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

基于复杂网络理论的黔中城市群冷岛网络优化与热环境缓解

宋爽 王韶晗 弓悦 余压芳

Optimization of cold island network and thermal environment mitigation in urban agglomeration based on complex network theory in central Guizhou Province, southwestern China

Song Shuang, Wang Shaohan, Gong Yue, Yu Yafang

引用本文:
宋爽, 王韶晗, 弓悦, 余压芳. 基于复杂网络理论的黔中城市群冷岛网络优化与热环境缓解[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):166–179. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250278
Song Shuang, Wang Shaohan, Gong Yue, Yu Yafang. Optimization of cold island network and thermal environment mitigation in urban agglomeration based on complex network theory in central Guizhou Province, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):166–179. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250278

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250278

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于复杂网络理论的生态空间优化
Ecological spatial optimization based on complex network theory: a case study of Songhua River Basin of northeastern China
北京林业大学学报, 2022, 44(9): 91–103. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210475

都市圈冷热岛空间网络构建与优化
Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 152–166. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250150

黄河流域生态空间网络特征
Characteristics of spatial ecological network in the Yellow River Basin of northern China
北京林业大学学报, 2022, 44(12): 142–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210159

基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化
Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200272

耦合Graphab–PLUS模型的生态网络动态评估框架
A dynamic assessment framework of ecological networks coupled with Graphab–PLUS model: a case study in the central area of Beijing
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 95–105. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230222

内蒙古防沙带生态空间网络结构演变
Evolution of ecological spatial network structure in sand–prevention belts of Inner Mongolia, northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(9): 116–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230021

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250278

基于复杂网络理论的黔中城市群冷岛网络优化与热环境缓解

宋 爽[1] 王韶晗[2] 弓 悦[3] 余压芳[1]
（1. 贵州大学建筑与城市规划学院，贵州 贵阳 550025；2. 福建农林大学园林艺术学院，福建 福州 350002；
3. 河南工业大学设计艺术学院，河南 郑州 450001）

摘要:【目的】热环境是评价城市生态环境的重要指标之一，直接关系到居民健康及区域经济可持续发展。本研究以西南黔中城市群为对象，突破传统孤立的蓝绿空间形态研究局限，创新性地提出冷岛网络优化框架，旨在通过最小干预实现热环境风险的最大化缓解。**【方法】**基于 MODIS LST 数据，采用形态学空间格局分析（MSPA）、最小面积阈值分析及蚁群算法提取冷岛网络，引入复杂网络理论高介数捷径（SMB）与结构洞填充（RSH）策略对网络进行增边优化，并利用结构鲁棒性分析验证优化效果。依据复杂网络结构参数，加权融合划分“源”重要性等级并叠加热岛斑块识别出障碍点。**【结果】**（1）黔中城市群热环境空间异质性显著，高温区集中于中北部及东南部，低温区分布于南部及西南部；共识别 102 个冷岛“源”，总面积 5 518.412 km^2，呈南密北疏分布，南部及西南部“源”连片聚集，北部零星分布；（2）提取 190 条冷岛廊道，总长 2 791.58 km，网络整体连通性薄弱、结构松散。（3）SMB 策略优化效果优于 RSH，网络初始连接鲁棒性从 0.73 提升至 0.82，在蓄意攻击下，网络节点和边完全恢复的去除节点阈值分别从 9 和 13 个提升至 22 和 23 个，随机攻击下，分别从 11 和 12 个提升至 23 和 25 个，恢复鲁棒性亦显著增强，形成环形加放射型网络。（4）识别出 6 个 5 级“源”（占“源”总面积 46.88%，以大型水体和山脉为主）及 16 个障碍点（其中 11 个阻断现有廊道，5 个位于新增优化廊道）。**【结论】**研究结果为喀斯特山地城市热环境韧性提升提供了科学高效的优化模型，也为高密度城市可持续发展中的生态空间精准调控提供了新范式。

关键词：冷岛网络；复杂网络；增边优化；结构鲁棒性；黔中城市群
中图分类号：X171.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)01−0166−14
引文格式：宋爽，王韶晗，弓悦，等. 基于复杂网络理论的黔中城市群冷岛网络优化与热环境缓解［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：166−179. Song Shuang, Wang Shaohan, Gong Yue, et al. Optimization of cold island network and thermal environment mitigation in urban agglomeration based on complex network theory in central Guizhou Province, southwestern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 166−179.

Optimization of cold island network and thermal environment mitigation in urban agglomeration based on complex network theory in central Guizhou Province, southwestern China

Song Shuang[1] Wang Shaohan[2] Gong Yue[3] Yu Yafang[1]
(1. School of Architecture and Urban Planning, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;
2. College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. School of Design and Art, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

收稿日期: 2025−07−21 **修回日期:** 2025−12−18
基金项目: 国家自然科学基金项目（52578067），贵州省基础研究计划（自然科学）面上项目（黔科合基础 MS[2025]588），贵州省人才团队项目（黔科合人才 CXTD[2025]060），贵州省基础研究计划（自然科学）青年引导项目（黔科合基础 [2024] 青年 134），贵州大学引进人才科研项目（贵大人基合字 [2023]34（自然科学））。

第一作者: 宋爽。主要研究方向：景观规划设计与景观生态修复。Email：songshuang0916@126.com 地址：550025 贵州省贵阳市花溪区贵州大学建筑与城市规划学院。
责任作者: 余压芳，教授，博士生导师。主要研究方向：城乡规划与遗产保护。Email：18085172259@163.com 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract:［**Objective**］The thermal environment is a critical metric for assessing urban ecological quality, directly impacting residents' health and regional sustainable economic development. Focusing on the central Guizhou urban agglomeration in southwestern China, this study overcame the limitations of traditional isolated research on blue-green space morphology and innovatively proposed a cold island network optimization framework, aiming to maximize thermal risk mitigation with minimal intervention.［**Method**］Based on MODIS LST data, the cold island network was extracted using morphological spatial pattern analysis (MSPA), minimum area threshold analysis, and the ant colony algorithm. From complex network theory, the shortcut for maximum betweenness (SMB) and reduction structural hole (RSH) strategies were introduced for edge-addition optimization, with structural robustness analysis employed to verify effectiveness. The importance levels of "source" patches were classified via weighted fusion of network structure parameters, and obstacle points were identified by overlaying heat island patches.［**Result**］(1) Significant spatial heterogeneity in the agglomeration's thermal environment: high-temperature zones were concentrated in the north-central and southeastern regions, while low-temperature zones were located in the south and southwestern region. (2) A total of 102 cold island "sources" (5 518.412 km^2) were identified, dense in the south and sparse in the north, clustered continuously in the southern and southwestern region and scattered in the northern region. 190 corridors (total length 2 791.58 km) were extracted, with overall weak connectivity and loose structure. (3) The optimization effect of SMB was better than RSH: initial connection robustness increased from 0.73 to 0.82. Under deliberate attacks, the threshold number of node removals required for complete recovery of network nodes and edges rose from 9 and 13 to 22 and 23, respectively. Under random attacks, the threshold number of node removals increased from 11 and 12 to 23 and 25, respectively. Recovery robustness improved significantly, resulting in a ring-radial network pattern. (4) Six level-5 sources (46.88% of total source area, dominated by large water bodies and mountains) and 16 obstacle points (11 blocking existing corridors, 5 in new optimized ones) were identified.［**Conclusion**］This study provides a scientific and efficient optimization model for enhancing thermal resilience in karst mountain cities, offering a new paradigm for precise ecological space regulation in sustainable high-density urban development.

Key words: cold island network; complex network; edge addition optimization; structural robustness; urban agglomeration in central Guizhou Province

城市热环境作为生态系统的重要大气组成部分，它综合反映了城市的环境状态，并与居民的生活和发展密切相关[1]。据联合国最新报告，预计到 2030 年，全球城市人口比例将上升至 60%，人口超过 1 000 万的超大城市数量将从 33 个增加至 43 个[2]。在全球气候变暖与城市规模扩大的共同影响下，热环境问题已对人居环境、生态系统服务及公众福祉产生明显的负面影响[3]。在我国快速推进城市化的背景下，增强城市的热适应与缓解能力，使其在未来发展中更具可持续性和弹性，已成为亟待解决的重要课题。

早期城市热环境研究多聚焦热岛分布特征[4]、影响因素[5]及形成机制[6]。研究证实，城市冷岛效应（植被、大面积水体及透水覆盖区域温度低于周边）对改善热环境、提升居民舒适度、优化城市小气候意义重大[7]，蓝绿空间因此成为核心研究对象。彼时研究以“见缝插绿”协调生态补偿、提升冷岛效应[8]，但城市建设用地扩张持续压缩蓝绿空间，导致其难充分发挥最佳效果[9]。为缓解热岛效应，学者从热岛特征出发，提出节能减排、使用高新材料、合理城市规划等治理对策[10]，但此类宏观建议针对性较弱。近年，冷岛效应研究常结合景观生态学，从斑块、基底、景观 3 层面探讨蓝绿空间的影响[11]，且发现蓝绿空间协同的冷岛效应强于单一绿或蓝空间元素[12]。但目前对蓝绿空间综合景观格局影响冷岛效率的探讨仍较缺乏[13]，加之城镇化发展接近或进入成熟阶段，不可能仅为优化生态指标重新规划现存蓝绿空间。

从国际视角来看，冷岛网络（cold island network，CIN）作为缓解热岛、提升气候适应性的关键载体，其科学规划能助力国土空间规划实现生态优先、可持续发展的目标[14]。但当前研究存在以下局限：仅分析冷岛斑块演变与热环境空间网络特性，难以服务现实治理[15]；虽知加强冷岛网络连通性、隔离热源是规避热环境风险的高效手段，但这两种方法在城市

发展中构建难度大[8]；网络拓扑结构模型虽成熟，可冷岛网络研究多停留在斑块识别与网络初步构建，缺乏结构优化策略的系统探索。尤其在喀斯特山地城市群这一特殊地理背景下，针对冷岛网络连通性薄弱、结构松散等问题的解决方案尚未形成，也未建立科学的网络优化效果验证体系，导致研究成果难以直接服务于国土空间规划。

冷岛网络是由多种要素构成的复杂网络，其内部信息流动力学与拓扑结构紧密相关，调整拓扑结构可优化信息流行为、提升网络输送效率[16]。复杂网络源于图论，融合系统科学、社会学等理论[17]，通过分析系统中个体关联的拓扑结构研究复杂系统，旨在阐明现实网络系统功能，为其设计与优化提供指导。近年来，复杂网络研究不断深入，学者们针对不同领域提出了多种网络拓扑模型。其中，随机网络、无标度网络及小世界网络在指导行为动力学分析方面展现出重要的理论和实践价值，这种抽象研究方法成为复杂系统研究的新热点[18]。但在冷岛网络优化研究中，如何将复杂网络理论与冷岛网络特性深度结合，提出针对性的结构优化策略，同时精准识别网络核心节点与障碍点，仍是当前研究的空白领域，尤其缺乏针对黔中城市群这类喀斯特山地城市的实证研究。

基于此，本研究以黔中城市群为研究区，创新提出复杂网络理论驱动的冷岛网络优化框架。利用 MODIS LST 数据，基于形态学空间格局分析（morphological spatial pattern analysis，MSPA）、最小面积阈值分析及蚁群算法提取冷岛网络，明确冷岛网络的时空分布特征和异质性；引入复杂网络理论中的高介数捷径（shortcut for maximum betweenness，SMB）策略与结构洞填充（reduction structural hole，RSH）策略对网络拓扑进行增边优化，并利用结构鲁棒性分析验证优化效果，同时依据复杂网络结构参数加权融合划分“源”重要性等级，叠加热岛斑块识别网络障碍点。研究旨在通过对城市群冷岛环境网络识别、特征分析及优化检验，最终实现减缓城市热环境风险与促进城市可持续发展的目标，为喀斯特山地城市群生态空间精准管控及热环境适配型“三生空间”布局优化提供决策参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

黔中城市群地处贵州省中部，涵盖贵阳市、遵义市、毕节市、安顺市、黔东南州、黔南州 6 个市（州）及贵安新区，共 33 个县（市、区），总面积 5.38 万 km^2，占贵州省总面积的 30.6%[19]。属亚热带季风气候，温暖湿润，年均气温为 10 ~ 20 ℃，年均降水量为 1 100 ~ 1 300 mm，主要集中在 5—10 月，全年分布不均[20]。城市群具有典型的喀斯特地貌特征，43.91% 地表存在土壤侵蚀，平均海拔 1 197.6 m，地势自西向东递减。2022 年末，城市群常住人口 1 885 万人，占贵州省的 48.5%，地区生产总值 12 100 亿元，占贵州省的 60.2%[19]，是西南地区经济增长的重要引擎。随着黔中城市群快速的城市化和地区一体化发展，喀斯特地区独特的异常热岛效应与城市扩张引发的传统热岛效应并存，对环境质量造成了严重的负面影响（图 1）。

1.2 数据来源

地表温度数据源自美国国家航空航天局提供的 MODIS LST 8 天合成产品数据集（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/），精度为 1 开尔文（K）。研究基于谷歌地球引擎（GEE）平台，分别对 2024 年 6 至 9 月的所有 MODIS LST 数据进行质量控制，计算各时期像元均值作为夏季研究区城市热环境的平均地表温度表征[21]。土地利用–覆被（LULC）数据由中国地理国情监测云平台（http://www.dsac.cn/）提供。城市边界数据取自全球城市边界数据集（http://data.ess.tsinghua.edu.cn/）。本研究综合利用地表温度、土地利用与城市边界数据，通过简化城市范围（simplify urban extent，SUE）算法识别城市冷岛斑块，统计非林地与非水体像元的平均温度作为背景场温度，将低于背景场温度的像元作为冷岛斑块，二者差值即为像元尺度的城市冷岛强度[22]。

2 材料与方法

研究首先基于 MODIS LST 数据，采用 SUE 算法识别城市冷岛斑块。其次，结合研究区地理特征选取阻力因子，经主客观集成赋权法构建综合阻力面。随后，结合 MSPA 与最小面积阈值分析识别冷岛网络“源”，基于蚁群算法识别廊道。继而利用复杂网络拓扑结构调整策略，对冷岛网络进行优化，并通过鲁棒性检验筛选最佳优化策略。最后，依据复杂网络拓扑结构参数划分“源”重要性等级，叠加城市群热岛斑块识别网络障碍点。技术流程如图 2。

2.1 冷岛网络构建

针对基于 SUE 算法识别出的城市群夏季冷岛斑块，利用 ArcGIS 10.6 将其转换为二值栅格数据（冷岛斑块赋值为前景，非冷岛区域为背景）[23]。随后进行 MSPA 分析，将冷岛斑块进一步划分为 7 类景观类型[24]：核心、孤岛、孔隙、边缘、环道、桥接和支线。其中，核心型冷岛斑块因其具有稳定且显著的降温效能，被定义为冷岛网络的潜在“源”。

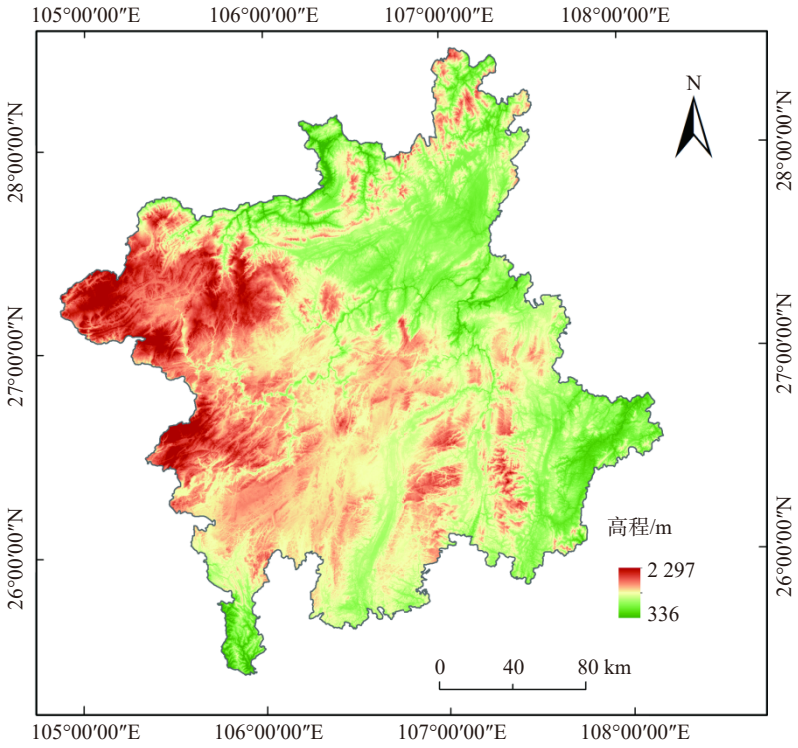


图 1　黔中城市群地理位置

Fig. 1　Geographical location of the central Guizhou urban agglomeration

冷岛“源”识别中，最小面积阈值影响“源”的数量与空间分布[25]，研究通过两阶段确定科学阈值：(1)最优分析尺度识别：量化 200 ~ 1 000 m 网格尺度下冷岛景观连通性指数、集聚度指数及分离度指数动态(图 3)，分析显示在 600 m 时连通性指数达峰值、集聚度指数此前稳定后显著下降、分离度指数此后趋于平稳，故将 600 m 定为“源”识别基准空间单元；(2)最小“源”面积阈值确定：在 600 m 网格尺度下，当“源”斑块面积阈值提升至 5 km^2 时，其数量下降速率显著降低(由指数衰减转为线性减少)，总面积占比稳定在 55% ~ 60%。这表明，面积小于 5 km^2 的斑块虽数量众多(约占斑块总数 70%)，但空间离散、冷岛效应弱，对“源”系统整体格局影响有限，故采用 5 km^2 作为最小面积阈值。

冷岛效应在复杂空间格局中扩散会受景观阻力阻滞，研究结合城市群的自然地理特性，遴选 LULC 类型、MSPA 景观类型以及基岩暴露率 3 类关键因子构建综合阻力面。其中，LULC 是冷岛产生与扩散的基础载体，不同覆被的地表反照率、蒸散发能力、热容量差异显著[26]；MSPA 可捕捉景观格局完整性对冷量传输的影响[27]，弥补 LULC 无法反映的同一覆被内结构差异阻力；另外，黔中喀斯特地貌占比超 60%(部分基岩暴露率超 80%)[19]，忽略基岩暴露率会低估无土区域强阻力，导致阻力面脱离实际。构建综合阻力面的核心是确定阻力因子权重[28]，为兼顾主观赋权法与客观赋权法的优势、提升权重科学性，研究采用层次分析法(analytical hierarchy process，AHP)与主成分分析(principal component analysis，PCA)集成赋权。其中，AHP 利用 YAAHP 软件来实现，PCA 利用 ArcGIS 10.6 中的空间主成分分析获取。研究按各因子对冷岛廊道形成的适宜性划分等级并赋予对应阻力值，利用空间加权叠加生成综合阻力面(表 1)。

研究引入蚁群算法提取冷岛网络廊道，该算法模拟蚂蚁觅食的正反馈与分布式计算特性，借信息素累积与挥发精准模拟能量在复杂景观基质的传导[29]。具体实践是将地表热能传输类比蚁群迁徙，冷岛“源”视作能量源点(巢穴/食物源)，景观基质作为信息素扩散场，进而将冷岛网络抽象为节点(源)与信息素轨迹构成的动态优化系统。研究中，该算法利用 Python 软件中的“Pheromone Path Mapping”模块实现，设置信息素挥发系数 $\rho = 0.5$、启发因子权重 $\alpha = 1$、期望因子权重 $\beta = 2$，经 200 次迭代计算识别冷岛网络廊道[16]。

2.2　冷岛网络优化

网络信息动力学行为与其拓扑结构密切相关，调整拓扑可优化该行为、提升网络信息容量。复杂网络拓扑调整含删边、增边、重连边及边有向化 4 种方式[15]，因城市冷岛网络为无向无权重结构，删边会降低其传输效率与性能，故本研究以增边为核心优

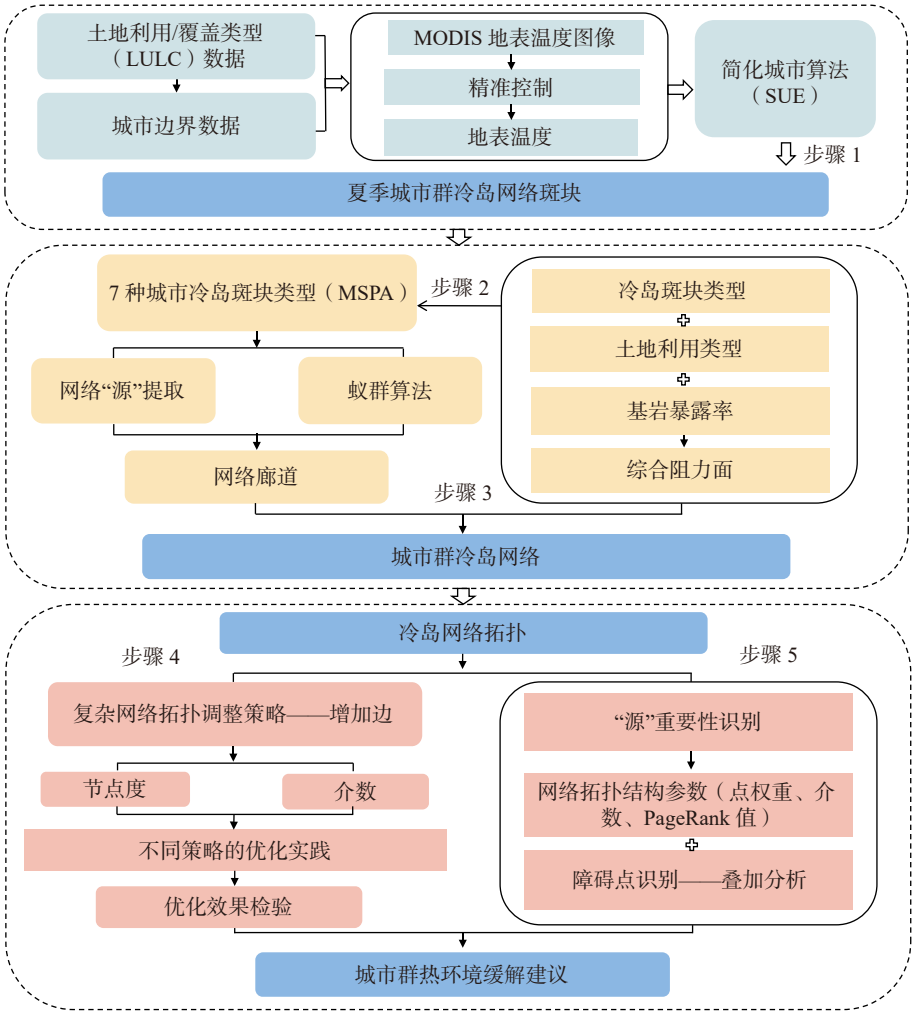


图 2 技术流程

Fig. 2 Technical processes

化手段。具体采用 2 种优势增边策略：(1)SMB 策略，即优先在介数中心性最高的节点对间加捷径边，缩短关键枢纽节点最短路径，提升核心路径传输效率[17]；(2)RSH 策略，即引入结构洞理论，在存在结构洞（缺乏直接连接的节点对）处加边，减少信息障碍、促进信息流均衡，提升无标度网络信息容量[30]。相较于传统低度优先（low degree first，LDF）、低介数优先（low betweenness first，LBF）策略，SMB 与 RSH 可实现更高信息容量、更短平均最短路径，且信息流分布更均匀[16]。结合《黔中城市群发展规划（2021—2035 年）》中“区域生态用地增量年均仅为现有廊道用地 12%”的约束，研究将增边数量设为现有廊道总数的 10%，此比例可通过优化存量用地实现，无需突破用地指标、挤占农业或城镇空间。冷岛网络优化及鲁棒性验证均通过 Matlab 2018 完成。

2.3 冷岛网络优化效果检验

结构鲁棒性分析可表征复杂系统受外界干扰时维持功能与结构特性的能力，是评估多领域复杂系统结构性能的关键指标[15]。其核心指标包括连接鲁棒性（R_c）和恢复鲁棒性，其中，恢复鲁棒性进一步分为边恢复鲁棒性（R_e）和节点恢复鲁棒性（R_d）[16]。连接鲁棒性衡量网络部分节点或边失效后维持原有连通结构与核心功能的能力，恢复鲁棒性则度量网络遭破坏后恢复至原本性能水平的能力[30]。通过该分析可筛选增强网络信息承载与传输效率的最优策略，进而保障优化后的城市冷岛网络发挥最大生态效能。以上指数计算公式如下所示。

$$R_c = \frac{C}{N - N_r} \tag{1}$$

$$R_e = 1 - \frac{N_r - N_d}{N} \tag{2}$$

$$R_d = 1 - \frac{M_r - M_e}{M} \tag{3}$$

式中：C 为去除部分节点后网络最大连通子图中节点的数量，N 为节点总数，N_r 为被去除的节点数目，N_d 为网络在去除部分节点后恢复的节点数目，M_r 为被去除的边数量，M_e 为边的恢复数量，M 为边的总数目。

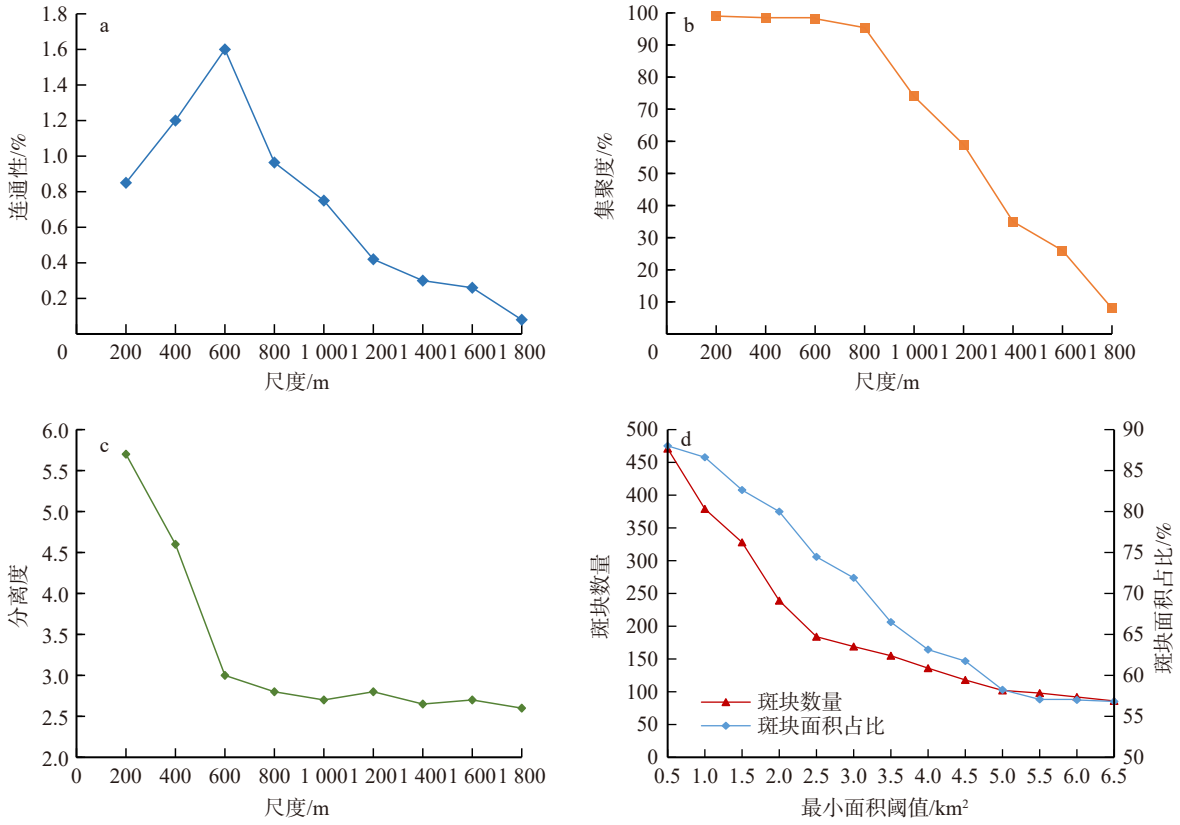


图 3　研究区冷岛网络“源”最小面积阈值

Fig. 3　Minimum area threshold of cold island network “source” in the study area

表 1　阻力因子及权重

Tab. 1　Resistance factors and weights

指标层	AHP权重	PCA权重	最终权重	等级	阻力值
LULC	0.343	0.451	0.397	林地	5
				水域	10
				湿地	15
				草地	30
				耕地	50
				未利用地	80
				建设用地	100
基岩暴露率	0.321	0.171	0.246	＜ 15%	10
				15% ~ 30%	30
				30% ~ 45%	50
				45% ~ 60%	70
				＞ 60%	100
MSPA 景观类型	0.336	0.378	0.357	核心	0
				桥接	10
				环道	30
				支线	40
				孤岛	50
				边缘	60
				孔隙	70
				背景	100

2.4　冷岛网络“源”重要性及障碍点识别

识别冷岛网络“源”重要性等级是破解热环境治理资源有限性与冷岛效应空间异质性矛盾的核心前提，可为精准锚定关键调控节点、优化冷岛资源分配提供科学依据。本研究基于复杂网络理论，从节点自身连接性、节点所连边重要性、相邻节点连接性三维度构建评价体系，量化冷岛源地重要性（I_{sp}）：（1）节点度：反映源地直接连接范围，值越高则局部辐射能力越强[30]；（2）介数中心性：表征节点在网络最短路径中的桥梁作用，值越高，则对全局冷量流通的控制力越强[31]；（3）PageRank 值：衡量节点在整个网络中的影响力权重，值越高则受相邻节点支撑的协同降温能力越突出[32]。障碍点指显著提升冷岛网络热阻、阻断冷量传输连续性的空间单元[33]，本研究结合空间重叠度与功能影响度双重标准识别：（1）以热岛核心斑块（LST≥区域均值 + 2 倍标准差的区域）为基础，与冷岛网络廊道进行空间叠加[34]；（2）计算热岛斑块与廊道的重叠面积占廊道总长度比例（阈值 ≥20%，基于预实验确定），并通过连通性指数（connectivity index, CI）衰减率验证——热岛斑块存在时，若廊道 CI 值较无热岛时下降≥15%，则判定为障碍点[35]。该方法既保证障碍点识别的空间精准性，又通过功能衰减量化避免非关键重叠区域误判。相关计算公式如下。

$$I_{sp}=\left(\frac{D_i-D_{min}}{D_{max}-D_{min}}+\frac{B_i-B_{min}}{B_{max}-B_{min}}+\frac{P_i-P_{min}}{P_{max}-P_{min}}\right)/3 \quad (4)$$

$$D_i=\sum_i d_{ij} \quad (5)$$

$$B_i=\sum_{i\neq j\in V}\frac{\rho_{ij}(v)}{\rho_{ij}} \quad (6)$$

$$P_i=\sum_{i=0}^{n}\frac{P(T_{i-1})_{i-1}}{L(T_{i-1})} \quad (7)$$

式中：D_i为节点i的度，B_i为节点i的介数，P_i节点i的PageRank值，D为网络节点点权构成的数列，B为网络节点介数构成的数列，P为网络节点PageRank值构成的数列，d_{ij}是节点i到节点j连接，V是网络节点集合，ρ_{ij}节点i和j之间最短路径数目，$\rho_{ij}(v)$是节点i和j之间最短路径中经过节点v的路径数目，$P(T_{i-1})$是其他(指向i)各个节点的PageRank值，$L(T_{i-1})$是其他(指向i)各个节点的出度。

3 结果与分析

3.1 黔中城市群热环境

研究采用自然间断点法对LST进行空间分级，结果显示LST分布范围为16.72～37.68 ℃，热环境空间异质性显著(图4a)。高温区及次高温区主要集中于研究区中北部及东南部，其温度较区域均值高出3.0～6.3 ℃(图4b)。该空间格局与工业用地密集分布区高度吻合，下垫面以高比例不透水层为主，其低反照率与高热容特性导致太阳辐射吸收效率提升60%以上；同时，工业活动排放的废热通过改变局地能量平衡，加剧地表增温，形成热岛核心区。低温区及次低温区主要分布于南部及西南部，温度较区域均值低3.0～5.5 ℃，以大面积水体(河流/水库)与连片林地为主，水体凭借高比热容与强蒸发冷却效应，可吸收80%以上的入射短波辐射；林地则通过冠层遮荫及蒸腾作用，显著降低地表感热通量。中温区作为过渡带分布于高/低温区之间，以中低密度建成区为主，其地表覆盖以砖瓦建材与稀疏植被混合构成，具有中等热惯性与有限蒸散能力，导致日间储热能力有限而夜间降温缓慢，形成次级热岛风险区。

3.2 冷岛网络“源”及综合阻力面

黔中城市群共识别冷岛网络“源”102个，总面积为5 518.412 km^2，空间分布呈现显著异质性。“源”密集分布于研究区南部及西南部，呈片状聚集特征(图5a)；而北部及东北部仅存在零星点状分布。面积最大“源”(1 074.558 km^2)位于中西部区域，属老王山山脉。研究通过多种因素加权叠加产生的综合阻力面，基于自然断点法将其分为5个等级(图5b)。高阻力区集中分布于中部贵阳及东北部遵义，该区域人口与工业用地高度集聚，城市建筑密度大、路网密集，蓝绿空间分布不均且连通性差，叠加强烈人为干扰，形成冷岛传导高阻区；低阻力区主要位于西北部毕节及东南部黔南和黔东南，该区域生态基底保存完整，植被覆盖度高，工业及服务业开发强度低，阻力值较低。

3.3 黔中城市群冷岛网络

基于蚁群算法共提取出190条冷岛廊道，总长度为2 791.58 km，单条廊道长度介于1.08～32.76 km之间(图6)。从廊道空间分布特征来看，研究区内可识别性较强的冷岛廊道数量较少，部分廊道因受建成区阻隔导致连通性受损，整体冷岛网络呈现连通性薄弱、结构松散的特征亟需强化。东部、北部及西北部等区域的廊道存在空间连续性萎缩现象，各“源”间未形成紧密的廊道连接，部分“源”仅通过单一廊道与周边“源”相连。仅研究区西南部及中部部

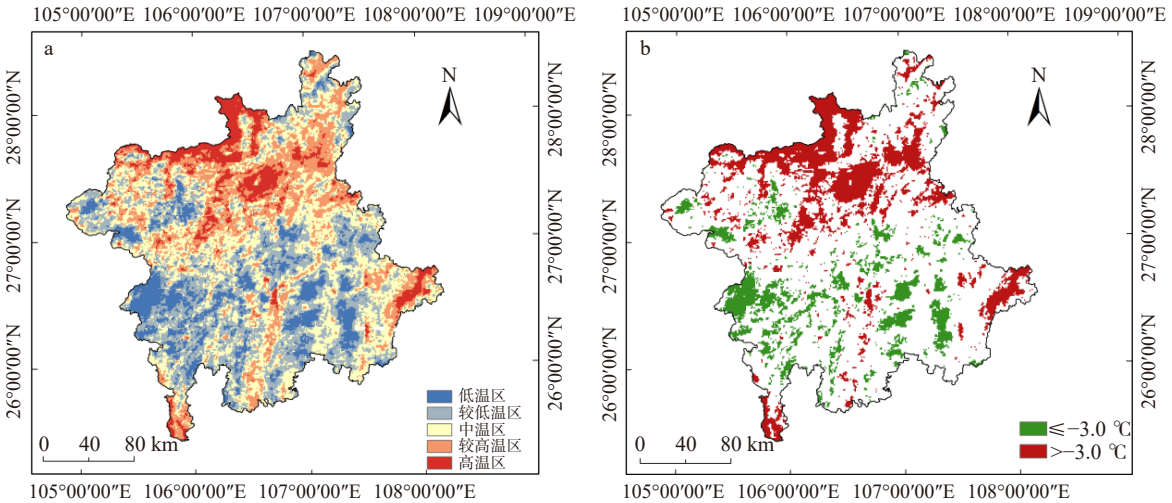


图4 研究区热环境(a)和相对平均地表温度(b)

Fig. 4 Thermal environment of the study area (a) and relative average surface temperature (b)

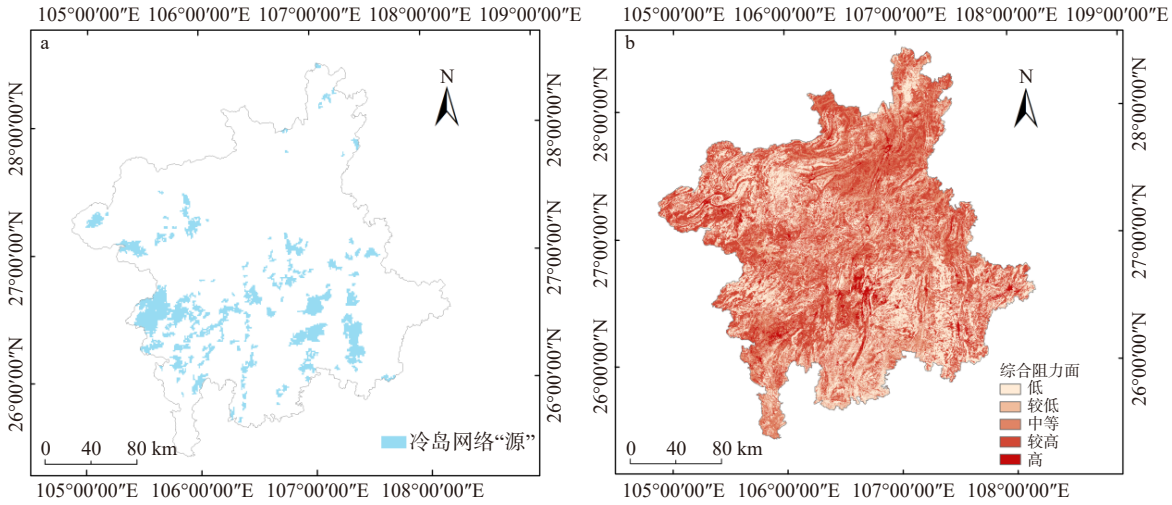


图 5　冷岛网络“源”(a)和综合阻力面(b)

Fig. 5　Cold island network “source” (a) and comprehensive resistance surface (b)

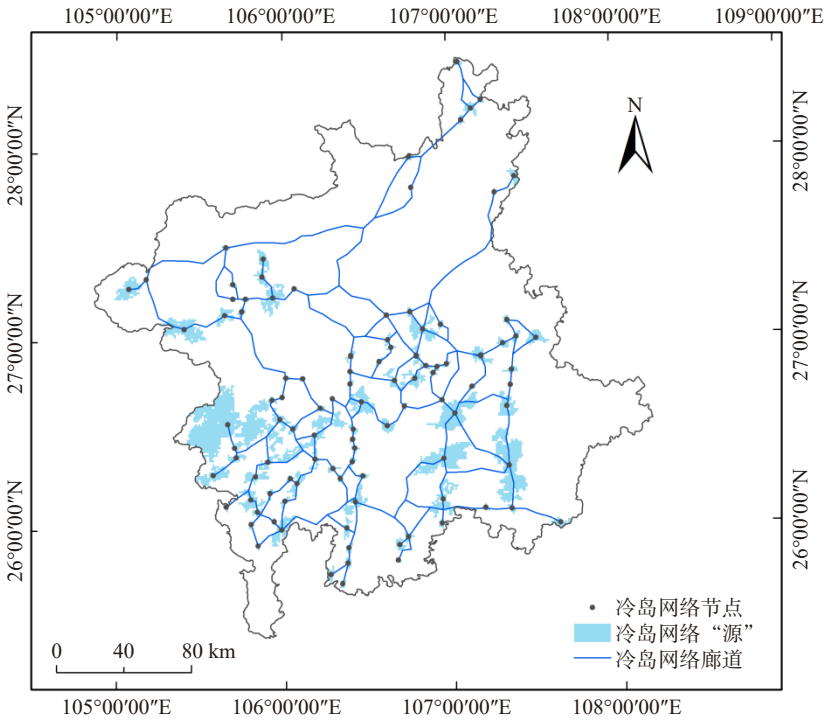


图 6　研究区冷岛网络

Fig. 6　Cold island network in the study area

分区域的冷岛廊道保持较好的结构完整性，基本维持城市群冷岛网络骨架，但局部仍存在结构缺陷。

3.4　冷岛网络优化

研究采用 SMB 与 RSH 策略对研究区冷岛网络进行优化，并利用结构鲁棒性分析验证优化效果，结果如下：优化前网络的初始连接鲁棒性指数为 0.73，连接性能较弱。在蓄意攻击条件下，网络鲁棒性迅速降低；当移除节点数量达到 26 个时，连接鲁棒性指数下降至 0.1 以下，此时网络结构已经被完全破坏，网络连接功能几乎完全丧失。随机攻击下，去除节点 36 个时，连接鲁棒性指数低于 0.1(图 7a)。经过 SMB 与 RSH 策略优化后，网络的初始连接鲁棒性指数分别提高至 0.82 和 0.78，较优化前均有显著改善。在蓄意攻击下，当连接鲁棒性指数低于 0.1 时，两种增边策略所需移除的节点数分别为 49 个和 36 个。在随机攻击下，连接鲁棒性指数低于 0.1 时，两种增边策略去除的节点数量分别为 52 个和 48 个(图 7b ~ c)。总之，SMB 优化后网络的连接初始连接度提升幅度更大，伴随去除节点数量的增加，鲁棒性下降速率更为缓慢。

在恢复鲁棒性方面，优化前网络在蓄意攻击下，去除节点少于 9 个，则受损节点可全部恢复；去除节点少于 13 个，则受损边可完全恢复。在随机攻击下，去除节点少于 11 个时，受损节点可完全恢复；去除

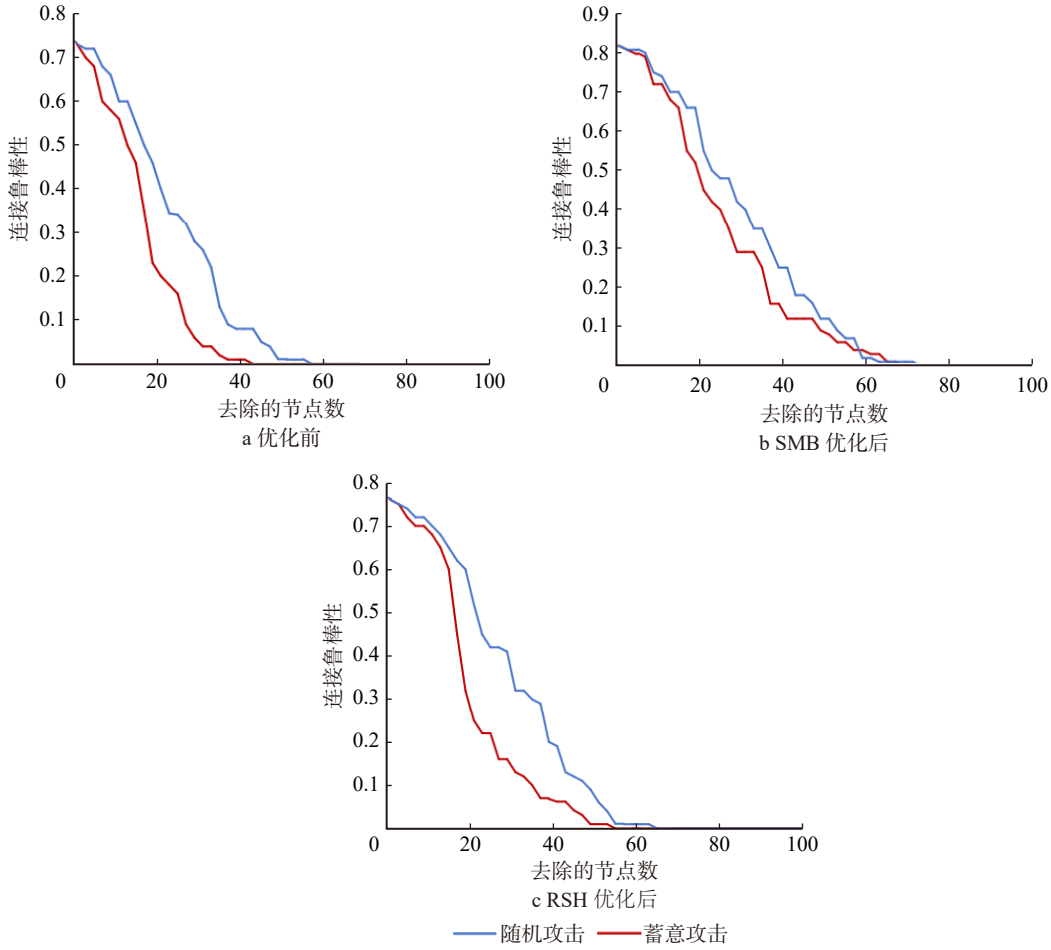


图 7 冷岛网络连接鲁棒性

Fig. 7 Connectivity robustness of cold island network

节点少于 12 个时，受损边可完全恢复(图 8a)。优化后，在蓄意攻击下，采用 SMB 与 RSH 策略时，节点数分别移除少于 22 个和 15 个即可完全恢复受损节点；边恢复则分别在去除少于 23 个和 16 个节点时实现完全恢复。在随机攻击下，SMB 与 RSH 策略分别可在去除少于 23 个和 19 个节点时完全恢复节点，在去除少于 25 个和 22 个节点时完全恢复边。整体而言，SMB 策略在节点与边的恢复鲁棒性上均优于 RSH 策略(图 8b～c)。

综合以上分析可知，采用 SMB 对城市群网络进行优化后，冷岛网络性能大幅度提升。空间布局上，优化后的网络不存在孤立冷岛节点，研究区东北部廊道得到有效补充环路，构成冷岛网络空间主干线。研究区中部及下南部是新增廊道的集中区域，这些廊道都为中型廊道，并较为均匀分布在大型廊道所构成的网络间隙，是对整个冷岛网络的有效补充。总之，优化后的冷岛网络整体形成了环形加放射型的网络结构，总体呈现出主次分明、重点突出、清晰明确的混合冷岛网络格局(图 9)。

3.5 “源”重要性及障碍点

研究使用 ArcGIS 10.6 中的自然断点方法，将I_{sp}划分为 5 个等级，总面积为 2 586.925 km^2(图 10a)。其中，5 级源地共 6 个，占源地总面积的 46.88%，主要由大型水体与山脉构成，具有植被覆盖率高、面积广阔及冷却效果显著的特征。4 级源地共 7 个，总面积 898.366 km^2，占比 16.28%，主要沿乌江中游干流鸭池河及城乡过渡带分布，斑块相对分散，主要由高山丘陵与湿地组成。3 级、2 级和 1 级源地数量分别为 13、35 和 41 个，面积依次为 866.574、792.753、373.895 km^2，三者合计占源地总面积的 36.84%。通过空间叠加分析，共提取 16 个障碍点(图 10b)，主要分布于研究区中部及北部，以城市建设用地、裸露山区及部分沙洲为主要类型。其中，11 个障碍点位于现有冷岛廊道上，是廊道维护与建设的重点防治对象；另有 5 障碍点处于经 SMB 优化策略确定的新增廊道范围内，这在一定程度上增加了廊道建设的实施难度。

4 讨 论

4.1 冷岛网络对黔中城市群热环境缓解的影响及与国土空间规划的衔接

黔中城市群作为西南喀斯特地貌典型代表，其

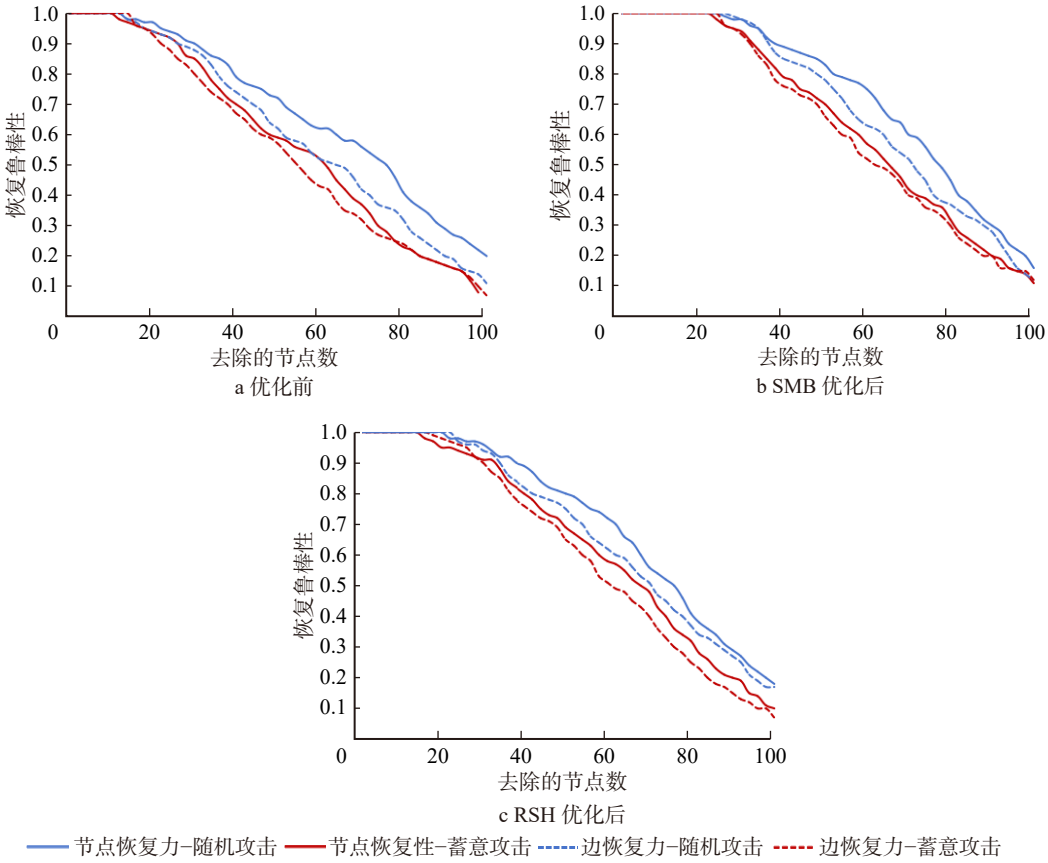


图 8　冷岛网络恢复鲁棒性

Fig. 8　Recovery robustness of cold island network

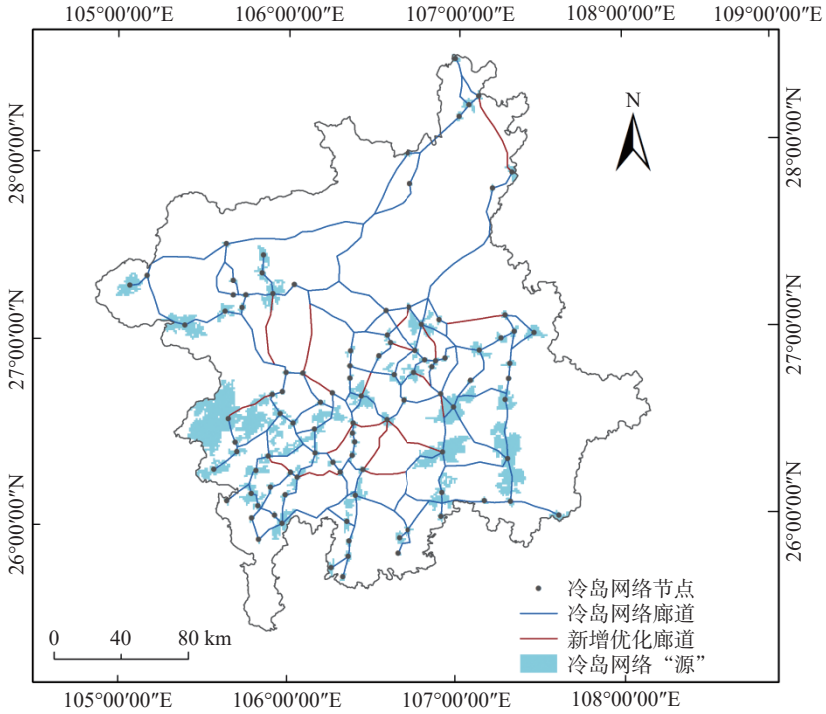


图 9　优化后的黔中城市群冷岛网络

Fig. 9　Optimized cold island network in the study area

国土空间开发长期面临生态脆弱性与城镇化需求的矛盾，《黔中城市群发展规划（2021—2035 年）》明确提出“构建生态安全格局、优化三生空间布局”的核心目标[19]，本研究提出的冷岛网络框架，正是对这一规划目标的技术响应与落地支撑。

研究通过 SMB 策略靶向增补 10% 关键廊道，

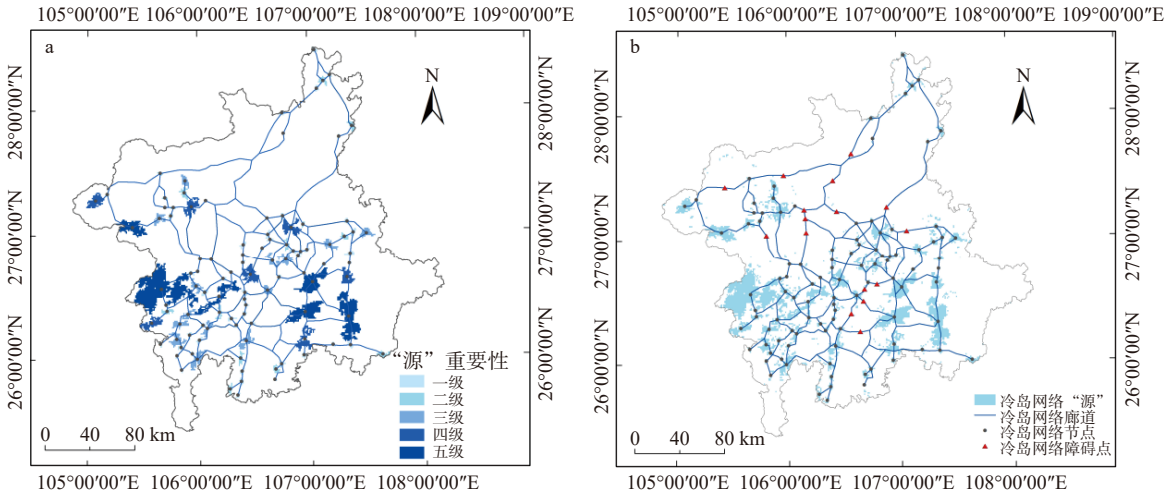


图 10 冷岛网络“源”重要性(a)和障碍点(b)

Fig. 10 Importance of “source” (a) and obstacle points (b) of cold island network

形成“三纵一横四核”的冷岛网络格局(图 11),其空间布局直接对接国土空间规划的核心管控要素:一是“三纵”廊道(乌蒙山、乌江—赤水河、苗岭—武陵山)均以规划划定的生态保护红线为基底,西部乌蒙山廊道串联喀斯特原始林地保护区,中部乌江—赤水河廊道衔接长江上游生态屏障管控区,东部苗岭—武陵山廊道对接黔东南生态功能区,实现冷岛网络与生态安全格局的深度融合;二是“一横”廊道(老王山—乌江)精准串联规划中的城乡生态过渡带,通过整合中小型水库、林地等分散生态斑块,弥补了国土空间规划中区域生态连通性的技术不足;三是“四大冷岛核心群”(乌蒙山、乌江、老王山、雷公山)均为规划明确的重点生态节点,其重要性分级与国土空间规划的生态节点保护优先级完全匹配,为规划中差异化生态管控提供量化依据。从热环境缓解实效看,该格局使冷岛网络连通性提升 38%,网络效率从 0.42 提升至 0.67,不仅能通过“西源—中输—东补”的冷量传输机制,缓解中北部工业密集区(规划中的“重点生产空间”)的热岛压力,还能通过北部“冷量屏障”抑制热岛向南部生态区(规划中的“重点生态空间”)扩散,实现生产空间降热、生态空间护冷、生活空间适温的三生空间热环境协同优化,直接呼应了国土空间规划“生态优先、绿色发展”的理念。

4.2 冷岛网络优化模型的适用性及规划可行性

山地城市国土空间规划受地形限制,存在用地

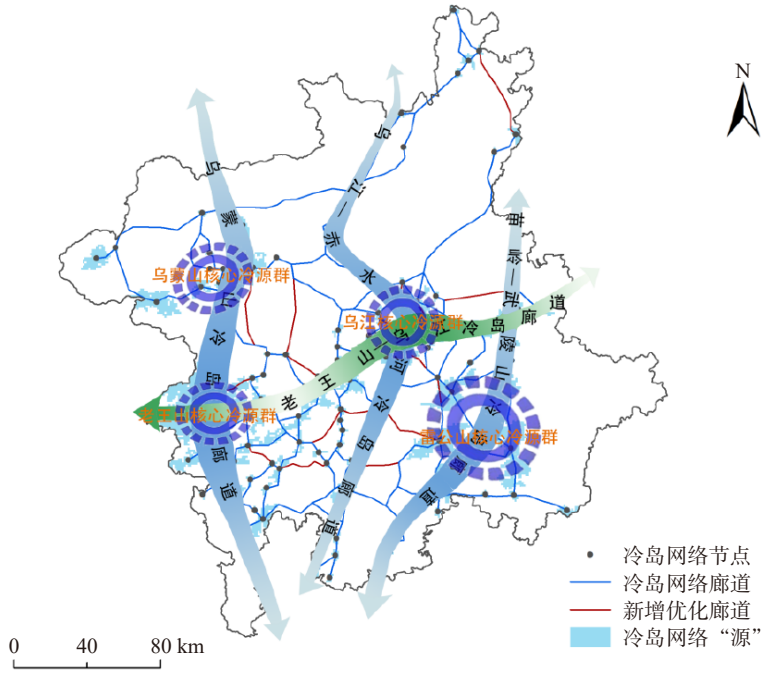


图 11 黔中城市群冷岛网络格局

Fig. 11 Cold island network pattern of central Guizhou urban agglomeration

局促、生态修复成本高的现实约束[36]，本研究引入的复杂网络优化模型（尤其是 SMB 策略），通过“最小干预—最大效益”的核心逻辑，实现了与规划实施条件的高度适配，其可行性可从 3 方面印证：

生态可行性：契合国土空间规划的底线管控要求。黔中城市群喀斯特地貌占比超 60%，国土空间规划将“石漠化敏感区、土壤侵蚀区”列为生态保护底线。SMB 策略通过优先强化高介数节点间的连接，避免在生态敏感区新建廊道——例如针对北部零星冷岛源，未新增跨石漠化区的廊道，而是通过修复现有廊道障碍点实现连通，生态扰动范围仅约为传统全域增绿模式的 1/5，完全符合规划不突破生态底线的管控要求。同时，模型识别的 102 个冷岛“源”中，87% 位于规划划定的生态空间内，其面积占城市群生态空间总面积的 31%，说明冷岛网络构建无需挤占农业或城镇空间，可依托现有生态基底施。

经济可行性：匹配国土空间规划的成本约束。山地城市生态工程成本显著高于平原地区，国土空间规划明确要求提高生态投资效益[19]。SMB 策略的靶向增边机制可大幅降低实施成本：一方面，新增廊道中 72% 沿现有交通廊道、河流岸线布局，可复用已有基础设施的征地范围，减少土地征收成本；另一方面，障碍点识别精准定位 16 个关键治理区，避免了全域治理的资源浪费。

实施可行性：衔接国土空间规划的管控体系。SMB 策略优化后的冷岛网络，可直接转化为国土空间规划的管控工具：一是“源”重要性分级对应规划生态节点管控等级，五级“源”纳入“一级生态管控区”，禁止开发建设；三、四级“源”纳入“二级生态管控区”，允许适度生态修复工程；二是障碍点治理可对接规划“城镇开发边界内用地调整”，11 个阻断现有廊道的障碍点，可通过拆违复绿、产业升级等规划手段整改[35]，5 个位于新增廊道的障碍点，可在城镇开发边界调整中优先避让[36]；三是网络结构可纳入规划“生态网络专项图则”，为后续详细规划中的绿道布局、蓝线划定提供依据。

4.3　局限及未来研究方向

本研究创新构建了“提取—优化—验证”的冷岛网络研究链条，弥补了喀斯特山地城市群冷岛网络与国土空间规划衔接的不足，但仍存在局限：一是部分新增廊道穿越城镇开发边界核心区，需进一步结合“用地兼容性分析”，在规划中明确“廊道与城镇建设的协调机制”；二是冷岛网络的多功能性未纳入研究，未来需结合国土空间规划的“生态系统服务”目标，构建“多目标优化模型”，实现热环境缓解与其他生态功能的协同。

5　结　　论

本研究以西南黔中城市群为研究区，通过构建与优化冷岛网络，系统探究了喀斯特山地城市群热环境缓解的科学路径，主要结论如下：

（1）黔中城市群热环境空间异质性显著，高温区及次高温区集中于中北部及东南部；低温区及次低温区分布于南部及西南部，以大面积水体与连片林地为主，冷却效应显著，形成鲜明的热环境空间分异格局。

（2）共识别 102 个冷岛网络“源”，总面积 5 518.412 km^2，空间分布呈现“南密北疏”特征。

（3）共提取出 190 条冷岛廊道，总长 2 791.58 km，原始网络连通性薄弱、结构松散，东部、北部及西北部廊道存在连续性萎缩，部分“源”仅通过单一廊道连接。

（4）SMB 策略优化效果优于 RSH 策略，SMB 优化后网络初始连接鲁棒性从 0.73 提升至 0.82，蓄意攻击下需去除 49 个节点才导致连接鲁棒性低于 0.1，随机攻击下需去除 52 个节点，恢复鲁棒性亦显著增强；空间上形成环形加放射型网络，东北部补充环路构成主干线，中部及下南部新增中型廊道填充网络间隙，消除孤立节点，形成“主次分明、结构清晰”的冷岛网络格局。

（5）基于复杂网络参数识别出 6 个 5 级冷岛“源”，占“源”总面积的 46.88%，以大型水体与山脉为主，冷却效果突出；共提取 16 个障碍点，其中 11 个阻断现有廊道，5 个位于新增优化廊道，是冷岛网络维护与建设的重点治理对象。

参　考　文　献

[1] He C M, Li S Q, Dong X. A new method for evaluate the cold island effect in cities [J]. Urban Climate, 2024, 54: 101846.

[2] 曹丽琴, 张良培, 李平湘, 等. 城市下垫面覆盖类型变化对热岛效应影响的模拟研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2008, 33(12): 1229−1232.
Cao L Q, Zhang L P, Li P X, et al. Simulation study of influence of change of land surface types on urban heat island [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(12): 1229−1232.

[3] 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.

[4] Luo Z R, Liu J H, Zhang S H, et al. Spatiotemporal evolution of urban rain islands in China under the conditions of urbanization and climate change [J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 1459.

[5] 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.

[6] 王加运. 城市地表热环境影响因素与降温效应供需耦合研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2024.
Wang J Y. Study on the coupling of supply and demand of urban surface thermal environment influencing factors and cooling effect[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024.

[7] Duan S, Luo Z, Yang X, et al. The impact of building operations on urban heat/cool islands under urban densification: a comparison between naturally-ventilated and air-conditioned buildings [J]. Applied Energy, 2019, 239: 1536.

[8] Zhang Y, Wang Q, Kong Y Q, et al. Analysis of cold island effect in city parks from the perspectives of maximum and cumulative values: a case study of Xi'an City [J]. Archives of Environmental Protection, 2024, 50(1): 95−109.

[9] Zhou P, Liu Z Y. Likelihood of concurrent climate extremes and variations over China [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(9): 094023.

[10] Xu D, Wang Y Q, Zhou D, et al. Influences of urban spatial factors on surface urban heat island effect and its spatial heterogeneity: a case study of Xi'an [J]. Building and Environment, 2024, 248: 111072.

[11] Cheng S Y, Li S, Qi F. Research on the construction method of heat island network resistance surface based on county perspective [J]. Atmosphere, 2023, 14(12): 1740.

[12] 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.

[13] 葛荣凤, 王京丽, 张力小, 等. 北京市城市化进程中热环境响应 [J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6040−6049.
Ge R F, Wang J L, Zhang L X, et al. Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6040−6049.

[14] Yang X Y, Li Y G, Luo Z W, et al. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms [J]. International Journal of Climatology, 2016, 37(2): 890−904.

[15] Zhang W B, Han G J, Feng Y X, et al. A survivability clustering algorithm for ad hoc network based on a small-world model [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 84(3): 1835−1854.

[16] Song S, Xu D W, Hu S S, et al. Ecological network optimization in urban central district based on complex network theory: a case study with the urban central district of Harbin [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(4): 1427.

[17] Song S, Wang S H, Shi M X, et al. Multiple scenario simulation and optimization of an urban green infrastructure network based on complex network theory: a case study in Harbin City, China [J]. Ecological Processes, 2022, 11(1): 33.

[18] 于强. 基于复杂网络理论的荒漠绿洲区生态网络研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Yu Q. Research on ecological network of desert oasis based on complex network theory[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[19] Zeng C Y, Wu S H, Zhou H, et al. The impact of urbanization growth patterns on carbon dioxide emissions: evidence from Guizhou, west of China [J]. Land, 2022, 11(8): 1211.

[20] Geng S B, Yang L, Sun Z Y, et al. Spatiotemporal patterns and driving forces of remotely sensed urban agglomeration heat islands in South China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 800: 149499.

[21] 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 等. SSP-RCP 情景下京津冀城市群夏季热环境空间网络识别与评估 [J]. 地理与地理信息科学, 2024, 40(3): 29−36.
Qiao Z, Chen J Y, Wang N, et al. Spatial network identification and evaluation of summer thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration under SSP-RCP scenario [J]. Geography and Geographic Information Science, 2024, 40(3): 29−36.

[22] Zhou H Z, Wang Q Q, Zhu N, et al. Optimization methods of urban green space layout on tropical islands to control heat island effects [J]. Energies, 2022, 16(1): 368.

[23] 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.

[24] 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.

[25] Irfeey A M M, Chau H W, Sumaiya M M F, et al. Sustainable mitigation strategies for urban heat island effects in urban areas [J]. Sustainability, 2023, 15(14): 10767.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 孟宪磊. 不透水面、植被、水体与城市热岛关系的多尺度研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
Meng X L. Multi-scale relationships between impervious surface, vegetation, water and urban heat island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.

[29] Rodriguez-Alvarez J. Urban energy index for buildings (UEIB): a new method to evaluate the effect of urban form on buildings' energy demand [J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 148: 170−187.

[30] Wang D, Liu E, Liu D, et al. Rsh: a link-addition strategy for capacity enhancement in scale-free networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2110−2113.

[31] 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 S F, Wen F F, Qiu Y W, et al. Construction and optimization of cold and heat island spatial network in metropolitan area-integration of interpretable machine learning and circuit theory [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 152−166.

[32] 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.

[33] Benazi M, Lounnas B, Mokhtari R. A complex network community detection algorithm based on random walk and label propagation [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2022, 33(9): e4518.

[34] 杨可明, 周玉洁, 齐建伟, 等. 城市不透水面及地表温度的遥感估算 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 134−139.
Yang K M, Zhou Y J, Qi J W, et al. Remote sensing estimating of urban impervious surface area and land surface temperature [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(2): 134−139.

[35] Ramsay E E, Duffy G A, Burge K, et al. Spatio-temporal development of the urban heat island in a socioeconomically diverse tropical city [J]. Environmental Pollution, 2023, 316: 120443.

[36] 涂荣誉. 近 20 年重庆中心城区热环境时空演变研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
Tu R Y. Study on the temporal and spatial evolution of thermal environment in the central urban area of Chongqing in the past 20 years [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.

（责任编辑　范　娟　李　契
责任编委　李　雄）