北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

都市圈冷热岛空间网络构建与优化

陈少枫 翁飞帆 邱羽薇 李泓杰 丁铮

Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory

Chen Shaofeng, Weng Feifan, Qiu Yuwei, Li Hongjie, Ding Zheng

引用本文:
陈少枫, 翁飞帆, 邱羽薇, 李泓杰, 丁铮. 都市圈冷热岛空间网络构建与优化[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):152–166. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250150
Chen Shaofeng, Weng Feifan, Qiu Yuwei, Li Hongjie, Ding Zheng. Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):152–166. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250150

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250150

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

下垫面覆盖类型变化对城市热岛的影响

Effects of land surface type changes on urban heat island: a case study of Chaoyang District, Beijing

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 99–109. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190045

基于机器学习的落叶松毛虫发生面积预测模型

Studies on prediction models of *Dendrolimus superans* occurrence area based on machine learning

北京林业大学学报, 2017, 39(1): 85–93. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160205

机器学习技术在风景园林中的应用进展与展望

Application progress and prospect of machine learning technology in landscape architecture

北京林业大学学报, 2021, 43(11): 137–156. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200313

机器学习算法在森林生长收获预估中的应用

Applications of machine learning algorithms in forest growth and yield prediction

北京林业大学学报, 2019, 41(12): 23–36. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190356

檀香咖啡豹蠹蛾虫害的树干区域分类研究

Classification of sandalwood trunk area damaged by *Zeuzera coffeae* nietner in complex background

北京林业大学学报, 2018, 40(1): 74–82. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170306

基于MSPA模型的北京市延庆区城乡生态网络构建

Construction of urban and rural ecological network in Yanqing District of Beijing based on MSPA model

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 113–121. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190271

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250150

都市圈冷热岛空间网络构建与优化
——可解释机器学习与电路理论的融合

陈少枫 翁飞帆 邱羽薇 李泓杰 丁 铮
（福建农林大学风景园林与艺术学院，福建 福州 350100）

摘要:【目的】随着城市化进程的加速，城市热岛效应的跨区域传导问题愈发凸显，成为亟待解决的环境问题。然而，传统阻力面构建方法在研究城市热岛效应时，存在主观性较强以及难以充分考虑空间异质性等问题，限制了对城市群间热环境关联机制的深入理解。因此，本研究以厦漳泉大都市圈为研究对象构建冷热岛空间网络，旨在揭示城市群间的热环境关联机制，并提出多尺度协同优化策略，为城市热环境的优化提供科学依据，助力区域气候适应性规划的推进，有效应对城市热岛效应带来的挑战。**【方法】**为实现上述目标，本研究创新性地整合 XGBoost-GeoSHapley 可解释机器学习模型与电路理论。通过 XGBoost-GeoSHapley 加性解释分析方法，结合地表温度分级结果，精准构建冷热岛阻力面，并深入量化阻力因子的空间效应、非线性关系以及交互作用。在此基础上，借助电路理论，精准识别冷热岛网络，进而识别关键的夹点、障碍点和中心性区域。最终，结合区域特征，提出针对性的优化策略，为厦漳泉大都市圈的热环境优化提供具体指导。**【结果】**冷岛网络呈现出“西北山地主导，沿海湿地补充”的格局，而热岛网络则主要集中在东部建成区。本研究共识别出 43 条热岛廊道（总长度 412.99 km）和 85 条冷岛廊道（总长度 1 693.08 km），并划定了热岛优先整改区 1 067.25 km^2（占比 4.4%）以及冷岛保护核心区 7 980.71 km^2（占比 32.9%）。与传统方法相比，本研究构建的冷热岛网络结构更为合理，连通性及整体性显著提升，其中冷岛的闭合值 α、线点比 β 和连通率 γ 等指标均优于热岛对应指标，表明冷岛网络的连通性和整体性更优，这为城市热环境的优化提供了有力支持。**【结论】**本研究将 XGBoost-GeoSHapley 模型与电路理论相结合，提出了一种适用于城市圈尺度的冷热岛空间网络构建方法。该方法有效解决了传统阻力面构建方法中存在的主观赋权与空间异质性问题。通过提高冷热岛廊道识别与调控精度，本研究构建了厦漳泉都市圈“一带三轴三核多片”的冷热岛交互格局，并提出了“纵向阻断 + 横向疏导”的治理框架。这一成果不仅为超大城市圈冷热岛网络的构建提供了重要的理论与实践参考，也为区域气候适应性规划提供了有力支持。

关键词：机器学习；电路理论；极端天气；热岛效应；热环境；阻力面；冷热岛网络；空间效应
中图分类号：F205；TP79 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)07−0152−15
引文格式：陈少枫，翁飞帆，邱羽薇，等. 都市圈冷热岛空间网络构建与优化——可解释机器学习与电路理论的融合［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：152−166. Chen Shaofeng, Weng Feifan, Qiu Yuwei, et al. Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 152−166.

Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory

Chen Shaofeng Weng Feifan Qiu Yuwei Li Hongjie Ding Zheng
(College of Landscape Architecture and the Arts, Fujian Agriculure and Forestry University, Fuzhou 350100, Fujian, China)

Abstract: [**Objective**] With the acceleration of urbanization, the inter-regional transmission of urban heat island (UHI) effect has become increasingly prominent, posing an urgent environmental challenge.

收稿日期: 2025−04−27 **修回日期:** 2025−05−28
基金项目: 中国农林高校设计艺术联盟专项（111900050）。
第一作者: 陈少枫。主要研究方向：人居环境。Email: 23302692@qq.com 地址：350100 福建省福州市闽侯县上街镇福建农林大学风景园林与艺术学院。
责任作者: 丁铮，教授、博士生导师。主要研究方向：景观规划设计。Email: 604141713@qq.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

Traditional methods for constructing resistance surfaces in UHI studies are limited by their subjectivity and inability to fully account for spatial heterogeneity, restricting a deep understanding of thermal environment linkage mechanisms among urban agglomerations. This study focused on the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area to construct a cold and heat island spatial network, aiming to reveal the thermal environment linkage mechanisms between urban clusters, and propose multi-scale collaborative optimization strategies. These strategies provide a scientific basis for optimizing urban thermal environments, and support regional climate adaptation planning to effectively address the challenges posed by UHI effect. [**Method**] To achieve the above objectives, this study innovatively integrated the XGBoost-GeoSHapley interpretable machine learning model with circuit theory. By employing the XGBoost-GeoSHapley additive explanation analysis method, combined with land surface temperature classification results, we accurately constructed resistance surfaces for cold and heat islands, and quantified the spatial effects, non-linear relationships, and interactions of resistance factors. Building on this foundation and using circuit theory, we precisely identified the cold and heat island networks, detecting key pinch points, obstacle points, and centrality areas. Finally, we proposed targeted optimization strategies informed by regional characteristics, offering specific guidance for optimizing the thermal environment in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area. [**Result**] The cold island network exhibits a pattern dominated by northwestern mountainous areas, supplemented by coastal wetlands, while the heat island network is primarily concentrated in the eastern urban areas. A total of 43 heat island corridors (total length of 412.99 km) and 85 cold island corridors (total length of 1 693.08 km) were identified, along with a heat island priority rectification area of 1 067.25 km^2 (4.4%) and a cold island protection core area of 7 980.71 km^2 (32.9%). Compared with traditional methods, the cold and heat island network structure constructed in this study was more rational, with significantly improved connectivity and integrity. Key indicators for cold islands, such as the closure value α, line-to-point ratio β, and connectivity rate γ, outperformed their heat island indicators, indicating superior connectivity and integrity for the cold island network. This provides strong support for optimizing urban thermal environments. [**Conclusion**] By integrating the XGBoost-GeoSHapley model with circuit theory, this study proposes a method for constructing cold and heat island spatial networks at the urban agglomeration scale, effectively overcoming the issues of subjective assignment and spatial heterogeneity in traditional resistance surface construction methods. Through enhanced precision in identifying and regulating cold and heat island corridors, we have established the "one belt, three axes, three cores, and many pieces" interaction pattern of cold and heat islands in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area. We also propose a governance framework of "vertical blocking + horizontal channeling", offering significant theoretical and practical references for constructing cold and heat island networks in megacity agglomerations, and providing substantial support for regional climate adaptation planning.

Key words: machine learning; circuit theory; extreme weather; heat island effect; thermal environment; resistance surfaces; cold and heat island networks; spatial effects

随着全球气候变化的持续加剧，其复杂的趋势及影响引发了地表热量异常积聚，严重威胁人类健康与生活舒适度[1]。城市建设与人类活动产生大量热量在城区空间中聚集，进一步加剧了热岛效应的形成[2]。这一现象可能引发一系列自然灾害和健康问题，导致生态系统失衡、城市水资源的短缺以及公共健康风险上升。截至 2022 年夏季，中国及多个北半球国家相继出现超过 40 ℃ 的极端高温，众多城市最高气温已突破历史极值，极端高温已成为全球关注的重大生态问题。鉴于城市可持续发展的紧迫性，学界已广泛展开相关的研究，聚焦城市热岛效应的影响及其潜在的缓解策略[3]。城市热量的传导与扩散受多种自然与人为因素影响，如自然通风、交通活动与风力资源等，这些因素的作用范围往往超越传统城市边界，呈现出显著的区域联动特征[4]。因此，研究城乡空间乃至城市群之间的热环境关联机制已成为当前广泛关注的重要议题，这不仅为多尺度调控的热环境体系构建提供了理论支撑，而且对推进区域气候适应性规划具有重要实践意义。

近年来，生态网络构建为生态系统的保护与管

理提供了一个全面且系统的框架[5]。生态网络的概念最初源于城市绿地的规划，主要通过生态廊道与连接节点的结合，实现生物多样性保护与景观格局优化的双重目标[6]。当前，国内外对生态网络结构的总体框架定义为“生态源区−生态阻力面−生态廊道−生态节点”[7]。这一框架的提出丰富了生态系统理论，为实现人与自然的和谐发展奠定了理论基础[8]。目前，城市热岛网络研究借鉴生态网络的相关研究背景，结合景观生态学的原理，对城市热环境进行了深入探讨。相关研究将地表热环境视为热景观，构建城市热环境空间网络，评估冷热岛网络在缓解城市热效应方面的作用[9]。在此过程中，形态学空间格局分析（morphological spatial pattern analysis, MSPA）与电路理论的协同应用，进一步推动了生态源地的识别与廊道的优化。MSPA 通过数学形态学运算，可精准识别景观结构中的核心区、边缘和桥梁等要素[10]。其核心优势在于，能依据形态特征客观判定生态功能完整且连续性强的栖息地斑块，有效弥补传统阈值方法在应对斑块破碎化时的敏感度不足问题[11]。此外，电路理论通过模拟生物随机扩散的“电子流”过程，不仅能够构建最小成本路径，还能定量评估廊道利用概率及景观连通性中的薄弱节点[12]，与图论方法相比，电路理论更准确地反映了生物迁徙的实际空间过程。两者结合，形成了以 MSPA 筛选生态源地，并通过电路理论生成生态网络的标准范式[9]。值得注意的是，在城市景观体系中，空间斑块的冷热属性分异现象尤为显著，每个景观单元均可归类为热源或冷源。而由冷热岛空间构成的廊道网络，在缓解城市热岛效应、优化区域热环境格局方面起着关键作用[13]。目前，冷热岛廊道的构建主要由“冷热源−冷热阻面−冷热廊−冷热节点”组成网络模型，该模型旨在解释城市区域内热量的流动与传递[14]。研究通常采用遥感生态指标[15]、人类活动[16]和土地利用类型[9]作为电阻表面因子。然而，现有方法论的局限性依然存在：在阻力面权重赋值环节，多数研究采用主观赋权方法，如层次分析法等，部分研究甚至直接套用既有成果中的权重系数。这种处理方式不仅忽视了阻力效应的空间异质性，还使所构建的阻力面模型在地理适应性和科学客观性方面面临双重挑战[8]。

随着深度学习与神经网络技术的迅猛发展，地表温度的非线性关系愈发受到研究者关注。地表温度研究中应用了多种机器学习方法，如随机森林[17]、回归树[18]和 XGBoost[19]等。其中，XGBoost 由于其高效性、性能优越以及良好的回归结果，得到了广泛应用[20]。尽管机器学习与人工智能存在“黑箱”模型的理论困境，但可解释人工智能的最新进展，提升了其可解释性。特别是 SHAP（shapley additive explanations）提供的局部解释方法，为研究复杂地理现象与过程的建模、解释和可视化提供了更大的灵活性[21]。目前，研究热环境影响因素的方法各异，包括地理探测器[22]、地理加权回归[23]和线性回归[24]等。有学者对比了 XGBoost-GeoSHapley 加性解释分析、空间滞后模型（SLM）以及多尺度地理加权回归（MGWR），发现 GeoSHapley 局部解释的机器学习模型可作为空间统计模型的有效替代方案，尤其在非线性关系与交互作用等复杂空间及非空间效应共存且未知的情境下，表现更为出色[25]。

综上所述，本研究将考虑影响地表温度的阻力因子，并将 GeoSHapley 的平均贡献纳入阻力面的构建中。拟通过机器学习模型构建热环境空间网络的阻力面，以更深入、准确地理解热环境阻力面的空间分布特征，进一步完善城市热环境网络时空演化的研究框架。具体来说，本研究的主要目标包括：结合电路理论与机器学习方法，构建多尺度协同的热环境调控体系；利用 XGBoost-GeoSHapley 加性解释分析方法，建立冷热岛阻力面，并探讨阻力面因子之间的潜在空间效应、非线性关系和交互作用；通过精准识别冷、热岛网络，增强城市应对热岛效应的缓解效能。研究结果将为城市规划、环境保护及公共卫生政策的制定提供坚实的科学支撑，助力有效应对城市热岛效应带来的挑战。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

厦漳泉都市圈是我国典型的海湾城市群之一，地处东经 116°53′21″～119°01′38″，北纬 23°33′20″～25°56′45″，覆盖厦门、漳州和泉州三市。该都市圈山地和丘陵面积占比超 80%，开发与建设空间受限，因而具有典型的城市热环境特征。作为海峡西岸经济区及 21 世纪海上丝绸之路的核心区域，该城市群面临日益严重的热岛效应。在城市扩张与人口集聚的推动下，该地区的城市热岛强度由 1996 年的 1.41 ℃显著上升至 2017 年的 6.08 ℃[26]。厦门、漳州、泉州三市地理空间联系紧密，但因行政边界划分，生态治理存在碎片化问题。漳州工业区的热排放对厦门产生跨区域热岛效应[27]，凸显协同治理的紧迫性，为探索多尺度空间协同规划机制提供了重要研究基础。

1.2 数据来源与预处理

本研究使用的数据包括：①行政区划数据，采用国家地球系统科学数据中心发布的厦门市、漳州市和泉州市的 1∶25 万县级行政区划数据集；②土地利

用数据（land use and land cover change，LUCC），选用武汉大学杨杰和黄昕教授团队发布的 2023 年中国 30 m 分辨率逐年土地覆盖数据[28]，该数据将土地划分为耕地、林地、灌木、草地、水域、海洋、裸地、建设用地和湿地这 9 类；③遥感影像数据，采用 2023 年 6 月 16 日和 17 日拍摄的夏季 Landsat 8 TM 数据，对于缺失部分，选取临近日期（2023 年 6 月 21 日和 2023 年 7 月 7 日）进行补充；Landsat 5 L2SP 和 Landsat 9 L2SP 数据。研究区在遥感影像中呈现无云状态，表面温度采用比例因子转换为开尔文，随后再转换为摄氏度。使用波段计算工具获取研究区域的归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）和归一化建筑物指数（normalized difference built-up index，NDBI）；④数字高程数据（digital elevation model，DEM）来自地理空间数据云，其中坡度（slope）数据基于 DEM 数据计算获得，道路距离（road distance，RD）通过欧氏距离进行计算。所有数据均经 ArcGIS 预处理，统一投影至 WGS_1984_UTM_Zone_46N。

2　研究方法

2.1　冷热岛阻力面模型的构建

本研究提出了一种构建冷热岛阻力面的综合方法。该方法包含 3 个核心步骤：首先，结合 XGBoost 机器学习框架和 GeoSHapley 加性解释算法，解释各阻力因子对地表温度的平均贡献度，并通过特征重要性排序确定阻力因子的综合权重；其次，采用阻力因子的边际效应分析方法，明确各阻力因子分级标准，有效突破传统主观赋值方法的瓶颈；最后，基于电路理论搭建城市冷热岛生态网络，提出基于网络拓扑优化的冷岛廊道修复策略与热岛效应缓释方案。该方法创新地使用 GeoSHapley 局部可解释模型替代传统空间统计模型，在处理非线性关系、空间效应和交互作用方面展现出更强的适应性，显著提高了复杂地表过程模拟的准确性。它深度融合机器学习与空间分析，为城市热环境治理构建精准、具解释性且具备空间决策能力的技术框架（图 1）。

2.2　冷、热岛源地识别

2.2.1　地表温度反演与提取

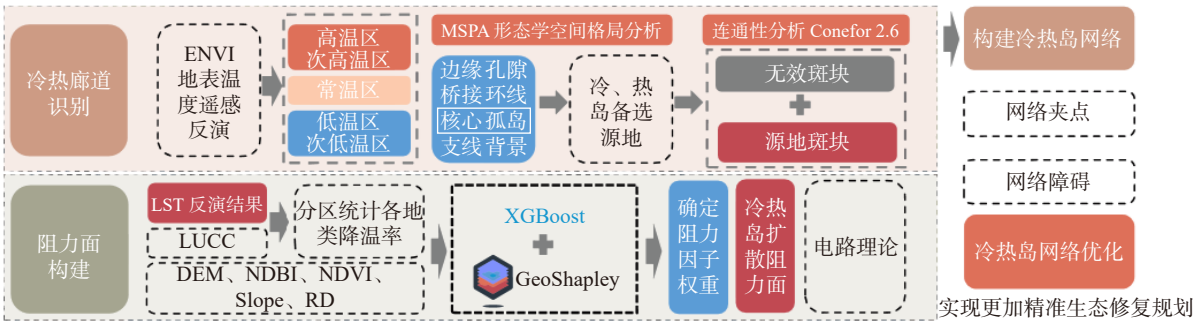
本研究采用厦漳泉大都市圈夏季高温时段的 Landsat 8 TIRS 影像，通过 ENVI 依次执行几何校正、辐射定标和大气校正等预处理流程，构建高精度的 LST 反演模型。采用均值−标准差方法对连续的地表温度数据进行分级（表 1，图 2）。该分级方法通过表征温度场的空间异质性，可以有效揭示热岛强度的分布规律[29]。

$$T_{\mathrm{N}}=\frac{T_i-T_{\min}}{T_{\max}-T_{\min}} \tag{1}$$

式中：T_{N} 为标准化地表温度，T_i 为第 i 个像素的实际地表温度，$T_{\min}$ 为研究区地表温度中的最低值，$T_{\max}$ 为研究区地表温度中的最高值。

2.2.2　MSPA 空间格局分析与景观连通性评估

本研究基于地表温度的分级结果，将高温区与次高温区、低温区与次低温区分别整合为热岛源地和冷岛源地，并将其作为 MSPA 分析的前景选项，利用 Guidos Toolbox 3.1 软件提取核心区和孤岛，作为冷热岛源地的备选斑块。景观连通性是衡量景观对生态流动促进或阻碍程度的重要指标[30]。通过抑制热源连通性和增强冷源连通性，可有效缓解城市热岛效应[31]。本研究采用 Conefor 2.6 软件对冷热岛区域斑块进行景观连通性评价。参考文献 [9] 的既有研究方法，设定连通概率为 0.5，并对 500、1 000、2 000、3 000 m 这 4 种距离阈值进行测试，通过分析不同阈值下单个斑块的可能连通性的斑块重要性指数（delta probability of connectivity，dPC）的变化规律，最终确定热岛区域和冷岛区域的最优连通距离均为 1 000 m。本研究综合运用整体连通性指数（integral index of connectivity，IIC）、可能连通性指数



LUCC. 土地利用数据；DEM. 数字高程数据；NDBI. 归一化建筑物指数；NDVI. 归一化植被指数；Slope. 坡度；RD. 道路距离

图 1　冷热岛网络构建的技术路线

Fig. 1　Technical route for construction of cold and heat island networks

表 1 地表温度等级划分

Tab. 1 Classification of surface temperature levels

等级	划分标准
高温区	$T_N > (T_a + 2S_{td})$
次高温区	$(T_a + 0.5S_{td}) < T_N \leqslant (T_a + 2S_{td})$
常温区	$(T_a - 0.5S_{td}) \leqslant T_N \leqslant (T_a + 0.5S_{td})$
次低温区	$(T_a - 2S_{td}) \leqslant T_N < (T_a - 0.5S_{td})$
低温区	$T_N < (T_a - 2S_{td})$

注：T_N 为标准化地表温度；T_a为平均标准化地表温度；S_{td}为标准差。

(probability of connectivity, PC)以及斑块重要性指数(delta index, dI)构建热景观连通性评价体系，以精准识别冷岛与热岛的核心源地。其计算公式为[9]

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_i a_j}{1+l_{ij}}}{A_L^2} \tag{2}$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}P_{ij}^{*}a_i a_j}{A_L^2} \tag{3}$$

$$dI = \frac{I - I_r}{I} \times 100\% \tag{4}$$

式中：n 为景观中斑块总数；a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和斑块 j 的面积(km^2)；l_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 之间的连接数；A_L 为景观总面积(km^2)；P_{ij}^{*}为斑块 i 与斑块 j 之间所有路径的最大乘积概率；I 为某一景观的连接度指数值，本文指可能连通性指数 PC；I_r 为剔除该斑块后景观的连接度指数值。

2.3 基于电路理论与 GeoSHapley 加性解释下的冷、热岛网络构建

2.3.1 GeoSHapley 加性解释下地表热量扩散阻力面权重分析

城市热环境空间网络的构建精度受电阻面的影响显著，而电阻面的构建过程必须充分考虑各种因素与地表温度之间的相关性。首先，本研究对各项阻力因子进行正态分布检验。结果显示，这些阻力因子均不符合正态分布特征。因此，研究采用 Spearman 相关性分析方法，通过输出相关系数表征两个变量之间的关系(ρ)，以反映其关联程度[32]。

$$\rho = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R(x_i)-\overline{R(x)})\cdot(R(y_i)-\overline{R(y)})}{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R(x_i)-\overline{R(x)})^2\right)\cdot\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R(y_i)-\overline{R(y)})^2\right)}} \tag{5}$$

式中：R 是相关系数，范围为 [−1, 1]；$R(x)$和$R(y)$分别是 x 和 y 的位次；$\overline{R(x)}$和$\overline{R(y)}$分别表示平均位次。

地表温度与各类阻力因子之间的 Spearman 相关性分析结果(图 3)表明：NDVI、RD、DEM 和 Slope 与地表温度之间呈显著负相关关系；而 LUCC 和 NDBI 与地表温度呈显著正相关。Spearman 相关性检验结果显示，这些阻力因子的 p 值均小于 0.001，表明相关关系具有显著的统计学差异。因此，本研究选取了这些与地表温度相关的阻力因子构建阻力面。然而，构建电阻表面涉及多种因素的相互作用，仅靠双因素相关性分析难以全面捕捉各因素之间的复杂关系。

因此，本研究提出了一种系统化的综合方法，用于构建冷热岛阻力面，利用 XGBoost 算法和 GeoSHapley 加性解释来确定阻力因子对地表温度的平均贡献度。当研究对象为具有空间属性的地理变量(例如地理坐标中的 X 和 Y)时，传统的 SHapley 值计算方法存在一定局限性[33]。这是因为 X 和 Y 通常被视为两个独立特征，单独计算其 SHapley 值难以体现“空间性”这一整体概念。在此背景下，Li[34]提出了 GeoSHapley 方法，以解决上述问题。GeoSHapley 基于 SHapley 值理论，将地理坐标 X 和 Y 的特征贡献整合为统一的地理空间变量，并进一步量化了地理空间变量与其他因子之间的交互作用(即空间效应)。通过这一方法，研究者能够更加全面地揭示地理空间属性在模型预测中的重要性和影响机制，该方法通过 Python 中的 GeoSHapley 库实现，其计算公式[35] 为

$$\phi_i = \sum_{S\subseteq F\setminus\{i\}}\frac{|S|!(|F|-|S|-1)!}{|F|!}[f(S\cup\{i\})-f(S)]$$

式中：ϕ_i是特征 i 的 GeoSHapley 值；S是不包含特征 i 的特征子集；F是全部特征集合；$|S|$是子集S的大小；$|F|$是特征集合F的大小；$f(S)$是仅使用子集S进行预测的模型输出；$f(S\cup\{i\})$是加入特征 i 后的预测值。

2.3.2 地表热量扩散阻力面构建

上文已对 NDBI、LUCC、Slope、RD、NDVI 以及 DEM 的平均贡献值进行排序。已有研究表明，LUCC 对区域热环境影响尤为显著[36]，本研究基于各用地类型的降温率特征计算地表覆盖阻力值。进一步研究发现：对于热岛到热岛的路径过程，土地利用类型降温率的绝对值越大，其受到的阻力越大，反之则越小；而在冷岛到冷岛的路径过程中，冷气流在传输过程中受到的阻力随着降温率绝对值的增大而减小，即降温率绝对值越大，阻力越小，反之则越大[37]。

在 ArcGIS 中，将用地类型与 LST 数据进行叠加分析，进行分区统计以获得各地类平均温度。参考文献 [37]，以裸地作为标准地物温度，用“各地类与裸地平均温度之差”与裸地平均温度的比值表示

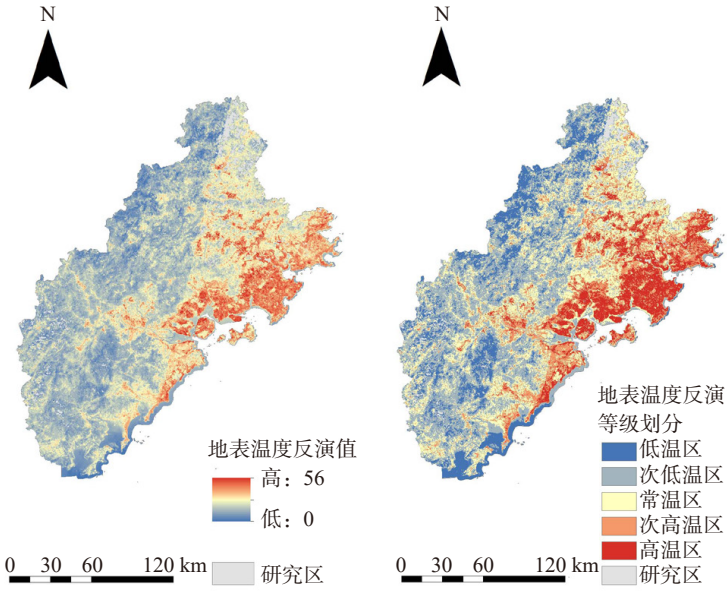


图 2　地表温度反演结果和等级划分

Fig. 2　Land surface temperature inversion results and grade classification

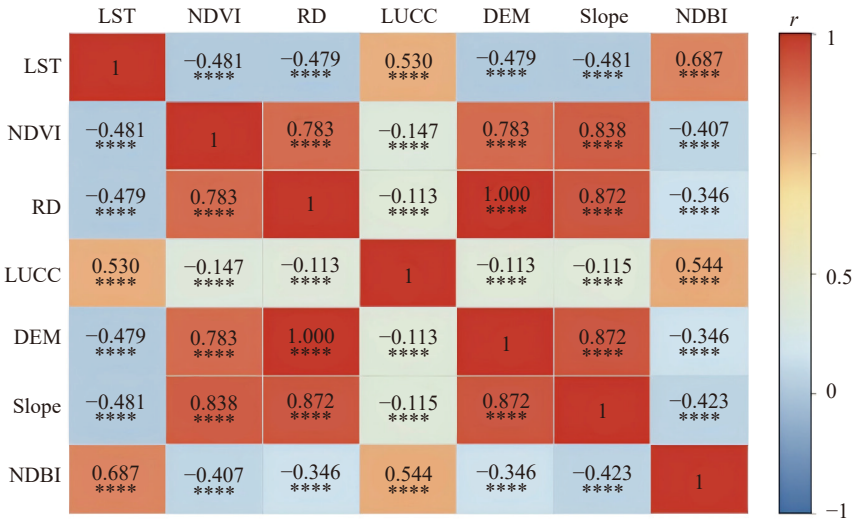


图 3　地表温度与各类阻力因子之间的 Spearman 相关结果（$p < 0.001$）

Fig. 3　Spearman correlation results between surface temperature and various resistance factors ($p < 0.001$)

降温率。

$$R_{\mathrm{L}} = \frac{T_i - T_0}{T_0}$$

式中：R_{L} 为降温率，T_i 为地物类型的温度，T_0 为裸地平均温度。

将地类降温率通过极差法进行标准化处理，并取倒数或乘 1 000，从而将阻力值限制在 1 ~ 1 001 之间，其结果即为各用地类型的热量扩散阻力值（表 2）。其次，通过 GeoSHapley 边际效应进一步确立各个阻力因子分级标准。

2.3.3　基于电路理论的冷、热岛网络构建

本研究以“冷热源—冷热阻面—冷热热廊—冷热节点”的标准范式为基础，通过电路理论构建冷、热岛网络[14]。冷、热岛网络在数据选取和参数设置等方面存在较大差异（表 2、3）。电路理论利用电路中电子随机流动的特性，模拟景观中个体物种或基因的迁移和扩散过程[38]。在该理论框架下，冷、热岛源区及其对应背景区域被视为导电界面，通过构建电阻网络模型模拟能量扩散路径。在具体实施过程中，使用 Linkage Mapper 工具中的网络构建与廊道模块，导入冷、热岛源地与 XGBoost -GeoSHapley 构建的综合阻力面栅格数据，参照文献设定 20 km 的廊道截断阈值[9]，采用“all to one”运算模式生成冷、热岛网络。在空间网络分析中，通过计算成本加权距离与最小成本路径长度的比值参数，可定量表征生态廊道的连通效率。该比值越大，表征区域间的

表 2 各地类降温率与冷热岛扩散阻力

Tab. 2 Cooling rates of various land types and diffusion resistance of cold and heat islands

地类	平均温度/℃	降温率	标准化值	热岛–热岛阻力	冷岛–冷岛阻力
水体	31.55	−0.165	0.251	3.984	251
海洋	28.88	−0.240	0.001	1 000.000	1
灌木	31.35	−0.170	0.231	4.329	231
林地	29.86	−0.210	0.092	10.870	92
耕地	34.26	−0.090	0.505	1.980	505
草地	35.57	−0.059	0.628	1.592	628
建成地	39.55	0.047	1.001	1.000	1 001
裸地	37.79	0	0.835	1.197	835

表 3 冷热源扩散综合阻力因子及其权重

Tab. 3 Comprehensive resistance factors and their weights for diffusion of cold and heat sources

阻力因子	权重	分级标准	热岛阻力值	阻力因子	权重	分级标准	热岛阻力值
NDVI	0.12	0.9 ~ 1.0	251	Slope	0.11	< 3	251
		0.7 ~ 0.9	1			3 ~ 5	1
		0.5 ~ 0.7	251			5 ~ 8	251
		0.3 ~ 0.5	501			8 ~ 15	501
		0.1 ~ 0.3	751			15 ~ 25	751
		0.0 ~ 0.1	1 001			> 25	1 001
DEM	0.05	< 50	251	RD	0.14	< 30	251
		50 ~ 80	1			30 ~ 80	1
		80 ~ 250	251			80 ~ 500	251
		250 ~ 500	501			500 ~ 750	501
		500 ~ 1 000	751			750 ~ 1 000	751
		> 1 000	1 001			> 1 000	1 001
NDBI	0.37	0.8 ~ 1.0	1	LUCC	0.21	水体	具体阻力值见表2
		0.6 ~ 0.8	251			海洋	
		0.4 ~ 0.6	501			灌木	
		0.2 ~ 0.4	751			林地	
		0 ~ 0.2	1 001			耕地	
						草地	
						建成地	
						裸地	

注：冷岛阻力值与热岛阻力值相反。

相对阻力越高，连通效能越低，从而实现生态廊道重要性等级的划分[39]。

2.4 冷热岛网络中夹点、障碍点和中心性识别

根据电路理论，冷热岛网络中的障碍点是能量流动的阻碍区域，识别和改善这些障碍可有效提升电子运动的效率[38]。本研究使用 Barrier Mapper 工具检测潜在的“障碍点”，设置最小搜索半径为 500 m、最大搜索半径 4 000 m，并以 500 m 为步长，通过移动窗口分析法，对各潜在障碍区域清除后的生态效益进行系统评估。在此过程中，将改善得分作为量化评估指标，用于反映特定障碍消除后相邻源地间连通性恢复的潜力。并利用 Pinchpoint Mapper 工具识别热环境中的“夹点”。该方法为揭示城市热环境的空间格局及热流动态提供了一种定量且高效的解决路径[40]。其次，利用 Centrality Mapper 模块识别冷、热源地的中心性[38]，将计算得到的中心性结果输入 ArcGIS。最后，选择冷热岛网络闭合值 α、线点比 β 和连通率 γ 等指标来评估热环境网络的结构和

效率[40]。

$$\alpha = \frac{L - V + 1}{2V - 5}$$

$$\beta = \frac{L}{V}$$

$$\gamma = \frac{L}{3(V - 2)}$$

式中：L 表示廊道数，V 表示节点数。

3　结果与讨论

3.1　基于 XGBoost-GeoSHapley 加性解释模型的冷、热岛网络构建

首先，本研究采用 XGBoost 回归算法构建预测模型，并借助交叉验证优化超参数。模型设置如下：以平方误差目标函数（reg:squarederror）作为优化目标，采用均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和 R^2 作为模型评估指标（表 4）。在树结构参数方面，单棵树最大深度设置为 26 层，生成子节点所需的最小样本权重（min_child_weight）约束为 18，节点分裂所需最小损失减少量（gamma）设为 0.1。训练时，以 0.1 的学习率调控梯度下降步长，并引入随机采样机制——构建每棵树时随机抽取 85% 的训练样本（subsample）和 90% 的特征列（colsample_bytree），以增强模型泛化能力并防止过拟合。其次，根据 MSPA 与景观连通性精准地识别冷岛与热岛的核心源地（图 4）。最后，利用 XGBoost-GeoSHapley 加性解释模型构建冷、热岛网络。

3.1.1　阻力面构建综合权重

选定的阻力因子及地理坐标 X 和 Y 对地表温度

表 4　XGBoost 模型训练结果

Tab. 4　XGBoost model training results

R^2	MAE	RMSE
88.7%	0.856	1.17

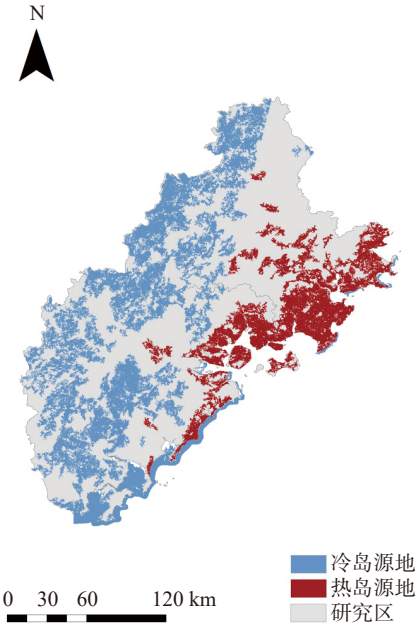
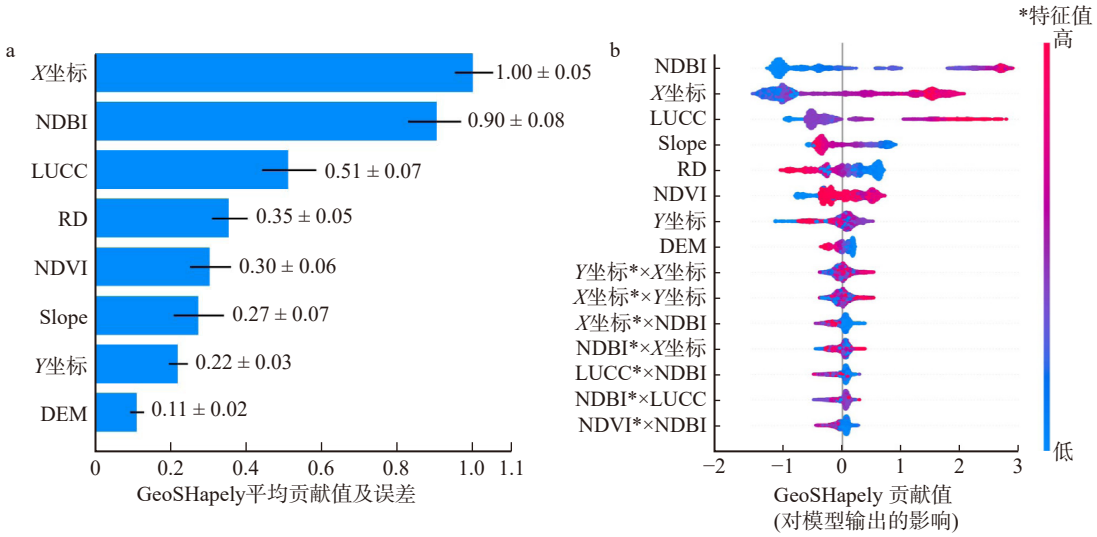


图 4　研究区热岛源地与冷岛源地

Fig. 4　Heat island source and cold island source in the study area

的平均贡献度排名依次为：X 坐标、NDBI、LUCC、Slope、RD、NDVI、Y 坐标、DEM（图 5a）。值得注意的是，地理坐标 X 的 GeoSHapley 贡献值显著高于其他因子（图 5a），表明厦漳泉大都市圈的地表温度具有明显的东西向梯度差异，这与该区域热岛效应的



*代表交互效应中以此为主。

图 5　XGBoost 模型的 GeoSHapely 贡献值汇总（a），以及地表温度反演 GeoSHapely 贡献值空间效应、非线性效应和交互效应图（b）

Fig. 5　Summary of GeoSHapely contribution values of the XGBoost model (a), and the spatial effect, nonlinear effect and interaction effect diagram of GeoSHapely contribution values of surface temperature inversion (b)

空间格局特征(如西部生态屏障与东部高密度建成区域之间)一致。相较之下,地理坐标 *Y* 的贡献度相对较低,可能由于研究区南北跨度较小或地形较为均质,导致纬度方向的热环境差异不显著。地理坐标 *X* 与地理坐标 *Y* 在因子交互效应中展现出显著的协同作用,这表明空间效应在主导厦漳泉都市圈地表温度变化方面起到了关键作用。此外,NDBI 与 LUCC 之间的协同作用也较为突出(图 5b),表明城市建成区扩张与不透水面累积对热岛效应具有倍增效应。例如,建设用地(LUCC 类别)与高密度建筑(NDBI 高值)的叠加可能导致地表热辐射强度出现非线性跃升。同时,*X* 坐标与 NDBI 的交互效应进一步揭示了城市热岛空间格局中的“东高西低”特征与建设用地分布之间的高度耦合性(图 5b)。

3.1.2 阻力面各因子分级标准

以往相关研究未能充分考虑各阻力因子分级标准可能呈现的非线性边际效应,限制了对热岛效应复杂空间动态的深刻理解[41]。本研究发现阻力因子的贡献度呈现非线性边际效应:当 NDVI > 0.9 时,GeoSHapley 值存在边际递减效应,此时 NDVI 在 [0.6, 0.8)区间与(0.9, 1] 区间的 GeoSHapley 值影响程度相当;而当 Slope < 3°和 DEM < 80 m 时,GeoSHapley 值则表现出边际递增趋势;对于 DEM 而言,当 DEM < 80 m 时,GeoSHapley 值同样表现出边际递增趋势,并在 DEM 为 80 m 时达到顶峰,其中 DEM 的 [0, 50] 区间与 [80, 250] 区间的 GeoSHapley 值影响程度相同,且当 DEM > 1 000 时,GeoSHapley 值趋于平稳;而在 RD > 30 时,SHapley 值则展现出边际递增效应,特别在 RD 为 60 m 时,GeoSHapley 值达到最高点,其中 RD 的 [0, 30)区间与(80, 500] 区间的 GeoSHapley 值影响相近(图 6)。这一现象揭示了城市热环境阻力因子构建过程中的阈值效应。因此,在构建阻力面模型时,建议充分考虑非线性边际效应的特征,以确保制定阻力因子分级赋值标准时做出更为合理的评估,特别是在面对与现有研究结果存在显著差异的情形中。以往研究中,如 Luo 等[42]研究基于 PLUS 模型的供冷网络研究,采用线性赋值方案将 NDVI 权重按 1、25、50、75、100 递增,未能识别 NDVI 可能在一些特定阈值内具有不同的 GeoSHapley 值的特征。本研究则充分考虑了非线性边际效应,从而为优化阻力面模型提供了新的且更具科学性和合理性的理论依据,特别是在面对与现有研究结果存在显著差异的情形中,能够更加精准地评估阻力因子分级赋值标准,提升对城市热环境阻力因子构建过程的理解和模型构建的准确性,进一步深化对热岛效应复杂空间动态的全面把握。

此外,该模型突破了传统线性回归或主成分分析在变量关系权重的设定上的局限[43],传统线性回归并没有考虑两个阻力因子相互作用的效果。例

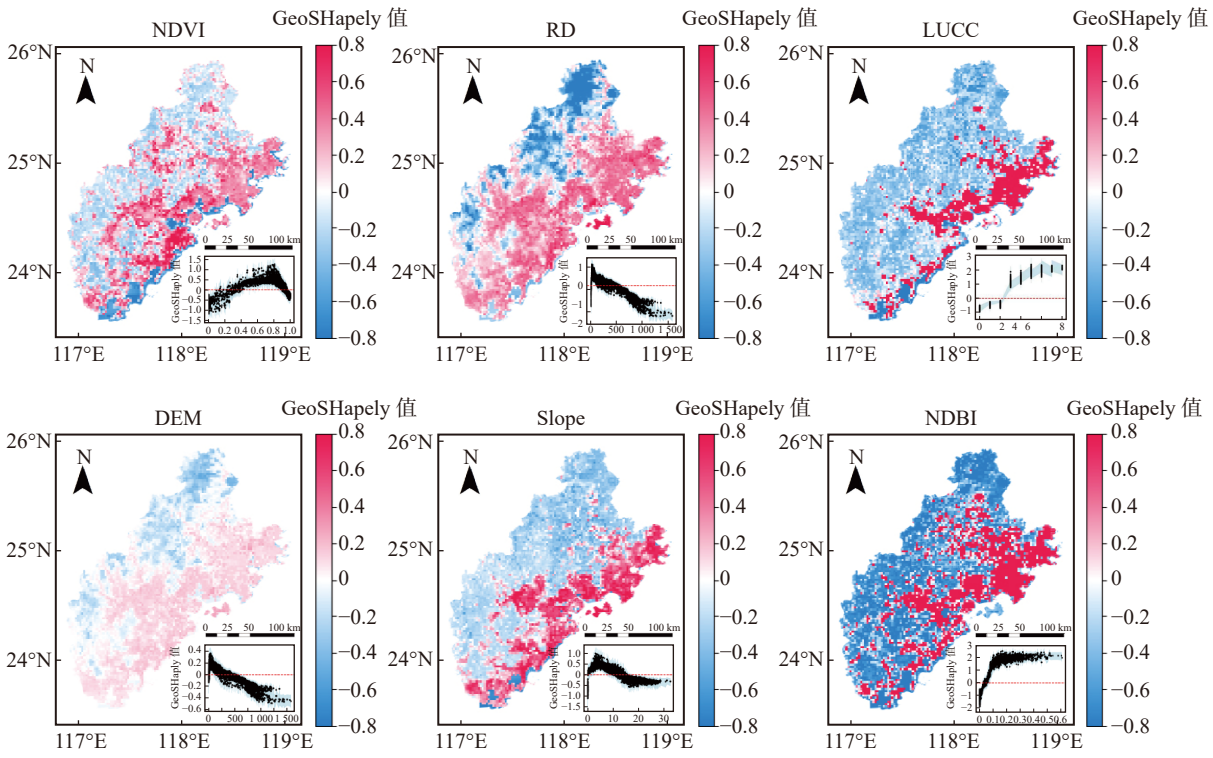


图 6 GeoSHapley 重要贡献度空间地理分布与 GeoSHapley 边际效应图

Fig. 6 Spatial geographical distribution of important contribution degree of GeoSHapley and marginal effect graph of GeoSHapley

如，本研究在分析 NDBI 与 LUCC 的协同效应时，GeoSHapley 二者交互贡献值达 1.61，揭示城市建成区扩张与不透水面密度增加对热岛效应的非线性增效机制。与此同时，传统的层次分析法由于依赖专家经验，其构造的阻力面存在较强的主观性，难以捕捉复杂的非线性关系和空间耦合机制[44]。本研究的方法通过引入非线性建模技术，能够更客观地量化各阻力因子的实际贡献及其相互作用，克服了传统方法在处理复杂空间动态时的不足。

3.1.3　冷、热岛网络构建

本研究基于 XGBoost-GeoSHapley 加性解释模型，构建了地表能量扩散的综合阻力面系统。通过 Linkage Mapper 空间分析工具，对厦漳泉区域进行了分析，共识别出 43 条热岛廊道(总长度 412.99 km)以及 85 条冷岛廊道(总长度 1 693.08 km)，这两类廊道呈现出显著的空间分异特征(图 7)。热岛廊道主要分布在泉州德化县至永春县一带，以及漳州市东南面六鳌镇至前亭镇一带，其中有 6 条重要热岛廊道，全部位于泉州德化县至永春县一带。热岛廊道的空间分布十分不均，主要是由于热岛源地集中分布在研究区东部，因此图 5a 中 X 坐标对应的地表温度 GeoSHapley 贡献度较高。热岛的形成主要源于厦漳泉的城市化发展集中于东部，且相对独立存在的源地斑块较少，因此廊道数量较少。相较而言，冷岛廊道主要沿西北林地至东南海岸分布，7 条重要廊道主要依托林地–水体–草地复合生态系统，其中部分区段穿越建成区和农业用地(图 7)。

基于改善得分、累积电流和中心性的计算结果，采用自然断点法分级，将较高级别确定为障碍点、夹点区域和源地分级(图 8、9)。热岛系统区域包含 28 处障碍点(1 067.25 km^2)、1 334 处夹点(10 417.75 km^2)(图 8)和 3 个热岛重要区(2 905.27 km^2)；冷岛系统区域则存在 190 处障碍点(1 723.75 km^2)、4 720 处夹点(16 348.25 km^2)和 4 个冷岛重要区(7 980.71 km^2)(图 9)。最后，汇总冷、热岛网络中的障碍点、夹点区域和源地分级，将密集区域附于卫星图上进行可视化示意(图 10)。

最终，通过分析闭合值 α、线点比 β 和连通率 γ 等关键指标，对热环境网络的结构及效率进行计算和评估：冷岛的 α 为 0.756，β 为 2.428，γ 为 0.858；热岛的 α 为 0.627，β 为 2.160，γ 为 0.780。本研究所已建立的热环境网络的结构及效率显著高于文献 [40]、[45] 和 [46] 的结果。

3.2　冷、热岛网络优化策略

本研究在“冷热源地提取—XGBoost-GeoSHapley—冷热岛网络识别”的综合研究框架基础上，针对网络障碍点、夹点与冷热源中心区域的识别结果，结合厦漳泉都市圈地理特征与热环境空间分异规律，提出以下多尺度协同优化策略。

(1)针对厦漳泉地区热岛与冷岛夹点的分布特征，建议采取差异化的生态优化策略。在热岛夹点显著覆盖 10 417.75 km^2 区域(占比 42.95%)的范围内，需重点围绕建成区实施立体降温工程，例如在漳州龙海区入海口推动屋顶绿化覆盖率提升，并保护红树林湿地生态；在泉州南安晋江流域推进生态透水铺装和滨江绿带建设。同时，需加强六鳌镇大澳湾“滨海防护林–沙滩–湿地”的三重防护体系建设。而在覆盖 16 348.25 km^2(占 67.41%)的冷岛区域，应重点强化南靖西北部“通灵山–官陂镇”廊道建设，设置核心保护区，并在石狮西南沿海控制城市开发强度，保留生态空间，维持自然降温能力。

(2)针对厦漳泉地区热岛和冷岛障碍点的修复，需结合不同区域特征实施综合治理。热岛障碍区域应重点增强生态连通性，在漳厦交界区通过线性公园串联碎片化绿地，打通生态廊道阻隔；同步对晋江流域开展水体生态修复，并增设植被缓冲带，以降低建成区热辐射效应；安溪至德化一带需推行农林复合经营模式，优化用地功能；漳州市区周边则需改造硬质铺装并植入立体绿化。冷岛障碍区域需强化生态基底保护，严格维护龙海入海口红树林湿地与大澳湾自然岸线；晋江入海口应控制开发强度以保留生态功能。南靖县林地可通过发展林下经济实现保护性利用。同时，应建立跨区域生态联防机制，利用微地形改造引导冷岛凉风渗透热岛区，结合自然恢复与人工修复，逐步消除热力阻隔，最终形成区域冷、热岛调节网络。

(3)针对热岛重点改善区和冷岛重点保护区实施精准治理。GeoSHapley 分析中 X 坐标(空间东西向差异)对地表温度有较高贡献度，本研究提出“纵向阻断 + 横向疏导”的厦漳泉热岛治理框架，构建“一纵三横三核多片”的基本结构。其中，“一纵”指厦漳泉沿海城镇冷热岛发展带，旨在建立厦漳泉沿海城市热岛效应联防联控发展带，实现多区域之间的热传递监测。“三横”包括厦门—漳州北部冷热岛廊道山海发展轴、同安—泉州安溪冷热岛廊道山海发展轴，以及南安市—安溪县—德化县冷热岛廊道的山海发展轴，在闽西南协同发展区框架下，统筹西北山区、厦漳泉城市圈与东南湾海岸带的蓝绿空间布局，建设“山–海–城”贯通的多级通风系统，并围绕厦门、漳州、泉州三大核心城区协调发展。最后，在核心节点方面，基于网络中心性分析识别出三大热岛重点改善区(漳州长泰区、厦门同安–翔安–集美

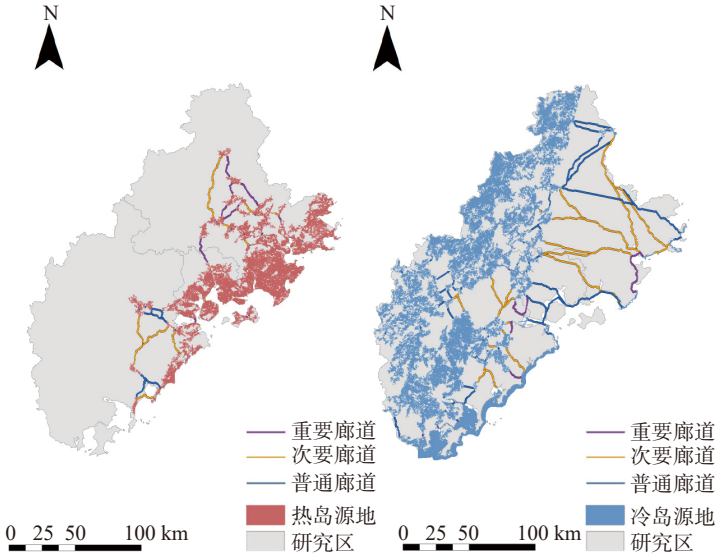


图 7 研究区冷热岛网络构建结果

Fig. 7 Construction results of cold and heat island networks in the study area

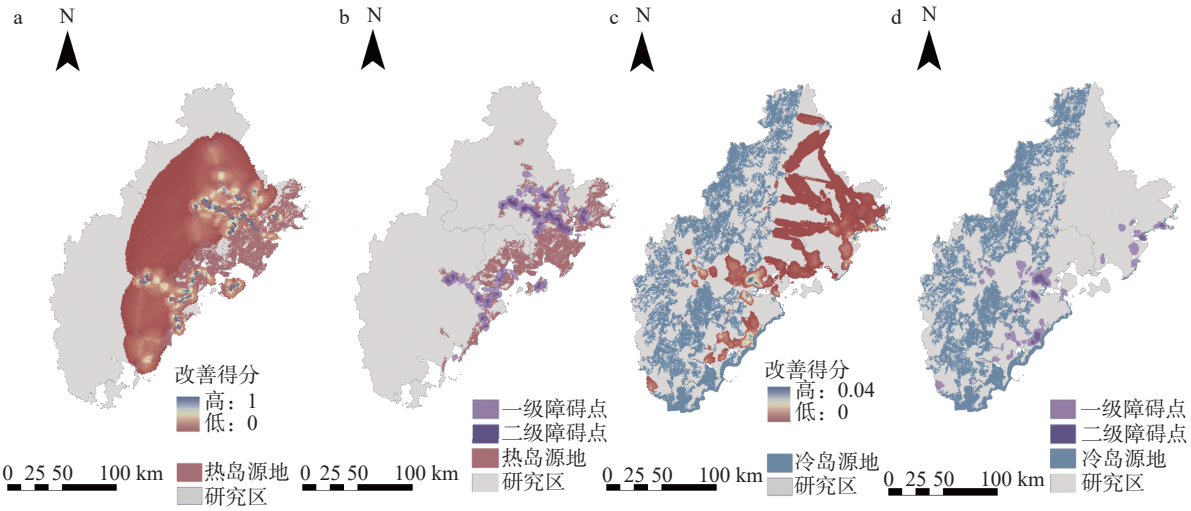


图 8 冷热岛网络的改善得分和障碍点识别

Fig. 8 Improvement scores and obstacle point identification of cold and heat island networks

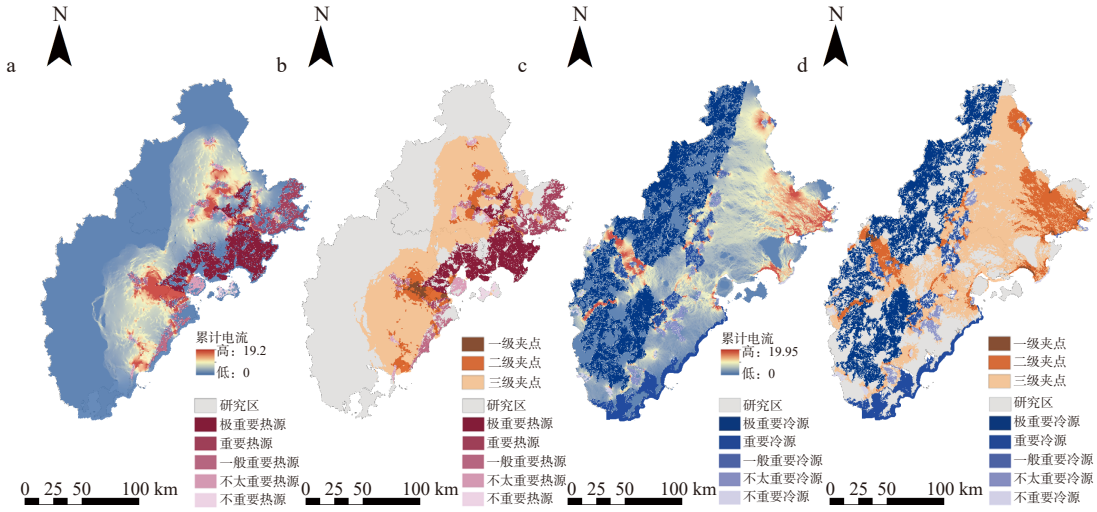
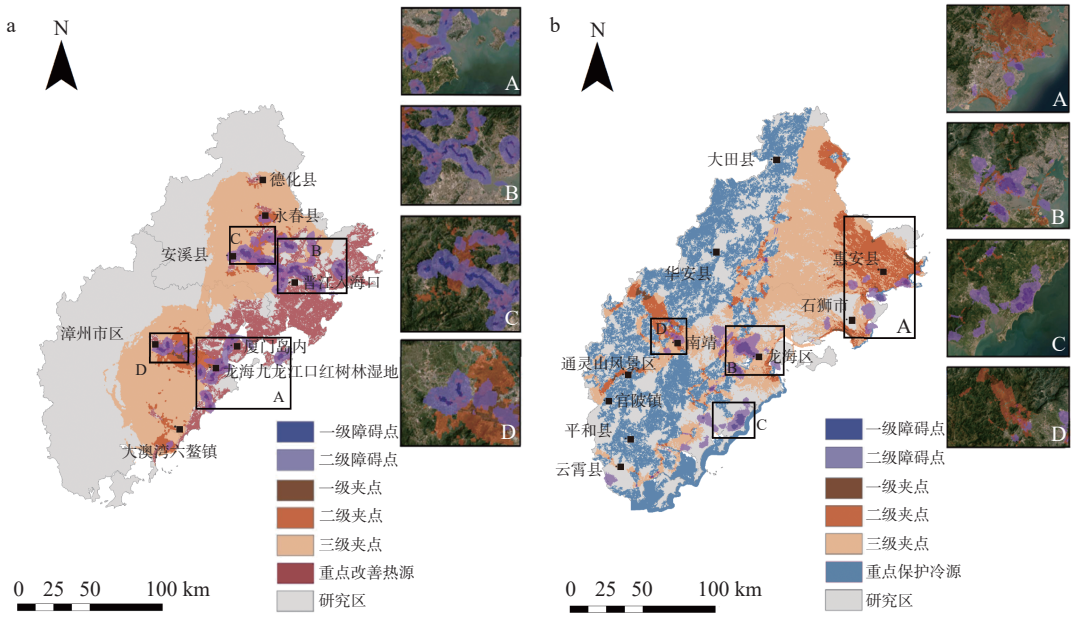


图 9 冷热岛网络的累积电流、中心性分级和夹点识别

Fig. 9 Cumulative current, centrality classification and pinch point identification of cold and heat island networks



卫星图为 2023 年谷歌地球卫星影像。

图 10　热岛网络改善区(a)和冷岛网络保护区(b)地理分布

Fig. 10　Geographical distribution of heat island network improvement area (a) and cold island network protection area (b)

区、泉州晋江–石狮–南安)与四大冷岛核心保护区(靖南县、平和县–云霄县、华安县和大田县),通过多尺度空间协同实现热环境的优化(图 11)。

4　结论与展望

本研究聚焦厦漳泉大都市圈,创新性地整合可解释机器学习模型(XGBoost-GeoSHapley)与电路理论,构建了冷热岛空间网络,并提出了多尺度协同优化策略。通过量化阻力因子的空间效应、非线性关系和交互作用,本研究克服了传统阻力面构建方法的主观性和空间异质性问题,构建了“西北山地主导,沿海湿地补充”的冷岛网络与“东部建成区集中”的热岛网络,并识别出多条冷热岛廊道及关键节点。研究结果表明,冷岛网络的连通性和整体性显

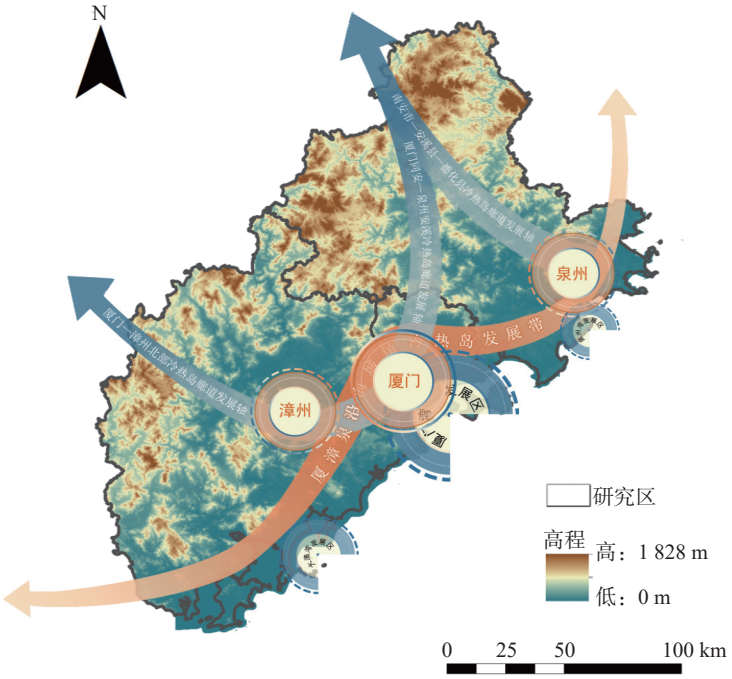


图 11　厦漳泉都市圈冷热岛网络格局示意

Fig. 11　Schematic diagram of network pattern of cold and heat islands in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area

著优于热岛网络，且提出的“纵向阻断 + 横向疏导”治理框架及“一纵三横三核多片”格局为区域热环境精准治理提供了科学依据。研究主要结论有以下 3 点。

（1）本研究基于 GeoSHapley 加性解释的阻力面权重分配方法，有效克服了传统主观赋权法的局限性。研究发现，NDBI（GeoSHapley 贡献度 0.37）与 LUCC（GeoSHapley 贡献度 0.21）为地表温度的主导阻力因子，地理坐标 X 的空间效应贡献度最高（0.28），揭示了区域热环境在“东高西低”方面的显著梯度差异。同时，探讨阻力因子的非线性边际效应，例如：NDVI > 0.9 时，SHapley 值呈现边际递减效应；Slope < 3°时，SHapley 值呈边际递增效应；DEM < 80 m 时，SHapley 值亦呈边际递增趋势。这些发现意味着在构建阻力面时，需关注边际效应的变化趋势，为精准划定城市热岛缓解区提供了量化依据。

（2）热岛网络展现出“东部集聚，廊道稀疏”的空间分布格局，其中 43 条热岛廊道主要集中在泉州德化至永春一带，印证了高强度建成区热岛效应的空间蔓延特性。冷岛网络则表现为“西北山地主导，沿海湿地补充”的多核结构，85 条冷岛廊道依托林地和水体形成连续生态屏障。障碍点与夹点分析表明，热岛网络障碍区域（1 067.25 km^2）主要位于漳厦交界建成区，而冷岛夹点（16 348.25 km^2）则集中于南靖–德化生态过渡带。

（3）本研究提出了“纵向阻断 + 横向疏导”的厦漳泉冷热岛治理框架，构建了“一纵三横三核多片”的基本结构，划定 10 417.75 km^2 高温重点改善区与 16 348.25 km^2 冷源重点保护区。针对性地设计立体降温工程（如泉州南安晋江流域建设生态透水铺装滨江绿带）与生态连通方案（如漳州龙海入海口红树林湿地与大澳湾自然岸线）。通过识别 3 处核心热源（厦门同安、翔安、泉州晋江–石狮沿海区）及 4 处关键冷源（靖南县、平和县–云霄县、华安县、大田县），为区域“山–海–城”冷热岛网络格局的构建提供空间指引。

综上所述，本研究将可解释机器学习模型与电路理论相结合，构建了城市热环境空间网络的理论框架，深化了对城市群热环境空间分异机制的理解。实践层面，该研究为厦漳泉大都市圈及其他类似城市群的热岛效应治理提供了切实可行的方案，通过识别关键冷热岛节点和廊道，明确了治理重点区域，提升了区域热环境调控能力，促进城市可持续发展。未来，本研究具有众多拓展的可能性。首先，可以尝试将深度学习算法与现有城市热环境模型相融合，构建更系统化、更精准的城市热环境综合模拟平台[23]。其次，利用长时间序列数据，开展城乡冷热岛效应的时空动态研究，解析城市扩张和气候变化对网络格局的具体影响[42]。此外，还需进一步将湿度、风速等多维环境因素纳入研究范畴，实施多指标耦合的城市热环境网络分析，以提升对复杂环境系统的综合理解[47]。进一步而言，研究范围可以扩展至更大地理尺度的城市群，探索区域间协同治理的机制，为跨城市群的气候适应与环境规划提供科学依据[48]。与此同时，应加强与政策制定和规划设计实践的结合，将研究成果转化为可操作的应用方案，为城市发展和建设提供可靠的技术支撑。通过上述方向的探索，不仅能推动研究的落地，还能赋予其在城市规划、区域治理及环境保护领域更广泛的价值和影响力。

底图审图号：GS(2022)1873 号

参 考 文 献

[1] Jay O, Capon A, Berry P, et al. Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities[J]. The Lancet, 2021, 398(10301): 709−724.

[2] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应 [J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2055−2060.
Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2055−2060.

[3] Heidari H, Arabi M, Warziniack T, et al. Effects of urban development patterns on municipal water shortage[J]. Frontiers in Water, 2021, 3: 694817.

[4] Yang M, Ren C, Wang H, et al. Mitigating urban heat island through neighboring rural land cover[J]. Nature Cities, 2024, 1(8): 522−532.

[5] Nie W, Shi Y, Siaw M J, et al. Constructing and optimizing ecological network at county and town scale: the case of Anji County, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108294.

[6] 赵晨晓, 刘春卉, 魏家星. 缓解城市热岛效应的南京市绿色基础设施网络构建方法 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(6): 27−35.
Zhao C X, Liu C H, Wei J X. Green infrastructure network construction method for mitigating urban heat island effect in Nanjing[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(6): 27−35.

[7] 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 J, Gong J, Li J Y. 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.

[8] Huang K, Peng L, Wang X, et al. Integrating circuit theory and landscape pattern index to identify and optimize ecological networks: a case study of the Sichuan Basin, China[J].

Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(44): 66874−66887.

[9] 李佳杰, 邢忠, 李旭. 基于电路理论的城市高温控制优先区域识别——以重庆市中心城区为例 [J]. 中国园林, 2024, 40(11): 97−103.
Li J J, Xing Z, Li X. Identification of priority areas for urban heat mitigation based on circuit theory: a case study of Chongqing's central city[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(11): 97−103.

[10] Vogt P, Ferrari J R, Lookingbill T R, et al. Mapping functional connectivity[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(1): 64−71.

[11] Vogt P, Riitters K H, Iwanowski M, et al. Mapping landscape corridors[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 481−488.

[12] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(50): 19885−19890.

[13] 张文萍, 庄子薛, 谢梦晴, 等. 基于电路理论的多尺度城市热环境网络构建及格局优化: 以成都市中心城区为例 [J]. 中国园林, 2023, 39(4): 103−108.
Zhang W P, Zhuang Z X, Xie M Q, et al. Construction and pattern optimization of multi scale urban thermal environment network based on circuit theory: a case study of the central urban area of Chengdu[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(4): 103−108.

[14] Shi Y, Fan Q, Song X, et al. Assessing the severity of urban heat transfer and flow across years: evidence from thermal environment spatial networks[J]. Urban Climate, 2025, 61: 102401.

[15] Mu H, Li X, Ma H, et al. Evaluation of the policy-driven ecological network in the Three-North Shelterbelt region of China[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 218: 104305.

[16] Shi F, Liu S, Sun Y, et al. Ecological network construction of the heterogeneous agro-pastoral areas in the upper Yellow River basin[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 302: 107069.

[17] Feng F, Ren Y, Xu C, et al. Exploring the non-linear impacts of urban features on land surface temperature using explainable artificial intelligence[J]. Urban Climate, 2024, 56: 102045.

[18] Atak B K. Analysing the relationships between land use/land cover and urban land surface temperature using regression tree in İzmir[J]. International Journal of Geography and Geography Education, 2020(41): 280−291.

[19] Pande C B, Egbueri J C, Costache R, et al. Predictive modeling of land surface temperature (LST) based on landsat-8 satellite data and machine learning models for sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141035.

[20] Ma X, Yang J, Zhang R, et al. XGBoost-based analysis of the relationship between urban 2-D/3-D morphology and seasonal gradient land surface temperature[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 4109−4124.

[21] Chen J, Wang K, Du P, et al. Quantifying the main and interactive effects of the dominant factors on the diurnal cycles of land surface temperature in typical urban functional zones[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 114: 105727.

[22] Chen L, Li H, Zhang C, et al. Dynamic analysis of landscape drivers in the thermal environment of Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 134: 104239.

[23] Zhao J, Guo F, Zhang H, et al. Mechanisms of non-stationary influence of urban form on the diurnal thermal environment based on machine learning and MGWR analysis[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 101: 105194.

[24] Peng X, Wu W, Zheng Y, et al. Correlation analysis of land surface temperature and topographic elements in Hangzhou, China[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 10451.

[25] Li Z. Extracting spatial effects from machine learning model using local interpretation method: an example of SHAP and XGBoost[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2022, 96: 101845.

[26] Shen Z J, Zhang B H, Xin R H, et al. Examining supply and demand of cooling effect of blue and green spaces in mitigating urban heat island effects: a case study of the Fujian delta urban agglomeration (FDUA), China[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109187.

[27] 刘嘉慧, 赵小锋, 林剑艺. 基于地表能量平衡的厦门岛城市功能区人为热排放分析 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(7): 1026−1036.
Liu J H, Zhao X F, Lin J Y. Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 20(7): 1026−1036.

[28] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2022[J]. Earth System Science Data, 2023, 13: 3907−3925.

[29] 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.
Liu T, Ouyang S, Gou M M, et al. Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 615−624.

[30] 王越, 林箐. 基于 MSPA 的城市绿地生态网络规划思路的转变与规划方法探究 [J]. 中国园林, 2017, 33(5): 68−73.
Wang Y, Lin Q. The transformation of planning ideas and the exploration of planning methods of urban green space ecological network based on MSPA[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(5): 68−73.

[31] Yu Z, Zhang J, Yang G. How to build a heat network to alleviate surface heat island effect?[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103135.

[32] Yang C, Zeng W, Yang X. Coupling coordination evaluation and sustainable development pattern of geo-ecological environment and urbanization in Chongqing municipality, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102271.

[33] Chen B, Hu J, Wang Y. Synergistic observation of FY-4A&4B to

estimate CO concentration in China: combining interpretable machine learning to reveal the influencing mechanisms of CO variations[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2024, 7(1): 9.

[34] Li Z. Geoshapley: a game theory approach to measuring spatial effects in machine learning models[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2024, 114(7): 1365−1385.

[35] Harris C, Pymar R, Rowat C. Joint shapley values: a measure of joint feature importance[J/OL]. arXiv preprint arXiv: 2107.11357, 2021. [2025−02−16]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.11357.

[36] 谢启姣. 城市热岛演变及其影响因素研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
Xie Q J. Urban heat island effect change and the major affecting variables analysis[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.

[37] 滕明君. 快速城市化地区生态安全格局构建研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
Teng M J. Planning ecological security patterns in arapidly urbanzing context[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.

[38] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J]. Ecology, 2008, 89(10): 2712−2724.

[39] 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 等. 基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 [J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3034−3042.
Qiao Z, Chen J Y, Wang N, et al. Spatial network of urban heat environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on MSPA and circuit theory[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3034−3042.

[40] Jing M, Song F, Meng K, et al. Optimization of landscape pattern in the main river basin of Liao River in China based on ecological network[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(24): 65587−65601.

[41] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1986−2001.
Zhu J, Su J, Yin H W, et al. Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multi-scale nesting[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(8): 1986−2001.

[42] Luo J, Fu H. Constructing an urban cooling network based on PLUS model: implications for future urban planning[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110887.

[43] Liu F, Liu J, Zhang Y, et al. Construction of a cold island network for the urban heat island effect mitigation[J]. Science of the Total Environment, 2024, 915: 169950.

[44] Qiu J, Li X, Qian W. Optimizing the spatial pattern of the cold island to mitigate the urban heat island effect[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110550.

[45] 李佳杰, 顾媛媛, 邢忠. 武汉城市圈“生物迁移−区域降温”复合功能生态网络构建 [J]. 风景园林, 2025, 32(1): 96−104.
Li J J, Gu Y Y, Xing Z. Construction of “biomigration-regional cooling” multi-functional ecological network in Wuhan urban agglomeration[J]. Landscape Architecture, 2025, 32(1): 96−104.

[46] 方云皓, 赵丽元, 窦碧莹, 等. 基于 MSPA-CIRCUIT 的长江中游城市群热环境网络识别与评价研究 [J]. 生态环境学报, 2023, 32(7): 1237−1248.
Fang Y H, Zhao L Y, Dou B Y, et al. Research on the identification and evaluation of thermal environment networks in urban agglomerations of the middle reaches of the Yangtze River based on MSPA-CIRCUIT[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(7): 1237−1248.

[47] Wu H, Ming Y, Liu Y. Investigating the influence of morphologic and functional polycentric structures on urban heat island: a case of Chongqing, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 114: 105790.

[48] Shi S, Ji S, Luo Z. Spatial heterogeneity, interaction and multi-scale effects of driving factors of heat island intensity in different urban agglomerations[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 126: 106401.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 张会儒）