

DOI: 10.5846/stxb201907131472

曾素平, 时琢, 赵梅芳, 刘发林, 王光军, 林杨, 李沁园, 向枝远, 陈小伟, U.S Ogbodo. 城市水体对热岛的缓冲性能沿河岸距离的变化规律. 生态学报, 2020, 40(15): 5190-5202.

Zeng S P, Shi Z, Zhao M F, Liu F L, Wang G J, Lin Y, Li Q Y, Xiang Z Y, Chen X W, U.S Ogbodo. The variation of buffer performance of water bodies on urban heat island along riverbank distance. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5190-5202.

城市水体对热岛的缓冲性能沿河岸距离的变化规律

曾素平³, 时琢^{1,2}, 赵梅芳^{1,2,*}, 刘发林³, 王光军^{1,2}, 林杨³, 李沁园^{1,2}, 向枝远^{1,2}, 陈小伟³, U.S Ogbodo^{1,2}

1 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004

2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

3 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

摘要:城市水体包括城区内的自然水体和人工水体两大类。作为城市生态系统的重要组成部分, 水体在缓解城市热岛效应 (Urban Heat Island, UHI) 上具有重要作用。研究城市热岛效应的现状, 探讨水体对城市热岛的缓冲效应, 为改善城市热岛效应和生态环境, 并对城市进行合理的改造和规划提供理论依据。以长沙市中心城区为研究区域, 以南北向贯穿长沙市的湘江河道作为主要研究对象, 基于长沙市 2016 年 7 月 Landsat 8 TIRS 遥感影像采用大气校正法反演地表温度 (Land Surface Temperature, LST), 利用监督分类法获取其同步的城市化进程和土地利用类型, 分析市区内地表温度及热岛效应的空间分布特征。同时, 通过在湘江两侧建立多个尺度的缓冲区, 并将其与地表温度分布及土地利用类型叠置, 分析湘江为主的水体对长沙市热环境及各缓冲区的缓冲效应, 结果表明: (1) 长沙市城市建设格局与热岛效应空间分布基本相似, 建筑用地热岛效应更高, 极端地表温度达到 53.8℃; 水体、绿地和裸地的热岛效应相对较低, 最低地表温度为 16.0℃; (2) 湘江对长沙市热岛效应具有缓冲作用, 对长沙市热岛效应的平均缓冲距离为 400 m; (3) 湘江对热岛效应的缓冲能力与水体周边土地利用类型有关, 对河东区的缓冲作用小于河西区, 对沿江休闲区的缓冲效应大于沿江住宅区。综上所述, 长沙市热岛效应强度与用地类型相关, 建筑用地热岛效应严重; 水体对热岛的缓冲效应显著, 但不同缓冲区内缓冲距离存在差异, 因此对城市生态格局进行小规模改造可增强水体缓冲作用, 缓解城市热岛效应。

关键词: 水体; 热岛效应; 缓冲作用; 长沙市

The variation of buffer performance of water bodies on urban heat island along riverbank distance

ZENG Suping³, SHI Zhuo^{1,2}, ZHAO Meifang^{1,2,*}, LIU Falin³, WANG Guangjun^{1,2}, LIN Yang³, LI Qinyuan^{1,2}, XIANG Zhiyuan^{1,2}, CHEN Xiaowei³, U.S Ogbodo^{1,2}

1 Faculty of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Forest Ecological Technology in Southern China, Changsha 410004, China

3 Faculty of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Urban water bodies are mainly classified into natural water and artificial water. As an important part of urban ecosystem, it plays an important role in relieving Urban Heat Island (UHI) effect. It is important to study the current status of urban heat island effect, explore the buffer effect of water body on urban heat island, and provide theoretical basis for urban transformation and planning rational for improving urban heat island effect and ecological environment. The area

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971456, 31600355)

收稿日期: 2019-07-13; 网络出版日期: 2020-05-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaomf963@126.com

considered in this study was the north-south direction of Changsha's Xiangjiang River, located in Changsha downtown. Based on Landsat 8 TIRS remote sensing image of Changsha City in July 2016, the land surface temperature (LST) was retrieved by atmospheric correction method. The synchronous urbanization process and land use types were obtained by supervised classification method, and the spatial distribution characteristics of surface temperature and heat island effect in urban areas were analyzed. At the same time, the buffer effects of Xiangjiang River on the thermal environment and various buffer zones in Changsha City were analyzed by building multi-scale buffer zones on both sides of Xiangjiang River and overlapping them with land surface temperature and land use types. The results showed that: (1) the spatial distribution of urban construction pattern in Changsha City was basically similar to that of heat island effect. The heat island effect of built-land was higher, and the extreme surface temperature reached 53.8 C. The heat island effect of water, green space and bare land was relatively low, and the lowest surface temperature was 16.0 C. (2) The Xiangjiang River had a buffer effect on the heat island effect in Changsha, and the average buffer distance for the heat island effect in Changsha was 400 m. (3) The buffer capacity of the Xiangjiang River to the heat island effect was related to the type of land cover around the water body. The buffer effect to the east of the river was less than that to the west of the river, and the buffer effect to the leisure area along the river was greater than that of the residential area along the river. In summary, the intensity of heat island effect in Changsha city is related to land use type, moreover, the heat island effect of construction land is serious. The buffer effect of water body on heat island is significant, but there are differences among different buffer zones. Therefore, small-scale urban ecological pattern transformation can enhance the buffer effect of water body and alleviate the urban heat Island effect.

Key Words: water bodies; heat island effect; buffering effect; Changsha

城市热岛效应 (Urban Heat Island, UHI) 是城市化导致城市地区气温或者地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 明显高于城市周围郊区的现象^[1]。作为一种特殊的气候特征,城市热岛效应的产生和发展主要受人类生产生活^[2-5]和太阳辐射^[6]的影响。随着城市化进程的加快,城市下垫面改变影响地表对太阳辐射的吸收,同时自然植被遭受严重破坏,城市建设导致地表温度逐年升高和热岛效应的增强^[7],加剧空气污染,严重影响了城市居民的生存环境和生活质量^[8]。同时,城市热岛可影响植被生境状况,进而影响城市生态系统的结构和功能^[9]。因此,探究水体对热岛的缓冲性能对缓解城市热岛效应、改善居民生存环境以及城市生态可持续发展具有重要意义。

目前许多研究发现,以水体、绿地为主导的“冷岛效应”是改善城市气候、缓解城市热岛效应最有效的方式^[10],植被能有效地削弱城市热岛效应^[11-14],而研究城市水体对热岛效应的影响主要是因为城市水体对城市的发展有重要影响,水体作为调节生态环境的重要组成部分,在缓解城市热环境方面具有显著作用。水体能对热岛起缓冲作用主要是因为水体有着可以作为城市冷源的重要功能^[15],其能够大量吸收并储存热量,有利于缓解水体上空及附近的热效应^[16]。研究发现水体周边的自然地形、用地区划、离水体距离等都能影响水体对地表温度的缓冲效应^[17]。已有的研究主要探讨城市热岛效应受水体^[18-19]、土地利用/覆盖类型和城市空间格局的影响^[20-23]。有关水体对城市热岛效应的缓解作用,主要研究水体自身能量流动与周边环境能量交换^[24-26],一般仅将水体作为因素之一进行研究,而作专门研究的比较少见^[27]。水体可在一定范围内有效缓解城市热岛效应,但不同地区之间普遍存在差异^[18]。有研究发现南京市水体对热岛效应的平均缓冲距离为 300 m^[18],而东莞市水体的缓冲距离为 200 m^[27]。缓冲距离主要受城市建设规模和布局的影响。景观格局对城市热岛效应具有一定的缓解作用^[28-29],在一定程度上影响热岛效应强度^[30]。如卞子浩等^[31]分析了景观生态格局对热岛效应的缓解作用;孟丹等^[32]将景观生态学与热环境研究结合,研究热力景观格局以及公园和道路景观对热岛效应的缓解作用。谢启姣等^[33]则研究城镇区域不透水面对热岛效应的影响过程。探究城市热岛效应特征及不同生态格局在城市热岛效应中的地位,对缓解城市热岛效应及对城市进行合理的生态规划具有重要意义^[34]。目前的研究仅探讨小范围内水体对其周边地表的降温作用,而且未考虑周边用地类型、生态格

局等因素的影响。本研究首次结合长沙市区湘江水体周边生态格局及城市用地区划,探讨水体对周边较大范围内地表温度的缓冲作用,为合理利用、规划水体周边用地和生态环境提供可行性依据。

长沙市城区从 1988 年至 2008 年,热岛强度年平均变化在 0.76 强度年平均变之间;长沙市热岛效应逐年增强,热岛的时空变化趋势与建城区一致,随建城区面积的增大而增大^[35-36]。21 世纪以来,长沙市城市化建设发展迅速,城区面积不断扩张^[37],热岛强度城区和郊区同步上升,严重影响居民生产生活^[38]。随着城市规模的扩大,建城区土地利用类型逐渐变化,大量绿地和耕地转变为建设用地,水体的热岛缓解作用逐渐突显出来^[36]。湘江为湖南省内最大河流,湘江长沙段作为长沙市区最大水系,南北向横穿主城区,因此可以认为湘江是长沙市城市生态系统的重要组成部分,对缓解长沙市热岛效应具有重要作用。已有研究主要对长沙市热岛效应时空演变的趋势^[35-36]及热岛成因进行探讨^[39],而将水体作为研究对象,并结合土地利用类型和生态规划格局,探讨水体对城市热岛缓冲作用的研究有待深入探讨。因此本研究选择长沙市湘江水体作为研究对象,并在沿江两岸建立缓冲区,重点研究湘江对城市热岛效应的缓冲作用,得出不同土地利用类型对湘江缓冲能力的增强或抑制强度。通过分析长沙市地表温度分布状况及土地利用类型,探究长沙市湘江水体对城市不同规划区热岛的缓冲效应,目的在于探索:(1)长沙市地表温度和城市热岛效应整体分布特征;(2)湘江水体对热岛地表温度的总体缓冲作用;(3)湘江水体对不同用地区划间缓冲效应的分异特征;(4)湘江水体对各类用地区划内不同生态规划用地间缓冲效应的分异特征。为提高城市土地利用效率,缓解城市热岛效应,提高城市居民舒适度,以及构建生态文明城市提供参考,为城市系统规划提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

长沙市位于中国湖南省东北部,是长江中下游地区重要的中心城市,位于东经 111°53′—114°5′,北纬 27°53′—114°5′之间,属亚热带季风气候,夏季以东南风为主,冬季西北风为主。长沙市形状狭长,东西两侧为山地,地势相对较高,中部趋于平缓,整体地形呈马鞍形^[36]。

根据卫星地图信息并结合实际情况,本次研究的实际范围为以长沙市区为中心的矩形区域,包括长沙市区和长沙县的部分地区。东西长 45.72 km,南北宽 21.69 km,总面积为 991.67 km²,地处长沙市中间区域的平缓地带,湘江及其四条支流(浏阳河、捞刀河、靳江河和洩水河)构成研究区的主要水系(图 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 数据收集与预处理

本研究的数据主要来源于 Landsat 8 卫星遥感影像、长沙市统计年鉴^[40]和《长沙市城市总体规划(2003—2020)(2014 年修订)》等。其中,Landsat 8 卫星遥感影像数据是通过地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)下载,选取了 2016 年研究地夏季成像的影像数据,影像中无云雾遮挡,地物类型清晰,成像效果理想,空间分辨率为 30 m。地表温度反演采用大气校正法,地类提取采用监督分类法。

1.2.2 总体缓冲区的建立及缓冲分区的设计

本研究通过对 2016 年卫星数据建立总体缓冲域、缓冲分区进行分析研究,并根据所选河流两边地势、海拔、经济、建筑以及规划等综合特征,将缓冲域进一步分维,生成 3 种具有明显影响差异的方案(图 2):

(1)总体缓冲区(图 2a):中心为湘江长沙段主干,两侧为长沙市主城区。缓冲带划分原则为河岸自然分界线^[41]。利用 ArcGIS 10.0 软件,在水体周边建立总体缓冲区。然后,将缓冲区平均切成 100 个缓冲带,各缓冲带宽度为 50 m,总共划分的缓冲面积为 291.858 km²,缓冲范围为 5 km(50 m×100 m)。

(2)沿江两岸缓冲分区(图 2b):由于湘江东西两岸主要用地类型和地势不同,将总体缓冲区分为河西区和河东区,并根据总缓冲域分析结果重新建立适当距离的缓冲区(850 m)。

(3)沿江四分缓冲分区(图 2c):根据用地类型将河西区和河东区分别划分为河西沿江休闲区、河西沿江住宅区、河东沿江休闲区和河东沿江住宅区,并根据总缓冲域分析结果重新建立适当距离的缓冲区(800 m)。

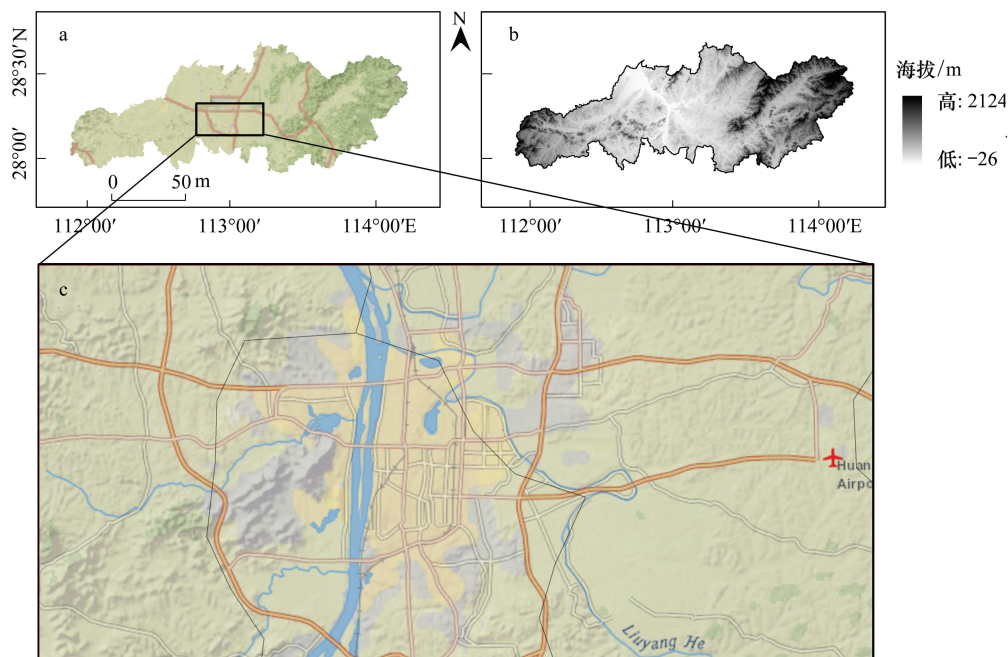


图1 研究区域

Fig.1 The study area

(a) 研究地所在的地理位置; (b) 海拔范围; (c) 2016 年长沙市区位图

河西沿江住宅区和河东沿江住宅区主要为居住用地、工业用地、公共设施用地;河西沿江休闲区主要为绿地、水体、道路广场、公共设施用地和居住区,河东沿江休闲区主要为绿地、公共设施用地、水体、居住用地^[42-43]。缓冲区内地形表现为中部较低,西、南、东相对较高,河西休闲区内绿地主要为岳麓山、桃花岭、谷山等,水体主要为咸嘉湖、桃子湖、后湖,河东休闲区绿地主要为黑麋峰、影珠山等,水体主要为捞刀河、月湖、青竹塘水库等,而两岸住宅区水体及绿地占比较小^[44]。

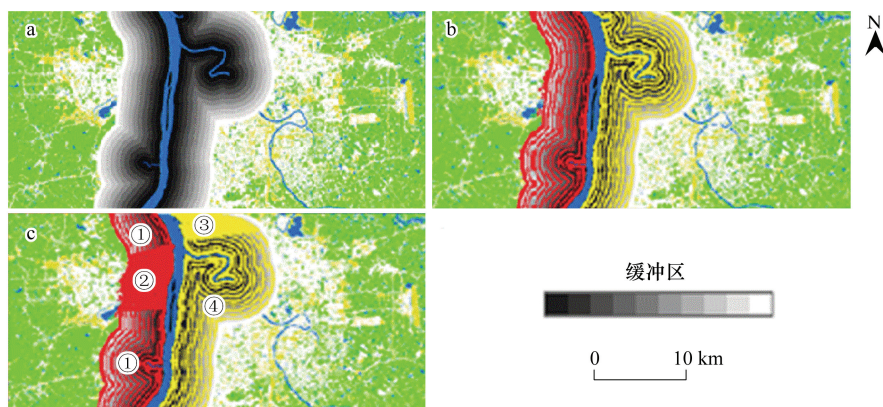


图2 缓冲效应域及分区示意图

Fig.2 Buffer effect domain and partition schematic diagram

(a) 缓冲区叠置范围图(50m×100);(b) 沿江两岸缓冲分区;(c) 沿江四分缓冲分区(①河西沿江休闲区;②河西沿江住宅区;③河东沿江休闲区;④河东沿江住宅区)

1.2.3 统计与分析

首先,为了统计长沙市地表温度和城市热岛效应整体分布特征,本研究对基于影像反演和监督分类得到

的 2016 年整个研究区域的两个栅格数据图层(地表温度和土地利用类型)进行分类统计。为了便于清晰展示地表温度的空间分布格局,这里使用地表温度等级法和热岛强度法将反演的地表温度值进行标准化处理,(1)采用密度分割法^[45-46]对地表绝对温度进行分级^[47-48],得到地表温度等级图;(2)本文中采用地表相对温度来表示城市热岛强度^[41],地表相对温度是指某点地表温度与平均地表温度之差与平均地表温度的比,其表达式为:

$$\Pi(T) = \Delta T / \bar{T} = (T_i - \bar{T}) / \bar{T}$$

式中, ΔT 为地表温度与平均地表温度之差; $\bar{T}$ 为平均地表温度; T_i 为某点地表温度。

其次,统计湘江水体对热岛地表温度的总体缓冲表现,并分析其对不同用地地区划间及区划内不同生态规划用地间缓冲效应的分异特征,本研究将总体缓冲区的图层与地表温度反演结果进行叠加,获取各缓冲区内地表温度分布,并计算每个缓冲带内的地表温度的平均值、最大值、最小值、标准偏差。以 X 轴代表缓冲带距水体边缘的距离,Y 轴代表地表温度,则 100 个平均地表温度点最终构成缓冲区的地表平均温度曲线。地表最高温度为各缓冲区内温度最大值,100 个最高地表温度点最终构成缓冲区的地表最高温度曲线。在 LST 曲线的坡面或者剖面剧烈变化的点之间插值,插值是在 Microsoft Excel 中对相邻点进行加权平均,权重与给定点到相邻点的距离成比例。

给定两个值 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,y 在 x 处的估计值为 y_1 和 y_2 的加权平均值:

$$Y = \frac{X_1 - X}{X_2 - X_1} + \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} y_2$$

插值点线性函数方程为:

$$L_1(X) = \frac{X_1 - X}{X_2 - X_1} + \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} y_2$$

没有插值该区域的值,而是绘制平均 LST,通过可视化和图形分析,分析从每个缓冲区获得的曲线,以发现在水体附近的温度剖面中存在的任何代表其冷却效果的倾角,对应的 X 值即为水体缓冲距离^[41, 49-50]。

分析河东沿江两岸缓冲分区(缓冲区共 850 m,每个缓冲带 50 m,共 17 个缓冲带)和沿江四分缓冲分区(缓冲距离共 800 m,每个缓冲带 50 m,共 16 个缓冲带)地表温度分布特征的方法与总体缓冲区一致。

利用 ArcGIS 10.0 和 Microsoft Excel 2010 对数据进行初步统计和整理,采用 IBM SPSS Statistics 21.0 进行数据分析和模型拟合,作图在 R 软件上完成。

2 结果

2.1 长沙市 LST 与土地利用类型空间分布格局

根据 2016 年长沙市地表温度空间分级图,最高温度为 53.84℃,最低温度为 16.03℃,平均温度为 38.3℃,其中温度 33.19—53.85℃ 之间区域占 90%(图 3,表 1)。结合长沙市地表温度分布图和土地利用类型分布图,长沙市热岛效应的空间分布与长沙市城市格局基本相符,市中心和长沙县建筑用地地表温度较高,以湘江为代表的水体、城市周边绿地和裸地地表温度较低,其中水体的地表温度最低(16.08—31.19℃)。

2.2 长沙市 UHI 的空间分布

由图 4 可知,长沙市热岛效应严重,形成了河西住宅区、河东住宅区和长沙县三个主要热岛区域。热岛效应高强度地区主要分布在河东住宅区和长沙县,除少量绿地和水体外,上述地区大部分范围具有强热岛效应,长沙县更是出现 0.65 的极高热岛强度像元。但以湘江为代表的城市水体以及城市附近的绿地及裸地大多具有负热岛效应,表明这些区域具有降低城市温度、缓解城市热岛效应的功能;尤其是城市内部的河流,在建筑密集区可有效降温通风。

2.3 湘江水体对热岛的 LST 及 UHI 缓冲效应特征

城市内部绿地和水体附近区域温度低于周边环境的现象称为城市冷岛效应(UCI)。UCI 效应被认为是

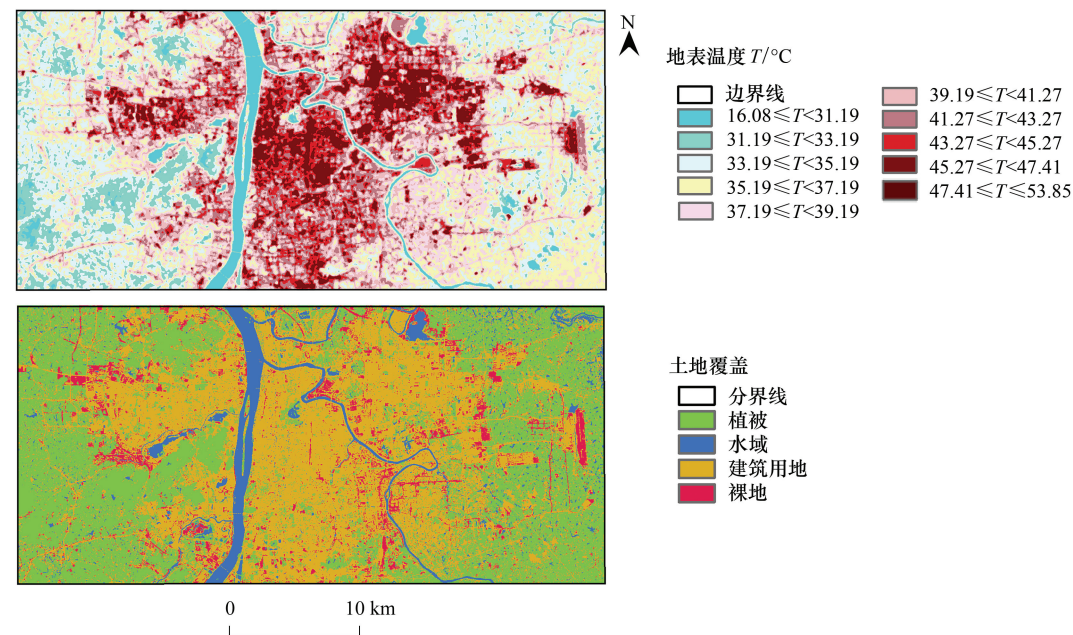


图3 长沙市 2016 年地表温度 (LST) 分级及土地覆盖特征

Fig.3 Land surface temperature (LST) classification and land cover characteristics in Changsha in 2016

LST: 地表温度 Land surface temperature

由城市绿地与水体的遮荫效应或蒸散效应造成的。由缓冲分析结果可知(图 5),湘江作为城市内河的确产生了 UCI 效应,湘江明显降低了水体周边的地表温度,通过建立精度更高的小尺度缓冲区(50 m × 17 m),最终确定湘江对最高温度的缓冲距离达到 400 m,对平均温度的缓冲距离达到 450 m。

表 1 长沙市各地表温度分级比重及其数量(像元大小:30 m×30 m)

Table 1 The percentage and number of land surface temperature classification in Changsha (cell size, 30 m×30 m)			
等级 Class	地表温度分级/℃ Land surface temperature classification	像元数 Cell number	占总像元数百分比 Percentage of the total cells/%
1	16.08—31.19	36353	3.3
2	31.20—33.19	73302	6.7
3	33.20—35.19	196340	17.8
4	35.20—37.19	210389	19.1
5	37.20—39.19	148245	13.5
6	39.20—41.27	131849	12.0
7	41.28—43.27	126164	11.5
8	43.28—45.27	97743	8.9
9	45.28—47.41	53828	4.9
10	47.42—53.85	26825	2.4
合计 All	16.08—53.85	1101038	100.0

2.4 缓冲效应在河西区和河东区的分异特征

湘江对东西两岸的平均缓冲距离为 400—450 m,因此对河西区和河东区分别建立规格为 850 m(50 m × 17 m)的缓冲区,提取缓冲区内的最高温度和平均温度,结果表明:湘江对河西区最高温度的缓冲距离为 250 m,平均温度的缓冲距离为 350 m(图 6);对河东区最高温度的缓冲距离为 450 m,平均温度的缓冲距离为 400 m(图 7)。

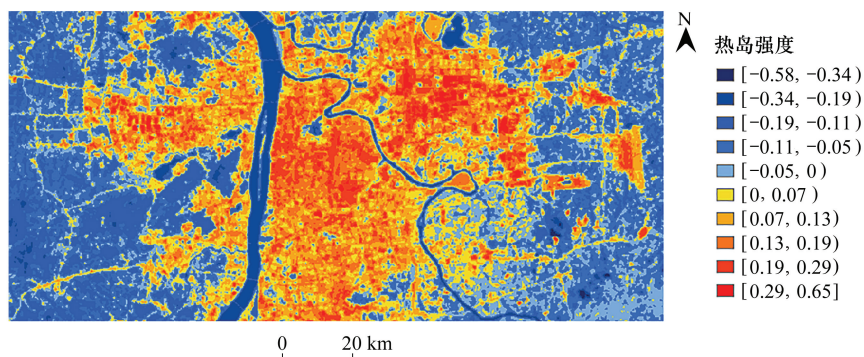


图4 长沙市2016年热岛强度分布图

Fig.4 Map of urban heat island intensity in Changsha in 2016

蓝色程度越深表示热岛强度越低红色程度越高表示热岛强度越高

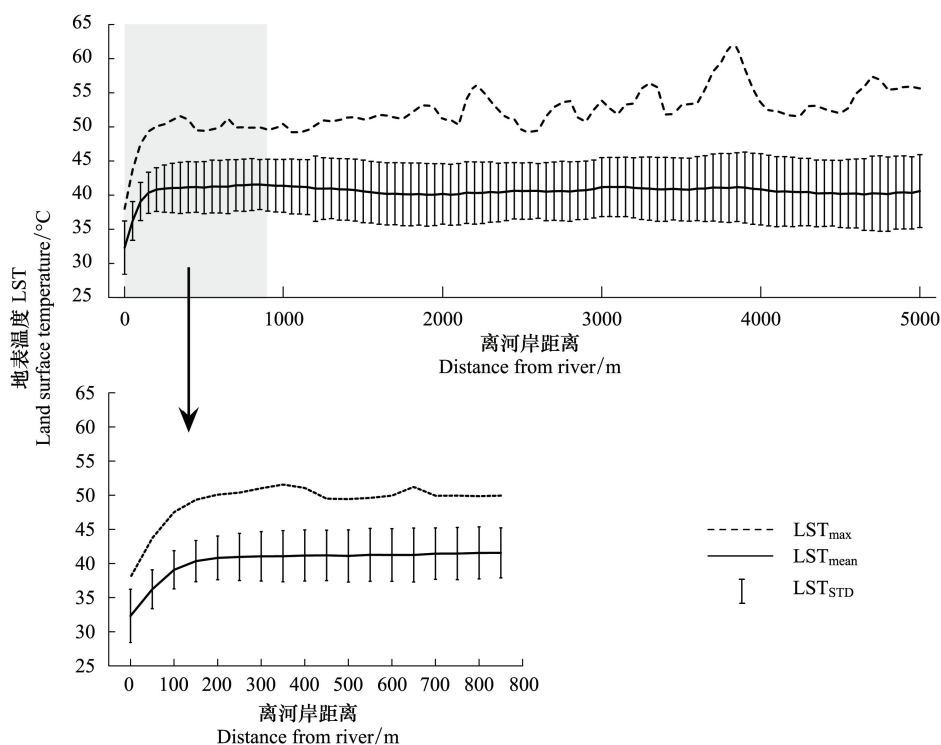


图5 湘江周边缓冲域的LST分布特征

Fig.5 LST distribution characteristics of the buffer region around Xiangjiang

$LST_{\max}$: 地表最高温度 Maximum land surface temperature; LST_{mean} : 地表平均温度 Mean land surface temperature; LST_{STD} : 地表平均温度标准差 The standard deviation of mean land surface temperature

湘江对河西区的缓冲距离较短,但随距离变大,该区域的最高温度和平均温度均呈现下降趋势。相比之下,河东区大部分面积为建设用地,但并无高热排放源,且沿江区域有大面积水体、绿地作为缓冲带(图3b),增加湘江对河东区的缓冲效应;100—200 m的区域内,由于建筑用地的影响湘江的缓冲作用降低,但随着距离增大,该区热岛效应得到缓解。在缓冲距离650 m处,平均温度和最高温度都急剧下降,随后又逐渐上升(图7)。

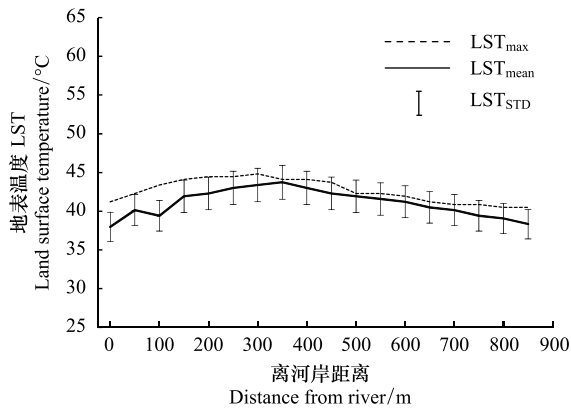


图6 湘江西岸缓冲域的 LST 分布特征

Fig.6 LST distribution characteristics of the west bank buffer area in Xiangjiang

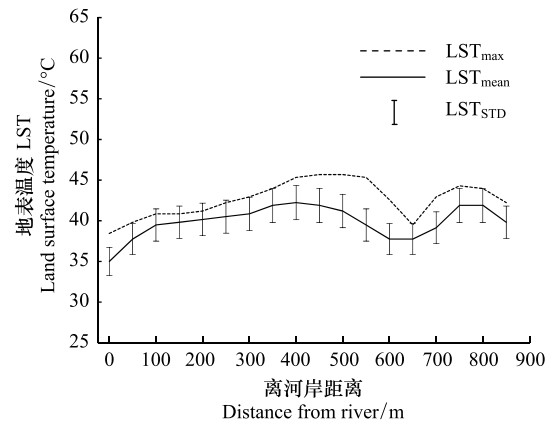


图7 湘江东岸缓冲域的 LST 分布特征

Fig.7 LST distribution characteristics of buffer zone on the eastern bank of Xiangjiang

2.5 缓冲效应在河西区和河东区不同用地区划间的分异特征

湘江对河东区缓冲效应比河西区弱;而与住宅区相比,湘江对河东和河西休闲区的缓冲效应更强(图8—图11)。

与河西住宅区相比,河西休闲区的最高温度呈显著上升趋势。湘江对河西休闲区最高温度和平均温度的缓冲距离均为 350 m(图8);在缓冲区 650 m 处,最高温度和平均温度均呈下降趋势。湘江对河西住宅区最高温度的缓冲距离为 250 m,对平均温度的缓冲距离仅为 150 m(图9)。

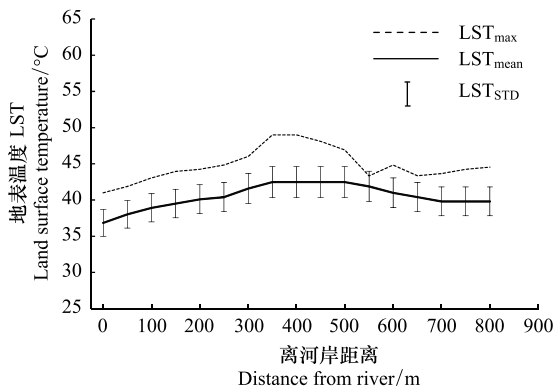


图8 河西沿江休闲区缓冲域的 LST 分布特征

Fig.8 Characteristics of LST distribution in buffer zone of west riverside recreational area along the river

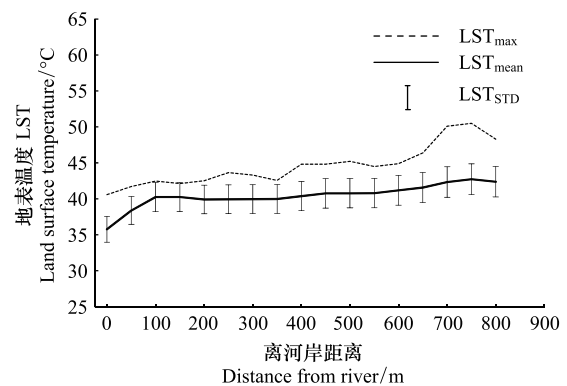


图9 河西沿江住宅区缓冲域的 LST 分布特征

Fig.9 Characteristics of LST distribution in buffer zone of west riverside residence area along the river

湘江对河东休闲区最高温度的缓冲距离为 250 m,对平均温度的缓冲距离仅为 200 m(图10);对河东住宅区最高温度和平均温度的缓冲距离均为 150 m(图11)。河东休闲区绿地面积占比在四个分区中最高,但该区地表最高温度前期上升迅速,且缓冲距离未达到平均水平。河东住宅区为长沙市中心城区,以居住用地和工业用地为主,城市热岛效应相对显著,湘江缓冲效应较小。

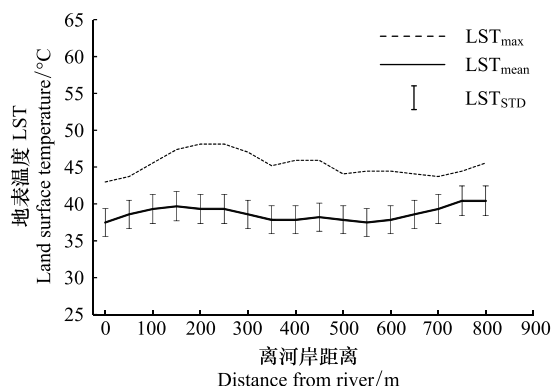


图 10 河东沿江休闲区缓冲带的 LST 分布特征

Fig.10 Characteristics of LST distribution in buffer zone of east riverside recreational area along the river

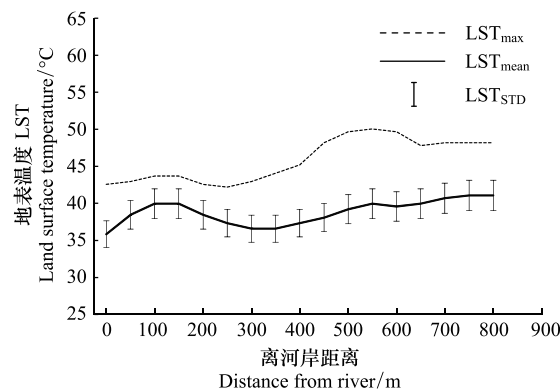


图 11 河东沿江住宅区缓冲带的 LST 分布特征

Fig.11 Characteristics of LST distribution in buffer zone of east riverside residence area along the river

3 讨论

3.1 城市 LST 及 UHI 分布特征

城市 LST 变化引起城市热岛效应, LST 是影响 UHI 效应的主要因素^[51], 地表温度越高热岛效应越强, 但城市规模和用地类型对其具有一定影响, 研究认为城市内公园、绿地、湿地显著影响城市热岛效应^[52], 城市水体可通过蒸发缓解热岛效应^[42]。目前有许多关于长沙市城市热岛效应时空分布的研究, 大部分认为长沙市的温度逐年增加且城市热岛空间分布与城市建成区的范围相吻合^[35]。例如, 研究发现长沙市城区和郊区的气温同步增高, 同时热岛强度越来越大^[38]。叶钰等^[36]发现长沙城区年平均气温从本世纪初的 17.2℃, 猛增到 2008 年的 18.1℃, 夏季极端高温近年达到 39.8—40.6℃, 城区地表温度明显高于周边郊区, 长沙市热岛空间范围逐年增加, 并且热岛的演变规律与城区范围扩大的趋势相同, 这是因为城市扩展引起下垫面的性质发生变化, 如地表反照率和热容性地表第一性物理参数^[53], 城区地表温度高于郊区与本研究结果一致, 本研究利用 2016 年数据发现市中心和长沙县建筑用地地表温度高于水体、城市周边绿地和裸地, 研究近年热岛趋势且范围更为明确。而由于小水体(如年嘉湖、跃进湖等)的存在以及较好的绿化植被, 城市中部烈士公园热岛强度较弱^[35]。对于其他城市热岛效应的研究发现, 大部分城市热岛效应增强, 如福州地表温度逐年升高^[54]; 南京市热岛效应强度和范围也在增长, 城镇居民点及工矿用地与城市热岛效应变化范围基本吻合^[7]; 武汉市的城市热岛分布规律也与城市空间格局相似, 主要是因为人口增大、建筑物增多^[55], 这与长沙市 LST 及 UHI 分布特征部分一致。研究也发现, 随着郑州市建成区的不断扩大, 城市热岛效应不断加剧, 市区高温区变化趋势与低植被覆盖区和城镇居民用地变化趋势基本相同^[56], 这与本研究中河东、河西住宅区热岛效应较强一致, 因为区域内主要为居住用地和工业用地, 植被覆盖率低。而通过对西安市热岛效应研究则发现, 热岛效应先由主城区扩张, 但之后主城区热岛效应减弱, 周围区(县)则明显增强, 这与本研究不同是因为西安市城区热岛效应受景观格局影响显著^[57]。本研究发现, 长沙市热岛强度整体表现为建筑用地最强, 以湘江为主的水体最弱, 绿地和裸地居中。大部分研究与本研究趋势一致, 大都表现为建筑用地热岛效应最强^[58]。例如, 白丽月^[59]发现福州市区不同用地类型热岛强度特征与本研究一致, 其发现热岛强度表现为水体<林草地<耕地<建设用地。有研究则发现热岛强度的差异与太阳辐射强度相关, 表现为森林热岛强度小于农田, 这是因为森林的蒸腾作用显著大于农田的蒸散^[60]。而有研究则发现土地类型的分布与地表温度分布的空间格局基本吻合, 城市用地、裸地或无植被区域的热岛强度高于其他下垫面^[15], 这与本研究结果城区内部分水体与绿地热岛效应较弱一致, 但研究未对小范围内的用地进行划分, 本研究则对湘江两岸的城市用地类型进行细

分(住宅区、休闲区)。

3.2 水体对热岛的缓冲效应特征

本研究发现湘江对长沙热岛效应具有缓冲作用,河道周边土地利用类型和缓冲范围内的自然地形等是影响缓冲距离的主要因素。有研究发现离水体距离增大,降温效果逐渐减弱^[61],这与本研究中水体对周边环境地表温度在一定距离内具有缓冲作用相同,本研究发现湘江对长沙市热岛效应的平均缓冲距离为 400 m。通过与众多研究结果对比发现(表 2),本研究区域内的平均缓冲距离与其他研究区域的结果处于同一数量级,说明本研究在水体两岸建立大范围及小尺度的缓冲区具有一定的科学性和准确性。与其他研究结果相比,湘江长沙段主干对城市热岛效应的缓冲能力更强,甚至是韩国首尔^[64]的两倍,这主要是由湘江自身的性质决定的,湘江作为湖南省境内最大河流、长江的主要支流,江面广阔,水流量大,而且湘江南北向纵贯长沙市中心城区,是优良的沟通城区与郊区的天然通风廊道。尽管南京市的研究主体是长江南京段,但是城市水体仅在 300 m 范围内可以显著消减城市热岛效应^[18],这是因为南京市的城市规模更大^[62],热岛效应的程度更高,长江对南京市热岛效应的缓冲能力被弱化,反而使得缓冲距离不如湘江。李东海等^[27]发现东莞市河流对城市热环境有一定的缓解作用,有效范围约 200 m 左右,研究发现河流宽度是影响缓冲距离的主要因素,河流越宽,缓冲作用相对越强,这与本研究不同是因为其主要探究河流宽度与缓冲距离的关系。刘勇洪等^[65]发现北京市区水体对周边最大 300 m 范围内的建筑区地表温度具有降温效应,其发现大面积的水体是缓解城市热岛效应的主要来源,说明湘江水体面积较大是缓冲距离较大的主要原因。同时王琳等^[66]研究发现绿地、水体和高大建筑及其阴影都会影响地表温度,从而影响水体温度调节作用与缓冲距离的相关性。

表 2 不同研究区缓冲分析结果的差异比较

Table 2 Comparison of buffer analysis results in different research areas

研究区域 Study area	研究时间 Research time	平均缓冲距离/m Mean buffer distance	参考文献 References
中国南京 Nanjing, China	2013 年 8 月	300	[18]
中国东莞 Dongguan, China	2005 年 10 月	200	[27]
韩国首尔 Seoul, Korea	2009 年 6 月	222.86	[61]
中国北京 Beijing, China	2006 年 6 月	300	[62]
中国桂林 Guilin, China	2010 年 8 月	240	[63]
中国长沙 Changsha, China	2016 年 9 月	400	本研究

本研究发现湘江水体对河西区的缓冲效应大于河东区,对沿江休闲区的缓冲效应大于住宅区。有研究发现热岛效应的作用强度主要与城市内水体面积和分布相关,城市湿地的形状及主导风向显著影响城市热岛效应^[34,67],这与本研究相似,主要是因为河西区水体(咸嘉湖、桃子湖、后湖)较多,且地势相对河东地区较为平坦,主导风向对其作用显著。有研究发现水体周边非建筑用地占比增加会扩大水体降温影响范围^[41,65],张元等^[68]发现绿地和水体可有效缓解城市热岛效应,而城市不透水面是造成城市热岛效应的主要影响因子,王美雅和徐涵秋^[22]也认为城市空间格局影响热岛效应,而减少城市不透水建筑的数量,增加绿化面积、保留水体可大幅度缓解城市热岛效应^[69],这与本研究中水体对河西区及休闲区缓冲距离较大一致,说明湘江对该区缓冲作用强主要是因为此区域主要为非建筑用地(绿地、水体),而住宅区主要是不透水面的建筑用地(居住用地、工业用地)。

3.3 展望

综合目前已有研究,当前城市热岛效应研究在各个方面均有大量的研究成果已见报道,普遍采用遥感技术获取城市热岛效应分布及变化趋势,但缺乏对小尺度地物温度特征的定量分析,致使现有研究结果不够精准,未来研究需加强小区域内热岛特征分析,提高数量级精度,探究地物提取的最适合起点面积。已有研究发现用地类型及城市生态格局对城市热岛具有重要影响,大部分研究小范围内的绿地或者水体对周边区域的降温作用,现代城市内部除了面积较大的自然河流,也存在一定面积的人工水体,但其对周边环境的降温作用研

究还比较缺乏。未来研究需结合水体周边建立大范围的缓冲区,同时将多个相邻水体综合探究,研究其相关性及其总体缓冲效应。现有研究未从多尺度、多空间等方面综合分析热岛缓冲作用,很多具有现实意义的科学问题尚未解决。例如,水体周边建筑高度对降温的效应有何影响;如何合理规划城市空间格局降低热岛效应、增强水体热岛缓冲作用需进一步探讨。因而,未来的研究还需综合当前成果,通过高技术手段获取精准城市地物温度及长时间系列数据,为城市区域尺度的城市格局规划提供切实可行的依据和对策。

4 结论

本研究分析长沙市 2016 年中心城区热岛强度,对湘江长沙段主干进行多尺度的缓冲分析,得出结论如下:

(1)长沙市地表温度和热岛强度的空间分布与城市建筑用地分布密切相关,长沙市中心城区热岛效应极强,周边绿地、水体、裸地等较弱。

(2)水体周边地表温度均随距离的增大而增大,在一定距离趋于稳定,湘江水体对长沙市热岛效应的缓冲距离为 400 m,缓冲效应较强。

(3)湘江对河西区的缓冲效应大于河东区,对休闲区的缓冲效应大于住宅区。说明城市水体在一定范围内对周边地区地表温度具有缓冲作用,影响缓冲距离的因素包括河道周边土地利用类型和缓冲范围内的自然地形等。

近年来,生态学研究受到了广泛的关注,与人类日常生活息息相关的城市生态学更是得到高度重视。然而,城市作为人工建造物和人类聚集地,大规模的改造重建是不现实的。因此,只有发掘城市内生态规划的合理性,同时适当对城市内部进行小规模的改造,才能在保持城市现状的前提下最大程度的缓解城市热岛效应。研究长沙市湘江水体对城市热岛的缓冲效应可为其他城市进行生态规划和改善居住地生态环境提供理论指导。

参考文献(References):

- [1] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370-384.
- [2] Bornstein R D. Observations of the urban heat island effect in New York City. *Journal of Applied Meteorology*, 1968, 7(4): 575-582.
- [3] Baker L A, Brazel A J, Selover N, Martin C, McIntyre N, Steiner F R, Nelson A, Musacchio L. Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): impacts, feedbacks and mitigation. *Urban Ecosystems*, 2002, 6(3): 183-203.
- [4] Bottyán Z, Unger J. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 2003, 75(3/4): 233-243.
- [5] Fan H L, Sailor D J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(1): 73-84.
- [6] Santamouris M. Cooling the cities-a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 2014, 103: 682-703.
- [7] 杨英宝, 苏伟忠, 江南, 甄峰. 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. *地理研究*, 2007, 26(5): 877-886.
- [8] Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, Fang J Y, Li Q X, Kaufmann R K, Tucker C J, Myneni R B. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [9] Willis K J, Petrokofsky G. The natural capital of city trees. *Science*, 2017, 356(6336): 374-376.
- [10] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147.
- [11] Gallo K P, McNab A L, Karl T R, Brown J F, Hood J J, Tarpley J D. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(5): 899-908.
- [12] 葛伟强, 周红妹, 杨引明, 丁金才. 基于遥感和 GIS 的城市绿地缓解热岛效应作用研究. *遥感技术与应用*, 2006, 21(5): 432-435.
- [13] 田平, 田光明, 王飞儿, 王宇峰. 基于 TM 影像的城市热岛效应和植被覆盖指数关系研究. *科技通报*, 2006, 22(5): 708-713.
- [14] 潘莹, 崔林林, 刘昌脉, 陈龙, 张岭峰. 基于 MODIS 数据的重庆市城市热岛效应时空分析. *生态学杂志*, 2018, 37(12): 3736-3745.
- [15] Aslan N, Koc-San D. Analysis of relationship between urban heat island effect and land use/cover type using Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI images//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague, Czech Republic: ISPRS,

- 2016; 821-828.
- [16] 丁圣彦, 曹新向. 清末以来开封市水域景观格局变化. 地理学报, 2004, 56(6): 956-963.
- [17] 岳文泽, 徐丽华. 城市典型水域景观的热环境效应. 生态学报, 2013, 33(6): 1852-1859.
- [18] 林昊, 牛继强, 马会钦, 樊勇. 城市水体对热岛的消减效应——以南京市为例. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2017, 30(2): 234-238.
- [19] 张棋斐, 文雅, 吴志峰, 陈颖彪. 高密度建成区湖泊水体的热缓释效应及其季相差异——以广州市中心城区为例. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1323-1334.
- [20] 黄荣峰, 徐涵秋. 利用 Landsat ETM+影像研究土地利用/覆盖与城市热环境的关系——以福州市为例. 遥感信息, 2005, (5): 36-39.
- [21] 苏伟忠, 杨英宝, 杨桂山. 南京市热场分布特征及其与土地利用/覆被关系研究. 地理科学, 2005, 25(6): 697-703.
- [22] 王美雅, 徐涵秋. 中国大城市的城市组成对城市热岛强度的影响研究. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1787-1798.
- [23] 苟睿坤, 赵选, 卜元坤, 高婷, 赵鹏祥. 杭州市城区热岛效应与景观格局的动态研究. 水土保持研究, 2019, 26(1): 316-322, 329-329.
- [24] Caissie D, Satish M G, El-Jabi N. Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). Hydrological Processes, 2005, 19(11): 2137-2159.
- [25] Evans E C, Mcgregor G R, Petts G E. River energy budgets with special reference to river bed processes. Hydrological Processes, 1998, 12(4): 575-595.
- [26] Webb B W, Zhang Y. Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. Hydrological Processes, 1997, 11(1): 79-101.
- [27] 李东海, 艾彬, 黎夏. 基于遥感和 GIS 的城市水体缓解热岛效应的研究——以东莞市为例. 热带地理, 2008, 28(5): 414-418.
- [28] 徐双, 李飞雪, 张卢奔, 周磊. 长沙市热力景观空间格局演变分析. 生态学报, 2015, 35(11): 3743-3754.
- [29] 王林申, 付佳, 贾琦, 范勇. 济南市地表参数变化及其热岛效应响应. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 148-152.
- [30] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型. 生态学报, 2017, 37(23): 7769-7780.
- [31] 卞子浩, 马超群, 王迪, 徐博, 艾杰. 西安地区热岛效应与景观生态格局相关性研究. 干旱气象, 2016, 34(2): 342-348.
- [32] 孟丹, 李小娟, 宫辉力, 赵文吉. 北京地区热力景观格局及典型城市景观的热环境效应. 生态学报, 2010, 30(13): 3491-3500.
- [33] 谢启姣, 陈昆仑, 金贵. 武汉城镇化与热岛效应的定量研究. 测绘科学, 2017, 42(9): 71-76, 87-87.
- [34] 徐洪, 杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2018, 54(6): 790-798.
- [35] 刘宇鹏, 杨波, 陈崇. 基于遥感的长沙市城市热岛效应时空分析. 遥感信息, 2011, (6): 73-78.
- [36] 叶钰, 秦建新, 胡顺石. 长沙市热岛效应时空特征变化研究. 地球信息科学学报, 2017, 19(4): 518-527.
- [37] 康文星, 李进, 吴耀兴, 何介南, 李硕. 长沙城市热岛的成因分析. 中国农学通报, 2012, 28(11): 295-300.
- [38] 龚志强, 何介南, 康文星, 吴耀兴, 吴立潮. 长沙市城区热岛时间分布特征分析. 中国农学通报, 2011, 27(14): 200-204.
- [39] 邹丹, 邹凯, 杨波. 基于 RS 与 GIS 的长沙市城市热岛影响因子分析. 地理空间信息, 2015, 13(1): 65-68.
- [40] 长沙市统计局. 长沙统计年鉴-2016. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [41] Gupta N, Mathew A, Khandelwal S. Analysis of cooling effect of water bodies on land surface temperature in nearby region: a case study of Ahmedabad and Chandigarh cities in India. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2019, 22(1): 81-93.
- [42] 熊斌. 长沙市城市总体规划实效性评价研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [43] 叶强, 莫正玺, 许乙青. 1979-2014 年长沙市城市功能用地扩展与驱动力研究. 地理研究, 2019, 38(5): 1063-1079.
- [44] 罗琼. 长沙市城市绿地系统空间格局演变及优化研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- [45] Smith R M. Comparing traditional methods for selecting class intervals on choropleth maps. The Professional Geographer, 1986, 38(1): 62-67.
- [46] Weng Q H. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(5): 555-566.
- [47] 孙凌峰. 杭州市市辖区城市热岛效应空间分布研究. 城市建设理论研究: 电子版, 2018, (15): 18-20.
- [48] 沈娅男, 林文鹏. 杭州湾南岸城市群热岛效应研究. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(7): 114-116.
- [49] 孙飒梅, 卢昌义. 遥感监测城市热岛强度及其作为生态监测指标的探讨. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(1): 66-70.
- [50] Du H Y, Song X J, Jiang H, Kan Z H, Wang Z B, Cai Y L. Research on the cooling island effects of water body: a case study of Shanghai, China. Ecological indicators, 2016, 67: 31-38.
- [51] Mathew A, Khandelwal S, Kaul N. Investigating spatial and seasonal variations of urban heat island effect over Jaipur city and its relationship with vegetation, urbanization and elevation parameters. Sustainable Cities and Society, 2017, 35: 157-177.
- [52] Chen A L, Yao X A, Sun R H, Chen L D. Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 13(4): 646-654.
- [53] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [54] 林荣平, 祁新华, 叶士琳. 沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制. 生态学报, 2017, 37(1): 294-304.

- [55] 余俞寒, 张文婷, 王加波, 杨森. 武汉城市群热岛效应对土地利用响应及其预测. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 158-168.
- [56] 段金龙, 宋轩, 张学雷. 基于 RS 的郑州市城市热岛效应时空演变. 应用生态学报, 2011, 22(1): 165-170.
- [57] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 奥勇, 蔡健. 西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2621-2628.
- [58] 杨敏, 杨贵军, 王艳杰, 张勇峰, 张智宏, 孙晨红. 北京城市热岛效应时空变化遥感分析. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 213-223.
- [59] 白丽月. 福州城市热岛效应与土地利用变化关系研究. 中国国土资源经济, 2017, 30(1): 39-43.
- [60] 方迎波, 占文凤, 黄帆, 高伦, 全金玲, 邹照旭. 长三角城市群表面城市热岛日内逐时变化规律. 地球科学进展, 2017, 32(2): 187-198.
- [61] Wu Z J, Zhang Y X. Water bodies' cooling effects on urban land daytime surface temperature: ecosystem service reducing heat island effect. Sustainability, 2019, 11(3): 787-787.
- [62] 南京市统计局. 南京统计年鉴-2013, 2013. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [63] 梁保平, 马艺芳, 李晖. 桂林市典型园林绿地与水体的降温效应研究. 生态环境学报, 2015, 24(2): 278-285.
- [64] Lee D, Oh K, Seo J. An analysis of Urban Cooling Island (UCI) effects by water spaces applying UCI indices. International Journal of Environmental Science and Development, 2016, 7(11): 810-815.
- [65] 刘勇洪, 轩春怡, 权维俊. 基于卫星资料的北京陆表水体的热环境效应分析. 湖泊科学, 2013, 25(1): 73-81.
- [66] 王琳, 祝亚鹏, 卫宝立, 李永华. 快速发展的中小城市地表热环境及水体温度调控作用研究——以山东省滨州市为例. 水土保持通报, 2018, 38(2): 102-109.
- [67] 张文静, 吴素良, 郝丽, 王琦, 胡琳. 西安城市热岛效应变化特征分析. 陕西气象, 2019, (1): 18-21.
- [68] 张元, 郭晋平. 太原市建成区热岛效应及其影响因子研究. 林业调查规划, 2018, 43(2): 25-30.
- [69] 乐通潮, 聂森, 潘辉, 李丽纯. 基于 Landsat8 卫星影像的地表温度反演及福州春季城市热岛效应分析. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 154-160.