DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2022. 07. 021

# 成都城市下垫面变化对地表热场的影响

宋云帆, 闵文彬, 彭骏

中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610071

摘要:利用 2001 年和 2018 年 MODIS 夏季地表温度产品,结合地表覆盖类型及植被指数数据,对比分析了成都市 夏季城市热岛和热场强度的昼夜时空分布特征及变化,并重点分析了成都地表热场与城市建筑用地面积、植被覆 盖度的关系.结果表明:① 2001 年到 2018 年,成都市夏季城市地表热场发生了显著的变化,中心城区、近郊及远 郊区县热岛范围均明显扩大,由多中心热岛发展为主城区与邻近郊县连城一片;热岛效应昼夜变化明显.② 成都 市城市不透水面面积增加了 763.33 km<sup>2</sup>,强热岛面积增加了 610 km<sup>2</sup>;城市不透水面与城市热岛区域分布及面积 变化密切相关.③ 成都市整体热场强度表现为西低东高的特征,热场强度高温区与植被覆盖度呈负相关关系,白 天相关性明显优于夜晚.

关 键 词:下垫面变化;城市热岛;热场强度;中分辨率成像

光谱仪; 植被覆盖度

中图分类号: TP79 文献标志码: A

**文 章 编 号:** 1673-9868(2022)07-0197-10

# Effects of Underlying Surface Change on Variation of Urban Thermal Characteristics in Chengdu

SONG Yunfan, MIN Wenbin, PENG Jun

Institute of Plateau Meteorology, CMA / Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610071, China

Abstract: Using 2001 and 2018 MODIS summer land surface temperature, combined with landcover and Normalized difference value vegetation index (*NDVI*) data, the diurnal and spatial distribution characteristics and changes of urban heat island and heat field intensity in Chengdu in summer were comparatively analyzed, and the relationship between surface heat field and urban construction land area and vegetation coverage in Chengdu was intensively analyzed. The results showed that: ① From 2001 to 2018, the urban

收稿日期: 2021-01-05



基金项目:国家自然科学基金项目(42071410);国家高分辨率对地观测重大专项(30-H30C01-9004-19/21).

作者简介:宋云帆,硕士,助理研究员,主要从事卫星遥感技术的应用研究.

通信作者: 闵文彬, 研究员.

surface heat field of Chengdu had a great change. The range of heat island in the central urban area, suburban and suburban counties was significantly expanded, and the main urban area was developed from a multi-center heat island to main urban area adjacent to the suburban counties. The diurnal change of heat island effect was significant. ② The impervious surface area and strong heat island area increased by 763. 33 km<sup>2</sup> and 610 km<sup>2</sup>, respectively. The change of impervious surface area was closely related to the regional distribution and area change of the heat island. ③ The overall distribution of heat island in Cheng-du was low in the west and high in the east. The relationship between heat field intensity and vegetation coverage was negatively correlated.

Key words: underlying surface change; urban heat island; heat field intensity; MODIS; vegetation coverage

城市热岛是指城区气温高、郊区气温低的现象,在温度空间分布上,城市犹如一个温暖的岛 屿<sup>[1-2]</sup>.随着城市化进程的加快,城市高楼林立、街道纵横,致使城区风速减弱,空气流通受阻,热量 不能及时散发,这是热岛效应产生的原因之一<sup>[3-5]</sup>.传统的气象站点气温差异热岛分析方法<sup>[6]</sup>由于气 象站点有限,很难全面掌握城市热岛的空间分布信息<sup>[7]</sup>,对于研究城市热岛的空间分布规律、影响因 素等存在一定的局限性.随着卫星遥感技术的进步,遥感监测成为了研究城市热环境的重要手段.大 量学者通过对遥感反演的地表温度、植被指数和地表分类信息的分析研究,说明了城市不透水面是城 市热岛效应的重要驱动机制,植被指数变化是城市热岛的一个重要影响因素<sup>[8-9]</sup>.因此聚焦于城市发 展引起的下垫面性质变化,对城市热岛的空间分布及强度变化影响进行分析,对于我国未来城市化发 展规划具有重要意义.

成都市作为四川省省会、特大城市,近年来社会经济高速发展,城市化进程发展迅速,导致城市热岛 效应也越来越明显<sup>[10-11]</sup>,针对这一现象许多专家学者进行了多方面的研究.张顺谦等<sup>[12]</sup>基于劈窗算法,使 用 MODIS 数据分析了 2005-2016 年成都市热岛效应的时空变化特征,并提出成都市热岛最大峰值出现在 7 月份.但尚铭等<sup>[13]</sup>发现成都属于强热岛类型,强度高于平原内其他中小城市,具有明显的季节特征,夏 季最强,春秋次之,冬季最弱.曾胜兰<sup>[14]</sup>指出成都市热岛效应呈现多热中心的分布模式,明显强于其他大、 中、小型城市.李晓敏等<sup>[15]</sup>应用 MODIS 地表温度数据发现成都市的城市热岛效应呈现环状分布特征,且 强热岛范围在 2003-2014 年间不断扩大.程志刚等<sup>[16]</sup>研究表明成都地区 2000-2010 年间夏季热环境变化 显著,昼夜变化明显,白天热岛强于夜晚,城市热岛发展与日较差、人口等因素有较好的相关性.但目前针 对成都地表热场的研究多集中分析其时空分布及演变规律,探讨下垫面对成都地表热场影响的研究较少. 成都城市化导致城区不透水面快速增加,以及成都对环境的建设和治理使得郊区植被覆盖增加,均改变了 原有下垫面的物理性质,对地表热环境造成影响.因此聚焦于研究成都城市下垫面变化对地表热场的影响 显得尤为重要.

本研究以 2001 年和 2018 年 MODIS 数据反演的地表温度为基础,结合植被指数和地表分类数据,对 比了成都市 2001 年和 2018 年城市热岛和热场强度的空间分布变化,重点分析了成都市地表热场与城市不 透水面、植被覆盖度之间的联系.研究结果可为成都市城市规划和热环境整治及管理提供科学依据.

## 1 研究区地形地貌概况

成都市地处四川盆地西部边缘,地势由西北向东南倾斜(图1).其西部和东部分别有龙门山脉和龙泉山脉环绕,由于地表海拔差异显著,造成水、热等气候要素在成都市范围内空间分布上的不同<sup>[17]</sup>.成都市总面积约为14335 km<sup>2</sup>,下辖10个区、5个县、5个县级市,其中主城区包括:锦江区、青羊区、金牛区、

武侯区和成华区.成都市是中国西南地区经济中心之一;近年来发展迅速,截止到 2018 年成都全年地区生产总值(GDP)达到 15 342 亿元,对比 2001 年的 1 492 亿元,增长超过 10 倍.



## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源及预处理

地表温度数据采用 MODIS 数据反演的 MOD11A1 日温度产品,空间分辨率为1 km×1 km;由于成都 地区多云多雨,而地表温度数据只有在晴空条件下才能获取,本研究选取晴空较多且热岛效应最明显的夏 季(6 月份)数据进行研究.

结合 GLC 土地分类结果<sup>[18]</sup>以及成都市地表的实地踏查,对 MCD12Q1 地表覆盖数据产品中成都行政 区划内进行了部分修正;地表覆盖数据空间分辨率为 500 m×500 m. 归一化植被指数数据采用 MOD13A1 产品,分辨率为 500 m×500 m;为了对比分析更为科学准确,本研究选取与地表温度数据时间相近的数 据.遥感数据的预处理包括拼接、重投影、重采样和裁剪.

### 2.2 研究方法

## 2.2.1 热岛强度指数

城市热岛强度指数(Urban Heat Island Intensity Index, *UHII*)即城市地表温度与郊区乡村地表温度 值之差<sup>[19]</sup>,用于反映城区与郊区乡村地表温度的差别.热岛强度表达式为:

$$UHII_{i} = T_{i} - \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} T_{\rm crop}$$

$$\tag{1}$$

式中: UHII; 为第 *i* 个像元对应的热岛强度指数; *T*; 为第 *i* 个像元的绝对地表温度值; *n* 为选取的郊区农田范围内有效像元数; *T*<sub>crov</sub> 为选取的郊区农田范围内绝对地表温度值.

为了分析热岛空间分布的年际变化,使结果具有可比性,本研究依据均值一标准差法将成都市范围内 热岛强度分为5级,如表1所示.标准差(*std*)是对地表温度偏离温度均值(μ)的反映,较常用的等间距密 度分割法更能反映城市热岛温度变异的细节[20].

表1 热岛强度等级划分表

热岛强度划分方法	热岛强度等级	热岛强度划分方法	热岛强度等级		
$UHII_i > \mu + std$	强热岛区	$\mu$ -std $\leq$ UHII <sub>ii</sub> $\leq$ $\mu$ -0.5std	弱冷岛区		
$\mu$ +0. 5 <i>std</i> $\leq$ UHII <sub>ii</sub> $\leq$ $\mu$ + <i>std</i>	弱热岛区	$UHII_{ii} \leq \mu - std$	强冷岛区		
$\mu = 0.5 std \leq UHII_{ii} \leq \mu + 0.5 std$	过渡区				

2.2.2 热场强度指数

鉴于城市热岛研究侧重下垫面温度相对高低的空间分布特征,同时为了消除不同年份获取数据时由 于时相差异存在的误差,本研究引入了热场强度指数(Heat Field Intensity Index, *HFII*). 热场强度指数 即热场的归一化,能反映影像热场分布的相对高温、低温范围和位置信息,具有热场指示意义<sup>[21]</sup>,其表 达式为:

$$HFII_{i} = \frac{T_{i} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$
(2)

式中: *HFII*; 为第*i* 个像元对应的热场强度指数; *T*; 为第*i* 个像元的绝对地表温度值; *T*<sub>min</sub> 为研究范围内 绝对地表温度值最小值; *T*<sub>max</sub> 研究范围内绝对地表温度值最小值. *HFII*; 的取值范围为: 0~1, 其值越大, 表示高温现象越明显. 根据已有研究并结合研究区实际情况,将热场强度指数分为5个等级, 如表2所示.

 热场强度指数划分
 热场强度等级
 热场强度指数划分
 热场强度等级

  $0 < HFII_i < 0.57$  低温区
  $0.75 \leq HFII_i < 0.9$  次高温区

  $0.57 \leq HFII_i < 0.6$  次低温区
  $0.9 \leq HFII_i < 1$  高温区

  $0.6 \leq HFII_i < 0.75$  中温区
  $0.9 \leq HFII_i < 1$   $0.9 \leq HFII_i < 1$ 

表 2 热场强度等级划分表

2.2.3 植被覆盖度

归一化植被指数(NDVI)是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子,本研究基于 NDVI 数据,利用像元二分模型估算成都市范围内的植被覆盖度<sup>[22]</sup>,计算公式如下:

 $f_{i} = (NDVI_{i} - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min})$ (3)

式中:NDVImin 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值;NDVImax 为完全由植被覆盖区域的 NDVI 值.

计算植被覆盖度时,通常根据研究区影像实际情况设置 NDVI 的上下阈值,来代表 NDVI<sub>max</sub> 和 ND-VI<sub>min</sub>,在一定程度上减弱遥感影像噪声带来的误差影响.本研究通过分析研究区域 NDVI 数据,采用 0.5%和 99.5%的置信区间.

## 3 结果与分析

## 3.1 成都市城市热岛分布与城市不透水面的关系

依据均值一标准差法对计算出的 2001 年和 2018 年成都市热岛指数进行划分,结果如图 2 所示.整体 分布上,强热岛区域在主城区比较集中,郊县也有点状强热岛中心出现,2001 年成都东部龙泉山脉以东白 天也出现了大范围强热岛效应. 冷岛区域位置和范围都比较稳定,位于成都市西部龙门山脉海拔较高地 带. 2018 年平原范围内(蓝色线条内)昼夜城市热岛强度和面积均明显高于 2001 年. 2001 年白天主城区热 岛分布呈环状,分布比较集中,周边郊县热岛中心呈点状分布. 2018 年白天成都市区已经与近郊区县连成 一片,远郊热岛范围也明显扩大.

201

 $\mathrm{km}^2$ 



审图号为:图川审(2016)018号.

图 2 成都市热岛分布图(蓝色线条内为平原区)

对比昼夜热岛分布,发现成都市夏季热岛有明显的昼夜变化,夜晚热岛效应明显弱于白天,符合已有研究结果<sup>[16]</sup>.夜晚热岛分布相比白天更为集中,2001年夜晚热岛主要集中在主城区,近郊及远郊热岛中心 消失,2018年夜晚热岛相比于白天明显范围减小,主要集中在主城区及近郊卫区县范围内.2001年和 2018年成都东部在夜晚均没有强热岛分布.各等级热岛指数面积统计结果及变化量如表3所示.

从表 3 的 2001 年和 2018 年热岛变化统计中可以更直观地看出,自 2001 年到 2018 年成都市平原区内 强热岛面积显著增加,白天和夜晚分别增加了 610 km<sup>2</sup> 和 253 km<sup>2</sup>,白天增加量显著大于夜晚.成都市总 体夜晚强热岛面积增加量与平原区内增加量相当,而白天强热岛面积反而显著减少,达到-1 019 km<sup>2</sup>,对 比图 2(2001 年白天和 2018 年白天)可知是因为 2001 年龙泉山脉以东区域的大面积强热岛.成都市总体弱 热岛面积白天和夜晚均增加明显,分别增加了 1 892 km<sup>2</sup> 和 2 165 km<sup>2</sup>.成都市总体强弱冷岛面积相加起来 变化不大,过渡区面积显著减少,表示成都市热岛增加面积大部分由过渡区转化而来.

表 3 2001 年和 2018 年热岛面积变化统计表

时间/变化量	强热岛区		弱熬	弱热岛区		过渡区		弱冷岛区		强冷岛区	
	总体	平原区	总体	平原区	总体	平原区	总体	平原区	总体	平原区	
2001年白天	27 580	539	1 510	715	7 031	5 038	1 812	981	1 609	1	
2018年白天	1 557	1 150	3 398	1 638	6 144	4 388	871	96	2 451	1	
2001年夜晚	282	282	1 052	1 048	10 709	5 948	475	0	1 968	0	
2018 年夜晚	539	535	3 217	2 065	8 283	4 664	689	0	1 630	0	
白天变化量	-1 019	610	1 892	923	-887	-650	-941	-884	841	0	
夜晚变化量	258	253	2 165	1 017	-2 426	-1 284	214	0	-338	0	

为研究城市发展对热岛效应的影响,图 3 给出了 2001 年和 2018 年地表覆盖类型分布,2018 年城市不透水面面积相比 2001 年明显扩大.结合图 2 和图 3,2001 年和 2018 年均显示成都平原内热岛的位置和范围与城市不透水面分布高度一致,变化趋势也相符合.统计成都市城市不透水面积可知,2018 年比 2001 年增加了 763.33 km<sup>2</sup>,增加了 83.24%,且城市不透水面面积增加量主要在平原区内.2018 年相比 2001 年 白天平原区内强热岛面积增加了 610 km<sup>2</sup>,与城市不透水面面积增加量相近.对比 2001 年和 2018 年城市不透水面分布,发现近郊双流区、温江区、新都区、郫县城市不透水面面积增加显著,结合图 2 可以看出相同区域的白天和夜晚强热岛面积增加显著且与城市不透水面位置及增长范围都相同.



审图号为:图川审(2016)018号.



值得一提的是,2001年和2018年白天热岛结果显示在成都东部龙泉山脉以东龙泉驿区、金堂县、简 阳市区域出现了大面积强热岛现象,2001年强热岛现象尤为明显,夜晚热岛结果显示相同区域并无强热岛 分布.对比地表覆盖图发现,2001年和2018年龙泉山脉以东的区域均没有大面积城市不透水面,可知该 区域的强热岛效应并不是城市不透水面引起的.

对比成都市内 20 个区(市、县)不透水面面积与热岛面积变化比例(因龙泉山脉以东的强热岛现象与城 市不透水面关系不大,故分区统计对比时排除在该区域的龙泉驿区、青白江区、东部新区金堂县、简阳 市),如图 4 所示,各个行政区热岛面积变化与城市不透水面变化趋势整体上相符合,白天的一致性高于夜 晚. 主城区的 5 个区(锦江区、青羊区、武侯区、金牛区、成华区)白天与夜晚强热岛面积相当,其余区(市、 县)差异较大,白天强热岛面积明显大于夜晚.



按照标准成都市区划修改统计图.

图 4 成都市各区县市城市不透水面及热岛面积变化统计图

### 3.2 成都市热场强度与植被覆盖度相关性分析

上述分析可知成都市平原区内热岛效应随着城市不透水面范围增大而显著增强,但龙泉山脉以东并无 大面积城市不透水面,也出现了大范围强热岛效应.已有研究表明,城市热岛效应除了与城市不透水面密 切相关外,还受植被覆盖率影响,为研究该区域热岛成因,本研究计算成都市植被覆盖度(图 5)作为该区 域热岛效应的影响因子来分析.



审图号为:图川审(2016)018号.

#### 图 5 成都市植被覆盖度分布图

图 6 为 2001 年和 2018 年昼夜地表热场强度, 2001 年和 2018 年白天热场中温区占据整个研究区的大部分,低温区和次低温区范围比较稳定,主要分布于西北部海拔较高的地区, 2001 年成都市高温区和次高温区集中在主城区和成都东部, 2018 年高温区和次高温区均较 2001 年范围明显扩大,近郊区县的高温区扩大更为明显. 夜晚主城区高温区与白天相比变化不大,但中温区面积明显比白天大,占据了区域内的大部分,表明研究区内的夜晚温差较小.

2001-2018 年成都市植被覆盖发生了较大变化,主城区以及周边郊县植被覆盖度较低的区域显著增 大.对比图 5 与图 6 的整体分布可以看出,植被覆盖度越小的地方地表热场越强,植被覆盖度越大则地表 热场越弱.2001 年龙泉山脉以东出现了大面积植被覆盖度较低的区域,与 2001 年地表热场以及热岛在该 区域的表现相一致.2018 年龙泉山脉以东整体覆盖率明显低于成都西部,金堂县、简阳市以及东部新区都 有较低植被覆盖度区域,这与该区域的热场高温区表现一致.

为了分析植被覆盖度对成都市地表热场的影响,本研究对二者进行拟合.如图 7 所示,发现以热场 强度 0.6 为分割,上半部分高温区和中温区散点分布密集表现出显著的相关性,下半部分低温区散点分 布离散,相关性不强.以红色线条为分割,本研究分别对两部分进行拟合分析.高温区和中温区部分热 场强度与植被覆盖度表现出明显的负相关性,白天相关性优于夜晚,白天拟合度 *R<sup>2</sup>*分别达到了 0.478 3 和 0.553 8,夜晚拟合度 *R<sup>2</sup>*为 0.272 5 和 0.437 5. 低温区热场强度与植被覆盖度呈现一定的正相关性, 夜晚相关性优于白天,但总体来说相关性不大,究其原因,低温区分布在海拔较高的地区,该区域的热 场还受海拔等其他因素的影响.

热场强度与植被覆盖度相关性分析表明:植被覆盖度增大可以有效缓解白天热场指数的增加,但是对 夜晚热场指数的影响不大.由于植被稀疏,白天成都市郊区也会出现与城市不透水面相似的热岛效应.因 此在成都市,植被覆盖度与城市化是同等重要的不可忽视的地表热场影响因素.



#### 图 6 成都市热场强度分布图

## 4 结论

本研究利用 MODIS 地表温度数据结合地表覆盖类型数据、植被指数数据,研究成都地区地表热场的 变化特征及其与下垫面变化之间的关系,得到以下主要结论:

① 成都市热岛效应明显,2001 年到 2018 年热岛面积显著增大,平原区内白天热岛分布由 2001 年强热 岛主要集中于主城区同时在近郊区县呈点状分布,转变为 2018 年主城区与近郊连成一片. 成都市热岛效应 昼夜差异明显,夜晚热岛分布主要集中在主城区,强度和面积均小于白天. 2001 年白天龙泉山脉以东出现 了大面积强热岛现象,显著大于 2018 年同区域强热岛面积.

② 2001 年到 2018 年热场强度高温区位置分布与变化趋势在白天与热岛效应变化相似,夜晚出现大面积次高温区,表明成都市夜间温差比白天小.

③ 城市热岛与城市不透水面对比分析发现,平原区内热岛分布及变化与城市不透水面变化具有较高的一致性.城市高速发展造成的城市不透水面面积增加是导致成都市热岛效应不断增强的主要因素之一.

④ 高温区和中温区热场强度与植被覆盖度在白天负相关性显著,2001 年龙泉山脉以东白天出现的 大面积强热场与该时期植被覆盖度较低密切相关.表明植被覆盖度也是影响成都市地表热场的重要因 素之一.

本研究以成都市热场变化为研究对象,分析了其与下垫面覆盖类型中的建筑区面积和植被覆盖度之间 的变化关系,探讨了城市发展进程中下垫面变化对城市热场时空变化的影响机理,结果可为相关部门制定 热环境整治和建筑区规划政策提供思路.



## 参考文献:

- [1] 陈云浩,李京,李晓兵.城市空间热环境遥感分析:格局、过程、模拟与影响 [M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 胡华浪,陈云浩,宫阿都.城市热岛的遥感研究进展 [J]. 国土资源遥感,2005,17(3):5-9,13.
- [3] 任金华,吴绍华,周生路,等.城市不透水面遥感研究进展[J].国土资源遥感,2012,24(4):8-15.
- [4] STREUTKER D R. Satellite-Measured Growth of the Urban Heat Island of Houston, Texas [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(3): 282-289.
- [5] SOBRINO J A, OLTRA-CARRIÓ R, SÒRIA G, et al. Impact of Spatial Resolution and Satellite Overpass Time on Evaluation of the Surface Urban Heat Island Effects [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 50-56.
- [6] MEMON R A, LEUNG D Y C, LIU C H. An Investigation of Urban Heat Island Intensity (UHII) as an Indicator of Urban Heating [J]. Atmospheric Research, 2009, 94(3): 491-500.

- [7] 孙铁钢,肖荣波,蔡云楠,等.城市热环境定量评价技术研究进展及发展趋势[J].应用生态学报,2016,27(8):2717-2728.
- [8] 杨朝斌,何兴元,张树文,等. 基于 Landsat 8 的城市热岛效应与地表因子关系研究——以长春市为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(12): 110-115.
- [9] 何炳伟,赵伟,李爱农,等. 基于 Landsat 8 遥感影像的新旧城区热环境特征对比研究——以成都市为例 [J]. 遥感技术与应用,2017,32(6):1141-1150.
- [10] 张好,徐涵秋,李乐,等.成都市热岛效应与城市空间发展关系分析 [J].地球信息科学学报,2014,16(1):70-78.
- [11] 陈颖锋, 王玉宽, 傅斌, 等. 成渝城市群城镇化的热岛效应 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3494-3501.
- [12] 张顺谦,周长艳.成都市晴天热岛效应的时空分布特征与成因 [J].应用生态学报, 2013, 24(7): 1962-1968.
- [13] 但尚铭,但玻,杨秀蓉,等.卫星遥感成都平原城市热岛效应的动态特征 [J].环境科学与技术,2009,32(7):10-13.
- [14] 曾胜兰. 道路建设对成都市热岛效应的影响 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1622-1627.
- [15] 李晓敏,曾胜兰. 成都、重庆城市热岛效应特征对比 [J]. 气象科技, 2015, 43(5): 888-897.
- [16] 程志刚,杨欣悦,孙晨,等. 成都地区夏季城市热岛变化及其与城市发展的关系 [J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(4): 322-331.
- [17] 胡毅,朱克云,李跃春,等. 成都平原中西部近 40 年气候特征及其变化研究 [J]. 成都信息工程学院学报,2004, 19(2):223-231.
- [18] XU Y D, YU L, PENG D L, et al. Annual 30-m Land Use/Land Cover Maps of China for 1980 2015 from the Integration of AVHRR, MODIS and Landsat Data Using the BFAST Algorithm [J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63(9): 1390-1407.
- [19] 叶彩华, 刘勇洪, 刘伟东, 等. 城市地表热环境遥感监测指标研究及应用 [J]. 气象科技, 2011, 39(1): 95-101.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 肖洋,熊勤犁,欧阳志云,等. 基于 MODIS 数据的重庆市植被覆盖度动态变化研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(7): 121-126.

## 责任编辑 包颖