

引用格式: 李婷, 李朝奎, 从政, 等. 基于遥感生态指数的大冶矿区生态网络格局构建及优化[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 601–610. LI Ting, LI Chaokui, CONG Zheng, *et al.* Construction and optimization of ecological network pattern in Daye mining area based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 601–610.

基于遥感生态指数的大冶矿区生态网络格局构建及优化

李 婷^{1,2}, 李朝奎³, 从 政⁴, 冯媛媛^{1,3}, 毛 艳²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 建筑与设计学院, 湖南湘潭 411201; 3. 湖南科技大学 测绘遥感信息工程湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201; 4. 湖南省轻纺设计院有限公司, 湖南长沙 410035)

摘要: 【目的】湖北省大冶矿区是中国重要的铜矿石和铁矿石生产基地, 在开采资源促进地区经济发展的同时, 也给当地生态平衡带来了巨大挑战。从宏观层面构建科学合理的生态网络, 识别保护和修复的关键区域, 对于维护当地生态平衡至关重要。【方法】以大冶矿区为研究对象, 采用遥感生态指数(RSEI)的方法识别生态源地、修正生态阻力面, 进而利用电路理论识别生态廊道、生态夹点及生态障碍点, 构建大冶矿区生态网络格局。【结果】大冶矿区的生态网络格局由11处生态源地、18条生态廊道、17处生态夹点及32处生态障碍点构成。生态源地主要分布在市域南部、西部、东部, 总面积为442.24 km²; 生态廊道总长度为104.55 km, 其中中南部地区多为高等级阻力廊道, 东北部多为中等级阻力廊道, 西部多为低等级阻力廊道; 生态夹点主要集中在西部低阻力廊道上, 而生态障碍点则多分布于中南部高阻力廊道上。基于以上要素, 构建“南山、北湖、多廊、多点”的生态网络格局。【结论】遥感生态指数的方法能有效识别出具有高生态价值和连通性的生态源地。基于修正后的生态阻力面, 能够精准识别出具有最小阻力值的生态廊道, 显著提升了整个生态网络结构的合理性。图6表4参30

关键词: 生态网络格局; 遥感生态指数; 电路理论; 大冶矿区

中图分类号: P901 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0601-10

Construction and optimization of ecological network pattern in Daye mining area based on remote sensing ecological index

LI Ting^{1,2}, LI Chaokui³, CONG Zheng⁴, FENG Yuanyuan^{1,3}, MAO Yan²

(1. School of Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. School of Architecture and Design, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Information Engineering for Surveying, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 4. Hunan Light-Textile Industrial Design Institute Co., Ltd., Changsha 410035, Hunan, China)

Abstract: [Objective] Daye mining area in Hubei Province is a significant production base for copper and iron ore in China. While exploiting resources to promote regional economic development, it also poses significant challenges to local ecological balance. This study aims to construct a scientific and reasonable ecological network from a macro perspective, and identify key areas for protection and restoration, which is crucial for maintaining the ecological equilibrium in the region. [Method] Taking Daye mining area as the research object, remote sensing ecological index (RSEI) was adopted to identify ecological source areas and

收稿日期: 2024-08-09; 修回日期: 2025-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42171418); 湖南省社会科学成果评审委员会项目(XSP25YBC241); 湖南省普通本科高校教学改革重点项目(202401000926)

作者简介: 李婷(Orcid: 0009-0009-7058-2556), 高级工程师, 博士研究生, 从事国土空间与生态保护研究。E-mail: 155405544@qq.com。通信作者: 李朝奎(Orcid: 0000-0002-2871-2179), 教授, 博士, 从事地理空间信息与智慧城市研究。E-mail: chkl_hn@163.com

correct ecological resistance surface. Then, circuit theory was used to identify ecological corridors, ecological pinch points, and ecological obstacle points, and to construct the ecological network pattern of Daye mining area. [Result] The ecological network pattern of Daye mining area consisted of 11 ecological source areas, 18 ecological corridors, 17 ecological pinch points, and 32 ecological obstacle points. The ecological source areas were primarily distributed in the southern, western, and eastern parts of the city, covering a total area of 442.24 km². The total length of the ecological corridor was 104.55 km, of which the central and southern regions were characterized by high-grade resistance corridors, the northeast was mostly medium-grade resistance corridors, and the west was mostly low-grade resistance corridors. Ecological pinch points were mainly concentrated on the low-resistance corridors in the west, while ecological barrier points were mostly distributed on high resistance corridors in the central and southern regions. Based on the above elements, an ecological network pattern of “south mountain, north lake, multi-corridor, and multi-point” was constructed. [Conclusion] RSEI can effectively identify ecological source areas with high ecological value and connectivity. Based on the revised ecological resistance surface, it is possible to accurately identify the ecological corridor with the minimum resistance value, which significantly enhances the rationality of the entire ecological network structure. [Ch, 6 fig. 4 tab. 30 ref.]

Key words: ecological network pattern; remote sensing ecological index; circuit theory; Daye mining area

20世纪以来,科学技术和社会生产力实现了质的飞跃^[1],同时也伴随着一系列生态问题。矿山地区兼具城镇发展和矿山开采的双重特性,生态尤为脆弱。大冶市是中国重要的铜矿石和铁矿石生产基地,数千年的开采导致了植被覆盖率下降、大气污染、水土流失、地面塌陷等问题。这些问题破坏了区域生态系统,也导致了生态格局失稳,因此,矿山地区生态系统亟需综合保护修复^[2]。

构建生态廊道和生物多样性保护网络,可以提升生态系统的整体性和稳定性,因此,从宏观角度出发,构建科学的生态网络,识别保护和修复的关键区域,对于维护地区生态平衡至关重要^[3]。目前学者主要基于“源地识别—阻力面构建—生态廊道提取—生态夹点、障碍点识别”的范式构建生态网络格局^[4]。该方法的关键在于源地的识别与阻力面的设置。已有生态源地的识别方法主要包括面积界定法^[5]、生态系统服务功能评价法^[6]、形态空间格局分析法(MSPA)^[7]、形态空间格局分析法+景观连通性法^[8]等,其中形态空间格局分析法+景观连通性法是目前应用最广的方法之一。该方法主要通过形态空间格局分析法识别景观核心区,再根据面积大小选取排名靠前的斑块进行景观连通性评价,从而得到生态源地。相关研究表明:源地的生态质量关系到生态系统的稳定性和可持续发展^[9],但现有方法在提取生态源地过程中鲜少考虑源地的生态质量。在阻力面构建方面,研究主要选取土地利用类型、高程、坡度、距道路和水系距离作为阻力面因子^[10],也有学者在矿山地区的研究中加入距矿区距离因子^[11]。人类活动强度是引发地区生态质量差异的重要因素,然而以往的研究对土地利用因子均采用统一赋值。这种方法忽视了人类活动对生态阻力的复杂影响,因此,顾及生态质量的阻力面构建方法值得进一步探究。

本研究以湖北省大冶矿区为研究对象,在形态空间格局分析法+景观连通性法的基础上,引入遥感生态指数(RSEI)识别生态源地,综合考虑土地利用的生态异质性,利用遥感生态指数修正土地利用阻力因子,构建生态阻力面。在此基础上,应用电路理论识别生态廊道、生态夹点及障碍点,构建大冶矿区生态网络格局。最后,根据构建的生态网络格局提出优化建议。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

大冶市位于湖北省东南部,长江中游南岸,29°40'~30°15'N,114°31'~115°20'E,总面积为1566.00 km²。大冶市矿产资源丰富,其资源开采为湖北省甚至全国的经济发展做出了巨大贡献,但同时也给大冶市带来了生态环境上的巨大损失。据统计,全市因资源开采造成不同程度损坏的地表面积达69.43 km²,占全市总面积的4.43%。由矿山开采引发的地质灾害点共计349处。资源开发过程中植被、景

观、土地、水资源、大气均遭受不同程度的污染, 生态恢复与治理任务十分艰巨。本研究充分考虑大冶采矿用地分布的分散性以及构建生态网络格局的全局性需求, 将研究范围设定为大冶市全域。

1.2 数据源及处理

2022 年大冶市的土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) ; 高程数据来自地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>) , 坡度数据运用 ArcGIS 10.8 坡度工具提取得到; 夜间灯光数据来源于 2022 年 CHEN 等^[12] 的研究 (<https://dataVERSE.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/YGIVCD>) ; 路网数据来源于全国地理信息目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>) ; 选择在云层覆盖最少的 2022 年 9 月采集 Landsat 8 卫星图像数据, 数据源于美国地质勘探局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) , 植被指数 (NDVI)、湿度指数 (WET)、裸地指数 (NDBSI) 和地表温度指数 (LST) 均通过 ENVI 软件对 Landsat 8 数据进行反演得到, 采矿用地数据利用 ENVI 软件对 Landsat 8 数据进行监督分类提取得到。以上数据统一转换至相同的投影坐标系统, 并设定 30 m 空间分辨率, 以确保数据的一致性。

2 研究方法

2.1 生态源地识别

生态源地是生态保护的“源”, 对于构建生态网络格局、维持区域生态稳定具有重要意义^[13]。本研究首先利用形态空间格局分析法识别出核心区, 其次利用遥感生态指数模型计算出核心区的遥感生态指数均值, 提取生态指数较高的前 30 个斑块进行连通性分析, 得到最终的生态源地。

2.1.1 基于形态空间格局分析法+遥感生态指数获取景观核心区 ①形态学空间格局分析。形态空间格局分析法可以定量识别研究区内栅格图像的景观类型^[14]。利用获取的土地利用数据, 挑选植被覆盖率超过 60% 的林地、水体作为前景要素, 而其他用地类型为背景。运用 ArcGIS 10.8 将数据转换成 TIFF 格式的二值栅格图像。随后, 使用 Guidos 软件, 通过八邻域分析技术, 将边缘宽度参数设定为 30 m, 最终识别出核心区、岛状斑块、环道区、桥接区、边缘区、孔隙和支线等 7 种不同的景观类型。②遥感生态指数。由于遥感技术具有大范围、长时间序列监测的优势, 2013 年徐涵秋^[15] 提出了一种完全基于遥感影像的生态监测评估模型, 该模型主要通过遥感影像中的不同波段组合运算, 提取植被指数、湿度指数、裸地指数和地表温度指数 4 个指标, 经主成分分析集成得到最终的遥感生态指数。具体计算方法参照文献^[16]。该方法可在一定程度上减少人为主观设权造成的误差, 从而快速得到区域生态质量评价结果, 且简单易用, 在城市、矿区、流域的生态环境质量监测中得到了广泛应用^[17]。本研究利用遥感生态指数代表研究区生态质量。

2.1.2 景观连通性选取生态源地 景观连通性对于物种的迁移和流动至关重要^[18]。利用 Conefor 软件, 选取整体连通性指数 (TIC) 和潜在连通性指数 (PCI), 并评估两者之间的相对重要性 (RI)。参考现有研究^[19], 将斑块间的连通性距离阈值设定为 1~10 km, 连通性概率设定为 0.5。基于指数的变化趋势, 最终确定 5 km 为合适的距离阈值, 计算得到整体连通性指数、潜在连通性指数、相对重要性。选取相对重要性大于 1 且面积大于 1 km² 的斑块作为生态源地。

2.2 生态阻力面构建

2.2.1 遥感生态指数修正土地利用阻力因子 土地利用是人类活动对生态系统影响最为直接的表现形式^[20], 是构建阻力面最为关键的因素, 但现有研究对同一土地利用类型采用统一赋值, 掩盖了同一用地类型的生态异质性。利用遥感生态指数对土地利用类型阻力面进行修正, 计算公式为: $P^* = E_j/E_s \times P$ 。其中: P^* 为经遥感生态指数校正后的土地利用类型阻力值; P 为修正前土地利用类型的阻力值; E_j 为第 j 个像元的遥感生态指数值; E_s 为第 s 种土地利用类型的遥感生态指数均值。遥感生态指数越大代表生态条件越好, 相应的生态阻力值越小, 因此需要通过 1 减去遥感生态指数标准化值的方式进行生态阻力值计算。

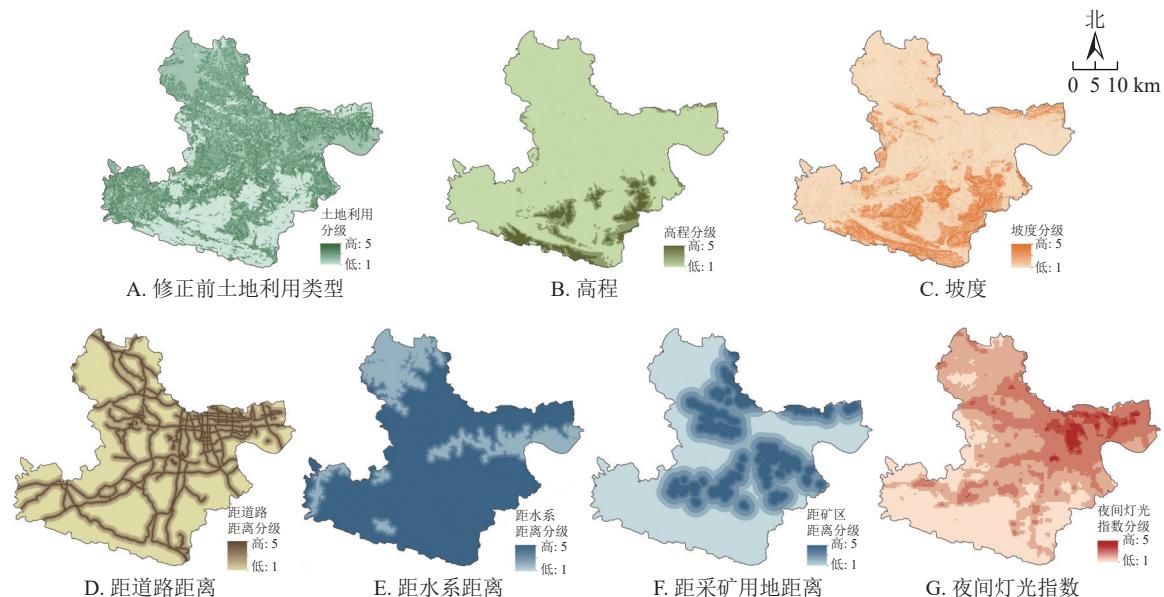
2.2.2 生态阻力面的构建 结合已有研究^[21], 选取土地利用类型、距道路距离、距水系距离、夜间灯光指数、高程、坡度及考虑采矿影响的矿区距离等为阻力因子, 其中土地利用类型是经过遥感生态指数修正的。除土地利用类型因子外, 将其他因子的阻力值统一分为 1~5 级, 并通过层次分析法 (AHP) 确定各个指标的权重 (表 1, 图 1)。鉴于土地利用类型综合了遥感生态指数, 因此在权重分配上占比最高。

表1 各阻力因子分级及权重

Table 1 Classification and weights of resistance factors

阻力值分级	阻力因子						
	修正前土地利用类型	高程/m	坡度/(°)	距道路距离/m	距水系距离/m	距采矿用地距离/m	夜间灯光指数/(nW·cm ⁻² ·sr ⁻²)
1	林地	<200	<8	≥1 000	<100	≥3 000	<3
2	水体	200~400	8~15	500~1 000	100~200	3 000~2 000	3~8
3	耕地	400~600	15~25	200~500	200~500	1 000~2 000	8~15
4	建设用地	600~800	25~35	100~200	500~1 000	1 000~500	15~25
5	采矿用地	≥800	≥35	<100	≥1 000	<500	≥25
权重	0.5	0.05	0.10	0.08	0.05	0.12	0.10

说明：各阻力因子数值采用上限排除法。



基于湖北省自然资源厅标准地图服务网站鄂S(2024)008号标准地图制作，底图边界无修改。

图1 单因子阻力面值示意图

Figure 1 Single factor resistance face value

2.3 生态网络格局构建

2.3.1 生态廊道构建 生态廊道是生态源地之间物种迁移的桥梁^[22]。基于电路理论，利用随机游走的电流来模拟物种的随机移动特性^[23]，通过 Linkage Mapper 工具箱中的 Building Network and Map Linkages 工具，利用最小成本路径方法计算物种在不同生态源地间迁移所需克服的累计阻力值，将成本加权距离阈值设置为 200 km，得到最小成本路径为生态廊道，最后用成本加权距离与最小成本路径的比值对生态廊道连通性进行分级，比值越小说明生态廊道连通性越强。

2.3.2 生态夹点和生态障碍点识别 生态夹点是生态环境最脆弱、最敏感的区域^[24]。利用 Linkage Mapper 工具箱中的 Pinchpoint Mapper 工具，结合自然间断点法对廊道的电流密度进行分级，将电流密度最高的区域视为生态夹点。生态障碍点是生态系统中对物种迁移、流动产生阻碍的区域。通过 Linkage Mapper 工具箱中的 barrier mapper 工具，以一定搜索半径的移动窗口法计算改进得分，得分越高表示该区域对物种活动的阻碍程度越高，为高障碍点区域。再通过自然断点法对改善系数分级，由高到低依次为极重要改善区、重要改善区、一般改善区。

3 结果与分析

3.1 生态源地选取

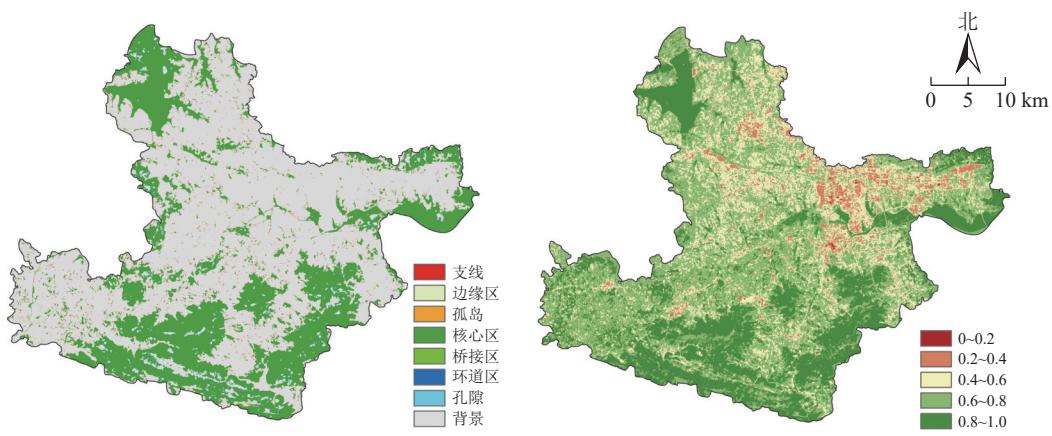
3.1.1 形态空间格局分析法识别结果 利用形态空间格局分析法得到研究区的景观分类结果(表2、图2A)。

结果显示: 占比最大的为核心区, 总面积为 513.83 km^2 , 占前景要素总面积的 84.24%。核心区主要为南部的幕埠山余脉, 北部的保安湖国家级湿地公园, 东部的大冶湖, 面积达 370.05 km^2 , 对核心区面积的贡献率高达 60.08%。相比之下, 对生物迁移至关重要的桥接区, 仅占前景要素的 0.20%, 表明现有的生态廊道较少, 生态连通性较差。综上所述, 尽管大冶矿区存在如幕埠山余脉等大尺度的核心区斑块, 但桥接区占比低, 生态连通性较差。

表 2 景观类型分类统计

Table 2 Classification and statistics of landscape types

景观类型	面积/ km^2	占前景要素 总面积的百分比/%	景观类型	面积/ km^2	占前景要素 总面积的百分比/%	景观类型	面积/ km^2	占前景要素 总面积的百分比/%
核心区	513.83	84.24	边缘区	66.32	10.87	支线	7.82	1.28
桥接区	1.25	0.20	孔隙	15.13	2.48	总计	609.96	100.00
孤岛	4.69	0.77	环道区	0.92	0.15			



A. 基于MSPA的景观类型

B. 遥感生态指数

基于湖北省自然资源厅标准地图服务网站鄂S (2024) 008号标准地图制作, 底图边界无修改。

图 2 基于 MSPA 的景观类型与遥感生态指数示意图

Figure 2 Landscape types based on MSPA and remote sensing ecological index

3.1.2 遥感生态指数分类结果 使用 ENVI 软件计算得到大冶矿区遥感生态指数, 将遥感生态指数(下限排除法)划分为优(0.8~1.0), 较优(0.6~0.8), 中(0.4~0.6), 较差(0.2~0.4), 差(0~0.2)5 个等级。结果显示(表 3、图 2 B): 2022 年研究区域遥感生态指数均值为 0.668, 生态等级总体为较优。生态等级为较优的比例最高, 占比为 43.95%; 生态等级为差的比例最低, 占比为 0.05%。具体而言, 生态质量较好的区域主要分布在南部的幕埠山余脉, 该区域以林地为主要用地类型, 土壤湿润, 植被丰富, 人为干扰较小。市域中部、北部地区生态质量相对差, 主要为城镇建设用地、采矿用地。这些区域经济活动较强, 人口稠密, 不透水层比例高, 因而生态质量差。

3.1.3 景观连通性结果 基于形态空间格局分析法+遥感生态指数模型评估结果, 遴选出遥感生态指数高的前 30 个核心区斑块进行景观连通性计算, 并结合斑块面积大小最终筛选出 11 个生态源地。从空间分布来看(图 3), 生态源地主要分布在市域南部、西部、东部, 该结果可能与南部为幕埠山余脉有关。中部、北部地区地势平坦, 城镇建设活动影响大, 生态源地数量相对少。

由表 4 可知: 1 号、2 号生态源地在整体连通性指数和可能连通性指数上表现突出, 相较其他生态源地, 两者对研究区的连通性贡献尤为显著。主要归因于 1 号、2 号生态源地面积较大, 意味着斑块面积越大, 生态质量越高, 对网络的贡献程度越高。此外, 这 2 个斑块均位于幕埠山余脉, 拥有较高的生态服务价值, 对大冶矿区生态网络的稳定性起到了关键作用。

3.1.4 不同方法识别生态源地结果对比 对比形态空间格局分析法+景观连通性评价结果(表 4), 发现修正前的方法识别的生态源地总面积更大, 为 447.14 km^2 。引入遥感生态指数后, 识别的总面积减少至

表3 遥感生态指数等级统计

Table 3 Classification statistics of remote sensing ecological index

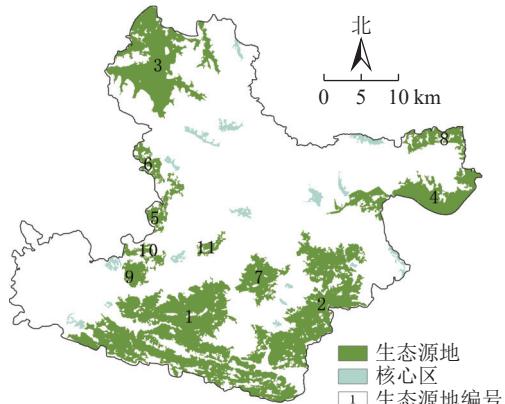
生态环境质量等级	遥感生态指数	面积/km ²	占总面积的百分比/%	生态环境质量等级	遥感生态指数	面积/km ²	占总面积的百分比/%
优	0.8~1.0	411.64	26.33	较差	0.2~0.4	73.58	4.71
较优	0.6~0.8	687.12	43.95	差	0.0~0.2	0.84	0.05
中	0.4~0.6	390.42	24.97				

说明：遥感生态指数采用下限排除法。

442.24 km²。尽管面积有所减少，但后者的遥感生态指数均值(0.789)和相对重要性(17.749)均略高于前者，表明结合遥感生态指数的方法能更精准地识别出具有高生态价值和连通性的生态源地。

3.2 生态网络格局构建

3.2.1 生态阻力面构建结果 利用遥感生态指数修正得到大冶矿区生态阻力值为0.60~3.96(图4 A)，均值为1.57，空间上总体呈现南部、西部以及东部低，中部和北部高的特点。以大冶中心城区为代表的高阻力值区，地势平坦，形成了适宜人类活动和居住的空间。此外该区域还分布着大量铜矿、铁矿资源，资源的开采造成区域地表植被破坏，形成了高阻力区域。低阻力值区主要用地类型为林地、水体等，这些区域人口稀少，外界扰动相对少，适宜生物生存。与修正前的生态阻力面相比(图4 B)，修正后的阻力系数在各土地利用类型内部表现出生态差异。例如修正前林地阻力值统一设定为1，而修正后阻力值范围为0.56~1.25，因此修正后的阻力面提高了土地利用类型内部差异的精确性和细致度。



基于湖北省自然资源厅标准地图服务网站鄂S(2024)008号标准地图制作，底图边界无修改。

图3 生态源地与核心区分布示意图

Figure 3 Distribution map of ecological source and core areas

表4 不同方法识别生态源地的结果

Table 4 Results of different methods on ecological source identification

生态源地 编号	修正后生态源地					修正前生态源地				
	面积/km ²	遥感生态指数	整体连通性指数	潜在连通性指数	相对重要性	面积/km ²	遥感生态指数	整体连通性指数	潜在连通性指数	相对重要性
1	157.53	0.831	61.358	65.979	63.669	157.53	0.831	60.808	68.664	64.736
2	95.30	0.836	46.549	47.296	46.923	95.30	0.836	38.045	43.546	40.795
3	78.26	0.781	18.398	19.038	18.718	78.26	0.781	18.492	19.436	18.964
4	38.92	0.803	16.189	16.352	16.271	38.92	0.803	13.481	16.052	14.766
5	9.96	0.810	15.329	14.517	8.329	20.68	0.810	7.772	9.142	8.457
6	7.88	0.813	13.811	10.997	4.699	15.34	0.813	3.857	5.169	4.513
7	20.68	0.746	7.959	8.698	14.923	9.96	0.746	15.700	13.979	13.979
8	6.09	0.790	2.136	5.257	4.046	8.88	0.709	2.854	7.586	5.220
9	8.29	0.752	2.894	5.198	12.404	8.29	0.790	2.094	5.173	3.634
10	15.34	0.753	4.535	4.863	3.697	7.88	0.752	2.109	8.497	5.303
11	3.99	0.766	1.619	1.510	1.565	6.09	0.753	1.607	1.542	1.575
均值	40.20	0.789	17.343	18.155	17.749	40.65	0.785	15.165	18.072	16.618

3.2.2 生态廊道构建结果 基于Linkage Mapper工具识别出生态廊道18条，总长度为104.55 km，平均长度为5.80 km。由图5A可知：大冶矿区廊道空间分布差异明显，其中中部、南部区域生态廊道10条，总长度为41.52 km，平均长度为4.15 km，空间分布短而密集。南部是幕埠山余脉所在地，源地面积大，生态质量较好。但是南部源地与中部、东北部源地之间的连通受采矿活动影响较大，多为高等级阻力廊道。东北部区域生态廊道共3条，总长度为55.50 km，平均长度为18.50 km，空间分布较长。

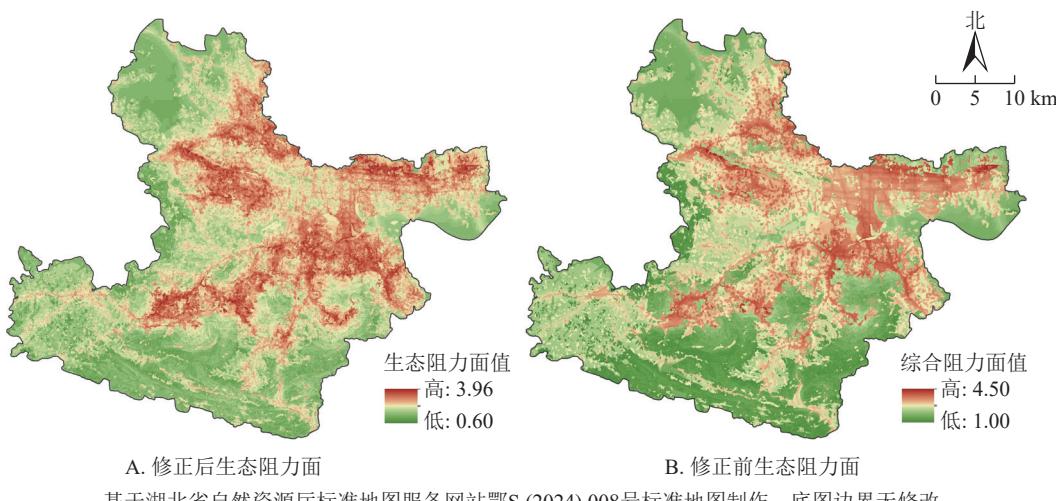


图4 生态阻力面构建示意图

Figure 4 Construction of ecological resistance surface

由于该区域生态源地数量少, 间距远, 且该区域的生态廊道主要贯穿城镇建设用地和农田区, 因此多为中等级阻力廊道。西部区域生态廊道共5条, 总长度为7.52 km, 平均长度为1.50 km, 空间分布相对较短。该区域以林地为主要用地类型, 生态质量较好, 因此多为低等级阻力廊道。

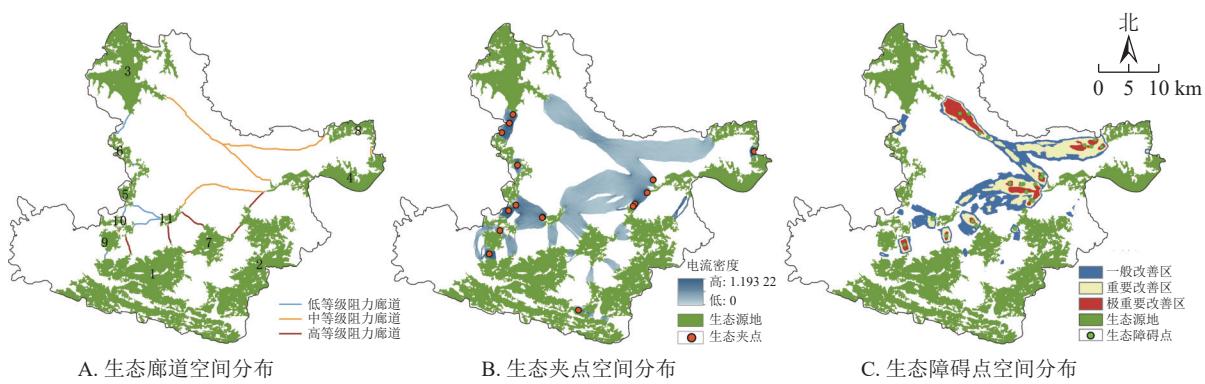


图5 生态网络格局构建示意图

Figure 5 Construction of ecological network pattern

3.2.3 生态夹点及生态障碍点结果 利用 Pinchpoint Mapper 模块工具得到研究区累积电流密度, 利用自然断点法将电流密度划分为5级, 电流密度最高的区域(深蓝色)为生态夹点(图5B)。最终识别出生态夹点17处, 总面积为2.75 km², 其中3处位于高等级阻力生态廊道上, 6处位于中等级阻力生态廊道上, 8处位于低等级阻力生态廊道上。从空间分布来看, 主要分布在市域西侧的保安湖与幕埠山余脉的生态廊道上。该区域主要为低等级阻力廊道, 是物种流通的关键区域, 生态脆弱, 极易产生破坏从而导致生态环境恶化。建议以生态夹点为起点向外一定范围实施生态保护。

进一步利用 Barrier Mapper 模块工具, 将搜索半径设定为180~1 800 m, 以180 m为步长进行移动窗口法的迭代计算, 发现半径在540 m时障碍区扩散达到最大, 因此选择半径540 m进行障碍点模拟。通过自然断点法对改进得分分级, 得到极重要改善区28.58 km², 重要改善区74.53 km², 一般改善区94.56 km², 其中极重要改善区为识别的生态障碍点(图5C)。经分析最终识别出生态障碍点32处, 其中22处位于高等级阻力生态廊道上, 8处位于中等级生态廊道上, 2处位于低等级阻力生态廊道上。从空间分布来看, 主要位于大冶湖与幕埠山余脉、大冶湖与保安湖之间, 以农田、城镇建设用地、采矿用地为主, 受到的阻力较大, 极易形成生态障碍点。因此应加强此类地区的生态修复, 改善廊道的流通性。

3.3 生态网络格局优化

以前文识别出的生态源地、廊道、夹点、障碍点等要素为基础, 并以保护源地、保障整体流通性为

原则,最终构建“南山、北湖、多廊、多点”的大治矿区生态网络格局(图6)。其中,“南山、北湖”指包含幕埠山余脉、大治湖、保安湖在内的11处生态源地,分布在生态质量高的南部、西部和东部,体现了多元自然保护的理念。“多廊”指幕埠山与保安湖、大治湖之间的生态廊道,这些廊道保障了生态源地间的连通性。“多点”指17处生态夹点和32处生态障碍点,对于生态夹点,建议实施重点保护,减少人类活动干扰。对于生态障碍点,建议有序开展生态修复工作,以恢复和增强这些区域的生态功能。

以构建的生态网络格局为基础,本研究提出保护与修复的具体建议。①针对幕埠山余脉区域,强化生态保护功能,合理开发森林公园和风景名胜区,以维护生态平衡。②在两湖地区,首先确保水生系统的完整性。在以旅游观光为主要目的的区域,应优先保障水资源的可持续利用和水生生态系统的健康。③针对廊道上的耕地,建议在周边建设防护林、草地等多样化植被,以增强生物多样性,减少水土流失。④实施分阶段、分批次的废弃矿区修复策略,并遵循“宜耕则耕、宜林则林、宜草则草、宜水则水”的原则,实现生态恢复。⑤城镇建设用地区域,应通过种植本土树种和灌木增加绿化,构建连续的生态廊道,以提升生态网络的连通性和流动性。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究融合了形态空间格局分析法、遥感生态指数和景观连通性分析识别生态源地,目的在于识别出自然条件适宜、能够支持生物栖息和活动的自然景观,并筛选出受人类活动影响较小的生态斑块,通过连通性分析,确保生态源地具有高生态质量和良好的连通性,从而为物种提供连续的栖息地和迁徙通道。相较于仅采用形态空间格局分析法和景观连通性法^[25],本研究不仅考虑了景观的结构和功能特征,还加入了生态质量的评价,增强了识别的科学性和有效性。与完全基于遥感生态指数的方法相比^[26],避免了将不适宜物种生存的区域误判为生态源地的风险。

在矿山地区生态阻力面构建方面,本研究构建了一套针对性的生态阻力面因子,并引入遥感生态指数进行修正。相较于仅依赖单一数据的修正方法^[27],遥感生态指数综合了植被指数、湿度指数、裸地指数及地表温度指数,精确地刻画了人类活动干扰的空间分布。修正后的生态阻力面展示了同一土地利用类型内部生态阻力系数的差异,引导物种选择阻力最小的路径进行迁移^[28],提高了生态网络的合理性。

本研究在生态网络格局构建中,主要从“正向”角度设计了恢复性廊道。但研究区域为矿区,人为扰动强烈,可进一步从“反向”角度设计生态风险网络,从正反2个方面为区域生态稳定提供支持。

4.2 结论

大治矿区共识别出11处生态源地,总面积为442.24 km²,主要分布在市域南部、西部、东部。18条生态廊道总长度为104.55 km,其中中南部区域生态廊道10条,总长度为41.52 km,主要为高等级阻力廊道,东北部区域生态廊道3条,总长度为55.50 km,主要为中等级阻力廊道。西部区域生态廊道5条,总长度为7.52 km,主要为低等级阻力廊道。17处生态夹点,主要分布在西部低阻力廊道上。32处生态障碍点,主要分布在中南部高阻力廊道上。基于上述要素,构建了“南山、北湖、多廊、多点”的生态网络格局。本研究提出的形态空间格局分析法+遥感生态指数与景观连通性评价相结合的方法能更有效地选择关键生态源地,利用遥感生态指数修正土地利用阻力因子构建生态阻力面,能反映出同一土地利用类型的生态差异对物种空间运动的干扰,为生态保护和修复提供了更为精确的科学依据。

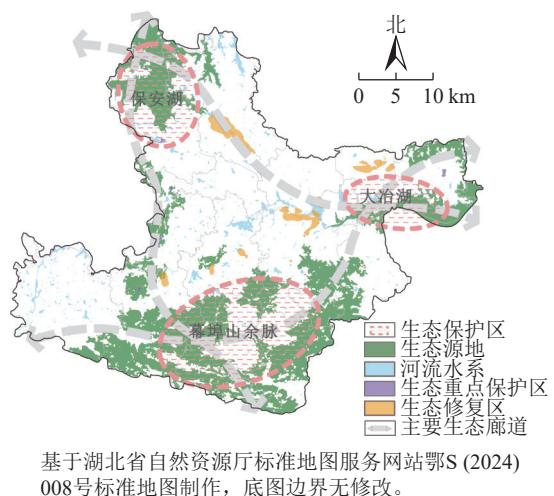


图6 生态网络格局保护示意图

Figure 6 Ecological network pattern protection map

5 参考文献

- [1] LIU Chunxia, WANG Chaoxia, LI Yuechen, *et al.* Spatiotemporal differentiation and geographic detection mechanism of ecological security in Chongqing, China [J/OL]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, **35**: e02072 [2024-07-09]. DOI: 10.1016/j.gecco.2022.e02072.
- [2] 刘威尔, 宇振荣. 山水林田湖生命共同体生态保护和修复[J]. 国土资源情报, 2016(10): 37–39, 15.
- LIU Weier, YU Zhenrong. Ecological conservation and restoration of life community of mountains, rivers, forests, farmland and lakes [J]. *Land and Resources Information*, 2016(10): 37–39, 15.
- [3] 蔡海生, 陈艺, 查东平, 等. 基于主导功能的国土空间生态修复分区的原理与方法[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(15): 261–270.
- CAI Haisheng, CHEN Yi, ZHA Dongping, *et al.* Principle and method for ecological restoration zoning of territorial space based on the dominant function [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(15): 261–270.
- [4] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, **36**(3): 407–419.
- PENG Jian, ZHAO Huijuan, LIU Yanxu, *et al.* Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. *Geographical Research*, 2017, **36**(3): 407–419.
- [5] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. 生态学报, 2011, **31**(20): 5928–5936.
- LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, *et al.* Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(20): 5928–5936.
- [6] 吴映梅, 李琛, 高彬嫔, 等. 高原湖泊城市生态安全格局构建——以大理市为例[J]. 生态学报, 2023, **43**(19): 8153–8166.
- WU Yingmei, LI Chen, GAO Binpin, *et al.* Construction of urban ecological security pattern in highland lakes cities: the case of Dali City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(19): 8153–8166.
- [7] YE Hui, YANG Zhaoping, XU Xiaoliang. Ecological corridors analysis based on MSPA and MCR model: a case study of the tomur world natural heritage region [J/OL]. *Sustainability*, 2020, **12**(3): 959 [2024-07-09]. DOI: 10.3390/su12030959.
- [8] 杨务发, 余坤勇, 赵各进, 等. 基于热岛效应的福州市绿色廊道优化[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, **39**(4): 876–883.
- YANG Wufa, YU Kunyong, ZHAO Gejin, *et al.* Optimization of greenways in Fuzhou based on heat island effect [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(4): 876–883.
- [9] COSTANZA R. Ecosystem health and ecological engineering [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **45**: 24–29.
- [10] 樊凡, 田国行, 樊巍, 等. 国土空间规划下县级绿色基础设施网络构建——以河南省周口市川汇区为例[J]. *地域研究与开发*, 2023, **42**(6): 66–71, 78.
- FAN Fan, TIAN Guohang, FAN Wei, *et al.* Construction of county green infrastructure network under territorial spatial planning: taking Chuanhui District of Zhoukou City in Henan Province as an example [J]. *Areal Research and Development*, 2023, **42**(6): 66–71, 78.
- [11] 郭成久, 刘宇欣, 李海福, 等. 抚顺西露天矿区景观格局变化与生态安全格局构建[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, **52**(4): 442–450.
- GUO Chengjiu, LIU Yuxin, LI Haifu, *et al.* Landscape characteristics and construction of landscape ecological security pattern in west open pit of Fushun Mine [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2021, **52**(4): 442–450.
- [12] CHEN Zuoqi, YU Bailang, YANG Chengshu, *et al.* An extended time series (2000–2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(3): 889–906.
- [13] 李恒凯, 刘玉婷, 李芹, 等. 基于MCR模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J]. 地理科学, 2020, **40**(6): 989–998.
- LI Hengkai, LIU Yuting, LI Qin, *et al.* Analysis of ecological security pattern of southern rare earth mining area based on MCR model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(6): 989–998.
- [14] 周媛. 多元目标导向下的成都中心城区绿地生态网络构建[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(2): 359–365.
- ZHOU Yuan. Developing urban greenspace ecological network in Chengdu City center based on multiple objectives [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(2): 359–365.
- [15] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 889–897.
- XU Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. *China Environmental Science*, 2013,

- 33(5): 889–897.
- [16] PENG Xuefeng, ZHANG Shiqi, PENG Peihao, et al. Unraveling the ecological tapestry: a comprehensive assessment of Changtang Nature Reserve's Ecological and Environmental Using RSEI and GEE [J/OL]. *Land*, 2023, 12(8): 1581 [2024-07-09]. DOI: [10.3390/land12081581](https://doi.org/10.3390/land12081581).
- [17] 潘婷, 王懿祥, 刘宪钊, 等. 雄安新区土地利用变化及其对生态质量的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(5): 1102–1110.
- PAN Ting, WANG Yixiang, LIU Xianzhao, et al. Land use change and its impact on ecological quality in Xiong'an New Area [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, 40(5): 1102–1110.
- [18] HAN Lei, WANG Zhi, WEI Mengmeng et al. Small patches play a critical role in the connectivity of the Western Tianshan landscape, Xinjiang, China [J/OL]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109542 [2024-07-09]. DOI: [10.1016/j.ecolind.2022.109542](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109542).
- [19] 董欣雨, 刘扬. 基于形态学空间格局分析与景观连通性的易门县生态网络构建与优化 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(5): 168–177.
- DONG Xinyu, LIU Yang. Construction and optimization of the ecological network in Yimen County based on MSPA and landscape connectivity [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2024, 39(5): 168–177.
- [20] 孟雪源, 陈刚, 郑志元. 国家重点生态功能区生态系统服务价值对土地利用变化的时空响应 [J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(4): 830–840.
- MENG Xueyuan, CHEN Gang, ZHENG Zhiyuan. Spatiotemporal response of ecosystem service value to land use changes in national key ecological functional areas [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, 41(4): 830–840.
- [21] LU Tong, LI Changjia, ZHOU Wenxin, et al. Fuzzy assessment of ecological security on the Qinghai-Tibet plateau based on pressure-state-response framework [J/OL]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1293 [2024-07-09]. DOI: [10.3390/rs15051293](https://doi.org/10.3390/rs15051293).
- [22] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究 [J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2995–3009.
- WEI Baojing, SU Jie, HU Xijun, et al. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2995–3009.
- [23] 樊凡, 田国行, 刘贺, 等. 郑州市国土空间生态修复的关键区域识别 [J]. *水土保持通报*, 2024, 44(2): 267–276.
- FAN Fan, TIAN Guohang, LIU He, et al. Identification of critical areas for ecological restoration of territorial space in Zhengzhou City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(2): 267–276.
- [24] 樊影, 王宏卫, 杨胜天, 等. 基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别 [J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7614–7626.
- FAN Ying, WANG Hongwei, YANG Shengtian, et al. Identification of ecological protection crucial areas in Altay Prefecture based on habitat quality and ecological security pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7614–7626.
- [25] YANG Caihong, GUO Huijun, HUANG Xiaoyuan, et al. Ecological network construction of a national park based on MSPA and MCR models: an example of the proposed national parks of “Ailaoshan-Wuliangshan” in China [J/OL]. *Land*, 2022, 11(11): 1913 [2024-07-09]. DOI: [10.3390/land11111913](https://doi.org/10.3390/land11111913).
- [26] 吕大伟, 蔡海生, 张学玲, 等. 基于遥感生态指数的弋阳县生态安全格局构建及优化 [J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(3): 545–556.
- LÜ Dawei, CAI Haisheng, ZHANG Xueling, et al. Construction and optimization of the ecological security pattern in Yiyang County based on the remote sensing ecological index [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(3): 545–556.
- [27] 陈勇, 肖晓, 刘艳中, 等. 兼顾生态供给和人类需求的矿业城市生态安全格局构建——以湖北省大冶市为例 [J]. *金属矿山*, 2019(5): 154–160.
- CHEN Yong, XIAO Xiao, LIU Yanzhong, et al. Construction of ecological security pattern in mining cities by balancing ecological supply and human demand: a case study of Daye City, Hubei Province [J]. *Metal Mine*, 2019(5): 154–160.
- [28] ZHANG Jingjie, JIANG Feng, CAI Zhenyuan, et al. Resistance-based connectivity model to construct corridors of the przewalski's gazelle (procapra przewalskii) in fragmented landscape [J/OL]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1656 [2024-07-09]. DOI: [10.3390/su13041656](https://doi.org/10.3390/su13041656).