理利用, 土地的利用率相对低, 不利于GDP增长; 城市扩展弹性系数在1.25时, 趋于合理的扩展速率; 在2015—2020年间, 合肥市的城市扩展弹性系数仅有0.56左右, 此时建成区扩展已无法满足人口增长的需求, 可能导致人地关系紧张, 资源分配不足。而南昌市2000—2020年的城市扩展弹性系数在1.34~1.60范围内上下波动, 总体来说土地资源也没有合理利用, 但是从两市的GDP统计数据中可以看出, 合肥与南昌市的GDP差距在后十年越来越大, 其中一个主要原因是安徽省在2011年8月正式撤销地级巢湖市, 并将原巢湖市下辖的巢湖市区、庐江县划归合肥市, 由此诞生了“合肥经济圈”。

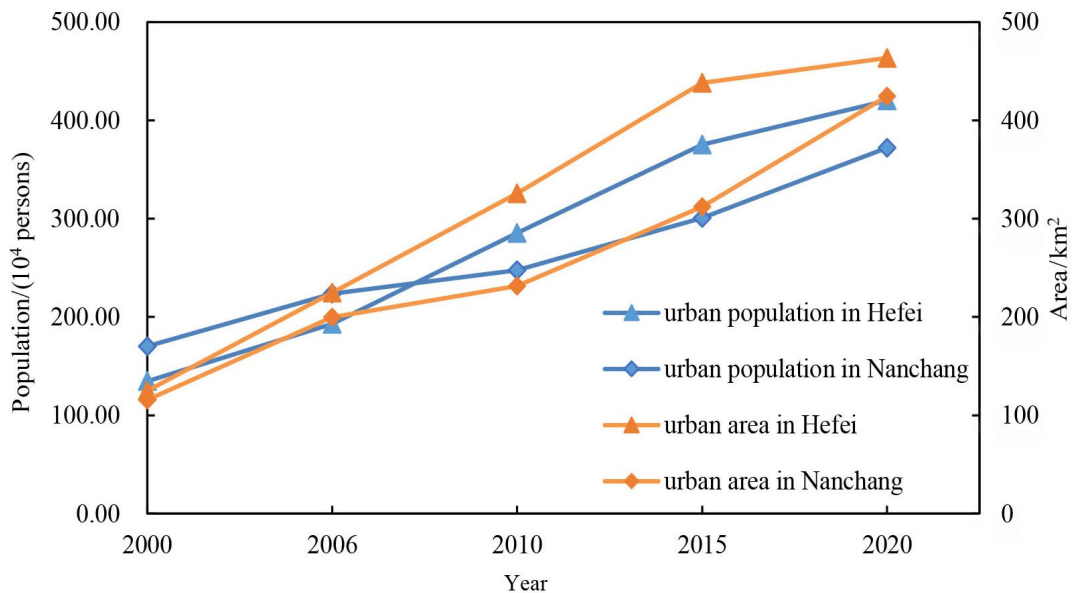


图2 2000—2020年合肥市和南昌市建成区面积和人口变化曲线

Fig. 2 Area and population change curve of built-up areas in Hefei and Nanchang from 2000 to 2020

表 4 2000—2020 年合肥市和南昌市建成区城市扩展弹性系数

Table 4 Elasticity coefficient of urban expansion in built-up areas of Hefei and Nanchang from 2000 to 2020

Time	S_{Hefei}	S_{Nanchang}	P_{Hefei}	P_{Nanchang}	R_{Hefei}	R_{Nanchang}
2000—2006	16.62	14.03	9.75	8.92	1.70	1.57
2006—2010	25.29	7.92	23.31	5.93	1.08	1.34
2010—2015	22.46	16.12	17.99	10.68	1.25	1.51
2015—2020	5.01	22.48	8.98	14.05	0.56	1.60

3.1.2 社会经济分析

近十年来, 两市中心城区的人口密度不断提高, 商务活动的规模不断增大, 但热岛效应却有所缓解, 这得益于产业结构的优化升级、产业布局的合理调整。两市 GDP 的三次产业结构如图 3 所示。由图可知, 2000 年合肥市的三大产业结构百分比分别占 12%、43%、45% 左右, 南昌市的三大产业结构百分比分别占 11%、40%、49% 左右。此后, 两市的第一产业一直处于下降趋势, 在 2017 年之后合肥市基本稳定在 3% 左右, 南昌市稳定在 4% 左右。随后合肥市以第二产业和第三产业为主导地位发展经济, 在 2011—2020 年间, 其第三产业在 GDP 中所占百分比迅速上升为 61% 左右, 产业结构逐渐实现由重变轻, 地表热岛效应区面积的涨幅也得到抑制, 非热岛效应区面积有所增加。南昌市在 2000—2006 年间第二产业迅速上升到 56% 左右、第三产业下降到 38% 左右, 到 2018 年为止其第二产业和第三产业以较平缓的速度分别下降和上升到 48% 左右, 随后第三产业才超越第二产业 50% 左右, 而近五年地表热岛效应区面积涨幅较大, 非热岛面积区却略微减少。

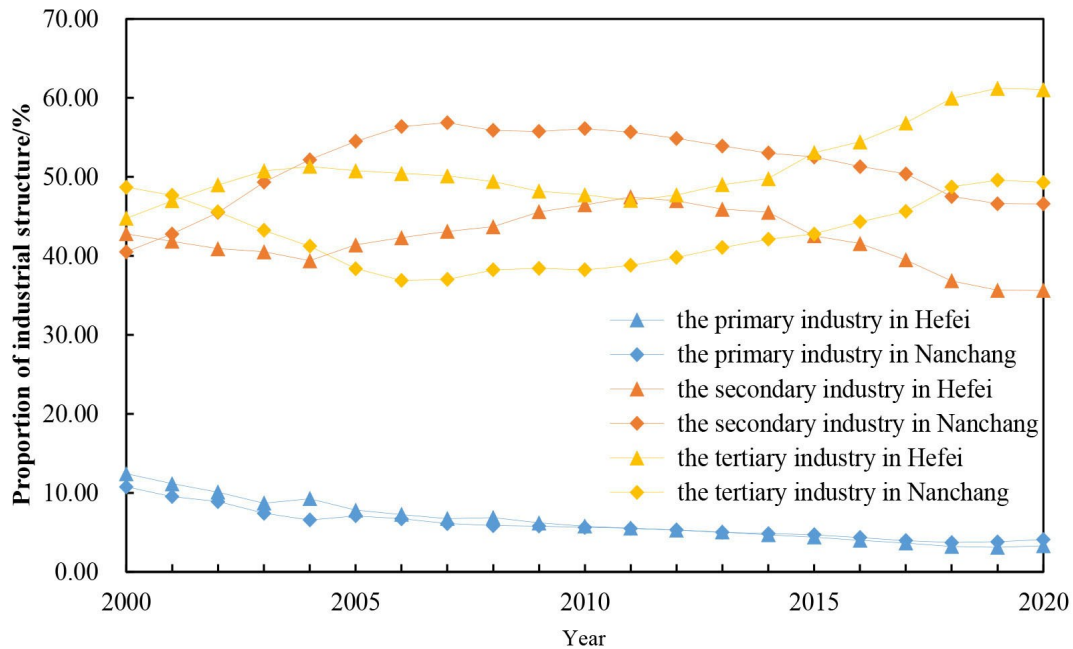


图 3 2000—2020 年合肥市和南昌市的产业结构变化曲线

Fig. 3 Industrial structure change curve of Hefei and Nanchang from 2000 to 2020

综上所述, 南昌市在近 20 年仍然以第二产业为主导地位, 而合肥市在 2011 年就完成了产业结构转型, 并由第二产业和第三产业占主导地位渐变为以第三产业拉动为导向的趋势演进。主要原因是政府的政策倾

斜,再加上合肥市滨湖新区的建立和以合肥市为核心城市的皖江都市带承接工业转移示范区的建立等重要规划,导致了大批的资本和人口向合肥市聚集,并尽可能将加工制造类企业搬出中心城区,着力发展现代服务业,大大优化了城区的空间布局,使布局的产业园区热源分散,缓解了地表热岛效应。而南昌市以及类似城市应该明确自身优势主导产业体系,坚持产业的优胜劣汰,把主导产业的高级化部分留在本市,将产业链的配套部分迁出,实现由重工业为主转变为水平较高、规模较大的现代服务业为主,并且在发展的同时也要控制热岛效应。在三次产业的演化中,第三产业会对总体经济中的稳定发展起着至关重要的作用,所以应适当地调整产业结构,使其变得更加合理以促进城市的发展。同时经济的稳定发展也会正反馈给产业结构的优化,两者是相辅相成的。

3.2 城市地表热岛效应分析

为了研究城市发展各要素与热岛效应强度的关系,先制作热岛效应等级分布图再与各要素分别分析。在ENVI软件上反演出两市的地表温度,并将两市反演得到的平均温度与地面气象站观测数据对比,误差在 $0.9\sim 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,反演精度基本满足本研究的要求;再进行归一化处理,最后在ArcGIS软件上绘图,如图4、5所示。根据夏明宇等^[32]和袁雪、颜七笙^[33]分别关于合肥市和南昌市土地利用类型的研究,并结合图4、5可以

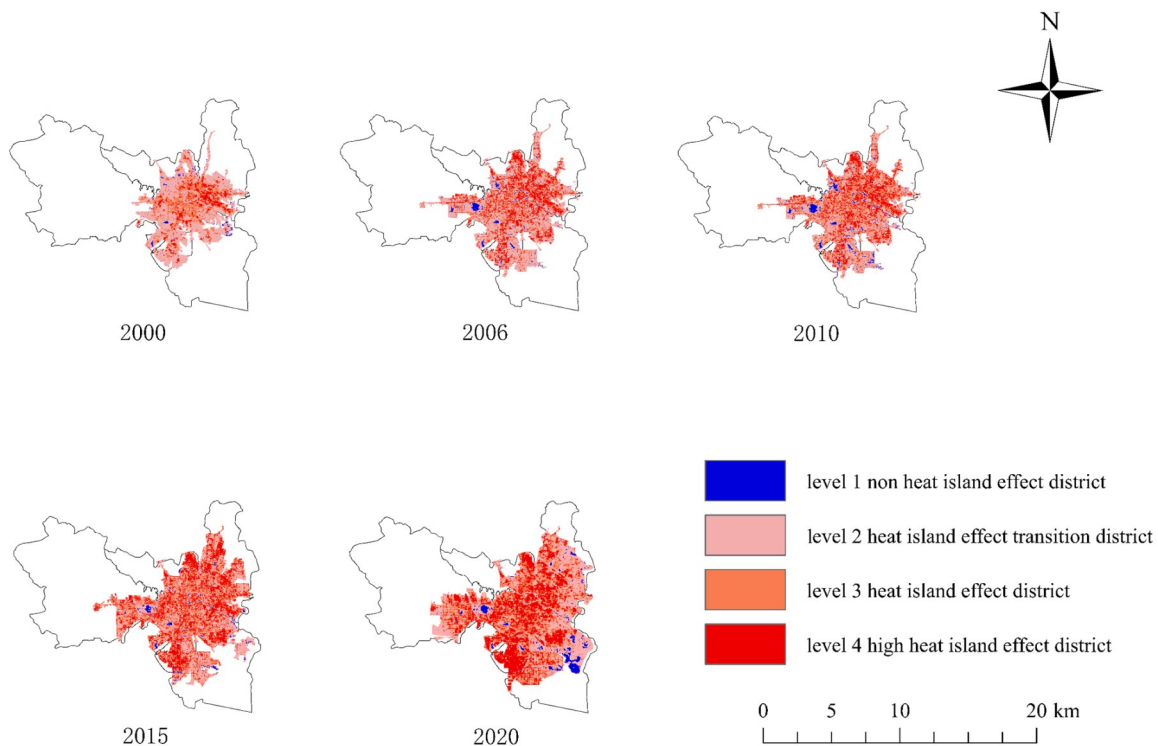


图4 2000—2020年合肥市城区热岛效应等级分布图

Fig. 4 Grade distribution map of heat island effect in Hefei urban area from 2000 to 2020

得出热岛效应的分布:1级非热岛效应区主要位于合肥市和南昌市城区内部温度较低的水域、绿地及部分海拔较高的山体等,温度小于郊区温度;2级热岛效应过渡主要位于城市近郊的部分耕地、自然保护区及绿化建设区域等,由于受城市化的影响,温度上升接近于郊区温度;3级和4级热岛效应区主要是建成区内部下垫面介质为水泥、柏油路面、混凝土等用地,其热容量和导热率比郊区绿地大,能吸收到更多的热量,除此之外,

还包括人流量大的居民区、商场区及工业区。

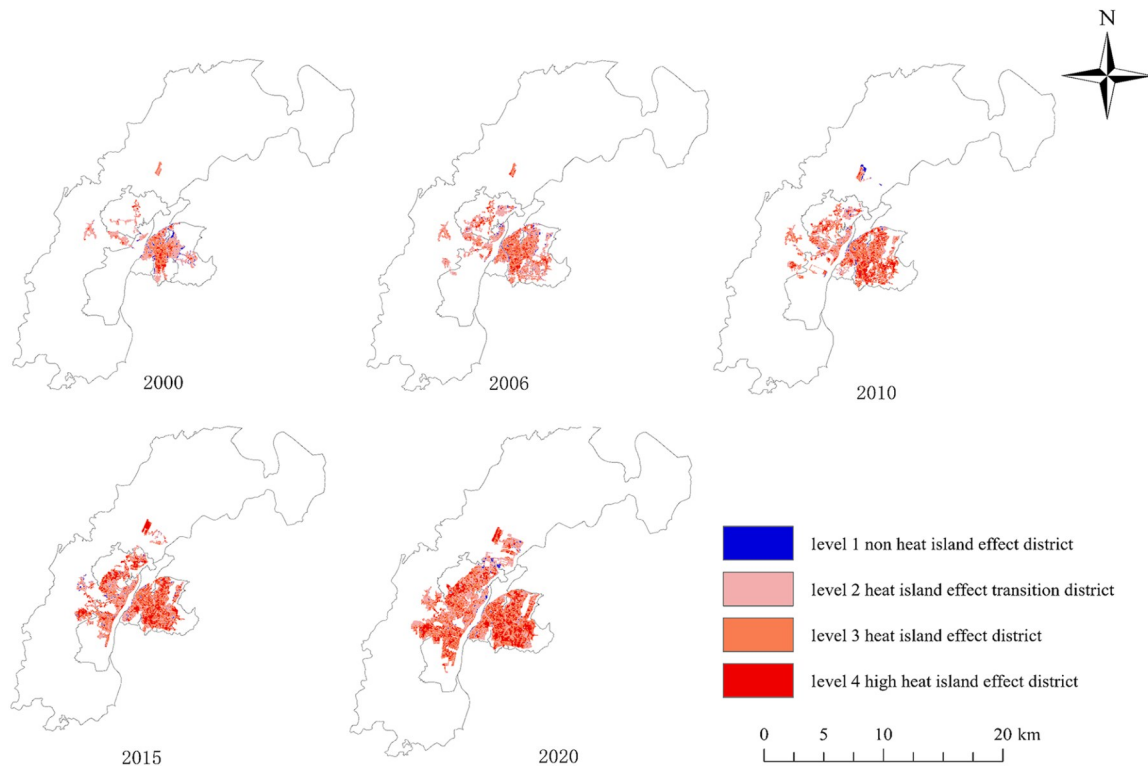


图 5 2000—2020 南昌市城区热岛效应等级分布图

Fig. 5 Grade distribution map of heat island effect in Nanchang urban area from 2000 to 2020

由于城市化的高速发展、人口的大规模流入以及建筑用地的迅速扩张,能够利用的土地日趋紧缺,从而增大城市空间的利用强度来缓解城市空间的需求问题会形成一个趋势,也使得土地的利用强度会愈来愈大。通过对两市的地表热岛强度分布分析得出:近 20 年内,两市主城区面积呈非线性持续扩大,合肥市和南昌市的地表热岛面积分别呈现东北—西南和东南—西北扩展趋势,热岛效应非常明显,且地表热岛效应的力度和范围均出现了大幅扩展态势,也与城市快速发展的规模和方向较为一致。两市的地表热岛面积变化如表 5.6 所示。由表 5.6 可知,2000—2020 年,合肥市的地表热岛效应区由 45.17 km² 增加到 351.61 km²,前十年 2 级地表热岛效应区的扩展速率最大,平均每年增大了 9.27 km²,后十年 4 级地表热岛效应区的扩张速率最大,平均每年增加了 14.72 km²;南昌市的地表热岛效应区由 40.80 km² 增加到 274.07 km²,20 年间 3 级地表热岛效应区的增加占主要比例,平均每年扩展了 8.05 km²。随着时间的变化,对比分析得出:合肥市的人类活动更为密集、工业化程度更加迅速;此外,合肥市历来注重绿化建设,还是首批国家级园林城市,非热岛区面积呈增加趋势,比 2000 年多 43.41 km²。

3.3 地理探测器结果分析

在地理探测器的因子探测结果上,再进行 Pearson 相关性分析及拟合,如表 7 所示。发现两市 Pearson 的相关性分析与因子探测器的结果相符合,地表热岛效应强度的影响因子解释力 q 值从大到小排列依次为:人口密度 x_1 、建成区面积 x_2 、人均 GDP x_3 、第二产业占比 x_3 、第三产业占比 x_4 。其中人口密度相较而言对城市地表热岛强度具有较强的决定力,且拟合模型为对数,与赵志敏^[34]对乌鲁木齐市城市化与热岛强度综合分

表 5 2000—2020 年合肥市地表热岛效应的面积变化

Table 5 Area change of surface heat island effect in Hefei from 2000 to 2020

Time	Area of heat island effect level/km ²				Heat island effect area/km ²
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	
2000	10.06	70.24	30.78	14.39	45.17
2006	5.13	147.79	50.32	28.45	80.56
2010	25.15	162.94	86.26	80.47	171.04
2015	32.74	165.18	101.72	130.62	232.34
2020	53.47	148.79	123.98	227.63	351.61

表 6 2000—2020 年南昌市地表热岛效应的面积变化

Table 6 Area change of surface heat island effect in Nanchang from 2000 to 2020

Time	Area of heat island effect level/km ²				Heat island effect area/km ²
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	
2000	5.21	70.19	33.24	7.20	40.80
2006	4.31	109.67	70.44	15.49	85.93
2010	4.56	92.36	100.57	34.05	134.62
2015	4.40	119.67	133.88	54.26	190.23
2020	4.80	146.12	194.30	79.37	274.07

析后得出人口密度增长与热岛效应呈最强正相关性, 以及杨英宝等^[35]对南京市的研究中发现人口密度与城市热岛效应为对数关系的结论相符合。

表 7 因子探测结果

Table 7 Factor detection result

Influence factor	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
q_{Hefei}	0.891	0.842	0.679	0.582	0.788
Pearson coefficient	0.965**	0.853**	0.755**	0.727**	0.912**
Fitting model	Logarithm	Linear	Quadratic	Quadratic	Logarithm
q_{Nanchang}	0.844	0.810	0.711	0.636	0.773
Pearson coefficient	0.972**	0.823**	0.812**	0.834**	0.923**
Fitting model	Logarithm	Linear	Quadratic	Quadratic	Linear

注: ** $p < 0.01$

在单一影响因子探测的基础上, 对合肥和南昌市地表热岛强度的因子进行交互作用并探测研究, 结果如表 8 和表 9 所示。分析发现, 交互作用均为双因子增强, 而且呈线性增强, 不存在独立或者减弱的关系, 说明人口密度、建成区面积、第二产业占比、第三产业占比和人均 GDP 每两个因素相互作用的决定力比单一因子更强, 更能加大城市地表热岛效应的强度, 其中人口密度与建成区面积的解释力较大, 所以可以作为出发点, 合理规划成为降低热岛效应的手段。

表 8 合肥市交互探测结果

Table 8 Interactive detection result of Hefei

$q(A \cap B)$	Compare	Explain
$q(x_1 \cap x_2) = 0.924$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < q(x_1) + q(x_2)$	Linear enhancement
$q(x_1 \cap x_3) = 0.917$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_3)] < q(x_1 \cap x_3) < q(x_1) + q(x_3)$	
$q(x_1 \cap x_4) = 0.902$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_4)] < q(x_1 \cap x_4) < q(x_1) + q(x_4)$	
$q(x_1 \cap x_5) = 0.921$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_5)] < q(x_1 \cap x_5) < q(x_1) + q(x_5)$	
$q(x_2 \cap x_3) = 0.857$	$\text{Max}[q(x_2), q(x_3)] < q(x_2 \cap x_3) < q(x_2) + q(x_3)$	
$q(x_2 \cap x_4) = 0.850$	$\text{Max}[q(x_2), q(x_4)] < q(x_2 \cap x_4) < q(x_2) + q(x_4)$	
$q(x_2 \cap x_5) = 0.874$	$\text{Max}[q(x_2), q(x_5)] < q(x_2 \cap x_5) < q(x_2) + q(x_5)$	
$q(x_3 \cap x_4) = 0.694$	$\text{Max}[q(x_3), q(x_4)] < q(x_3 \cap x_4) < q(x_3) + q(x_4)$	
$q(x_3 \cap x_5) = 0.819$	$\text{Max}[q(x_3), q(x_5)] < q(x_3 \cap x_5) < q(x_3) + q(x_5)$	
$q(x_4 \cap x_5) = 0.806$	$\text{Max}[q(x_4), q(x_5)] < q(x_4 \cap x_5) < q(x_4) + q(x_5)$	

注: 当 $\text{Max}[q(A), q(B)] < q(A \cap B) < q(A) + q(B)$ 时呈线性增强; 当 $q(A \cap B) > q(A) + q(B)$ 时呈非线性增强, 下表同

表 9 南昌市交互探测结果

Table 9 Interactive detection result of Nanchang

$q(A \cap B)$	Compare	Explain
$q(x_1 \cap x_2) = 0.872$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < q(x_1) + q(x_2)$	Linear enhancement
$q(x_1 \cap x_3) = 0.858$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_3)] < q(x_1 \cap x_3) < q(x_1) + q(x_3)$	
$q(x_1 \cap x_4) = 0.850$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_4)] < q(x_1 \cap x_4) < q(x_1) + q(x_4)$	
$q(x_1 \cap x_5) = 0.882$	$\text{Max}[q(x_1), q(x_5)] < q(x_1 \cap x_5) < q(x_1) + q(x_5)$	
$q(x_2 \cap x_3) = 0.856$	$\text{Max}[q(x_2), q(x_3)] < q(x_2 \cap x_3) < q(x_2) + q(x_3)$	
$q(x_2 \cap x_4) = 0.851$	$\text{Max}[q(x_2), q(x_4)] < q(x_2 \cap x_4) < q(x_2) + q(x_4)$	
$q(x_2 \cap x_5) = 0.865$	$\text{Max}[q(x_2), q(x_5)] < q(x_2 \cap x_5) < q(x_2) + q(x_5)$	
$q(x_3 \cap x_4) = 0.683$	$\text{Max}[q(x_3), q(x_4)] < q(x_3 \cap x_4) < q(x_3) + q(x_4)$	
$q(x_3 \cap x_5) = 0.807$	$\text{Max}[q(x_3), q(x_5)] < q(x_3 \cap x_5) < q(x_3) + q(x_5)$	
$q(x_4 \cap x_5) = 0.798$	$\text{Max}[q(x_4), q(x_5)] < q(x_4 \cap x_5) < q(x_4) + q(x_5)$	

4 结 论

1) 在 2000—2015 年, 合肥市的城市扩展系数由 1.70 降低到 1.08, 最后趋于 1.25, 在 2020 年时降低到 0.56; 在 2000—2020 年, 南昌市的城市扩展系数在 1.34~1.60 范围内上下波动; 合肥市和南昌市分别在 2011 年和 2018 年完成了产业结构转型, 朝着以第三产业拉动为导向的趋势演进; 城市发展时, 应重视现代服务业, 迁出加工制造类企业, 不仅能优化城区的空间布局, 还能分散热源, 缓解地表热岛效应。

2) 在 2000—2020 年的城市发展进程中, 合肥市和南昌市主城区持续扩展均呈现非线性的增长趋势; 合肥地表热岛效应主要在东北和西南方向上扩展, 而南昌主要呈现出东南和西北方向的扩展模式; 合肥和南昌地表热岛效应面积分别由 45.17 km² 和 40.80 km² 增加到 351.61 km² 和 274.07 km², 且热岛发展力度和范围与城市快速发展的规模和方向较为一致; 除此之外, 合肥市的非热岛面积增加了 43.41 km², 在发展的同时还兼顾到了生态环境, 增加了绿地、水体等建设。

3) 合肥市和南昌市的各影响因子对地表热岛效应强度的解释力从大到小均为: 人口密度、建成区面积、

人均GDP、第二产业占比、第三产业占比,其中人口密度的影响最大,产业结构中第二产业作用较高于第三产业;各因素相互作用均比单一因子对城市地表热岛效应强度的影响程度更大。

综上所述,城市快速发展与城市地表热岛效应的增强之间确实存在密切关系,当城市人口密度迅速增大时,常规做法是对传统建筑进行重建改造,使得各类建筑物的间距缩小,所容纳空间增大,或者增大建筑面积,但往往会使建筑与绿化的面积比例不协调;而大量的密集人口又会大大提高生产活动强度,进而进行大量的能源消费,增大了地表热岛效应强度。根据上述分析结果,对于目前城市发展和地表热岛效应扩展的趋势,提出以下建议:1)合理利用土地资源,加快产业结构的优化,大力发展创新,提升产业技术水平,使城市向着以第三产业拉动为导向的趋势发展,以减少重工业等带来的强热岛效应;2)城市在发展的同时应尽可能地提高绿化建设意识,保护并增加建设城区的绿地、水体等面积,保留足够的绿色空间,应多使用一些环保材料进行建筑的建造;3)适当控制城市人口数量,降低人为热,提倡绿色出行,多使用液化石油气、天然气等清洁能源;4)分析扩大建成区所带来的利弊,要重视生态环境的平衡,注重科学规划城市建设布局。

参考文献:

- [1] Zhao S Q, Zhou D C, Liu S G. Data concurrency is required for estimating urban heat island intensity [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 208(PtA): 118-124.
- [2] Yao Y, Chen X, Qian J. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1134-1147.
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] Zhu R X, Zhao N N, Wang Q Q, *et al.* Research on the influence of urban heat island (UHI) intensity on energy consumption for heating and cooling of existing residential buildings in different climate zones [J]. *South Architecture*, 2020, (5): 16-20.
朱荣鑫, 赵乃妮, 王清勤, 等. 城市热岛效应对我国不同气候区既有居住建筑采暖空调能耗的影响研究 [J]. *南方建筑*, 2020, (5): 16-20.
- [4] Han S J, Tang Q H, Xu D, *et al.* Impacts of urbanization and agricultural development on observed changes in surface air temperature over ***** from 1961 to 2006 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 135(3): 1595-1607.
- [5] Lin D G, Xie Y H, Ou L, *et al.* Study on urban heat island effect in Loudi City, Hunan Province [J]. *Building Science*, 2020, 36(10): 84-88.
林道光, 谢叶恒, 欧玲, 等. 湖南省娄底市城区热岛效应研究 [J]. *建筑科学*, 2020, 36(10): 84-88.
- [6] Nie J D, Zhang J H, Huang B. A review of studies on the impact of urban heat island effect on human health [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(1): 200-208.
聂敬娣, 张俊华, 黄波. 城市热岛效应对人体健康影响研究综述 [J]. *生态科学*, 2021, 40(1): 200-208.
- [7] Wei X M, Ma W C, Kong L. Relationship between change of land surface temperature and land surface characteristics in medium and small cities [J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(3): 115-119.
魏雪梅, 马卫春, 孔丽. 中小城市地表温度变化与下垫面关系 [J]. *遥感信息*, 2019, 34(3): 115-119.
- [8] Qiu G Y, Zhang X N. China's urbanization and its ecological environment challenges in the 21st century [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(6): 640-649.
邱国玉, 张晓楠. 21世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战 [J]. *地球科学进展*, 2019, 34(6): 640-649.
- [9] Pan Y, Cui L L, Liu C M, *et al.* Spatio-temporal analysis of urban heat island effect in Chongqing based on MODIS data [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(12): 3736-3745.

- 潘莹,崔林林,刘昌脉,等.基于MODIS数据的重庆市城市热岛效应时空分析[J].生态学杂志,2018,37(12):3736-3745.
- [10] Liu Y, Mu K K, Han B, *et al.* Surface urban heat island effect of local climate zone [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(6): 192-200.
刘衍,慕凯凯,韩冰,等.城市局地气候分类的地表热岛效应[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(6):192-200.
- [11] Liu T, Qi Y J, Cao G Z. China's floating population in the 21st century: Uneven landscape, influencing factors, and effects on urbanization [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4): 567-581.
刘涛,齐元静,曹广忠.中国流动人口空间格局演变机制及城镇化效应:基于2000和2010年人口普查分县数据的分析[J].地理学报,2015,70(4):567-581.
- [12] Yang X S, Yao L Y, Jin T, *et al.* Temporal and spatial variations of local temperatures in the summer of Nanjing [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, (1): 160-167.
杨小山,姚灵焯,金涛,等.南京夏季城市局地气温时空变化特征[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,(1):160-167.
- [13] Yang M, Yang G J, Wang Y J, *et al.* Remote sensing analysis of temporal-spatial variations of urban heat island effect over Beijing[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(3): 213-223.
杨敏,杨贵军,王艳杰,等.北京城市热岛效应时空变化遥感分析[J].国土资源遥感,2018,30(3):213-223.
- [14] Mao K B, Tang H J, Zhou Q B, *et al.* Retrieving land surface temperature from MODIS data by using radiance transfer equation [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2007, 43(4): 12-17.
毛克彪,唐华俊,周清波,等.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),2007,43(4):12-17.
- [15] Cao X J, Jiang H, Zhang Z M, *et al.* Atmospheric correction of Landsat-8 satellite image and its vegetation index comparison with SEVI [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(5): 983-991.
曹小杰,江洪,张兆明,等.Landsat8卫星影像大气校正及其植被指数与SEVI性能比较[J].遥感技术与应用,2019,34(5):983-991.
- [16] 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.
- [17] Su Y, Bao Y. Spatial-temporal characteristics of urban heat island effect in Hanzhong City in recent 20 years based on mono-window algorithm [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(4): 183-192.
苏嫻,包玉.基于单窗算法的汉中市近20年城市热岛效应时空特征[J].西北林学院学报,2018,33(4):183-192.
- [18] Li Y, Pan J H. Spatial pattern on urban heat environment using split window algorithm and spectral mixture analysis based on Landsat 8 images: A case of Lanzhou City [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(1): 111-119.
李瑶,潘竟虎.基于Landsat 8劈窗算法与混合光谱分解的城市热岛空间格局分析:以兰州市中心城区为例[J].干旱区地理,2015,38(1):111-119.
- [19] Jimenez-Munoz J C, Cristobal J, Sobrino J A, *et al.* Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 339-349.
- [20] Wang Y, Yang D, Min J, *et al.* Spatial pattern analysis and quantitative detection of multi-factor influence for urban heat island effect in a mountainous city: A case study of Chongqing metropolitan circle [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(3): 856-868.
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.
- [21] Wang G, Xiao R B, Zhang Q P, *et al.* On impacts of land use, population density and altitude on the urban heat island [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 41(1): 82-90.
王刚,肖荣波,张秋平,等.土地利用、人口密度及海拔对城市热岛的影响[J].云南大学学报(自然科学),2019,41(1):82-90.
- [22] Yin Y X, Zhang H, An H M, *et al.* Heat island characteristics and influencing factors of urban agglomeration in the Yangtze River Economic Zone based on GEE [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(1): 160-169.

- 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.
- [23] Tan M H, Li X B, Lv C H. The expansion of construction land in China's large and medium cities in the 1990s and the occupation of cultivated land [J]. *Chinese Science: Series D*, 2004, 34(12): 1157-1165.
谈明洪, 李秀彬, 吕昌河. 20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用 [J]. 中国科学 (D辑), 2004, 34(12): 1157-1165.
- [24] Guo Y, Wang H W, Zhang Z, et al. Spatio-temporal scale effect and driving mechanism of thermal environment and land surface cover in Nanjing [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, 29(7): 1403-1411.
郭宇, 王宏伟, 张喆, 等. 南京市热环境与地表覆被的时空尺度效应及驱动机制研究 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1403-1411.
- [25] Ma J, Wang Q M, Ji M D, et al. Remote sensing analysis of heat island effect in Changchun City [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(8): 61-69.
马晶, 王青妹, 纪梦达, 等. 长春市城区热岛效应遥感分析 [J]. 测绘科学, 2019, 44(8): 61-69.
- [26] Chen X, Vierling L, Deering D. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(1): 63-79.
- [27] Liu L, Yao B. Monitoring vegetation-cover changes based on NDVI dimidiate pixel model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S1): 230-234.
刘琳, 姚波. 基于NDVI象元二分法的植被覆盖变化监测 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 230-234.
- [28] Glenn D M, Tabb A. Evaluation of five methods to measure normalized difference vegetation index (NDVI) in apple and citrus [J]. *International Journal of Fruit Science*, 2019, 19(2): 191-210.
- [29] Qin Z H, Li W J, Zhang M H, et al. Estimation method of atmospheric parameters using single window algorithm [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2003, (2): 37-43.
覃志豪, 李文娟, 张明华, 等. 单窗算法的大气参数估计方法 [J]. 国土资源遥感, 2003, (2): 37-43.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Xia M Y, Liu H, Jiang Y, et al. Spatial-temporal characteristics and driving force analysis of Hefei urban expansion based on remote sensing monitoring [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2021, 44(9): 140-144.
夏明宇, 刘虎, 姜岳, 等. 基于遥感监测的合肥市城市扩展时空特征及驱动力分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(9): 140-144.
- [33] Yuan X, Yan Q S. Research on dynamic evolution and simulation of land use landscape pattern in Nanchang City [J]. *Jiangxi Science*, 2022, 40(2): 291-299.
袁雪, 颜七笙. 南昌市土地利用景观格局动态演变与模拟研究 [J]. 江西科学, 2022, 40(2): 291-299.
- [34] Zhao Z M. The analyse on urban heat-island effect factors and the countermeasures on the issue [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2008, 24(6): 77-79.
赵志敏. 城市化进程对城市热岛效应因子的对比分析 [J]. 中国环境监测, 2008, 24(6): 77-79.
- [35] Yang Y B, Su W Z, Jiang N, et al. Spatial-temporal characteristics of urban heat island effect change of Nanjing City and its relation with land use change [J]. *Geographical Research*, 2007, 26(5): 877-886.
杨英宝, 苏伟忠, 江南, 等. 南京市热岛效应变化时空特征及其与土地利用变化的关系 [J]. 地理研究, 2007, 26(5): 877-886.