

基于MSPA模型和电路理论的衡阳市主城区热环境空间网络构建

黄挺贤, 孙雨欣, 刘晓红*, 黄仕元

南华大学松霖建筑与设计艺术学院, 湖南 衡阳

收稿日期: 2024年1月17日; 录用日期: 2024年2月24日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

随着城镇化的快速推进, 城市热岛效应愈发显著, 对生态环境和居民健康造成了严重威胁。以衡阳中心地区为例, 通过运用Landsat 5/8地表温度遥感影像, 识别衡阳市中心城区热环境空间变化特征。运用形态学空间格局分析方法(MSPA)和电路理论确定了城市核心热岛景观斑块、热环境廊道和重要节点区域, 并分析其时空演变特征。研究结果表明: (1) 2011~2019年衡阳市中心城区热岛景观斑块趋于集中, 热岛区域面积显著增加。(2) 热岛核心区域面积占热岛景观面积的比例最高。热岛斑块之间连通性与聚集度进一步提高。(3) 通过电路理论识别出58条热环境廊道, 障碍点区域86处, 一级夹点区域106处。在采取规划措施时, 可以中断夹点区域之间的联系, 以减缓整个区域的热岛效应, 同时重点保护热环境网络的障碍点区域。研究结果对衡阳市主动减缓城市热岛效应, 推动城市可持续发展具有重要的实践指导意义。

关键词

城市热环境, 热岛景观斑块, 形态学空间格局分析, 电路理论

Construction of a Spatial Thermal Network in the Main Urban Area of Hengyang City Based on MSPA Model and Circuit Theory

Tingxian Huang, Yuxin Sun, Xiaohong Liu*, Shiyuan Huang

Solux College of Architecture and Design, University of South China, Hengyang Hunan

Received: Jan. 17th, 2024; accepted: Feb. 24th, 2024; published: Feb. 29th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 黄挺贤, 孙雨欣, 刘晓红, 黄仕元. 基于MSPA模型和电路理论的衡阳市主城区热环境空间网络构建[J]. 地理科学研究, 2024, 13(1): 126-139. DOI: 10.12677/gser.2024.131013

Abstract

The urban heat island effect is growing in importance due to the quickening pace of urbanization, which poses a major risk to the health of the local population and the environment. Using Landsat 5/8 surface temperature remote sensing pictures, the spatial change features of the thermal environment in the core city of Hengyang were discovered, using the central region as an example. The urban core heat island landscape patches, thermal environment corridors, and significant node regions were identified, and their spatial and temporal evolution characteristics were analyzed, using the morphological spatial pattern analysis (MSPA) approach and circuit theory. The study's findings indicate that: (1) The central urban area of Hengyang City has a tendency to have concentrated heat island landscape patches, and between 2011 and 2019, the extent of these places rose dramatically. (2) During the study period, the core heat island area comprised the largest percentage of the heat island landscape area. There was a considerable increase in the connection and aggregation amongst heat island regions. (3) Using circuit theory, 58 thermal environment corridors, 86 obstacle point locations, and 106 first-level pinch point areas were found. To reduce the heat island effect throughout the entire region, planning strategies that prioritize the protection of the thermal environment network's obstacle point locations may involve breaking the link between the pinch point areas. The study's conclusions provide Hengyang City with crucial, actionable advice on how to reduce the impact of the urban heat island and advance the city's sustainable growth.

Keywords

Urban Thermal Environment, Heat Island Landscape Patches, MSPA, Circuit Theory

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国快速城市化发展, 城市的建设、人口的集聚以及交通流量的增加, 导致城市热环境气候问题日益突出, 严重影响着城市居民的生产和生活。城市热环境问题已成为我国城镇化进程中亟待破解的重要难题[1]。《中国应对气候变化的政策与行动》指出: 要制定城市适应气候变化行动方案, 提升城市基础设施建设的气候韧性, 主动适应气候变化, 有效缓解城市热岛效应和相关气候风险。

城市热岛问题已成为学者们研究的热点。目前, 关于热岛效应的研究主要有两大类: 一种是通过气象站观测, 利用观测的气象数据分析城市的热岛效应。其优点在于能够提供多尺度的连续性数据, 有助于分析热岛变化的差异性; 由于气象站点分布的局限性, 不利于研究热岛的空间格局。另一种是通过卫星遥感影像反演地表温度, 对城市热岛进行研究, 该方法研究范围较大, 可以覆盖不同地区的气候变化情况。

随着遥感影像的进一步发展, 对研究城市热岛效应, 影响地表温度(Land Surface Temperature, LST)的因素受多种城市地表特征的影响, 近年来有学者围绕着以 LST 为指标的城市热岛效应与归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、改进归一化差异水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)、归一化建筑指数(Normalized Difference Build-up Index, NDBI)、土地利用

差异和坡度等方面进行了研究[2] [3] [4]。通过回归模型定量分析了 NDVI 和 LST 的呈较为明显的负相关,表明城市绿地空间对城市热岛效应有着较强的削弱能力[5]。利用 TM 遥感影像研究了兰州城市热岛效应的时空分布特征,并研究了 LST 和 NDVI、MNDWI 存在着明显的负相关性,与 NDBI 呈正相关性[6]。基于遥感影像的分析,LST 的变化受到 NDBI 等因素的影响[7]。此外,热岛效应受城市地表特征变化的影响,如植被或建筑区的空间范围和组成以及城市土地利用的空间安排[8]。然而,城市的热环境系统结构以及成因机制复杂,现阶段的城市热环境研究更加侧重于分析单个环境因素与地表温度的关系,对分析城市热岛斑块空间形态和结构特征以及影响因子相对较少,难以全面地揭示形成热岛的内在成因,相关研究成果难以应用于实践当中。

目前,许多研究从景观格局的角度提出缓解城市热岛效应,依据土地利用类型识别“源-汇”景观斑块,构建“源-汇”多层级廊道实现缓解热岛效应[9]。其中 MSPA 是当前学者用于对热环境空间网络格局探究的重要方法。余兆武等[10]采用 MSPA 方法构建了东莞市热岛斑块网络格局,明确了核心斑块之间连通性,并提出有针对性地降低其关联程度,达到减缓热岛效应的目的。乔治等[11]利用 MSPA 模型识别了京津冀城市群热环境空间网络并揭示了关键廊道时空演变过程,强调主动适应和减缓城市热环境变化的必要性。从上述研究表明,在探讨各种土地利用种类对区域热影响机制的研究中,分析方法主要是研究土地利用种类和地表气温的线性关系。因此,如何从空间尺度上对热环境产生的影响,是本研究解决的主要问题。

本研究以衡阳市中心城区为例,将 landsat 5/8 反演获得的地表温度 LST,采用强调结构性链接的 MSPA 方法确定热岛源地景观斑块,选取影响地表温度的因素并利用层次分析法按权重进行空间叠加,构建综合空间阻力面,利用电路理论 linkage mapper 工具提取热环境廊道,并识别网络关键区域。本研究将对中国城市的热环境网络识别提供借鉴,以期达到积极、有序的应对措施和降低城市热环境风险,并推动城市的可持续发展。

2. 研究区域与数据来源

2.1. 研究区域概况

衡阳市位于北纬 26°07'05"~27°28'24",东经 110°32'16"~113°16'32",是湖南省第二大城市。属于亚热带季风气候,夏季炎热潮湿,冬季寒冷干燥,春秋温和多雨,年平均温度 17℃,年降水量约 1300 mm。本研究以衡阳市中心城区为研究对象,具体范围包括:雁峰区、石鼓区、珠晖区和蒸湘区。中心城区面积约 105.20 km²。区域内水系丰富,湘江,蒸水,耒水三水交汇。主城区有着高密度的建设区域,人口密度大,热环境空间分布异常明显。近年来,城市高温范围呈扩大趋势,历史最高温度为 41.3℃,如图 1 所示。

2.2. 数据的来源与处理

本研究数据主要包括:(1) 2011 年 7 月 26 日、2015 年 8 月 22 日、2019 年 8 月 17 日 Landsat OLI 和 TM 数据影像,来自地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>);应用 ENVI5.6 软件对遥感图像进行辐射定标,大气校正,几何校正,裁剪等预处理后反演地表温度(LST);归一化植被指数(NDVI)、改进归一化水体指数(NDMWI)、湿度指数(WET)、归一化建筑指数(NDBI)。通过 ENVI 软件对 Landsat8/5 遥感影像进行波段处理分析后进行归一化处理。(2) 空间分辨率为 30 m 的 DEM 数字高程数据,来自地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>),通过 ArcGIS 处理并获取坡度数据。(3) 土地利用类型数据基于 Google Earth Engine 得到分辨率为 30 m 的土地利用类型图,将研究区的土地类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡居民用地和未利用土地 6 种类型。

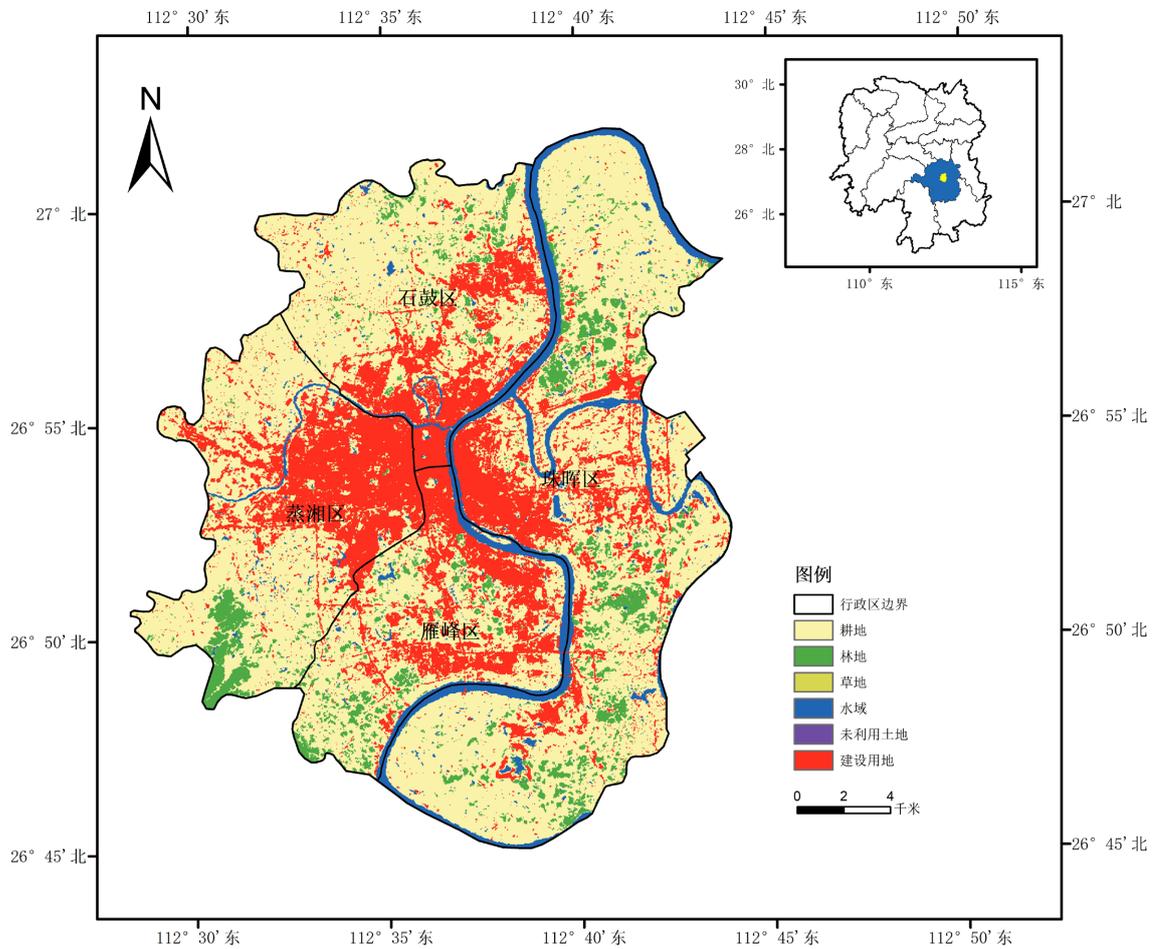


Figure 1. Spatial distribution of land cover types in the study area
图 1. 研究区土地覆被类型的空间分布

3. 研究方法

3.1. 城市热岛景观斑块的识别

(1) LST 和 RLST 的计算

基于遥感影像, 利用大气校正法反演出地表温度 LST [12], 该算法精度较高, 其计算公式如下(式(1)):

$$LST = \frac{K_2}{\ln \left[1 + \frac{K_1}{B(T_s)} \right]} \quad (1)$$

式中: $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度, K_1 、 K_2 均为常量, Landsat TM 中 $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{um} \cdot \text{sr})$, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$; Landsat TIRS 中的 $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{um} \cdot \text{sr})$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

相关研究表明, 当相对地表温差(RLST)大于 2°C 会形成热岛区[13], 因此可将 $RLST < 0^\circ\text{C}$ 分为低温区, $0^\circ\text{C} \leq RLST \leq 2^\circ\text{C}$ 为中温区, $RLST > 2^\circ\text{C}$ 为高温区。其计算公式如下(式(2)):

$$RLST = LST_i - \overline{LST} \quad (2)$$

式中, RLST 为相对地表温差; LST_i 为某年研究区像元 i 的地表温度值, \overline{LST} 为研究区的平均地表温度值。

(2) 基于 MSPA 模型的景观格局分析

本文利用 ArcGIS 软件将识别的高温区域转换为二值数据(即热岛区为前景, 其余为背景), 接着将其转化为二值数据, 采用八邻域 30 m 边缘宽度进行分析, 进一步得到互不重叠的 7 类热岛景观斑块, 包括核心、孤岛、孔隙、边缘、环道、桥接和支线[14]。其中, 热岛核心区是前景像元中面积较大的热岛景观斑块, 常被作为热环境网络中的源地。

(3) 景观连通性分析

景观连通性, 是指景观促进或限制了斑块之间相互移动的程度, 而斑块的面积大小和连通性都有利于整个系统的平衡[15]。通过提取筛选面积较大的核心区斑块进行景观连通性分析[16]。采用整体连通性指数(integral index of connectivity, IIC)、可能连通性指数(probability of connectivity, PC)和斑块重要性数 d_1 等指数进行定量评估各区域之间景观连通性[17]; 本文借助 Conefor2.6, 将源地连通距离阈值(distance threshold, DT)设置为 2000 m, 源地连通概率(correspond to probability, CP)设置为 0.5, 分别计算源地斑块的 IIC 与 PC, 均分权重以统筹区域景观中 d_{IIC} 与 d_{PC} 两项连通性指数[18], 在此基础上定量分析热岛景观斑块时空演变的规律。计算公式为: 将源地连通距离阈值(distance threshold, DT)设置为 2000 m, 源地连通概率(correspond to probability, CP)设置为 0.5, 分别计算源地斑块的 IIC 与 PC, 均分权重以统筹区域景观中与二项连通性指数, 并在此基础上定量分析了热岛景观中斑块空间演化的规律性。计算公式是:

$$d_{IIC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{A_i \times A_j}{1 + C_{ij}}}{A_L^2} \quad (3)$$

$$d_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_i \times A_j \times P_{ij}^*}{A_L^2} \quad (4)$$

$$d_1 = 0.5d_{IIC} + 0.5d_{PC} \quad (5)$$

式中, d_{IIC} 表示区域热岛景观斑块整体连通性; d_{PC} 表示区域热岛景观斑块可能连通性; d_1 表示区域热岛景观斑块重要性; A_L 为区域内热岛景观斑块的总面积; n 表示区域内热岛景观斑块的总量; A_i 、 A_j 为热岛景观斑块 i 和斑块 j 的面积; C_{ij} 表示热岛景观斑块 i 和斑块 j 之间的连接数; P_{ij}^* 为热岛景观斑块 i 和斑块 j 之间的最大连接概率。

3.2. 阻力面构建

热环境网络构建的基础是景观阻力面, 实质反映了区域内景观物质和能量流动的情况。地表温度受多种城市地表特征因素的影响[19], 本文选取地表参数中的归一化植被指数(NDVI)、改进归一化差异水体(MNDWI)、归一化建筑指数(NDBI)、湿度指数(WET)、土地覆被类型、坡度指数等 6 个影响因子作为衡量“热环境”的有效指标。其中, NDVI、MNDWI、WET 与阻力为正向关系; NDBI、坡度与阻力是负相关; 土地覆盖类型也同样影响着城市热岛效应(图 2)。利用专家打分法和层次分析法(AHP)确定评价指标权重, 分别对 NDVI、MNDWI、NDBI、WET、土地覆被类型和坡度赋值为 0.24、0.23、0.12、0.16、0.1 和 0.15 (表 1), 利用 ArcGIS 软件对其归一化处理, 最终得到综合阻力面。

Table 1. Weight of resistance factors

表 1. 阻力因子权重表

阻力因子	NDVI	WMDMI	NDBI	WET	坡度	土地覆被类型
权重	0.24	0.23	0.12	0.16	0.1	0.15

(1) 归一化植被指数(NDVI)

该指数是反映植被覆盖程度的指标，可以反映区域内植被覆盖度情况，值越大代表植被覆盖较为茂密、生长良好，其计算公式为：

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (7)$$

(2) 改进归一化差异水体指数(MNDWI)

该指数能准确地划分水域和建筑的阴影，可对城市范围内的水域精确提取[20]。其计算公式为：

$$\begin{aligned} Wet(TM) &= 0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{MIR1} - 0.6109\rho_{MIR2} \\ Wet(OLI) &= 0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{MIR1} - 0.4559\rho_{MIR2} \end{aligned}$$

(3) 湿度指数(WET)

该指数表示地面湿度的程度，也是地表温度的重要指数，其数值越大说明地表越潮湿，其计算公式为：

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR1}} \quad (8)$$

(4) 归一化建筑指数(NDBI)

该指数被广泛应用于提取城镇建筑物用地，在一般情况下，当值大于 0 时，表示城镇建筑用地。其计算公式为：

$$NDBI = \frac{\rho_{MIR} - \rho_{NIR}}{\rho_{MIR} + \rho_{NIR}} \quad (9)$$

式中： ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{MIR1} 、 ρ_{MIR2} 分别为 Landsat 8 携带的陆地成像仪和 Landsat 5 携带的专题制图仪中所采集的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短红外波 1、短红外波 2。

(5) 土地覆盖因子

不同的土地覆盖类型对于热环境廊道的连通性具有不同的阻力，孙宗耀等[21]通过热环境贡献指数分析，不同土地利用类型对研究区热环境影响有所差异。将研究区的土地类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡居民用地和未利用土地 6 个类型。根据余兆武等[22]研究，林地最高为 100，因为它具有最高的植被覆盖度和最少的人为干扰，其次是水域，为 50，其次是草地，为 25。考虑到衡阳市未利用土地和建设用地受人为干扰影响较大，绿度较低，其对应的阻力系数分别取最小值 5 和 1 (表 2)。

3.3. 基于电路理论的廊道模拟

基于城市热岛核心区斑块空间分布情况，引入电路理论，识别衡阳市中心城区热环境空间网络。将研究区看作一个导电层，根据电子在电路中的随机游动特征，将各模块间的能量传递过程等效为电流，以电流密度确定能量在各模块间转移的阻力状况，进而通过景观节点间的高电流密度识别出对区域景观连接最小成本的路径[23]。本文基于电路理论，利用 Linkage Mapper 模块中 Linkage Pathways Tool 工具提取衡阳市中心城区的热环境廊道。

“夹点”是斑块之间廊道连接的关键作用点，在维持热环境空间网络连通性方面起着重要作用。由于“夹点”是高电流密度集聚的关键点，故其一旦受到破坏，能够消除热环境网络的整体连接性，因此消除“夹点”是破坏整个热环境空间网络的重点。利用 Linkage Mapper 中的 Pinchpoint Mapper 工具，将最小成本路径和电路理论相结合，首先利用 Circuitscape 软件获取电流密度高值区域，然后基于 Pinchpoint

Mapper 筛选出对区域连通性较低的区域，进一步确定其中最小阻力运动路径和临界夹点区域，最终识别研究区热廊道中的重要夹点区域。本文采用 All-to-one (多对一模式)识别研究区“夹点”区域[24]。

“障碍点”是影响源地之间廊道连接质量的障碍区域，也是热环境空间网络识别的重点区域，能够阻碍热廊道之间的连接，是需要保护的区域。障碍点的出现受多种因素影响，结合研究区土地利用类型，针对不同问题采取不同的保护措施，尽可能降低热景观斑块之间的连通性。使用 Linkage Mapper 插件下的 Barrier Mapper 模块工具进行障碍区域的识别，采用自然段点法分为 5 级，选取一级障碍点作为确定衡阳市中心城区热环境空间网络障碍点区域。

Table 2. Land cover factor resistance values
表 2. 土地覆被因子阻力值表

土地覆被类型	林地	水域	草地	耕地	未利用土地	建设用地
因子赋值	100	50	30	25	5	1

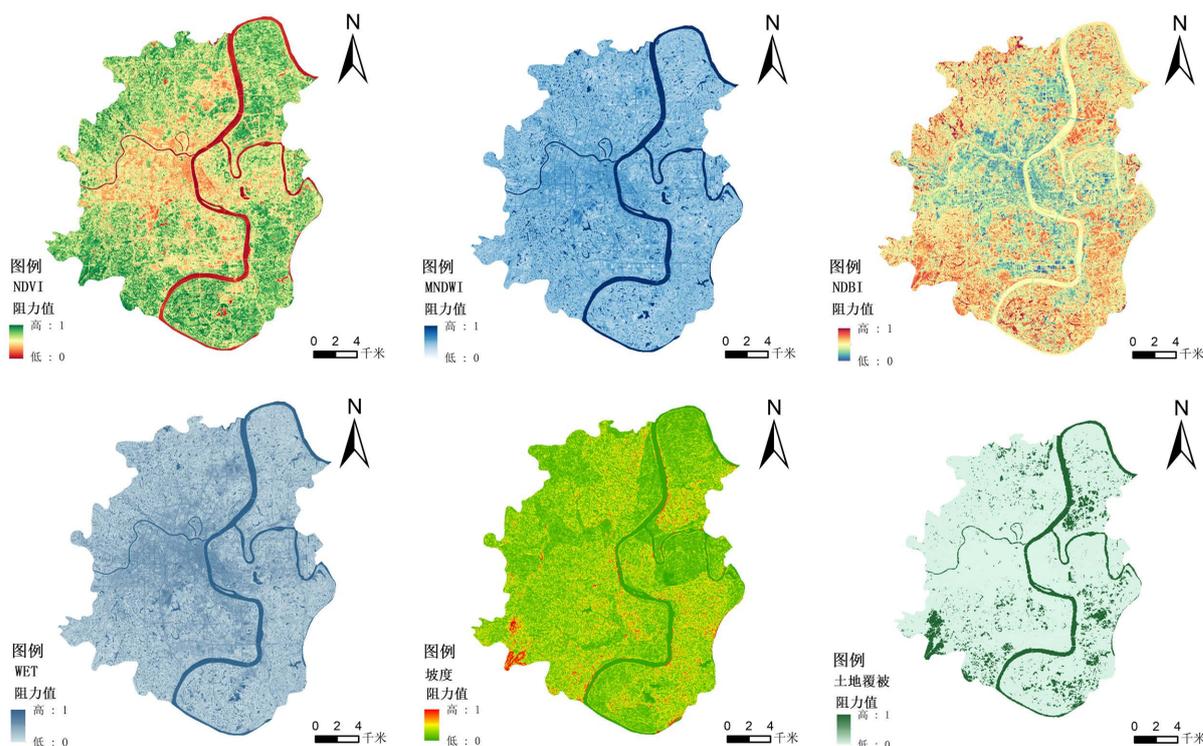


Figure 2. The method for the rapid extraction of disaster information based on target feature library
图 2. 各影响因子阻力面图

4. 结果分析

4.1. 城市热岛景观斑块时空演变特征

基于 MSPA 的衡阳市中心城区的热岛景观斑块的时空演变特征如图 3 所示。结果表明，2011~2019 年，热岛景观斑块面积在不断地增多，主要分布在城区中部，南部和西北部，面积分别为 54.96 km²、77.76 km²、106.82 km²。分别占研究区面积的 6.95%、8.24%、15.14%。其中核心区所占热岛斑块面积最大，核心区斑块分别占全部热岛景观斑块的 65.40%、55.04%、73.58%。2011 年热岛景观斑块相对较小，主

要分布在中心城区。其中 2015 年核心区斑块相较 2011 年占比减少，但热岛斑块总面积增加。核心区斑块减少占比原因是桥接区、支线、孤岛和环道明显增多，热岛斑块之间结构性及连通性增强，各热岛景观斑块趋于聚集。2019 年热岛景观斑块聚集程度加强，核心区斑块明显增多。由于受边缘效应影响，2011~2019 年，除核心区以外，城市热岛景观斑块的边缘区面积最大，为 27.78%、25.66%、18.40%。造成这一现象的主要原因在于城市边缘区一般都是以核心区为中心，所以核心区的形状对边缘区的变化也有很大的影响。说明核心区斑块具有一定的稳定性。支线面积占比第三，说明各热岛斑块之间连接性逐渐增强。孤岛、孔隙和环道占比较低，在一定程度上可以作为垫脚石，增强热岛景观斑块的连通性。

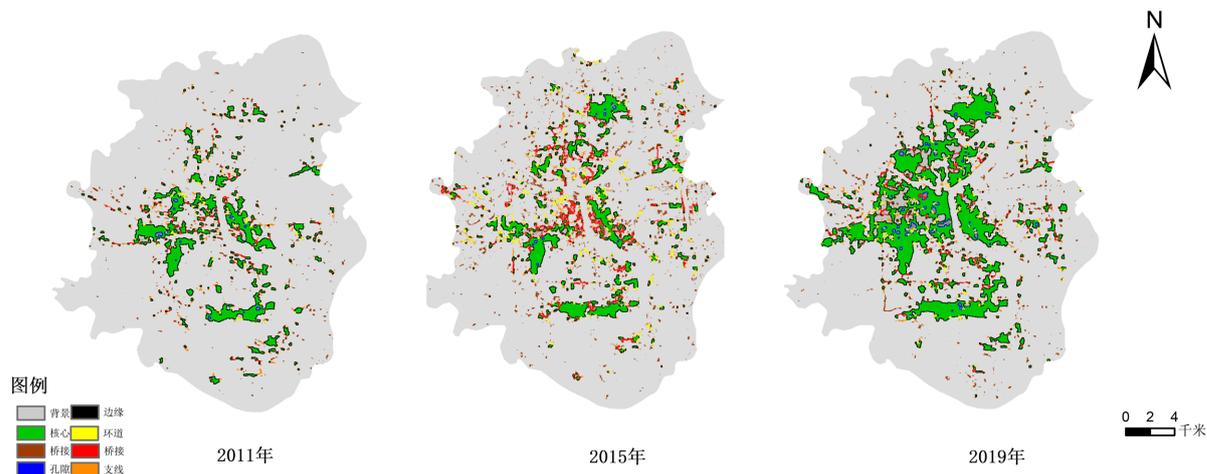


Figure 3. Results of urban heat island plaque classification distribution from 2011 to 2019

图 3. 2011 年至 2019 年城市热岛斑块分类分布结果

4.2. 景观连通性分析结果

选取 2019 年核心区热岛斑块为景观连通性评价的对象，依据斑块重要性指数 d_1 选取排名前 25 个斑块作为源地。具体数值如图 4 与表 3 显示，这些区域主要集中于城市建成区。其中，斑块 1 的 d_1 值最大为 64.75，面积为 25.36 km^2 ，位于蒸湘区蒸阳北路与解放大道的商业区以及华新汽车站周边住宅区，其斑块中间多孔洞，主要为城市内部大面积蓝绿景观所在处，如西湖公园，岳屏公园以及平湖公园等。斑块 2 次之， d_1 值为 44.59，面积为 12.76 km^2 ，位于石鼓区蔡伦大道与蒸湘北路的居住区及商业区，如碧桂园住宅区以及材料装饰市场，家具广场等。斑块 3， d_1 值 21.51，面积为 9.66 km^2 ，位于雁峰区的工业园区，如白沙洲工业园，生物制药厂以及机械制造厂等；斑块 4， d_1 值 20.01，面积为 7.72 km^2 ，位于珠晖区衡阳火车站周边的商业区及住宅区，如衡阳商业城，衡阳市第一人民医院以及衡阳市第三中学；斑块 5， d_1 值 14.59，面积为 6.31 km^2 ，位于石鼓区的工业园区，主要有生物制药以及化工公司。其余斑块面积均小于 1 km^2 且值较小，主要位于面积较大斑块之间。这些区域主要集中于住宅区、商业区及工业区，为大面积的不透水面。

Table 3. Calculation results of d_1 values for the top 25 heat island patches in Hengyang City in 2019

表 3. 衡阳市 2019 年排名前 25 个热岛斑块 d_1 值计算结果

源地编号	面积/ km^2	指数			源地编号	面积/ km^2	指数		
		d_{PC}	d_{HC}	d_1			d_{PC}	d_{HC}	d_1
1	25.367	64.702	25.872	64.751	13	0.709	1.157	0.020	1.216

续表

2	12.761	40.564	6.548	44.586	14	0.492	1.126	0.010	1.163
3	9.661	19.451	3.753	21.517	15	0.434	1.037	0.008	1.135
4	7.724	19.291	2.399	20.007	16	0.414	0.934	0.007	1.070
5	6.310	12.456	1.601	14.593	17	0.279	0.552	0.003	0.666
6	0.994	1.962	0.040	2.381	18	0.239	0.438	0.002	0.479
7	0.751	1.536	0.023	2.007	19	0.372	0.442	0.006	0.469
8	0.201	1.722	0.002	1.729	20	0.178	0.367	0.001	0.450
9	0.641	1.538	0.017	1.669	21	0.222	0.338	0.002	0.353
10	0.281	0.641	0.003	1.562	22	0.220	0.262	0.002	0.273
11	0.248	0.566	0.002	1.370	23	0.501	0.039	0.010	0.037
12	0.895	1.345	0.032	1.333	24	0.290	0.024	0.003	0.026
					25	0.873	0.031	0.031	0.025

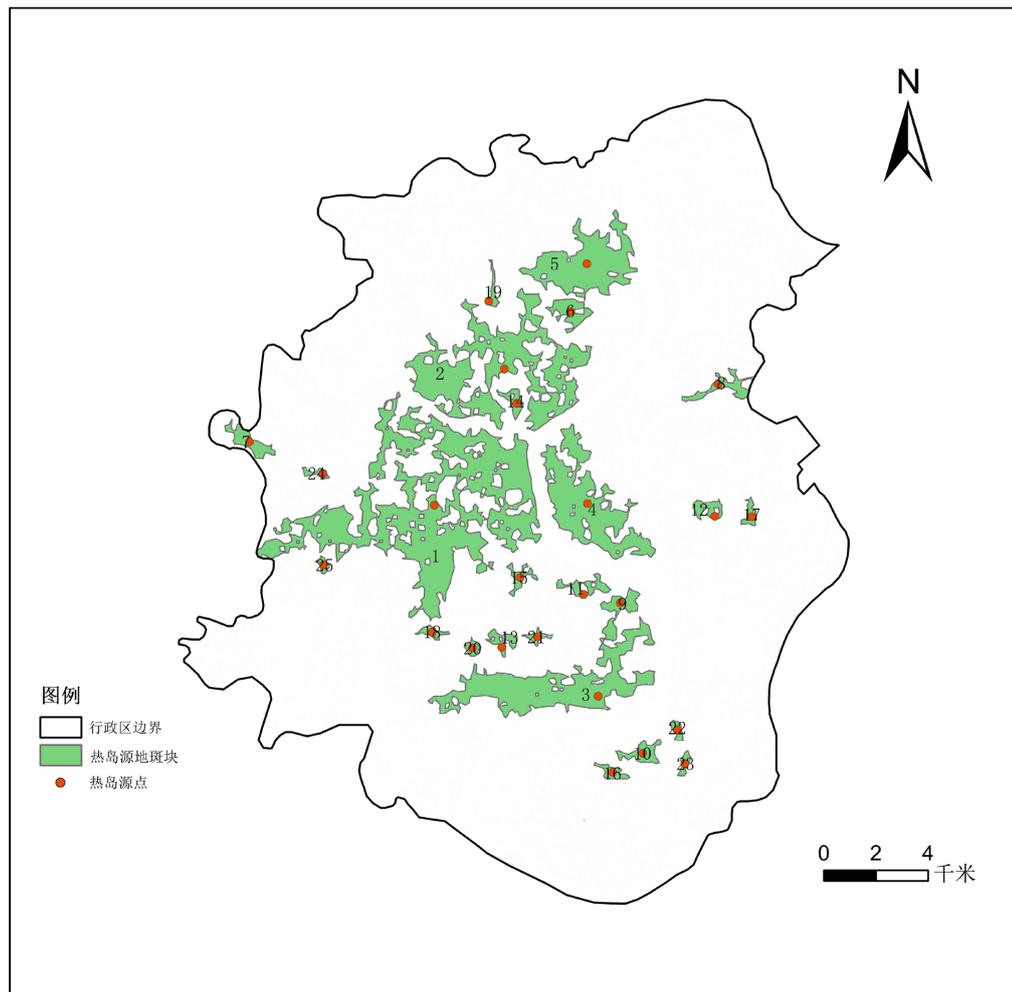


Figure 4. Thermal environmental source patches based on landscape connectivity analysis, 2019

图 4. 2019 年基于景观连通性分析的热环境源地斑块

4.3. 最终阻力面

热环境阻力面的空间格局反映了研究区内能量流动所受到的阻力大小。基于 ArcGIS 空间分析, 根据 NDVI、MNDWI、WET、NDBI、土地利用数据、坡度等因子阻力面叠加分析得到综合热景观阻力面(图 5), 结果显示, 2019 年的阻力值其空间异质性显著, 高值区分布在河流、湖泊、山体等类型; 低值区主要分布在中心城区及工业区。

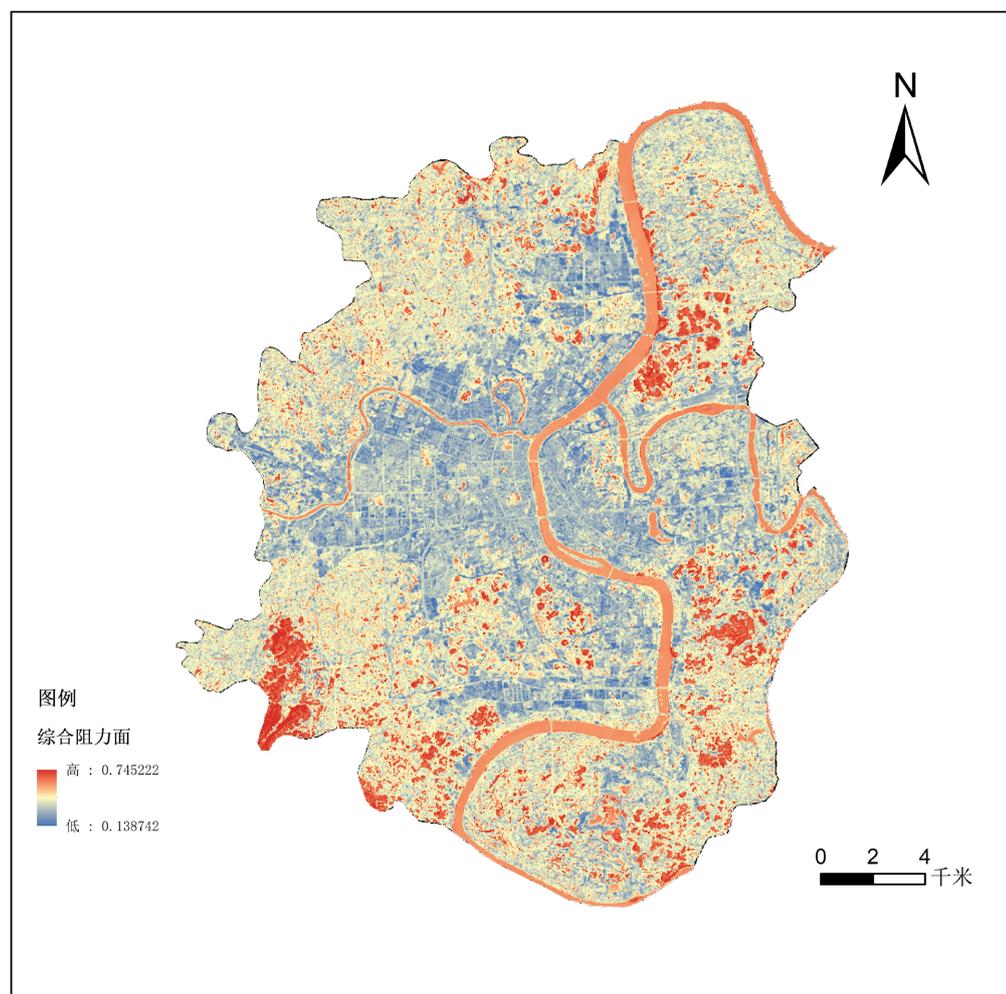


Figure 5. Schematic of the integrated resistance surface of the surface thermal environment in 2019
图 5. 2019 年地表热环境综合阻力面示意图

4.4. 城市热环境空间网络构建结果分析

基于综合总阻力面与电路理论, 使用 Linkage Mapper 插件共提取出由 58 条廊道组成的热环境空间网络, 总长度为 106.66 km, 如图 6 所示。其中, 最长廊道长度为 8.81 km, 连接线路为 17 号源地与 22 源地; 热廊道最短, 长度仅为 0.07 km, 连接线路为 5 号源地与 6 源地。廊道主要与道路、未建设用地重合度较高。就整体分布而言, 东南部的网络更加密集, 是由于此区域热岛斑块数量较多, 较小的热岛斑块能起到垫脚石的作用, 说明该区域增强了网络的连通性有利于热能量的流动。因此, 亟须采取措施减弱该区域的连通性。

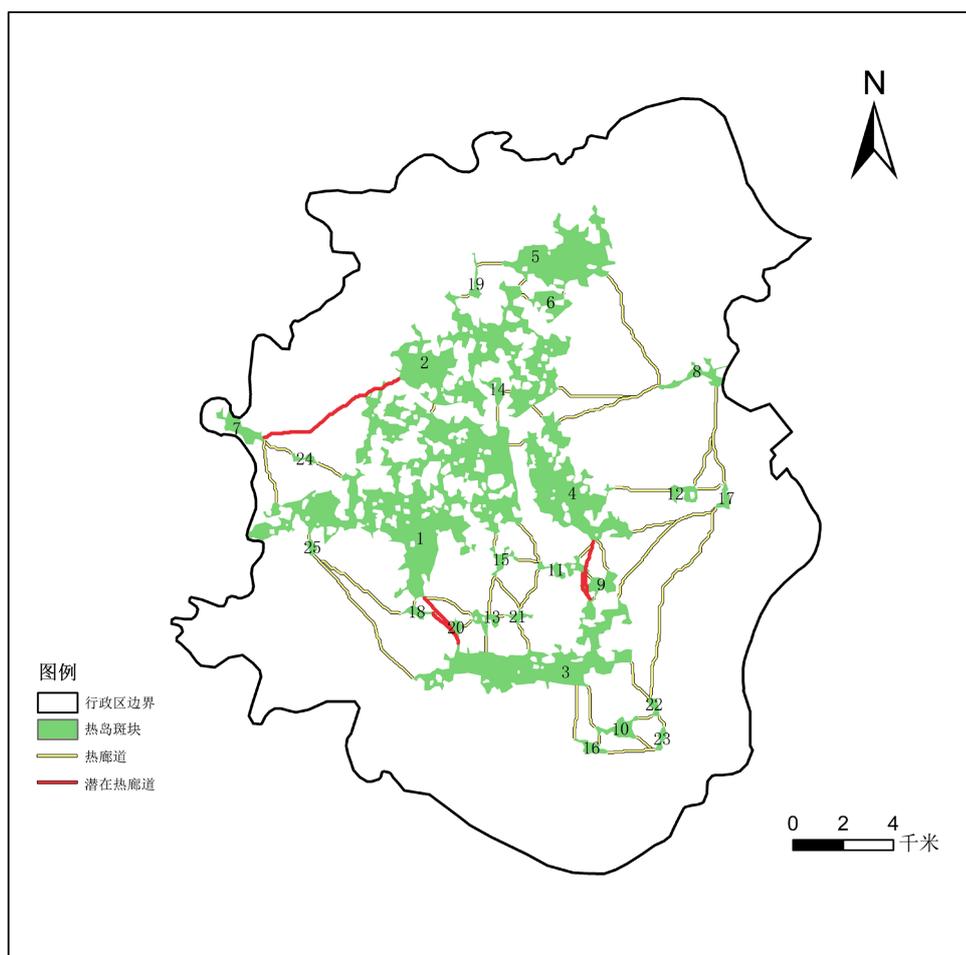


Figure 6. Spatial distribution of thermal corridors
图 6. 热廊道空间分布图

4.4.1. 关键节点区域识别结果

通过 Circuitscape 4.0 软件进行基于电路理论的多对一模式模拟, 筛选电流值前 20% 的区域作为研究范围内重要节点[25], 最终提取夹点区域 106 处(图 7), 总面积 7.25 km²。结果表明, 这类夹点区域主要集中在源地周边。其中如 1、4、5、14、20 号源地之间夹点最多, 位于研究区南部, 主要为热岛斑块较密集区域。其他源地间夹点数量较少。以夹点区域为起点向外一定范围的区域进行一些合理措施, 该区域热环境聚集效应较强, 极易产生破坏从而阻断较近之间斑块链接, 该区域尽可能采取措施进行人为干扰。识别障碍点 86 处(图 7), 面积 22.91 km²。障碍点主要分布于研究范围内东部和南部, 现状用地为河流、湖泊及林地等, 这些用地下垫面硬化程度较低, 影响了热环境基底的完整性与稳定性, 并阻碍廊道延伸与热环境能量的流动传输。这也从侧面证实了构建蓝绿景观确实可以阻断热岛区域连通性。

4.4.2. 热环境空间主动适应与减缓措施

上文所识别的廊道、关键点区域, 这清楚地表明, 在对城市规划建设的实践中, 应该重点关注这些区域。此外, 应在高风险和关键夹点区域实施有效的冷却措施, 以防止热廊道连接, 破碎热岛斑块聚集, 这可能会严重恶化整个热环境区域。在衡阳市的西北部, 由于这些地区的建筑密度和人口密度较高, 很难通过增加城市蓝绿景观(例如, 城市公园以及水域)来缓解城市热岛效应。因此, 可以采取被动缓解措施,

如城市建筑物材料的选择以及外形设计；减少广泛使用不透水的硬质地面，将其改造成绿化广场，以减轻热岛效应。在城市规划中合理布局绿地和水域空间，并使其形态更加复杂，向更广阔的区域扩展，以最大程度发挥绿地的降温效应并影响更多区域；未来的城市绿地空间应向立体空间延伸，将绿色空间从地面延伸至垂直面和空中降低大面积的硬化地面使用，避免不必要的不透水表面，立体绿化对于这类区域是很好的选择[26] [27]。比如衡阳市西南部的待开发区域，可以通过扩展道路两侧的绿化带来阻挡热流，或者建立小型公园和湿地等措施，主动采取缓解措施以达到降温的目的，减轻热岛效应。总的来说，我们应该提出热环境网络格局的构建，从网络到斑块相结合的角度，进行气候适应规划的影响，以应对气候变化的挑战。

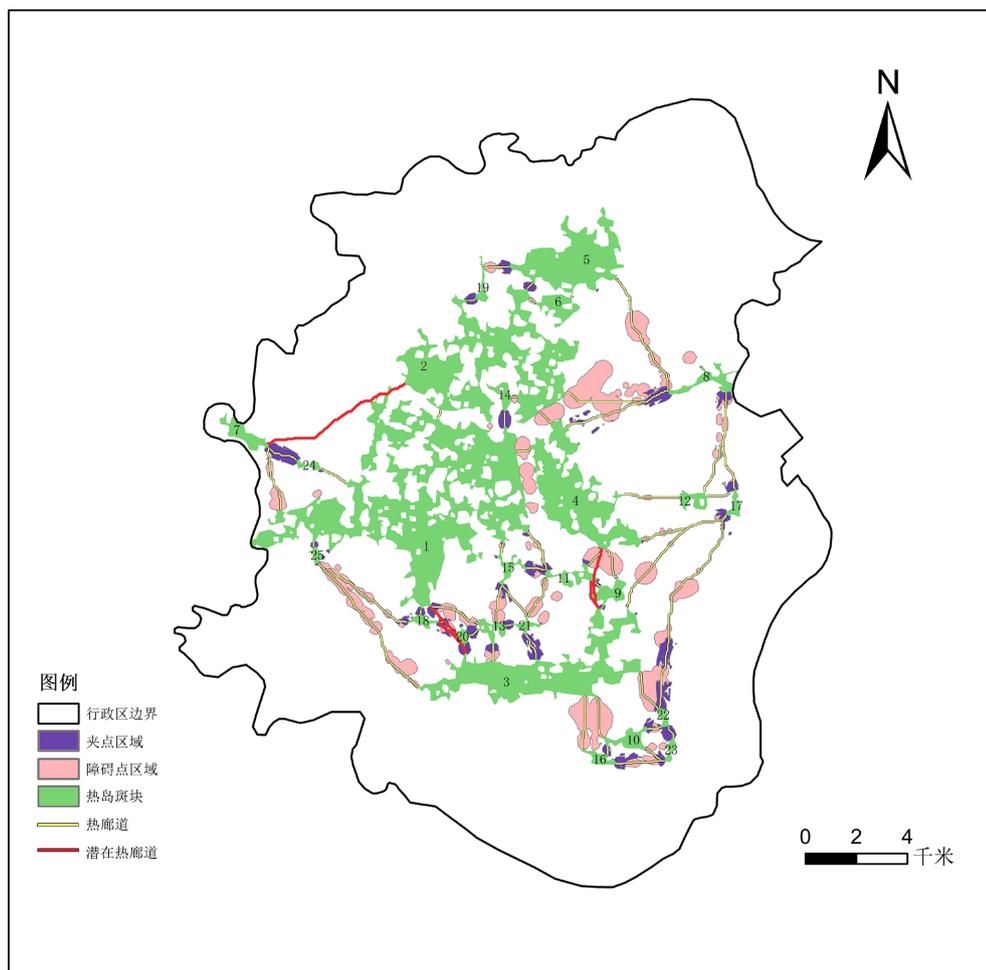


Figure 7. Spatial distribution of pinch points and obstacle points
图 7. 夹点与障碍点空间分布

5. 结论

本文基于 MSPA 模型和电路理论方法，利用地表温度、影响地表温度因子、土地覆盖类型数据和城市边界多源数据，构建了衡阳市 2011~2019 年的热环境空间网络格局。同时还确定了 2019 年热环境网络优化的重要夹点区域，探讨了夹点与障碍点区域对整体热环境空间网络的未来优化方向。得出以下结论：

(1) 2011~2019 年衡阳市中心城区热岛斑块面积明显增加，核心区斑块面积增加，在中南部呈聚集状

态, 稳定性较强。通过景观格局指数提取 25 块重要源地, 以建设用地为主, 主要分布在研究区中部和南部。

(2) 基于电路理论共提取 58 条热环境景观廊道, 并识别出夹点区域以及障碍点区域, 面积共计 30.16 km²。夹点区域需重点关注, 是阻断廊道的关键点, 通过破坏关键点, 打破热环境廊道的稳定性。

(3) 在城市建设的实践中, 通过精准识别关键区域, 为规划人员规划优先改造作为参考。避免集中的不透水区域和增加城市绿地面积是缓解城市热岛效应的有效方法。这项研究有助于更好地理解城市景观的优化和城市热岛效应的缓解。

参考文献

- [1] 梁建设, 白永平, 杨雪荻, 等. 基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3365-3374.
- [2] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [3] 李程蓉, 陈天. 缓解城市热环境的多层级“源-汇”景观网络构建[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3068-3078.
- [4] 熊鹰, 章芳. 基于多源数据的长沙市人居热环境效应及其影响因素分析[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2443-2458.
- [5] 姚侠妹, 陈媛媛, 偶春, 等. 城市绿色空间时空演变及其生态效益研究——以合肥市区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(1): 51-61.
- [6] 张建明, 王鹏龙, 马宁, 等. 河谷地形下兰州市城市热岛效应的时空演变研究[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1530-1537.
- [7] 韦海东, 赵有益, 陈英. 兰州市城市热岛效应评价与灰色预测[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 571-576.
- [8] Debbage, N., Bereitschaft, B. and Shepherd, J.M. (2017) Quantifying the Spatiotemporal Trends of Urban Sprawl among Large US Metropolitan Areas via Spatial Metrics. *Applied Spatial Analysis and Policy*, **10**, 317-345. <https://doi.org/10.1007/s12061-016-9190-6>
- [9] 马瑞明, 谢苗苗, 郟文聚. 城市热岛“源-汇”景观识别及降温效率[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3328-3337.
- [10] Yu, Z.W., Zhang, J.G., Yang, G.Y. and Schlaberg, J. (2021) Reverse Thinking: A New Method from the Graph Perspective for Evaluating and Mitigating Regional Surface Heat Islands. *Remote Sensing*, **13**, Article 1127. <https://doi.org/10.3390/rs13061127>
- [11] 乔治, 卢应爽, 贺瞳, 等. 城市热岛斑块遥感识别及空间扩张路径研究——以北京市为例[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1492-1501.
- [12] 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001(4): 456-466.
- [13] 陆晓君, 刘珍环. 城市“源-汇”热景观变化及其空间作用强度特征——以深圳西部地区为例[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6329-6338.
- [14] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 139-147.
- [15] 刘婷, 欧阳帅, 勾蒙蒙, 等. 基于 MSPA 模型的新型城市热景观连通性分析[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 615-624.
- [16] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 等. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4720-4731.
- [17] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 等. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [18] 费凡, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于二维与三维信息的南京市主城区生态网络格局对比分析[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5534-5545.
- [19] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 3987-3997.
- [20] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [21] 孙宗耀, 孙希华, 徐新良. 土地利用差异与变化对区域热环境贡献研究——以京津冀城市群为例[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1313-1322.

-
- [22] Yu, Z.W., Zhang, J.G. and Yang, G.Y. (2021) How to Build a Heat Network to Alleviate Surface Heat Island Effect? *Sustainable Cities and Society*, **74**, Article ID: 103135. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103135>
- [23] 李涛, 巩雅博, 戈健宅. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建——以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2555-2564.
- [24] 成文青, 陶宇, 吴未, 等. 基于 MSPA-连接度-空间句法的生态保护空间及优先级识别——以苏锡常地区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1789-1798.
- [25] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [26] 史宝刚, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 ENVI-met 模型的南京市新街口地区垂直绿化降温效应评价[J]. 现代城市研究, 2021(12): 125-132.
- [27] 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 等. 城市空间格局与热环境响应关系: 以合肥市区为例[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3043-3053.