

引文格式: 董欣雨, 刘扬. 基于形态学空间格局分析与景观连通性的易门县生态网络构建与优化[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(5): 168–177. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202406034](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202406034)

基于形态学空间格局分析与景观连通性的 易门县生态网络构建与优化*

董欣雨, 刘扬**

(西南林业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650224)

摘要:【目的】构建与优化玉溪市易门县的生态网络, 为当地的生物多样性保护提供参考。【方法】利用形态学空间格局分析 (morphological spatial pattern analysis, MSPA) 方法识别生态源地, 并综合考虑人为与自然因素构建综合生态耗费面; 采用最小累计阻力 (minimum cumulative resistance, MCR) 模型及重力模型提取并筛选生态廊道, 构建易门县生态网络。【结果】(1) 生态源地主要分布在易门县东北部及中部的优良生境区域, 而在中东部和南部的分布则因人类活动较少; (2) 综合生态耗费面显示: 中东部与西部阻力较高, 而中南部及北部则较低。通过最小成本路径分析识别出 45 条潜在廊道, 通过重力模型提取出 15 条重要廊道, 且生态廊道的空间分布不均、长度较短。网络分析验证表明: 易门县生态网络的 α 、 β 和 γ 值分别为 0.40、1.50 和 0.63, 网络连通度低、南北部连接缺失, 可能影响物种的扩散。【结论】为优化易门县生态网络, 建议新增 8 个生态源地及 16 条规划廊道; 对 10 个重要生态节点和 23 个一般生态节点实行分级保护, 并识别修复 24 个生态断裂点。研究结果为城市生态网络的优化提供了科学依据。

关键词: 生态网络; 形态学空间格局分析 (MSPA); 最小累计阻力模型 (MCR); 景观连通性; 云南易门县
中图分类号: P901 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2024) 05-0168-10

Construction and Optimization of the Ecological Network in Yimen County Based on MSPA and Landscape Connectivity

DONG Xinyu, LIU Yang

(College of Landscape Architecture and Horticulture, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Purpose] To construct and optimize the ecological network in Yimen County, providing reference for local biodiversity conservation. [Methods] The morphological spatial pattern analysis (MSPA) method was used to identify ecological source areas, and an integrated ecological cost surface was constructed, considering both anthropogenic and natural factors. The minimum cumulative resistance (MCR) model and gravity model were used to extract and screen ecological corridors and to construct the ecological network in Yimen County. [Results] 1) The ecological source areas were mainly distributed in the high-quality habitat areas, which distributed in the northeast and central parts of Yimen County, while the distribution was less in the east-central and southern parts due to human activities. 2) The integrated ecological cost surface showed that: higher resistance in the east-

收稿日期: 2024-06-26

修回日期: 2024-09-10

网络首发日期: 2024-10-08

*基金项目: 国家自然科学基金 (51768064) 结余资金预研项目 (110824098)。

作者简介: 董欣雨 (1999—), 女, 云南昆明人, 在读硕士研究生, 主要从事工业遗产保护及生态网络构建研究。E-mail: 1053215791@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 刘扬 (1975—), 男, 内蒙古根河人, 博士, 教授, 主要从事风景园林规划设计、传统村落与乡土景观、文化景观与遗产园林保护等研究。E-mail: 934594085@qq.com
网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240930.1710.002>



central and western parts of the county, and lower resistance in the south-central and northern parts. A total of 45 potential corridors were identified through least-cost path analysis, and 15 important corridors were extracted by the gravity model, and the spatial distribution of ecological corridors was uneven and short in length. The grid analysis verified that: the value of α , β , and γ was 0.40, 1.50, and 0.63, respectively, indicating low network connectivity with missing connections in the north and south, which might affect species dispersal. [**Conclusion**] To optimize the ecological network in Yimen County, it is recommended to add eight new ecological sources and 16 planned corridors. It is also recommended to implement graded protection for ten important ecological nodes and 23 general ecological nodes, and to identify and restore 24 ecological breakpoints. The results provide a scientific basis for the optimization of urban ecological network.

Keywords: ecological network; morphological spatial pattern analysis (MSPA); minimum cumulative resistance (MCR) model; landscape connectivity; Yimen County, Yunnan Province

快速城市化虽然能够提高经济水平, 但不合理的城市生态规划、人口迁移等导致生态用地被占用、生物栖息地减少, 甚至导致生物多样性丧失, 严重干扰生态自我调控能力^[1-2]。评估景观连通性并构建生态网络是从理论到实践解决城市生态问题的有效途径。这一策略通过连接孤立且破碎的生态斑块, 增加斑块间的有效联系, 促进基因流动和物种交换, 对提高城市生态系统服务水平、恢复自然生态系统功能以及丰富生物多样性具有重要作用^[3-4]。

许多学者在生态网络研究领域进行了大量工作, 开发了多种构建生态网络的方法。这些方法通常以生态用地规划为主, 识别生态源地, 构建生态耗费面并提取生态廊道^[5]; 在此基础上, 结合生态风险评估^[6]、生态土地适宜性评价^[7]等方法, 可以进一步细化生境斑块的空间质量、阻力^[8]、经济成本和生态效益^[9], 针对不同地形地貌构建不同尺度的生态网络, 并制订优化策略。随着城市经济的不断发展, 城市用地空间不足, 逐渐侵占山林、河湖等绿地, 破坏景观连通性, 导致中心城区景观破碎和分散^[10]。将形态学空间格局分析 (morphological spatial pattern analysis, MSPA) 方法与最小累计阻力 (minimum cumulative resistance, MCR) 模型结合, 不仅能保证研究结果的科学性和准确性, 还能提升整个网络的连通性和生态效益^[11], 进而更有效地构建生态网络。

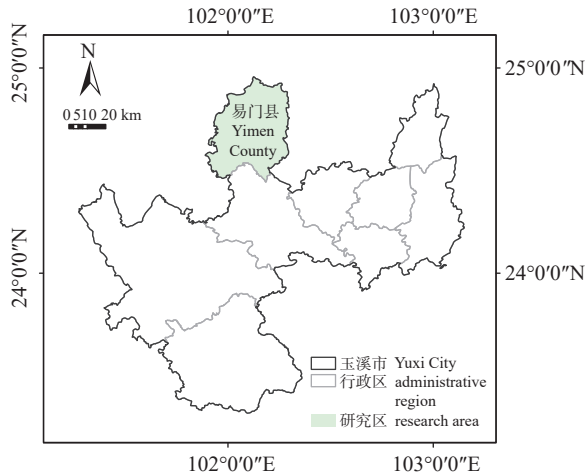
云南省玉溪市是生态学研究网络中的重要节点, 可以充分利用生态网络建设提供的资源平台, 进行更深入、系统的研究^[12-13]。易门县在玉

溪市具有重要地位, 其独特的地理位置、丰富的资源以及明确的发展战略和规划, 为其在玉溪市的发展提供了有力支撑。近年来, 易门县人民政府针对经济快速发展, 城镇扩张导致周边林地、草地及优质耕地被侵占等问题, 积极开展生态修复、水土保持、水土流失治理、水生态修复等工作, 协同发展生态旅游产业, 共筑区域生态安全格局^[14-15]。构建和优化生态网络在生态保护、环境改善、数据监测与治理等方面具有显著优势, 有利于缓解易门县因城市化导致的土地利用类型变化, 进而产生的景观破碎化、区域生态环境恶化、生物栖息地减少等一系列问题, 并以此为基础, 探究城乡发展与生态环境保护之间的用地矛盾, 寻求平衡自然环境与人类活动的方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市西北部的易门县 (24°27'N, 102°18'E), 2021 年全县总面积约 1 526.55 km² (图 1)。该地区属亚热带季风气候, 年均温 16 ℃, 冬季阳光充足, 无严寒。易门县山区面积约占 97%, 地处高原山地, 三面高山环绕, 中部为溶蚀性盆地, 东南面为中山河谷地带, 地形复杂, 立体气候显著。复杂的地形地貌条件孕育了丰富的动植物资源, 境内森林覆盖率达 66.53%, 拥有多种野生动物。目前, 易门县的生态廊道主要以水源保护、森林公园保护、水源涵养等为重点生态廊道, 数量较少, 不同廊道间的连通性不足, 且碎片化严重^[15]。



注: 底图审图号 GS(2024)0650 号; 下同。

Note: Bottom drawing number: GS(2024)0650; the same as below.

图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location of the study area

1.2 数据来源与处理

研究数据包括: 2021 年易门县城市规划区边界、道路和水系的矢量数据, 来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>); 分辨率为 30 m 的遥感影像图和 ASTER GDEM 数字高程数据, 来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>)。以 2021 年易门县 Landsat 8 OLI_TIRS 遥感影像为基础数据, 使用 ENVI 5.3 软件进行基本配准处理后, 通过对比谷歌地图进行目视解译和监督分类, 将其划分为水体、林地、草地、耕地、建设用地和其他用地 6 类土地利用类型; 根据实地调研校对和验证数据 (解译精度为 96.46%, Kappa 系数为 0.93), 在 ArcGIS 10.7 中添加研究区道路和行政区边界矢量数据, 栅格数据单元设为 30 m×30 m, 最终得到 2021 年易门县土地利用类型 (图 2)。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 MSPA 方法的景观格局分析

生态网络的构建需要经过确定源地、构建阻力面、判别生态格局等步骤^[16]。MSPA 方法能够有效反映区域内空间形态上的连通性和景观类型的整体分布格局, 基于此对栅格数据进行景观分类^[17-18]。GuidosToolbox 工具可以将赋值后的二值栅格文件运用八邻域方法进行分析, 识别出核心区、桥接区、孔隙、环线、支线、边缘区和孤岛 7 种不重叠的景观类型^[19]。在易门县土地利用数据的基础上, 将重要生态要素 (如林地和水体) 设

为前景, 赋值为 2, 草地、耕地、建设用地和其他用地作为背景, 赋值为 1, 边缘宽度设为默认值 1, 进行景观连通性分析。

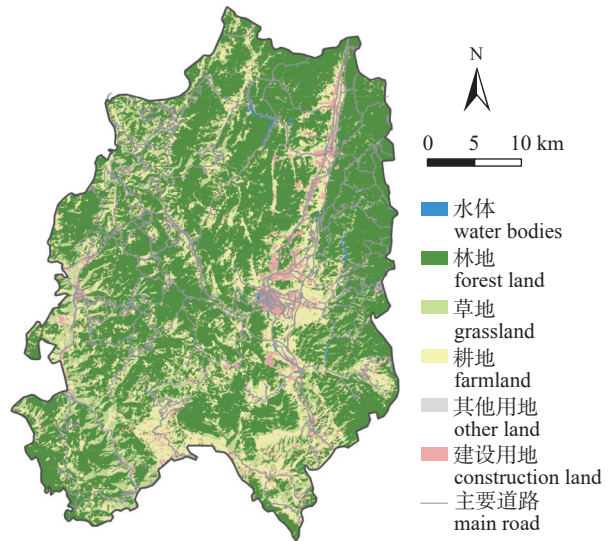


图 2 2021 年易门县土地利用类型

Fig. 2 Land use type of Yimen County in 2021

1.3.2 生态源地识别及景观连通性评价

生态源地为生物活动提供优质栖息地与迁徙用地, 是具有高生境价值并产生重要辐射效应的关键斑块。源地越密集, 其生态功能和调控能力越强。景观连通性评价可以判断斑块的连通重要性及其是否利于物种迁徙。景观连通性指数主要包括整体连通性指数 (integral index of connectivity, IIC)、可能连通性 (probability of connectivity, PC) 指数和斑块重要性 (dPC) 指数, 这些指数能够反映区域内部能量是否流通, 以及斑块对景观连通性的贡献度。连通性越高, 越有助于促进物种迁徙和扩散, 维持种群的遗传多样性。使用 Conefor 2.6 软件计算核心区及以上 3 个指数, 选取面积最大的 10 个斑块作为核心区域进行连通性分析并识别生态源地, 计算公式为:

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_i \cdot a_j}{1 + n l_{ij}} \right)}{A^2};$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}^*}{A^2};$$

$$dPC = \frac{PC - PC_{\text{remove}}}{PC} \times 100\%。$$

式中: n 为研究区内所有斑块的数量; a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和 j 的面积; nl_{ij} 为斑块 i 至 j 之间的连接数; p_{ij}^* 为物种在斑块 i 和 j 间直接迁徙扩散的最大可能性; A^2 为研究区的景观总面积; PC_{remove} 为去除某一斑块后的景观连接度指数。

1.3.3 最小累计阻力 (MCR) 模型的构建

MCR 模型由 KNAAPEN 等^[20]提出, 能够将估计的物种扩散阻力分配给各景观类型, 进一步分析现有联系的空间分异, 同时也是生态保护和景观类型分析的重要工具。目前该模型在生态网络构建和优化方面的应用已相对成熟^[21]。生态阻力能够反映生态源地之间物种扩散的难易程度, 而综合生态耗费面则是研究区域内主要影响因素的综合空间表现。地形中的海拔和坡度是构建阻力面的关键限制因素^[22]。鉴于人为干扰通常表现为阻碍生态资源外部扩散, 故将与道路的距离纳

入人为阻力因素。参考相关研究, 除了土地利用类型外, 使用自然断点法对景观阻力因子进行 1~5 等级分级赋值^[11, 23-26], 并将土地利用类型、海拔、坡度和距道路距离的权重分别设置为 0.34、0.06、0.29 和 0.21 (表 1)。使用 ArcGIS 10.7 中的栅格计算器对 4 项阻力因子进行加权求和 (土地利用类型 $\times 0.34$ + 海拔 $\times 0.06$ + 坡度 $\times 0.29$ + 与道路的距离 $\times 0.21$) 生成栅格阻力面, 并计算从生态源向周围斑块扩散的累计成本, 计算公式为:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i)。$$

式中: MCR_{ij} 为生态源地 i 到其余斑块 j 的最小累积阻力值; $f(x)$ 为某个正函数; m 为景观单元 i 的数量, n 为源地 j 的数量, D_{ij} 为斑块 i 到 j 的空间距离; R_i 为 i 对某种物种运动的综合阻力系数。

表 1 景观阻力因子分级、赋值与权重

Tab. 1 Classification, assignment and weight of landscape resistance factors

项目 item	土地利用类型 land use type	海拔/m altitude	坡度/(°) slope	与道路的距离/m distance from road
阻力值 resistance value	1 林地 forest land	≤ 1480	≤ 5	> 800
	2 草地 grassland	(1480, 1721]	(5, 17]	(600, 800]
	3 耕地 farmland	(1721, 1921]	(17, 29]	(400, 600]
	4 其他用地 other land	(1921, 2125]	(29, 41]	(200, 400]
	5 水体 water bodies	> 2125	> 41	≤ 200
	6 建设用地 construction land			
权重 weight	0.34	0.06	0.29	0.21

1.3.4 基于最小成本路径的生态廊道识别

基于重力模型对研究区潜在生态廊道进行重要性识别, 可以构建生态源地之间的相互作用力矩阵。由于斑块本身的属性差异、斑块间的相互作用关系、人为因素与保护策略等因素的综合作用, 不同斑块的阻力选择不同。因此, 可以定量评价斑块间的相互作用强度, 并判断潜在生态廊道的相对重要性。相互作用力越高, 廊道所承接的生物扩散和能量流动就越强, 在增强生态连通性、保护生物多样性、维护生态系统完整性等方面具有重要作用。基于 ArcGIS 10.7 软件, 选择 1 个生态源地为源/汇点 (生态系统中物质、能量或信息的输入或输出节点), 叠加研究区的综合生态耗费面, 使用成本距离与成本回溯链接矩阵计算每个源点到其他源点的最小成本路径, 识别生态源地之间的最优生物扩散和迁移路径, 构建潜

在生态廊道。

1.3.5 重要生态廊道提取

生态源地之间的相互作用力可以体现源地之间的关系, 作用力越强, 源地在生态系统中发挥的功能越关键, 连接 2 个源地的廊道能更有效地传递物质和能量。通过重力模型构建各源地间的相互作用力矩阵, 提取高作用力廊道作为重要生态廊道, 构建易门县的生态网络图。随后, 使用网格分析法对现有网络的闭合度 (α 值)、线点率 (β 值) 及连接度 (γ 值) 进行验证, 结合研究区实际情况提出优化策略, 其中, α 值越接近 1, 物种扩散迁徙越有利, 物质循环越流畅; β 值越大, 生态网络越复杂。生态源地之间的相互作用力计算公式为:

$$G_{ab} = \frac{L_{\max}^2 \ln S_a \times \ln S_b}{L_{ab}^2 \times P_a \times P_b}。$$

式中： G_{ab} 为 2 个核心斑块 a 和 b 之间的相互作用力； L_{ab} 为斑块 a 和 b 廊道之间累积的阻力值； L_{\max} 为研究区内所有廊道累积的阻力最大值； S_a 和 S_b 分别为斑块 a 和 b 的面积； P_a 和 P_b 分别为源地 a 和 b 的平均阻力值。

2 结果与分析

2.1 基于 MSPA 的景观格局

MSPA 景观类型分析 (图 3) 和景观类型统计 (表 2) 显示：核心区面积为 712.22 km²，占 7 类景观总面积的 77.09%，整体呈片状分布。大型斑块主要分布在研究区的中西部 and 东北部，而西南角和南部则以破碎的小斑块为主。中东部区域主要为建成区，受人类活动和城市建设影响，该建成区区域形成大面积空白。虽然核心区的大型斑块成片分布，但孔隙较多，增加了生态系统退化的可能性。西部和南部的桥接区较为密集，但面积仅为 7.27 km²，占总面积的 0.79%，表明研究区整体连通性不高。孔隙和边缘是核心区与非绿色景观区域内部和外部之间的过渡区域，具有边缘效应，分别占总面积的 5.24% 和 12.96%。支线占比为 2.44%。环线是斑块内部生物迁徙和活动的便捷通道，仅占 0.64%，面积最小，不利于物种的多样性。孤岛是零散、破碎分布的块状斑块，较为孤立，占比为 0.85%，通常可作为连接其他斑块并提供生物迁徙的踏脚石。

2.2 生态源地选取及景观连通性

由表 3 可知：整体连通性指数 (IIC) 和可能连通性 (PC) 指数随着连通距离阈值的增加而增大。当距离阈值达到 1 000 m，可能性概率为 0.5 时，整体连通性指数将固定为 0.29，即景观连通性已达到最高值。以 IIC、PC 和斑块重要性 (dPC) 对核心区进行景观连接度评价，对比得到 dPC 值大于 1 的 10 个斑块作为生态源地并编号 (表 4 和图 4)，发现 1、2、3 号斑块的面积较大，其 dPC 和 IIC 值也较高，其余斑块的 dPC 和 IIC 值随着面积的减小而减小。因此，推测斑块面积会影响斑块重要性和整体连通性指数。

由图 4 还可知：源地斑块面积差异较大，空间分布不均。大斑块源地主要位于东北部和中部，而小斑块源地则集中于中南部，南北方向的连通性较差，中东部、西北部与南部区域存在大

量空白。水域、林地和公园主要分布在生态状况较好的大面积生态源地斑块中 (如 2、3、6 号斑块)，虽然能够维持较高的整体景观连通性，但与南部的连接通道较少，限制了生物流、能量流及信息流的扩散。南部地区地势相对低洼，村庄密集，由于交通道路和耕地的影响，源地斑块 (如 4、5、7、8、9、10 号) 多被分割成距离较近、面积小且破碎的小块。虽然这些小斑块可以为生物



图 3 基于 MSPA 的景观类型分析

Fig. 3 Landscape type analysis based on MSPA

表 2 景观类型分类统计

Tab. 2 Landscape type classification statistics

景观类型 landscape type	面积/km ² area	占比/% percentage
核心区 core	712.22	77.09
桥接区 bridge	7.27	0.79
孔隙 perforation	48.41	5.24
边缘 edge	119.74	12.96
支线 branch	22.54	2.44
环线 loop	5.91	0.64
孤岛 islet	7.84	0.85
总计 total	923.92	100.00

迁徙提供短暂的停留点, 有助于斑块异质性的发展, 但由于其内部生境质量不高, 不利于物种的长期停留和栖息。因此, 生态源地间的 dPC 值与 IIC 值具有一定的关联性。

2.3 生态网络构建与优化

根据表 2 数据计算得到研究区的综合生态耗

费面 (图 5), 结果显示阻力值分布不均。受城市建设和人类活动的影响, 中东部的阻力值最高, 并以此为中心向东北、东南和西南地区延伸, 使生态源地被分割成小块; 西侧也存在部分阻力值较高的区域。这些城镇和居住区极大地限制了生物流动, 阻碍了源地之间的物质、能量流通。

表 3 不同距离阈值下的景观连通性指数
Tab. 3 Landscape connectivity index under different distance thresholds

景观连通性指数 landscape connectivity index	200 m	500 m	1 000 m	1 500 m	2 000 m
整体连通性指数 integral index of connectivity (IIC)	0.24	0.28	0.29	0.29	0.29
可能连通性指数 probability of connectivity (PC) index	0.28	0.33	0.36	0.37	0.37

表 4 10 个生态源地的景观连通性指数

Tab. 4 Landscape connectivity index of ten ecological source areas

序号 serial number	斑块编号 patch number	斑块重要性 dPC	整体连通性指数 IIC
1	7	5.22	3.82
2	1	75.34	67.35
3	3	47.26	41.64
4	6	5.54	3.76
5	10	1.09	0.88
6	2	56.96	50.05
7	4	7.04	4.89
8	8	4.55	2.94
9	9	1.87	1.40
10	5	7.43	6.89

基于重力模型对研究区的潜在生态廊道进行重要性识别, 构建生态源地之间的相互作用力矩阵 (表 5), 结合研究区实际情况, 最终提取出相互作用力最高的 15 条廊道作为重要生态廊道, 这些廊道主要集中于南部地区, 北部仅有 1 条, 其余 30 条则为一般廊道 (图 6)。研究区的生态网络空间分布不均, 重要生态廊道和一般生态廊道都集中在生态源地较多的中南部地区, 整体廊道的空间分布在南北和东西方向上差异较大; 面积较大的生态源地内部的潜在生态廊道过于单一, 以北部地区的重要廊道数量仅有 1 条最为明显。

通过网格分析法验证生态网络的完善程度和连通性可知: 网络的闭合度 (α 值)、线点率 (β 值) 和连接度 (γ 值) 分别为 0.40、1.50 和 0.63, 表明易门县生态网络结构复杂但不够流畅, 闭合度与连接度水平一般, 存在较大的生态网络优化空



图 4 生态源地分布
Fig. 4 Distribution of ecological source areas

间。优化结果 (图 7) 显示: 考虑到生物扩散和迁徙的需求, 以及研究区源地的空间分布, 在维护原有林地和水体的基础上, 从核心区中筛选出 8 个面积较大, IIC、PC 和 dPC 值较高的斑块作为新增生态源地, 并使用 MCR 模型构建最小成本路径, 规划 16 条新廊道; 识别出 10 个重要生

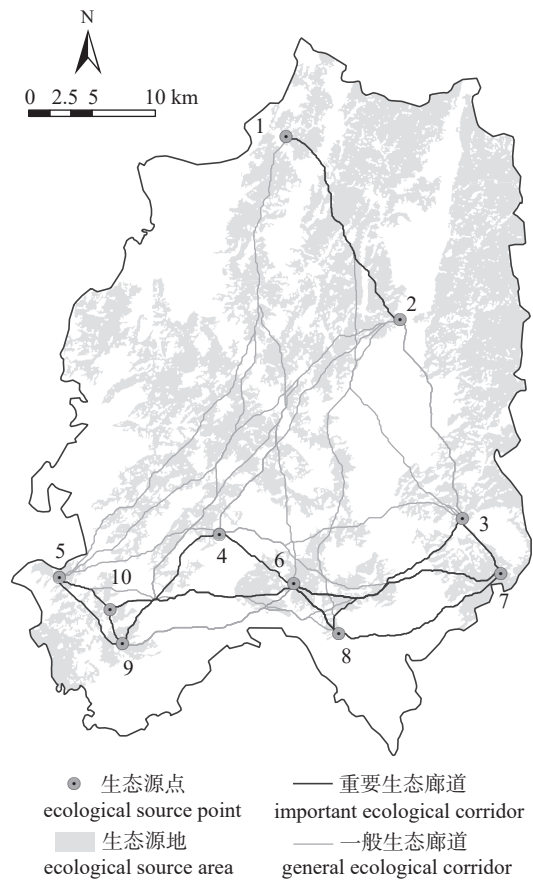


图 6 研究区的生态网络

Fig. 6 Ecological network of the study area

环境要求不一, 难以准确预测每个物种的迁徙时间。因此, 缺乏针对研究区内生物物种的具体分析。根据文献资料, 玉溪市保护物种数量较少, 新增量低, 易门县的生物物种资料难以获取^[3-4, 32-33], 数值设置也存在一定的主观性。本研究主要从用地类型角度考虑, 优化生态网络, 提升生态效益, 还需要进一步研究如何平衡自然与人类活动发展的关系^[34]。

3.2 易门县生态网络优化建议

在区域尺度下, 生态网络的构建和优化对该地区生态环境和生物多样性保护研究都具有重要意义, 能够全面展示研究区的生态环境现状^[35]。相关研究表明: 通过营造适宜生物生存和物种迁徙的高质量生境, 增设并扩大生态源地与生态廊道, 识别并强化重要生态节点等方式, 可以有效提高源地间的景观连通性, 优化景观格局, 加强生物多样性保护^[36-37]。因此, 基于易门县生态网络构建结果与实地情况, 提出以下优化建议。

(1) 增补源地斑块与廊道网络。生态网络构

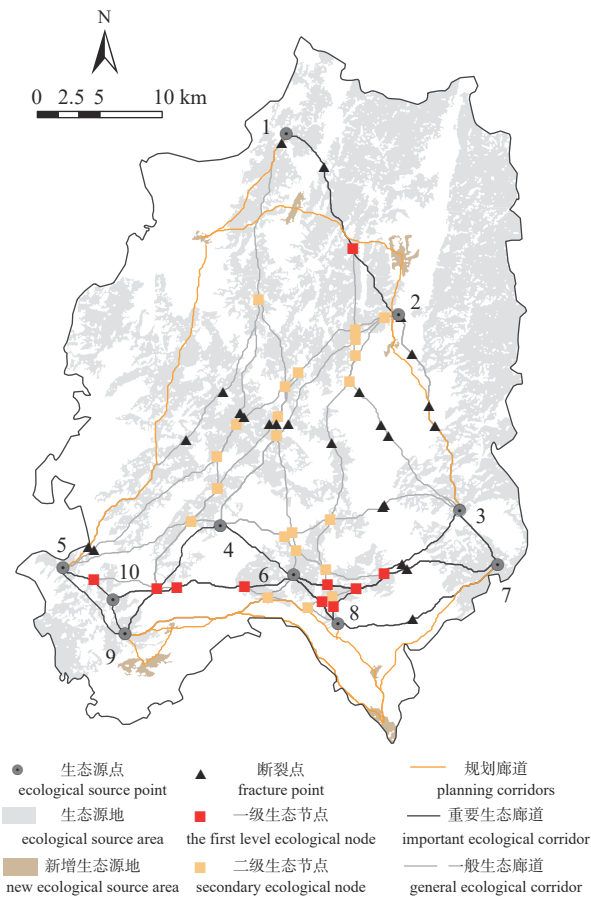


图 7 生态网络优化

Fig. 7 Optimization of ecological network

建研究显示: 研究区西北角、中东部和南部存在大量空白, 生境较差, 缺少生物栖息地和基础廊道连接。经过优化, 筛选出 8 个新增生态源地, 规划 16 条新廊道。经网格分析法验证, 优化前 α 、 β 和 γ 值分别为 0.40、1.50 和 0.63, 优化后分别为 0.45、1.72 和 0.65, 数值明显增加, 优化效果显著, 生态网络流畅度、廊道、节点均得到明显改善^[22-23], 能够有效打通南北和东西方向的网络连接, 优化研究区整体的生态网络结构。

(2) 加强生态节点保护。生态节点连接不同的景观区域, 影响生态循环和物质交换。有效的保护和建设有助于优化生态网络, 促进区域可持续发展。研究区内识别出的生态节点已进行重要程度分级, 包括 10 个重要生态节点 (位于重要生态廊道交会处, 以及重要生态廊道与一般生态廊道的交会处) 和 23 个一般生态节点, 以实现不同等级生态节点的针对性保护, 增强景观的整体性和生态的稳定性。

(3) 修复生态断裂点。生态断裂点通常定义为生态网络与硬质表面的交汇点, 包括与国道、省道、高速公路及少量居民点的交集。城镇化进程中, 这些地点往往成为建设用地和道路对区域生态环境造成威胁和破坏的关键点。通过对研究区交通路网和生态廊道的研究, 共识别出 24 个生态断裂点。建议采取工程措施进行修复, 如利用高架桥等修筑公路, 以减少交通网络对生态网络的直接破坏; 或在一般道路两侧设立生态缓冲区, 注重道路两侧绿化的体量和生态功能, 增强生态斑块间的连通性, 降低动物迁徙过程中的死亡率。

4 结论

从景观格局分析来看, 研究地核心区景观面积为 712.22 km², 占 7 类景观总面积的 77.09%, 主要呈片状分布, 中东部等地区因建成区影响形成大面积空白。根据景观连通性分析, 选出 10 个生态源地, 其中 1、2、3 号源地的斑块面积与其他源地差异较大, 集中于中北部, 中南部多为面积较小的源地斑块。整体空间分布不均, 斑块面积与斑块连接重要性密切相关。提取 15 条重要生态廊道和 30 条一般廊道构建易门县的生态网络, 南部网络密度较高, 南北部与东西部连通性较低。通过网络分析法评价网络情况发现, 该网络的闭合度、线点率和连接度水平不高。大型生态源地斑块内部的潜在廊道数量少, 小型生态源地斑块距离近、成本低, 但易受外来因素的干扰和影响。

[参考文献]

- [1] 丁立仲, 徐高福, 卢剑波, 等. 景观破碎化及其对生物多样性的影响[J]. 江苏林业科技, 2005, 32(4): 45. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7380.2005.04.017.
- [2] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 等. 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. DOI: 10.5846/stxb201402130248.
- [3] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于MSPA的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析[J]. 生态学报, 2016, 35(6): 1608. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201606.026.
- [4] 梁艳艳, 赵银娣. 基于景观分析的西安市生态网络构建与优化[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3767. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202011.019.
- [5] 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. DOI: 10.20103/j.stxb.202304140767.
- [6] 于颖, 孟京辉, 宋增明, 等. 基于MCR模型和景观连通性的县域生态网络构建[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 226. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202108041.
- [7] WEI W, LIU C L, MA L B, et al. Ecological land suitability for arid region at river basin scale: framework and application based on minimum cumulative resistance (MCR) model[J]. Chinese Geographical Science, 2022, 32(2): 312. DOI: 10.1007/s11769-022-1261-9.
- [8] 杨迈, 郑毅, 李晓琳, 等. 洱海流域生态网络构建与分析[J]. 湿地科学, 2024, 22(2): 254. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2024.02.010.
- [9] 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. DOI: 10.13836/j.jjau.2022052.
- [10] 李怡欣, 李菁, 陈辉, 等. 基于MSPA和MCR模型的贵阳市2008—2017年景观连通性评价与时空特征[J]. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1240. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202206.020.
- [11] 陈南南, 康帅直, 赵永华, 等. 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. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202105.012.
- [12] 刘士鑫, 李建华, 孙咏琦, 等. 基于FLUS-Markov模型的玉溪市生态系统服务价值时空演变与预测[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(2): 189. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2024.02.029.
- [13] 孙雨露, 李正升, 李虹, 等. 基于PSR模型的玉溪市生态安全评价[J]. 四川职业技术学院学报, 2017, 27(5): 34. DOI: 10.13974/j.cnki.51-1645/z.2017.05.009.
- [14] 陈国平, 骆延青, 李亚筠, 等. 基于高分影像分类的易门县城镇扩展及驱动机制[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2017, 33(5): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0479.2017.05.005.
- [15] 易门县自然资源局. 易门县国土空间总体规划(2021—2035年)(草案公示版)[EB/OL]. (2023-01-20) [2024-06-26]. <http://www.ym.gov.cn/ymxfzfxgk/ymxgtzyj/2024-08/17>.
- [16] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999(1): 8. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.1999.01.002.
- [17] 王越, 林箐. 基于MSPA的城市绿地生态网络规划思路的转变与规划方法探究[J]. 中国园林, 2017, 33(5): 68.
- [18] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 等. 基于MSPA和MCR模型的南昌市生态网络构建与优化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 139. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.020.
- [19] 刘一丁, 何政伟, 陈俊华, 等. 基于MSPA与MCR模型的生态网络构建方法研究: 以南充市为例[J]. 西南农业学报, 2021, 34(2): 354. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2021.2.019.
- [20] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape & Urban Planning, 1992, 23(1): 1. DOI: 10.1016/0169-2046(92)90060-D.
- [21] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 等. 基于形态空间格局分析和

- 最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201810.019](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201810.019).
- [22] 陈静, 左翔, 彭建松, 等. 基于MSPA与景观连通性分析的城市生态网络构建: 以保山市隆阳区为例[J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 118. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx.1972.2020.04.017](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx.1972.2020.04.017).
- [23] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1611. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201605.016](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201605.016).
- [24] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1711. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2008.04.042](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2008.04.042).
- [25] LI Y Y, ZHANG Y Z, JIANG Z Y, 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): 63. DOI: [10.1186/s13717-021-00332-2](https://doi.org/10.1186/s13717-021-00332-2).
- [26] 蒋思敏, 张青年, 陶华超. 广州市绿地生态网络的构建与评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(4): 162. DOI: [10.13471/j.cnki.acta.snus.2016.04.025](https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2016.04.025).
- [27] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2406. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2005.09.037](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2005.09.037).
- [28] FORMAN R T T, GODRON M. Landscapae ecology[M]. New York: Wilye, 1986.
- [29] OSTAPOWICZ K, VOGT P, RIITERS H K, et al. Impact of scale on morphological spatial pattern of forest[J]. Landscape Ecology, 2008, 23(9): 1107. DOI: [10.1007/s10980-008-9271-2](https://doi.org/10.1007/s10980-008-9271-2).
- [30] 邱龙. 滇中城市群地区植被覆盖度时空变化及其影响因素研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- [31] 孔阳, 王思元. 基于MSPA模型的北京市延庆区城乡生态网络构建[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(7): 113. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20190271](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190271).
- [32] 姜志诚, 杨雨林, 汤镒帆, 等. 玉溪市及下辖县区鸟类多样性初析[J]. 玉溪师范学院学报, 2022, 38(6): 44. DOI: [10.3969/j.issn.1009-9506.2022.06.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9506.2022.06.006).
- [33] 姜志诚, 任正涛, 曾熙雯, 等. 云南省国家重点保护陆生野生动物分布格局研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(5): 101. DOI: [10.11929/j.swfu.202307025](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202307025).
- [34] 金瑜, 王娟, 杨玥, 等. 云南思茅土地利用变化方式对亚洲象栖息地的影响[J]. 林业资源管理, 2023(3): 46. DOI: [10.13466/j.cnki.lyzygl.2023.03.007](https://doi.org/10.13466/j.cnki.lyzygl.2023.03.007).
- [35] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2863.
- [36] XU W X, WANG J M, ZHANG M, et al. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 125523. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.125523](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125523).
- [37] 侍昊, 徐雁南. 基于景观连通性的城市绿地核心区规划方法研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 51. DOI: [10.3969/j.jssn.1000-2006.2011.01.012](https://doi.org/10.3969/j.jssn.1000-2006.2011.01.012).

责任编辑: 何承刚