

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.012 CSTR:32310.14.stbxb.2026.01.012

奥勇,李敏,赵永华,等.基于RSEI与电路理论的鄱阳湖生态经济区生态安全格局构建[J].水土保持学报,2026,40(1):231-241.

AO Yong, LI Min, ZHAO Yonghua, et al. Construction of ecological security pattern in Poyang Lake Eco-Economic Zone based on RSEI and circuit theory[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):231-241.

基于RSEI与电路理论的鄱阳湖生态经济区生态安全格局构建

奥勇^{1,2,3}, 李敏¹, 赵永华^{1,2,3}, 丁志豪¹, 倪贇¹, 黄福星¹

(1.长安大学土地工程学院,西安710054; 2.陕西省土地整治重点实验室,西安710054;

3.自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室,西安710054)

摘要: [目的] 为科学评估鄱阳湖生态经济区生境质量并构建生态安全格局,对生态修复提出科学建议。[方法] 以2003年、2013年、2023年鄱阳湖生态经济区多源遥感和土地利用数据为基础,结合遥感生态指数、形态空间格局分析与电路理论,系统评估区域生境质量时空演变规律,构建“源地-廊道-夹点-障碍”协同优化的生态安全格局。[结果] 1) 研究区生境质量总体较高(RSEI平均值为0.75~0.79),但呈“中部退化、边缘稳定”的空间分异特征。2) 基于MSPA识别出重要生态源地(16个)分布于九江、景德镇、鹰潭等植被覆盖率高的生态优势区,一般生态源地(41个)呈斑块状分布于生态经济区中部过渡带与边缘缓冲带,二者共同支撑区域生物多样性。3) 基于电路理论识别119条生态廊道及关键节点,共同优化区域生态网络结构与功能。关键廊道纵向贯通中部高阻力区与边缘生态区,保障生态连通性;重要廊道环状连接三大生态源地,维持系统稳定性;一般廊道网状填充间隙,提升网络密度。南昌-上饶生态夹点区与宜春市中部和吉安市西北部障碍点分布区属于安全格局重点关注区域,对研究区生态红线划定具有决定性意义。[结论] 研究提出“源地保护-廊道连通-夹点调控-障碍修复”机制,为鄱阳湖流域生态红线划定“一带两区三屏”的国土空间规划科学策略。

关键词: 遥感生态指数; 电路理论; 生态安全格局; 鄱阳湖生态经济区

中图分类号: X171; TU984.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0231-11

Construction of Ecological Security Pattern in Poyang Lake Eco-Economic Zone Based on RSEI and Circuit Theory

AO Yong^{1,2,3}, LI Min¹, ZHAO Yonghua^{1,2,3}, DING Zhihao¹, NI Yun¹, HUANG Fuxing¹

(1.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2.Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710054, China; 3.Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] To scientifically evaluate the habitat quality of the Poyang Lake Eco-Economic Zone, construct an ecological security pattern, and provide scientific recommendations for ecological restoration. [Methods] Based on the multi-source remote sensing and land use data of the Poyang Lake Eco-Economic Zone in 2003, 2013 and 2023, combined with the remote sensing ecological index, morphological spatial pattern analysis, and circuit theory, the spatiotemporal evolution patterns of regional habitat quality were systematically evaluated. Additionally, the ecological security pattern of "source-corridor-pinch point-barrier" collaborative optimization was constructed. [Results] 1) The habitat quality in the study area was generally high (average RSEI value of 0.75—0.79), but it showed spatial differentiation characteristics of "degraded in the middle and stable at the edge". 2) Based on MSPA, 16 important ecological sources were identified and distributed in

收稿日期:2025-05-22 修回日期:2025-06-30 录用日期:2025-07-17 网络首发日期(www.cnki.net):2025-09-03

资助项目:国家自然科学基金项目(U23 A2061)

第一作者:奥勇(1965—),男,副教授,博士,主要从事生态遥感研究。E-mail:aoyong@chd.edu.cn

通信作者:奥勇(1965—),男,副教授,博士,主要从事生态遥感研究。E-mail:aoyong@chd.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

ecologically advantageous areas with high vegetation coverage such as Jiujiang, Jingdezhen, and Yingtian. 41 general ecological sources were distributed in patches in the transition zone and marginal buffer zone in the middle of the eco-economic zone, which jointly supported regional biodiversity. 3) Based on circuit theory, 119 ecological corridors and key nodes were identified to jointly optimize the structure and function of the regional ecological network. The key corridors vertically connected the central high-resistance area and the marginal ecological area to ensure ecological connectivity. The important corridors connected the three ecological sources in a ring to maintain system stability. The general corridors filled the gaps in a mesh-like pattern to enhance network density. The Nanchang-Shangrao ecological pinch point and the barrier point distribution area in central Yichun City and northwestern Ji'an City were the key areas of the ecological security pattern, playing a decisive role in delineating the ecological red line of the study area. [Conclusion] This study proposes a restoration mechanism of "source protection-corridor connectivity-pinch point regulation-barrier restoration", providing a scientific land spatial planning strategy of "one belt, two zones, and three screens" for delineating the ecological red line of the Poyang Lake Basin.

Keywords: remote sensing ecological index; circuit theory; ecological security pattern; Poyang Lake Eco-Economic Zone

Received: 2025-05-22

Revised: 2025-06-30

Accepted: 2025-07-17

Online(www.cnki.net): 2025-09-03

生态安全与人类安全紧密地联系在一起^[1],高强度的城市建设开发改变生态环境的天然性,导致生态用地流失,生态风险增加等生态安全问题^[2]。作为江西省中部崛起的关键力量,鄱阳湖区天然特征退化和自然环境破坏等生态问题亟需引起重视^[3]。在国家生态安全战略指导下,通过构建生态网络体系与优化自然生境质量来推进鄱阳湖生态经济区国土空间生态保护修复,能够实现区域经济与生态可持续发展^[4]。

生境质量反映生态系统为生物个体和种群提供持续生存条件的能力,直接关系到区域生物多样性,经常用于评价生态系统的生态质量和生态功能^[5]。遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)结合遥感数据多维度、客观性的优势,被广泛应用于区域生境质量动态监测,目前已涉及领域包括对城市^[6]、河流流域^[7]、山地^[8]、生态脆弱区等^[9]区域的环境评估。生态安全格局的识别通常遵循“确定生态源地、构建阻力面、识别廊道”的研究路径^[10]。通过对网络关键点优化与物种迁移和生态流扩散等生态过程的调控,实现对物种栖息地稳定性和交流路径连通性的修复,从而改善区域生境质量^[11],为国土空间生态保护修复提供重要依据。在提取生态源地的过程中,形态空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)通过量化自然斑块的面积特征与空间配置格局来提取核心区,近年来已经从最基础的简单景观分类聚焦到生态源地提取^[12]、景观破碎化判断^[13]和生态网络优化^[14]等方面。在提取廊道的方向,已有研究^[15]发现,电路理论

能将物种迁移模拟为电路中电荷的随机游走,展示景观中多条潜在路径。同时,高电流密度区域的生态夹点,阻碍生态流的高阻力区障碍点也与景观生态学产生良好结合效应^[16]。

2009年12月12日,中央正式批复《鄱阳湖生态经济区规划》^[17],标志着鄱阳湖流域各县市生态保护与经济建设上升至国家战略层面,但相关研究仍存在一些问题:1)尽管鄱阳湖生态经济区概念提出多年,许多相关研究在方法上仍多聚焦于单一生态因子的影响,忽视生态格局中多个因子间的协同作用,需要结合生态与社会多维度对当地生态建设提出有效建议。2)一些研究直接以自然保护区、森林斑块作为源地,忽视生境质量和景观连通性的量化分析,源地划定存在主观划界问题。以往研究^[18]在源地构建时已将生境质量模块纳入参考,并且显著提升源地识别的科学性与系统性,说明基于生境质量、生物多样性等更多生态学角度的安全格局构建具有一定的研究意义。

本研究以鄱阳湖生态经济区为对象,集成2003年、2013年、2023年多源遥感数据,将MSPA结果与RSEI和景观连通性相结合,克服以自然保护区、野生动物栖息地或生态保护区等直接作为源地的局限性^[19],并系统揭示区域生境质量时空分异规律、识别廊道及关键节点,构建生态安全格局。研究旨在:1)分析RSEI结果,阐明近20a鄱阳湖生态经济区生境质量的时空演变特征。2)将RSEI与MSPA、景观连通性相结合识别生态源地,运用电路理论识别生态廊

道、生态夹点与生态障碍点,构建生态网络。3)基于生态网络提出“源地供给-廊道联通-夹点调控-障碍修复”的一体化“一带两区三屏”生态安全优化格局,为鄱阳湖流域国土空间规划与生态红线动态管理提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

鄱阳湖生态经济区(27°30'~30°06'N,114°29'~117°42'E)地处中国江西省北部、长江中下游地区(图1),包括南昌、九江、景德镇、鹰潭4市全部区域,以及新余、抚州、宜春、上饶、吉安市的部分县(市、区),共计38个县(市、区)^[20],总面积5.12万km²,总人口约2 116.68万人。地势由南向北逐渐降低,地貌类型多样,南部以山地丘陵为主,中部和北部以平原和低洼地为主,跨长江中下游平原及华东南山地两大地貌单元,属于典型的亚热带季风气候,气候温暖湿润,四季分明,年平均气温16~18℃,年降水量1 200~1 900 mm。

鄱阳湖生态经济区作为江西省区域经济发展核心,是承接东部发达地区与西部发展潜力区域的关键纽带。同时,生态经济区的设立积极响应国家“长江经济带发展”战略,强调生态优先、绿色发展,充分发挥鄱阳湖重要的水源涵养功能,在保障长江流域的水资源安全、调节洪水和维护生物多样性方面起着至关重要的作用。

1.2 数据来源与预处理

本文所使用 MODIS 系列数据产品主要为

表 1 数据源说明

Table 1 Description of data sources

数据名称	空间分辨率/m	时间分辨率	时间范围	来源
MOD09 A1 数据集	500	8 d	2003年、2013年、2023年 植被生长季(6—9月)	Google Earth Engine (https://earthengine.google.com/)
MOD13 A1 数据集	500	16 d		
MOD11 A2 数据集	1 000	8 d		
土地利用类型 栅格数据	30	年	2003年、2013年、2023年	CLCD全国土地覆盖数据 (https://zenodo.org/records/12779975)
USGS/SRTMGL1_003 数字高程数据	30	—	2000年	Google Earth Engine (https://earthengine.google.com/)
植被覆盖度数据	250	年	2023年	青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)
道路数据	—	年	2023年	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)
河流水系数据	—	年	2023年	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数(RSEI) 遥感生态指数RSEI基于城市生态系统中重要的组成部分的绿色指标(NDVI)、湿度指标(Wet)、热度指标(LST)和干度指

MOD09 A1数据集(表1),反映地表反射率的相关信息,用于采集湿度Wet和干度NDSI指标;MOD13 A1数据集用于提取绿色NDVI;MOD11 A2数据集用于提取地表温度LST。由于研究区水体面积较大,运用改进后的归一化差异水体指数(MNDWI)^[21]对MODIS数据中的水体进行掩膜处理,避免水体对于主成分载荷的干扰。DEM数据为GEE平台30 m分辨率USGS/SRTMGL1_003数字高程数据,并通过3 D分析得到坡度数据。植被覆盖度(FVC)数据来自中国区域逐年250 m植被覆盖度数据集。所有数据地理参考统一为WGS_1984_UTM_Zone_50 N,综合考虑数据基础分辨率与模型操作要求,将上述数据统一为一致的分辨率(100 m×100 m)。

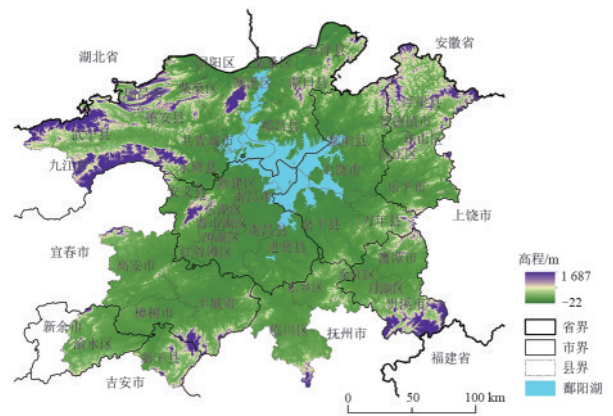


图 1 鄱阳湖生态经济区概况

Fig. 1 Overview of Poyang Lake Eco-Economic Zone

标(NDBSI)4个指数得到,指标计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

式中: ρ_{NIR} 为近红外波段反射率; ρ_R 为红光波段反射率。

$$\text{Wet}_{(\text{TM})} = 0.0315\rho_B + 0.2021\rho_G + 0.3102\rho_R + 0.1594\rho_{\text{NIR}} - 0.6806\rho_{\text{SWIR1}} - 0.6109\rho_{\text{SWIR2}} \quad (2)$$

$$\text{Wet}_{(\text{OLI})} = 0.1511\rho_B + 0.1973\rho_G + 0.3283\rho_R + 0.3407\rho_{\text{NIR}} - 0.7117\rho_{\text{SWIR1}} - 0.4559\rho_{\text{SWIR2}} \quad (3)$$

式中： ρ_B 、 ρ_G 、 ρ_R 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别为 TM 与 OLI 数据的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率。

$$L_\lambda = [\epsilon T + (1 - \epsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow \quad (4)$$

$$T = \frac{[L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \epsilon)L_\downarrow]}{\tau\epsilon} \quad (5)$$

$$\text{LST} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{T} + 1\right)} \quad (6)$$

式中： K_1 、 K_2 为传感器定标参数； L_λ 为热红外辐射亮度值； T 为黑体辐射亮度； ϵ 为地表比辐射率； τ 为大气透过率； L_\uparrow 、 L_\downarrow 为大气上、下行辐射亮度值。

$$\text{SI} = \frac{[(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_R) - (\rho_{\text{NIR}} + \rho_B)]}{[(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_R) + (\rho_{\text{NIR}} + \rho_B)]} \quad (7)$$

$$\text{IBI} = \frac{\left[\frac{2\rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_R} - \left(\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{\text{SWIR1}}} \right) \right]}{\left[\frac{2\rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_R} + \left(\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{\text{SWIR1}}} \right) \right]} \quad (8)$$

$$\text{NDBSI} = \frac{\text{SI} + \text{IBI}}{2} \quad (9)$$

式中：SI 为裸土指数；IBI 为建筑指数。

为避免人为确定指标间的相关性和权重对结果所造成的影响，本研究将标准化后的 4 个指标进行主成分分析，具体公式参考文献 [22]，结合使用目的，为比较过程中使 PC1 大的数值代表生态条件较好的区域，在处理中用 1 减去 PC1，得到 RSEI_0 ：

$$\text{RSEI}_0 = 1 - \left\{ \text{PC1} [f(\text{NDVI}, \text{Wet}, \text{LST}, \text{NDBSI})] \right\} \quad (10)$$

对初始遥感指数同样进行正规化处理，得到最终的结果 RSEI：

$$\text{RSEI} = \frac{\text{RSEI}_0 - \text{RSEI}_{0\text{min}}}{\text{RSEI}_{0\text{max}} - \text{RSEI}_{0\text{min}}} \quad (11)$$

1.3.2 基于 MSPA 的生态源地确定 生态源地是在区域范围内持续提供生态系统服务的重要生态斑块，识别过程需要考虑 3 个含义。源地本身的生境质量、源地能够提供的生态系统服务价值、源地所具有的景观连通性^[23]。MSPA 方法是一种能够提高异质景观的保护优先级识别能力的景观要素分类方法^[13]。基于鄱阳湖生态经济区 2023 年 30 m 分辨率的土地利用栅格数据(图 2)，综合考虑鄱阳湖流域生物多样性现状，将林地、草地、湿地、灌木和水域设置为前景 (foreground)，将不太适合作为物种活动空间且不具备觅食条件的人造地表、裸地和耕地设置为背景要素 (background)。通过 Guidos Toolbox3.0 软件对景观要素进行测量、识别和分割为核心、孤岛、孔隙等 7 种互斥的类型。为确保生态源地具有足够的面积来提供有效的生态辐射，首先将面积 $> 10 \text{ km}^2$ 的核心区域作为初步筛选生态源地^[24]。

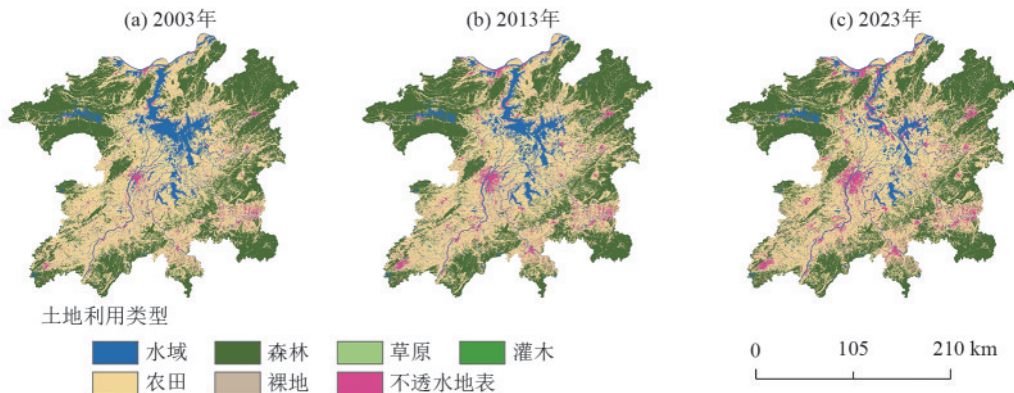


图 2 2003 年、2013 年、2023 年土地利用空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use in 2003, 2013 and 2023

良好的景观连通性对于保护生物多样性和维持生态系统稳定具有关键性作用^[25]。基于 Conefor 软件能够计算初步选取的生态源地的整体连通性指数 (IIC) 和可能连通性指数 (PC)，从而充分反映

生态源地间的景观连接性，取二者的平均值 DPC 综合反映生态源地重要性程度^[26]。DPC 值越大，表明斑块连通程度越高。最后，综合 RSEI 结果和景观连通性结果将生态源地划分为重要生态源地

($DPC > 1$)和一般生态源地($0.1 < DPC < 1$),并按面积大小对重要源地进行编号。景观连通性计算公式为:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times P_{ij}^*}{A_L^2} \quad (12)$$

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{(a_i \times a_j)}{(1 + nl_{ij})} \right]}{A_L^2} \quad (13)$$

式中: n 为斑块数; a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和斑块 j 面积, m^2 ; A_L 为景观总面积, m^2 ; P_{ij}^* 为斑块 i 和斑块 j 间扩散的最大可能性; nl_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 间最短路径的连接数量。

1.3.3 生态阻力面构建 生态阻力往往影响物种在源地间迁移速度及生态流等能量流运行程度^[27]。选取高程、坡度、土地利用类型、植被覆盖度、距道路距离和距水系距离6个因子作为模拟现实环境中物种迁移难易程度的关键因素。由于量纲不同,首先对因子进行归一化处理,其中正(负)向为该阻力因子大小与物种迁移的难易程度成正(反)比,而对于土地利用类型则需要进行重分类赋值后进行模糊隶属度处理。归一化后采用熵权法确定各因子权重(表2),最后构建综合阻力面。

正向指标归一化处理:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (14)$$

负向指标归一化处理:

$$y_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (15)$$

式中: y_{ij} 为第 i 个像元的第 j 个指标的标准化值; x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$)为第 i 个像元的第 j 个指标; $\max x_j$ 和 $\min x_j$ 分别为第 j 个指标的最大值和最小值。

表2 生态阻力因子

Table 2 Ecological resistance factors

阻力因子	高程	坡度	土地利用类型	植被覆盖度	距道路距离	距水系距离
正负向	+	+	赋值	-	-	-
权重	0.250	0.270	0.350	0.090	0.013	0.027

1.3.4 生态廊道、夹点及障碍点识别 生态廊道对于促进物种栖息、繁衍、迁移和扩散等生态过程起到关键作用,目前提取生态廊道最常用的模型是最小累积阻力模型和电路理论。电路理论利用生态流与电流所共通的随机游走的特点,将特定景观看作由电子、电阻和节点组成的导电平面,物种个体和基因流作为电子在电阻不同的区域随机移动,从而预测出复杂景观中生物移动模式^[28]。本研究利用

Circuitscape中的Linkage Mapper模块,输入综合阻力面与源地识别生态廊道,通过对每个源地输入标准电流并连通到其他源地^[29],表明生态源地间的连通性对生态系统服务、物种迁徙、基因流动等方面的影响。夹点是在生态廊道中电流密度较高的区域,即物种在源地间移动时通过概率较高的位置^[30]。利用Circuitscape中的Pinchpoint Mapper模块迭代运算得到的结果进行重分类,累计电流值最高的区域即为夹点。生态障碍点与夹点对应的,它是物种在斑块间迁徙中遇到阻碍的区域,在电路理论中通过计算清除障碍点后生态廊道的电流恢复差值来判断^[31]。利用Circuitscape中的Barrier Mapper模块中“maximum”模式设置步长进行探测,根据研究区大小,将搜索路径步长设置为100,最大搜索距离为500。

2 结果与分析

2.1 生态环境质量时空格局

2.1.1 生态环境质量时间变化 使用RSEI遥感生态指数计算表明,2003年、2013年、2023年鄱阳湖生态经济区RSEI分别为0.75、0.78、0.79,生境质量总体水平较高且平均水准呈逐步提升趋势(图3)。生态质量为“优”和“良好”的区域面积占比一直保持在80%以上,但对比2003年和2013年、2023年面积为“优”区域有所下滑,生态质量为“差”和“较差”区域上升2.3%(表3)。

2.1.2 生态环境质量空间演进 从RSEI 3 a空间分布可以看出,鄱阳湖生态经济区RSEI分布具有明显的空间差异性,生态环境总体情况处于良好和优,生态脆弱区基本分布在水系周围,呈点状分布。此外,生态经济区边缘主要存在生态质量优势区退化问题,斑点状生态环境恶化区主要集中在边缘林草分布区的九江武宁县、景德镇浮梁县、鹰潭贵溪市和吉安新干县。需要重点关注的区域主要分布于中部南昌市东湖区、西湖区、青云谱区、青山湖区和新建区等人口密集区域。同时也出现一些低于平均水平的生态质量较差、零散分布于各市的区域,包括新余渝水区、鹰潭的月湖区、贵溪市和抚州临川区。总体来说,鄱阳湖生态区总体良好但空间差异显著,边缘林草生态质量优异区面积略有下滑,中部区域人口密集区生态有所恶化,脆弱区沿水系零散分布。

2.2 生态源地识别

基于MSPA的提取结果(图4),提取出57个面积 $> 10 \text{ km}^2$ 的核心区作为生态源地,总面积为 $10\ 863.13 \text{ km}^2$,占核心区面积的74.88%,占生态经济区总面积的21.23%。结合RSEI高值区域和DPC连通性较好的区

域分布情况,将生态源地划分为重要生态源地(16个)和一般生态源地(41个),分别占生态经济区总面积的15.94%、5.29%(图5)。从行政区划角度,重要源地主要分布在九江市中西部和东北部分区域、上饶市东北部、景德镇市中北部及鹰潭市南部。重要生态源地主要在生态经济区边缘集中分布,形成跨市连

片格局,多沿水系与山地分布。九江市幕阜山余脉和九岭山森林覆盖率高,分布着面积最大的重要源地,支撑区域生态网络核心功能,而鹰潭市武夷山脉则是信江中游生态廊道的核心区,保留珍惜动植物栖息地。昌江流经景德镇市后注入鄱阳湖,沿岸具有植被缓冲带,是连接生态源地的重要区域。

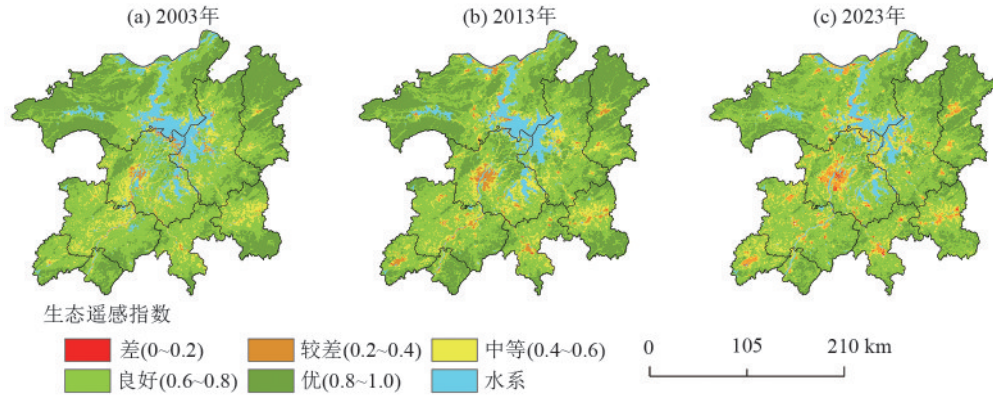


图 3 2003年、2013年、2023年生态环境质量等级分布

Fig. 3 Distribution of ecological and environmental quality grades in 2003, 2013, and 2023

表 3 2003年、2013年、2023年RSEI各等级面积及占比变化

Table 3 Changes in area and proportion of each grade of RSEI in 2003, 2013, and 2023

等级	2003年		2013年		2023年		2003—2023年 面积变化/km ²	2003—2023年 占比变化/%
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%		
差	155.25	0.31	92.50	0.19	188.25	0.37	+33.00	+0.06
较差	1 339.50	2.71	1 661.75	3.36	2 500.00	4.98	+1 160.50	+2.27
中等	5 669.25	11.45	6 308.25	12.75	7 130.75	14.19	+1 461.50	+2.74
良好	25 481.25	51.47	24 290.75	49.11	28 248.25	56.22	+2 767.00	+4.75
优	16 857.75	34.05	17 095.00	34.56	12 152.25	24.19	-4 705.50	-9.87

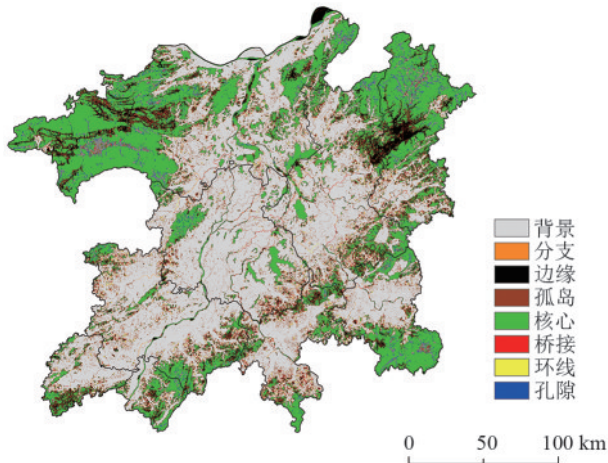


图 4 2023年MSPA结果及生态源地提取结果

Fig. 4 MSPA results and ecological source extraction results in 2023

一般生态源地共41个,相对分布较为零散,在各市均有分布,呈斑块化密集分布特征,主要集中于鄱阳湖邻近区域。相较于重要生态源地,其面积较小但在区域中部过渡带及边缘缓冲带均有延伸,通过生态廊道串联核心源地,完善生态网络结构的生物流通纽带。生态源地与RSEI高值区域

具有一定的重合性,表明生态环境质量较高的区域对于物种繁衍迁徙等生态功能服务也处于优良水平。

2.3 生态阻力面及生态廊道构建

综合考虑鄱阳湖生态经济区生态(高程、坡度、距河流距离、植被覆盖度)与社会(距道路距离、土地利用)因素造成的生态阻力(图6)。阻力呈“中部高、四周低”分布特点,高值区域主要以农田、水域为主,地表覆盖均质化程度高,天然植被覆盖率低,缺乏地形起伏和生态缓冲带,导致生物迁徙通道的自然屏障效应薄弱。研究区中部农田、裸地和建设用地等人口分布较为密集,从南昌市等各市区的中心城区向外蔓延放射,该类区域交通路网发达,形成物理隔离带,同时沿鄱阳湖水系分布,对于生物迁徙产生较大的生态阻力。中部集中的城镇建设、交通枢纽与产业开发地带与四周生态服务山地森林带的阻力差异反映鄱阳湖生态经济区城镇化格局与生态系统破碎化间的空间冲突关系。中部区域生态连通性薄弱,需优先修复,而四周山地林区应作为稳定生态屏障重点保护。

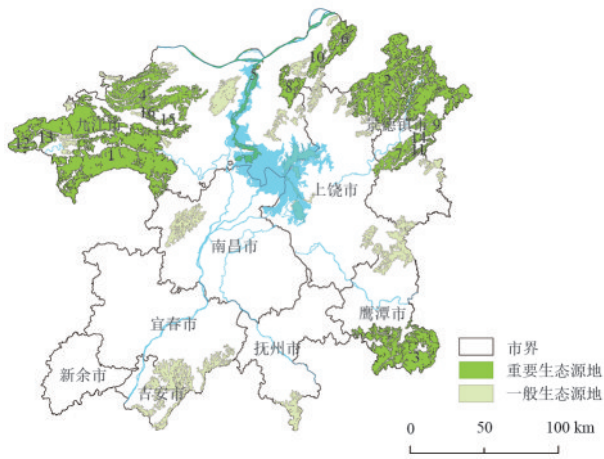


图 5 2023年生态源地分布
Fig. 5 Ecological source distribution in 2023

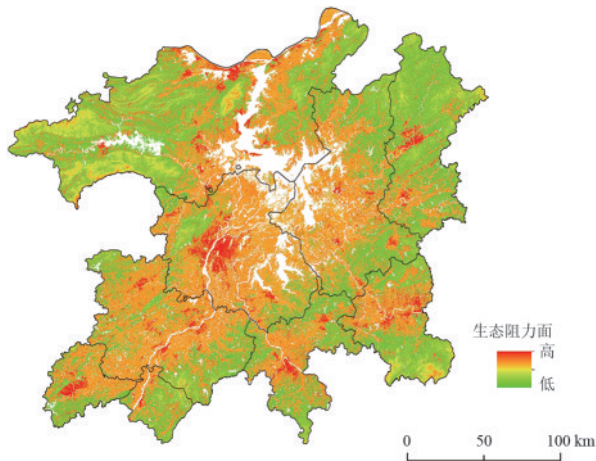


图 6 2023年生态阻力面
Fig. 6 Ecological resistance surface in 2023

对鄱阳湖生态经济区进行生态廊道识别,共识别出 119 条生态廊道(图 7)。廊道总长度 1 927.64 km,最长的廊道 155.20 km,最短的廊道 0.14 km。生态廊道主要分布在研究区北部和东南部,该区域生态阻力值小。采用源地间成本加权距离(CWD)与最小成本路径长度(LCP_Length)的比值进行比较从而获得廊道质量,比值越大表示物种迁徙阻力越高。依据 CWD/LCP 的值对廊道进行重新分类,之后采用自然断点法将其分为 3 类:阻力值较小的关键生态廊道共 16 条,总长 537.30 km;重要生态廊道共 37 条,总长 858.10 km;一般生态廊道共 66 条,总长 532.24 km,3 种廊道长度分别占研究区生态廊道总长的 27.9%、44.5%、27.6%。

关键廊道在整个区域内纵横分布均匀,是高阻力城市过渡带与低阻力生态服务区的重要通道。中部纵向廊道相对距离较长,生态连通性最脆弱但却是生物迁徙最依赖的路径,影响着整体生态网络的效率。重要廊道的数量最多,呈边缘环状分布格局,连接幕阜山-修水、昌江源地和武夷山-信江 3 个重要

源地,具有较强的自我维持功能。一般廊道呈碎片化的网状结构,是对中部高阻力区与边缘生态服务区连通不畅的部分进行沟通的短距离通道,发挥着“生态踏脚石”的功能,填补网络间隙,提高整体网络密度。3 类生态廊道在空间上呈“关键廊道贯通中轴、重要廊道环绕边缘、一般廊道填补缝隙”的多级协同结构。

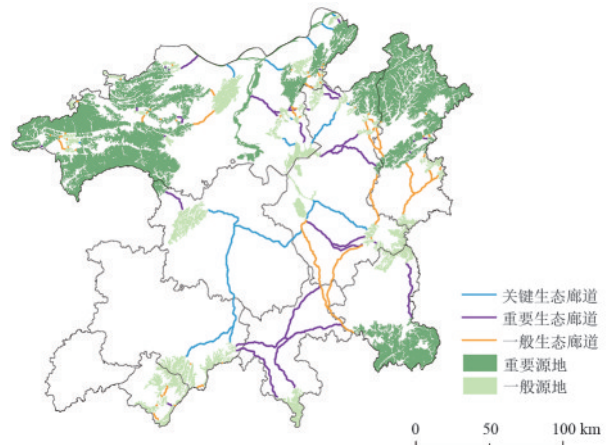


图 7 2023年生态廊道提取结果
Fig. 7 Ecological corridor extraction results in 2023

2.4 生态夹点与生态障碍点空间分布

依据电路理论提取生态障碍点集中分布区 1 处和生态夹点集中分布区 1 处。由图 8 可知,生态夹点作为廊道中的关键“踏脚石”,其修复可显著提升网络连通效率;生态障碍点则为生态流的高阻力阻滞区,通过阻断物质能量流动导致网络破碎化。

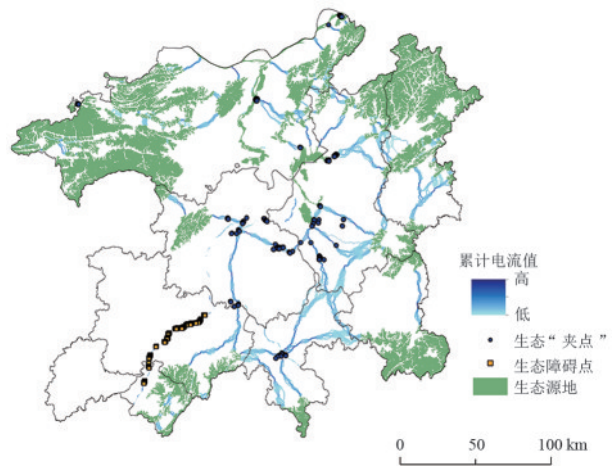


图 8 2023年生态夹点与生态障碍点分布
Fig. 8 Distribution of ecological pinch points and ecological barrier points in 2023

鄱阳湖生态经济区的生态障碍点集中分布于生态阻力较大的宜春市中部与吉安市西北部,占县域面积约 5 368.36 km²。该区域主要分布在农田与水系,宜春中部处于九岭山向鄱阳湖平原过渡的丘陵地带,地形破碎化程度高,天然植被连续性差,生态

用地与水域相接,水文连通性不稳定,容易形成生态过程阻滞节点。亟须对障碍点密集处的优先修复区进行生态修复,维护宜春-吉安段生态源地安全。

夹点密集的重点保护区位于南昌市和上饶市相接处,面积约 6 462.19 km²。该区域属于森林、农田、水域等多种土地类型交界处,地貌类型从平坦冲积平原过渡到低山丘陵,地形起伏度相对大,生境类型多样性丰富。但与抚州市中部相似的是,该夹点区域也是江西省人口较为密集、生态阻力较大的区域,阻力较高的景观使生物集中于夹点区域通行,属于生态安全格局关键区。此外,夹点零散分布于关键和重要生态廊道上,位于九江市东北部和西北部区域本身生态环境优越、生物多样性程度高,是生物迁徙和扩散的必经之地。

2.5 生态安全格局构建

构建生态安全格局综合结果(图9)旨在通过“源地供给-廊道联通-夹点调控-障碍修复”的协同机制,构建“一带两区三屏”一体化的空间网络,为研究区生态红线优化、生物多样性保护及景观破碎化治理提供科学支撑。“一带”即长江-鄱阳湖生态带,作为鄱阳湖生态经济区的主轴性生态结构,促进跨省生态合作,共同提升长江整体生态系统平稳健康的运行。“两区”即基于夹点和障碍点密集区提出的重点保护区和优先修复区,重点保护区集中于鄱阳湖湖区及其周边山地,如南昌、永修、武宁等区域,具有源地集中、生态质量优、生态廊道密度高等特点;优先修复区则多位于中部高阻力区域与生态廊道中断区域,如宜春-吉安、抚州等地,是生态流动受阻、生境破碎化明显的区域。“三屏”指幕阜山-九岭山生态屏障(西部)、昌江生态屏障(北部)和武夷山-信江生态屏障(东南部),三屏多位于生态经济区的地理边缘地带,国家级生态功能区和重要自然保护地集中区,自然生态本底良好,林地连片、坡度高、人类干扰相对较弱,有利于削弱中部高阻力区域的压力,维持边缘稳定性。

根据对《江西省国土空间生态修复规划(2021—2035年)》中提出的“一湖五河三屏”生态保护策略进行细化,“生态带”进一步强化鄱阳湖与长江间的生态能量流动关系。同时基于电路理论和RSEI生态指数提出的“两区”是对省级策略的细化补充,特别是南昌-上饶优先修复区,集中于中部高阻力区与生态夹点密集区间的生态断裂地带,亟须划入生态红线特殊管控区。屏障区则都以山地森林为基础,无论是基于阻力、电路模型进行识别,还是策略中基于红线评估结果,“三屏”都属于关键生态结构。

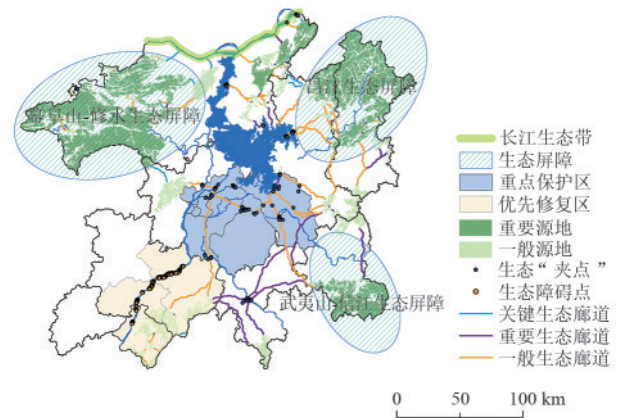


图9 2023年生态安全格局

Fig. 9 Ecological security pattern in 2023

3 讨论

基于RSEI探究结果显示,鄱阳湖生态经济区2003—2023年整体生境质量以良好和优的区域为主,质量等级为差和较差的区域主要在中部地区分布,生态风险呈“中间高、四周低”趋势,与已有研究^[32-33]结论一致。本文基于电路理论与RSEI结果构建鄱阳湖生态经济区生态安全格局,识别出多级生态源地、关键生态廊道与生态节点,综合提出“一带两区三屏”一体化空间结构。在此基础上,划定长江-鄱阳湖生态带作为区域生态主轴,明确重点保护区与优先修复区的空间分布,构建外围三大生态屏障,形成“纵横连通、内外协同”的生态安全网络。

本文基于MSPA识别景观要素,提取生态源地,同时将MSPA核心区与RSEI生境质量分级的功能相结合,能够提高生态源地识别的准确性和综合性^[24]。该格局可有效提升鄱阳湖流域的生物多样性保护能力,增强生态系统的抗干扰能力,减少因城市化扩张导致的生境破碎化问题。同时“一带两区三屏”是依据2023年生境质量空间分布提出,对于江西省国土空间修复规划策略进行细化与调整,具有一定的指导与实践意义。精准识别关键区域,提出生态修复与保护策略,是增强生态安全格局,提升区域生态系统服务功能的关键^[34]。

3.1 生态修复建议

1) 提高生态源地质量,强化核心生态源地保护。三大屏障区的大面积重要生态源地,不仅是整个生态经济区的核心节点,而且这些区域本身就是高森林覆盖率区,依托鄱阳湖流域和昌江及其支流,形成重要的生态屏障,是鄱阳湖生态经济区向东南丘陵过渡的生态缓冲带,应及时纳入生态保护红线,保证其良好的生境质量,精准维护生物栖息地的完整性。

2) 畅通生态廊道网络,提升“两区”修复效率。生

态通道在长江-鄱阳湖主轴区域最为密集,而中部南昌-高安-樟树一线阻力高、廊道中断,是当前生态网络中最关键的“断裂带”。因此,建议优先在该区域打通生态廊道节点,通过河岸绿化、复合廊道建设等手段强化生态源地间的连接,将宜春市中部至吉安市生态障碍优先修复区作为重点区域,该区域属于生态阻力值高值区,核心源地间迁移路径断裂率较高,应实施小微生境修复和缓冲带建设措施,通过小范围干预实现大范围生态效益;将生态夹点分布密集的南昌-上饶区划分为重点保护区,精准保护关键节点。

3)三大模块协同修复,保障全区域连通性。鄱阳湖生态经济区生态安全格局是基于“核心源地-辐射廊道”的骨架,将重点保护区和优先修复区与网络进行镶嵌耦合,三方面协同修复能够有效避免生态破碎化。在九江区域幕阜山-九岭山森林屏障、景德镇区域昌江流域生态屏障和鹰潭地区武夷山-信江生态廊道,是重要源地与廊道密集分布的重点治理划分区域,退化林修复等源地治理工程能够使源地的生物多样性为廊道提供种源。宜春市中部和吉安市西北部修复区与南昌-上饶夹点集群相接,属于生态红线划定重点考虑区域,共同治理可使保护区的严格管控为修复区提供“生态保险”。

3.2 与已有成果的比较

基于2023年鄱阳湖生态经济区土地类型分布与生境质量提取出重要生态源地和一般生态源地,其中重要生态源地属于生态系统服务功能重要区域,分布在九江市西部幕阜山余脉和九岭山区、上饶市东北部鄱阳县的怀玉山脉、鹰潭市的武夷山脉,该区域保留了原始的次生林和湿地,也是信江、昌江等水系的源头区域,是鄱阳湖生态经济区重要的水源涵养区,为生物提供稳定的觅食与繁殖场所。已有学者对鄱阳湖地区生态安全格局开展了相关研究,具有一定的参考价值。在现有研究中,张海铃等^[35]基于最小累积阻力模型与电路理论,识别环鄱阳湖城市群生态格局中的中部平原廊道稀疏问题,适用于城市群尺度下的生态修复部署。本文在其三大源地的基础上拓展了九江幕阜山-修水屏障,并结合生境质量动态评估分类源地。而江戈平等^[3]则从更宏观的视角出发,系统分析环鄱阳湖城市群2000—2020年生态安全格局的时空演变,揭示出土地利用变化、城市扩张和景观破碎化是主要驱动因素,并识别出主要驱动力的比重,本文在此基础上加入了生态空间结构的变化(RSEI指数)。

本文从结构建构与治理整合2个层面进一步深化生态安全格局的识别与响应路径。空间上,本文研究

对象为鄱阳湖生态经济区全域,突破环湖城市群的局限,更注重流域整体性和跨区域生态连通性;方法上,本文融合RSEI生态质量指数与电路理论阻力模型,系统构建“一带两区三屏”生态空间结构,不仅识别出重要生态源地和主干廊道,也明确优先修复区与外围生态屏障的空间联动关系。将“生态源地-廊道网络-修复区域-外部屏障”整合为一个有机的生态安全网络体系,从静态识别转向结构优化,从被动修复走向主动构建,是生态经济区建设不可避免的选择。

4 结论

1)2003—2023年区域生态质量总体较高,但呈“中部退化、边缘稳定”空间格局。

2)结合RSEI与MSPA识别出16个重要源地和41个一般源地,核心区集中于边缘林地生态保护区,是生态屏障与生物多样性保护的关键,一般源地分布破碎化,但在中部过渡带和重要源地周围分布,填补网络空白。

3)共提取119条生态廊道,构建“核心-边缘”嵌套式生态网络,通过关键、重要和一般生态廊道将中部高阻力脆弱区与边缘生态屏障相连通,增强网络稳定性。生态夹点密集于南昌-上饶交界,障碍点主要分布于宜春-吉安区域。

4)提出“源地保护-廊道联通-夹点调控-障碍修复”协同优化机制,通过“一带两区三屏”的空间结构提升生态网络的连通性和生态系统稳定性。但是遥感数据分辨率可能低估小尺度生境破碎化细节,未来可结合Sentinel-2等高分辨率数据优化生态源地与廊道识别精度。

参考文献:

- [1] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容[J].应用生态学报,2002,13(3):354-358.
XIAO D N, CHEN W B, GUO F L. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354-358.
- [2] ZHANG F Y, JIA Y Y, LIU X L, et al. Application of MSPA-MCR models to construct ecological security pattern in the basin: A case study of Dawen River basin[J]. Ecological Indicators, 2024, 160: e111887.
- [3] 江戈平,孟丽红,刘友存,等.环鄱阳湖城市群生态安全时空格局变化及其驱动力研究[J].生态科学,2024,43(5):22-30.
JIANG G P, MENG L H, LIU Y C, et al. Study on ecological security pattern and driving force of urban agglomeration around Poyang Lake [J]. Ecological Science, 2024, 43(5): 22-30.
- [4] OUYANG Z Y, ZHENG H, XIAO Y, et al. Improve-

- ments in ecosystem services from investments in natural-capital[J].*Science*, 2016, 352(6292):1455-1459.
- [5] 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 H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5):889-897.
- [6] ZHAO Y L, HUO A D, ZHAO Z X, et al. Novel method for evaluating wetland ecological environment quality based on coupled remote sensing ecological index and landscape pattern indices: Case study of Dianchi Lake wetlands, China[J]. *Sustainability*, 2024, 16(22):e9979.
- [7] TANG C C, LI Q, TAO H F, et al. Evaluation and driving factors of ecological environment quality in the Tarim River basin based on remote sensing ecological index[J]. *Peerj*, 2024, 12:e18368.
- [8] 王智允, 胡秀娟, 郑偲怡, 等. 山地遥感生态指数的构建及应用[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(11):3131-3140.
WANG Z Y, HU X J, ZHENG S Y, et al. Construction and application of hilly remote sensing ecological index [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(11): 3131-3140.
- [9] 范金明, 张超, 钱慧, 等. 岩溶石漠化地区生态环境演变及驱动力分析[J]. *森林与环境学报*, 2024, 44(3): 298-307.
FAN J M, ZHANG C, QIAN H, et al. Analysis of ecological environment evolution and driving forces in a karst rocky desertification area[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(3):298-307.
- [10] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. *地理学报*, 2018, 73(4):701-710.
PENG J, LI H L, LIU Y X, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiongan New Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4):701-710.
- [11] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 等. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价[J]. *生态学报*, 2023, 43(4):1461-1473.
LI Q Q, JIN X B, ZHANG X L, et al. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4):1461-1473.
- [12] LI J M, LIANG L E, CHAO Y, et al. Construction of the ecological security pattern of Mu Us sandy land on the basis of the "Source-Resistance-Corridor" theory[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 171:e113162.
- [13] SHEN Z, YIN H W, KONG F H, et al. Enhancing ecological network establishment with explicit species information and spatially coordinated optimization for supporting urban landscape planning and management[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 248:e105079.
- [14] WU T K, LU S W, DING Y C. Ecological security evaluation system integrated with circuit theory for regional ecological security pattern construction: A coordinated study of Chang-Zhu-Tan metropolitan area in China[J]. *Land*, 2025, 14(2):e257.
- [15] WU Y D, HAN Z Y, MENG J J, et al. Circuit theory-based ecological security pattern could promote ecological protection in the Heihe River basin of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(10): 27340-27356.
- [16] 陈绎安, 胡宝群, 汤江龙, 等. 生态系统服务供需权衡下南昌市生态安全格局演变及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(11):7316-7328.
CHEN Y A, HU B Q, TANG J L, et al. Analysis of the evolution of ecological security pattern in Nanchang City and its influencing factors under the balance of supply and demand of ecosystem services [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(11):7316-7328.
- [17] 金斌松, 聂明, 李琴, 等. 鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(3):268-275.
JIN B S, NIE M, LI Q, et al. Basic characteristics, challenges and key scientific questions of the Poyang Lake basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(3):268-275.
- [18] 杨文越, 叶泓妤. 基于生境质量的粤港澳大湾区生态网络识别[J]. *生态学报*, 2023, 43(24):10430-10442.
YANG W Y, YE H Y. Identification of ecological networks in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on habitat quality assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24):10430-10442.
- [19] GAO Y, MA L, LIU J X, et al. Constructing ecological networks based on habitat quality assessment: A case study of Changzhou, China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:e46073.
- [20] 刘海, 郑粮, 黄跃飞, 等. 鄱阳湖生态经济区成立前后NDVI时空动态变化及其驱动因素[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1):11-22.
LIU H, ZHENG L, HUANG Y F, et al. Spatial and temporal dynamics and its driving factors of vegetation cover before and after the establishment of Poyang Lake Eco-economic Zone [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1):11-22.
- [21] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5):589-595.
XU H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595.
- [22] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学*

- 报,2013,33(24):7853-7862.
- XU H Q. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (24) : 7853-7862.
- [23] 吴健生,张理卿,彭建,等.深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J].生态学报,2013,33(13):4125-4133.
- WU J S, ZHANG L Q, PENG J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen[J].*Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13):4125-4133.
- [24] ZHANG L L, LIU Q Y, WANG J, et al. Constructing ecological security patterns using remote sensing ecological index and circuit theory: A case study of the Changchun-Jilin-Tumen region [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: e123693.
- [25] XIONG C N, WEI H, LAN M J. Analysis of connectivity on greenland landscape in metropolitan region of Chongqing City[J].*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):2237-2244.
- [26] 杜佳衡,王影雪,潘悦,等.高原河谷县域景观生态风险评价与生态安全格局构建:以云南省大理州永平县为例[J].生态学杂志,2024,43(5):1509-1520.
- DU J H, WANG Y X, PAN Y, et al. Ecological risk assessment and ecological security pattern construction of county-level landscape in plateau valley: A case study in Yongping County, Dali Prefecture, Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(5):1509-1520.
- [27] 朱炳臣,李同昇,陈谢扬,等.汉江流域生态综合网络构建与生态安全格局识别研究[J].长江流域资源与环境, 2024, 33(2):362-373.
- ZHU B C, LI T S, CHEN X Y, et al. Research on the construction of ecological integrated network and identification of ecological security pattern in the Han River basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(2):362-373.
- [28] PENG J, YANG Y, LIU Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644:781-790.
- [29] 吴钰茹,吴晶晶,毕晓丽,等.综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性[J].生态学报,2022,42(4):1315-1326.
- WU Y R, WU J J, BI X L, et al. Application of the least cost distance model and the circuit theory model in the evaluation of wetland landscape connectivity in the Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (4):1315-1326.
- [30] 宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J].应用生态学报,2016,27(10):3344-3352.
- SONG L L, QIN M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (10):3344-3352.
- [31] 曹秀凤,刘兆顺,李淑杰,等.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以吉林省松原市为例[J].中国环境科学,2022,42(6):2779-2787.
- CAO X F, LIU Z S, LI S J, et al. Identification of key areas of ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security: A case of Songyuan City, Jilin Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42 (6):2779-2787.
- [32] 黄翰林,瞿德业,陆文静,等.鄱阳湖生态经济区景观生态风险评价及预测[J].环境科学与技术,2024,47(10):216-228.
- HUANG H L, QU D Y, LU W J, et al. Landscape ecological risk assessment and prediction of Poyang Lake ecological economic zone [J]. *Environmental Science and Technology*, 2024, 47(10):216-228.
- [33] 田智慧,尹传鑫,王晓蕾.鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J].环境科学,2023,44(2):816-827.
- TIAN Z H, YIN C X, WANG X L. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang Lake basin [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2):816-827.
- [34] 卢培嘉,韦燕飞,童新华,等.国土空间生态修复关键区域识别研究:以西安市为例[J].环境工程技术学报, 2024, 14(6):1877-1891.
- LU P J, WEI Y F, TONG X H, et al. Study on identification of key areas for ecological restoration of territorial space: Taking Xi'an City as an example [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(6):1877-1891.
- [35] 张海铃,叶长盛,胡梦姗.基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略[J].水土保持研究,2023,30(2):393-402.
- ZHANG H L, YE C S, HU M S. Identification and restoration strategy of key areas of ecological restoration in urban agglomeration around Poyang Lake based on ecological security pattern [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2):393-402.