

基于“源地-廊道-节点”的涪江流域生态安全格局构建*

陈 浩, 王营维, 成忠琪, 马 丽
(绵阳师范学院 地理与环境学院, 四川 绵阳 621006)

摘要:通过精准提取生态空间要素的方式构建生态安全格局是维护生物多样性、提升生态系统功能的重要途径。以涪江流域作为研究区,利用形态学空间格局分析识别生态源地斑块,基于生态风险等级评价和最小累积阻力模型建立累积阻力表面,从而模拟生态廊道,提取生态节点,构建“以生态源地为关键斑块、以生态廊道为轴线、以生态节点为枢纽”的涪江流域生态安全格局,形成“源廊成网、生境连通”的生态安全网络。研究结果表明:1) 涪江流域内生态源地面积达 11 834.31 km²,占流域总面积的 29.96%,聚集成片分布于岷山断块、龙门山断裂带控制的上游区域,零星分布于川东平行山岭地带;2) 生态廊道总长度为 2 249.32 km,其中沿涪江干流河道展布的廊道延伸距离最长,达 434.32 km,该廊道在物种迁徙、能量和信息流动过程中利用率较高;3) 所提取 25 个生态节点均位于廊道沿线生态阻力低值区域,成为物种迁徙途中的“踏脚石”和“暂歇点”;4) 基于“源地-廊道-节点”构建涪江流域生态安全网络,提出“一廊两区”(涪江生态水廊和流域南、北两端生态源地分布区)生态建设思路,以保障生态源地间的连通性、生态网络的完整性和稳定性。研究结果可为识别涪江流域生态修复关键区、保障该流域生态系统服务功能正常发挥提供科学支撑。

关键词:生态安全格局;生态源地;生态廊道;生态节点;形态学空间格局分析

中图分类号:P951

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)06-0070-13

随着生态系统退化、国土空间格局失序、人地矛盾不断突出等问题的凸显,国土空间生态安全受到了广泛关注。构建适合区域环境特点的生态安全格局网络,对于维护区域生态过程的连通性与整体性并使特定生态过程得到有效调控和保护而言,具有非常重要的意义^[1-3]。生态安全格局的研究最早起源于景观生态规划领域。在国际上,相关研究者更多关注如何通过优化生态系统服务功能、增强重点生态功能区连通性等方式达到生物多样性保护的目的^[4-8]。在中国,俞孔坚^[9]于 20 世纪 90 年代提出了景观生态安全格局这一概念,并对水源涵养、水土保持、生物多样性保护等单一生态过程进行分析,通过计算植被覆盖度高低、评价水土流失潜在风险大小、统计单位空间物种分布数量等方式判断相应生态过程的安全格局水平^[10]。就研究区域而言,早期相关研究主要集中在自然保护区、森林公园内生态保护网络的构建^[11],随着“源-汇”理论、生态平衡理论及地理信息技术的发展,生态安全格局研究方式趋于多样化,并从理论概念的辨析向格局量化研究方向发展。目前,“识别关键生态要素的空间位置、有效链接孤立的景观要素、以最低的成本改善区域生态系统整体功能”已成为生态安全格局构建的核心理念^[1],并由此逐渐形成了“生态源地识别—生态阻力面构建—生态廊道模拟—生态节点提取”的主流研究框架^[12-17]。生态源地是对生态系统功能发挥及生态过程完整状态起决定作用的关键生态斑块,确定生态源地的方法包括“从生态系统服务角度构建指标体系对斑块的重要性进行评价”^[18-21]“基于景观连接度,运用形态学空间格局分析(MSPA)进行筛选”^[22-26]等。生态廊道是生态网络中物种迁移、能量流动和信息传递的连通纽带,相关研究通常在生态阻力面构建的基础上运用最小累积阻力模型(MCR)^[13,27-30]与 Circuit 理论^[31-33]对廊道进行模拟分析。生态节点是迁徙物种在生态廊道上的“暂歇点”,常通过建立拓扑关系提取累积阻力表面“山谷线”与生态廊道的交点来获取^[20,22,24-25]。

生态安全格局构建的关键在于识别生态源地和模拟生态廊道,无论基于生态系统服务价值评估划分生态源地,还是直接将植被覆盖度高的林地作为源地,均未充分考虑景观斑块间的整体性和连通性。MSPA 侧重于空间形态属性的表达,将该模型与景观连通性指数相结合,能在像元尺度下较为高效、准确地识别生态源地。MCR 通过计算物种在不同生态源地间迁徙、扩散的最小累积阻力和最短成本路径,能较好地模拟生物在空间运动中

* 收稿日期:2025-04-03 修回日期:2025-07-11 网络出版时间:2026-01-08T16:45

资助项目:四川省科技厅科技计划面上项目(No. 2025ZNSFSC0257)

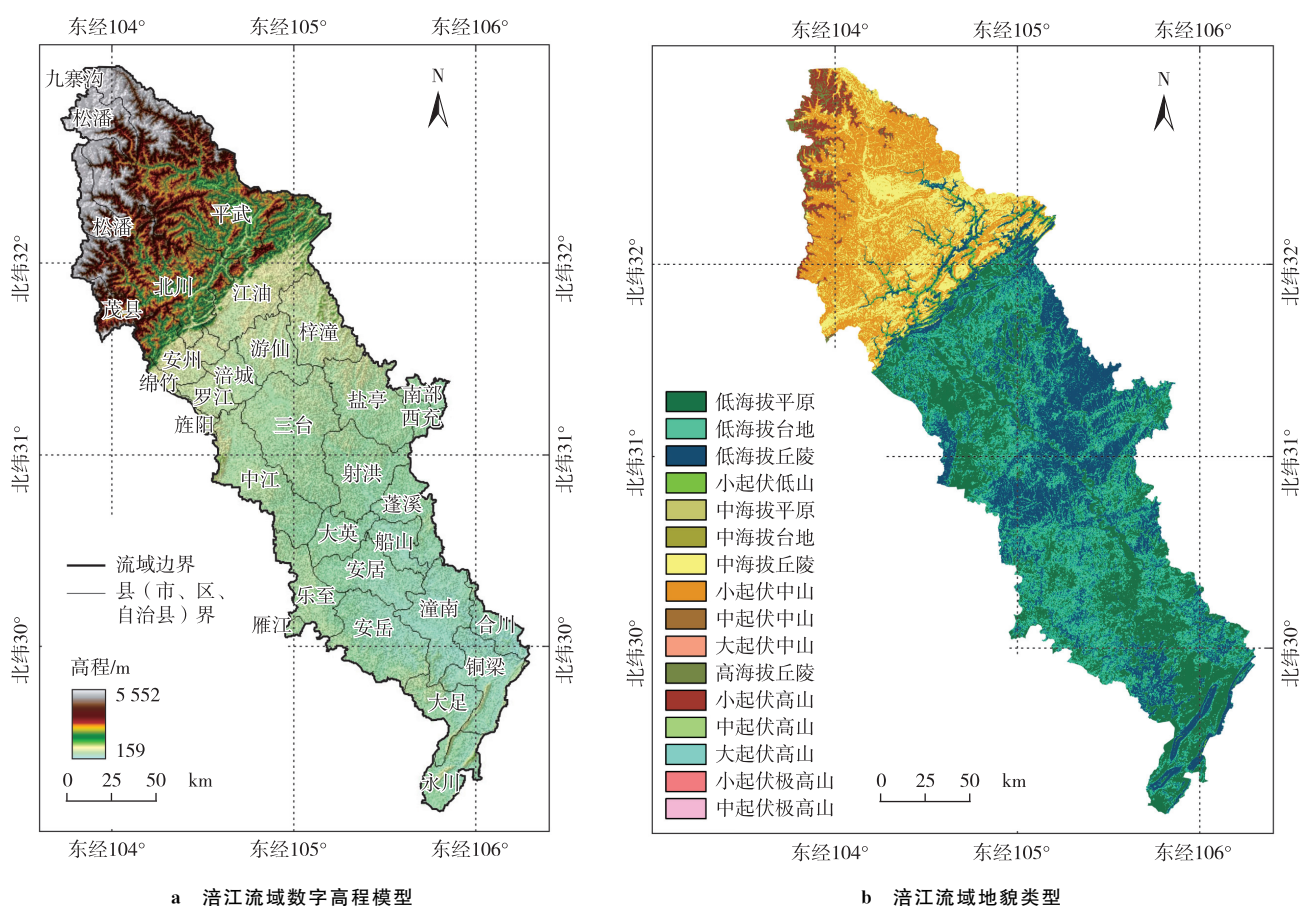
第一作者简介:陈浩,男,教授,博士,研究方向为景观空间格局与第四纪环境,E-mail:chenhao11611@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260108.1352.008

的潜在趋势,该模型因充分考虑到地理因素和生物行为而被认为是最接近自然特性的生态网络构建方式。涪江流域作为长江上游重要生态屏障和水源涵养地,对调节区域水循环、维持生物多样性具有重要作用,但随着人类活动范围不断扩大,流域地表覆被、水文环境等要素发生了明显变化,水土流失、水环境污染、植被退化等一系列生态安全问题也随之而来。为筑牢涪江流域生态安全屏障、保障流域生态系统服务功能的正常发挥提供科学参考,同时也为其他区域构建生态安全网络、识别生态修复关键区提供借鉴依据,本研究以涪江流域作为研究区,基于 MSPA 识别核心斑块,计算斑块的连通性指数,将具有良好连通性的生态用地作为“源”;同时运用 MCR 分析累积阻力表面中阻力最小、成本距离最短的“通道”,模拟生态廊道和提取生态节点,从“点-线-面”角度构建了基于“源地-廊道-节点”的涪江流域生态安全格局范式。

1 研究区概况

发源于岷山主峰雪宝顶的涪江是嘉陵江右岸最大支流,干流全长 668 km,流域面积为 $3.95 \times 10^4 \text{ km}^2$,流域范围位于青藏高原东缘与四川盆地的过渡地带,地势自西北向东南倾斜,上游区域以中、小起伏中山地貌为主,中、下游区域以低海拔平原、丘陵地貌为主(图 1)。从景观格局空间分异角度看,研究区地处高原/平原生态交错带,流域上游林草覆盖率较高;耕地、建设用地等受人工改造程度较强的土地利用类型主要集中于中、下游地区。由于近些年来崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害及人类活动干扰的影响,导致涪江流域某些关键生态区域单一、均质的景观斑块变得破碎化,加上生态交错带内生态系统对环境波动的响应比相邻区域更为敏感,因而整个流域的生态风险日益增加。涪江流域生态环境状况受到多源因素影响,而构建该区域生态安全格局是应对生态风险的有效手段。



注:图中数字高程模型数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)2022年30m分辨率数字高程数据,行政区划区界、流域边界等矢量数据分别来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>)2022年中国区县行政区划边界数据、中国三级流域空间分布数据,下同。

图1 涪江流域数字高程与地貌类型示意图

Fig. 1 The sketch map of digital elevation and geomorphic types in Fujiang River Basin

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究使用的基础数据包括地表覆被数据、归一化植被指数、数字高程模型、城乡居民点、工矿用地、水域分布、道路矢量数据等,其中:地表覆被数据和归一化植被指数来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率 30 m,在数据分析时将地表覆被数据按照一级地类进行重分类;数字高程模型来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率 30 m,坡度数据从数字高程模型中提取;城乡居民点、工矿用地、水域分布数据从地表覆被数据的二级地类中提取;道路矢量数据来源于 Open Street Map 平台(<https://download.geofabrik.de/asia.html>)。

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地识别

生态源地是对它所在区域的水源涵养、生物多样性保护和生态系统稳定性维持具有重要价值的生境斑块,并对周边区域具有明显的生态辐射效应。本研究将林地、草地、水域、湿地等地类设置为前景地类,将其余地类如不透水面、裸地、冰雪、农田等设置为背景地类,利用 MSPA 在核心、边缘、孤岛、环线、支线、桥接和孔隙共 7 种要素类型中识别出核心斑块,并将之作为备选源地。由于面积较小且破碎的斑块无法承担较高的生态功能,通过 Conefor 工具对备选源地面积大小排名前 30 位的斑块进行景观连通性分析,设置连通概率为 0.5,计算备选源地斑块的可能连通性指数(C_p)和整体连通性指数(C_1)。综合考虑上述 2 种指数运算所得备选源地重要性值(P_1),参考前人研究成果^[15,25,34]和涪江流域地表覆被类型及景观特征,将 P_1 值大于 0.1 且具有良好连通性的斑块确定为生态源地斑块。

景观连通性各指标计算公式如下^[15]:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}}{A_L^2}, C_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_i a_j}{1 + n l_{ij}} \right)}{A_L^2}, P_1 = \frac{d_{C_p} + d_{C_1}}{2},$$

其中: n 为斑块总个数; a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和斑块 j 的面积; p_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 之间扩散的最大可能性,它的值主要运用 Conefor 工具来计算; l_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 的拓扑距离; A_L 为斑块总面积; d_{C_p} 和 d_{C_1} 为去除单个斑块后组成景观斑块的 C_p 与 C_1 修正值。 C_p 值越大表示源地斑块的连通潜力越大, C_1 值越大表示源地斑块的连接程度越高,而 P_1 值越大表示斑块在景观连通性中的重要性越强。

2.2.2 生态风险评价

根据涪江流域生态现状,从自然要素和人文社会要素这 2 个层面选取生态风险评价因子对流域的生态风险状况进行评价。在所选取的自然要素中,地表覆被类型反映了地球表层自然营造物和人工建筑物的综合分布状况,相对于不透水面(人类作用于自然地表形成的建筑物、道路等硬质表面)、裸地等地类,林地、湿地、水域等地类具有较低的景观生态风险;归一化植被指数是通过遥感影像获取的植被生长状况数据和植被覆盖程度参数,它的数值越高则生态风险越低;坡度、高程反映了地形因素对水土流失、地质灾害的潜在影响,两者的数值越高,生态风险越大;水体具有物质输移、气候调节、维护生物多样性等生态服务功能,因而距离水域越近的区域,生态风险相对越小。在人文社会要素中,工矿建设、居民点建设和道路建设改变了自然形态的景观格局和地表覆被状况,因此距离城乡居民点、工矿用地和道路较近地域的生态系统所受干扰程度较大,生态风险较高。

选取地表覆被类型、归一化植被指数、高程、坡度、距水域距离、距工矿用地距离、距城乡居民点距离、距道路距离等 8 个评价因子,将它们均重分类为 5 个等级。利用 ArcGIS 空间分析工具中的“空间主成分分析”对已重分类的自然因素和人文社会要素栅格数据进行主成分分析。根据累计贡献率 95% 确定 6 个主成分,计算每个主成分特征值占比和各评价因子在它们主成分中的特征向量,并对这 2 个指标进行累计,再除以累计贡献率,从而获得各评价因子综合得分系数。各评价因子综合得分系数在所有评价因子中的占比即为评价因子权重。将各个评价因子进行加权求和,得到研究区生态风险综合评价结果,具体公式如下^[35]:

$$E = \sum_{k=1}^K A_k X_k,$$

其中: E 为生态风险综合评价结果, K 为评价因子总个数, A_k 和 X_k 分别为第 k 个评价因子权重和对应的生态风险等级值。

2.2.3 阻力面构建

生态系统中物种迁移、能量流动与信息传递均需克服生态障碍导致的阻力,而MCR在考虑生态源地、距离、景观界面特征的基础上能较好模拟景观要素对物质流、生态流的阻碍作用。运用MCR构建涪江流域累积阻力表面,具体计算方法如下^[18]:

$$V_{\text{MCR}} = f_{\min} \sum_{n=N}^{m=M} D_{ij} R_i,$$

其中: V_{MCR} 为最小累积阻力值, $f_{\min}$ 为最小累积阻力与生态过程的正相关函数, D_{mn} 为生态源地 n 到栅格 m 的空间距离, R_i 为栅格 i 对生态流动的阻力值。 $n=N$ 和 $m=M$ 分别代表物种在源地间迁移经过的栅格单元距离之和与累积阻力总量。

2.2.4 生态廊道模拟

生态廊道是生态要素如物种、能量、信息等生态源地之间传递和流动的线性通道^[22-23]。基于生态源地和累积阻力表面数值,运用成本路径工具,以“生态阻力面”为成本,依次模拟每个生态源地到其他生态源地的最小成本路径,构建两两之间的潜在廊道,并进行合并、去冗处理,最终得到研究区内完整的生态廊道。

2.2.5 生态节点提取

利用ArcGIS“河网分级”插件提取涪江流域累积阻力表面的“山谷线”,并将它与生态廊道的交汇点定义为生态节点,作为能量流动、信息传递和物种迁徙沿线的生态阻力低值区域。生态节点被视为廊道中的“踏脚石”和“暂歇点”,为生态要素在源地之间迁移和流动提供临时栖息地,并促进生态要素在更广阔的地理空间中扩散。

3 结果与分析

3.1 生态源地空间分布

基于MSPA和景观连通性计算结果,在涪江流域识别出的生态源地面积为11 834.31 km²,占流域总面积的29.96%;生态源地在流域上游区域聚集成片、整体性好,但在流域中、下游区域呈零散、破碎化分布(图2)。进一步分析可知:生态源地与涪江流域重要林地资源存在较大重叠,流域北部的生态源地面积高达11 614.78 km²,主要位于岷江断裂和虎牙断裂所夹持的岷山隆起区、龙门山断裂带逆冲及右旋走滑作用控制地带;区域内森林覆盖度高,为生物提供了稳定且空间连续性强的栖息环境。地处四川省梓潼县七曲山国家森林公园内的古柏植被资源为中国最大的纯古柏林,被誉为“金牛蜀道的巨大肺叶”,可作为物种扩散、生态功能流动与传递的源点,此处生态源地面积为74.82 km²。流域南端生态源地面积为144.71 km²,主要位于重庆市铜梁区、大足区、永川区等区域内华蓥山南延的云雾山、巴岳山、箕山、英山等支脉,是区域内调节水循环、维持生态系统完整性和提供生物栖息地的关键生态斑块。

3.2 生态风险等级

生态风险是自然要素和人文社会要素交互作用对生态格局产生的不利影响。本研究选取地表覆被类型、归一化植被指数、坡度、高程、距水域距离等自然要素评价因子和距城乡居民点、工矿用地及道路的距离等人文社会要素评价因子对涪江流域生态风险进行评估,每个评价因子的风险级别越高(从1级到5级依次升高),对应的风险越大。在此基础上利用空间主成分分析计算每个评价因子的权重,结果如表1所示。在自然要素评价因子中,地表覆被类型和归一化植被指数的风险空间分布状况较为相似,均表现为流域上游区域主要为风险低值区,流域中、下游区域风险相对较高(图3a、b);高程和坡度的风险空间分布状况与前两者的情况相反,位于高山峡谷区域的流域上游存在发生崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的潜在风险,因而风险等级较高(图3c、d);水域可为生物繁衍生息提供稳定水分来源和优良生存空间,距离水域较近的区域生态风险相对较低(图3e)。就人文社会要素评价因子的风险空间分布状况来看,由于居民点、工矿建设用地、道路等人类活动场所主要集中于流域中、下游的平坝和丘陵地区,因此区域内人类活动带来的生态风险明显高于上游区域(图3f、g、h)。

运用空间主成分分析计算每个生态风险评价因子的权重值,对所有风险评价因子进行加权求和,得到研究区每个栅格的生态风险指数,利用重分类工具(自然间断点分级)将涪江流域生态风险程度划分为低、较低、中

等、较高、高共 5 个等级。由图 4 可知:1) 低风险区和较低风险区的面积较小,分别为 2 792.45、5 601.17 km²,且分别占流域总面积的 7.06%、14.16%。这 2 类区域主要分布于流域上游的九寨沟县、松潘县、平武县和北川羌族自治县境内,区域内人类活动强度相对较小,地表覆被类型主要为林地、草地,植被覆盖度高,物种栖息环境良好。另外,在流域中、下游的丘陵低山地带也有这 2 类区域零星分布。2) 中等风险区面积达 9 406.40 km²,占流域总面积的 23.79%。该类区域主要集中分布于流域上游区域,在中、下游区域也有零散分布。区域内植被覆盖度较高,但受到一定程度人类活动(如城乡居民点、工矿用地、道路等建设)干扰,或者区域内海拔、坡度值较高而存在次生地质灾害风险。3) 较高风险区和高风险区的面积分别为 14 447.82、7 301.87 km²,且分别占流域总面积的 36.53%和 18.46%。这 2 类区域主要分布于流域中、下游地区,区域内人口聚集,农田、不透水面等地类广泛分布,城镇建设用地扩张等人类活动过程成为影响区域内景观生态的重要因素。

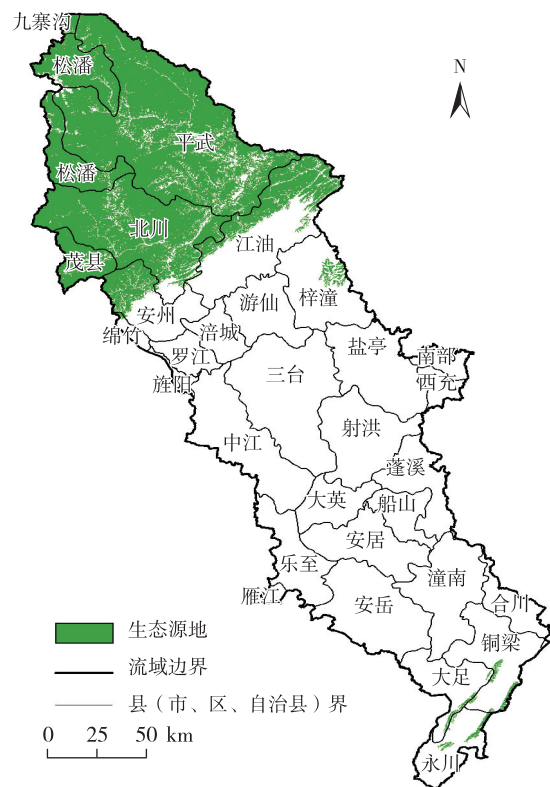


图 2 涪江流域生态源地的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of ecological source in the Fujiang River Basin

表 1 生态风险评价因子分级标准

Tab. 1 The grading standard of ecological risk assessment factors

要素类型	评价因子	分级标准					权重
		1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	
自然要素	地表覆被类型	林地、水域、湿地	草地、灌木	农田	冰雪、裸地	不透水面	0.082 0
	归一化植被指数	>0.8	>0.6~0.8	>0.4~0.6	>0.2~0.4	0~0.2	0.083 1
	高程/m	159~1 000	>1 000~2 000	>2 000~3 000	>3 000~4 000	>4 000	0.039 7
	坡度/(°)	0~10	>10~20	>20~30	>30~40	>40	0.207 3
	距水域距离/km	0~1	>1~2	>2~3	>3~4	>4	0.088 8
人文社会要素	距工矿用地距离/km	>20	>15~20	>10~15	>5~10	0~5	0.175 4
	距城乡居民点距离/km	>20	>15~20	>10~15	>5~10	0~5	0.191 9
	距道路距离/km	>4	>3~4	>2~3	>1~2	0~1	0.131 8

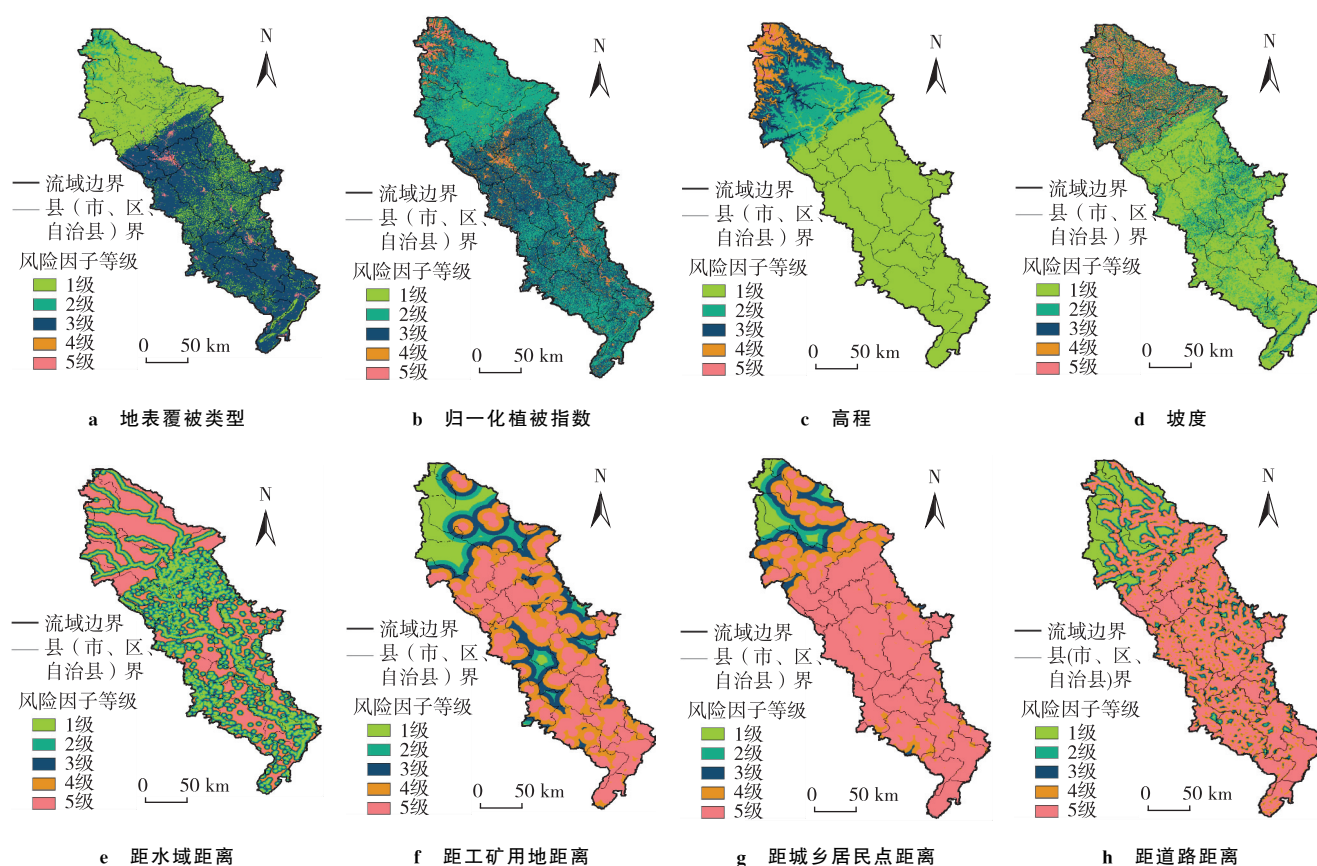


图3 涪江流域生态风险评价因子等级

Fig. 3 Ecological risk assessment factor grade of Fujiang River Basin

3.3 生态安全格局构建

3.3.1 累积阻力表面特征

在涪江流域生态风险等级确定的基础上,利用 MCR 构建流域累积阻力表面,将阻力值按自然间断点分级法分为低、较低、中等、较高和高共 5 个等级。图 5 显示:1) 低阻力区和较低阻力区主要分布于流域生态源地及外缘区域、植被覆盖度较高的中游低山丘陵地带和干流河道流经区域,其中位于生态源地外缘的低阻力区是较易被物种利用的景观空间,对保护生态源地具有屏障作用。2) 高阻力区和较高阻力区主要位于人类活动干扰较大的城镇建设用、工矿用地密集区域,在涪城区、游仙区、安州区南部、旌阳区、罗江区、绵竹市、安岳县、潼南区、铜梁区等地呈现大范围面状集中分布。比较图 4 和图 5 可以发现,涪江流域内不同等级的累积阻力表面区域与生态风险区域的空间分布状况并不完全一致。其中原因主要在于生态源地作为承担重要辐射功能的生境斑块,在运用 MCR 构建累积阻力表面时既考虑了流域生态风险评价结果,又考虑了生态源地到各个栅格的空间距离,因此距生态源地较近的区域累积阻力值也相对较低。

3.3.2 生态廊道模拟和生态节点提取

生态廊道是生态源地两两相连的最小累计阻力谷线。基于涪江流域生态源地和累积阻力表面,计算每个生态源地到其他生态源地的最小累积耗费路径,共识别出生态廊道 22 条,总长度达 2 249.32 km(图 6)。涪江流域内的生态廊道基本贯穿全域,分布受生态源地空间位置、土地覆被类型等因素影响,整体呈“北部密集、中南部稀疏”的蛛网状分布。涪江流域生态源地主要集中于流域南、北两端,连通南、北生态源地的生态廊道共有 3 条,其中沿涪江干流河道分布的生态廊道延伸距离最长,达 434.32 km(其余 2 条生态廊道的长度分别为 310.63、345.16 km);在进行生态廊道模拟时,发现该廊道位置重叠率高,表明它是流域南、北两端不同生态源地之间生物迁徙、能量和信息流动的主要线路。由图 5 亦可看出,涪江干流河道对物种迁徙的阻力相对较小,沿河道分布的林地、灌木、湿地、高覆盖度草地等地类为物种迁移提供了暂栖地。如前所述,生态节点是生态廊道中的“踏脚石”,是生态要素在源地之间迁徙和流动的“暂歇点”,而结合图 5 和图 6 可知:通过累积阻力面“山谷线”与生态

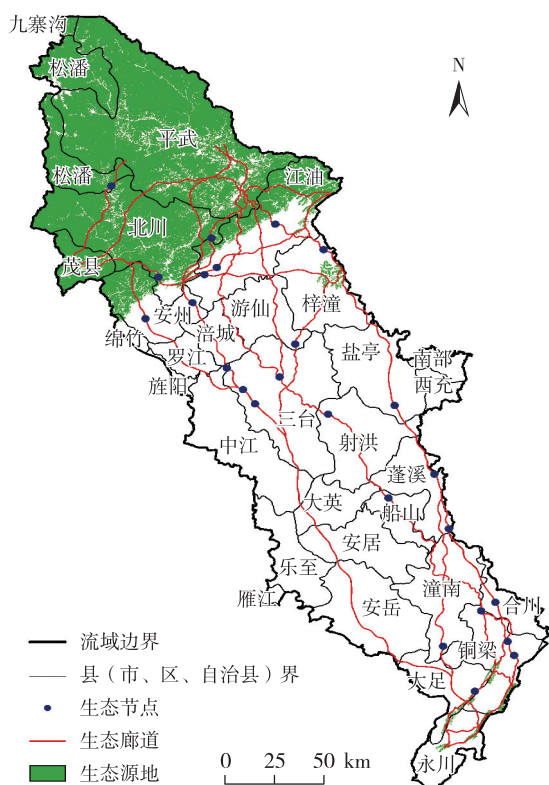


图 6 涪江流域生态廊道和生态节点

Fig. 6 Ecological corridors and ecological nodes in the Fujiang River Basin

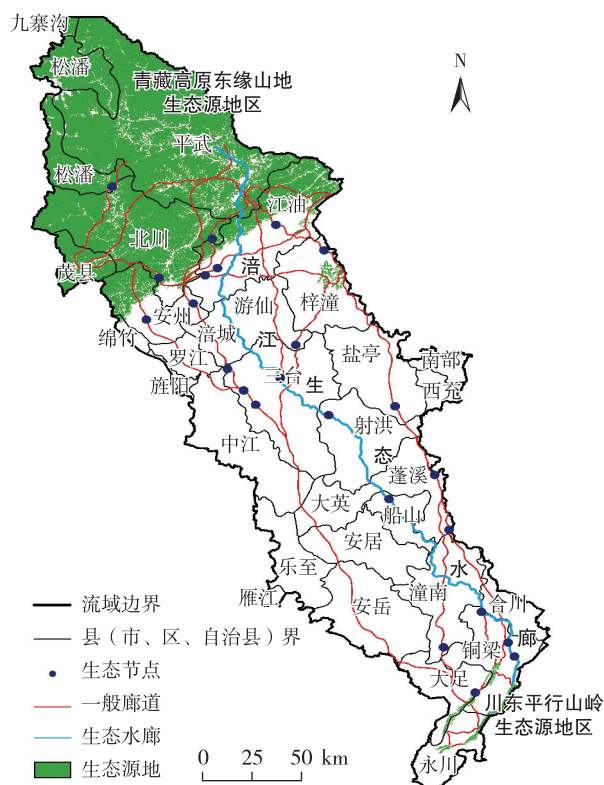


图 7 涪江流域“一廊两区”生态网络

Fig. 7 “One corridor and two districts” ecological network in the Fujiang River Basin

4 讨论

在生态源地的选取上,前人通常将生态系统服务高值区域^[20,27,36-38]或集中连片的大面积林地、水域^[14,29,39-40]和自然保护区^[41-42]作为生态源地。本研究在综合分析形态学空间格局和景观连通性的基础上使用 MSPA 识别生态源地,全面考虑了景观结构的完整性和连接性,避免了直接选取单一地表覆被类型作为生态源地的不足,基于上述方式识别的生态源地基本位于景观生态风险评价所得出的低风险区域和较低风险区域。这表明运用 MSPA 识别研究区生态源地的方法科学合理,符合生态学一般规律。在生态风险评价方面,传统研究多关注土壤侵蚀、水质污染、不透水面增加等单一风险源,或对水土流失、土地荒漠化等单项风险因子进行评估^[43-46],亦或将不同地类的生态服务价值当量作为生态风险及景观格局阻力大小的评价要素^[47],缺少多源指标下流域景观生态风险的综合考量。流域生态系统作为特殊的“自然-社会”景观综合体,受到自然因素和人文社会因素强烈影响,本研究根据涪江流域生态现状,将地表覆被类型、归一化植被指数、坡度、高程、距水域距离、距城乡居民点距离、距工矿用地距离、距道路距离等多源风险因子空间数据纳入生态风险评价体系,使研究区生态风险状况评价结果更具综合性。本研究结果表明,城镇建设用地、农业用地扩张等人类活动过程对涪江流域景观格局产生了重要影响,低植被覆盖且生态阻力较大的建设用地和耕地分布区域生态风险相对较高,该区域内生态源地和生态廊道分布稀疏,这与前人研究结果^[2-3,48-50]基本一致。

如前所述,相较于选取自然保护区、大面积林地和水体等特定区域作为生态源地的直接识别方式,本研究中采用 MSPA 识别生态源地提升了生态源地识别的科学性和可靠性。在准确识别生态源地的基础上,利用 MCR 构建生态阻力面,进而模拟生态廊道,相较于利用重力模型^[20,26,50-51]和电路理论^[24,31-33]模拟生态廊道的方法更为实用和易操作,能较好地表达不同景观要素对生态过程的阻碍作用。需要指出的是,不同物种在迁徙过程中对生态廊道宽度的需求存在差异,而本研究未对生态廊道的宽度及景观异质性进行深入探究。因此,设置研究区最优廊道宽度并使之发挥最大生态效益将是下一步的研究重点。

相较于过去多数学者集中于对涪江上游流域生态功能保护区的探讨,本研究从全流域视角切入,对该流域

整体生态安全格局即基于“源地-廊道-节点”所构建生态安全网络进行了分析,所识别生态源地分属不同行政区域。而以分水岭所夹持的涪江流域为研究单元,避免了基于行政区划构建生态空间格局而产生的生态源地被人为割裂的弊端,且在相对稳定的流域空间中模拟的生态廊道和提取的生态节点更接近物种迁移、能量流动的真实路径和真实“歇脚点”。

目前对生态安全格局构建的方式仍处于探索阶段,不同学者在多重视域下构建的生态网络各有优劣。本研究除生态廊道宽度有待深入探究外,还存在以下需进一步改进之处:1) 本研究主要运用 2023 年相关数据识别生态源地、模拟生态廊道和提取生态节点,构建了涪江流域生态安全格局,但缺乏历史时间尺度上的生态安全格局动态演变分析,在下一步的研究中拟构建多时间尺度生态安全网络,并探讨它的时空演化特征。2) 本研究所得结果主要基于对 MSPA、MCR 等模型的运用,缺少对计算结果的实地验证,今后的研究中将结合实地考察数据与模型数据,这将更有利于准确辨识各生态格局要素的服务功能。3) 本研究未尝试运用多种方式识别生态源地斑块并作方法对比,今后拟将生态重要性、生态敏感性、生态系统服务价值等指标作为生态源地的识别依据,并将通过它们与 MSPA 所识别的生态源地位置进行对比分析。4) 由于数据的可获取性和研究方法所限,本研究主要选取地表覆被类型、归一化植被指数、坡度、高程、距水系距离、距城乡居民点距离、距工矿用地距离、距道路距离等因子对涪江流域生态状况进行评估,在未来的工作中将更为全面地选取评价指标如香农均匀度指数、蔓延度指数、景观分离度指数、景观丰度等,从而进一步增强累积阻力表面赋值的准确性。

5 结束语

生态安全格局理论认为景观中存在某些关键因素构成的潜在空间格局,关键因素所处位置及它们之间的联系对维护和控制特定地段生态过程起着重要作用,生态源地、生态廊道和生态节点是潜在空间格局中的关键局部。基于“源地-廊道-节点”的生态安全格局构建是划定生态用地、落实生态功能区划等区域调控政策的有效工具,是实现区域可持续发展的重要途径。综合涪江流域自然资源条件和社会发展实际,探讨在流域空间内构建生态安全格局的技术方法具有现实意义。本研究的主要结果如下:

1) 涪江流域生态源地集聚成片分布于流域北端青藏高原东缘山地,零散展布于流域南端川东平行山岭地带。生态源地中面积最大的地表覆被类型为林地和草地,它们为流域提供水源涵养、水土保持、生物多样性维持等方面的生态供给服务,确保生态系统结构的稳定性和完整性。

2) 基于涪江流域生态风险等级,运用成本路径工具识别出生态廊道 22 条,整体呈“北部密集、中南部稀疏”的蛛网状分布格局。所识别生态廊道将相距较远的南、北两片生态源地连为一个整体,其中沿涪江干流河道分布的生态廊道是流域南、北两端不同生态源地之间生物迁徙、能量和信息流动的主要线路。

3) 分布于生态廊道之上的 25 个生态节点均位于廊道沿线的生态阻力低值区域,成为生态要素在源地之间迁徙和流动的“暂歇点”。对生态节点的明确识别和保护,能降低生态廊道被阻断的风险,对廊道功能的维系具有积极意义。

4) 基于“源廊成网、生境连通”的生态网络,提出“一廊两区”生态建设思路,即:建设干流防护林使之成为涪江水廊生态屏障,加强流域南、北两端生态源地分布区自然生态系统保护。针对涪江流域中部受人类活动干扰较为明显的问题,提出严格控制建设用地扩张、通过植树造林提高节点生态水平的建议。

参考文献:

- [1] 刘世梁,王清波,缪驰远,等. 基于生态网络的黄河上游(四川段)水源涵养生态安全格局构建[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(3): 418-426.
LIU S L, WANG Q B, MIAO C Y, et al. Ecological security patterns of water conservation in the upper reaches of the Yellow River Basin (Sichuan section) with ecological network approach[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(3): 418-426.
- [2] 丁金华,汪大庆,钱晶. 城市扩张情景下苏南水网景观生态风险评价与生态安全格局构建:以苏州白蚬湖片区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(9): 2059-2070.
DING J H, WANG D Q, QIAN J. Landscape ecological risk assessment and ecological security pattern construction in the southern Jiangsu water network area under the urban expansion scenario simulation: a case study of the Baixian Lake area in Suzhou[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(9): 2059-2070.

- [3] 邓楚雄,龚雅菁,张光杰,等. 基于景观生态风险评价的湘江流域生态安全格局构建[J]. 水土保持通报,2024,44(3):145-158.
DENG C X,GONG Y J,ZHANG G J,et al. Construction of an ecological security pattern in Xiangjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2024,44(3):145-158.
- [4] SYLVAIN Z A,BRANSON D H,RAND T A,et al. Decoupled recovery of ecological communities after reclamation[J]. PeerJ,2019,7:e7038.
- [5] CIMATTI M,CHAPLIN-KRAMER R,DI MARCO M. The role of high-biodiversity regions in preserving Nature's Contributions to People[J]. Nature Sustainability,2023,6(11):1385-1393.
- [6] PICCINI I,DEPETRIS M,PARADISO F,et al. Macro-moth (Lepidoptera) diversity of a newly shaped ecological corridor and the surrounding forest area in the western Italian Alps[J]. Diversity,2023,15(1):95.
- [7] RINCÓN V,VELÁZQUEZ J,GUTIÉRREZ J,et al. Proposal of new Natura 2000 network boundaries in Spain based on the value of importance for biodiversity and connectivity analysis for its improvement[J]. Ecological Indicators,2021,129:108024.
- [8] CLOSSET-KOPP D,WASOF S,DECOCQ G. Using process-based indicator species to evaluate ecological corridors in fragmented landscapes[J]. Biological Conservation,2016,201:152-159.
- [9] 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.
- [10] 俞孔坚,李海龙,李迪华,等. 国土尺度生态安全格局[J]. 生态学报,2009,29(10):5163-5175.
YU K J,LI H L,LI D H,et al. National scale ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(10):5163-5175.
- [11] 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.
- [12] 付凤杰,刘珍环,刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以贺州市为例[J]. 生态学报,2021,41(9):3406-3414.
FU F J,LIU Z H,LIU H. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern:a case study in Hezhou City[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(9):3406-3414.
- [13] 于成龙,刘丹,冯锐,等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J]. 生态学报,2021,41(1):290-301.
YU C L,LIU D,FENG R,et al. Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(1):290-301.
- [14] 吴金华,刘思雨,白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. 干旱区研究,2021,38(4):1120-1127.
WU J H,LIU S Y,BAI S. Identification and optimization of ecological corridors in Shenmu City based on landscape ecological security[J]. Arid Zone Research,2021,38(4):1120-1127.
- [15] 王晓峰,朱梦娜,张欣蓉,等. 基于“源地-阻力-廊道”的三江源区生态安全格局构建[J]. 生态学报,2024,44(11):4609-4623.
WANG X F,ZHU M N,ZHANG X R,et al. Ecological security pattern construction of the Three-river Source Region based on source-resistance-corridor[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(11):4609-4623.
- [16] ZHANG Y L,ZHAO Z Y,FU B J,et al. Identifying ecological security patterns based on the supply,demand and sensitivity of ecosystem service:a case study in the Yellow River Basin,China[J]. Journal of Environmental Management,2022,315:115158.
- [17] KANG J M,ZHANG X,ZHU X W,et al. Ecological security pattern:a new idea for balancing regional development and ecological protection. A case study of the Jiaodong Peninsula,China[J]. Global Ecology and Conservation,2021,26:e01472.
- [18] 屠越,刘敏,高婵婵,等. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断[J]. 生态学报,2022,42(17):7056-7067.
TU Y,LIU M,GAO C C,et al. Construction of ecological sources identification system for metropolitan areas and diagnosis of key areas for ecological restoration in nationally spatial areas[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(17):7056-7067.
- [19] 向爱盟,赵筱青,黄佩,等. 高原湖泊流域国土空间生态修复优先区诊断及修复研究[J]. 生态学报,2023,43(15):6143-6153.
XIANG A M,ZHAO X Q,HUANG P,et al. Diagnosis and restoration of priority area of territorial ecological restoration in plateau lake watershed[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(15):6143-6153.
- [20] 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.
- [21] 王玉莹,金晓斌,沈春竹,等. 东部发达区生态安全格局构建:以苏南地区为例[J]. 生态学报,2019,39(7):2298-2310.

- WANG Y Y, JIN X B, SHEN C Z, et al. Establishment of an ecological security pattern in the eastern developed regions; a case study of the Sunan District[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2298-2310.
- [22] 许忠洋, 王琤, 顾彤, 等. 基于生态网络的生态修复关键区识别: 以延安市为例[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(6): 1073-1083.
- XU Z Y, WANG C, GU T, et al. Identification of the key areas of ecological restoration based on the ecological network; a case study of Yan'an City[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(6): 1073-1083.
- [23] 李倩瑜, 唐立娜, 邱全毅, 等. 基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建: 以厦门市为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(6): 2284-2294.
- LI Q Y, TANG L N, QIU Q Y, et al. Construction of urban ecological security pattern based on MSPA and MCR Model; a case study of Xiamen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6): 2284-2294.
- [24] 李可璇, 张蕾, 李豪, 等. 基于 MSPA 模型和电路理论的晋西北国土空间生态修复关键区域识别[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(9): 1593-1604.
- LI K X, ZHANG L, LI H, et al. Identification of the key regions of spatial ecological restoration in the Northwest Shanxi based on the MSPA model and circuit theory[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(9): 1593-1604.
- [25] 许涛, 樊鹤翔, 周可钦, 等. 基于 MSPA-MCR-CIRCUIT 的山西省运城市景观生态网络构建[J]. *中国园林*, 2024, 40(3): 114-118.
- XU T, FAN H X, ZHOU K Q, et al. Construction of landscape ecological network in Yuncheng City of Shanxi Province based on MSPA-MCR-CIRCUIT[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2024, 40(3): 114-118.
- [26] 柳建玲, 李胜鹏, 范胜龙, 等. 基于生态安全格局的厦漳泉地区国土空间生态保护修复区与预警点识别[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8124-8134.
- LIU J L, LI S P, FAN S L, et al. Identification of territorial ecological protection and restoration areas and early warning places based on ecological security pattern; a case study in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8124-8134.
- [27] 李明慧, 周启刚, 孟浩斌, 等. 基于最小累积阻力模型的三峡库区重庆段生态安全格局构建[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(8): 1916-1926.
- LI M H, ZHOU Q G, MENG H B, et al. Ecological security layout planning of Chongqing section in the Three Gorges Reservoir Area based on the model of minimum cumulative coefficient[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8): 1916-1926.
- [28] 张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 等. 基于景观生态风险评价的涪江流域景观格局优化[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 3940-3951.
- ZHANG X M, DONG T X, DU H M, et al. Optimization of landscape pattern in Fujiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 3940-3951.
- [29] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 等. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1036-1045.
- LI H H, MA T H, WANG K, et al. Construction of ecological security pattern in northern Peixian based on MCR and SPCA[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [30] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 等. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 555-565.
- YANG K, CAO Y G, FENG Z, et al. Research progress of ecological security pattern construction based on minimum cumulative resistance model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 555-565.
- [31] 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 Y P, GAN X Y, WU X. 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.
- [32] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 等. 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 T, GONG Y B, GE J Z, et al. 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.
- [33] 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.
- [34] 勾容, 苏维词, 黄贤凤. 基于景观生态安全评价的贵州省生态安全网络构建及多情景模拟[J]. *环境科学*, 2025, 46(7): 4580-4591.

- GOU R, SU W C, HUANG X F. Construction of ecological security network and multi-scenario simulation in Guizhou Province based on landscape ecological security assessment[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4580-4591.
- [35] 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 C M, WANG Z T, TANG N, 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.
- [36] 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.
- [37] 李久林, 徐建刚, 储金龙. 基于 Circuit 理论的城市生态安全格局研究: 以安庆市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(8): 1812-1824.
- LI J L, XU J G, CHU J L. Constructing the urban ecological security pattern of Anqing City by circuit theory[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(8): 1812-1824.
- [38] 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.
- [39] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1420-1437.
- LI Q P, ZHANG Z D, WAN L W, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [40] 高星, 宋昭颖, 李晨曦, 等. 基于景观生态风险评价的白洋淀流域景观格局优化研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(2): 174-183.
- GAO X, SONG Z Y, LI C X, et al. Landscape pattern optimization in Baiyangdian Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(2): 174-183.
- [41] YAN J X, LI J, YAO X D, et al. Ecological security pattern construction based on landscape ecological risk assessment in the Yellow River Basin[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 13: 1514599.
- [42] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 5928-5936.
- LI H, YI N, YAO W J, et al. Shangri-La County ecological land use planning based on landscape security pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [43] LI K, WANG J Y, ZHANG Y W. Heavy metal pollution risk of cultivated land from industrial production in China: spatial pattern and its enlightenment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 828: 154382.
- [44] 徐新良, 陈建洪, 张雄一. 我国农田面源污染时空演变特征分析[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(12): 157-165.
- XU X L, CHEN J H, ZHANG X Y. Analysis on the spatiotemporal evolution characteristics of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(12): 157-165.
- [45] ZHANG J L, SHI D M, JIN H F, et al. Characteristics of cultivated layer soil shear strength for sloping farmland in response to soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Catena*, 2022, 215: 106304.
- [46] 肖巍. 科尔沁沙地南缘退化耕地风沙危害状况[J]. *江西农业*, 2019(12): 84.
- XIAO W. Wind-sand hazards on degraded farmland at the southern margin of the Horqin Sandy Land[J]. *Jiangxi Agriculture*, 2019(12): 84.
- [47] 余宇晨, 陈彩虹, 贺丹, 等. 基于 MCR 模型和 Kriging 的海口市景观格局优化分析[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(3): 233-238.
- SHE Y C, CHEN C H, HE D, et al. Landscape pattern optimization analysis based on MCR model and Kriging in Haikou[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(3): 233-238.
- [48] 陈心怡, 谢跟踪, 张金萍. 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 975-986.
- CHEN X Y, XIE G Z, ZHANG J P. Landscape ecological risk assessment of land use changes in the coastal area of Haikou City in the past 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 975-986.
- [49] 李月, 刘静兰, 李静静, 等. 基于生态廊道识别的喀斯特流域生态安全格局构建: 以贵州南明河流域为例[J]. *环境科学*, 2025, 46(5): 3098-3113.
- LI Y, LIU J L, LI J J, et al. Construction of an ecological security pattern in karst watersheds based on ecological corridor identification: a case study of the Nanming River Basin in Guizhou[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(5): 3098-3113.
- [50] 富丽, 彭双云, 龚陆平, 等. 喀斯特地区生态安全格局构建与演变分析[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 218-229.

- FU L, PENG S Y, GONG L P, et al. Analysis of the construction and evolution of ecological security patterns in karst areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 218-229.
- [51] 蒋榕, 张鑫, 李冠衡, 等. 西双版纳州生态廊道构建[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(11): 113-123.
- JIANG R, ZHANG X, LI G H, et al. Construction of ecological corridor in Xishuangbanna Prefecture, Yunnan Province of southwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(11): 113-123.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Ecological Security Pattern Construction of the Fujiang River Basin Based on “Source-Corridor-Node”

CHEN Hao, WANG Yingwei, CHENG Zhongqi, MA Li

(College of Geography and Environment, Mianyang Teachers' College, Mianyang Sichuan 621006, China)

Abstract: Constructing ecological security pattern by accurately extracting ecological space elements is an important way to maintain biodiversity and enhance ecosystem functions. Taking the Fujiang River Basin as the study area, the morphological spatial pattern analysis (MSPA) was used to identify the ecological source patches, and the landscape connectivity index was used to evaluate the importance of the patches. Based on the evaluation of ecological risk level, the cumulative resistance surface is established by using the minimum cumulative resistance model (MCR), so as to simulate the ecological corridor and extract the ecological nodes on the corridor, and construct the ecological security pattern of the Fujiang River Basin with the ecological source as the “key patch”, the ecological corridor as the “axis”, and the ecological node as the “hub”, and form an ecological security network of “source-corridor network and habitat connectivity”. The results show that: 1) The ecological source area of the Fujiang River Basin is 11 834.31 km², accounting for 29.96 % of the total area of the basin, which is mainly distributed in the upper reaches controlled by the Minshan fault block and the Longmenshan fault zone, and scatteredly distributed in the parallel mountains of eastern Sichuan. 2) The total length of the ecological corridor in the study area is 2 249.32 km, the corridor along the main stream of the Fujiang River is the longest, reaching 434.32 km. The corridor has high utilization rate in the process of biological migration, energy and information flow. 3) The 25 ecological nodes were located in the low value area of ecological resistance along the corridor, which became the “stepping stones” and “temporary resting points” on the way of species migration. 4) The ecological security network of Fujiang River Basin is constructed based on the “source-corridor-node”, and the idea of “one corridor and two areas” (the ecological water corridor of the Fujiang River, and the ecological source areas at both the northern and southern ends of the river basin) ecological construction is put forward to ensure the connectivity between ecological sources, the integrity and stability of ecological network. The above results can provide scientific support for identifying the key areas of ecological restoration and ensuring the normal play of ecosystem services in the Fujiang River Basin.

Keywords: ecological security pattern; ecological source; ecological corridor; ecological node; morphological spatial pattern analysis

(责任编辑 方 兴)