

卢泓杏, 赵宇鸾. 基于生态安全格局的岩溶山地国土空间生态修复关键区识别——以贵州省关岭县为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 349-363.

DOI: 10.11932/karst2024y017

基于生态安全格局的岩溶山地国土空间 生态修复关键区识别 ——以贵州省关岭县为例

卢泓杏^{1,2}, 赵宇鸾^{1,2,3}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特生态环境
国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001; 3. 贵州师范大学关岭喀斯特
生态系统野外科学观测研究站, 贵州 关岭 561301)

摘要:为识别县域国土空间生态修复关键区,以滇黔桂石漠化片区的贵州省关岭县为例,选取2020年国土变更调查数据、“三区三线”划定成果、高程DEM等数据,利用MSPA、景观连通性指数、电路理论等方法,通过构建生态安全格局,识别生态夹点、生态障碍点等作为生态修复关键区。结果表明:(1)识别关岭县37块生态源地(449.78 km²),其受不同石漠化程度影响呈现东西部集中成片、中部零星离散的空间分布特征;(2)提取74条生态廊道(140.775 km)有效连接零散分布的源地,等级较高的生态廊道多分布在石漠化程度较低区域。共识别36处生态夹点和14处生态障碍点作为国土空间生态修复关键区,构建出“三区、两轴、多点”的国土空间生态修复格局以提高生态修复成效;(3)确定生态夹点区的生态修复面积为757.84 hm²,主要分布在研究区中部的低阻力区域,确定的生态障碍点区的生态修复面积为364.48 hm²,主要集中在研究区中部的人类活动密集区,其分布范围受人类活动与大面积、深程度石漠化的双重干扰;(4)生态修复措施需结合实际石漠化治理成效及修复成本科学推进,并根据胁迫因子的差异性提出有利于关岭县生态修复与岩溶地区环境保护的规划布局。

关键词:安全格局;生态节点;生态修复;岩溶山地;关岭

创新点:采用形态学空间分析法叠加景观连通性分析、生态红线、自然保护区等综合识别生态源地,并分析生态源地重要性、数量等特征与岩性分布之间的关系,提高源地识别的科学性,弥补以往研究的不足。

中图分类号: P641;X171.4 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0349-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

西南岩溶山地特别是贵州生态系统脆弱,人地

矛盾尖锐^[1]、生境破碎化严重、生物多样性丧失等生态问题频发^[2],威胁到两江上游生态可持续发展^[3-4]。

针对生态退化问题,《国务院关于支持贵州在新时代

基金项目: 贵州省科技厅科技创新基地建设项目(黔科合中引地[2023]005);贵州省自然科学基金项目(黔科合基础-ZK[2023]重点027)

第一作者简介: 卢泓杏(1998—),女,硕士研究生,研究方向: 岩溶生态建设与区域经济。E-mail: 2729816289@qq.com。

通信作者: 赵宇鸾(1985—),男,博士,教授,博士研究生导师,研究方向: 土地利用与山区发展。E-mail: zhaoyl.09b@ignsrr.ac.cn。

收稿日期: 2023-06-17

西部大开发上闯出新路的意见》明确提出贵州省要坚持生态优先绿色发展,高质量建设国家生态文明试验区,筑牢长江、珠江上游生态安全屏障,国土空间生态修复为此目标的实现提供了调控路径^[5]。为精准识别生态修复关键区,规避诉求复杂、利益主体多种问题并做到系统修复,构建生态安全格局可提供有效空间措施^[6-7]。确保生态系统的可持续性和稳定性是生态安全格局的核心要求,国土空间生态修复工作要求落实“山水林田湖草沙”生命共同体理念,强调全域、全要素、全过程的统筹治理,可见生态安全格局与国土空间生态修复工作的整体性视角与系统性理念一致^[8]。因此,以维护区域生态安全稳定为导向,科学构建生态安全格局并精准识别国土空间生态修复关键区,对协调生态保护与经济发展的平衡具有重要意义。

岩溶山地生态本底脆弱,地形复杂、景观破碎程度高,生态问题突出^[9]。县域尺度的岩溶山地生态问题多以石漠化治理^[10-11]、水源涵养^[12]、生态系统服务研究进展^[13]等研究为主,缺乏基于生态安全格局构建的国土空间生态修复区识别视角。县域作为国土空间生态治理的行政单元,加强国土空间生态修复区识别研究尤为必要^[14]。基于生态安全格局构建识别国土空间生态修复关键区正逐步发展为“源地—阻力面—廊道—节点—网络空间”的综合研究框架^[15-16]。其中,源地识别是构建生态安全格局的关键环节,包括以风景名胜区或自然保护区分布的用地类型识别方法^[17]和综合指标体系评价法^[18]两类。形态空间格局分析方法(MSPA)从像元层面识别出研究区内对景观连通性具有重要作用的区域,精准判断景观的类型和结构,常结合 Conefor 软件来实现景观连通性评价,科学筛选生态源地^[19]。阻力面多采用综合指标结合专家意见进行赋值,并采用不透光表面指数、灯光数据等进行修正^[20]。生态廊道的提取多采用 MCR 模型^[21]、重力模型^[22]、蚁群模型^[23]和电路理论^[24]。电路理论运用电流在电阻面随机游走的特征模拟物种在源地间随机迁移扩散,通过累积电流的大小直观反映廊道及节点的相对重要性并识别节点的位置,提取出最合理的廊道宽度,弥补其他模型难以模拟生态流动的不足。

关岭布依族苗族自治县具有岩溶山地生态脆弱区的典型性和人地矛盾尖锐等特征^[25-26]。城市化加速与大量城市基础设施建设的发展,加剧关岭县景

观破碎、植被覆盖减少等生态退化现象^[27],导致经济发展与生态保护目标失衡,亟需开展生态修复关键区识别研究。鉴于此,本研究基于 MSPA、生态保护红线、自然保护区范围、景观格局指数和电路理论等构建关岭县生态安全格局,识别生态夹点、生态障碍点等作为国土空间生态修复关键区域,提出用地现状修复策略,以期为加强北盘江乃至珠江流域的生态屏障建设提供借鉴。

1 研究区概况

关岭布依族苗族自治县位于贵州省安顺市,岩溶地貌面积占全县国土空间的 83.83%,是滇黔桂石漠化片区,生态保护红线面积占国土空间的 25.10%,属国家乡村振兴重点帮扶县(图 1)。关岭县属中亚热带季风湿润气候,多年平均气温 16.2℃,年平均最高气温 16.9℃,最低气温 15.4℃;年平均降雨量 1 205~1 656 mm;珠江上游支系北盘江流域的高原峡谷地带,地形起伏大且地貌复杂多样,是典型的岩溶山地区域,同时分布有北盘江大峡谷国家湿地公园、关岭化石群国家地质公园、花江大峡谷、濞陵河峡谷等生态区;2020 年全县人口 28.2 万,人口密度为 224 人·km⁻²。关岭县岩溶山区石漠化面积广、程度深,人地矛盾突出,生态退化问题造成该县生境破碎和生态系统供给服务能力较弱。

2 研究方法

2.1 数据来源

关岭县 2020 年土地利用数据来源于贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室,分辨率为 30 m。立足研究区地理位置与生态本底,选取陆域生态系统构建生态安全格局,利用 ArcGIS10.8 提取耕地、园地、林地、草地、交通运输用地、城镇村及工矿用地、水域及水利设施用地、其他土地共 8 类分析用地(图 1);生态保护红线、自然保护区等数据来源于贵州省“三区三线”划定成果;高程数据 DEM 源自地理空间数据云网站;道路网数据来源于 Open Street Map 平台。

2.2 生态源地综合识别及重要性评价

生态源地是区域物种生存与迁移的栖息地^[28],

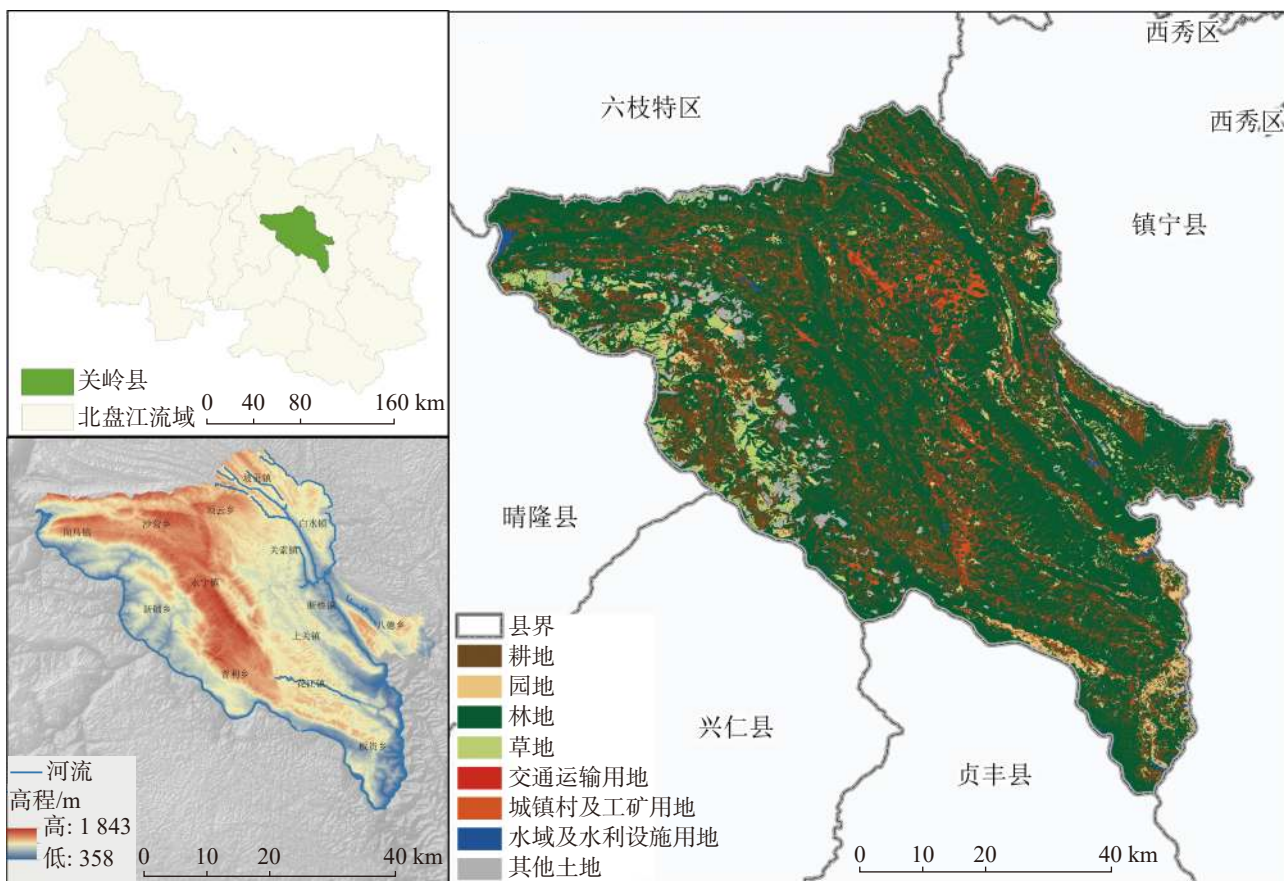


图 1 研究区地理位置及土地利用类型分布

Fig. 1 Geographical location and distribution of the land use of the study area

也是构建生态网络的基础。为提高源地筛选的科学性,本研究采用 MSPA 分析结果叠加生态红线和自然保护区划定范围筛选源地。基于研究区生态现状,将林地、草地、水域及水利设施用地三种用地类型作为前景,其他用地类型为背景,识别出 7 类景观类型。其中核心区是生境质量较好、面积较大、抗干扰能力较强的斑块,对物种迁移与扩散具有重要意义,可作为生态源地。但核心区斑块破碎化严重,结合实际情况,参考已有研究^[29],初次筛选面积大于 1 km² 的核心区作为生态源地。

源地连通性可表征物种在不同源地斑块间流动与扩散的便利或阻碍程度,连通性越高的生态源地对提高区域生态安全越有利^[30]。本研究将初次提取的源地斑块,运用 Conefor 2.6 软件,选取整体连通性指数 (IIC)、可能连通性指数 (PC) 进行连通性分析,其中斑块重要性指数 (dPC) 的值域可用于筛选生态源地及其重要性划分^[31],根据连通性评价结果将斑块重要性分为一级源地、二级源地和三级源地。

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \cdot a_j}{1 + nl_{ij}}}{s^2} \quad (1)$$

式中: n 代表景观斑块数量; a_i 、 a_j 分别代表斑块 i 和斑块 j 的面积; nl_{ij} 表示斑块 ij 之间的连接; s 是景观总面积。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}}{s^2} \quad (2)$$

式中: n 代表景观斑块数量; a_i 、 a_j 分别代表斑块 i 和斑块 j 的面积; p_{ij} 代表物种在斑块 i 和斑块 j 之间所有路径流动的最大概率; s 是景观总面积。PC 的值域范围在 0~1 之间,值域越高,景观连通性越好。

$$dI(dPC) = 100 \frac{I - I'}{I} \quad (3)$$

式中: 变量 I 代表任意景观的连通性指数,表征本文中选取的 IIC 和 PC,分别用 $dIIC$ 和 dPC 表示; I' 代表剔除某斑块后的景观连通性最终值域。

2.3 生态阻力面构建

为寻求适宜的生存栖息地,物种会随机游走在

不同生态源地间,其迁移和扩散路径的选择需要克服一定阻力。生态源地适宜性越高,生物迁移和扩散的阻力越小。本研究立足于岩溶山地自然地理特征,考虑到人类—自然环境双重干扰,选取土地利用类型、高程、坡度、距道路距离为本研究的阻力因子。参考已有研究的赋值标准^[32-34],采用层次分析法结合专家意见确定各阻力因子的权重(表 1)。

表 1 生态阻力因子赋值及权重
Table 1 Weight and assignment of ecological resistance factors

阻力因子	亚 类	阻力值	权重
土地利用类型	林地	3	0.45
	草地	5	
	其他用地	150	
	园地	150	
	耕地	400	
	水域及水利设施用地	400	
	交通设施用地	800	
	城镇村及工矿用地	1 000	
高程/m	360~500	50	0.15
	500~1 000	100	
	1 000~1 500	150	
	1 500~1 841	200	
	0~8	100	
坡度/°	8~15	200	0.15
	15~25	300	
	25~35	400	
	>35	500	
	30~500	100	
距道路距离/m	500~1 000	20	0.25
	1 000~1 500	10	
	1 500~2 000	5	
	>2000	1	

2.4 生态廊道提取

生态廊道是连接不同生态源地之间的条带状生态用地,通常由植被、水体等自然要素构成,可支撑物种的迁移与扩散,对保护生态多样性具有重要意义^[35]。基于生物随机游走特性的电路理论可补充最小阻力法在替代路径、廊道范围及关键节点识别等方面的不足^[36],本研究借助 Linkage Mapper Tool3.0 工具中的 Linkage pathway tool,通过计算每个像素距离节点的成本加权距离 (cost-weighted distances, CWD),创建成本加权距离表面,依据最小成本加权

距离进一步得到生态廊道。在此基础上,通过调用 Circuitscape4.0 工具,利用 Centrality Mapper 计算生态廊道的流量中心度,可量化不同生态廊道对维持生态网络整体连通性的重要性。

2.5 生态节点识别

生态节点是由 McRae 等^[37]基于电路理论提出,用于表示影响源地间生态流通性的关键点,也是抗外界干扰能力差的生态脆弱点,通过系统保护与整体修复节点区域,对提升景观连通性和维持生态安全具有重要意义,可作为国土空间生态修复关键区^[38]。本研究识别的生态节点包括生态夹点、生态障碍点和生态断裂点。

2.5.1 生态夹点识别

生态夹点是物种迁移与扩散的必经之路,破坏夹点区会割裂生态廊道的连通。在生态廊道提取的基础上,选择 Linkage Mapper3.0 工具下的 Pinchpoint Mapper 模块,调用 Circuitscape4.0 计算电流密度累积值。根据已有研究成果^[39-40],选取 All-to-one 模式,依次以一处生态源地接地,其余生态源地输入 1 A 电流值,进行流动迭代,最终获取通过每个像元的累积电流值,累积电流密度高值区即为生态夹点^[41]。生态夹点的位置不受廊道宽度设定的影响,所以结合研究区生态保护目标、植被状况、廊道功能等,经多次测算,本研究最终以加权成本距离 5 000 m 作为廊道宽度。

2.5.2 生态障碍点识别

生态障碍点是阻碍物种在源地间流动的重点区域,在 Linkage Mapper3.0 工具下的 Barrier Mapper 模块中运行。根据像元分辨率的大小,基于一定搜索半径的移动窗口法获取,计算移除障碍点后的累积电流恢复值,红色区域为改进得分的高值区,即生态障碍区,值越大表示该区域对物种活动的阻碍程度越高^[42]。不同搜索半径识别的障碍点面积有差异,本研究设置 60 m、90 m、240 m、300 m 搜索半径,考虑生态修复成本最终确定以 300 m 搜索半径识别出的生态障碍点作为国土空间生态修复的关键区域。

2.5.3 生态断裂点识别

纵横交错的道路网络常对区域生态网络造成割

裂,必然会存在生态断裂点阻碍物种的迁移与扩散,本研究通过叠加生态网络与交通要道,以两者交汇点作为生态断裂点。

3 结果与分析

3.1 综合生态源地

由 MSPA 分析结果可知,核心区总面积约 621.94 km²,占生态景观总面积的 42.47%。岩溶山地石漠化程度深,景观破碎化程度高,导致面积小而破碎的核心区数量多、离散分布且连通性极差;边缘区和孔隙总面积分别为 176.07 km²、15.74 km²,分别占生态景观总面积的 12.02%、1.07%,孔隙区占比低,表明研究区抗外界干扰能力较弱,生态稳定性较差;桥接区作为连接不同核心区的区域,占生态景观总面积的 5.19%,整体分布与核心区一致;支线占生态景观总面积的 2.93%,表明研究区连通性一般;环岛是斑块内部生物迁移的捷径,占生态景观总面积的

1.50%;孤岛面积占生态景观总面积的 1.13%,破碎且零散分布(图 2,表 2)。整体上看,关岭县核心区面积占比高,但景观破碎化严重,生态系统抗干扰能力弱,需提高景观连通性才能提高物种迁移扩散的流通性。

为避免源地过于破碎化,本研究最终二次筛选 dPC>0.4 的 37 个斑块为生态源地并进行重要性划分(图 3,表 3)。

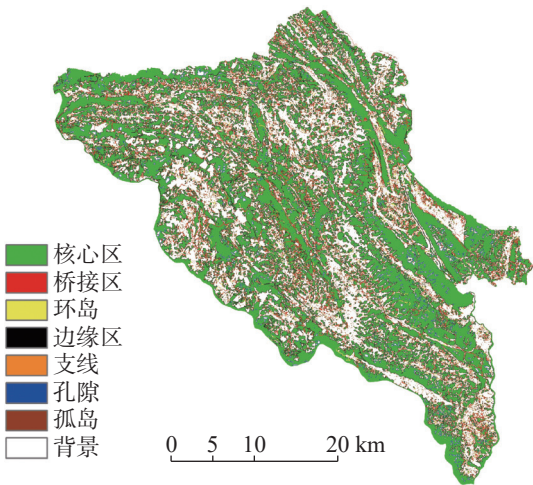


图 2 基于 MSPA 分析的景观类型图
Fig. 2 Landscape types based on MSPA

表 2 景观类型分类统计表
Table 2 Classification of landscape types

景观类型	总面积/km ²	占前景要素比例	占研究区面积比例
核心区	621.94	64.03%	42.47%
边缘区	176.07	18.13%	12.02%
桥接区	76.07	7.83%	5.19%
支线	42.93	4.42%	2.93%
环岛	22.02	2.27%	1.50%
孤岛	16.51	1.70%	1.13%
孔隙	15.74	1.62%	1.07%



图 3 生态源地空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of ecological source areas

从空间分布上看,研究区西部和东部生态源地面积大且集中连片,根据 2017 年出版的《贵州省区域地质志》^[43],该区出露地层主要为三叠系法郎组、赖石科组和杨柳井组等,岩性以泥岩、泥质砂岩、泥质粉砂岩等碎屑岩为主,石漠化程度较低,生态本底较好,故一级源地数量多、面积大且连通性最高,是维持区域生态安全的枢纽地区;研究区中部广泛分布有三叠系嘉陵江组、关岭组等地层,岩性以白云岩、白云质灰岩、灰岩等碳酸盐岩为主,溶蚀作用强,石漠化面积大、程度深,生态本底较差,加之人口密度高,人类活动干扰性强,面临人类—自然双重干扰,导致生态源地重要性低且分布离散,故生态源地重要性从县域外围向中部逐渐降低(表 4,图 4)。

3.2 生态廊道

综合生态阻力面空间差异性明显(图 5,图 6),阻力高值区主要分布在研究区中部城镇建设用地区域和交通运输用地区域,自然—人类双重干扰性强;阻力低值区零散分布于林地周围,以北盘江和打帮河沿岸区域最为明显。

表 3 生态源地重要性指数

Table 3 Index of the importance of ecological source areas

编号	面积/km ²	指数	
		dIIC	dPC
15	93.88	55.53	51.61
28	45.19	36.30	27.83
18	34.67	29.05	18.54
31	12.12	18.38	11.13
10	38.46	17.29	16.48
32	29.25	13.81	8.58
33	17.79	11.54	8.81
17	19.68	11.30	8.26
16	18.94	9.36	8.48
3	16.70	7.60	6.70
22	15.96	7.59	5.39
11	13.43	6.14	5.22
26	6.75	6.08	2.55
23	15.78	5.30	5.56
30	13.37	5.30	4.19
7	7.26	3.28	2.91
20	1.53	3.10	0.55
27	1.72	2.98	0.51
19	7.50	2.50	3.15
25	3.64	1.80	1.23
36	4.36	1.50	1.21
21	4.56	1.46	1.35
35	2.79	1.19	0.78
37	2.47	1.05	0.69
2	2.21	1.03	0.88
34	1.80	0.98	0.58
14	1.53	0.77	0.61
1	1.40	0.69	0.61
4	1.37	0.69	0.46
6	1.29	0.62	0.44
5	1.81	0.57	0.50
9	1.09	0.49	0.56
13	1.01	0.49	0.34
12	1.11	0.45	0.36
8	1.16	0.42	0.62
24	3.71	0.42	0.33
29	2.50	0.41	0.02

研究区共识别生态廊道 74 条,总面积为 3 600.63 hm²,长度共计 140.775 km(图 7),同时识别 11 条“潜在生态廊道”作为生态源地之间可能存在的通道^[43],后续需加强关注。将生态廊道的中心度

表 4 生态源地重要性等级面积及占比

Table 4 Importance levels of area and proportion of ecological source areas

生态源地等级	数量	占源地总数比例	面积/hm ²	占源地总面积的比例
一级	8	21.62%	291.0360	57.30%
二级	11	29.73%	118.9489	31.99%
三级	18	48.65%	39.7965	10.70%

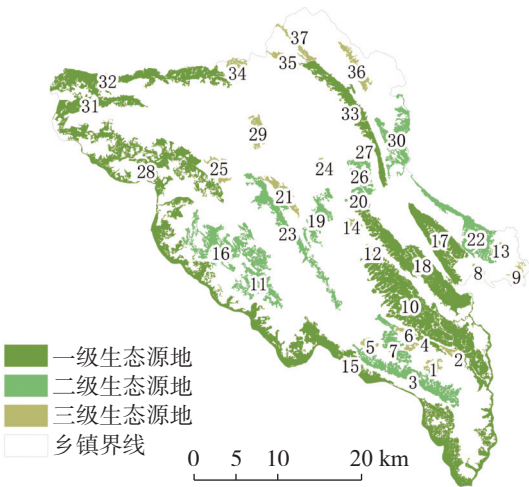


图 4 生态源地重要性分级

Fig. 4 Importance levels of ecological source areas

分析结果按自然断点法分为 13 条关键生态廊道、16 条重要生态廊道、45 条一般生态廊道,长度介于 30.00~8 078.74 m。从空间分布上看,研究区西部和东南部石漠化程度较低,生态本底强,源地集中连片,故关键生态廊道与重点生态廊道的分布数量多,呈现短而窄的特征,破坏该区域生态环境会造成源地间生态廊道的割裂,需重点维护;研究区中部城镇空间分布少量关键廊道与重要廊道,廊道两侧城镇建设用地、交通运输用地和耕地等用地零乱分布,石漠化程度较高,面临自然—人类活动强干扰,导致生态空间与生活空间产生冲突,这部分廊道虽承担重要生态过程但稳定性较弱;同时,研究区中部石漠化面积大、程度深,生态环境脆弱性较高,故一般生态廊道数量多。整体上看,生态廊道环生态源地分布形成生态网络,提高了研究区生态源地的连通性。

3.3 生态安全格局

生态安全格局是识别、优化国土空间生态修复关键区的重要手段,也是统筹推进国土空间生态修复目标和维护生态可持续的基础^[42]。基于关岭县生态保护目标,落实省级“屏环带绕”的生态空间格局,

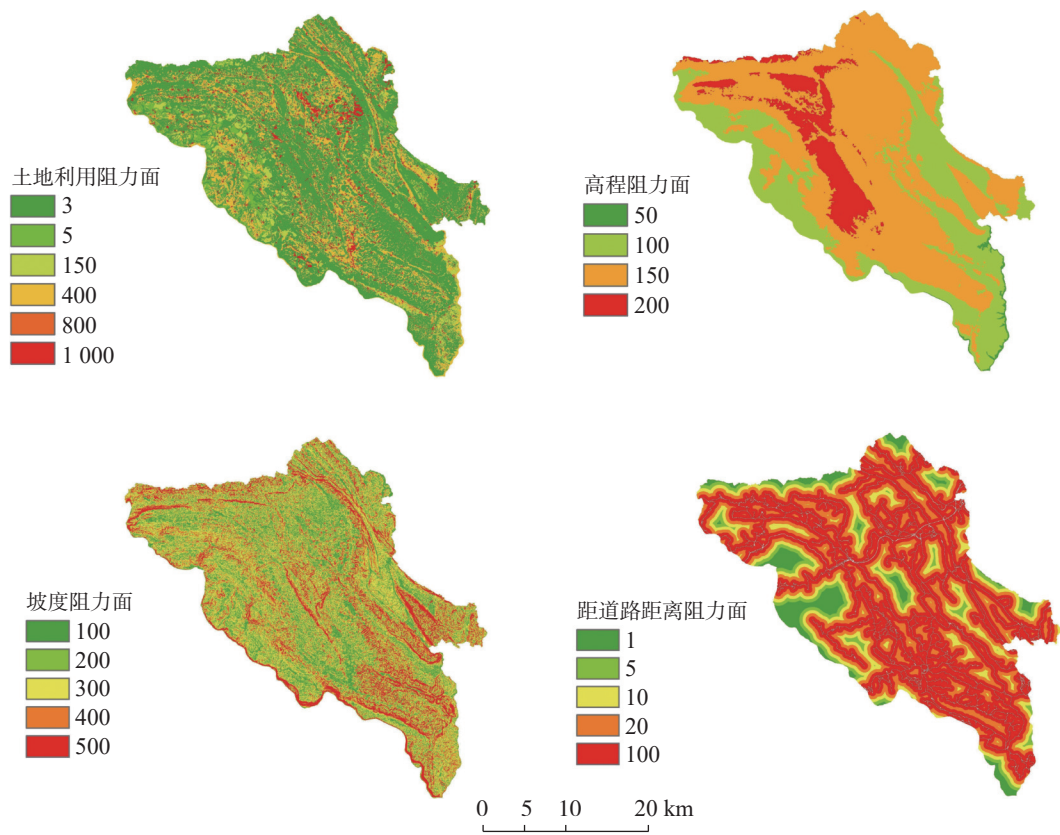


图 5 生态阻力因子分级

Fig. 5 Classification of ecological resistance factors

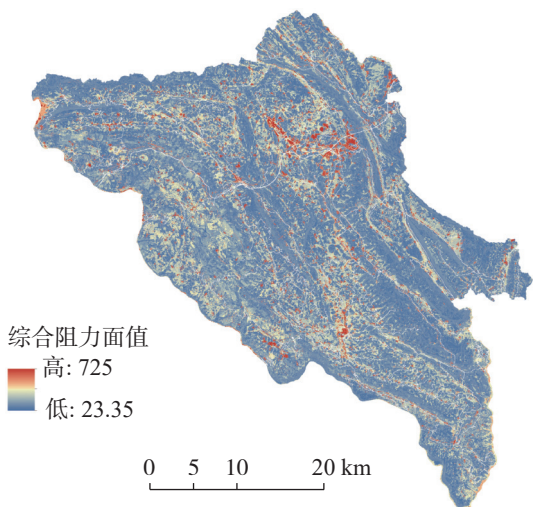


图 6 综合生态阻力面

Fig. 6 Comprehensive ecological resistance surface



图 7 生态廊道空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of ecological corridors

将识别的 37 个生态源地和 74 条生态廊道组合构成研究区生态安全网络,构建“三区、两轴、多点”的区域生态安全格局(图 8)。西部国家湿地生态区石漠化程度低,自然资源禀赋高,具有北盘江大峡谷国家湿地公园、关岭化石群国家地质公园等生境质量高的生态源地,凸显山地生态湿地特色风貌;中部高原

峡谷生态区内含花江大峡谷、瀑陵河峡谷等生态景观,凸显“群山环绕、山水共建、林河相融”的特征;东部岩溶山地生态区以岩溶景观为主,打帮河沿岸水源丰富,凸显岩溶自然景观风貌。“两轴”指以北盘江、打帮河为主的生态连通和水源涵养轴,有利于保护关岭生物多样性和提升水源涵养功能。“多点”指选取部分重要性较高的生态源地作为生态核心点,

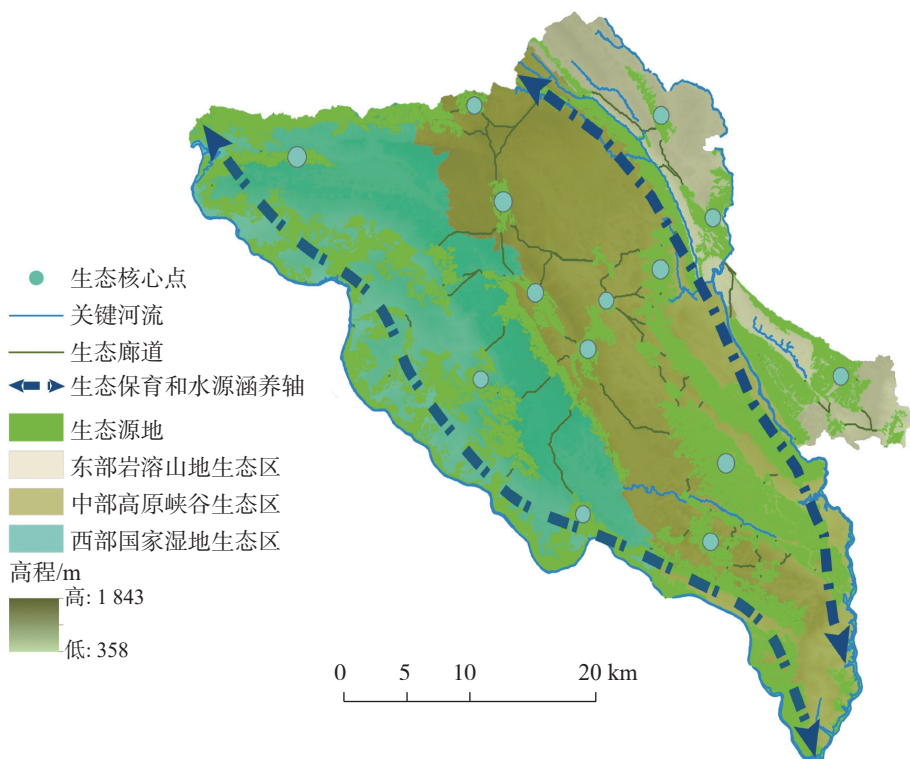


图 8 关岭县生态安全格局

Fig. 8 Ecological security pattern of Guanling county

此类区域为物种提供优越的栖息条件。

3.4 国土空间生态修复关键区

3.4.1 生态夹点区

生态夹点作为高累计电流区是生态修复的优先区,本研究共识别夹点 36 处,总长度为 6 087 m,面积 757.84 hm^2 ,呈细长带状分布(表 5,图 9)。叠加研究区生态阻力面、土地利用类型和遥感影像综合分析发现,生态夹点主要分布在研究区低阻力区域,现状用地主要以林地、园地、水域及水利设施用地为主,这表明物种的迁移与扩散会优先选择低阻力区,但夹点周围覆盖居民点和道路网,对整体景观连通性做出重要贡献的同时面临人类活动的强干扰,是国土空间生态修复优先区。

3.4.2 生态障碍点区

本研究共识别出 14 处生态障碍点(图 10),总长度为 4 845.11 m,面积为 364.48 hm^2 ,多数生态障碍点位于一般生态廊道上。研究区西部的石漠化程度较低,生态本底条件较好,故无障碍点分布,主要集中在研究区中部城镇建设用地、交通运输用地等人类活动强干扰区域。叠加遥感影像和土地利用类型发

现,生态障碍点多分布于耕地、交通运输用地和城镇村及工矿用地等高阻力区域,一定程度上割裂了生态网络连通性,少量障碍点分布在研究区中部的林地和园地等低阻力区域(表 6),原因在于中部石漠化程度高,阻碍物种迁移扩散。

3.4.3 生态断裂点

通过叠加夹点、障碍点、断裂点发现存在重叠部分(图 11),说明部分区域在承担关键生态功能的同时受到人类—自然强干扰,关岭县交通运输要道的空间布局与生态空间发生冲突,零乱分布的用地类型阻碍物种的迁移与扩散,修复此类障碍点,或者增加动物迁徙专门通道、隧道、天桥等有利于加强关岭县生态安全。

4 生态修复措施

岩溶山地生态修复措施需结合区域石漠化程度科学推进,基于关岭县生态安全格局“三区”划定,优先修复西部国家湿地生态区的夹点区域,加强林地、湿地功能修复与生态治理,而对林地、湿地等资源过度开发与利用导致珍稀动植物和栖息地范围减小等

表 5 关岭县生态“夹点”分布情况
Table 5 Distribution of ecological pinch-points in Guanling county

生态区	乡镇	数量	面积/hm ²	分布位置	土地利用类型
东部岩溶山地生态区	八德乡	2	62.8573	八一村、法宜村、郎宫居委会、民族村	耕地、林地、水域及水利设施用地、园地
	白水镇	3	25.8230	凡化村、坑边居委会、乌拉居委会、新寨村	耕地、林地、园地
	坡贡镇	2	32.7064	凡化村、新寨村	耕地、林地、园地
	普利乡	2	21.1030	东关村、月霞村、云峰村	耕地、林地、水域及水利设施用地
西部国家湿地生态区	新铺乡	2	33.6982	江龙村、新龙村	草地、耕地、林地、水域及水利设施用地、园地
	永宁镇	3	63.0072	白岩村、东关村、云峰村、中兴村	耕地、林地、水域及水利设施用地、园地
	板贵乡	5	119.4564	多德村、花嘎村、坪寨村、中寨村	耕地、林地、水域及水利设施用地、园地
	顶云乡	2	41.1327	谷新村、木厂村	耕地、林地、园地
	断桥镇	1	0.9474	福农村、戈尧村、红星村	林地
中部高原峡谷生态区	关索镇	5	125.0503	北口村、菠萝沟村、场坝社区、龙潭村、落叶新村、西龙村、许土村	草地、耕地、林地、水域及水利设施用地、园地
	花江镇	8	138.9281	厂上村、多德村、莲花村、前峰村、桃源村、锡厂村、向阳村、永睦村	耕地、林地、水域及水利设施用地、园地
	上关镇	5	74.9895	场坝村、福农村、戈尧村、红星村、三合村	耕地、林地、水域及水利设施用地、园地
	永宁镇	2	18.1463	东方红村、围墙村	耕地、林地

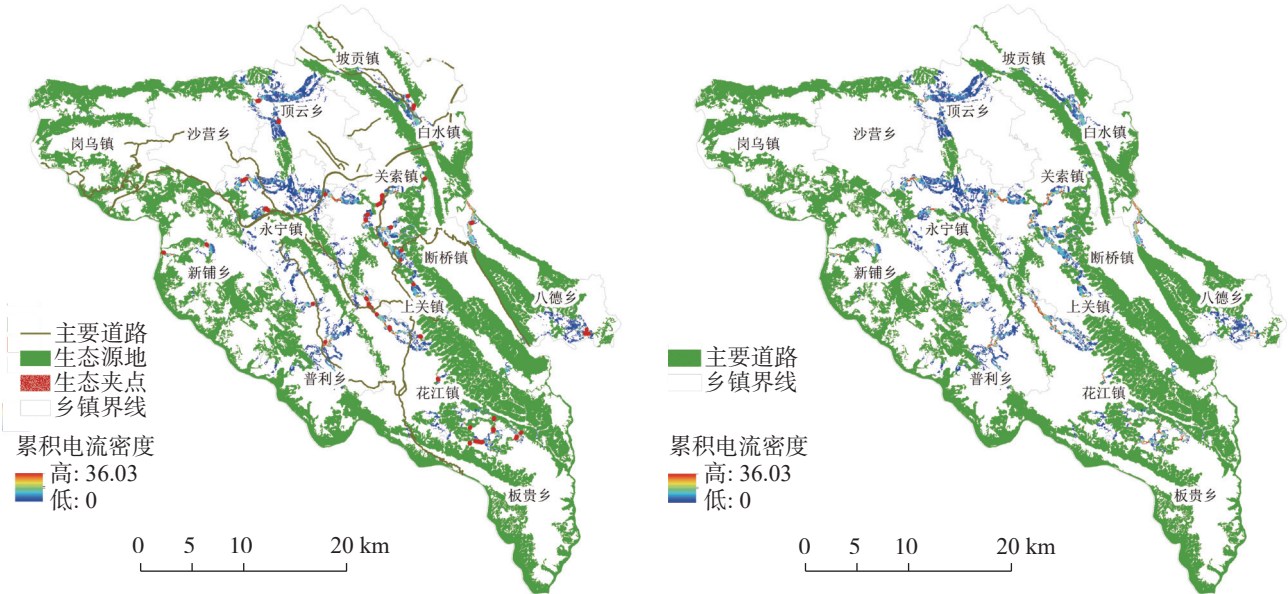


图 9 关岭县生态夹点分布
Fig. 9 Distribution of ecological pinch-points in Guanling county

问题,采取植被恢复、野生动物栖息地恢复等措施;深度修复中部高原峡谷生态区的夹点区域,该区石漠化程度较高,协调生态修复措施与石漠化修复目

标,合理调整用地布局,降低生产生活空间与生态空间之间的冲突;集中修复东部岩溶山地生态区的夹点区域,将自然修复与人工干预相结合,综合运用土

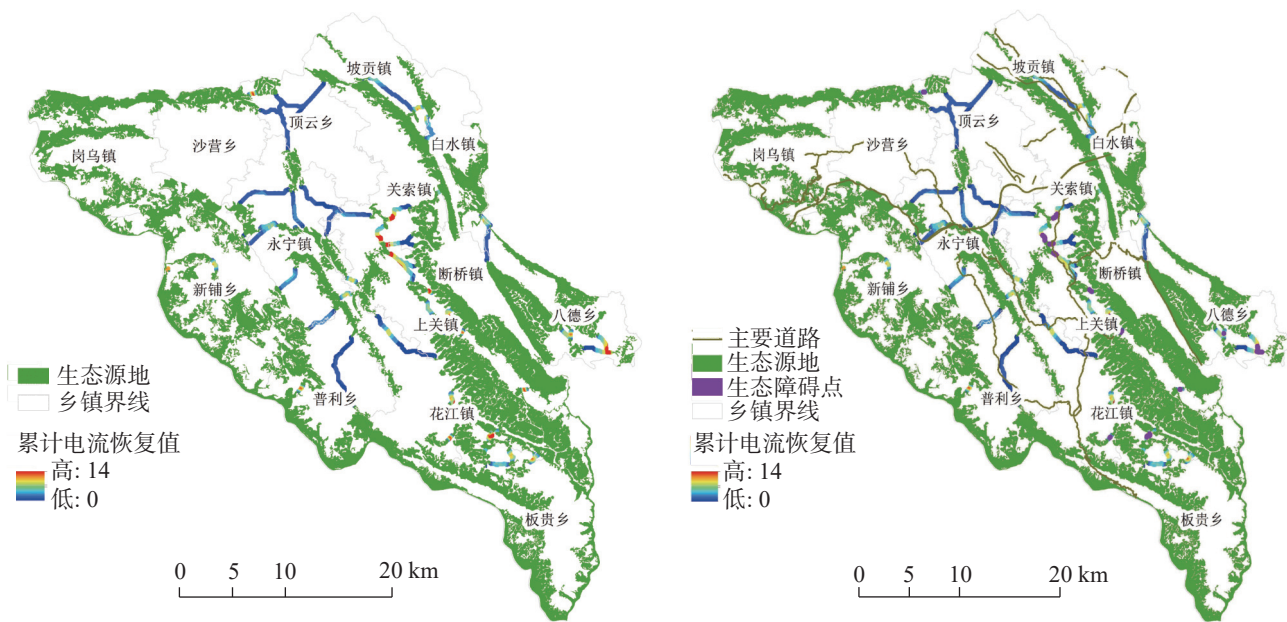


图 10 关岭县生态障碍点空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of ecological barriers in Guanling county

表 6 关岭县生态“障碍点”分布情况

Table 6 Distribution of ecological barriers in Guanling county

生态区	乡镇	数量	面积/hm ²	分布位置	土地利用类型
东部岩溶山地生态区	八德乡	2	67.083 2	大理村、法宜村、后寨村、民族村	草地、城镇村及工矿用地、耕地、交通运输用地、林地、其他土地、水域及水利设施用地、园地
	顶云乡	1	18.557 4	谷新村	耕地、交通运输用地、林地、园地
	关索镇	4	93.367 8	北口村、红星村、龙潭村、落叶新村、许土村	草地、城镇村及工矿用地、耕地、交通运输用地、林地、其他土地、水域及水利设施用地、园地
中部高原峡谷生态区	花江镇	2	50.063 8	前峰村、下石村	城镇村及工矿用地、耕地、交通运输用地、林地、园地
	上关镇	7	135.407 3	场坝村、冬足村、福农村、红星村、乐安村、龙潭村、落哨村	草地、城镇村及工矿用地、耕地、交通运输用地、林地、其他土地、水域及水利设施用地、园地

地整治、土壤改良、退耕还林、封山育林等石漠化治理措施,降低生态景观破碎化程度。

优先修复中部高原峡谷生态区的障碍点区域,优化交通网络布局,修整乡村道路,对截断生态过程的道路进行移除或者寻找替代路径。实施封山育林,降低人类经济活动的威胁及石漠化、地下水渗漏等自然灾害对生态系统的破坏;深度修复东部岩溶山地生态区的障碍点区域,保护土层地表结构,抑制石漠化恶劣演化,考虑对低效率耕地实行退耕还林。合理布局园地种植规模,对阻断生态过程的园地进行地块切割或移除,确保生态过程的流通。

5 讨 论

石漠化问题仍然是制约关岭县生态可持续发展的一大障碍,县域中部以大面积碳酸盐岩为主,溶蚀作用较强,故石漠化程度与面积高于县域西部和东部,加之人类活动强度高,故生态源地重要性从县域外围向中部逐渐降低,可供物种迁移与生存的关键生态廊道与生态夹点则大量集中在西部与东部区域。同时,中部区域分布少量关键生态廊道,但廊道两侧用地类型和道路网错综复杂,加之石漠化程度高,所以分布大量障碍点区域阻碍物种迁移与扩散。岩溶

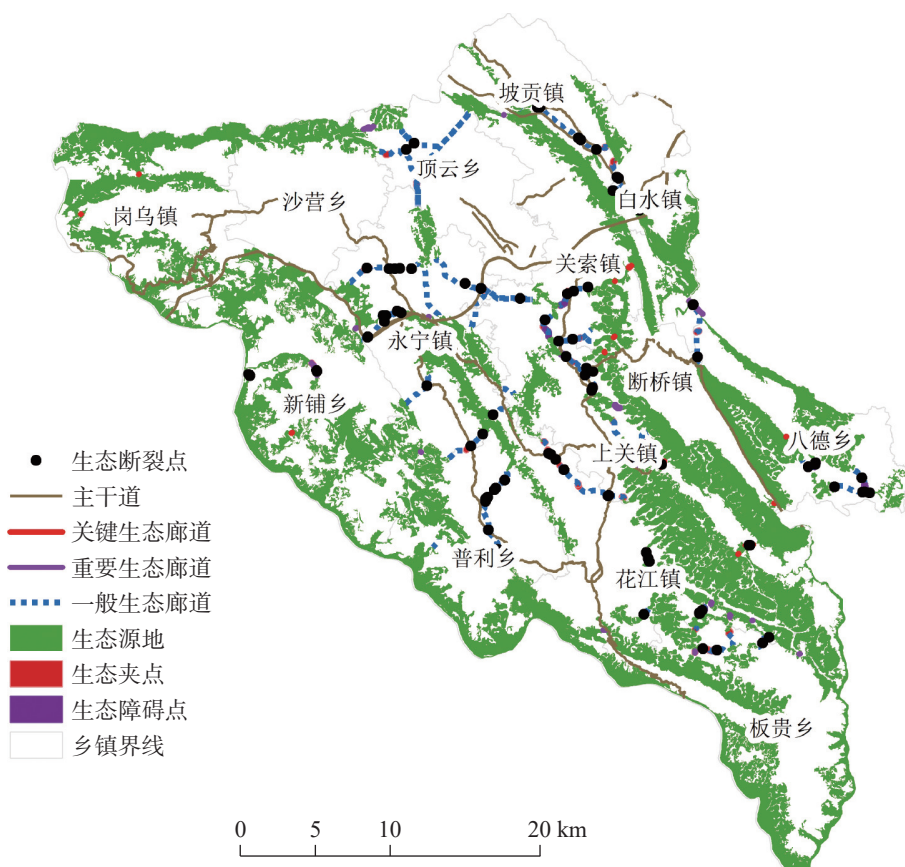


图 11 关岭县生态断裂点空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of ecological breaking points in Guanling county

区域石漠化面积大、程度深,且不同区域石漠化等级不同,导致自然资源禀赋、土壤侵蚀强度、地表径流密度等方面具有区域差异,因而生态修复不能只注重局部修复而忽略整体效果,需结合石漠化治理目标,在现有石漠化治理成效下科学推进国土空间生态修复,共同促进生态与经济可协调发展。

6 结 论

(1)在研究区识别出生态源地 37 块,面积共计 449.78 km²,与生态保护红线重合率高达 95%,在全县范围均有分布并呈现东西部集中连片、中部零星离散的空间分布特征;重要性较高的源地多分布在石漠化程度较低区域,石漠化程度高的区域多分布重要性较低的生态源地。

(2)在研究区提取出 74 条全长 140.775 km 的生态廊道,识别 36 处生态夹点和 14 处生态障碍点作为国土空间生态修复关键区,生态廊道重要性与研究区石漠化程度呈正相关,研究区中部夹点与障碍

点数量及分布受人类活动与大面积、高强度石漠化的双重干扰。

(3)需构建生态安全网络,形成“三区、两轴、多点”的国土空间生态修复格局,保障生态修复工作因地制宜、系统推进。

参考文献

- [1] 付刚,肖能文,乔梦萍,齐月,闫冰,刘高慧,高晓奇,李俊生.北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J].生态学报,2017,37(8):2551-2562.
FU Gang, XIAO Nengwen, QIAO Mengping, QI Yue, YAN Bing, LIU Gaohui, GAO Xiaoqi, LI Junsheng. Spatial-temporal changes of landscape fragmentation patterns in Beijing in the last two decades[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2551-2562.
- [2] 苏冲,董建权,马志刚,乔娜,彭建.基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别:以四川省华蓥山区为例[J].生态学报,2019,39(23):8948-8956.
SU Chong, DONG Jianquan, MA Zhigang, QIAO Na, PENG Jian. Identifying priority areas for ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on ecological security patterns: A case study in

- Huaying mountain, Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8948-8956
- [3] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- MA Keming, FU Bojie, LI Xiaoya, GUAN Wenbin. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 761-768.
- [4] 董晓超, 熊康宁, 朱大运, 蓝家程, 廖建军, 曹洋, 刘兴宜. 喀斯特生态环境风险评价: 以贵州省为例[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 713-721.
- DONG Xiaochao, XIONG Kangning, ZHU Dayun, LAN Jiacheng, LIAO Jianjun, CAO Yang, LIU Xingyi. Risk assessment of karst ecological environments: A case study of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 713-721.
- [5] 易行, 白彩全, 梁龙武, 赵子聪, 宋伟轩, 周妍. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 37-52.
- YI Xing, BAI Caiquan, LIANG Longwu, ZHAO Zicong, SONG Weixuan, ZHOU Yan. The evolution and frontier development of land ecological restoration research[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 37-52.
- [6] 梁坤宇, 金晓斌, 张晓琳, 宋家鹏, 李权荃, 应苏辰, 祁翌, 周寅康. 耦合生态系统服务供需的生态安全格局构建: 以苏南地区为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3880-3896.
- LIANG Kunyu, JIN Xiaobin, ZHANG Xiaolin, SONG Jiapeng, LI Quanquan, YING Suchen, QI Zhao, ZHOU Yinkang. Construction of ecological security patterns coupling supply and demand of ecosystem services: a case study of Southern Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9): 3880-3896.
- [7] 姜虹, 张子墨, 徐子涵, 丹宇卓, 叶玉瑶, 李家志, 彭建. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1981-1992.
- JIANG Hong, ZHANG Zimo, XU Zihan, DAN Yuzhuo, YE Yuyao, LI Jiazhi, PENG Jian. Construction of ecological security pattern integrating multiple ecological protection objective in Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1981-1992.
- [8] 冯琰玮, 甄江红, 田桐羽. 基于生态安全格局的国土空间保护修复优化: 以内蒙古呼包鄂地区为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(11): 2915-2929.
- FENG Yanwei, ZHENG Jianghong, TIAN Tongyu. Optimization of land protection and restoration based on ecological security pattern: A case study of Hohhot-Baotou-Ordos region in Inner Mongolia[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(11): 2915-2929.
- [9] 邓欧, 李亦秋, 杨广斌, 李若霜. 贵州喀斯特石漠化防治的国家重点生态功能区生态系统健康度评价[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(5): 689-696.
- DENG Ou, LI Yiqiu, YANG Guangbin, LI Ruoshuang. Evaluation on the ecosystem health of national key ecological function areas for karst rocky desertification prevention and control in Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 689-696.
- [10] 陈起伟, 熊康宁, 周梅, 徐丰. 关岭县不同等级石漠化区土壤侵蚀特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 24-28.
- CHEN Qiwei, XIONG Kangning, ZHOU Mei, XU Feng. Characteristics of soil and water loss in different rocky desertification areas in Guanling county[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 24-28
- [11] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 苏维词. 中国岩溶生态功能优先背景下的西南岩溶区石漠化治理问题[J]. *中国岩溶*, 2014, 33(4): 464-472.
- ZHANG Junyi, DAI Minghong, WANG Lachun, SU Weici. Rocky desertification control issues in the context of priority for ecological function in karst areas of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(4): 464-472.
- [12] 赵恬茵, 吴媛媛, 孙连群, 高长春, 潘网生, 许玉凤, 程富东. 岩溶地区水土流失的定量研究进展[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 61-70, 108.
- ZHAO Tianyin, WU Yuanyuan, SUN Lianqun, GAO Changchun, PAN Wangsheng, XU Yufeng, CHENG Fudong. Progress of quantitative research on soil and water loss in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 61-70, 108.
- [13] 韩会庆, 苏志华. 喀斯特生态系统服务研究进展与展望[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 352-358.
- HAN Huiqing, SHU Zhihua. Research progress and prospects of karst ecosystem services[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 352-358.
- [14] 易浪, 孙颖, 尹少华, 魏晓. 生态安全格局构建: 概念、框架与展望[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(4): 845-856.
- YI Lang, SUN Ying, YIN Shaohua, WEI Xiao. Construction of ecological security pattern: Concept, framework and prospect[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(4): 845-856.
- [15] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8725-8732.
- WANG Xiaoyu, FENG Zhe, WU Kening, LIN Qian. Ecological conservation and restoration of Life Community Theory based on the construction of ecological security pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8725-8732.
- [16] Alan Vergnes, Christian Kerbiriou, Philippe Clergeau. Ecological corridors also operate in an urban matrix: A test case with garden shrews[J]. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(3): 511-525.
- [17] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 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 Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jian, FENG Zhe, LIU Hongmeng, HE Shengbin. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [18] 黄丽萍, 向芳芳, 陈荣清. 基于生态安全格局的县域国土空间生态保护修复关键区域识别: 以抚州市宜黄县为例[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1334-1344.
- HUANG Liping, XIANG Fangfang, CHEN Rongqing. Identification

- cation of key areas for ecological protection and restoration of county territorial space based on ecological security pattern: A case study in Yihuang county of Fuzhou City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1334-1344.
- [19] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴建生. 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, WU Jiansheng. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.
- [20] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784.
- HUANG MUYI, YUE WENZE, FENG SHAORU, CAI JIEJIE. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie mountain area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771-784.
- [21] 赵伟, 邹欣怡, 蒲海霞. 成渝地区双城经济圈生态安全格局构建[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(5): 2423-2433.
- ZHAO Wei, ZOU Xinyi, PU Haixia. Construction of ecological security pattern in Chengdu-Chongqing Twin-City Economic Circle[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(5): 2423-2433.
- [22] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- XU Feng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, XU Jiangang. Developing ecological networks based on MSPA and the least-cost path method: A case study in Bazhong western new district[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [23] 朱琪, 袁泉, 于大炮, 周旺明, 周莉, 韩艳刚, 齐麟. 基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3463-3473.
- ZHU Qi, YUAN Quan, YU Dapao, ZHOU Wangming, ZHOU Li, HAN Yangang, QI Lin. Construction of ecological security network of Northeast China forest belt based on the circuit theory[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(11): 3463-3473.
- [24] 马阔, 吴起鑫, 韩贵琳, 董爱国. 南、北盘江流域枯水期水化学特征及离子来源分析[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(2): 192-202.
- MA Kuo, WU Qixin, HAN Guilin, DONG Aiguo. Hydrochemical characteristics and sources of Nanpanjiang and Beipanjiang river basins during dry seasons[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(2): 192-202.
- [25] 胡大儒, 郑克勋, 赵代尧, 陈占恒. 复杂岩溶水系统势汇区建坝成库可行性研究: 以北盘江流域普岔河水库为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(5): 736-745.
- HU Daru, ZHENG Kexun, ZHAO Daiyao, CHEN Zhanheng. Feasibility study on dam and reservoir construction in the catchment area of complex karst water system: Taking Pucha reservoir of Beipan river as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(5): 736-745.
- [26] Ying Bin, Liu Ting, Ke Li, Xiong Kangning, Li Sensen, Sun Ruonan, Zhu Feihu. Identifying the landscape security pattern in karst rocky desertification area based on ecosystem services and ecological sensitivity: A case study of Guanling county, Guizhou Province[J]. *Forests*, 2023, 14: 613.
- [27] 姚采云, 安睿, 窦超, 刘耀林. 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, LIU Yaolin. 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.
- [28] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 韩博, 李寒冰, 周寅康. 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 Quanquan, JIN Xiaobin, ZHANG Xiaolin, HAN Bo, LI Hanbing, ZHOU Yinkang. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1461-1473.
- [29] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863-2874.
- YIN Haiwei, KONG Fanhua, QI Yi, WANG Hongyang, ZHOU Yanni, QIN Zhengmao. Developing and optimizing ecological network in urban agglomeration of Hunan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [30] 李志英, 李媛媛, 李文星, 薛梦柯. 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, XUE Mengke. 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.
- [31] 王越, 赵雯琳, 刘纯青. 基于 MSPA-Conefor-MCR 路径的生态网络优化及其构建: 以彭泽县为例[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(2): 504-518.
- WANG Yue, ZHAO Wenlin, LIU Chunqing. Optimization and construction of ecological network based on MSPA-Conefor-MCR path: Take Pengze county as an example[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(2): 504-518.
- [32] 陈南南, 康帅直, 赵永华. 基于 MSPA 和 MCR 模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1545-1553.
- CHEN Nannan, KANG Shuaizhi, ZHAO Yonghua. Construction of ecological network in Qinling mountains of Shaanxi, China based on MSPA and MCR model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1545-1553.
- [33] 蒋若琳, 龚本海, 王艺锦, 王凌晖. 基于 MSPA 与 MCR 的崇左

- 市生态网络构建与优化[J]. 江西农业学报, 2022, 34(7): 122-129.
- JIANG Ruolin, GONG Benhai, WANG Yijin, WANG Linghui. Construction and optimization of ecological network in Chongzuo City based on MSPA and MCR model[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(7): 122-129.
- [34] 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方. 基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络[J]. 环境科学, 2022, 44(6): 3034-3042.
- QIAO Zhi, CHEN Jiayue, WANG Nan, LU Yingshuang, HE Tong, SUN Zongyao, XU Xinliang, YANG Hao, LI Ying, WANG Fang. Spatial network of urban thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on MSPA and circuit theory[J]. *Environmental Science*, 2022, 44(6): 3034-3042.
- [35] 王悦露, 董威, 张云龙, 傅伯杰, 赵正嫒, 吕一河, 张建军, 伍星. 基于生态系统服务的生态安全研究进展与展望[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 1-9.
- WANG Yuelu, DONG Wei, ZHANG Yunlong, FU Bojie, ZHAO Zhengyuan, LYU Yihe, ZHANG Jianjun, WU Xing. Research progress and prospect of ecological security based on ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(19): 1-9.
- [36] 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 Lili, QIN Mingzhou. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [37] McRae Brad H, Dickson Brett G, Keitt Timothy H, Shah Viral B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J]. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2714.
- [38] Peng Jian, Pan Yajing, Liu Yanxu, Zhao Huijuan, Wang Yanglin. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 71: 110-124.
- [39] 杜雨阳, 王征强, 于庆和, 杨永崇, 张全文. 基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建: 以秦岭(陕西段)为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1069-1078.
- DU Yuyang, WANG Zhengqiang, YU Qinghe, YANG Yongchong, ZHANG Quanwen. Construction of a regional ecological security pattern based on a habitat quality model and circuit theory: A case study of the Qinling mountains (Shaanxi section)[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 1069-1078.
- [40] 史学民, 秦明周, 李斌, 李仓宇, 宋利利. 基于 MSPA 和电路理论的郑汴都市区绿色基础设施网络研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 631-638.
- SHI Xuemin, QIN Mingzhou, LI Bin, LI Cangyu, SONG Lili. Research on the green infrastructure network in the Zhengzhou-Kaifeng metropolitan area based on MSPA and circuit theory[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2018, 48(6): 631-638.
- [41] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 齐增湘, 谢水波. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建: 以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2555-2564.
- LI Tao, GONG Yabo, GE Jianzhai, QI Zengxiang, XIE Shuibao. Construction of urban landscape ecological security pattern based on circuit theory: A case study of Hengyang City, Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2555-2564.
- [42] 吴映梅, 李琛, 高彬斌, 王梦娇, 武燕, 郑可君. 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, WANG Mengjiao, WU Yan, ZHENG Kejun. Construction of urban ecological security pattern in highland lakes cities: The case of Dali City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(19): 8153-8166.
- [43] 贵州地质调查院. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 495-604.
- Guizhou Institute of Geological Survey. Regional Geology of Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 495-604.

Identification of key areas for the ecological restoration of karst mountainous territorial space based on the construction of ecological security pattern: A case study of Guanling, Guizhou Province

LU Hongxing^{1,2}, ZHAO Yuluan^{1,2,3}

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. Guanling Karst Ecosystem Field Scientific Observation and Research Station, Guizhou Normal University, Guanling, Guizhou 561301, China)

Abstract As one of the most ecologically fragile regions in the world, the ecosystem in the karst area is characterized by low environmental bearing capacity, high vulnerability and acute conflicts between human and land use, and thus the karst area requires strict ecological protection and effective ecological restoration. Guanling Buyi Miao Autonomous County (hereinafter referred to as Guanling county) is located in Anshun City, Guizhou Province. The karst landform accounts for 83.83% of the total land area of this county. Guanling county is a desertification area of Yunnan, Guangxi and Guizhou, with the ecological protection red line area amounting to 25.10% of the land area of this county; therefore, Chinese government listed it as a key county receiving assistance for rural revitalization. The karst mountainous area of Guanling county is distributed with a wide area of severe rocky desertification, with prominent conflicts between human and land use, and at the same time a number of national ecological zones are located there. In recent years, ecological degradation problems have caused habitat fragmentation and poor capacity for ecosystem supply in this county. Therefore, the identification of key areas for ecological restoration of national territorial space is of great significance to the ecological security of the Beipan river basin and even the Pearl river basin.

The objectives of this study are: (1) to determine the importance level of ecological source areas, and to identify these areas by combining multiple factors such as MSPA, ecological protection red line, landscape connectivity analysis, etc.; (2) to construct the ecological resistance surface by synthesizing the impacts of human beings and nature, and to construct the regional ecological security pattern by using the circuit theory to extract the ecological elements such as ecological corridors, ecological pinch points, ecological barriers, etc.; (3) to classify the ecological control area based on the regional ecological background, and to propose targeted ecological restoration measures for territorial space.

The results of the study show that: (1) Thirty-seven ecological source areas (449.78 km²), affected by different degrees of rocky desertification, in Guanling county have been identified. These areas are contiguously concentrated in the east and west, and scattered in the central part of the county. (2) Seventy-four ecological corridors (140.775 km) have been extracted, with important ecological corridors concentrated in the areas in a lower degree of rock desertification. At the same time, 36 ecological pinch-points and 14 ecological barriers have been identified as key areas for ecological restoration of territorial space, and the ecological restoration effectiveness have been improved by the construction of an ecological restoration pattern of "three zones, two axes and multiple points". (3) The ecological restoration area of the identified ecological pinch-points covers 757.84 hm², which is mainly distributed in the low-resistance area in the central part of the study area. The ecological restoration area of the identified ecological barriers covers 364.48 hm², which is mainly concentrated in the central part of the study area with intensive human activities, and its distribution is subjected to the double interference of human activities and extensive and severe rocky desertification. (4) Ecological restoration measures need to be promoted scientifically in combination with the actual effectiveness of rock desertification management and the restoration cost. Besides, the planning conducive to ecological restoration and environmental protection of karst areas in Guanling county should be proposed according to the variability of stress factors.

Key words security pattern, ecological node, ecological restoration, karst mountain, Guanling county

(编辑 黄晨晖)