

近20年太原城市群热岛演变遥感研究

郑培鑫, 邓帆*, 李志远, 赵恩灵, 冯倩, 韩杨
(长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要:为揭示太原城市群热岛效应时空变化规律,利用2003—2021年的MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)地表温度产品(MYD11A2/MOD11A2)获取太原城市群长时间序列地表温度,计算热岛强度并进行强度划分,从年、季、月以及日时间尺度对城市群的热岛变化分布特征及其演变规律进行分析。结果表明:(1)太原城市群热岛效应随城市发展呈增长趋势,2019年热岛效应最强。空间上由太原盆地外围向内部填充;(2)太原城市群热岛强度季节变化表现为:夏季>春季>秋季>冬季,太原市热岛效应季节性差异尤为明显;(3)太原城市群热岛效应从1月—6月逐步增强,热岛区域分布在太原城市群中部,7月—12月份逐渐减弱,热岛分布区域由中东部向西南部紧缩;(4)太原城市群白天热岛面积是夜晚的两倍,热岛分布夜晚较白天分散,集中在城市中心区域,冷岛分布较为相似。该结论可为太原城市群未来气候变化研究和生态城市建设提供依据。

关键词:城市热岛;地表温度;时空变化;Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer;太原城市群

中图分类号:TP79;X87 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2395(2024)02-0452-12

Remote Sensing Study on the Evolution of Heat Island in Taiyuan Urban Agglomeration in Recent 20 Years

ZHENG Peixin, DENG Fan*, LI Zhiyuan, ZHAO Enling, FENG Qian, HAN Yang
(School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: To reveal the temporal and spatial variation of the heat island effect in Taiyuan urban agglomeration, the MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) surface temperature product (MYD11A2/MOD11A2) from 2003 to 2021 was used to obtain the long time series surface temperature of Taiyuan urban agglomeration, calculate the intensity of the heat island and divide the intensity, and analyze the change distribution characteristics and evolution law of the heat island in the urban agglomeration at the annual, quarterly, monthly and daily time scales. The results show that: (1) The heat island effect of Taiyuan urban agglomeration is generally growing, with the strongest heat island effect in 2019. In space, it is filled from the outside of Taiyuan basin to the inside; (2) Seasonal variation of heat island intensity in Taiyuan urban agglomeration is as follows: summer > spring > autumn > winter. Seasonal variation is closely related to the heat island effect in the eastern part of the urban agglomeration; (3) The heat island effect of Taiyuan urban agglomeration was gradually enhanced from January to June. The heat island area was distributed in the central part of Taiyuan urban agglomeration, and gradually weakened from July to December. The heat island distribution area was compacted from the Middle East to the southwest; (4) The area of heat island in the daytime of Taiyuan urban agglomeration is twice as large as that at night. The distribution of heat island at night is more dispersed than that at daytime, concentrated in the central area of the city, and at daytime, concentrated in the city's central area, and so does the distribution of cold island. This conclusion can provide a

收稿日期:2022-11-08; **接受日期:**2023-05-28

基金项目:自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金(KF-2020-05-047);长江大学2021年教学研究项目(JY2021021)

作者简介:郑培鑫(1998-),男,山西阳泉人,硕士研究生,主要研究方向为城市遥感。E-mail:202071352@yangtzeu.edu.cn

* **通信作者:**邓帆(DENG Fan),E-mail:dengfan@yangtzeu.edu.cn

引文格式:郑培鑫,邓帆,李志远,等.近20年太原城市群热岛演变遥感研究[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(2):452-463. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023104

basis for future climate change research and ecological city construction in Taiyuan.

Key words: urban heat island; surface temperature; spatiotemporal variation; moderate-resolution imaging spectroradiometer; Taiyuan urban agglomeration

0 引言

工业革命以来,全球城市化进入了快速发展阶段,城市人口的比重不断增加,城镇化率不断提高。城市化引起下垫面的显著变化,对局地气候产生影响,城市热岛效应(urban heat island effects)就是城市化对气候影响的主要表现之一。它是指城市气温高于周围自然环境气温的现象^[1],在气温分布图上,城市是个封闭的高温区,犹如孤立的岛屿。随着城市化的进程,城市面积的迅速扩大,城市间的距离逐渐缩短,在局部范围内形成城市群。城市群是人口密集、高楼林立、内在联系紧密的城市集合体,城市群必然会对周边热环境造成较大的影响^[2]。因此,打破城市之间的界限,从城市群的角度分析热岛效应的时空变化特征和演化规律,可为宏观层面缓解热岛效应提供理论依据。

研究城市热岛效应可以有效地了解城市热环境变化,为改善城市生态环境质量提供依据。目前,热岛效应的研究主要是利用气象观测站数据^[3-6]和遥感数据进行。遥感技术可提供具有宏观一致性的数据,在大尺度研究中广泛使用,利于与城市下垫面数据结合进行空间分析,便于分析热岛效应的空间格局和影响因素。基于遥感的城市热岛研究具体可以分为两类:一是研究热岛的分布特征及不同因素对热岛的影响。学者们探讨了水体^[7-9]、下垫面^[10-12]、大气^[13-15]和植被^[16-17]等因素对城市热环境的影响。总体来看,我国90%以上的城市存在热岛效应,且白天热岛强度高于夜晚,热带地区的热岛强度高于温带地区^[18];白天东部沿海城市热岛强度高于西北和高原城市^[19]。自然因素对热岛强度起主导作用,热岛比例则受人为因素影响^[20]。二是针对特定的城市,分析热岛的时空格局、演化规律。学者们利用遥感影像,对城市及城市群的热岛效应进行了长时间序列分析,城市扩张会影响热岛的强度与

分布^[21]。例如,米晓楠等^[22]利用多源卫星资料计算太原市热岛强度及城市热岛比例指数,结果表明太原市热岛效应明显,且太原南部热岛强度逐渐增强且有相连趋势。太原市夏季热岛效应较强,城市内部的绿地公园、水体对热岛效应起消减作用^[21-22]。此外,学者们还对北京^[23]、武汉^[24-25]、西安^[26]等地区城市热岛的形成及演变规律进行了探索。这些研究成果对于指导城市规划、建设具有重要意义。

太原城市群是国家重点建设的14个城市群之一,位于山西省中东部,以太原市为中心,以太原盆地城镇密集区为主体构成的城市群,是山西省经济最发达的地区。目前关于太原城市群的热岛研究尚没有长时间序列的遥感资料分析研究。因此,本文利用连续、多时相的遥感地表温度资料(2003年—2021年的MYD11A2/MOD11A2数据),对太原城市群地表温度和热岛强度进行研究,并从日、月、季、年等多个时间尺度对太原城市群热岛效应的分布特征和演变规律进行探讨,以期增加对太原城市群热岛效应的认识,为太原城市群城市规划及城市生态环境保护提供更科学的依据。

1 研究区概况

太原城市群涵盖山西省中部的21个县区,包括太原市(古交市、迎泽区、尖草坪区、晋源区、万柏林区、小店区、杏花岭区、阳曲县、娄烦县、清徐县),介休市、平遥县、祁县、太谷区、榆次区,交城县、岚县、文水县、孝义市、汾阳市,静乐县(据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划》)(图1)。研究区总面积 $2.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,城市群大部分位于太原盆地,东西两侧以断层崖与山地相接,呈现“东西高、中间低”的地势特征,城市群北部为山地。研究区属于温带大陆性气候,夏季最高气温 36°C ,具有四季分明、冬夏气温悬殊、昼夜温差大的特点。作为山西省的经济、政治、文化和资源中心,近年来太原城市群建筑用地不断扩

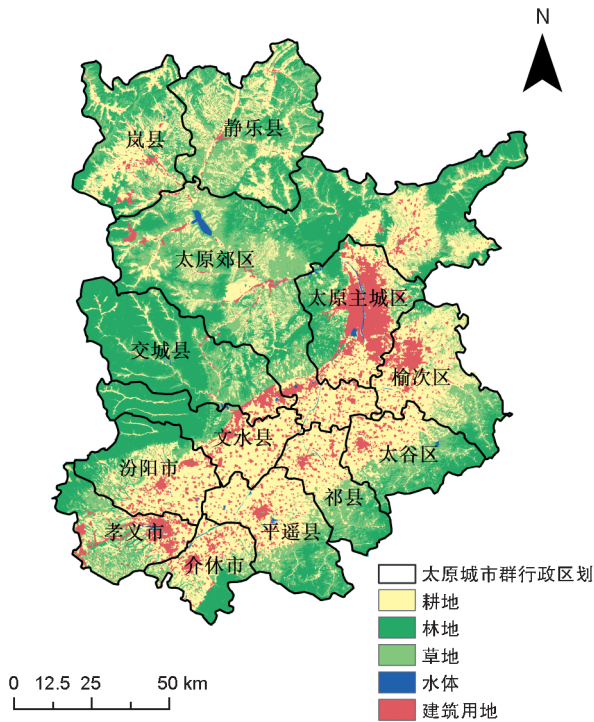


图1 太原城市群2020年30米地表覆盖数据土地利用现状图

Fig. 1 Land use status map of Taiyuan urban agglomeration with 30 meter surface cover data in 2020

张,建筑高度逐步增加,城市化水平逐年上升,使热量在城市区内大量积聚,热岛效应进一步增强^[27]。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及处理

本文使用NASA(National Aeronautics and Space Administration)2003年—2021年间所有的MOD11A2/MYD11A2遥感影像,共计1748幅,影像标识号为H26V05。MOD11A2/MYD11A2是空间分辨率为1 km、时间分辨率为8 d的MODIS L1B级合成产品。MOD11A2/MYD11A2一天共有四次过境,为研究热岛效应的昼夜变化特征提供了条件。L1B级产品的最新算法在反射响应速度、扫描角度与红外波段的光学串扰等方面进行了调整,产品精度进一步提升,保证了数据的一致性与相对稳定性。

利用ENVI(Environment for Visualizing Images)软件,从MOD11A2/MYD11A2中提取昼、夜地表温度两个数据集,利用MRT(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer Reprojection

Tool)工具对数据集进行坐标转换、重投影等预处理,使用太原城市群行政区划图与昼、夜(间)数据集做掩膜处理,然后利用ArcGIS的栅格计算器将像素亮度转为地表温度^[28],并对空缺值进行插值计算,定标公式(1):

$$T_{ls} = 0.02 \times D - 273.15, \quad (1)$$

式中: T_{ls} 为像素的地表温度; D 为像素亮度。

土地利用数据来自2000、2010和2020年全球30 m地表覆盖数据(GlobeLand30)产品,利用ArcGIS对影像重分类得到耕地、林地、草地、水体、建筑用地5大类,并将30 m分辨率的建筑用地与1 km的格网空间进行叠加,计算1 km²内的建筑用地密度。

2.2 研究方法

缓冲区法是当前常见的热岛强度估算方法,即在城市边界的基础上向外做一定距离或者等面积的缓冲区作为乡村区域,来计算城乡温度差异。具体步骤为:①获取2000年、2010年和2020年太原城市群的建筑用地作为2003年—2009年、2010年—2019年、2020年—2021年三个时间段的城市区;②城市区向外做等面积缓冲区为乡村区域;③利用城市区与乡村区域地表平均温度的差值来表示热岛强度。

为研究不同时间尺度热岛效应特征,将MOD11A2/MOY11A2 8 d地表温度产品处理成年、季、月、日不同时间尺度的地表温度。通过对多幅遥感影像同一区域的各个像元值进行平均值计算,减少地表温度计算的误差,获得不同时间尺度的地表温度。在计算季节地表温度时,规定3月—5月为春季,6月—8月为夏季,9月—11月为秋季,12月—次年2月为冬季。

2.3 热岛强度计算与分级

将预处理后的年、季、月、日地表温度数据,计算热岛强度并进行等级划分^[19]。热岛强度计算如公式2所示:

$$I_{\text{subi}} = \frac{\sum_0^m T_c}{m} - \frac{\sum_0^n T_u}{n}, \quad (2)$$

式中: I_{subi} 指太原城市群热岛强度; m 、 n 分别代表城市区与乡村区域的像元总个数; T_c 指城市区第 u 个像元的地表温度; T_u 指乡村区域第 u 个像元的地表温度。本文为方便统计,将 I_{subi} 值小于1℃定义为冷岛,并根据均值-标准差法定义

弱热岛(1℃~2℃),中热岛(2℃~3℃),强热岛(3℃~4℃),极强热岛(>4℃),见表1。文中热岛面积一般指中强度及以上热岛面积的总和。

表1 热岛强度等级划分

Table 1 Classification of heat island intensity

序号	热岛强度等级	范围
1	冷岛	$\Delta t \leq 1^\circ\text{C}$
2	弱热岛	$1^\circ\text{C} < \Delta t \leq 2^\circ\text{C}$
3	中热岛	$2^\circ\text{C} < \Delta t \leq 3^\circ\text{C}$
4	强热岛	$3^\circ\text{C} < \Delta t \leq 4^\circ\text{C}$
5	极强热岛	$\Delta t > 4^\circ\text{C}$

注:Δt为城市区与乡村区域的地表温度差值。

3 结果与分析

3.1 昼夜变化

通过对太原城市群2003年—2021年昼夜地表温度数据的处理和统计分析,得到太原城市群昼夜各热岛强度等级占总区域的面积比例(图2、表2)。

太原城市群冷岛集中在城市群的北部、东南部,昼夜变化幅度较小。弱热岛昼夜变化明显,夜晚弱热岛面积是白天两倍,主要分布在中热岛周围。强热岛昼夜变化次之,白天分布在文水、汾阳、孝义、介休、平遥、祁县、太谷、榆次的部分地区,呈条带状;夜晚在城市中心,如

表2 太原城市群热岛比例

Table 2 Proportion of heat island in Taiyuan urban agglomeration

热岛强度	昼/%	夜/%
冷岛	67.79	68.04
弱热岛	10.37	21.15
中热岛	11.72	8.12
强热岛	9.06	2.00
极强热岛	1.05	0.68

太原主城区、孝义、介休等,呈点状分布。白天极强热岛较多,集中在汾阳市南部、孝义市东部,介休市、平遥县、祁县、太谷区有少量分布;夜间大面积的极强热岛分布在太原主城区。

3.2 热岛效应的月变化

太原城市群每月的乡村区域平均地表温度见图3。太原城市群乡村区域的平均地表温度在1月—7月呈上升趋势,8月—12月呈下降趋势,在6、7月平均地表温度高达24℃。

太原城市群热岛效应月变化如图4、图5所示。5月—6月热岛效应较强,极强热岛主要分布在太原城市群西南部,7月—12月份逐渐减弱,热岛区域由中东部向西南部紧缩。太原城市群最强热岛效应在5月,极强热岛与强热岛面积均达到最大值,分别为2 973 km²和672 km²,其中极强热岛集中在孝义市、文水县东部。极强热岛按月波动变化,1月—5月持续

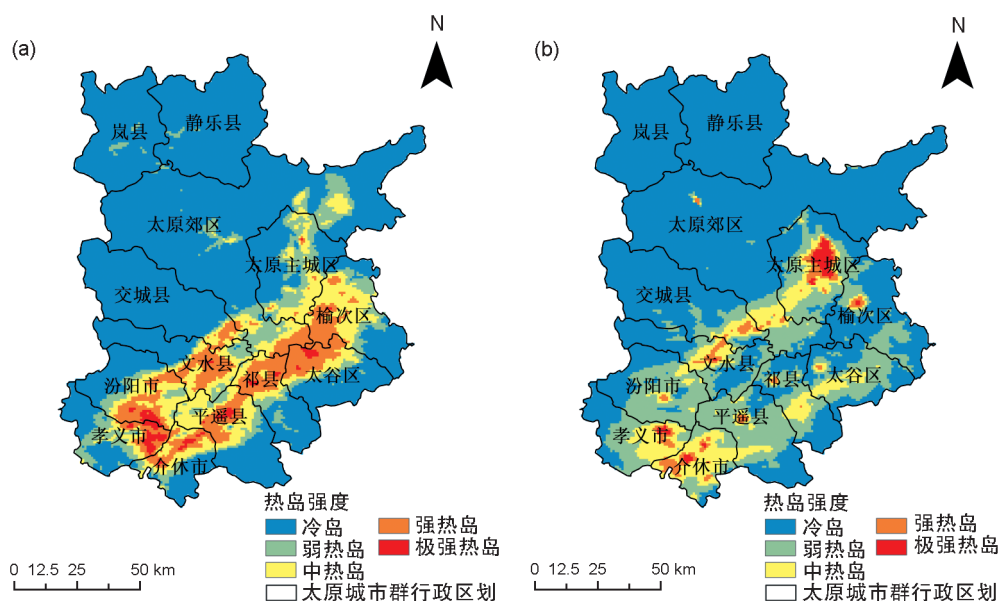


图2 太原城市群热岛效应昼(a)夜(b)分布图

Fig. 2 Daytime (a) and night (b) distribution of heat island effect in Taiyuan urban agglomeration

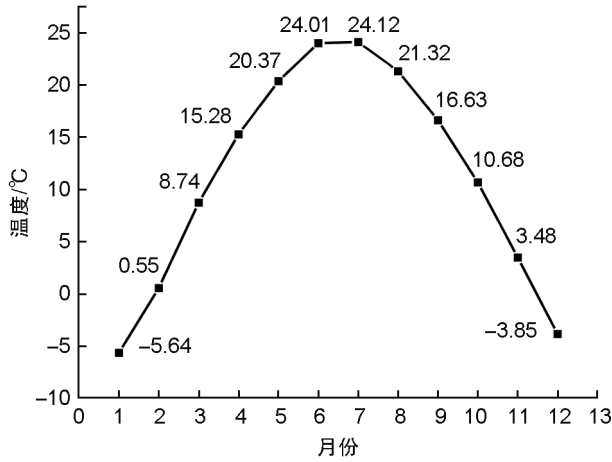


图3 太原城市群乡村区域月平均温度

Fig. 3 Mean monthly temperature in rural areas of Taiyuan urban agglomeration

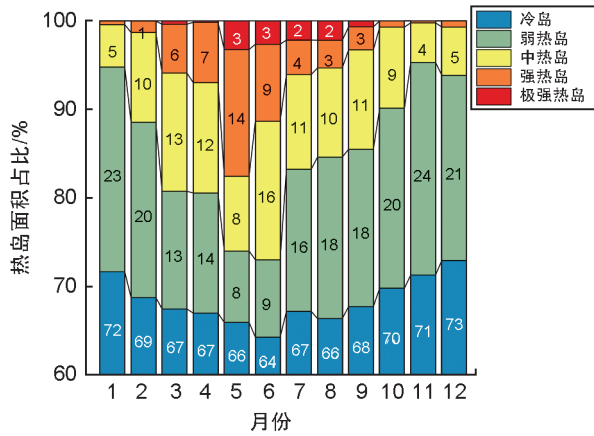


图4 太原城市群热岛比例月变化图

Fig. 4 Monthly variation of heat island effect in Taiyuan urban agglomeration

增长,6月—12月缓慢下降,1月、2月、10月、11月、12月极强热岛面积均不到5 km²。强热岛在5月份面积最大,达到2 973 km²,广泛分布在太原盆地内,3、4、6月面积较大,1月—2月、10月—12月则处于低谷区,其中11月份最低,强热岛面积为46 km²,零星分布在介休、孝义与太原主城区境内。中热岛面积浮动相对较小,且长时间占据热岛面积的50%以上,6月份中热岛面积达到最大值3 251 km²,由5月份的强热岛转换而来,11月中热岛面积最小为928 km²,主要聚集在孝义、介休、太原主城区,文水县、汾阳、平遥、祁县、太谷境内呈点状分布。一年中,冷岛占城市群总面积的70%左右,集中在城市群的北部与东南部。

3.3 热岛效应的季节变化

太原城市群热岛效应具有季节性差异,其中夏季热岛效应最强,冬季最弱(图6)。夏季极强热岛面积最大,集中分布在孝义、介休及太原主城区的中心部分,春季次之,主要分布在孝义;春季强热岛广泛分布在太原盆地,冬季强热岛面积最小,主要分布在孝义、介休两地。中热岛春、夏季面积相当,春季更集中在太原盆地西南部,夏季中热岛重心向太原城区靠拢。太原城市群春、夏两季的热岛效应比较显著,春季强热岛分布广,夏季极强热岛分布更集中。冬季热岛效应最弱,乡村区域平均温度不足0℃,中热岛、强热岛、极强热岛面积大幅下降。

3.4 热岛效应的年变化

太原城市群2003年、2006年、2009年、2012年、2015年、2018年、2021年热岛分布变化如图7所示。2003年—2021年间,太原城市群热岛效应逐年增强,2021年热岛面积相较2003年大幅增长,热岛分布从太原盆地向内部填充,太原城市群热岛的空间特征整体上受“东西高、中间低”地势影响。

太原城市群近20年的热岛面积制成折线图如图8所示,极强热岛呈缓慢上升趋势,2019年极强热岛面积为252 km²,为近20年最大值,经2019年—2020年下降后2021年大幅增加,增幅高达69.90%,极强热岛主要集中在孝义、介休两地。中热岛面积增幅最大,变化主要分为3个阶段:①2003年—2005年缓慢增长,②2005年—2013年波动增长,③2013年—2020年继续增长,2019年达最大值3 475 km²。强热岛增速居中,近20年中有两个较快增长的阶段分别为2006年—2008年、2016年—2019年,经过两次大幅增长太原盆地的强热岛从点状分布演化呈带状分布。弱热岛面积在近20年中不断下降,逐渐转换为冷岛与中热岛。2007年前,极强热岛只出现在太原主城区的中心位置,2007年平遥县成为第二个拥有极强热岛的行政区,随后孝义、介休、祁县等相继出现极强热岛,2019年太原城市群热岛效应最强,孝义东部与介休西部的极强热岛首次相连,形成近20年内最大的热岛。

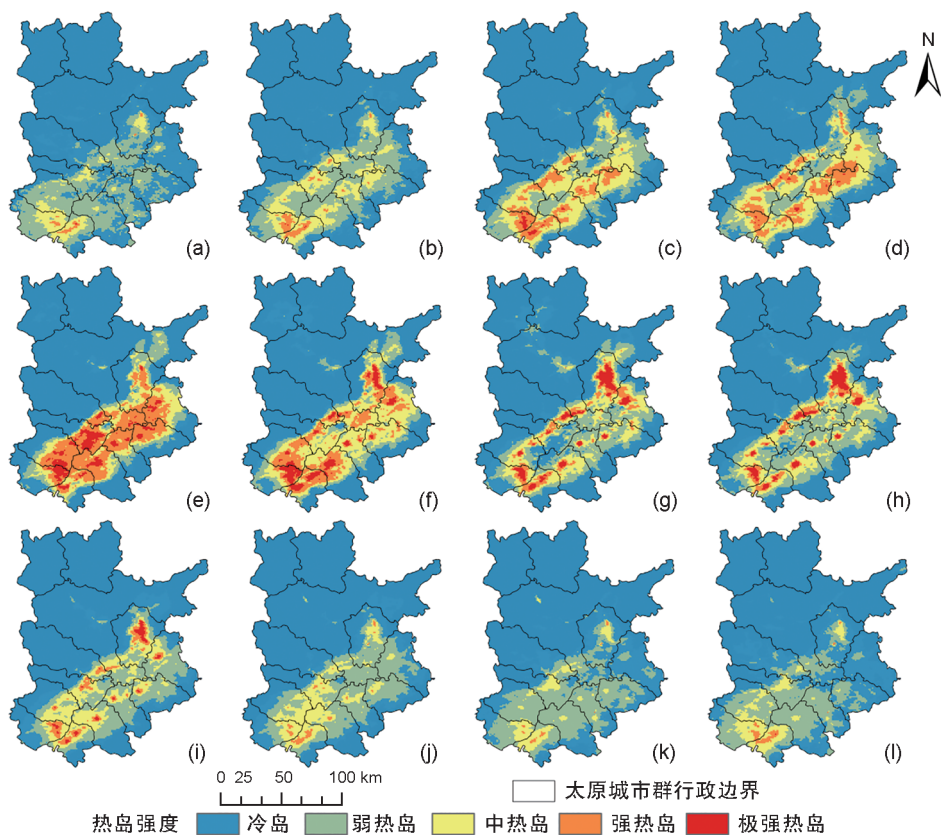


图5 太原城市群热岛月份分布图((a)—(l):1月—12月)

Fig. 5 Monthly distribution map of heat island in Taiyuan urban agglomeration ((a)—(l): Jan—Dec)

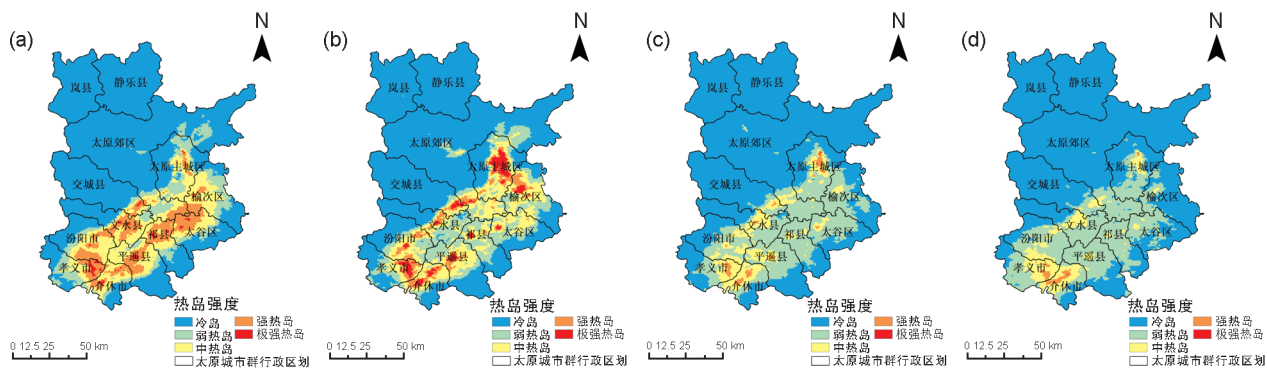


图6 太原城市群热岛效应季节分布图

(a) 春, (b) 夏, (c) 秋, (d) 冬

Fig. 6 Distribution map of heat island effect season in Taiyuan urban agglomeration

(a) Spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

统计太原城市群的热岛分布面积(表3),结果表明,太原城市群经过近20年的发展后,行政区内的中热岛强度以上的热岛面积不断增大,总体增长146.34%。其中,孝义市极强热岛区面积最大,为670 km²;介休市极强热岛区面积占比最大约为7.10%;孝义市变化幅度最大,与2003年相比极强热岛区面积增长670 km²;北方的静乐县、岚县与榆次区热岛效应最弱,几

乎不存在中热岛区、强热岛区和极强热岛区。到2021年,除静乐县、岚县外所有行政区内的中强度以上的热岛面积都有54%~497%的增长,且平遥、介休、孝义、太原主城区均存在大面积的极强热岛区。

太原城市群热岛主要分布在太原城市群区西南部和东部即太原主城区市南部、交城县、汾阳市东南部、孝义市东部、介休市、平遥县、

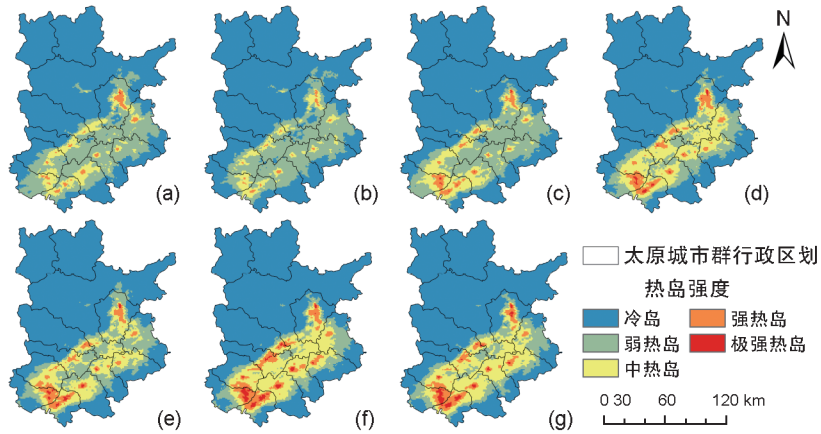


图7 太原城市群热岛分布图((a)—(g):2003、2006、2009、2012、2015、2018、2021年)

Fig. 7 Heat island distribution map of Taiyuan urban agglomeration ((a)—(g): In 2003, 2006, 2009, 2012, 2015, 2018, 2021)

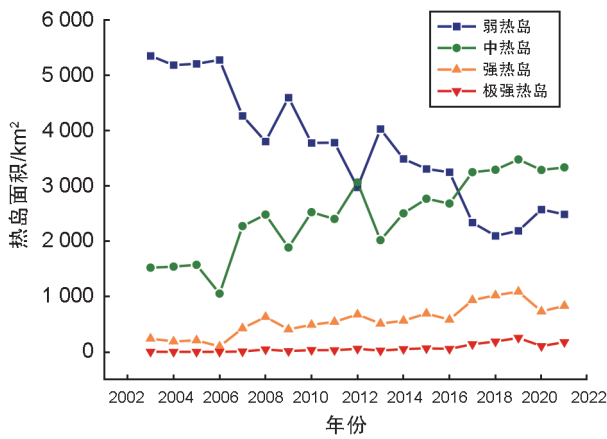


图8 太原城市群热岛效应季年际变化图

Fig. 8 Interannual variation of heat island effect in Taiyuan urban agglomeration

祁县、太谷区北部和榆次区西部,大致表现为西南—中东走向的条带状,并同时向内部填充,极强热岛分布在太原主城区、孝义市及介休市,冷岛分布在地势较高的交城县、岚县、静乐县和太原郊区。

3.5 核心区热岛变化研究

除了从宏观视角分析太原城市群热岛面积的变化,作为城市群核心——太原主城区的热岛变化尤为明显(图9)。太原主城区在近20年间热岛强度发生了大面积变化,主要表现为:冷岛面积增加了21.12%,集中分布在核心区北部和东北部,包括尖草坪区、杏花岭区大部分、迎泽区和小店区少部分地区;弱热岛面积由原有的534 km²减少到327 km²,降幅为39.22%,小店

表3 太原城市群行政区不同等级热岛面积表

Table 3 Heat island areas of different grades in administrative regions of Taiyuan urban agglomeration (km²)

行政区	冷岛		弱热岛		中热岛		强热岛		极强热岛	
	2003	2021	2003	2021	2003	2021	2003	2021	2003	2021
榆次区	459	483	746	544	94	269	22	25	0	0
太谷区	390	391	588	230	63	371	7	51	0	5
祁县	285	267	500	160	60	393	12	31	0	6
平遥县	463	471	533	207	239	518	18	46	0	11
介休市	223	187	285	105	204	216	31	182	0	53
静乐县	2 039	2 039	0	0	0	0	0	0	0	0
文水县	486	459	449	192	136	350	8	76	0	2
交城县	1 612	1 619	148	72	66	93	4	42	0	4
岚县	1 523	1 523	0	0	0	0	0	0	0	0
孝义市	303	360	447	253	169	116	24	147	0	67
汾阳市	474	475	491	184	206	409	9	108	0	4
太原主城区	623	686	538	327	165	293	104	106	2	20
太原郊区	4 770	4 977	622	209	118	304	0	17	0	3

区、尖草坪区、杏花岭区减少明显;中热岛增加了77.58%,小店区大面积的弱热岛转变为中热岛;强热岛面积几乎不变;极强热岛面积由原来的2 km²增加到20 km²,增幅高达900%,其中尖草坪区扩张明显,杏花岭区西南部、迎泽区西部、小店区北部相邻的区域转变为大型极强热岛。

3.6 热岛变化与城市建设的关系

为探究热岛变化与城市建设间的关系,本文提取2000年、2010年、2020年GlobeLand30数据集中的建设用地,并与时间相近的热岛分布图进行叠加,得到热岛-建设用地叠加图(图

10);利用ArcGIS面积制表功能获取不同建筑用地密度下的热岛比例,制成堆叠图(图11);利用2003年、2021年间的建筑用地、热岛变化情况制作2003年—2021年城市建设与热岛转换表(表4)。

在近20年的时间内太原城市群建筑用地增加了92.93%,热岛面积增加了146.34%,随着建筑用地的增加,太原城市群热岛效应逐步增强。2003年热岛主要分布在大型建筑用地附近(图10(a)),如太原主城区、榆次区、平遥县、介休市、孝义市等。2010年随着建筑用地的扩张,

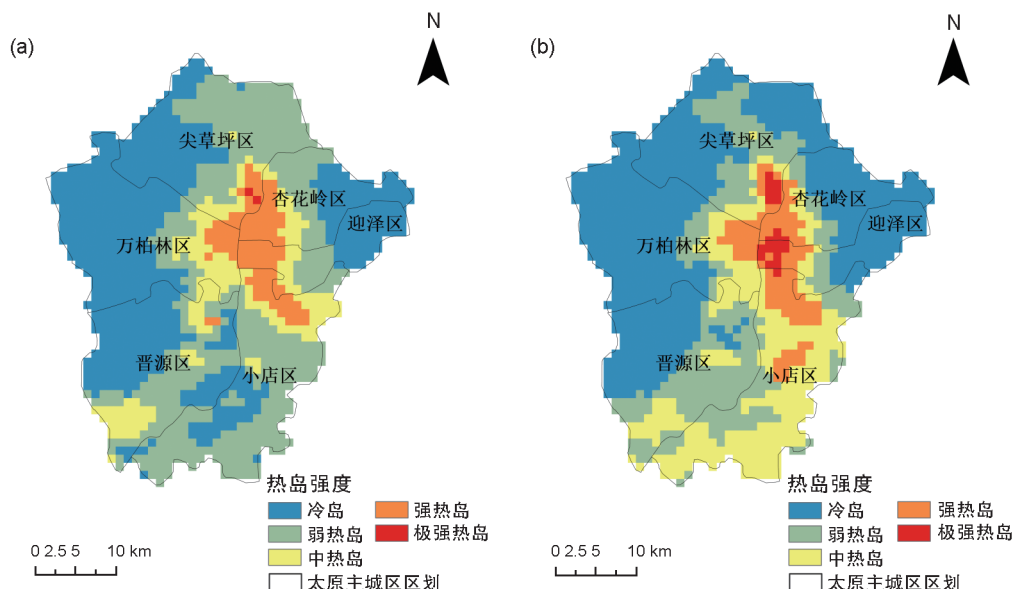


图9 太原主城区热岛分布图

(a) 2003年;(b) 2021年

Fig. 9 Distribution map of heat island in main urban area of Taiyuan

(a) In 2003; (b) in 2021

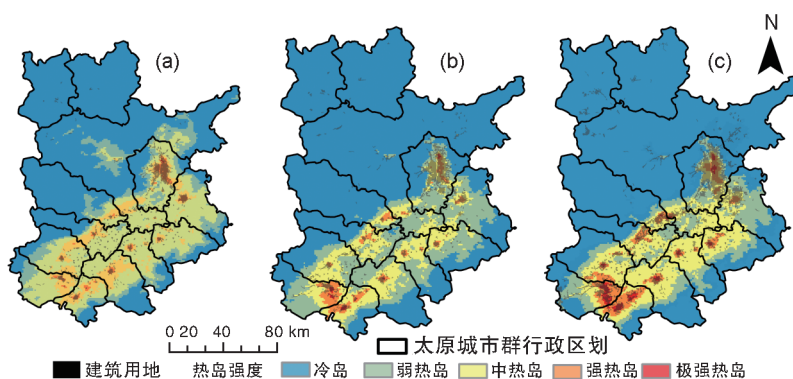


图10 热岛-建设用地叠加图

(a) 2003年;(b) 2010年;(c) 2021年

Fig. 10 Heat Island - Construction land overlap map

(a) In 2003; (b) in 2010; (c) in 2021

大型建筑用地周围的热岛效应变强(图 10(b))。2021 年,祁县、汾阳、太谷、文水与交城建筑用地的增加、太原盆地中建筑用地密度的提升使整个城市群的热岛效应更强并向内部填充。太原盆地内大部分弱热岛升级成为中热岛(图 10(c))。

随着太原城市群建筑密度的增加,极强热岛比例逐步扩大;同等建筑用地密度下,2003 年、2010 年、2021 年极强热岛、强热岛面积逐渐增加(图 11)。2003 年,太原城市群内几乎不存在极强热岛,强热岛面积在建筑用地密度为 20% 时最小,当建筑密度达到 100% 时最大,占总体热岛的 67%;2010 年,建筑用地密度在逐步提升的同时,极强热岛比例也在上升。当建筑密度达到 100% 时,城市群内出现 1% 的冷岛区域。2023 年,建筑用地密度为 100% 时,极强

热岛比例达到 14%,强热岛与中热岛面积相当,冷岛也占据了 8% 的面积。

非建筑用地在转变为建筑用地的过程中,热岛等级也会发生一定变化。由表 4 知,2003 年~2021 年间,升级热岛面积为 3 688.88 km²,降级热岛面积为 695.24 km²,绝大部分区域热岛等级无变化。在向高等级热岛发展的过程中建筑用地占 868.35 km²,其中非建筑用地转化面积占 49.18%,较多的弱热岛、中热岛升级成更高级的热岛;降级热岛内部建筑用地与非建筑用地转变较小;在热岛等级没有发生变化的区域内,非建筑用地转建筑用地占土地变化总面积的 93.64%,为 435.475 8 km²。

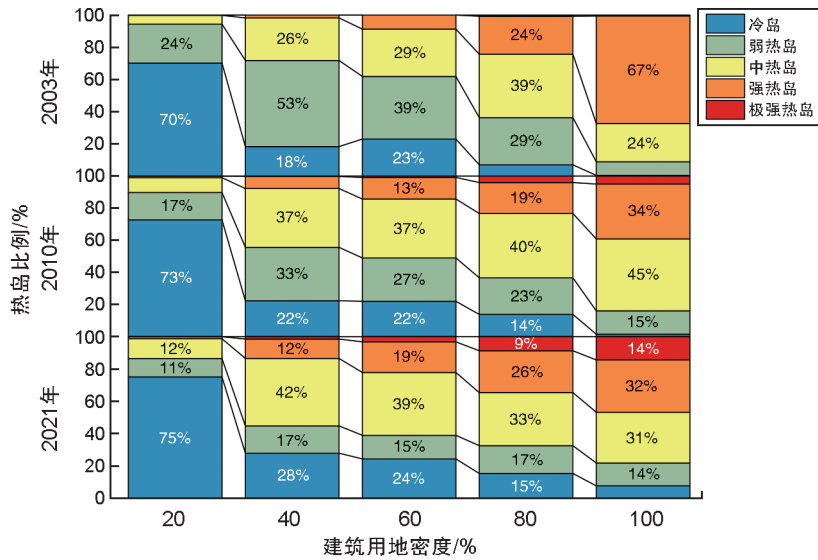


图 11 建筑用地密度-热岛比例堆叠图

Fig. 11 Building land density-heat island proportional stack map

表 4 2003 年—2021 年城市建设与热岛转换表

Table 4 Urban construction and heat island conversion during 2003—2021

(km²)

变化过程	非建	建→非建	非建→建	建	变化过程	非建	建→非建	非建→建	建
中→冷	0.26	0.00	0.18	0.55	弱→中	2 101.29	15.61	192.25	238.48
弱→冷	489.73	3.17	35.16	25.01	冷→中	10.32	0.01	3.86	0.76
冷	12 943.71	17.08	164.33	86.88	强	12.71	0.50	23.79	91.26
强→弱	1.53	0.00	0.39	0.08	中→强	308.47	4.60	124.66	107.62
中→弱	94.69	0.57	18.32	10.35	弱→强	110.64	1.12	27.10	15.29
弱	1 834.54	7.41	131.60	102.87	极强	0.00	0.00	0.30	1.69
冷→弱	225.18	0.59	23.72	9.12	强→极强	11.78	1.05	16.74	56.56
强→中	2.71	0.04	4.01	8.49	中→极强	29.28	0.58	35.74	13.46
中	519.95	4.57	115.45	109.97					

注:中代表中热岛,建表示建筑用地,→表示转换

4 结论与讨论

本文利用2003—2021年的MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)地表温度产品(MYD11A2/MOD11A2)获取太原城市群长时间序列地表温度,计算热岛强度并进行强度划分,分析了不同时间尺度城市群的热岛分布特征和变化趋势。空间分布上,热岛区域随城市扩张而变大^[20-21];太原主城区热岛向南发展趋势明显^[22]。时间尺度上,夏季热岛效应较强,冬季热岛效应较弱^[10]。由于数据来源与研究尺度的不同,热岛效应的季节特征与李艳红等学者太原热岛效应秋冬季较强,春夏季较弱的结论有差异^[3]。随着建筑用密度的提高,极强热岛面积在增加同时冷岛区域也在扩大,可能与城市内部修建的人工湖、绿地公园有关^[23]。热岛效应仍是城市热环境中的重要指标,可为城市未来气候变化研究、城市边界划分和城市内部绿政规划提供依据。

研究结论如下:

(1)近20年内太原城市群热岛效应随着城市扩张和建筑用地密度的提高处于增长趋势。2019年热岛效应最强,中强度热岛以上热岛主要分布在太原盆地及其周边地势较低的地区,以西南—东部走向为主。城市群核心区域冷岛面积有所增加,大量弱热岛转变为中热岛,极强热岛区面积增长极大,热岛有向南发展趋势。

(2)太原城市群的热岛效应季节变化表现为:夏季>春季>秋季>冬季。其中夏、春季的热岛效应都比较显著,春季热岛分布较为广泛,夏季热岛更加集中,冬季热岛效应最弱。

(3)太原城市群热岛效应从1月逐步变强,5、6月份热岛效应最强,然后逐步减弱。热岛效应集中在太原市区、介休、孝义地区。中强度热岛区域由中东部向西南部紧缩。

(4)太原城市群白天期间热岛效应强于夜晚,二者冷岛区域相近。白天热岛分布呈条带状,夜晚热岛集中在城市中心,区为点状分布,主要分布在太原主城区。

由于研究侧重点不同,未对城市群热岛效应的影响因素开展研究,缺乏各种因子对热岛的驱动作用,因此应将长时间序列下的热岛效应演变规律和驱动力分析相结合深入研究。

参考文献:

- [1] 周淑贞,束炯.城市气候学[M].北京:气象出版社,1994:144-145.
- [2] ZHOU D C, BONAFONI S, ZHANG L X, *et al.* Remote Sensing of the Urban Heat Island Effect in a Highly Populated Urban Agglomeration Area in East China[J]. *Sci Total Environ*, 2018, **628/629**: 415-429. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.074.
- [3] 刘宇峰,原志华,孔伟,等.1993—2012年西安城区城市热岛效应强度变化趋势及影响因素分析[J].自然资源学报,2015, **30**(6): 974-985. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.06.008.
LIU Y F, YUAN Z H, KONG W, *et al.* The Changing Trend of Heat Island Intensity and Main Influencing Factors during 1993-2012 in Xi'an City[J]. *J Nat Resour*, 2015, **30**(6): 974-985. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.06.008.
- [4] 李艳红,李智才,周晋红,等.基于自动站资料的太原城市群热岛研究[J].干旱区资源与环境,2013, **27**(12): 173-179. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7578.2013.12.029.
LI Y H, LI Z C, ZHOU J H, *et al.* The Urban Heat Island Effect in Taiyuan[J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2013, **27**(12): 173-179. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7578.2013.12.029.
- [5] 李宇,周德成,闫章美.中国84个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子[J].环境科学,2021, **42**(10): 5037-5045. DOI: 10.13227/j.hjcx.202102003.
LI Y, ZHOU D C, YAN Z M. Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities[J]. *Environ Sci*, 2021, **42**(10): 5037-5045. DOI: 10.13227/j.hjcx.202102003.
- [6] 程迪,王咏薇,刘寿东,等.1959—2012年夏季珠三角地区高温热浪的时空分布特征及其城市热岛效应的影响分析[J].科学技术与工程,2019, **19**(1): 273-283. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.01.042.
CHENG D, WANG Y W, LIU S D, *et al.* Spatial and Temporal Distribution Characteristic of Summer Heat Waves in the Pearl River Delta Region During 1959-2012 and Analysis of the Impact of Urban Heat Island Effect[J]. *Sci Technol Eng*, 2019, **19**(1): 273-283. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.01.042.
- [7] WANG Y S, ZHAN Q M, OUYANG W L. How to Quantify the Relationship Between Spatial Distribution of Urban Waterbodies and Land Surface Temperature?[J]. *Sci Total Environ*, 2019, **671**: 1-9. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.377.
- [8] 向炆,周志翔.蓝绿空间景观格局对城市热岛的影响[J].中国园林,2023, **39**(1): 105-110. DOI: 10.19775/j.cla.2023.01.0105.

- XIANG Y, ZHOU Z X. Influence of Blue-green Spatial Landscape Pattern on Urban Heat Island[J]. *Chin Landsc Archit*, 2023, **39**(1): 105-110. DOI: 10.19775/jcla.2023.01.0105.
- [9] 项小云, 杜嘉, 宋开山, 等. 湿地对福州市热岛效应影响遥感分析[J]. *地球环境学报*, 2021, **12**(4): 411-424. DOI: 10.7515/JEE202028.
- XIANG X Y, DU J, SONG K S, *et al.* The Impact of Wetland on Heat Island Effect Using Remote Sensing Technology in Fuzhou[J]. *J Earth Environ*, 2021, **12**(4): 411-424. DOI: 10.7515/JEE202028.
- [10] 张乃心, 杨树文, 付昱凯, 等. 兰州市彩钢板建筑时空聚集特征及其对城市热岛效应影响分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2022, **38**(3): 43-49. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2022.03.007.
- ZHANG N X, YANG S W, FU Y K, *et al.* Spatio-temporal Agglomeration Characteristics of Color Steel Plate Buildings in Lanzhou and Their Influence on Urban Heat Island Effect[J]. *Geogr Geo Inf Sci*, 2022, **38**(3): 43-49. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2022.03.007.
- [11] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2022.06.28.
- LIU S Y, WU Y, XU J, *et al.* Relationship between Surface Thermal Environment and Underlying Surface Index in Yan'an City[J]. *J Northwest For Univ*, 2022, **37**(6): 207-214. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2022.06.28.
- [12] 宋云帆, 闵文彬, 彭骏. 成都城市下垫面变化对地表热场的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, **44**(7): 197-206. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.07.021.
- SONG Y F, MIN W B, PENG J. Effects of Underlying Surface Change on Variation of Urban Thermal Characteristics in Chengdu[J]. *J Southwest Univ Nat Sci*, 2022, **44**(7): 197-206. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.07.021.
- [13] 韩美玥, 冯晓刚, 李凤霞, 等. 城市热岛与气溶胶交互影响的研究进展[J]. *遥感信息*, 2022, **37**(4): 128-134. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2022.04.019.
- HAN M Y, FENG X G, LI F X, *et al.* Research Progress on Interaction Between Urban Heat Island and Aerosol[J]. *Remote Sens Inf*, 2022, **37**(4): 128-134. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2022.04.019.
- [14] 王媛媛, 任宏, 宫诗玮. 中国31个主要城市热岛与大气污染间关系研究[J]. *环境科学与技术*, 2022, **45**(S1): 150-158. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1267.21.338.
- WANG Y Y, REN H, GONG S W. Relationship Between Urban Heat Island and Air Pollution in 31 Major Cities in China[J]. *Environmental Sci Technology*, 2022, **45**(S1): 150-158. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1267.21.338.
- [15] 李宇. 中国主要城市大气与地表热岛效应的对比研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- LI Y. Comparative Study on Atmospheric and Surface Heat Island Effects in Major Cities of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.
- [16] 赵选. 西安城市热环境效应及绿地缓解作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- ZHAO X. Study on Urban Thermal Environment Effect and Mitigation Effect of Green Space in Xi'an[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [17] GUO G H, WU Z F, CHEN Y B. Complex Mechanisms Linking Land Surface Temperature to Greenspace Spatial Patterns: Evidence from Four Southeastern Chinese Cities[J]. *Sci Total Environ*, 2019, **674**: 77-87. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.402.
- [18] 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. DOI: 10.13227/j.hjcx.202006009.
- SUN Y W, WANG R, GUO Q H, *et al.* Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale[J]. *Environ Sci*, 2021, **42**(1): 501-512. DOI: 10.13227/j.hjcx.202006009.
- [19] 胡楠林, 任志彬, 董禹麟, 等. 中国城市群热岛效应时空演变及其影响因素分析[J]. *地理科学*, 2022, **42**(9): 1534-1545. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2021.08.042.
- HU N L, REN Z B, DONG Y L, *et al.* Temporal and Spatial Evolution of Urban Heat Island Effect in China and Its Influencing Factors[J]. *Sci Geogr Sin*, 2022, **42**(9): 1534-1545. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2021.08.042.
- [20] 刘宇翔, 杨英宝, 胡佳, 等. 基于长时序MODIS数据的中国城市昼夜热岛强度时空特征[J]. *地球信息科学学报*, 2022, **24**(5): 981-995. DOI: 10.5846/stxb202011303061.
- LIU Y X, YANG Y B, HU J, *et al.* Temporal and Spatial Characteristics of Diurnal Surface Urban Heat Island Intensity in China Based on Long Time Series MODIS Data[J]. *J Geo Inf Sci*, 2022, **24**(5): 981-995. DOI: 10.5846/stxb202011303061.
- [21] 王宗阳. Landsat稠密时间序列分析的城市群热岛效应变化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- WANG Z Y. Study on the Change of Urban Heat Island Effect Based on Landsat Dense Time Series Analysis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [22] 米晓楠, 白林燕, 赵永强, 等. 基于多源卫星资料的太原市城市热岛效应分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, **21**(32): 13650-13658. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.32.005.

- MI X N, BAI L Y, ZHAO Y Q, *et al.* Analysis of Urban Heat Island Effect in Taiyuan Based on Multi Source Satellite Data[J]. *Sci Technol Eng*, 2021, **21**(32): 13650-13658. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.32.005.
- [23] QUAN J L. Multi-temporal Effects of Urban Forms and Functions on Urban Heat Islands Based on Local Climate Zone Classification[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, **16**(12): 2140. DOI: 10.3390/ijerph16122140.
- [24] 谢启姣. 武汉城市热岛特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(3): 462-469. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201603013.
- XIE Q J. Analysis on Characteristics and Influencing Factors of Urban Heat Island Effect in Wuhan[J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2016, **25**(3): 462-469. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201603013.
- [25] 池腾龙, 曾坚, 刘晨. 近30年武汉市热环境格局演化机制及扩散模式研究[J]. *国土资源遥感*, 2017, **29**(4): 197-204. DOI: 10.6046/gtzyyg.2017.04.30.
- CHI T L, ZENG J, LIU C. A Study of Evolution Mechanism and Diffusion Mode Pattern of Thermal Environment for Wuhan City in the Past 30 Years[J]. *Remote Sens Land Resour*, 2017, **29**(4): 197-204. DOI: 10.6046/gtzyyg.2017.04.30.
- [26] LI B Y, WANG W, BAI L, *et al.* Effects of Spatio-temporal Landscape Patterns on Land Surface Temperature: a Case Study of Xi'an City, China[J]. *Environ Monit Assess*, 2018, **190**(7): 419. DOI: 10.1007/s10661-018-6787-z.
- [27] 王英杰. 太原市热岛效应现状和绿地消减效应研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2020.
- WANG Y J. Study on the Present Situation of Heat Island Effect and the Effect of Green Space Reduction in Taiyuan city[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [28] ZHAO W, DUAN S B. Reconstruction of Daytime Land Surface Temperatures under Cloud-covered Conditions Using Integrated MODIS/Terra Land Products and MSG Geostationary Satellite Data[J]. *Remote Sens Environ*, 2020, **247**: 111931. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111931.