

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.040; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.040.

杨艳萍, 干晓宇, 吴潇. 基于电路理论的岷江流域生态安全格局构建研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 263-275.

Yang Yanping, Gan Xiaoyu, Wu Xiao. Study on the construction of ecological security pattern in Minjiang River Basin based on circuit theory[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 263-275.

# 基于电路理论的岷江流域生态安全格局构建研究

杨艳萍, 干晓宇, 吴潇

(四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

**摘要:** [目的]精准提取各生态空间要素,构建生态安全格局,维持流域生态系统的健康稳定及生态环境保护的可持续发展。[方法]以岷江流域为研究区,评估其生态系统服务重要性以筛选生态源地,通过地质灾害敏感性评价修正土地利用基本阻力面,并基于电路理论,量化识别廊道、夹点、障碍点等生态空间要素,构建生态安全格局。[结果](1) 面积阈值设定为  $7 \text{ km}^2$  时,筛选出生态源地 77 个,面积占比为 30.77%,关键生态源地主要在“龙门—邛崃山脉”及其以北的岷山中南段雪宝顶等林地区,以及岷江中下游的部分耕地和林地。(2) 生态廊道共 176 条,总长度 2 072.96 km,关键生态廊道总长度占比为 21.32%,集中在岷江中游;生态夹点共 719 处,总面积 1 578.5  $\text{km}^2$ ;生态障碍点 163 处,总面积 2 410  $\text{km}^2$ 。(3) 构建“四区两带一廊”的岷江流域生态安全格局,并以岷江乡为例,探索了岷江流域“全流域—局域单元”生态空间协同修复路径。[结论]生态修复时要考虑多尺度格局的衔接与融合,实行系统性、差异化的生态空间分区治理,提升生态景观连通性及生境质量,促进物质流通。

**关键词:** 生态安全格局; 生态修复; 电路理论; 生态系统服务; 地质灾害敏感性; 岷江流域

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0263-13

## Study on the construction of ecological security pattern in Minjiang River Basin based on circuit theory

Yang Yanping, Gan Xiaoyu, Wu Xiao

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to accurately extract various ecological spatial elements and construct an ecological security pattern, to maintain the health and stability of river basin ecosystems, and to promote the sustainable development of ecological environmental protection. [Methods] The Minjiang River Basin was taken as the study area where the significance of ecosystem services was assessed to select ecological sources. The basic resistance surface of land use was modified through the evaluation of geological disaster sensitivity. Ecological spatial elements such as corridors, pinch points, and barrier points were quantitatively identified based on circuit theory to construct the ecological security pattern. [Results] (1) With the area threshold established at  $7 \text{ km}^2$ , 77 ecological sources were selected, accounting for 30.77% of the total area. The key ecological sources were mainly located in the forested areas of the ‘Longmen-Qionglai Mountains’ and the southern-central segment of the Minshan Mountains to the north, including Xuebaoding, as well as part of cultivated land and forested land in the middle and lower reaches of the Minjiang River Basin. (2) A total of 176 ecological corridors were identified, with a combined length of 2 072.96 km, of which the key ecological corridors accounted for 21.32% of the total length and were primarily concentrated in the middle reaches of the Minjiang River Basin. There were 719 ecological pinch points covering an area of 1 578.5  $\text{km}^2$ , and 163

收稿日期: 2024-08-08

修回日期: 2024-09-05

接受日期: 2024-09-20

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南民族村寨防灾技术综合示范”(2020YFD1100700)

第一作者: 杨艳萍(2000—), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为城市生态规划等。E-mail: yangyp0806@163.com

通信作者: 吴潇(1983—), 男, 河南信阳人, 副教授, 博士, 研究方向为城市区域规划等。E-mail: wuxiao1012@scu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

ecological barrier points spanning an area of 2 410 km<sup>2</sup>. (3) The ecological security pattern characterized by ‘four zones, two belts, and one corridor’ had been established for the Minjiang River Basin. Minjiang Township was taken as an example. A collaborative ecological spatial restoration approach for the ‘whole watershed-local unit’ within the Minjiang River Basin had been explored. [Conclusion] In the context of ecological restoration, emphasis should be placed on the integration and convergence of multi-scale patterns. And a systematic and differentiated approach to ecological spatial zoning governance should be implemented to enhance ecological landscape connectivity and habitat quality, and to facilitate the circulation of materials.

**Keywords:** ecological security pattern; ecological restoration; circuit theory; ecosystem services; geological disaster sensitivity; Minjiang River Basin

随着城市化进程加快,土地开发强度增加,生态系统动态平衡遭到破坏,引发了水土流失、生物多样性锐减、栖息地消失、生态网络破碎化等<sup>[1]</sup>生态问题,区域生态安全与经济发展水平之间的矛盾日益凸显。生态安全格局是生态系统与社会发展之间的纽带,对其结构进行优化提升,维持生态系统的健康稳定,对推动区域生态安全建设和提高人民生活水平至关重要<sup>[2]</sup>。国外学者 Forman 等<sup>[3-4]</sup>基于景观与区域生态学,提出了“斑块—廊道—基底”的生态系统模型,以优化景观生态规划设计。在此基础上,20 世纪 90 年代,我国学者俞孔坚<sup>[5]</sup>首次提出了符合中国国情的生态安全格局构建的理论与方法,即确定源→建立阻力面→判别缓冲区、源间联接、辐射道和战略点。马克明等<sup>[6]</sup>在景观生态学规划的理论基础上,提出区域生态安全格局的概念,并对其设计原则、方法、理论依据与框架进行了系统的梳理。近年来,国内外学者在理论基础上,以都市圈<sup>[7]</sup>、城市群<sup>[8]</sup>、流域<sup>[9]</sup>、城市<sup>[10]</sup>、区县等<sup>[11]</sup>不同空间尺度范围为研究单元,从生态系统服务重要性<sup>[9]</sup>、生态敏感性<sup>[12]</sup>、生态风险<sup>[11]</sup>、景观生态指数等<sup>[13]</sup>多维度构建指标体系,探讨生态安全格局构建的影响因素及格局演变规律,并正逐步加强与经济社会发展的联系<sup>[7]</sup>。目前,生态安全格局的构建已形成“源地识别—阻力面构建—廊道提取—格局构建”的基本范式<sup>[14]</sup>,但研究往往在此阶段后停滞,缺乏深入实践与落地探索。

基于 GIS,RS 技术,元胞自动机模型(CA)<sup>[15]</sup>、最小累积阻力模型(MCR)<sup>[16]</sup>、重力模型<sup>[11]</sup>、电路理论等<sup>[17]</sup>多种方法和模型被耦合应用,丰富了生态安全格局的研究框架。电路理论由学者 McRae<sup>[18]</sup>引入景观生态学,通过类比电流、电压、电阻等物理学中的概念,模拟基因流和生物在异质景观中的移动模式。电路理论模型类似于应用最广泛的最小累积阻力模型,是基于图论数据和生物运动构建的,但在电路理论中,电荷的随机游走更契合生物游走的特性,能有

效模拟生态流动过程,且能准确反映生态廊道的真实宽度和关键节点及其相对重要程度,科学指导生态安全格局的构建<sup>[10,19]</sup>。

岷江流域是长江上游的重要生态屏障,也是成都平原最重要的水源地,流域内分布多个国家自然保护区,生态资源本底优越。但随着人类活动范围不断扩大,流域的地表覆盖、水文环境等变化显著,引发了一系列生态问题,严重威胁到流域的生态安全。本研究融合 GIS 空间分析法、InVEST 模型、RUSLE 模型、NPP 定量指标法等方法,识别并筛选高生态系统服务价值的生态源地;利用地质灾害敏感性修正土地利用基本阻力面;并基于电路理论,提取生态廊道、夹点及障碍点,构建具有地域特色的岷江流域生态安全格局并提出优化对策,确定生态修复方向。此外,本研究强调多尺度生态安全格局的衔接与融合,将岷江全流域生态安全格局与局域空间单元实践结合,探索“全流域—局域单元”生态空间协同修复路径,对局域单元生态修复提供具体的空间指引,旨在推动岷江流域生态安全的可持续发展,也为其他区域生态安全格局构建及后续生态修复实践提供有效参考。

## 1 研究区概况

岷江流域(102°33'E—104°44'E,28°19'N—33°09'N)位于四川省中部,是长江上游的一级支流,面积约 6.65 万 km<sup>2</sup>,流经阿坝、成都、雅安等 9 市(州)44 县(市、区)(图 1)。研究区源自青藏高原东缘的岷山南麓,土地利用类型以林地为主,森林覆盖率达 45.18%,建有都江堰、通济堰、醴泉堰诸多水利工程,极大地推动了流域的经济社会发展。流域分上中下游,上游从源头至都江堰以北,中游为都江堰至乐山大渡河汇入处,下游为乐山向南至宜宾汇入长江。上游地形复杂多样,为典型的高原山地气候,包括森林、草地、湿地等多种自然生态系统,资源丰富但地质灾害频发,且地广人稀,经济发展落后;中下游地势较平缓,多为丘陵、盆地、平

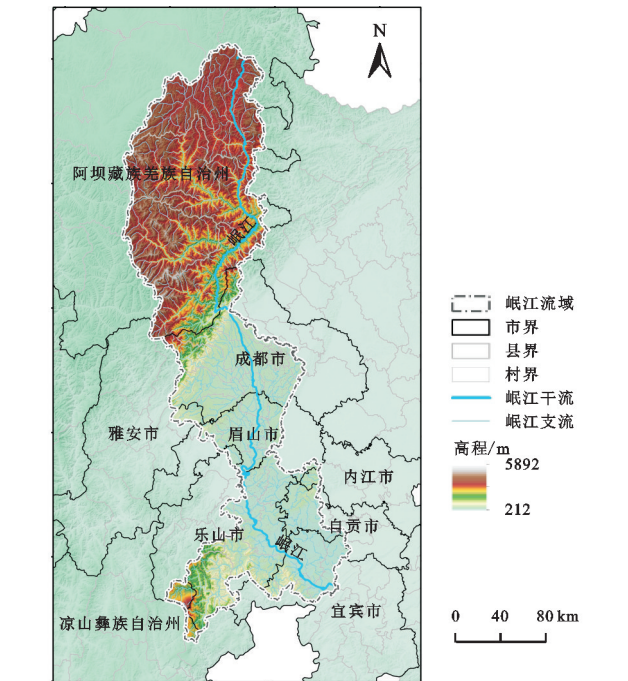
原,土地利用类型以耕地、建设用地、林地为主,属于亚热带气候区,人口密集,工农业发达,经济发展状况良好,尤其是成都、乐山、宜宾等市,已成为区域工业和文化中心,也是四川省经济发展的重要支撑力量。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究涉及的基础数据见表 1,将所有数据坐标系统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48 N,并将栅格数据重采样至 500 m 的分辨率。利用 ArcGIS 10.2 平台,对基础数据处理可得到其余所需数据。土地利用数据一级分类包括农田、森林、灌木、草地、水体、冰雪、裸地、不透水面和湿地,据研究需要,将其重分类为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 类。基于 DEM 数据,可计算得到坡度、地形起伏度。对降水、土壤数据根据公式在栅格计算器中处理可得到降水侵蚀因子、土壤可蚀性因子、土壤渗流因子等。其中,土地利用数据、坡度、地形起伏度、降水、气温、土壤、植被覆盖因子(FVC)、多年植被净初级生产力平均值(NPP)、归一化植被指数(NDVI)、粮食产量等数据用于源地识别中生物多样性、固碳释氧、水土保持、水源涵养、粮食生产等指标的分析。土地利用

数据、坡度、降水、植被覆盖因子、夜间灯光强度等数据用于构建综合阻力面。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 研究区生态资源本底特征  
Fig. 1 Characteristics of ecological resource base in the study area

表 1 数据来源  
Table 1 Data sources

数据名称	数据来源	年份	格式	分辨率
河流	全国地理信息资源目录服务系统	2021	矢量	
土地利用类型	武汉大学年度中国土地覆盖数据集(CLCD)	2022		30 m
DEM	NASA 地球科学数据网			12.5 m
降水		2013—2022		1 km
气温				
植被覆盖因子(FVC)	国家青藏高原科学数据中心	2022	栅格	250 m
归一化植被指数(NDVI)				
土壤	Harmonized World Soil Database v1.2	1995		
多年植被净初级生产力平均值(NPP)	MOD17A3 数据集	2013—2022		500 m
夜间灯光强度	《基于跨传感器校准获得的全球类 NPP-VIIRS 的长时序夜间光照数据》	2022		
粮食产量	统计年鉴		统计数据	

2.2 研究方法

2.2.1 电路理论基本原理 在一个特定的景观中,物种或基因流的迁徙分散是随机的,电路中的电荷游走也具有随机性,电路理论将随机游走理论和物种运动生态学融合,以测量异质景观的连接性<sup>[17]</sup>。电路理论中,异质性景观被类比为由节点、电阻等构成的电路,物种个体或基因流被视为电子,生境质量好的栖息地对应节点,具有不同阻力值的景观被看作电导

面,电阻距离代替成本距离,直接映射生态流动的空间分布范围<sup>[19]</sup>。电路理论模型可通过电流模拟异质景观中的基因流,预测生物沿某一路径迁徙扩散的概率,识别出多条不同宽度的生态廊道,且考虑了廊道的冗余性。根据电流密度中心度也能确定源地、廊道的重要性程度,且筛选出的夹点位置不受廊道宽度影响,据此能更客观地划分生态空间,有效减少主观判断<sup>[10]</sup>。此外,并联电路中路径增多,电阻减小,电流



增强,且路径宽度更宽,电子流通量也更多,因此,增加生物迁徙通过的廊道数量、宽度、连通性等能减少迁徙阻碍,提高成功扩散的概率<sup>[20]</sup>。

### 2.2.2 异质景观识别与构建

(1) 生态源地识别。景观中生境质量好的生态斑块被称为生态源地,其生态服务价值高、生态系统稳定,是物种生存和迁移的基本要素,也是构成生态安全格局的基础<sup>[21]</sup>,与电路理论中节点的概念相似。生态系统服务对人类的生存发展至关重要,评估其重要性有助于揭示生态系统的健康状况,本研究基于生态系统服务重要性评价结果选取备选生态源地。

岷江流域存在生物多样性锐减、生境退化、水土流失、河道干涸、水质恶化等生态问题,并且岷江流域是粮仓担当,粮食资源对联系社会经济和自然生态系统至关重要<sup>[22]</sup>,而现有岷江生态安全格局的研究未考虑保障粮食生产问题。本研究选择生物多样性、固碳释氧、水土保持、水源涵养、粮食生产 5 种服务作为评估生态系统服务重要性的指标。运用 ArcGIS 10.2 将 5 个指标的评价结果等权叠加,并采用分位数法进行等级划分,得到重要性等级高的备选生态源地。此外,具有一定规模的生态源地对周边地区的辐射带动作用更强,有助于保持生态系统的稳定,因此,设定最小面积阈值以筛选生态源地<sup>[12]</sup>。

生境质量能够反映物种在环境中的生存能力,选取 InVEST 模型中的生境质量(Habitat Quality)模块,以生物多样性为重点量化评估生境质量<sup>[23]</sup>:

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (1)$$

式中: $Q_{xj}$ 为地类  $j$  中栅格  $x$  的生境质量; $H_j$ 为地类  $j$  的生境适宜度; $D_{xj}$ 是地类  $j$  中栅格  $x$  生境退化度; $k$ 为半饱和系数,取 0.5; $z$ 为归一化常量,默认取 2.5。

根据相关研究与本地实际情况,选择气温和降水作为碳密度修正因子,对全国碳库密度进行修正,并结合研究区土地利用类型,利用 InVEST 模型 Carbon 模块评估其生态系统的固碳能力<sup>[9,24]</sup>:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (2)$$

$$C_{\text{SP}} = 3.3968 \times \text{MAP} + 3996.1 \quad (3)$$

$$C_{\text{BP}} = 6.798 \times e^{0.0054 \times \text{MAP}} \quad (4)$$

$$C_{\text{BT}} = 28 \times \text{MAT} + 398 \quad (5)$$

式中: $C_{\text{total}}$ 为总碳储量; $C_{\text{above}}$ ,  $C_{\text{below}}$ ,  $C_{\text{soil}}$ ,  $C_{\text{dead}}$ 分别为地上部分碳储量、地下部分碳储量、土壤碳储量、死亡有机质 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ; $C_{\text{SP}}$ ,  $C_{\text{BP}}$ ,  $C_{\text{BT}}$ 分别表示根据年降水量得到的土壤碳密度、根据年降水量和年均温得到的生物量碳密度 $(\text{kg}/\text{m}^2)$ ; $\text{MAP}$ 、 $\text{MAT}$ 分别表示年均降水量 $(\text{mm})$ 和年均气温 $(^\circ\text{C})$ 。

生态系统可通过其结构与过程减少由于水蚀而造成的土壤流失。由于岷江流域土壤侵蚀类型以水蚀为主<sup>[25]</sup>,采用修正通用水土流失方程(RUSLE)的水土保持服务模型进行评价<sup>[17]</sup>:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times LS \times (1 - C) \quad (6)$$

$$R = 0.067 F_{\text{pre}}^{1.627} \quad (7)$$

$$K = (-0.01383 + 0.51575 K_{\text{EPIC}}) \times 0.1317 \quad (8)$$

$$K_{\text{EPIC}} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \text{SAN} \left( 1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25 \text{orgC}}{\text{orgC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{orgC})} \right] \times \left\{ 1 - \frac{0.7 \left( 1 - \frac{\text{SAN}}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{\text{SAN}}{100} \right) + \exp \left[ 22.9 \left( 1 - \frac{\text{SAN}}{100} \right) - 5.51 \right]} \right\} \quad (9)$$

式中: $A_c$ ,  $A_p$ ,  $A_r$ 分别为水土保持量、潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ; $R$ 为降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ; $L$ 为坡长; $S$ 为坡度, $L$ ,  $S$ 用地形起伏度代替,邻域范围约 20  $\text{hm}^2$ ; $F_{\text{pre}}$ 为多年平均降水量 $(\text{mm})$ ; $K$ ,  $K_{\text{EPIC}}$ 分别为修正后、修正前的土壤可蚀性 $[\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ; $C$ 为植被覆盖管理因子; $\text{SAN}$ ,  $\text{SIL}$ ,  $\text{CLA}$ ,  $\text{orgC}$ 分别为砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、粘粒( $<0.002$  mm)、有机碳的百分比含量 $(\%)$ 。

水源涵养是指生态系统通过特有结构截留、渗透、蓄积降水,并通过蒸散发调控水循环,以达到补充地下水、缓解河流季节性波动、防洪抗旱等作用。本文采用《生态保护红线划定指南》中提供的 NPP 定量指标法评估水源涵养重要性:

$$\text{WR} = \text{NPP}_{\text{mean}} \times F_{\text{sic}} \times F_{\text{pre}} \times (1 - F_{\text{slo}}) \quad (10)$$

式中:WR 为生态系统水源涵养服务能力指数; $\text{NPP}_{\text{mean}}$ 为多年植被净初级生产力平均值 $(\text{gC}/\text{m}^2)$ ; $F_{\text{sic}}$ 为土壤渗流因子; $F_{\text{pre}}$ 为多年平均降水量 $(\text{mm})$ ; $F_{\text{slo}}$ 为坡度 $(^\circ)$ 。

食物生产以粮食产量为基础,结合粮食产量与 NDVI 间的显著线性关系,将粮食产量按照栅格的 NDVI 值与研究区总 NDVI 值的比例进行空间分配<sup>[26]</sup>:

$$\text{Grain}_{\text{supply}} = \text{Grain}_{\text{production}} \times \frac{\text{NDVI}_i}{\text{NDVI}_s} \quad (11)$$

式中: $\text{Grain}_{\text{supply}}$ 表示粮食生产服务供给量; $\text{Grain}_{\text{production}}$ 表示某区县的粮食总产量 $(\text{t})$ ; $\text{NDVI}_s$ 为该县年最大 NDVI 之和; $\text{NDVI}_i$ 为栅格  $i$  的年最大 NDVI。

(2) 综合阻力面构建。景观阻力面与电路理论中的电导面概念相似,生态系统中的物质能量流动和物种迁徙扩散会受到各种自然和人为因素的影响<sup>[26]</sup>,类似于电荷游走时会遇到阻碍能力各异的电阻。根据



已有研究及岷江流域特性,将利于物种扩散的土地利用类型赋予低电阻值,而阻碍扩散的类型则赋予高电阻值,据此建立基本生态阻力面<sup>[9,21]</sup>。

岷江流域位于山地—盆地过渡带,研究区内青藏高原边缘和成都平原接壤处地质构造复杂,褶皱带活动频繁,地震、崩塌、滑坡、泥石流、洪水等地质灾害频发<sup>[27]</sup>。这些岩土体位移灾害主要受坡度、夏季降水、植被覆盖度、人类工程活动等多重因素的影响<sup>[12]</sup>。夜间灯光数据可以很好地反映人类活动强度,如城市化水平、人口密度等<sup>[23]</sup>。因此,本研究选取上述4个因子等权重叠加,评估岷江流域地质灾害敏感性,并修正基本阻力面,公式如下<sup>[12]</sup>:

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \times R \quad (12)$$

式中: $R_i$ 为根据地质灾害敏感性修正后的栅格 $i$ 的电阻值; $NL_i$ 为栅格 $i$ 的地质灾害敏感度; $NL_a$ 为栅格 $i$ 对应的土地利用类型 $a$ 的平均地质灾害敏感度; $R$ 为栅格 $i$ 对应的土地利用类型的基本电阻值。

**2.2.3 基于电路理论的廊道、夹点、障碍点提取** 基于电路理论,结合识别出的生态源地与构建的阻力面数据,利用 Circuitscape 开源程序与 Linkage Mapper 插件的成对模式提取生态廊道、夹点及障碍点<sup>[17]</sup>。生态廊道是连通相邻生态源地的低阻力带状通道,有助于减少景观破碎化和物种隔离现象,促进生态系统之间能量、物质和信息的流动交换,可等价于电路理论中的电流路径<sup>[26]</sup>。本研究调用 Build Network and Map Linkages 工具进行廊道模拟,并在边界设3 km的缓冲区减少人为边界对电流模拟的影响。运用 Centrality Mapper 模块计算廊道及源地的中心度,划分重要性等级,累计电流值越高,对维持景观之间的连接性越关键。

生态夹点指生态电流集中、强度高的区域,物种通过这些区域的阻力较小,易促进两地间的生态流动。调用 Pinchpoint Mapper 模块,量化源地之间的电流以确定物种移动的关键路径和位置,累计电流值高的区域即为生态夹点。该区域生态过程频繁,物种通过夹点的可能性高且不可替代,是构建生态安全格局的关键节点,不能被破坏或移除,需要重点保护修复<sup>[20]</sup>。生态障碍点则会对物种在不同生态斑块间的迁徙构成阻碍,不利于源地之间的有效连接,识别并改进障碍点对于增强生态廊道的连通性至关重要<sup>[20]</sup>。本研究将梯度搜索半径设置为500,1 000,1 500,2 000 m,使用 Barrier Mapper 工具的移动窗口法识别阻力较大的区域,形成经电阻阈值分析得到相对 LCD 改进得分比例模式下的生态障碍点电流分布。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态源地识别

**3.1.1 生态系统服务重要性特征** 由上述评价得到岷江流域生态系统服务重要性空间分布(图2),从北至南呈“高一低—高”的空间格局,空间差异显著,分别以“龙门—邛崃山脉”和“乐山市市中区及井研县西北部行政边界”为分界线。生物多样性、固碳释氧、水土保持3种生态服务之间存在明显的协同关系,且与综合生态服务空间格局分布大体一致,而水源涵养、粮食生产服务则与其他服务多呈权衡关系。

总体而言,岷江流域生态系统服务重要性的空间异质性与其地类、自然环境特征以及社会经济发展状况紧密关联。从空间分布上看,高等级区集中在植被覆盖率高的林区,而低等级区则以建设强度大的区域为主,其余地类,如草地、耕地等地区等级多数处于中间值,呈过渡状分布。

**3.1.2 生态源地识别及重要性评估** 根据面积大于阈值的斑块数量及占研究区总面积比例随阈值的变化可知(图3),当阈值达1 km<sup>2</sup>后,生态源地斑块数量减少放缓;阈值设定为7 km<sup>2</sup>时,数量趋于平缓,占区域总面积比例稳定在30%左右。因此,选取7 km<sup>2</sup>作为生态源地最小面积阈值,剔除细碎、不连贯斑块的同时,对整体格局的完整性影响小。

筛选得到77个生态源地,面积为14 408.75 km<sup>2</sup>,约占研究区总面积的30.77%(图4)。计算生态流的中心度,采用分位数法将源地分为关键生态源地、重要生态源地、一般生态源地,面积占比分别为66.02%,31.11%,2.87%。关键生态源地主要分布在“龙门—邛崃山脉”生态屏障及其以北的岷山中南段雪宝顶等林地区,以及岷江中下游干流以东的多个市县,地类主要是耕地,是粮食盛产的区域。重要生态源地主要位于研究区西南部林区,以及岷江上游的少量林地。一般生态源地呈点状分布在岷江上游和下游,面积偏小,分布较分散。

目前部分斑块虽因破碎不连续而未被划为生态源地,但其被生态源地包围,是生态扩张的理想区域,需加强保护以减少外界干扰。此外,成都平原经济地位重要但生态退化未止,工业发展和基础设施建设也增加了生态保护压力,导致源地分布稀疏、面积小、连通性差,生态传递受阻,亟待加强人工生态源地建设。

#### 3.2 生态廊道提取

**3.2.1 生态廊道提取及重要性评估** 经地质灾害敏感性修正后的生态阻力面呈“一核多点”的空间格局

(图 4),成都市主城区是高阻力中心,其余高阻力值呈点状散布在建设强度高的市县,阻力值均由内向外递减。龙门—邛崃山脉及其以北的区域,以及岷江下

游干流以西的区域整体阻力值最低;上游部分陡峭的区域阻力值较高但范围小;其余平原地区的阻力值多处于中间值。

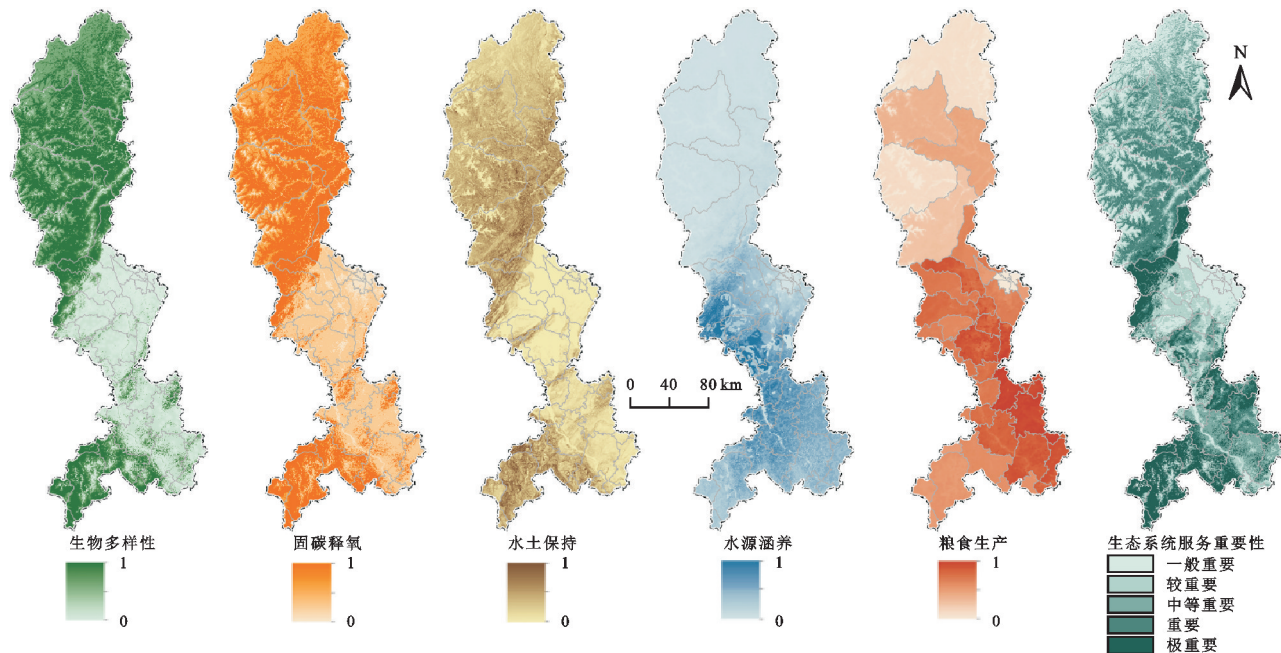


图 2 生态系统服务重要性评价

Fig. 2 Evaluation of the importance of ecosystem services

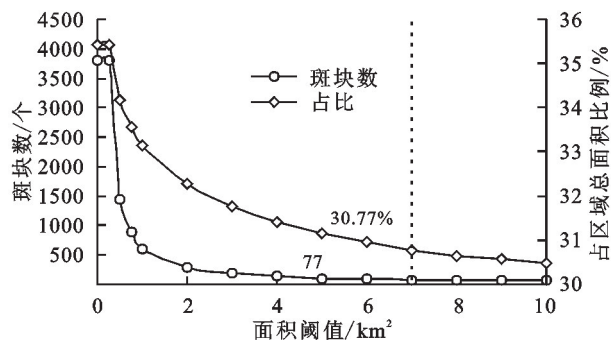


图 3 生态源地数量及面积占比统计

Fig. 3 Statistics on the number of ecological sources and their area share

基于电路理论,将生态源地与综合阻力面结果输入 Linkage Mapper 插件,共识别出 176 条生态廊道,总长度 2 072.96 km,长度小于 5 km 的路径长度仅占总路径的 7.34%,表明整体路径连通性良好,破碎度低(图 4)。生态廊道的电流值区间为 35.94~711.19,采用分位数法将廊道分为关键生态廊道、重要生态廊道、一般生态廊道,占比分别为 21.32%,18.84%,59.84%。研究区内最长的生态廊道为 82.69 km,是关键生态廊道,位于成都市内,绕开了阻力极高值区域,但仍有一定的生物流断裂风险。从空间分布来看,岷江上游生态廊道密集呈网状,多为一般生态廊道,关键和重要生态廊道较少,分布分散且长度偏短;中下游廊道较稀疏,但中下游廊道平均长度长,主要为关键生态廊道,

有效串联了南北源地,一定程度上弥补了成都平原区源地缺失的问题;下游段也有 2 条关键生态廊道,位于乐山市犍为县。

3.2.2 生态廊道阻力值评估 将生态源地与综合阻力面数据导入 Linkage Mapper 插件,计算源地间成本加权距离(CWD)与最小成本路径长度(LCP\_Length),CWD/LCP 的比值越高,物种迁徙阻力越大<sup>[28]</sup>。根据重分类结果(图 4),岷江中游廊道连通性最差,下游次之,上游相对较好。上游廊道地类以林地和草地为主,生态系统服务价值较高,且物种通行阻力较小。与生态廊道重要性分级图对比可以看到,有些关键及重要生态廊道跨越了建设用地和耕地等阻力大的地区,但其受到的阻碍仍较大,需着重改善,提高区域连通性。

### 3.3 生态修复关键区域

3.3.1 生态夹点 采用分位数法将运算结果分为 5 级,提取出的累计电流值最高的生态夹点共 719 处,总面积为 1 578.5 km<sup>2</sup>,面积大于 1 km<sup>2</sup> 的夹点数量虽仅占 19.75%,但面积占到了 87.14%。面积最大的夹点达 98.00 km<sup>2</sup>,位于岷江中游成都市(图 4)。生态夹点位于筛选出的生态廊道上,多数呈条带状分布;其余面积较小、呈点状分散分布的夹点大多位于上游。夹点地类多为林地、草地、耕地,中下游的夹点周围往往存在建设用地,其在承担维护景观连通性的



同时,还面临着人类活动的压迫和威胁。此外,夹点多位于廊道出入源地的位置及廊道中段,这些区域若

发生断裂,极有可能导致整个景观系统的功能出现混乱或失调。

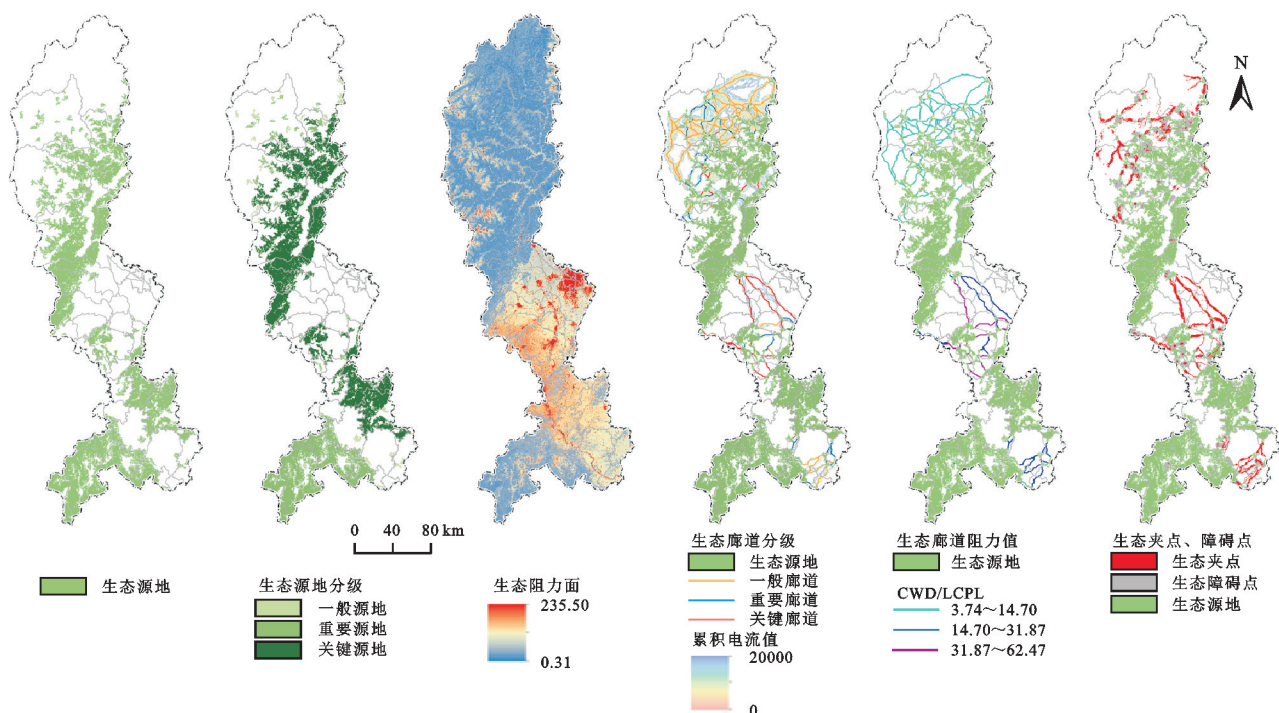


图4 各生态要素提取与分级

Fig. 4 Extraction and grading of each ecological element

**3.3.2 生态障碍点** 利用分位数法将生态障碍点分为5级,识别出等级最高的生态障碍点共163处,总面积2410 km<sup>2</sup>,面积最大的障碍点达到177 km<sup>2</sup>,位于岷江上游阿坝州(图4)。面积不超过1 km<sup>2</sup>的障碍点数量占48.47%,但总面积仅占1.20%,主要呈点状分散分布在岷江上游,修复工程相对较易实施,修复完成后会显著促进区域景观连通性的提升。面积大于1 km<sup>2</sup>的生态障碍点大多呈块状或条带状分布,主要集中在岷江上游,其次中游眉山市内分布较多,下游数量较少,分布较分散。生态障碍点大多位于源地边缘或间隙,有部分紧邻生态夹点或与之重叠,会威胁到生态基底的完整与稳定,并限制廊道扩展,尤其需要优先修复。

### 3.4 生态安全格局构建及优化对策

基于前文提取出的各空间要素,结合岷江流域自然本底条件、生态保护发展需求和相关政策,构建“四区两带一廊”的生态安全格局(图5),并提出优化对策。

**3.4.1 “四区”** 将岷江流域分为优先修复区、生态保育区、控制调节区、生态提升区4个分区,分区依据、面积及占比见表2。优先修复区是保障生态系统正常运转的关键,应加大修复力度,重新连接断裂的生态廊道,促进区域间生态要素流通。生态保育区自然群落结构丰富,承载着各种重要的生态功能,与自然保护区重合比例大,如卧龙国家级自然保护区、美

姑大风顶国家级自然保护区、龙池山自然保护区等;中下游段部分耕地水源涵养量或粮食生产量高,是粮食主产区。控制调节区生态系统服务能力相对较差,生态廊道易因土地利用变化、植被减少或长度过长而断开,导致生态物质流通受阻。生态提升区阻力值高、生态系统服务能力差,人口及交通路网分布密集,建设用地集聚,且水利工程建设对生态环境影响较大;中下游地区缺少辐射带动作用强的源地且无生态廊道经过。

生态治理时要区分各个分区的目标导向,因地制宜地实施调控措施(图6)。需重点保护自然山体和水系,如岷山、邛崃山等生态屏障,通过封山育林,促进生态恢复。人工建设物种迁徙缓冲区时,需考虑当地生物习性。此外,耕地兼具生产与生态功能,可调节气候、连接生态斑块,故应尊重原有耕地范围,避免过度开发。

**3.4.2 “两带一廊”** 生态屏障带由关键生态源地和关键生态廊道构成,生态源地修复带由岷江上游生态系统服务相对较差及阻力值相对较高的区域构成,都呈“C字型”结构。生态屏障带在整个生态安全格局中占据重要地位,需强化一体化治理,深入开展关键夹点、障碍点的生态修复工作,充分发挥其生态辐射效能。生态源地修复带主要以草地和林地为主体,自然资源丰富,但在强降水影响下,不规则地震叠加滑



坡、泥石流等地质灾害易发,生态脆弱性加剧。应针对海拔和自然资源特点采取适宜的生态修复措施,加强防洪工程建设、地质灾害监管,健全灾害预警、防灾减灾体系,减轻对生态环境的损害。

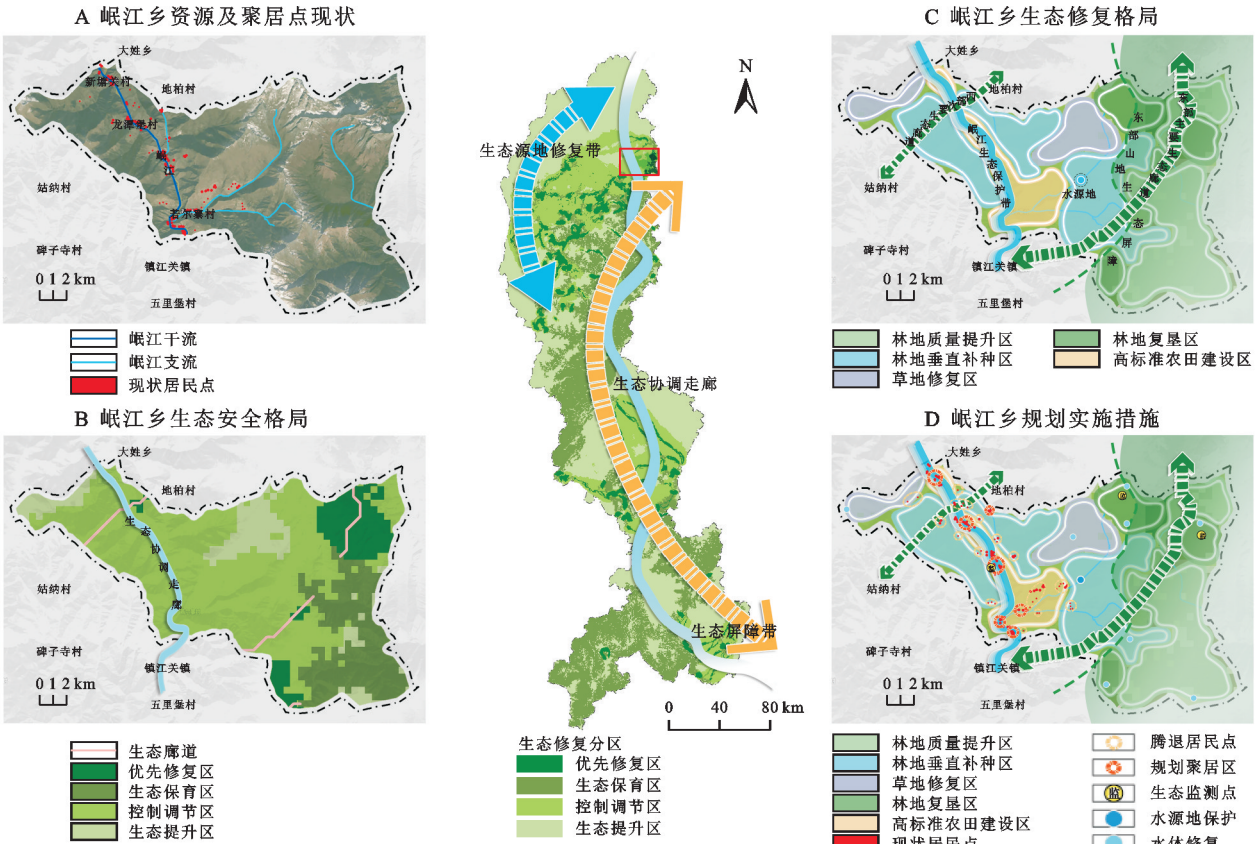


图 5 岷江流域生态安全格局构建

Fig. 5 Construction of ecological security pattern in Minjiang River Basin

表 2 岷江流域生态安全分区

Table 2 Minjiang River Basin ecological security zones			
分区	类型	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%
优先修复区	提取出的最重要的生态夹点、生态障碍点	3600.44	7.69
生态保育区	生态源地	14009.16	29.91
控制调节区	带有宽度信息的生态廊道和其他等级的夹点、障碍点叠加	9612.08	20.53
生态提升区	阻力值偏高或生态系统服务能力较差的区域	19608.90	41.87

河流是天然的生态廊道,水流稳定、低阻,利于连接不同区域。应强化水系联系,恢复河道的自然连通,建设流域及河湖生态缓冲区。本研究选取岷江干流作为生态协调走廊,贯穿南北,协调整个研究区的物质能量流通。其两岸人类活动较频繁,需加强人口分流,控制建设用地扩张速度。此外,重点保护岷江水系网,监督水质,改善受污染水体,并全面修复都江堰灌区水系,构建完整的水系网络。

3.5 岷江流域“全流域—局域单元”生态空间协同修复路径

3.5.1 局域单元生态空间修复路径 在全流域生态安全格局构建的框架下,本研究针对局域单元的自然

资源禀赋与生态问题进行垂直生态分区的细化,打破了平面空间定势,并补充识别出的生态廊道、设置重要生态治理点位,构建局域单元的生态修复格局,配套实施相应有效的生态保育措施,旨在通过科学合理的空间布局,强化各生态系统服务能力,减少自然灾害的影响,以期为该地区的可持续发展提供科学依据与实践指导(图 7)。局域单元生态空间修复的实施亦巩固了全流域的生态安全防线,有助于研究区整体景观连通性的增强及生境质量的提升,从而促进生态系统中的物质循环与能量流通,推动生态系统的健康稳定发展。

3.5.2 岷江乡生态修复实例 基于前文分析,岷江乡位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县南部,有岷江干流流经,邻岷山最高峰雪宝顶,地形起伏大,生态资源丰富,但生态系统服务能力仍待加强,尤其在水源涵养和粮食生产方面(图 5A)。该地区土壤类型以壤土为主,易引起土壤侵蚀,加之岩体结构松散,紧邻岷江与雪山断裂带,地震活动频繁,滑坡、崩塌、泥石流等次生灾害风险显著。此外,还面临自然阻力、水土流失及人类活动干扰等多重挑战。鉴于此,本研究选择岷江乡作为局域研究对象(图 8)。

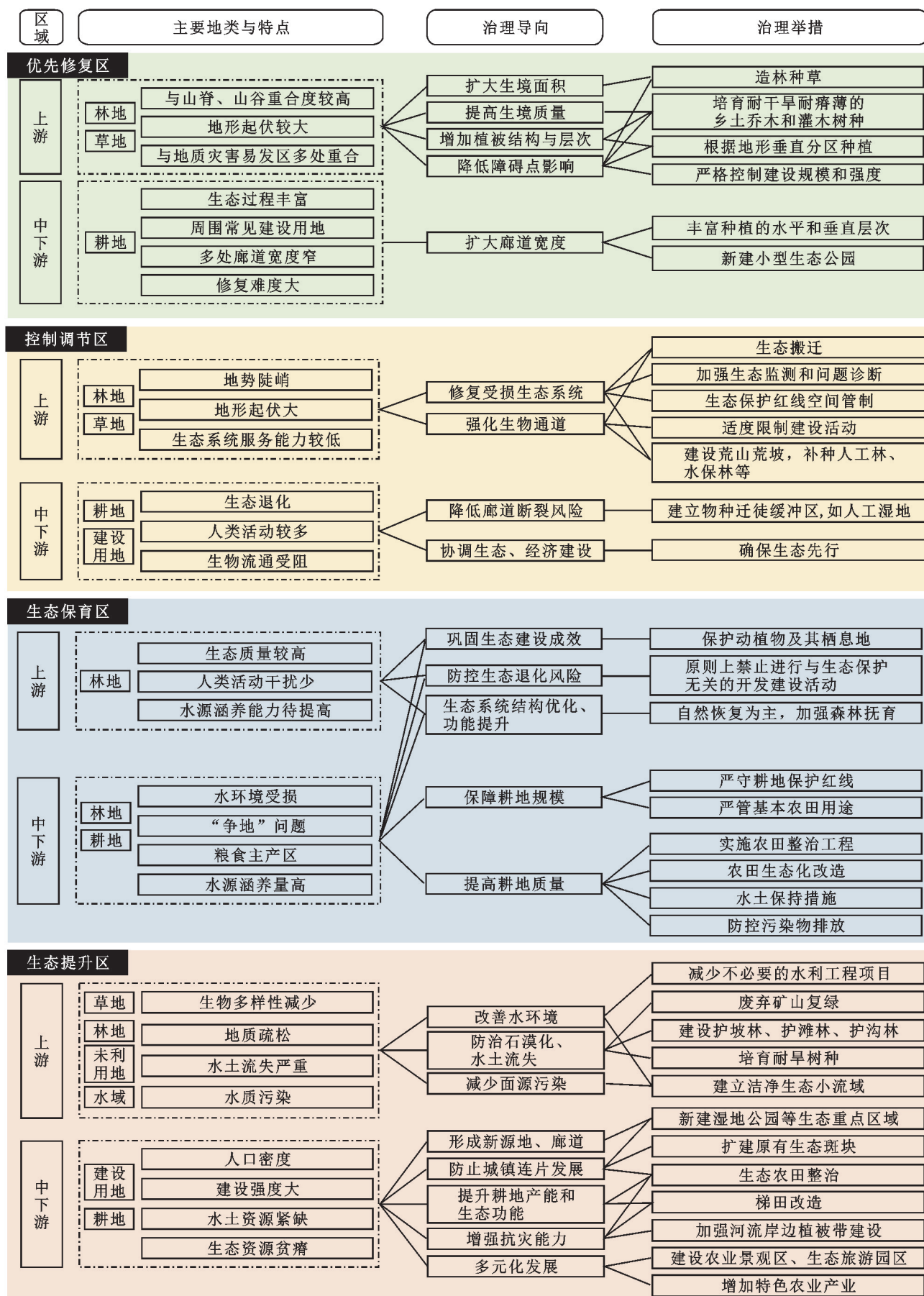


图6 “四区”治理对策

Fig. 6 Governance responses in the ‘four zones’



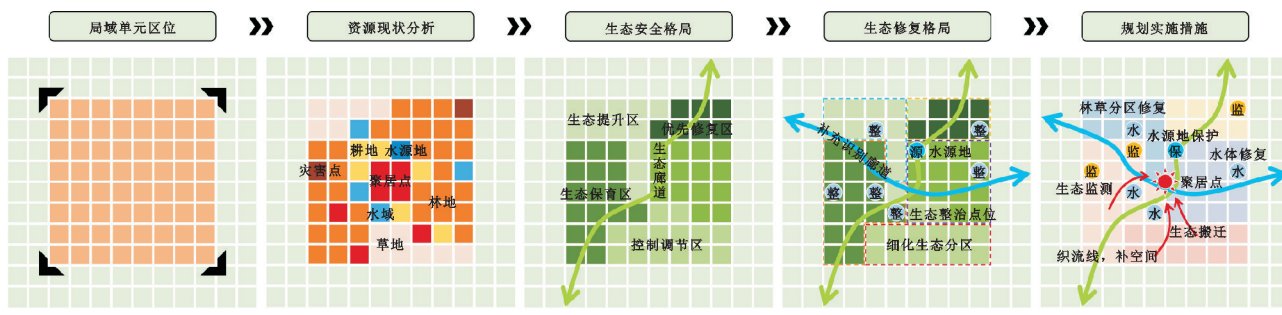


图 7 局域单元生态空间修复路径

Fig. 7 Restoration path of ecological space in local units

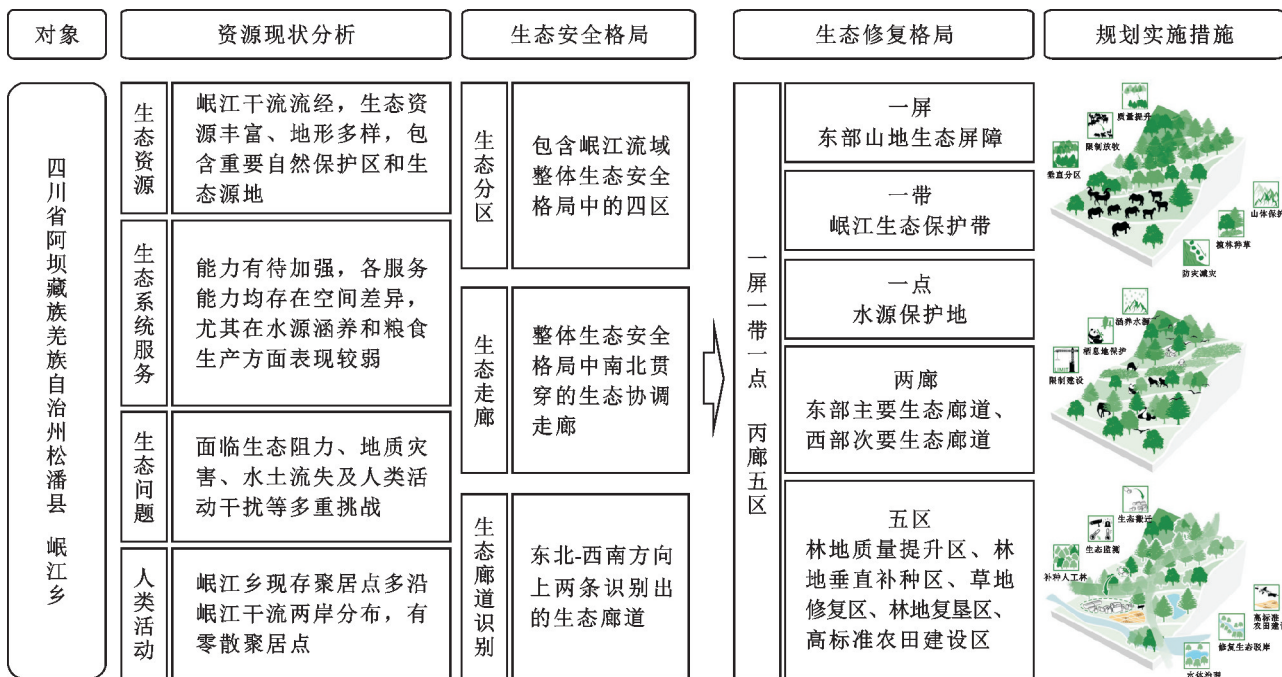


图 8 岷江乡生态空间修复步骤

Fig. 8 Restoration steps of ecological space in Minjiang Township

依据局域单元生态空间修复路径(图 7),结合岷江乡在岷江全流域生态安全格局中的位置(图 5B)及现存生态问题,构建岷江乡“一屏一带一点,两廊五区”的生态修复格局(图 5C),并参考岷江流域的生态优化对策(图 6),制定针对岷江乡的生态修复实施措施(图 5D)。

(1) 生态空间分区优化。首先需改善岷江乡林草资源质量。岷江乡东部山地生态屏障与大熊猫国家公园位置吻合,应着重保护大熊猫等野生动物,确保迁徙通道与栖息地的安全。林地复垦区是周围生境较好的未利用地,作为生态修复的关键区域,应通过山体修复与适度放牧恢复生态,解决山体斑秃问题;林地质量提升区侧重于自然恢复与密林结构改善,留优去劣,留直去弯,间密留稀。林地垂直补种区内生产建设活动相对频繁的区域需及时补种受损林木,垂直种植红松、铁杉等乡土树种,增强土壤有机质并加强水土保持。草地修复区则需改革粗放养殖,落实禁牧休牧制度,并结合生物与工程措施,综合治理

高山草甸,恢复草原生态,提升整体生态效益。

其次,针对高标准农田建设区,要以提升粮食生产能力为目标,严格落实永久基本农田特殊保护制度,有效遏制农田“非农化”倾向,并推进土地整治工程。评估并划分“坡地改梯田”整治区域,提升土地平整度与集中连片程度;改良灌溉排水系统、优化田间道路网及种植结构,以缓解水资源压力,提高粮食产能和农田抗灾能力;同时,注重土壤改良,防控污染,提高有机质含量与肥力,有效遏制耕地水土流失。

(2) 地质灾害及水污染防治。地质灾害易发处及岷江河岸应加强“人防+技防”的地质灾害监测预警网络建设,利用雨量计等设备预警滑坡、泥石流,全方位、立体化动态监测各类灾害隐患点位。此外,腾退风险高且零星破旧的宅基地,推动居民避险搬迁,集中安置在两岸安全地带,尤其需要腾退在生态廊道上的零散聚居点,以减少地质灾害损失,同时提升各生态片区生境质量,减少物种迁徙障碍。



岷江生态保护带需强化防洪管理,重点防御山洪灾害,限制高风险区开发。落实河(湖)长制,防止非法采砂、随意弃渣等行为,保持河道畅通。同时,加强水源地保护与水质监管,优化水质,清淤控污,修复生态驳岸,补植生态防护林,恢复水生植物,建设自然生态岸线,提升水土保持及自净能力。针对高原湖泊,建立生态保护核心区、缓冲区、绿色发展区,促进生态旅游与湖泊协调发展。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

4.1.1 岷江流域生态安全格局相关研究对比 岷江流域作为长江上游重要生态屏障及成都平原主要水源地,其生态安全格局构建研究旨在增强生态景观连通性,维持生态系统稳定性。与已有研究相比<sup>[29-30]</sup>,本研究在识别生态源地时,除考虑4种常用且对缓解气候变化和提升人类福祉有重要影响的生态系统服务外,还结合岷江流域特点纳入了粮食生产指标,系统性地评估全流域生态安全。构建生态阻力面时,综合自然与社会经济因素,强调了地质灾害的影响,以减小地类间空间分异导致的阻力值误差。基于此,采用与生物随机游走特性更契合的电路理论,精准提取生态空间要素,识别出具有宽度属性且真实反映物种迁徙和扩散的生态廊道,并依据电流密度中心度更准确地对源地、廊道等进行重要性分级,且提取出了不受廊道宽度影响的生态夹点、障碍点。此外,结合构建出的岷江全流域生态安全格局,以岷江乡为例,探索了“全流域一局域单元”生态空间协同修复路径,强调了多尺度生态安全格局的衔接与融合,为其他区域的格局构建及后续生态修复实践提供了有效参考。

由于研究范围、因子选取及方法与既有研究不同,所得出的各要素数量、面积及空间分布均存在差异。识别出的生态源地、夹点、障碍点在上游最密集,中下游相对较稀疏,且源地集中面积大,连接源地的生态廊道总长度相对更短。因此,需加强人造生态源地与廊道的建设,提高廊道整体密度,填补研究区中部空缺,连通南北源地稀疏的区域,从而实现整体景观连通性的增强及生境优化,促进物质流通。

4.1.2 研究不足与展望 本研究主要基于陆生动物的迁徙习惯提取生态源地和廊道,对水生动物和植物种子扩散考虑不足,但文中廊道宽度设置能基本保障动植物物种的多样性。此外,Circuitscape软件与Linkage Mapper插件运行的固定程序无法灵活调整以适应研究区实际情况,且数据来源多样、精度不一,

运算结果验证受限,提取出的生态空间与实际情况可能存在一定偏差。同时,由于数据精度限制,忽略了小尺度水体和道路,对整体格局构成潜在影响。当前研究受到了研究方法、数据精度、模型应用等存在的共性问题限制,未来可通过多模型提取生态空间要素进行对比分析,并强调小尺度精细数据在大尺度生态安全格局构建中的应用。

### 4.2 结论

(1) 面积阈值设定为7 km<sup>2</sup>时,筛选出生态源地77个,总面积为14 408.75 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的30.77%。关键生态源地主要在“龙门—邛崃山脉”生态屏障处及其以北的岷山中南段雪宝顶等林地区,以及岷江中下游的部分耕地和林地。

(2) 基于电路理论,共识别出生态廊道176条,总长度2 072.96 km,关键生态廊道总长度占比为21.32%,集中在岷江中游。生态夹点共719处,总面积1 578.5 km<sup>2</sup>,上游主要呈点状分散分布,中下游主要呈带状分布。生态障碍点有163处,总面积2 410 km<sup>2</sup>,大多位于源地边缘或间隙,且有部分紧挨生态夹点或直接与之重叠。

(3) 构建“四区两带一廊”的岷江流域生态安全格局并提出空间优化对策。“四区”为优先修复区、生态保育区、控制调节区、生态提升区,面积占比分别为7.69%,29.91%,20.53%,41.87%。“两带”为生态屏障带和生态源地修复带,“一廊”为生态协调走廊。

(4) 强调了多尺度生态安全格局的衔接与融合,提出岷江流域“全流域一局域单元”生态空间协同修复路径,并以岷江乡为例,对该局域单元生态修复提供了具体的空间指引,为流域生态安全格局构建及后续生态修复实践提供有效参考。

### 参考文献(References):

- [1] 蒋艳灵,刘春腊,周长青,等.中国生态城市理论研究现状与实践问题思考[J].地理研究,2015,34(12):2222-2237.  
Jiang Y L, Liu C L, Zhou C Q, et al. Overview of theoretical research and practical considerations on eco-cities of China [J]. Geographical Research, 2015, 34 (12): 2222-2237.
- [2] 岳德鹏,于强,张启斌,等.区域生态安全格局优化研究进展[J].农业机械学报,2017,48(2):1-10.  
Yue D P, Yu Q, Zhang Q B, et al. Progress in research on regional ecological security pattern optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):1-10.
- [3] Forman R T T, Michel G. Patches and structural compo-

- nents for a landscape ecology[J]. *BioScience*, 1981, 31(10): 733-740.
- [4] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology[J]. *Landscape Ecology*, 1995, 10(3):133-142.
- [5] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].*生态学报*, 1999, 19(1):8-15.
- Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):8-15.
- [6] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.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 K M, Fu B J, Li X Y, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 761-768.
- [7] 刘轶,王倩娜,廖奕晴.成都都市圈生态与社会经济系统耦合协调动态演化、多情景模拟及其政策启示[J].*自然资源学报*, 2023, 38(10):2599-2618.
- Liu Y, Wang Q N, Liao Y Q. Dynamic evolution and multi-scenario simulation of ecosystem and socio-economic system coupling coordination in Chengdu Metropolitan Area and its policy implications[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(10):2599-2618.
- [8] 柯钦华,周俏薇,庄宝怡,等.基于生态系统服务供需平衡的粤港澳大湾区生态安全格局构建研究[J].*生态学报*, 2024, 44(5):1765-1779.
- Ke Q H, Zhou Q W, Zhuang B Y, et al. Construction of ecological security pattern in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on the balance of ecosystem services supply and demand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(5):1765-1779.
- [9] 韩王亚,夏双双,周维,等.基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建[J].*生态学报*, 2023, 43(21): 8948-8957.
- Han W Y, Xia S S, Zhou W, et al. Constructing ecological security pattern based on ecological corridor identification in Lhasa River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21):8948-8957.
- [10] 薛强,路路,牛韧,等.基于地质灾害敏感性的生态安全格局关键区识别与修复:以济南市为例[J].*生态学报*, 2021, 41(22):9050-9063.
- Xue Q, Lu L, Niu R, et al. Identification and restoration of key areas of ecological security pattern based on sensitivity to geological disasters: a case study of Jinan City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22):9050-9063.
- [11] 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.
- [12] 彭建,郭小楠,胡熠娜,等.基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建:以云南省玉溪市为例[J].*应用生态学报*, 2017, 28(2):627-635.
- Peng J, Guo X N, Hu Y N, et al. Constructing ecological security patterns in mountain areas based on geological disaster sensitivity: a case study in Yuxi City, Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2):627-635.
- [13] 雷金睿,陈宗铸,陈毅青,等.1990—2018年海南岛湿地景观生态安全格局演变[J].*生态环境学报*, 2020, 29(2):293-302.
- Lei J R, Chen Z Z, Chen Y Q, et al. Dynamic analysis of wetland landscape ecological security pattern of Hainan Island in 1990-2018[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2):293-302.
- [14] 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 J, Zhao H J, Liu Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.
- [15] White R, Engelen G, Uljee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(3):323-343.
- [16] 张海铃,叶长盛,胡梦娜.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.
- [17] 周浪,李明慧,周启刚,等.基于电路理论的特大山地区生态安全格局构建:以重庆市都市区为例[J].*水土保持研究*, 2021, 28(2):319-325, 334.
- Zhou L, Li M H, Zhou Q G, et al. Construction of ecological security pattern in very large mountainous city based on circuit theory: taking Chongqing metropolitan

- area as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(2):319-325,334.
- [18] McRae B H. Isolation by resistance[J]. *Evolution*, 2006,60(8):1551-1561.
- [19] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J]. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [20] McRae B H, Hall S A, Beier P, et al. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits[J]. *PLoS One*, 2012, 7(12): e52604.
- [21] 刘斯媛,罗勇,于慧,等.川西北长江黄河源区生态安全格局构建及优化[J].*环境工程技术学报*,2023,13(4): 1315-1324.
- Liu S Y, Luo Y, Yu H, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in the source regions of the Yangtze River and the Yellow River in northwestern Sichuan[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023,13(4):1315-1324.
- [22] Sharmina M, Hoolohan C, Bows-Larkin A, et al. A nexus perspective on competing land demands: Wider lessons from a UK policy case study[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016,59:74-84.
- [23] 李欣,董智,李小倩,等.鲁中南山地丘陵区多尺度下生态空间分区分管控的探讨[J].*干旱区资源与环境*,2024, 38(8):129-138.
- Li X, Dong Z, Li X Q, et al. A probe to the ecological space zoning control at multiple scales in hilly areas of central-south Shandong[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024,38(8):129-138.
- [24] 张优.基于LUCC的成都平原地区碳排放效应研究[D].成都:四川师范大学,2018.
- Zhang Y. Study on carbon emission effect in Chengdu Plain Area based on LUCC[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018.
- [25] 邓玉林,孟兆鑫,王玉宽,等.岷江流域土壤侵蚀变化与治理对策研究[J].*水土保持学报*,2008(5):56-60.
- Deng Y L, Meng Z X, Wang Y K, et al. Study on soil erosion changes and controlling strategy in the Minjiang River Valley[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008(5):56-60.
- [26] 姜虹,张子墨,徐子涵,等.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 H, Zhang Z M, Xu Z H, et al. Construction of ecological security pattern integrating multiple ecological protection objectives in Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(5):1981-1992.
- [27] 刘星洪,姚鑫,杨波,等.川西高原活动性滑坡识别与空间分布特征研究[J].*地质力学学报*,2023,29(1):111-126.
- Liu X H, Yao X, Yang B, et al. InSAR-based identification and spatial distribution analysis of active landslides in the Western Sichuan Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2023,29(1):111-126.
- [28] 倪庆琳,丁忠义,侯湖平,等.基于电路理论的生态格局识别与保护研究:以宁武县为例[J].*干旱区资源与环境*,2019,33(5):67-73.
- Ni Q L, Ding Z Y, Hou H P, et al. Ecological pattern recognition and protection based on circuit theory[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019,33(5):67-73.
- [29] 方国政,薛东剑,陈晓杰,等.面向生态安全格局的岷江地区生态修复重点区域识别[J].*桂林理工大学学报*, 2022,42(1):151-159.
- Fang G Z, Xue D J, Chen X J, et al. Identification of key ecological restoration areas in Minjiang River region based on ecological security pattern[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2022,42(1):151-159.
- [30] 姚材仪,何艳梅,程建兄,等.岷江流域生态安全格局评价与优化:基于最小累积阻力模型和重力模型[J].*生态学报*,2023,43(17):7083-7096.
- Yao C Y, He Y M, Cheng J X, et al. Evaluation of ecological security pattern and optimization suggestions in Minjiang River Basin based on MCR model and gravity model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(17):7083-7096.