

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.02.003

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:吴凡,常勇,姚磊,孙硕. 京津冀地区地表热环境时空分布格局[J]. 西安理工大学学报,2023,39(2):173-183.

WU Fan, CHANG Yong, YAO Lei, SUN Shuo. Spatial and temporal distribution pattern of surface thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(2): 173-183.

京津冀地区地表热环境时空分布格局

吴凡,常勇,姚磊,孙硕

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358)

摘要: 针对不同梯度下京津冀地区地表热环境的空间格局时空变化,及热环境与土地覆被类型的关系,本文基于京津冀地区的 MODIS 月均温和土地覆被数据,运用 Ripley L 函数法、标准差椭圆、景观指数等方法,从变化趋势、空间集聚性、形态特征 3 个方面进行探讨。研究表明:①热环境格局演化阶段特征显著:一阶段(2000—2010 年)京津冀地区温区等级走高,热环境趋于两极化,二阶段(2010—2020 年)两极化有所缓和,治理效果初步显现;②各温区均在 2010 年前后呈现出聚集趋势的转变,聚集度随着空间距离的增加先增强后减弱,在更高温区内呈现出更强的波动性,整体在 40~80 km 内呈现出高聚集性;③京津冀热环境斑块组成在一阶段高温区及次高温区斑块呈变大变多趋势,二阶段反向收缩;④林地和耕地是影响京津冀地区相对地表温度的主要因素,建成区影响力逐渐上升。

关键词: 热环境; 京津冀; MODIS 地温

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)02-0173-11

Spatial and temporal distribution pattern of surface thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei region

WU Fan, CHANG Yong, YAO Lei, SUN Shuo

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: Based on the MODIS monthly mean temperature and land cover data of Beijing-Tianjin-Hebei region, this paper explores the spatial pattern of surface thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei region under different gradients from three aspects, including change trend, spatial agglomeration and morphological characteristics; it explores the relationship between thermal environment and land cover types by using Ripley's L -function method, standard deviation ellipse and landscape index. The results of the study indicate that: ① The evolutionary stage characteristics of the thermal environment pattern are significant; the first stage (2000—2010) the temperature zone level in the Beijing-Tianjin-Hebei region went up and the thermal environment tended to be polarized, with the second stage (2010—2020) the polarization moderated and the initial effect of governance revealed. ② Each temperature zone showed a change of aggregation trend around 2010. With the increase of space distance, the degree of aggregation first increased and then decreased. In the higher temperature zone, it showed a stronger volatility, and overall it showed a high aggregation within 40~80 km. ③ The composition of thermal environment patches in Beijing, Tianjin and Hebei province tends to become larger and more patches in the high-temperature zone and the sub-high-temperature zone in the first stage, and contract in the opposite direction in

收稿日期: 2022-06-28; 网络首发日期: 2023-01-06

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1294.N.20230106.1346.001.html>

基金项目: 教育部产学合作协同育人资助项目(201902227024)

第一作者: 吴凡,女,硕士生,研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail:wufanmoral@126.com

通信作者: 常勇,男,副教授,研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail:chy.163@163.com

the second stage. ④Forest land and arable land are the main factors influencing the relative surface temperature in Beijing-Tianjin-Hebei region, with the influence of built-up areas increasing.

Key words: thermal environment; Beijing-Tianjin-Hebei; MODIS surface temperature

根据联合国统计署发表的报告显示,现在世界上已经有超过一半的人居住在城市之中,《2020 年世界城市报告》显示,到 2050 年城市人口占全球总人口比例将达到 68%^[1]。自改革开放以来,中国的城市化进程速度不断加快,第七次人口普查城市化率已经达到 63.89%。急速的城市化极大地改变了中国城市景观格局和城市热环境,城市热岛效应是城市热环境不断恶化引发的城市生态问题之一^[2]。城市热岛(UHI)一般被定义为城市比周围农村温度高的现象^[3],不同时间、不同空间、不同层次,热岛效应都有不同的特点。城市化显著地改变了城市不透水面的结构,绿地、水面布局的减少以及人为的热排放都会增强热岛效应。城市热岛效应促使了城市高温灾害的形成、加剧了高温的出现频率,并带来了巨大危害,严重威胁着城市可持续发展^[4-5]。因此,对地表热环境分布格局及其影响因素的探索是本文研究的重点。

人们普遍认为,城市化将提高城市气温和地表温度^[6],改变城市热环境空间分布状态,因此,国内外学者多关注于城市扩张与城市热岛的空间关系。胡平^[7]通过劈窗算法反演成都市遥感影像发现,热岛区域多集中地分布在二环至绕城区域,说明城市扩张现象严重。韩冬锐等^[8]发现长三角地区热环境的不安全区域多发布在城市建成区及其周围,且呈扩张趋势。钱敏蕾等^[9]使用 TVX 空间法定量研究上海市热环境效应,结果也表明热岛强度分布与城市化建设密切相关,呈现“葫芦串-葡萄串-摊大饼型”的蔓延模式。张伟等^[10]提出了一种基于空间统计特征的城市热岛范围界定方法,并得出杭州城市热岛的空间形态日趋复杂——单中心向多中心扩散发展。胡李发等^[11]利用主成分分析法构建城市热环境指数,发现关中平原城市群热岛强度老城区增速大于新建城区。徐双等^[12]通过分区统计法分析了不同热力景观等级下长沙市各城市景观的空间格局变化,从中心位置到偏北、偏东和偏南方向上,热力景观从市区向周边郊区呈现破碎化,而向西方向上则相反。多数学者聚焦于单一城市在城市扩张与热环境形态间的关联,而较少关注城市群体系中,各城市与郊区的热环境随城市化进程的变化。因此,本研究将中国快速城市化的典型地区京津冀城市群作为研究区域,重点研究城市群区域的热环境表征情况。

在城市热岛与景观指数结合的领域,李玉杰等^[13]通过地统计学和景观格局的结合发现,海口市近 19a 热岛效应先增后减,热岛斑块前期缩小后期扩张,斑块形状区域平稳。高静等^[14]创新性地引用大气污染中的“源”“汇”概念,研究了武汉市主城区内的源汇景观组对城市热岛的作用,发现两者存在极强的相关性,即汇-源景观面积比大于 0.89 时,景观组对城市热岛具有缓解作用。

城市热环境受下垫面的影响^[15],特别是城市化过程中大量自然植被被人工不透水面取代,使生态环境压力提升^[16],部分学者探究了土地覆被对城市热岛的影响。邱海玲^[17]以北京市为研究区,发现绿地面积与降温作用一定范围内呈对数关系,且降温幅度与绿地面积等大小没有明显的相关性。杨雅君等^[18]基于热红外成像技术观测地表温度,综合分析 6 种典型城市下垫面,发现嵌草砖的热环境稳定性较草地和大理石要好,沥青路面最能代表下垫面地表温度的时空变化特征。而樊智宇、聂芹、郭宇、黄奕钦、吴昌广等^[19-23]研究发现不透水面是城市热环境恶化的主要驱动因素。在城市扩张与土地覆被状况及其景观格局的共同影响下,城市热环境的格局不断发生变化,而这种影响与变化在京津冀城市群演化中的体现,也是本研究的探讨内容。

随着经济的发展,中国的城市化进程正朝着大城市集群方向发展。京津冀地区作为中国城市最密集、城市化水平最高的地区之一^[24],自 20 世纪 80 年代以来,经历了城市化快速发展时期。发达的工业、频繁的人类活动导致该区域城市热岛现象日趋严重,并对区域气候和人类生活造成了不可忽略的影响^[5,25]。而京津冀城市群作为中国核心经济区的重要组成部分,肩负国家应对全球竞争的重大使命。因此,探究区域地表热环境的分布及演化对经济快速发展的京津冀地区来说十分必要。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

京津冀城市群由首都经济圈发展而来,位于 113°27'~119°50'E、36°1'~42°37'N 之间,总面积 2.18×10⁵ km²(图 1)。京津冀地区属于暖温带大陆性季风型气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均降水量 300~800 mm。上世纪 80 年代中期国家将京津冀地区作为“四大”试点地区之一,在实施国

土整治战略、开展跨区域分工协作、优化产业和人口布局等方面的探索具有重要意义。截至 2019 年,该区域占国土面积的 2.35%,却居住着全国 7.24%的人口,GDP 占全国的 8.6%。据《中国城市营销发展报告(2019)》显示,京津冀城市群位列城市群品牌第三位。与此同时,京津冀地区也面临城镇化发展失衡、区域热环境加剧的问题。然而,由于缺乏区域统筹,热环境应对策略常常只针对特定区域,特别是两个直辖市,其政策与战略总是与河北省分离。

为其政策规划提供参考,同时对于城市化飞速发展的其他区域的环境治理具有重要借鉴意义。

1.2 数据来源及预处理

MODIS 传感器作为 Aqua 和 Terra 卫星上的重要载荷,提供了丰富的大气、陆地与海洋系列标准产品。考虑到研究时间的跨度,本文使用的数据包括 MODIS 月均温数据和土地覆被数据。地表温度数据为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 1~12 月的月均地表温度数据,空间分辨率为 1 km,该数据从地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载,已被广泛应用于区域和全球尺度的热环境研究。土地覆被数据来自于自然资源部 30 m 全球地表覆盖数据集 (<http://www.globallandcover.com/>),参考中科院土地利用分类标准,将土地利用数据重新分类为林地、草地、水体、耕地、建成区、裸地 6 种土地覆被类型(图 2)。为统一研究数据空间分辨率^[26-27],本文将地温数据与地表覆被数据重分类为 3 km 分辨率的影像以作进一步研究。

2000—2020 年,京津冀水体及耕地面积占比连续下降,草地面积占比则以 2005 年为转折点表现为先上升后下降,林地、建成区面积逐渐增加,建成区增长率也呈上升趋势,其绝对份额由 9.97% 增长至 14.74%,面积增加 8 187.26 km²,说明 20 年间城市建成区正处于快速扩张阶段(图 3)。2000 年,各城市的建成区规模相对较小且相互隔离,多集中在城市化程度较高的行政中心,如北京、天津、石家庄等地。2000—2020 年,建成区扩张主要体现在各城市行政区划范围内的近郊地区,如邢台、邯郸、保定等次等级城市的建成区也逐渐连点成片。

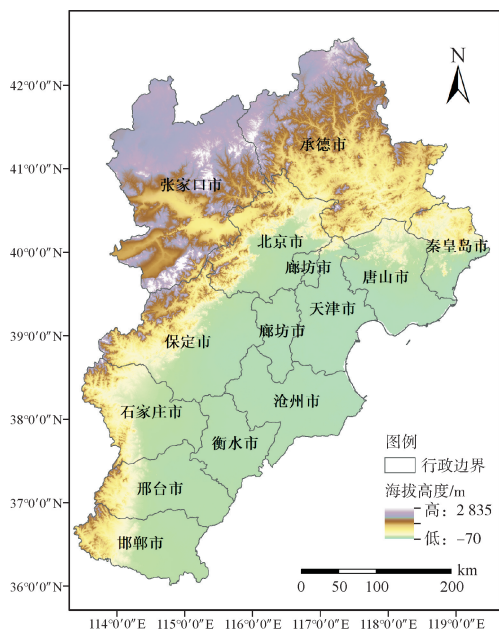


图 1 京津冀地区地理位置

Fig. 1 Location of Beijing-Tianjin-Hebei(BTH) region

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

总体而言,京津冀地区是中国城市群发展的典型代表,了解其区域热环境的时空演变格局,有助于

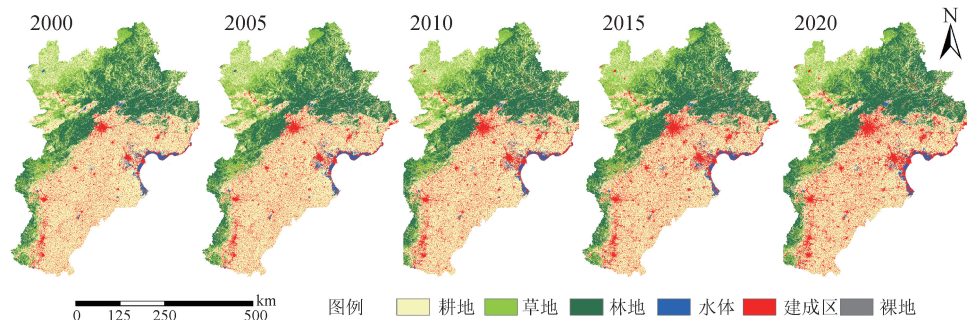


图 2 京津冀土地覆盖分类

Fig. 2 Land cover in BTH

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

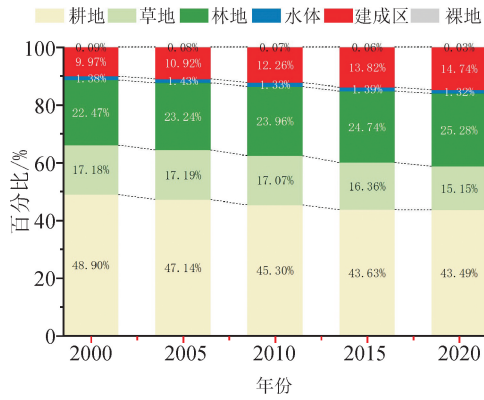


图 3 京津冀土地覆盖率的变化
Fig. 3 Land cover changes in BTH

1.3 研究方法

1.3.1 相对地表温度的计算

考虑到不同年份间整体地表温度的差异,并方

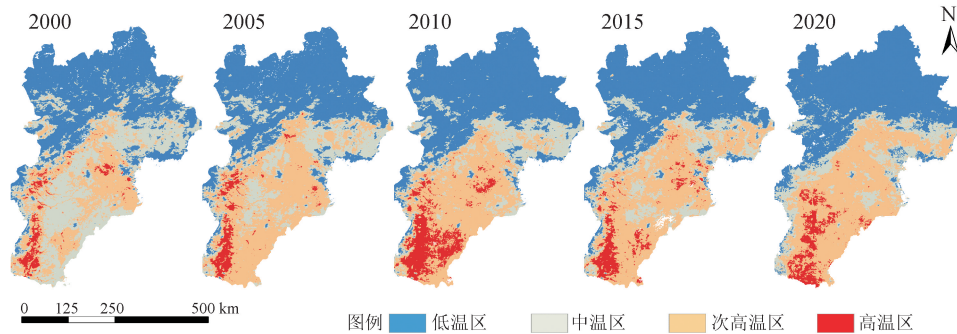


图 4 京津冀相对地表温度
Fig. 4 RLST in BTH

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

1.3.2 相对地表温度的计算

标准差椭圆是一种用于揭示空间要素分布及变化的空间统计法。选用用标准差椭圆法以 RLST 等级为权重识别京津冀地区热岛的整体情况,分析 20 年来京津冀各温区热环境的演变趋势和趋向性,其公式为:

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (2)$$

$$SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (3)$$

式中: SDE_x 和 SDE_y 表示标准差椭圆方差,长半径取最大方差,短半径取最小方差; x_i 和 y_i 是每个要素的空间位置坐标; \bar{X} 和 \bar{Y} 是算数平均中心。短半径越短,数据向心力越明显;长短半径差值越大,表示数据方向性越明显。

便后续对不同区域对热环境的贡献进行统计,本文选取地表温度的相对值来代表区域热岛的强度^[28],其公式为:

$$RLST_j^i = LST_j^i - \overline{LST_j} \quad (1)$$

式中: i 表示每一个像元; $RLST$ 表示相对地表温度; LST_j^i 表示 j 年的遥感地表温度; $\overline{LST_j}$ 表示 j 年份京津冀地区的平均地表温度。参考相关学者的研究^[29-31],本文根据相对地表温度将区域热环境分为四个温区,即低温区($RLST < 0$)、中温区($0 \leq RLST < 2$)、次高温区($2 \leq RLST < 4$)和高温区($RLST \geq 4$),以供进一步分析京津冀地区的热岛时空格局及其特征(图 4)。

1.3.3 聚类分析

空间聚类分析可以根据空间对象的属性对空间对象将“属性相似,空间临近”进行分类划分,已被广泛应用于城市规划、环境监测、地震预报等领域,也是空间数据挖掘领域的重要分支。为了对区域热岛模式进行多尺度的空间集聚格局分析,本文选用 Ripley L 函数法^[29,32],对各梯度下京津冀各温区热环境的集聚格局进行探究。最近邻比是随机条件下最近邻平均观测距离与最近邻平均预期距离之比,可以显示景观要素的空间集聚格局,但是受尺度影响较大,而 Ripley L 函数法则更有助于确定动态尺度下的空间格局,计算公式为:

$$NRR = \frac{2 \sqrt{\frac{n}{A}} \sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (4)$$

$$L(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{i,j}}{\pi n(n-1)} - d} \quad (5)$$

式中: d 代表尺度; n 是特征的数量; A 为特征总面积; $k_{i,j}$ 为权重。 $L(d) > 0$ 表示在距离 d 处出现高温聚集现象, $L(d) < 0$ 表示其在距离 d 处是分散的。 $NRR=1$ 表示空间格局呈随机分布, $NRR < 1$ 和 $NRR > 1$ 分别表示空间格局是集群或分散的。

1.3.4 景观格局

景观指数能定量反映景观的结构组成与空间配置,是浓缩景观格局信息的指标。为了分析区域热

岛各温区的形态及分布特征,本文基于 Fragstats (v4.2) 软件平台,综合考虑数据的空间分辨率,并参考相关文献^[33-35],选取了斑块类型总面积(TA)、斑块数量(NP)、平均斑块面积(ARER_MN)和斑块所占景观面积比例(PLAND)四个斑块水平景观指数作为分析基础,对京津冀地区各温区的空间形态进行分析,对景观指数的具体描述见表 1。

表 1 景观指数及其含义
Tab.1 Landscape index and its meaning

景观指数	公式	单位	含义
斑块类型总面积 (TA)	$TA = \sum_{j=1}^m a_{ij} \left(\frac{1}{10000} \right)$	hm ²	决定了景观的范围以及研究和分析的最大尺度,也是计算其他指标的基础。
斑块数量 (NP)	$NP=N$	个	反应景观的空间格局,经常被用来描述整个景观的异质性,其值的大小与景观的破碎度有正相关性。
平均斑块面积 (AREA_MN)	$AREA_MN = \frac{A}{N} 10^{-6}$	hm ²	代表一种平均状况,其分布区间对景观中最小斑块的选取有制约作用,也可以指征景观的破碎程度。
斑块所占景观面积比例 (PLAND)	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$	%	度量景观的组分,帮助确定优势景观元素的依据之一。

1.3.5 相关性分析

地表热环境的分布格局与地区地表覆被类型密切相关,本文结合前人研究^[36],将地表覆被密度的概念引入,以此表示地表覆被特征,计算公式为:

$$LCD_i = \frac{n_i s_r}{S} \times 100\% \quad (6)$$

式中: i 表示林地、草地、水体、耕地、建成区、裸地 6 种土地覆被类型; LCD 表示地表覆被密度; n_i 表示该网格内 i 土地覆被类型所占像素数; s_r 表示单个像素的固定面积; S 表示单个格网总面积。基于现实的考虑以及数据的可操作性,选取 $LCD > 5\%$ 的数据进行后续分析,对于 $LCD \leq 5\%$ 的土地覆被数据,忽略其对该格网内相对地表温度的影响。

如上文所述,城市地表温度的异质性是多种因素共同作用的结果,包括自然覆被、建成区不透水地表、城市建筑形态和社会经济等因素。鉴于本文的研究目的,本文选取 Spearman 相关系数探索各时期土地覆被密度与相对地表温度之间的关系。

2 结果与分析

2.1 京津冀热环境变化趋势分析

本文利用 ArcGIS 10.2 统计分析 2000—2020

年京津冀地区 RLST 的转化情况,并通过转移矩阵将其进行可视化分析,以揭示在此期间京津冀地区地表热环境效应的时空演化规律。2000—2020 年,京津冀地区 RLST 的总体表现为中温区的面积大幅下降,由 2000 年的 66 877 km² 变为 2015 年的 34 857 km²,主要转换为低温区、次高温区、高温区,面积分别为 8 516 km²、32 042 km² 和 631 km²,特别是 2000—2005 年期间,有 26 702 km² 转换为次高温区(图 5)。2010 年前,中温区持续下降,高温区持续上升,热环境形势趋于恶化,而在 2010 年后,低温区及高温区的面积有所回退,中温区及次高温区面积小幅增加,区域热环境呈好转趋势。在京津冀地区地表温区的转换(面积大于 50 km²)中,由高等级向低等级转换的主要类型有 4 种,面积达 16 139 km²,而由低等级向高等级转换的主要类型有 5 种,面积高达 42 842 km²,为高等级向低等级转换的 2.65 倍。总体来说,京津冀地区随着城市化进程的发展,社会经济发展对土地利用模式的影响增加,区域热环境格局变化明显,整体温区等级走高,2010 年前热环境两极化持续加剧,2010—2020 年有所好转。

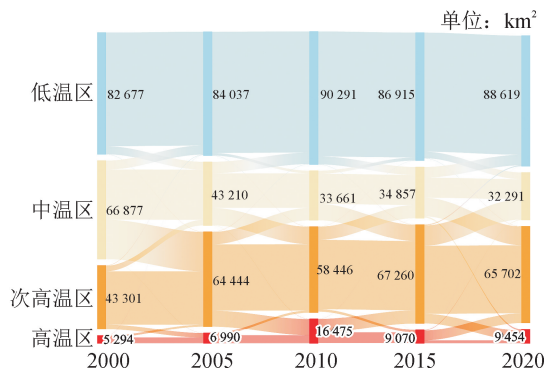


图5 京津冀的地表温区转移

Fig. 5 Surface temperature zone transfer in BTH

在此本文将京津冀热环境发展分为两大阶段,一阶段(2000—2010年),二阶段(2010—2020年),以便于后续分析与验证。

标准差椭圆用于分析京津冀地区各温区的分布趋势及随时间的变化(图6)。从其结果来看,京津冀地区各温区及整体的标准差椭圆具有一定的方向性特征,热环境形势的空间发展方向(椭圆的长轴方向)大致为西南-东北走向。这与土地覆被分类图(图2)中,耕地和建成区这些人类活动密集频繁的区域

分布趋势相似,说明京津冀地区热环境的发展情况与人类活动密不可分。中温区于一阶段标准差椭圆中心朝东北方向移动,标准差椭圆方向性逐渐减小,离散性逐渐增大,后于二阶段向西南方向移动。次高温区变化幅度较小,由于高温区面积占比较小,分布较为分散,变化幅度被放大,二阶段大致朝东南方向移动,标准差椭圆半径缩短,方向性有所减小。在一阶段,各温区标准差椭圆的长轴均呈缩短趋势,面积呈现缩小趋势,说明在西南-东北方向呈收缩集中趋势,整体聚集性升高。而在二阶段,趋势呈反转状况,说明京津冀地区热环境的中高温区聚集性有所降低,呈分散特征,形势转好。各温区整体而言,变化趋势由中温区主导,次高温区变化幅度较小,且随着温区等级的提升标准差椭圆中心逐渐向西南方向移动。而与京津冀整体的标准差椭圆变化对比可以发现,京津冀地区热环境整体变化趋势受次高温区影响较大,随着京津冀地区城市化进程的快速发展,区域热环境的空间格局逐渐由自东北向西南到自西南向东北方向转变。

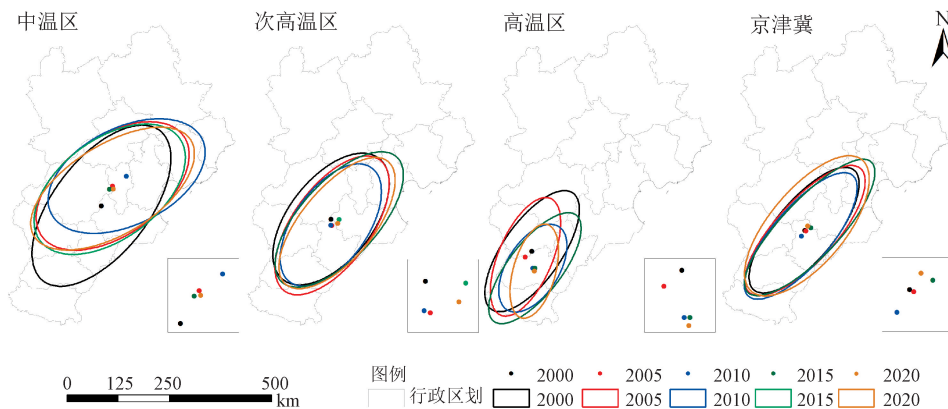


图6 京津冀各温区标准差椭圆变化趋势

Fig. 6 The trend of the standard deviation ellipse for each temperature zone in BTH

注:此图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1610的标准地图制作,底图无修改。

2.2 京津冀热环境聚集性分析

本文以栅格中心点为点元素,根据京津冀地区经纬度范围确定200 km为区域点元素运行Ripley L函数的最大距离,以12 km为距离增量在Arc-Map中进行聚类分析(见图7)。中温区、次高温区、高温区分别在60 km、70 km、45 km附近出现单峰值拐点,而京津冀地区峰值拐点出现在更远的80 km附近,表明在0 km到拐点对应距离范围内聚集性不断增强,在峰值处达到最大,并在此空间尺度上最显著。京津冀地区热环境的空间分布格局在较大的距离范围内聚集,且各温区总体分布格局基本一

致,聚集度随着空间距离的增加先增强后减弱。从时间上来看,各温区均在2010年前后呈现出聚集趋势的转变,中温区与次高温区表现在峰值的高低上,聚集性由升高转为降低,高温区则是聚集度的峰值由不断后移的趋势转为前移。总的来说,京津冀地区整体热环境在286 km范围内呈聚类分布,一阶段L(d)值逐渐上升,于二阶段有所回落,在更高温区内呈现出更强的波动性,整体在40~80 km内呈现出高聚集性,进一步验证了上文提及的京津冀热环境发展的两大阶段。

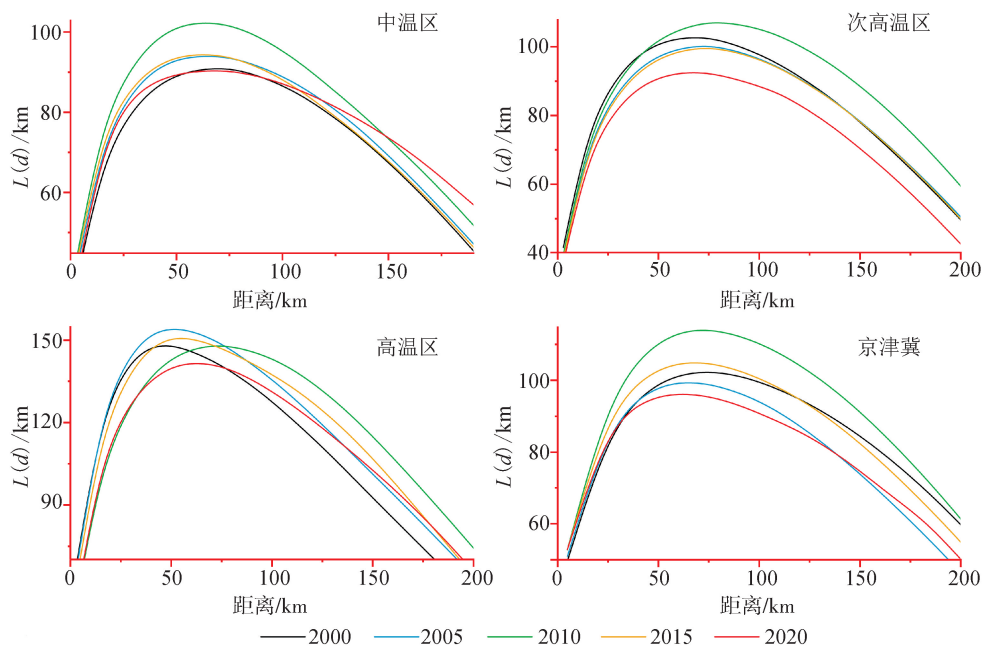


图7 Ripley L 函数结果
Fig. 7 Ripley's L function results

2.3 京津冀热环境形态特征分析

结合表 2 及景观指数含义(表 1)可知,在 2000 年的京津冀热环境中,中温区约是次高温区的面积的 1.55 倍,而两者的平均斑块面积却很接近,说明中温区的破碎化程度相对较高;而高温区虽然斑块所占景观总面积的比例很低,但它在斑块数量仅为次高温区 20% 的情况下斑块平均面积却达到了次高温区的 64%,表明其集聚性很高。一阶段期间,中温区斑块面积缩小、斑块数量减少、斑块所占景观

面积比例下降,高温区则斑块面积扩大、斑块数量增加、斑块所占景观面积比例上升。二阶段则有轻微的反向波动。而次高温区在 2000—2005 年间斑块面积急剧扩张、平均斑块面积巨幅增大、斑块所占景观面积比例暴涨,而在 2005 年后有少许回落。总体来看,京津冀热环境斑块组成在 2010 年前后呈转折性发展,一阶段高温区及次高温区斑块呈变大变多趋势,二阶段则反向收缩,再次验证了京津冀热环境发展的两大阶段。

表 2 斑块型景观指数按温区类型统计
Tab. 2 The patch landscape index by temperature zone type

年份	温区类型	TA/km ²	NP	AREA_ MN/km ²	PLAND/ %	年份	温区类型	TA/km ²	NP	AREA_ MN/km ²	PLAND/ %
2000	中温区	67 284	1 414	47.58	33.82	2015	中温区	35 820	1 015	35.29	18.02
	次高温区	43 479	924	47.06	21.86		次高温区	66 591	894	74.49	33.49
	高温区	5 517	183	30.15	2.77		高温区	9 441	241	39.17	4.75
2005	中温区	43 956	1 098	40.03	22.04	2020	中温区	35 601	812	32.96	16.39
	次高温区	64 305	805	79.88	32.25		次高温区	70 912	382	69.11	32.65
	高温区	7 173	188	38.15	3.60		高温区	10 074	232	32.45	4.64
2010	中温区	34 344	854	40.22	17.20						
	次高温区	58 005	730	79.46	29.05						
	高温区	16 713	286	58.44	8.37						

2.4 热环境与下垫面的相关性分析

就不同土地覆被类型的平均相对地表温度及其年际变化而言,建设用地的平均相对地表温度为 $1.7^{\circ}\text{C}\sim 2.3^{\circ}\text{C}$ 左右,对京津冀热环境的升温情况关系密切,林地、草地的平均相对地表温度为在 $-2.7^{\circ}\text{C}\sim -0.9^{\circ}\text{C}$ 之间,相对较低。说明城市化导致的不透水地表通常会产生热效应,而林地与草地则会产生冷却效应(图9)。值得注意的是,耕地的平均地表温度在 0°C 以上但在 2°C 以下,考虑到其植被类型较为单一且为人工管理,区域内人类活动频繁,其降温作用通常较小或不具备降温作用。

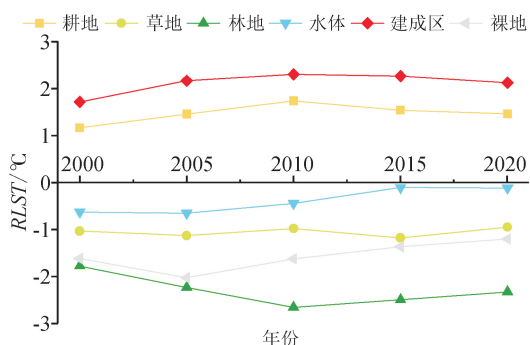


图8 各土地覆盖类型的平均相对地表温度
Fig. 8 Mean RLST of each land cover type

Spearman 相关分析显示(表3),林地密度、水体密度在不同时间点上,所有LCD均与RLST呈显著负相关,且显著性均呈先增大后减小的趋势;而耕地密度、建成区密度则在各时间点均与RLST呈显著正相关,前者显著性在一阶段上升,二阶段有所下降,而后者在整个时间段内均呈上升趋势,且幅度不断加大。这与京津冀地区建成区面积飞速扩张,影响力增强有很大关系。由于京津冀地区裸地面积占比较低(图2),数据量过少,结果可信度较低。

表3 不同时期LCD和RLST的Spearman相关系数

Tab. 3 Spearman correlation coefficients of LCD and RLST for different periods

年份	林地	草地	水体	耕地	建成区	裸地
2000	-0.46**	-0.13**	-0.30**	0.51**	0.07**	-0.21
2005	-0.46**	-0.08**	-0.39**	0.55**	0.11**	-0.26*
2010	-0.52**	0.11**	-0.37**	0.62**	0.14**	-0.26*
2015	-0.47**	0.09*	-0.35**	0.58**	0.31**	-0.23*
2020	-0.44**	0.08*	-0.34**	0.55**	0.35**	-0.22*

注:**表示 $p < 0.01$ 水平,*表示 $p < 0.05$ 水平。

其中,林地密度与相对地表温度的负相关关系最强,耕地密度与相对地表温度的正相关关系最强,两者均于一阶段期间呈增强趋势,二阶段则有所回

落,在时间上变化趋势一致。这表明林地和耕地是影响京津冀地区相对地表温度的主要因素,建成区则作为增温效应的新军影响力飞升,是最值得注意的地表覆被类型,这与各土地覆被类型区域内的平均RLST结果一致(图2),可信度较高。

3 讨论

城市的进程显著增强了城市热岛效应,但对于城市群规模的热环境影像研究仍然不足。城市化的发展和城市边界的加速扩张,导致城市间的距离不断缩小甚至趋于消失。以往的研究也证明了城市热岛效应的影响通常具有其现实意义,有学者提出城市于郊区是连续而流动的,并不具有严格意义的分界,可见传统的城乡分类在今天已经过时,尤其是在人口稠密的发展中地区^[37]。因此,结合前人的研究结果^[30],城市化进程中的区域热环境指数(即区域热岛)在描述城市群热环境方面具有相对优势。孤立的建成核心区从城市中心区域延伸到郊区并逐渐相互连接,最终形成城市群的过程,这与京津冀热环境高温区的发展趋势一致(图2)。此外,Ripley L函数的结果表明,区域热岛于2005年在较小距离下呈聚集趋势,但于二阶段在较大距离上聚集性显著。

不透水地表的扩张可以解释快速城市化过程中城市热岛现象的变化,同样也可以解释城市群区域热岛的变化^[38]。有学者发现2005—2015年间,京津冀地区不透水面的时空格局经历了两个时期,2010—2015年各自然区域不透水地表的生长速度明显快于前一阶段^[39]。总体来说,在城市化的初始阶段,城市的扩张受到了行政边界的隔离和制约。随后,城市从单中心向多中心的扩张和城市间大型基础设施(交通网络)的建设导致了区域热岛的形成。土地利用类型的变化对区域热岛也具有显著影响。相关研究表明^[16],城市绿地具有缓解城市热岛效应的作用,且其降温作用随其面积的增加而增加,这与本研究的分析结论一致。城市群区域快速城市化引起的一系列区域热岛问题并不能仅靠一个城市解决,而应该从区域的尺度上制定方案。因此,在区域尺度上理解热环境的时空格局、成因及其演化规律,对于全面理解城市群扩张下的热环境问题并制定解决方案具有重要意义。

京津冀地区具有典型的夏季高温多雨的温带大陆性季风气候,这使得获取夏季统一时间的完全无云干扰的高质量影像数据变得极为困难。虽然大部分图像质量非常高,但由于时空跨度较大,部分区域的地表温度数据仍受到云层影像而缺失。MODIS

图像数据的另一个局限性在于年度地表温度数据使用了月合成地表温度数据进行计算,可能对结果具有一定的影响。为了避免这种时间维度上的跨越性,在未来的研究中,可以使用多传感器融合的方法获取更准确的地表温度数据。此外,地形走向与降水情况对区域热环境的影响也值得更进一步的研究。

4 结 论

本文基于京津冀地区的 MODIS 月均温数据和土地覆被数据,运用景观生态学、空间统计学的理论与方法,对不同温区等级下京津冀地区的地表热环境空间分布格局及其与地表覆被类型间的关系进行了探讨。

1) 京津冀建成区面积不断扩张,热环境格局演化呈明显的两大阶段:一阶段(2000—2010年)整体温区等级走高,京津冀地区整体热环境趋于两极化,且整体温区等级走高;二阶段(2010—2020年)有所缓和,高温区集聚性降低,治理效果初步显现。

2) 中温区、次高温区、高温区区域热岛分别在 60 km、70 km、45 km 尺度上最显著,总体分布格局基本一致,聚集度随着空间距离的增加先增强后减弱。各温区均在一阶段集聚性增强,二阶段则有所回落,在更高温区内呈现出更强的波动性,整体在 40~80 km 内呈现出高聚集性。

3) 中温区在一阶段期间斑块面积缩小、斑块数量减少,破碎程度加大,二阶段有所回调;高温区则相反,逐渐形成串联贯通区域。京津冀热环境斑块组成在 2010 年前后呈转折性发展,一阶段高温区及次高温区斑块呈变大变多趋势,二阶段呈反向收缩。

4) 林地和耕地是影响京津冀地区相对地表温度的主要因素,建成区则影响力飞升。林地密度与相对地表温度的负相关关系最强,耕地密度与相对地表温度的正相关关系最强,两者均于一阶段呈增强趋势,二阶段有所回落。

参考文献:

[1] United Nations Human Settlements Programme. World cities report 2020: the value of sustainable urbanization [R/OL]. New York, 2020. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf.

[2] WANG Shuang, HU Mengmeng, WANG Yafei, et al. Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103561.

[3] MIKAMI T. Urban heat island phenomena and their causing factors: a case study of Tokyo Metropolis [J]. *Journal of Geography*, 2005, 114(3): 496-506.

[4] 丁金才,周红妹,叶其欣. 从上海市热岛演变看城市绿化的重要意义[J]. *气象*, 2002, 28(2): 22-24.

DING Jincai, ZHOU Hongmei, YE Qixin. Importance of city greening prospected upon evolution of heat island in Shanghai City [J]. *Meteorological Monthly*, 2002, 28(2): 22-24.

[5] 张佳华,孟倩文,李欣. 北京城区城市热岛的多时空尺度变化[J]. *地理科学*, 2011, 31(11): 1349-1354.

ZHANG Jiahua, MENG Qianwen, LI Xin. Urban heat island variations in Beijing Region in multi spatial and temporal scales[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(11): 1349-1354.

[6] CHAPMAN S, WATSON J E M, SALAZAR A, et al. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review[J]. *Landscape Ecology*, 2017, 32(10): 1921-1935.

[7] 胡平. 基于 Landsat 8 的成都市中心城区城市热岛效应研究[D]. 成都:成都理工大学, 2015.

HU Ping. Study on urban heat island in the central city of Chengdu based on Landsat 8[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[8] 韩冬锐,徐新良,李静,等. 长江三角洲城市群热环境安全格局及土地利用变化影响研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(1): 39-49.

HAN Dongrui, XU Xinliang, LI Jing, et al. Study on the security pattern of the heat environment and the influence of land use change in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2017, 19(1): 39-49.

[9] 钱敏蕾,徐艺扬,李响,等. 上海市城市化进程中热环境响应的空间评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 624-633.

QIAN Minlei, XU Yiyang, LI Xiang, et al. An assessment of spatial thermal environmental response to rapid urbanization of Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 624-633.

[10] 张伟,蒋锦刚,朱玉碧. 基于空间统计特征的城市热环境时空演化[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1840-1846.

ZHANG Wei, JIANG Jingang, ZHU Yubi. Spatial-temporal evolution of urban thermal environment based on spatial statistical features[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1840-1846.

[11] 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.

- HU Lifa, XIE Yuanli, CUI Siying, et al. The characteristics and driving forces of summer urban heat island in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8):3842-3852
- [12] 徐双,李飞雪,张卢奔,等. 长沙市热力景观空间格局演变分析[J]. *生态学报*, 2015, 35(11):3743-3754.
- XU Suang, LI Feixue, ZHANG Luben, et al. Spatio-temporal changes of thermal environment landscape pattern in Changsha[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3743-3754.
- [13] 李玉杰,卢娟,陈思佳,等. 海口市热力景观时空格局与分异特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(4): 712-722.
- LI Yujie, LU Juan, CHEN Sijia, et al. On the spatial-temporal patterns and differentiation characteristics of thermal landscape in Haikou City[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2021, 38(4):712-722.
- [14] 高静,龚健,李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(11):1770-1782.
- GAO Jing, GONG Jian, LI Jingye. Effects of source and sink landscape pattern on land surface temperature: an urban heat island study in Wuhan City[J]. *Progress in Geography*. 2019, 38(11): 1770-1782.
- [15] KUANG Wenhui, LIU Yue, DOU Yinyin, et al. What are hot and what are not in an urban landscape: quantifying and explaining the land surface temperature pattern in Beijing, China [J]. *Landscape Ecology*, 2015, 30(2): 357-373.
- [16] 曾建丽,赵玉帛,李淑琪. 京津冀城市群新型城镇化水平时空格局演变及驱动因素研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(10):100-107.
- ZENG Jianli, ZHAO Yubo, LI Shuqi. Research on the evolution and driving factors of the new urbanization level of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(10):100-107.
- [17] 邱海玲. 北京城市热岛效应及绿地降温作用研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- QIU Hailing. Study on urban heat island effect and cooling effect of greenland in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [18] 杨雅君,邹振东,赵文利,等. 6种城市下垫面热环境效应对比研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5):881-889.
- YANG Yajun, ZOU Zhendong, ZHAO Wenli, et al. Comparative study on the thermal environment effect of six urban underlying surfaces[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(5): 881-889.
- [19] 樊智宇,詹庆明,刘慧民,等. 武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(2):226-235.
- FAN Zhiyu, ZHAN Qingming, LIU Huimin, et al. Spatial-temporal distribution of urban heat island and the heating effect of impervious surface in summer in Wuhan[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(2):226-235.
- [20] 聂芹. 上海市城市不透水面及其热环境效应的分形研究[D]. 上海:华东师范大学, 2013.
- NIE Qin. Fractal investigation of urban impervious surfaces and its thermal environment effect in Shanghai city[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [21] 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.
- GUO Yu, WANG Hongwei, ZHANG Zhe, et al. Spatio-temporal scale effect and driving mechanism of thermal environment and land surface cover in Nanjing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7): 1403-1411.
- [22] 黄奕钦,龚建周. 广州市中心城区城市不透水地表覆盖结构与地表温度的关联性研究[J]. *生态科学*, 2022, 41(4):32-40.
- HUANG Yiqin, GONG Jianzhou. The relationship between the impervious surface covering structure and land surface temperature in Guangzhou downtown[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(4): 32-40.
- [23] 吴昌广,林姚宇,王耀武,等. 城市地表热环境季节变化及与下垫面特征关系[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(4):26-30.
- WU Changguang, LIN Yaoyu, WANG Yaowu, et al. Seasonal variations of urban land surface thermal environment and its relationship to land surface characteristics[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(4): 26-30.
- [24] 金微微. 京津冀地区经济协调创新发展体系的构建研究[J]. *中国商论*, 2020(24):17-18.
- JIN Weiwei. Research on the construction of coordinated economic innovation development system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Business & Trade*, 2020(24): 17-18.
- [25] 姚士谋,陈爽,陈振光. 关于城市群基本概念的新认识[J]. *现代城市研究*, 1998(6):15-17, 61.
- YAO Shimou, CHEN Shuang, CHEN Zhenguang. New recognition on city group basic concept[J]. *Modern Urban Research*, 1998(6):15-17, 61.
- [26] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等. 1989~2015年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J]. 中

- 国环境科学,2019,39(4):1734-1743.
- LEI Jinrui, CHEN Zongzhu, WU Tingtian, et al. Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989~2015. *China Environmental Science*, 2019, 39(4):1734-1743.
- [27] WANG Yixu, XU Mingxue, LI Jun, et al. The gradient effect on the relationship between the underlying factor and land surface temperature in large urbanized region[J]. *Land*,2021,10(1): 20.
- [28] SUN Ranhao, CHEN Liding. Effects of green space dynamics on urban heat islands: mitigation and diversification[J]. *Ecosystem Services*,2017,23: 38-46.
- [29] QIU Guoyu, ZOU Zhendong, LI Xiangze, et al. Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China[J]. *Habitat International*, 2017, 68:30-42.
- [30] 赵志刚,余德,何宁,等. 赣西三市热环境时空演变特征及影响因素[J]. *生态科学*,2019,38(3):174-181.
- ZHAO Zhigang, YU De, HE Ning, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influence factors of thermal environment in three cities of western Jiangxi[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(3): 174-181.
- [31] YU Zhaowu, YAO Yawen, YANG Gaoyuan, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995-2015) of Southern China[J]. *Science of The Total Environment*,2019,674:242-254.
- [32] 余兆武,肖黎姗,郭青海,等. 城镇化过程中福建省山区县农村聚落景观格局变化特征[J]. *生态学报*, 2016,36(10):3021-3031.
- YU Zhaowu, XIAO Lishan, GUO Qinghai, et al. Mountain county rural settlement landscape pattern change and spatial characteristics in rapid mountain urbanization process in Fujian province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3021-3031.
- [33] 沈中健,曾坚. 闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系[J]. *地理学报*,2021,76(3):566-583.
- SHEN Zhongjian, ZENG Jian. Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 566-583.
- [34] 唐建军,杨民安,周亮,等. 高原环湖城镇聚落的景观格局及空间形态演变特征——以滇池为例[J]. *长江流域资源与环境*,2020,29(10):2274-2284.
- TANG Jianjun, YANG Minan, ZHOU Liang, et al. Landscape pattern and spatial form evolution of urban settlements around lakes in plateau: a case study of Dianchi Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2020,29(10):2274-2284.
- [35] 范韦莹,王学雷,姜刘志,等. 2005年、2010年和2017年神农架大九湖湿地土地利用格局及其变化[J]. *湿地科学*,2020,18(4):437-445.
- FAN Weiyang, WANG Xuelei, JIANG Liuzhi, et al. Land use patterns of Dajiuhu Wetlands, Shennongjia in 2005, 2010 and 2017 and their changes[J]. *Wetland Science*,2020,18(4):437-445.
- [36] ZANG Xiuying, FENG Xuezhi. Land-cover density - based approach to urban land use mapping using high-resolution imagery [J]. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(2): 162-167.
- [37] STEWART I D, OKE T R. Local climate zones for urban temperature studies [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,2012,93(12): 1879-1900.
- [38] 李炳燮,马张宝,齐清文,等. Landsat TM 遥感影像中厚云和阴影去除[J]. *遥感学报*,2010,14(3):534-545.
- LI Pyongsop, MA Zhangbao, QI Qingwen, et al. Cloud and shadow removal from Landsat TM data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2010, 14 (3): 534-545.
- [39] 金耀,李士成,倪永,等. 基于地表覆盖及夜间灯光的分区人口空间化——以京津冀地区为例[J]. *遥感信息*,2021,36(5):81-89.
- JIN Yao, LI Shicheng, NI Yong, et al. Zonal simulation of population distribution based on land cover and nighttime light data: taking Beijing-Tianjin-Hebei for an example[J]. *Remote Sensing Information*, 2021, 36(5): 81-89.

(责任编辑 王绪迪)