

耦合生态系统服务功能与景观格局的 珠江上游生态网络优化

邓斐枫¹, 唐继敏¹, 余哲修^{1,2}, 黄豪¹, 梁峻琦¹, 王妍^{1,2,3}, 齐丹卉^{1,3}

(1.西南林业大学水土保持学院,昆明 650224; 2.国家林业和草原局云南沾益岩溶生态系统定位观测研究站,昆明 650224; 3.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室,昆明 650224)

摘要: [目的] 为应对珠江上游喀斯特地区生态退化、景观破碎化与连通性下降等问题,构建耦合生态系统服务功能与景观格局的生态网络优化框架,为流域生态保护与国土空间治理提供依据。[方法] 以珠江上游为研究区,依托 InVEST 模型量化水源涵养、土壤保持与固碳释氧三大核心服务功能,结合形态学空间格局分析(MSPA)提取核心景观要素,通过空间叠置筛选生态源地;进而融合多源自然-社会数据构建综合生态阻力面,借助电路理论与 Linkage Mapper 识别生态廊道、夹点与障碍点,进而提出生态网络优化策略。[结果] 研究共识别优质生态源地 29 个,总面积 4 728.27 km²,主要集聚于东南部山地,与“西北高、东南低”的综合阻力格局形成强烈反差。基于电路理论提取 74 条生态廊道,总长 3 274.82 km,整体呈“东密西疏”的非均衡分布特征;同时识别出 23 处生态夹点和 31 处生态障碍点,主要分布于地形收束与人为扰动叠加的关键瓶颈区域。[结论] 喀斯特恶劣基底与人类活动的“双重空间挤压”,致使珠江上游生态网络呈现强烈的空间极化与结构脆弱性。由此确立的“一核、两轴、三区、多点”空间优化蓝图,提出分区管控与靶向修复相结合的差异化策略,为西南喀斯特流域生态安全格局构建与生态韧性提升提供科学支撑。

关键词: 生态系统服务; 形态学空间格局分析(MSPA); 电路理论; 生态网络; 珠江上游

中图分类号:X171.1;Q149

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)05-0364-11

Ecological Network Optimization in the Upper Pearl River Basin by Coupling Ecosystem Services with Landscape Patterns

Deng Feifeng¹, Tang Jimin¹, Yu Zhexiu^{1,2}, Huang Hao¹, Liang Junqi¹, Wang Yan^{1,2,3}, Qi Danhui^{1,3}

(1.School of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2.Zhanyi Karst Ecosystem Observation and Research Station, Kunming 650224, China; 3.Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous & Rural Areas of Yunnan Province, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] To address issues including ecological degradation, landscape fragmentation, and decreased connectivity in the karst region of the upper reaches of the Pearl River, this study constructs an ecological network optimization framework that couples ecosystem service functions and landscape patterns, thereby providing a scientific basis for watershed ecological protection and territorial spatial governance. [Methods] Taking the upper reaches of the Pearl River as the study area, this study quantified three core ecosystem service functions: water conservation, soil conservation, and carbon sequestration and oxygen release-based on the InVEST model. Combined with morphological spatial pattern analysis (MSPA), core landscape elements were extracted, and ecological sources were screened through spatial overlay. On this basis, a comprehensive ecological resistance surface was constructed by integrating multi-source natural-social data.

收稿日期:2026-04-27

修回日期:2026-05-29

录用日期:2026-06-08

网络首发日期(www.cnki.net):2026-09-07

资助项目:云南省科技厅科技计划项目(202605AS350012,202502AE090046);云南省科技厅重点项目(202401AS070014);国家自然科学基金项目(32260420)

第一作者:邓斐枫(1998—),女,硕士研究生,主要从事生态修复治理研究。E-mail:18789806516@163.com

通信作者:齐丹卉(1979—),女,副教授,硕士生导师,主要从事石漠化治理、生态修复研究。E-mail:7942965@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

Circuit theory and Linkage Mapper were adopted to identify ecological corridors, pinch points, and barrier points, and then an optimization strategy for the ecological network was proposed. [Results] A total of 29 high-quality ecological sources were identified in this study, with a total area of 4 728.27 km², mainly concentrated in the mountainous areas of the southeast, forming a sharp contrast with the comprehensive resistance pattern of "high in the northwest and low in the southeast". Based on circuit theory, 74 ecological corridors were extracted, with a total length of 3 274.82 km, showing an overall unbalanced distribution pattern of "dense in the east and sparse in the west". Meanwhile, 23 ecological pinch points and 31 ecological barrier points were identified, which were mainly distributed in key bottleneck areas where topographic constriction and human disturbance overlapped. [Conclusion] The "dual spatial extrusion" from the unfavorable karst substrate and human activities leads to strong spatial polarization and structural vulnerability of the ecological network in the upper reaches of the Pearl River. The spatial optimization blueprint of "one core, two axes, three zones, and multiple points" established in this study, combined with the differentiated strategy of integrating zonal management and targeted restoration, provides scientific support for the construction of ecological security patterns and the improvement of ecological resilience in southwest karst watersheds.

Keywords: ecosystem services; morphological spatial pattern analysis (MSPA); circuit theory; ecological network; upper reaches of Pearl River

Received: 2026-04-27

Revised: 2026-05-29

Accepted: 2026-06-08

Online(www.cnki.net): 2026-09-07

珠江上游作为维系珠江流域及粤港澳大湾区的重要水源涵养地和生态安全战略屏障,在国家生态安全格局构建与流域高质量发展的背景下,其生态系统稳定性至关重要^[1-2]。该区域广泛发育典型喀斯特地貌,具有土层浅薄、岩石裸露率高、生境高度异质等脆弱本底特征^[3]。随着区域开发强度的持续增加,人地矛盾日益突出,导致景观破碎化加剧、生境连通性下降等一系列生态问题^[4-5]。在此地形复杂且生态环境敏感的流域区域,生态质量退化进一步诱发水土流失加剧及生态系统稳定性下降,严重制约区域可持续发展^[6-7]。生态网络作为刻画生态系统结构与过程联系的重要手段,通过构建生态源地、廊道与关键节点之间的空间连接关系,有助于提升生态斑块间连通性、降低景观破碎度,已成为喀斯特流域生态修复与保护的重要宏观途径^[8-10]。

目前,基于形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)与最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)等方法的生态网络构建不断发展,在提升景观连通性等方面取得较多应用成果^[11-13]。然而,现有研究^[14-15]多侧重于生态网络的空间格局特征,对生态系统服务功能的空间差异关注不足,尤其在喀斯特这种地质条件脆弱、伴随石漠化等退化问题突出的流域地区,更加凸显对生态功能约束的忽视。一方面,仅凭几何形态提取源地普遍缺乏对土壤保持、水源涵养等关

键生态系统服务功能的综合考虑,或从单一功能协同的角度考虑,导致生态网络优化与实际生态过程及水土保持需求之间存在一定偏差,难以有效反映功能与格局之间的耦合关系^[16]。例如,Fan等^[17]在西南典型喀斯特地区应用形态学空间格局分析识别生态源地,未纳入生态系统服务功能的评估;李政等^[18]则从功能服务与人类需求视角识别生态源地,忽略对形态空间格局的考量。另一方面,针对该区域“地貌脆弱性-人口密集-水源保护”的多重约束,现有研究^[19]多基于普适性指标构建阻力面,未能充分揭示喀斯特大坡度地形与植被退化过程对整体景观连通性的侵蚀机制。在此背景下,如何从功能与格局协同视角出发,克服单一形态空间格局识别的局限,揭示喀斯特独特的地质生境对生态流动路径的限制,已成为该区域生态安全格局构建中亟需解决的重要科学问题。综上所述,本研究以珠江上游为研究区,耦合对该区域生态安全具有关键支撑作用的水土保持等核心功能,构建“生态功能-景观格局-景观连通性”相结合的生态网络优化框架,旨在探讨喀斯特流域关键生态服务功能与景观连通性指标之间的空间耦合规律,提出适应不同地貌单元的差异化修复策略,为喀斯特流域水土流失防治、石漠化精准治理及国土空间格局优化提供科学依据与实践支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

珠江上游主要涵盖滇东至滇中东南部的昆明、曲靖等5市(州),面积约5.75万km²,是维系珠江全流域生态与水资源安全的咽喉要地(图1)。该区地处高原向丘陵过渡带,海拔217~2 867 m,属亚热带高原季风气候,多年平均气温9.5~24.0℃,年平均降水量900~1 200 mm,降水时空分布不均,雨季(5—10月)降水量占全年80%以上。

受喀斯特地貌与构造断裂协同作用,山岭河谷相间交错,地形极度破碎。在自然本底上,以南盘江为主体的辐射型水系构筑核心生态廊道;土壤以山原红壤与浅薄的石灰土为主。该区域面临的突出问题主要表现为岩石裸露率高、土层瘠薄、土壤侵蚀模数高且持水能力弱,在高强度人为扰动下,致使区域生境割裂加剧、生态网络连通受阻,资源开发与生态保育的空间矛盾日益凸显^[20]。

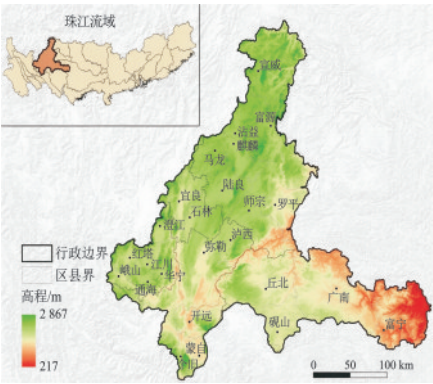


图1 研究区位置
Fig.1 Location of study area

1.2 数据收集与预处理

本研究的数据主要分为3类:1)生态系统服务各类指标数据;2)基于MSPA方法的基础数据,提取珠江上游生态源地;3)计算珠江上游综合生态阻力面所需的多源自然-社会基础数据。所有数据统一至WGS 1984坐标系,并重采样为30 m空间分辨率。数据来源见表1。

表1 数据来源
Table 1 Data sources

数据名称	数据来源	空间分辨率/m	年份
降雨量	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)	1 000	2024
蒸发量	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)	1 000	2024
土壤数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)	250	2024
DEM	中国科学院地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)	30	2024
土地利用	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)	30	2025
植被覆盖度	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)	250	2024
夜间灯光	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/)	500	2024
道路、水系	国家基础地理信息中心(https://www.ngcc.cn/)	30	2024

1.3 生态系统服务功能

综合考虑珠江上游流域的生态退化特征及区域保护目标,本研究选取水源涵养、土壤保持与固碳释氧3类关键生态系统服务功能,采用InVEST模型实施空间量化评估,并进行归一化处理,通过等权重叠加法生成研究区综合生态系统服务图层,运用自然断点分级法将生态系统服务模块划分为5个等级:一般重要、较重要、中等重要、高度重要和极重要,并提取综合生态系统服务价值最高的2类作为潜在生态源地的功能筛选基础。

1)水源涵养。水源涵养功能是指生态系统通过自然过程能够产出的淡水资源总量,即栅格范围内的降水量减去植物蒸腾和地表蒸发后剩余的水量^[21]。本研究利用InVEST模型的产水模块来计算珠江上游生态系统的产水服务^[22]。计算公式为:

$$Y(x)=[1-AET(x)/P(x)]P(x) \quad (1)$$

式中:Y(x)为栅格单元x的年产水量,mm;AET(x)为栅格单元x的实际蒸散发,mm;P(x)为栅格单元x的年降水量,mm。

2)土壤保持。土壤保持表征生态系统抵御水力侵蚀、维系地表物质稳态的核心抗扰动能力。其空间量化基于InVEST模型的泥沙截留模块进行计算^[23]。计算公式为:

$$RKLS=R\times K\times LS \quad (2)$$

$$USLE=R\times K\times LS\times P\times C \quad (3)$$

$$SD=RKLS-USLE \quad (4)$$

式中:RKLS为潜在土壤侵蚀量,t/hm²;USLE为实际土壤侵蚀量,t/hm²;SD为土壤保持量,t/hm²;R为降雨侵蚀因子;K为土壤可蚀因子;LS为坡度坡长因子;C为植被与经营管理因子;P为水土保持措施因子。

3)固碳释氧。固碳释氧功能表征着生态系统缓冲气候波动及维持碳平衡的核心能力。基于土地利

用数据和各碳密度数据,利用 InVEST 模型的碳储量模块对其进行空间量化^[24]。该模块通过概化复杂的自然碳循环过程,将全域碳库解构为地上生物碳、地下生物碳、土壤有机碳与死亡有机物碳 4 大基础组分^[25]。计算公式为:

$$C_t = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \tag{5}$$

式中: C_t 为碳固存总量,t/km²; C_{above} 为地上碳密度,t/km²; C_{below} 为地下碳密度,t/km²; C_{soil} 为土壤碳密度,t/km²; C_{dead} 为死亡有机物中的碳密度,t/km²。

1.4 形态学空间格局分析(MSPA)

MSPA 是一种基于图像形态学理论的空间模式识别方法,通过数学形态学运算对栅格数据的空间结构进行分割,从而对土地利用进行分类,在像素级别上生成景观生态斑块^[26]。本研究选取林地、灌木林作为前景,其他用地作为背景。利用 Guidos Toolbox 软件,采用默认的八邻域分析方法,对研究区的土地利用栅格数据进行 MSPA 分析,识别研究区域的 7 种核心景观类型:核心区、孤岛、孔隙、边缘区、桥接区、环线、支线,提取对维持连通性具有重要意义的核心区作为空间格局候选源地。

1.5 景观连通性评价

景观连接度调节着物质循环和能量流动的效率,在生物多样性保护中起着关键作用^[27]。研究将综合服务功能识别的生态源地与 MSPA 核心区进行空间叠置,获取既具备关键服务功能又具备稳定格局的斑

块。为规避边缘效应及细碎斑块对网络构建的干扰,设定 30 km²为最小面积阈值筛选出综合生态源地,并利用 Conefor 2.6 软件构建连接可能性指数(PC)和斑块重要性指数(dPC)模型,分析连接度特征,对综合生态源地进行重要性的评估。计算公式^[28]为:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^n}{A_L^2} \tag{6}$$

$$dPC = (PC - PC_{remove}) / PC \times 100\% \tag{7}$$

式中: a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和 j 的面积,km²; A_L 为景观总面积,km²; p_{ij} 为斑块 i 和 j 之间全部路径概率的乘积最大值; n 为斑块数量,个; PC_{remove} 为在假设移除斑块 i 之后,剩余所有斑块重新计算得到的景观连通性指数值。

1.6 生态阻力面构建

不同景观单元之间的变异性显著影响物种迁移,阻碍程度与生态系统服务平滑度呈负相关^[29]。综合考虑研究区的自然特征,分别选取土地利用类型、坡度、高程、植被覆盖度、距道路距离、距河流距离、人口密度、夜间灯光等 8 个关键评价指标作为生态阻力因子(表 2),将其划分为 5 个等级,并分别赋予 10、20、40、80、100 阻力值^[30]。利用 ArcGIS 欧氏距离及重分类工具生成单因子阻力面(图 2),并结合层次分析法确定各因子权重,进行一致性检验。所得的一致性比率(CR)为 0.034,表明评估结果是相互一致的,可用于生成最终的阻力权重。

表 2 评价因子体系及阻力系数
Table 2 Evaluation factors and resistance coefficients

阻力值 赋值	土地利用 类型	高程/m	坡度/(°)	人口密度/ (人·km ⁻²)	植被覆 盖度	距河流 距离/m	距道路 距离/m	夜间 灯光/lx
10	林地、水域	<460	<8	<150	>0.7	0~200	0~200	<5
20	草地、其他用地	460~800	8~15	150~500	0.6~0.7	200~500	200~500	5~20
40	耕地	800~1 200	15~25	500~1 000	0.5~0.6	500~1 000	500~1 000	20~35
80	未利用地	1 200~1 600	25~35	1 000~3 000	0.4~0.5	1 000~2 000	1 000~2 000	35~50
100	建设用地	>1 600	>35	>3 000	<0.4	>2 000	>2 000	>50
权重	0.25	0.10	0.15	0.10	0.20	0.05	0.10	0.05

1.7 基于电路理论的生态要素识别

1.7.1 生态廊道提取 生态廊道是保障生态源地之间物质和能量流动的通道,是保障生态过程、生态功能实现的关键生态用地^[31]。本研究基于综合生态源地与多源阻力面,利用电路理论 Linkage Mapper 工具,求取每对源地之间的成本加权距离及最小成本路径^[32],并依据廊道在区域网络中的连接强度与结构作用,将其划分为重要生态廊道和一般生态廊道。

1.7.2 生态夹点与生态障碍点 生态夹点是通过电流密度较高的区域,代表 2 个生态源地之间有较好的

连通性^[33]。利用 Pinchpoint Mapper 模块,在每条廊道内部独立运行电路模型,提取电流密度显著高于廊道均值的栅格集合,归并相邻高值栅格后得到夹点区域。生态障碍点是指那些明显抬升局部通行成本、弱化源地间功能联系,在修复之后又能带来明确连通性增益的区域^[34]。采用 Barrier Mapper 模块,通过滑动窗口逐像元评估局部阻力对整体廊道成本的贡献增量,将贡献值超过设定阈值的像元集合界定为障碍点^[35]。

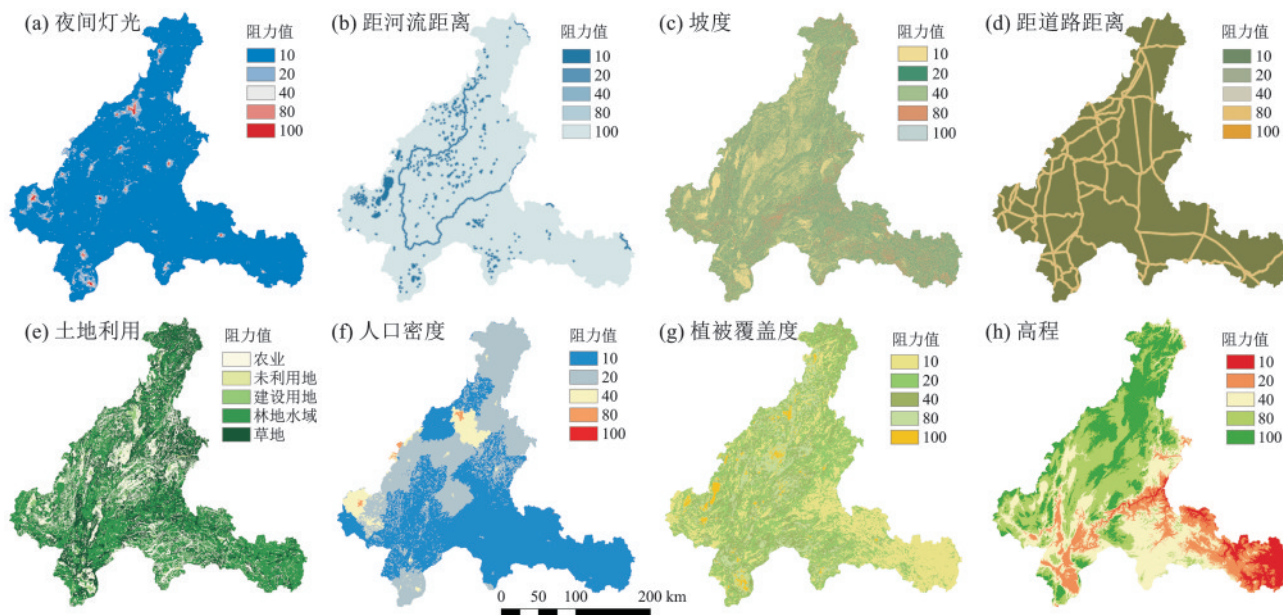


图 2 各因子阻力面

Fig.2 Resistance surfaces of individual factors

2 结果与分析

2.1 生态源地的识别与重要性评估

研究表明,珠江上游各项关键生态系统服务在喀斯特地貌约束下呈现山地聚集、边缘强化的空间格局(图 3),其中水源涵养与土壤保持功能的极重要区面积分别约为 2 156.47、2 161.29 km²,主要集中于东部至东南部及中西北部高山区,反映喀斯特环境的空间脆弱性。固碳释氧功能则呈大面积斑块状镶嵌分布,极重要区面积达 26 562.17 km²,占研究区总面积的 46.19%,表明该区域仍保留较为完整的山地

生态本底。综合服务高度重要区和极重要区面积分别为 11 924.29、5 929.27 km²,分别占研究区总面积的 20.7% 和 10.3%。整体空间趋势呈现以东南部山脉为骨架、向西北部递减的格局,高值区主要分布在文山州东部至东南部、红河州南部和曲靖市东部。综合来看,珠江上游的综合生态系统服务约有 1/3 的国土空间承载着区域生态安全的核心功能,高重要区和极重要区镶嵌于自然生境、地形突变及岩溶发育强烈的生态敏感地带,有效地保障珠江上游流域整体生态韧性和服务功能。

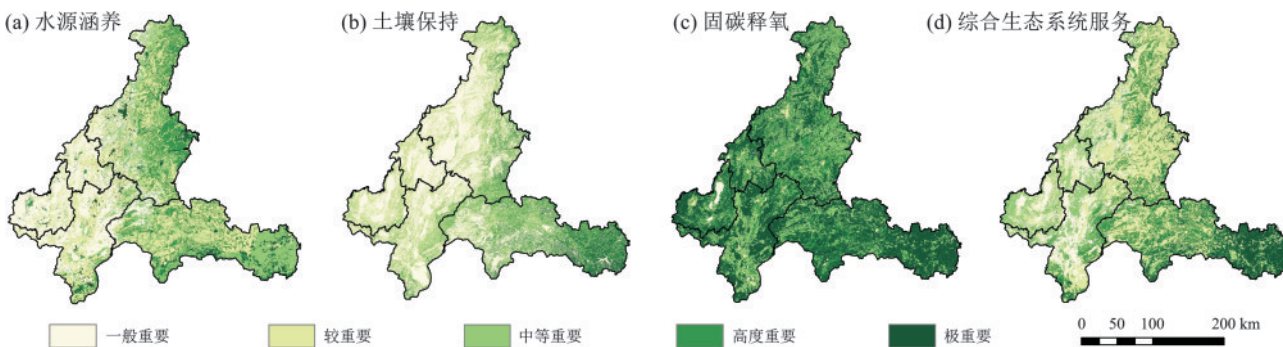


图 3 生态系统服务重要性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service importance

由图 4 可知,研究区生态景观结构异质性显著,其中林地景观总面积 26 567.87 km²,覆盖率达 46.21%。核心区作为潜在的生态源地,占据林地总面积的 46.26%,同时在整个研究区中占比高达 21.38%,显示其在景观中的显著生态优势和作为生物多样性维护与生态过程驱动主体的重要地位(表 3)。基于生态系统服务功能与形态空间格局的协同分析,共提取重叠斑块 38 898 个,最终识别出 29 个生态功能高度集聚的

斑块作为生态源地(图 5a),面积为 4 728.27 km²,占研究区总面积 8.2%。从空间格局来看,其主要高度集中于研究区南部及东南部,北部仅零星分布若干源地。文山州生态源地在东部分布较密集,其中富宁县境内的关键斑块是区域最大的连续核心源地,更是珠江上游的重要水源涵养区。相比之下,中西部的丘北县、砚山县等源地分布较为稀疏,表明这些区域生态系统服务功能、景观连通性和生态环境质量较差。

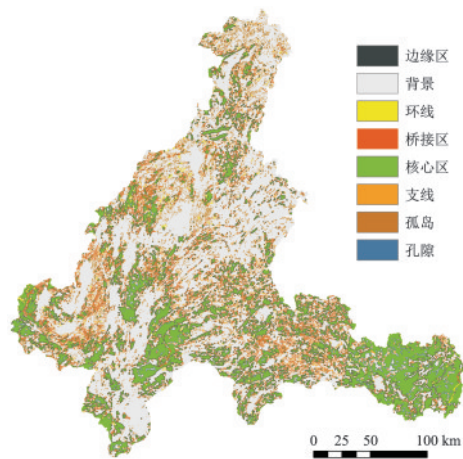


图 4 景观格局类型空间分布
Fig.4 Spatial distribution of landscape pattern types

根据斑块重要性指数,将生态源地分为重要源地($dPC \geq 2$)和次要源地($2 > dPC > 0$)(图 5b)。分级结果显示,重要源地共计 20 个(表 4),总面积达 4 383.33 km^2 ,主要高度集聚于研究区东南部。其中

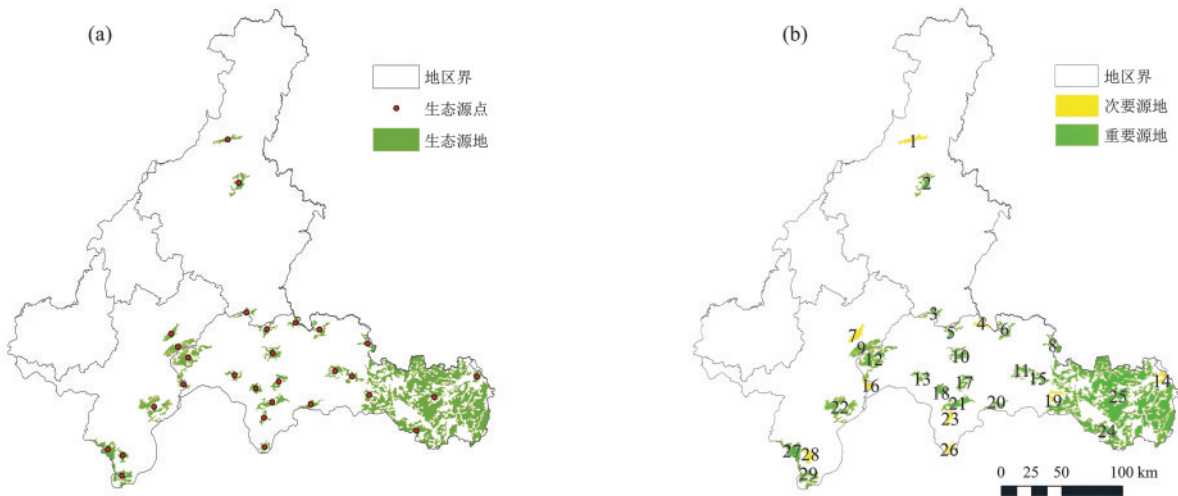


图 5 生态源地空间分布
Fig.5 Spatial distribution of ecological sources

表 4 重要源地景观连通性指数					
Table 4 Landscape connectivity index for key sources					
斑块编号	dPC	斑块面积/ km^2	斑块编号	dPC	斑块面积/ km^2
25	84.11	2 666.47	10	2.98	74.90
24	10.82	241.91	6	2.91	64.88
12	8.26	212.39	29	2.84	103.32
22	6.64	170.99	18	2.77	44.44
15	5.24	62.49	2	2.59	85.33
21	4.89	98.83	20	2.58	42.52
3	3.99	38.45	17	2.56	61.50
9	3.70	102.95	13	2.48	39.25
11	3.57	56.27	8	2.15	48.69
27	3.44	123.17	5	2.07	44.58

25号斑块 dPC 值最大,高达 84.11,是东南山地维持生态系统服务与景观连通性的核心枢纽。次要源地共 9 个,总面积仅为 344.94 km^2 ,表现出面积狭小且 dPC 值偏低特征,多以“孤岛”形态零散分布于研究区外围边缘地带。

表 3 MSPA 景观类型面积概况			
Table 3 Overview of areas of MSPA landscape types			
景观类型	总面积/ km^2	占林地总面积比例/%	占研究区总面积比例/%
核心区	12 291.31	46.26	21.38
孤岛	1 080.44	4.07	1.88
孔隙	601.44	2.26	1.05
边缘区	6 139.75	23.11	10.68
环线	560.06	2.11	0.97
桥接区	2 773.81	10.44	4.82
支线	3 121.06	11.75	5.43
合计	26 567.87	100.00	46.21

2.2 综合阻力面构建分析

测算结果(图 6)表明,研究区生态阻力值为 10~89,空间上呈“东南低,西北及中北部局部高”的显著分异格局。高阻力区主要集中在曲靖市、昆明市、玉溪市、红河州南北两端及文山州西南部,其中曲靖市呈大面积连片高阻特征。在空间拓扑上,高阻力带与建设用地扩张边界、主干路网轴线及夜间灯光高值区高度重合,表明城镇化扩张与高强度农业开发仍是重塑区域阻力格局的核心驱动力。低阻力区广泛分布于文山州东北部及东部地带,构筑了相对连续完整的生态基底。该区域凭借极高的植被覆盖度维持优良的生境质量,叠加稀疏的人口与微弱的灯光辐射,使得人为干扰降至最低,从而在全区保持最优的景观渗透性。

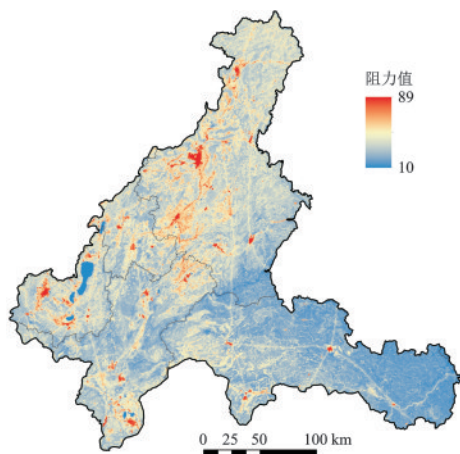


图 6 综合阻力面

Fig.6 Composite resistance surface

2.3 生态网络构建

2.3.1 生态廊道识别 利用 Linkage Mapper 结合生态源地和综合阻力面,提取出珠江上游 74 条生态廊道(图 7),总长度达 3 274.82 km,构成流域生态网络的基本拓扑骨架。廊道主要依托东南部连绵的喀斯特山地林区及主要河谷水系延伸展布,呈“东密西疏、南北贯通、中部密集”的非均衡分布特征。东南部优质源地为廊道网络提供稳定基础,而中部廊道受人为扰动与复杂破碎地形的双重挤压,多呈细长弯折,该区域既是全网物质能量交换的核心枢纽,也是极易遭受外部胁迫的空间脆弱带。基于成本权重距离与路径长度筛选出重要廊道和一般廊道,其中重要廊道 9 条,长度 1 598.92 km,主要沿西南部至东南部、东南部向北部延伸的主要连接带分布,发挥着跨区域、大尺度生态流干线输导作用。一般廊道有 60 条,长度 1 675.89 km,分布于中部和北部,多为邻近源地之间的短距离连接,增强网络的冗余度,提升整体韧性。

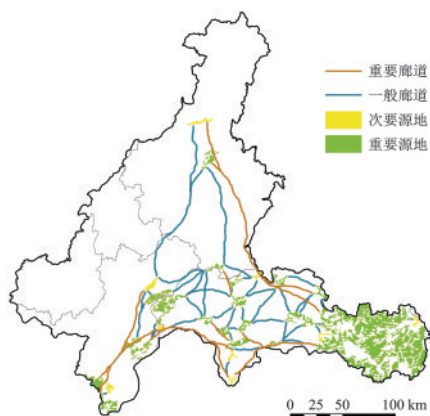


图 7 生态廊道重要性分布

Fig.7 Distribution of importance of ecological corridors

2.3.2 生态夹点和生态障碍点 在廊道网络基础上,通过叠加全域生态电流密度,共识别出 23 个生态夹点(图 8a),总面积仅 13.19 km²,但电流密度峰值达

51.75,呈现明显高值聚集特征。其形成主要受周边喀斯特生境退化、石漠化扩展和局地开发挤压可通行空间影响,导致生态流在此明显汇聚。

从空间分布看,夹点高度集聚于 2 类区域:一是东南部核心源地群与西部、北部边缘源地之间的衔接咽喉,尤其在源地距离较远、通道极少的区域最为显著;二是中南部廊道的狭窄过渡带,是西南、东南、北部诸源地多向交换的枢纽,因此生态流在中南部有限的低阻空间内叠加,容易形成高值夹点。这些区域空间脆弱,一旦受到道路建设、用地扩张或河岸硬化等影响,局部破坏就可能沿网络扩散,造成多条廊道功能受损。

通过障碍模拟,识别出 31 个生态障碍点(图 8b),总面积约 45.67 km²。这些区域恢复潜力较大,是开展连通性修复与生态补植的重点节点。空间叠置分析表明,障碍点主要集中于中部廊道密集区、北部纵向主干通道及西南至中部连接带。其中,中部核心联结区的障碍点与廊道骨架高度重合,是珠江上游生态流动最频繁、受人为干扰也最强的区域,应作为优先修复区。北部狭长通道则因替代路径少、联系单一,一旦关键阻隔未被消除,上下游生态交换就可能明显减弱。

3 讨论

3.1 珠江上游生态网络空间特征与“功能-格局”协同优势

珠江上游生态网络呈显著的“东南高连通、西北低破碎”的非均衡空间特征。综合生态系统服务高值区、生态源地与高连通廊道主要集聚于研究区东南部及南部山地,而中北部则表现为源地离散、廊道稀疏、阻力偏高的破碎化格局。此空间分异说明,珠江上游生态网络并非地形起伏的单向映射,而是喀斯特地貌约束、人类活动干扰和生态系统服务供给差异共同作用的结果。与昆明、曲靖等局地研究相比,本研究进一步从流域整体尺度揭示珠江上游生态网络的系统性不均衡,说明网络结构问题已不仅是局地破碎化,而是跨行政单元、跨地貌单元的整体性空间失衡^[36-37]。

在喀斯特山区传统识别中,一些连通度较高但因高强度水力侵蚀导致水土流失严重的林地被误判为优质源地;而部分生态功能极低的孤立林地也因其景观完整性被纳入^[38]。本研究框架将水源涵养、土壤保持与固碳释氧 3 项服务作为约束,确保筛选出的源地具有极高的生态服务产出。对于喀斯特这个地质极为脆弱、生态退化诱发岩溶干旱与石漠化加剧的特殊区域而言,能使生态源地更为客观地契合“功能-格局”一体化的生态修复现实。

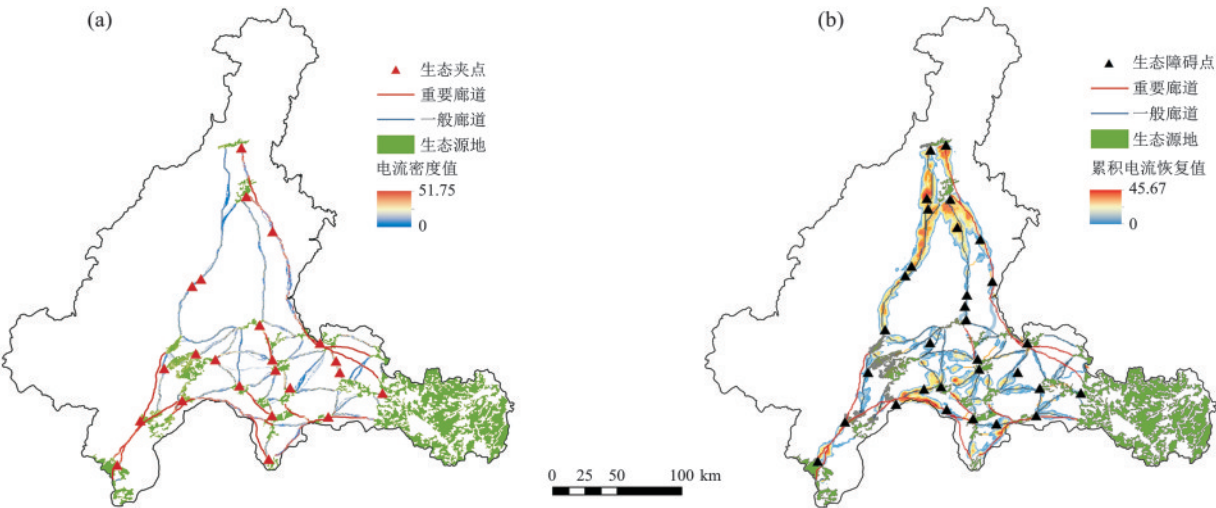


图 8 生态夹点与生态障碍点空间分布
Fig.8 Spatial distribution of ecological pinch points and ecological barrier points

3.2 喀斯特本底对网络空间格局的胁迫机制

珠江上游生态网络格局的形成,本质上是喀斯特脆弱地质条件与高强度人类活动共同作用的结果,主要表现为生境分散和生态通道断裂两种特征。喀斯特地区峰丛洼地广布、土层浅薄,天然限制了植被的连续分布,使生态源地在空间上呈现出零散分布的格局。同时,这种地貌条件也使生态系统对外界干扰十分敏感,坡耕地开垦或城镇扩张极易诱发石漠化,进而迅速提高生态阻力^[39]。

研究识别出 23 个高电流密度夹点,正是地貌限制与人类开发双重作用下的空间表征,与 Peng 等^[40]提出的“生态流被迫汇聚于低阻通道”机制一致。这些夹点在拓扑结构上跨越着不同喀斯特地质单元,形成生态网络中的关键“咽喉”。由于地形起伏大、裸岩率高,物种可迁移的通道极少,生态电流被迫高度集中。一旦夹点发生局部的生态退化,其导致的景观阻断将沿着廊道迅速扩散,造成生态系统服务功能的整体性破坏。因此,喀斯特流域的生态网络具有更显著的结构脆弱性,关键夹点的保护具有无可替代的决定作用。

3.3 面向网络空间优化的策略与研究局限

2018 年,云南省人民政府发布《云南省生态保护红线》^[41],明确对珠江上游及滇东南喀斯特地带划定水土保持生态保护红线。在此基础上,国家“十五五”规划提出高质量发展的战略要求,将推动珠江上游生态大保护与绿色发展上升为国家区域重大战略。基于上述背景,本研究通过生态系统服务与景观格局耦合,构建“一核、两轴、三区、多点”的生态网络优化框架(图 9),为珠江上游国土空间治理提供细致的指导方案。“一核”即东南部核心生态单元,集聚优质源地,是土壤保持与水源涵养的关键区。须严

守保护界线,重点维护原始喀斯特森林,确保持续稳定地向西北部输送优质的生态环境。

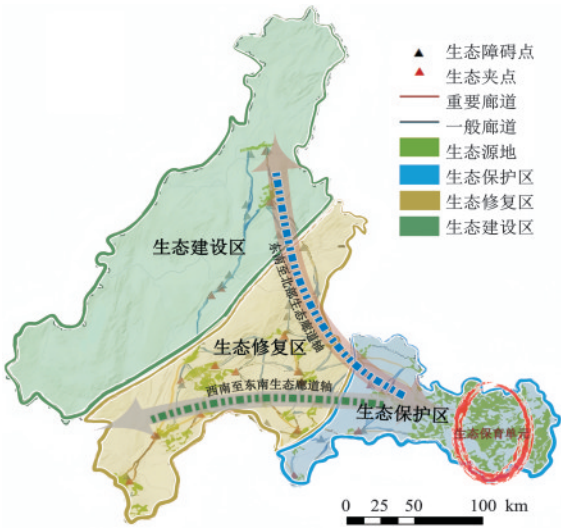


图 9 珠江上游生态网络优化
Fig.9 Optimization of ecological network in upper reaches of Pearl River

“两轴”构筑生态流跨域传输的拓扑骨架。其中,横贯西南至东南的生态大动脉依托优质连片源地与主干廊道,打通核心保育区向外层空间的输导路径,保障水土保持与碳汇功能;而东南向北部延伸的联系轴,衔接北部的离散源地,承担着跨越不同喀斯特地貌单元的宏观生态调度与网络支撑重任。

“三区”的划定准确对应不同区域所面临的生态压力与特征。东南区生态条件优越、连通紧密,因此划定为生态保护区,维系核心生态资源和主要生态通道;中部作为廊道密集且夹点、障碍点高发的过渡带,划设为生态修复区,着重修复自然连通性、提升生态功能;北部及中西部存在生态斑块缩减、景观破

碎等突出问题,设为生态建设区,通过人工干预与生境踏脚石培育来强化生态网络。

“多点”则聚焦网络修复的关键节点,即对识别出的23处生态夹点与31处生态障碍点实施针对性保护与修复。夹点作为生态流被迫汇聚的“拓扑咽喉”,需严格保护,并通过植被修复保障廊道的连续性;障碍点则通过道路生态化、缓冲带重建和绿地补植等措施,提高生态网络通行能力。

整体来看,珠江上游生态网络优化核心在于“保核、强轴、分区、补点”的空间协同调控,在脆弱地质和人为干扰双重约束下,实现服务功能与景观格局同步提升,推动生态格局由静态保护向更加韧性的动态治理转变。然而,研究仍存在一定局限性。一方面,在模型参数设置上,虽然采用多源数据,但对喀斯特地下水文过程与生态连通性关联的考虑尚显不足,未来应进一步引入地下岩溶连通性指标;另一方面,当前的生态阻力面设定较少触及动态演变层面,未能反映气候波动下植被演替的效应。后续研究应结合多情景模拟,探讨在气候变化与人类活动双重压力下,珠江上游生态网络结构的演变趋势与韧性阈值。如何将生态网络优化策略有效融入地方行政管理体系,实现跨区域的生态补偿与协同治理,依然是未来亟待解决的问题。通过持续监测与模型更新,本研究旨在为筑牢珠江流域高质量发展的生态安全屏障提供坚实的科学支撑。

4 结论

1)珠江上游综合生态系统服务功能呈“东南集聚、西北衰减”格局。高值区集中于文山、红河南部及曲靖东部,构成区域水土保持与水源涵养的核心基底;中西北部受喀斯特发育与人类活动双重胁迫,服务供给低且退化风险突出。

2)研究以30 km²为阈值筛选出29个生态源地,总面积4 728.27 km²,在东南部呈大面积连片聚集分布,中北部区域趋于离散,直观揭示地质本底与人为扰动对区域景观结构的协同塑造。

3)生态网络包含74条生态廊道(总长3 274.82 km)、23处生态夹点和31处障碍点,呈非均衡网状布局,关键节点集中于地形收束与交通干扰叠加区,成为限制物种迁移的关键空间瓶颈。

4)基于“生态功能-景观格局-景观连通性”耦合框架构建“一核、两轴、三区、多点”的空间优化格局,并针对源地极化特征及关键节点的双重胁迫,提出“分区分管、靶向修复”策略,为西南喀斯特流域突破高阻力基底、提升生态韧性提供长效指导。

参考文献:

- [1] 傅伯杰,黄光庆,张虹鸥,等.强化珠江流域生态保护与绿色发展助力粤港澳大湾区建设[J].中国科学院院刊,2023,38(10):1440-1446.
Fu Bojie, Huang Guangqing, Zhang Hongou, et al. Strengthening ecological protection and green development in Pearl River basin to support construction of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(10): 1440-1446.
- [2] 梁晨,穆泳林,智烈慧,等.珠江流域湿地保护优先格局构建与保护空缺识别[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(1):142-150.
Liang Chen, Mu Yonglin, Zhi Liehui, et al. Systematic conservation planning of freshwater wetlands in Pearl River basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(1): 142-150.
- [3] Zhang Shiwen, Wang Yan, Zhang Chao, et al. Evaluation on the adaptability of Yunnan karst ecosystems based on rock-soil-water-vegetation [J]. Ecological Engineering, 2023, 193: e107009.
- [4] 胡浩穹.国土空间规划背景下城市群生态安全格局和生态修复体系的构建与耦合[D].天津:天津大学,2021.
Hu Haoqiong. Construction and coupling of ecological security pattern and ecological restoration system of urban agglomerations under the background of territorial and spatial planning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [5] Dadashpoor H, Azizi P, Moghadasi M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area [J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 707-719.
- [6] Peng Xudong, Dai Quanhui. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022, 10(2): 217-227.
- [7] 王君玲,赵东,赵樊.基于生态系统安全评估的山区城市群生态网络构建:以黔中城市群为例[J].环境科技,2025,38(4):7-11.
Wang Junling, Zhao Dong, Zhao Fan. Construction of ecological network for mountainous urban agglomeration based on ecological security assessment: Using the central Guizhou urban agglomeration as a case study [J]. Environmental Science and Technology, 2025, 38(4): 7-11.
- [8] 丁宇,张雷,曾祥坤.粤港澳大湾区生态功能网络构建及对策[J].生态与农村环境学报,2019,35(5):573-581.
Ding Yu, Zhang Lei, Zeng Xiangkun. The construction of an ecological function network and its application in the greater bay area, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 573-581.
- [9] Chen Wenhao, Liu Huimin, Wang Jinlong. Construction

- and optimization of regional ecological security patterns based on MSPA-MCR-GA Model: A case study of Dongting Lake basin in China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 165: e112169.
- [10] 李欣, 郑颖, 陈安宁, 等. 基于生态安全格局与风险评价的生态修复优先区识别: 以神木市为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(19): 8784-8797.
- Li Xin, Zheng Ying, Chen Anning, et al. Identification of ecological restoration priority areas based on ecological security patterns and risk assessment: A case study of Shenmu City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19): 8784-8797.
- [11] Wang Yujie, Qu Ziya, Zhong Qicheng, et al. Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: e109258.
- [12] 潘振华, 周媛, 姚婧, 等. 基于形态空间格局分析与最小累积阻力模型的城市热环境生态网络优化研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(5): 1085-1093.
- Pan Zhenhua, Zhou Yuan, Yao Jing, et al. Research on optimization of urban thermal environment ecological network based on MSPA and minimum cumulative resistance model[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, 41(5): 1085-1093.
- [13] Dickson B G, Albano C M, Anantharaman R, et al. Circuit-theory applications to connectivity science and conservation[J]. *Conservation Biology*, 2019, 33(2): 239-249.
- [14] Li Yangyang, Zhang Yuzhe, Jiang Zhiyun, et al. Integrating morphological spatial pattern analysis and the minimal cumulative resistance model to optimize urban ecological networks: A case study in Shenzhen City, China[J]. *Ecological Processes*, 2021, 10(1): e63.
- [15] 姚采云, 安睿, 窦超, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的三峡库区林地生态网络构建与评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1953-1962.
- Yao Caiyun, An Rui, Dou Chao, et al. Research on construction and evaluation of forest land ecological network in Three Gorges Reservoir area based on MSPA and MCR model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 1953-1962.
- [16] 杨欣, 肖豪立, 王艺霏. 长江中游城市群生态网络构建、优化与协同治理[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 300-309.
- Yang Xin, Xiao Haoli, Wang Yifei. Construction, optimization and synergistic governance of the ecological network of urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 300-309.
- [17] Fan Jingyang, Liu Shiliang, Wang Wanting, et al. Quantifying the ecological network dynamics associated with ecological restoration projects: A case study in Southwest China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2025, 62: e03744.
- [18] 李政, 丁忆, 王亚林, 等. 基于最小累积阻力模型的山地石漠化地区生态安全格局构建: 以重庆市南川区为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1046-1054.
- Li Zheng, Ding Yi, Wang Yalin, et al. Construction of ecological security pattern in mountain rocky desertification area based on MCR model: A case study of Nanchuan, Chongqing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8): 1046-1054.
- [19] Chen Chulin, Shi Lei, Lu Yu, et al. The optimization of urban ecological network planning based on the minimum cumulative resistance model and granularity reverse method: A case study of Haikou, China[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 43592-43605.
- [20] Sun Haojun, Zhang Shaoyun, He Songyang, et al. Characteristics and forecasting of rocky desertification dynamics in the Pearl River source region from 1990 to 2030[J]. *Land*, 2025, 14(5): e984.
- [21] 李芳, 张金龙, 杨环. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游 1990—2018 年产水量模拟[J]. *高原气象*, 2022, 41(3): 698-707.
- Li Fang, Zhang Jinlong, Yang Huan. Simulation of annual water yield in the upper Heihe River basin from 1990 to 2018 based on InVEST[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(3): 698-707.
- [22] 孙琪, 徐长春, 任正良, 等. 塔里木河流域产水量时空分布及驱动因素分析[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(8): 114-122.
- Sun Qi, Xu Changchun, Ren Zhengliang, et al. Spatiotemporal variation in water yield and their underlying mechanisms in Tarim River basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 114-122.
- [23] 李井浩, 柳书俊, 王志杰. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3): 287-298.
- Li Jinghao, Liu Shujun, Wang Zhijie. Multi-scenario simulation of spatiotemporal changes of land use pattern and ecosystem services in Yunnan-Guizhou Plateau based on FLUS and InVEST models[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 287-298.
- [24] 张宇洁, 张晓萍, 孙伟楠, 等. 1970—2020 年北洛河流域产水、保土、固碳生态系统服务时空演变特征与权衡/协同关系[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 365-377.
- Zhang Yujie, Zhang Xiaoping, Sun Weinan, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and trade-offs/synergies of water yield, soil conservation, and carbon storage ecosystem services in the Beiluo River basin from 1970 to 2020[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 365-377.
- [25] 刘蕊婷, 马淑娟, 张学万, 等. 森林生态系统五大碳库碳储量估算模型及其影响因素研究进展[J]. *林业建设*, 2024, 42(6): 11-25.

- Liu Ruiting, Ma Shujuan, Zhang Xuewan, et al. Research progress on the estimation model of carbon storage in five major carbon pools for forest ecosystems and their influencing factors[J]. *Forestry Construction*, 2024, 42(6): 11-25.
- [26] Peng Jian, Yang Yang, Liu Yanxu, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [27] Bombrun M, Dash J P, Pont D, et al. Forest-scale phenotyping: Productivity characterisation through machine learning[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: e99.
- [28] Li Yimin, Zhao Juazhen, Yuan Jing, et al. Constructing the ecological security pattern of Nujiang prefecture based on the framework of "importance-sensitivity-connectivity" [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(17): e10869.
- [29] Zhang Song, Zhang Yu, Xiong Kangning, et al. Construction of forest ecological security patterns based on MSPA model and circuit theory in the desertification control forests in South China karst[J]. *Heritage Science*, 2025, 13: e432.
- [30] Lei Dai, Zhi Jiewang. Construction and optimization strategy of ecological security pattern based on ecosystem services and landscape connectivity: A case study of Guizhou Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(15): 45123-45139.
- [31] 连虎刚, 刘春芳, 倪博文, 等. 西北干旱区自然保护地体系生态网络构建及优化: 以河西走廊为例[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(1): 259-270.
- Lian Hugang, Liu Chunfang, Ni Bowen, et al. Construction and optimization of ecological network of natural protected areas in the northwestern arid region: A case study of Hexi Corridor[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(1): 259-270.
- [32] 郭金龙, 李成, 赵洁, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别: 以淮河流域为例[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(10): 5718-5731.
- Guo Jinlong, Li Cheng, Zhao Jie, et al. Identification of key areas for territorial ecological restoration based on ecological security patterns: A case study of the Huaihe River basin[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(10): 5718-5731.
- [33] Zhang Qishun, Tang Fuping, Chen Honghua, et al. Assessing landscape fragmentation and ecological connectivity to support regional spatial planning: A case study of Jiangsu Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 162: e112063.
- [34] 潘竟虎, 王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. *生态学报*, 2021, 41(7): 2582-2595.
- Pan Jinghu, Wang Yun. Ecological security evaluation and ecological pattern optimization in Taolai River basin based on CVOR and circuit theory [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2582-2595.
- [35] Zhai Tianlin, Huang Longyang. Linking MSPA and circuit theory to identify the spatial range of ecological networks and its priority areas for conservation and restoration in urban agglomeration[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: e828979.
- [36] 李志英, 李媛媛, 李文星, 等. 基于形态学空间格局分析与最小累积阻力模型的昆明市生态安全格局构建研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(1): 69-79.
- Li Zhiying, Li Yuanyuan, Li Wenxing, et al. Study on the construction of ecological security pattern in Kunming based on MSPA and MCR model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(1): 69-79.
- [37] Qin Jizheng, Dai Jiping, Li Songhui, et al. Construction of ecological network in Qujing City based on MSPA and MCR models[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: e9800.
- [38] 范春苗, 王志泰, 汤娜, 等. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6620-6632.
- Fan Chunmiao, Wang Zhitai, Tang Na, et al. Construction of ecological network in downtown of Guiyang City based on morphologically spatial pattern and spatially principal component analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6620-6632.
- [39] 周豹, 赵俊三, 陈国平, 等. 多情景模拟下滇东南喀斯特地区生态系统服务评估与网络优化[J]. *环境科学*, 2025, 46(7): 4615-4627.
- Zhou Bao, Zhao Junsan, Chen Guoping, et al. Ecosystem services assessment and network optimization under multiple scenario simulations in the karst area of south-east Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4615-4627.
- [40] Peng Jian, Pan Yajing, Liu Yanxu, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [41] 方刘花, 张智勇, 文传浩. 推动珠江上游生态大保护与绿色发展的对策建议[J]. *社会主义论坛*, 2026(3): 23-24.
- Fang Liuhua, Zhang Zhiyong, Wen Chuanhao. Countermeasures and suggestions for promoting ecological comprehensive protection and green development in the upper reaches of the Pearl River[J]. *Socialist Forum*, 2026(3): 23-24.