

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

姚彩云¹ 安睿¹ 窦超¹ 刘耀林^{1, 21}

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

2. 武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079)

【摘要】: 三峡库区是长江经济带上重要的生态屏障区, 同时也是生态脆弱区。提取三峡库区重要生态源地、构建综合生态阻力面、识别重要生态廊道和生态节点, 从而构建生态安全网络, 对筑牢长江上游重要生态屏障具有十分重要的研究价值和意义。以三峡库区为研究区, 利用形态学空间格局分析方法 (MSPA) 识别出林地生态源地斑块, 通过景观连通性指数评价斑块重要性; 结合土地利用类型、DEM、坡度、距河流距离、距道路距离和 NDVI 等阻力因子构建综合生态阻力面, 运用最小累计阻力模型 (MCR) 构建生态廊道, 提取生态廊道上重要生态节点, 形成三峡库区林地生态安全网络; 最后对三峡库区生态安全网络结构进行评价研究。研究结果表明: (1) 三峡库区林地生态源地共 38 块, 占林地面积的 59.55%, 占区域总面积的 27.95%, 主要分布在三峡库区湖北段的大巴山-巫山-武陵山区以及重庆段的缙云山-中梁山-铜锣山-明月山-云雾山区。(2) 阻力高值区主要分布在城镇建设用地区, 最高值位于重庆市主城区; 阻力低值区主要分布在林地和水域, 最低值位于湖北段巫山山脉。(3) 生态廊道共 79 条, 其中, 3 条重要廊道, 76 条一般廊道, 廊道总长度为 1326.37km。(4) 生态廊道的平均阻力为 2.50, 生态斑块间的廊道总累积阻力为 197.36; α 指数、 β 指数、 γ 指数分别为 0.52、2.08、0.73; 耕地、林地和草地是构成重要廊道的主要景观类型。研究结果呈现出“三屏多廊点多斑块”的生态网络空间格局, 对保护生物多样性、提升生态系统功能和维持区域生态安全格局提供科学指导。

【关键词】: 三峡库区 MSPA MCR 模型 生态安全格局 生态网络评价

【中图分类号】: TU984.115 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)09-1953-10

三峡库区是长江流域重要的生态屏障区, 同样也是典型的生态脆弱区, 区域生态环境安全问题愈加受到政府关注^[1,2,3]。湖北省出台《湖北构建长江绿色生态廊道》政策致力于生态修复、环境保护和绿色发展; 重庆市制定《重庆市国土空间总体规划(2021-2035年)》旨在保护渝东北三峡库区山清水秀的生态空间, 提出至 2035 年, 森林覆盖率达到 60%的生态目标。因此, 构建生态安全格局、进行生态网络评价是当前景观生态学的研究热点, 同时也是解决生态环境问题、促进区域生态安全发展的途径^[4,5,6]。

针对生态网络构建及评价研究的范式是建立“生态源地-生态阻力面-生态廊道-生态节点-生态网络”的研究框架^[4]。在生态源地识别方面, 陈昕^[7]等从生态系统服务重要性、生态敏感性与景观连通性三个方面进行源地识别, 进而构建出基于“重要性-

作者简介: 姚彩云(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用规划与管理。E-mail:ccyao929@163.com;刘耀林, E-mail:yaolin610@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503601)

敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局。吴健生等^[8]利用 ArcGIS 热点分析对重构后的生态系统服务价值冷热点进行识别,提取三种置信度水平上的生态系统服务价值热点区域,进而识别出两江新区的生态源地。陈南南等^[9]利用 MSPA 识别重要生态源地,并运用 MCR 模型提取廊道,从而构建秦岭(陕西段)生态网络。对于生态源地斑块面积阈值设定,彭建等^[10]通过探讨生态源地斑块数、生态源地面积比例以及生态源地与自然保护区重合率等因素,最终选取 5km² 作为玉溪市生态源地斑块最小面积阈值。关于生态阻力面的设定,已有研究大多基于土地利用类型,依据专家打分直接赋值^[11],但对于不同地类的阻力值相对大小难以形成统一范式^[12],有学者直接采用不同地类阻力的相对大小^[13]。生态廊道是生态流的通道,具有连通景观格局的作用^[14]。目前,已发展多种生态廊道识别方法,如最小累积阻力模型^[15,16]和斑块重力模型等^[17]。其中,最小累积阻力模型能较好模拟景观对空间运动过程的阻碍作用,相比传统模型能更好地表达景观格局和生态过程的关系,被广泛应用于生态网络构建。生态节点是连接斑块间生态最脆弱的地方,对生态网络中物质传输和能量流动具有重要作用^[18]。

以往的生态安全研究多针对人为活动剧烈区域,以森林、草原等自然地域为对象的生物物种保护安全格局研究相对较少。鉴于此,本研究以三峡库区林地为研究对象,结合空间形态学格局分析(MSPA)方法和斑块重要性指数识别林地生态源地。同时,针对物种迁徙路线的不确定性特点,利用 MCR 模型模拟迁徙可能路线,结合综合生态阻力面构建三峡库区林地生态廊道,从“生态源地-综合生态阻力面-生态廊道-生态节点-生态网络”的视角分析三峡库区林地生态安全格局,并评价三峡库区生态安全网络,推动基于生物多样性保护的生态廊道的建设实践,以期为三峡库区的生态网络规划与管理提供帮助。

1 研究区概况

三峡库区所处地理位置为 28° 31' N~31° 44' N,105° 50' E~111° 40' E,总面积为 5.8×10⁴km²,包括湖北段和重庆段,区域生态环境脆弱,是长江经济带上重要的生态屏障区,研究区地理位置见图 1。三峡库区地形高低起伏变化明显,区域狭长,东西两端气候差异明显。且位于我国东西地势和南北气候的交汇过渡带,物种资源丰富,是生物多样性保护的关键地区之一。近年来,库区森林面积和蓄积量大幅增长,森林覆盖率达 58.49%,高于长江流域平均水平。

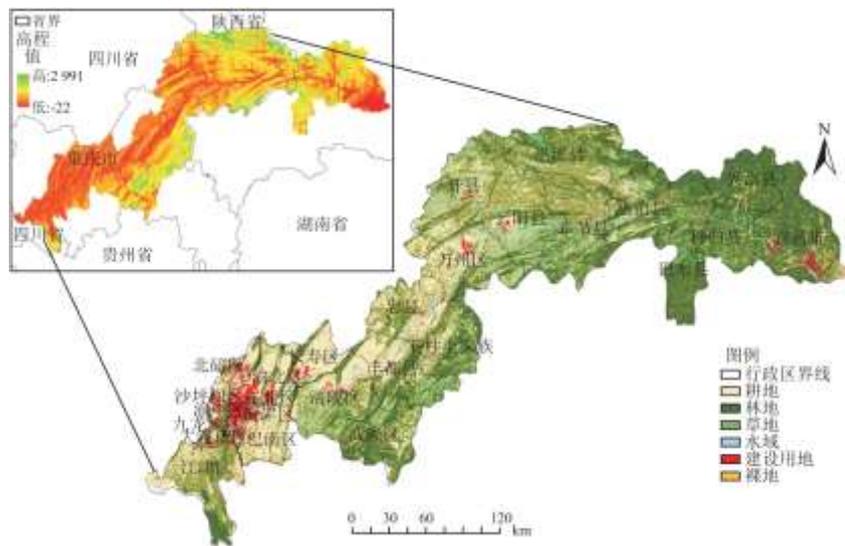


图 1 研究区地理位置

2 数据源与研究方法

2.1 数据来源

研究所用数据主要包括三峡库区土地利用数据、DEM、植被覆盖数据等，相关数据来源及分辨率见表 1。研究区 DEM 和土地利用数据均来源于地理空间数据云平台，空间分辨率为 30m；土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和裸地六类；NDVI 数据来源于遥感数据反演；行政区划和交通道路等矢量数据来源于资源环境数据云平台。

表 1 数据概况

数据名称	数据类型	数据来源	数据精度
土地利用数据	栅格数据	地理空间数据云	30m
DEM	栅格数据	地理空间数据云	30m
NDVI	栅格数据	地理空间数据云	30m
行政区划数据	矢量数据	资源环境数据云平台	-
交通道路数据	矢量数据	资源环境数据云平台	-

2.2 研究方法

2.2.1 基于 MSPA 方法的生态源地识别

形态学空间格局分析 (Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA) 是凭借腐蚀、膨胀以及开闭运算的图像处理方法，通过识别和分割调整整体空间格局，并有效确定景观类型及结构，详细生态学特征见表 2。因此，基于三峡库区土地利用影像，采用 MSPA 方法进行林地景观格局分析，将林地设为研究前景，其它用地类型作为研究背景，利用 GuidosToolbox 软件得到核心区、孤岛、孔隙、边缘区、连接桥、环线、支线等七种景观类型。

表 2 MSPA 景观结构类型及生态学特征

结构类型	生态学特征
核心区 (Core)	绿色植被覆盖区域中的核心
孤岛 (Islet)	相对孤立且面积较小的绿色斑块
孔隙 (Perforation)	内部斑块边缘区域
边缘区 (Edge)	核心区域的外部边界
环线 (Loop)	连接同一核心区的具有廊道特征的狭长区域
桥接区 (Bridge)	连接多个不同核心区的非核心区内的具有廊道特征的狭长区域
支线 (Branch)	识别出所有景观后的部分结构就是支线

2.2.2 源地斑块重要性评价

根据景观生态学理论, 斑块面积和连接度是维持景观生态功能的重要载体^[19,20]。常用的景观连接指数包括整体连通性 (IIC)、可能连通性 (PC) 和斑块重要性指数 (dPC), 其中, dPC 表示斑块的重要性, 能够较好评价区域内核心斑块间的连接水平^[21]。为了分析每个林地斑块对研究区整体连通性的贡献程度, 根据 Conefor Sensinode 2.6 软件景观连通性指数评价结果, 将林地斑块重要性指数值分为高等级、中等级和低等级这三个等级。

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

$$dPC = \frac{PC - PC_{remove}}{PC} \quad (2)$$

2.2.3 综合生态阻力面构建

生态阻力面即表示生态源地扩散的阻力障碍分布, 反映了景观要素的可达度和趋势^[22]。结合以往研究和研究区实际情况, 建立生态源地扩张阻力体系, 选取土地利用类型、高程、坡度、距河流距离、距道路距离和 NDVI 作为阻力因子, 并利用层次分析法确定各阻力因子权重, 具体见表 3。

2.2.4 MCR 模型及廊道识别

最小累积阻力模型, 即 MCR 模型^[23], 是指物种从源地经过不同阻力单元到达目的地所克服阻力的总和。MCR 模型主要考虑 3 个方面的因素, 即源、距离、景观介质面, 经过俞孔坚等^[24]的修改, MCR 模型公式如下:

表 3 生态源地扩张阻力因子分级及权重

评价因子	1	2	3	4	5	权重
土地利用类型	林地	水域	草地	耕地	其他用地	0.25
高程	<50m	50~200m	200~500m	500~1000m	>1000m	0.14
坡度	<2°	2° ~5°	5° ~15°	15° ~25°	>25°	0.13
距河流距离	<1km	1~3km	3~5km	5~10km	>10km	0.15
NDVI	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2	0.22
距道路距离	<250m	250~500m	500~1000m	1000~2000m	>2000m	0.11

$$MCR = \int_{\min}^{\max} \sum_{i=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (3)$$

式中: MCR 为最小累积阻力值, f 是正函数, 用来表示空间上任意单元的最小阻力与它到空间上其他单元的关系; D_{ij} 表示物种从源 j 到到空间某景观单元 i 的实际距离; R_i 表示景观单元 i 对物种运动的阻力系数。

2.2.5 生态网络分析

在生态网络评价方面， α 、 β 、 γ 指数是常用的定量化评价指数，可用于描述研究区的网络复杂程度及连通率等，具体描述如下：

$$\alpha = \frac{l-v+1}{2v-5} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{l}{v} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{l}{l_{\max}} = \frac{l}{3(v-2)} \quad (6)$$

式中： l 为廊道数； v 为节点数。

3 结果

3.1 林地生态源地识别

三峡库区 MSPA 分析结果如图 2 和表 4 所示，研究区内核心区景观面积占林地总面积的 69.38%。孤岛斑块呈破碎状分布，孤岛斑块面积占林地总面积的 0.4%，面积占比较小。孔隙面积占林地总面积的 5.46%，表明研究区的林地边缘效应较差，容易受外界因素干扰。边缘区是林地与非林地的缓冲地带，占林地总面积的 18.04%，面积仅次于核心区，表明研究区的林地具有一定的边缘效应。支线面积占林地总面积的 5.26%，表明研究区内的连通作用一般。桥接区代表景观生态安全格局中的结构性廊道，连接桥面积仅占林地总面积的 1.25%，难以为能量交换和物质流动提供迁移通道。环线可以便利物种在斑块内部移动，占林地总面积的 0.21%。

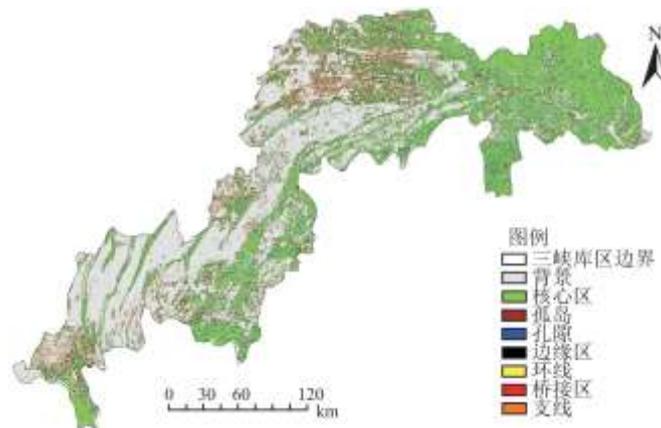


图 2 基于 MSPA 的林地景观格局分析

表 4 基于 MSPA 的林地景观类型及占比

景观类型	总面积 (km ²)	占前景要素比例 (%)	占研究区域比例 (%)
------	------------------------	-------------	-------------

核心区	6117.142	69.38	32.55
孤岛	8122.135	0.40	0.19
孔隙	191.560	5.46	2.56
边缘区	5368.782	18.04	8.47
环线	681.953	0.21	0.10
连接桥	1690.834	1.25	0.59
支线	3371.452	5.26	2.47

为避免提取出的生态源地过于破碎和碎片化分布，本研究提取了核心区源地中面积大于 10km^2 的林地斑块，按照 1000m 的阈值进行聚合，最终得到 38 个核心生态源地，详细见图 3。三峡库区核心林地生态源地斑块主要分布在湖北段的大老岭国家森林公园以及西陵峡大峡谷景区、三峡车溪旅游区、金银岗森林公园；重庆段主要位于虎峰山景区、重庆缙云山国家级自然保护区、金刀峡自然风景区、仙女山国家森林公园、武陵山国家森林公园和铁峰山国家森林公园。由生态源地斑块分布结果可知：三峡库区的大巴山、巫山、武陵山、大娄山组成的生态屏障，可发挥水土保持、水源涵养和生物多样性功能，同时，缙云山、中梁山、铜锣山、明月山、云雾山等平行山岭，樵坪山、云篆山等独立山体以及各类自然保护区，发挥生态斑块作用。

3.2 斑块重要性评价

由表 5 可知，研究区内共提取 38 个林地核心区斑块，这三种等级中斑块数量最多的是低等级斑块，数量为 24 个，占比为 63.16%，其面积仅占斑块总面积的 10.01%。中等级的斑块数量共有 11 个，占斑块总数的 28.95%，占斑块总面积比例为 5.22%。高等级的斑块在数量上共有 3 个，占斑块总数比例为 7.89%，但其所占的斑块总面积 84.77%，远远大于剩余两个等级的斑块，对研究区内林地景观连通性起着重要的维持作用，也进一步反映三峡库区湖北段林地是集中连片林地，面积大的斑块对景观连通性贡献发挥着举足轻重的作用，有利于保持林地景观稳定性。

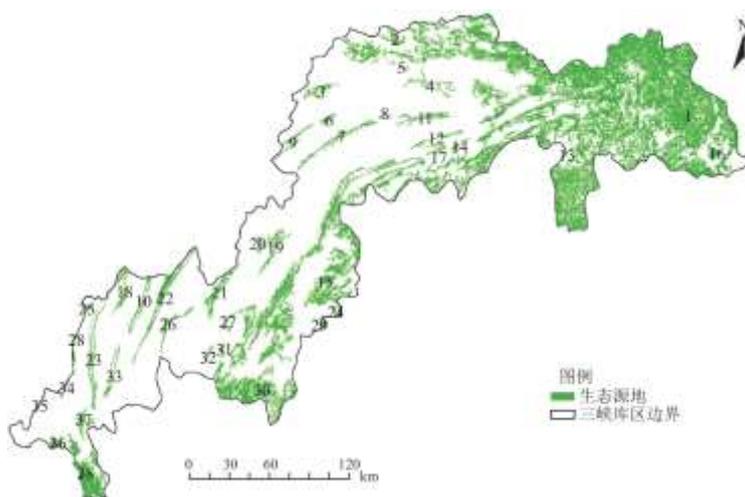


图 3 林地生态源地分布

按照斑块重要性指数 dPC 值在研究区选取生态源地，具体见图 4，生态源地分布不均衡，三峡库区湖北段分布众多山脉，为

三峡库区提供大面积生态源地，重庆段西北部缺乏生态功能较好的林地景观，因而生态源地明显集中在三峡库区湖北段以及重庆段东北部。同时结合研究区内国家森林公园和自然保护区分布，结果表明：湖北段大巴山区、巫山以及武陵山区，形成第一道天然生态屏障；重庆段的四十八槽森林公园、赤甲山、铁峰山、七曜山、丰都名山和仙女山，形成第二道天然屏障，主要位于渝东北三峡库区城镇群；重庆段的缙云山、中梁山、铜锣山和明月山，形成第三道天然生态屏障，有“主城四山”之称。

表 5 斑块重要性等级面积及比例

斑块重要性等级	数量	占斑块总数比例 (%)	面积 (km ²)	占斑块总面积比例 (%)
高等级	3	7.89	13570.65	84.77
中等级	11	28.95	835.55	5.22
低等级	24	63.16	1602.12	10.01

3.3 综合生态阻力面构建

本研究根据各阻力评价因子及其权重，在 ArcGIS 中建立每个阻力因子图层，利用栅格计算器对各阻力因子进行加权求和，进而在符合研究区内的特有的生态特征的基础上，得到林地生态安全格局的综合生态阻力面。研究区域内生态阻力面如图 5 和图 6 所示，生态阻力值区域差异明显，阻力高值区主要分布在重庆段城镇建设用地区，阻力最高值位于重庆市主城区；阻力低值区主要分布在长江及其支流等水域沿岸和林地周围，整体阻力最低值位于三峡库区湖北段的巫山山区。

3.4 生态安全格局

生态廊道是生态源地之间的最低累积阻力谷线。基于生态源地和景观阻力面，本研究运用 Linkage Mapper 工具识别不同源地之间的最小累积耗费距离路径，由此确定生态廊道。结果如图 7 所示，三峡库区地处我国西南山区，库区地形高低起伏变化明显，区域狭长，中部山地连绵。根据识别结果以及研究区内部的实际情况，结合自然保护区的位置以及重要物种种群的所在位置，共得到 79 条生态廊道，提取生态廊道与主要交通干道的交点作为生态节点，共识别 43 个生态节点，根据生态廊道上生态节点数超过 3 个这一标准对生态廊道等级进行划分，得到 3 条重要廊道，76 条一般廊道，主要分布在研究区北部和西部，共同形成“三屏多廊多点多斑块”的生态安全网络。

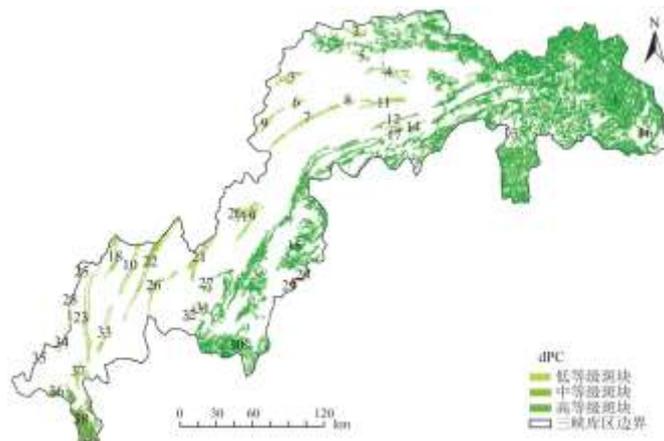


图 4 林地生态源地斑块重要性分布

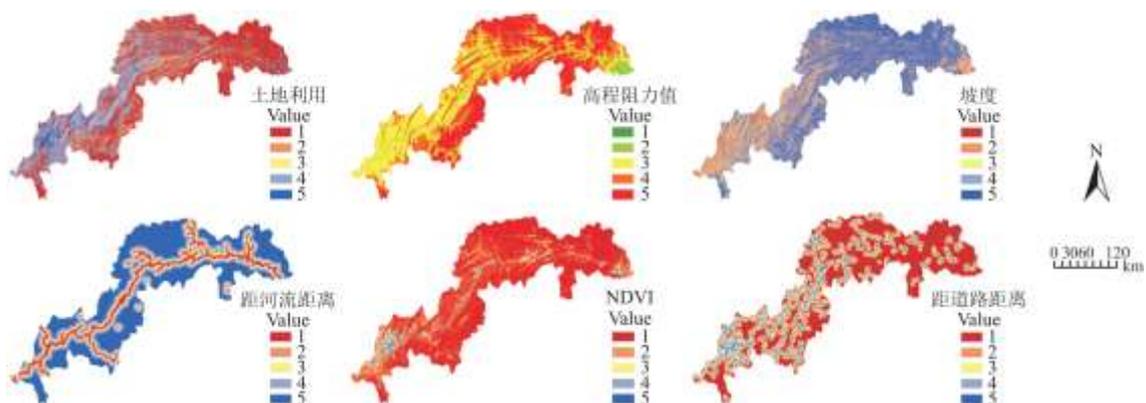


图 5 生态阻力因子分级

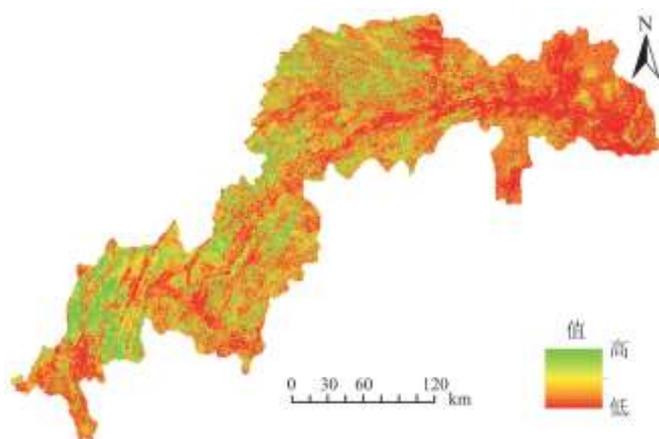


图 6 综合生态阻力面

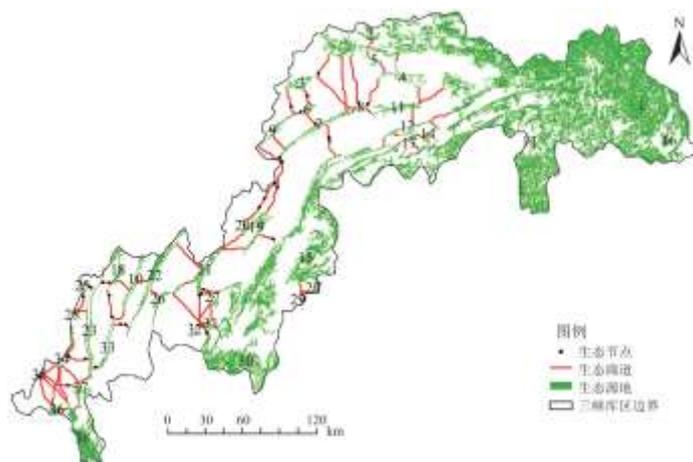


图 7 林地生态网络

3.5 生态安全网络评价

3.5.1 单位廊道平均阻力

根据生成的廊道的累积阻力与廊道长度之比得到单位廊道的平均阻力。根据表 6 可知，生态廊道的平均阻力为 2.50，生态斑块间的廊道总累积阻力为 197.36，表明斑块间的交流相对困难，研究区的生态稳定性较脆弱。但是，生态廊道只是相对理想化的生态廊道，在真实情况下物种是在一定的距离范围内下进行迁徙。

表 6 生态网络廊道平均阻力统计

不同累积阻力和长度比的廊道数目				廊道总	廊道总长度(m)	廊道总累积阻力值	廊道平均阻力
<2	2.0~2.4	2.4~2.8	>2.8	数目			
2	27	42	8	79	1326369	197.36	2.50

3.5.2 生态网络指数

利用生态网络闭合指数(α 指数)、生态网络连接度指数(β 指数)和生态网络连通度(γ 指数)对生态廊道进行评价分析，得到： α 指数、 β 指数、 γ 指数分别为 0.52、2.08、0.73，说明三峡库区林地生态网络节点的连接程度较好，但网络的物质循环和流通较一般。

3.5.3 生态廊道用地结构

基于最小阻力模型生成的生态廊道不具有宽度^[25]，而宽度对廊道生态功能的发挥有着重要作用，适当增加廊道宽度有利于区域生物多样性的维持。为保护生物多样性，选取 100m 作为三峡库区林地生态廊道的识别宽度，分析生态廊道的景观结构。生态廊道景观结构分析如图 8，结果表明，耕地、林地和草地是构成重要廊道的主要景观类型，耕地、林地和草地面积占比分别为 50.31%、32.29%和 12.28%，耕地、林地和草地之和约占廊道总面积的 95%，表明耕地、林地和草地对物种的扩散和迁移起着重要的连接作用，也是物种重要的栖息场所。

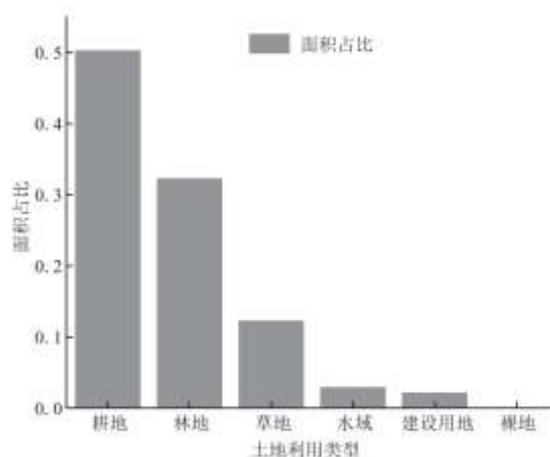


图 8 廊道用地结构

4 结论与讨论

本文以三峡库区为研究区域,结合 MSPA 和景观连通性分析确定林地生态源地,选取土地利用类型、DEM、坡度、距河流距离、距道路距离和 NDVI 等阻力因子构建综合生态阻力面,运用 MCR 模型识别生态廊道,构建三峡库区林地生态安全网络,并评价网络结构优势度,结论如下:

(1)三峡库区林地生态源地共 38 块,占林地面积的 59.55%,占区域总面积的 27.95%,主要分布在湖北段大巴山区-巫山-武陵山区以及重庆段的缙云山-中梁山-铜锣山-明月山-云雾山,形成三道林地天然屏障,构成三峡库区生态安全网络中的“三屏多斑块”的格局,发挥水土保持、水源涵养和生物多样性功能。

(2)研究区内综合生态阻力值差异明显,以景观生态学的视角反映人类活动干扰的空间分布及强度。阻力高值区主要分布在城镇建设用地聚集区,重庆市主城区阻力值最高;阻力低值区主要分布在林地和水域等区域,最低值位于湖北中段巫山山脉。后续生态建设需要重点关注高值区的生态安全问题,以增加生境适宜性和景观连通性,进一步构建完善的生态网络。

(3)生态源地连接 79 条生态廊道,生态网络中包含 43 个生态节点,以单条生态廊道上节点数是否超过 3 区分出 3 条重要廊道和 76 条一般廊道,廊道总长度为 1326.37km,主要分布在研究区北部和西部,共同形成“三屏多廊多点多斑块”的生态安全网络。

(4)生态廊道平均阻力为 2.50,生态斑块间的廊道总累积阻力为 197.36; α 指数、 β 指数、 γ 指数分别为 0.52、2.08、0.73,三峡库区林地生态网络节点的连接程度较好,但网络的物质循环和流通较一般;生态廊道景观结构分析结果表明,耕地、林地和草地是构成廊道的主要景观类型,有助于物种扩散和迁移。

综上,相比于以往生态安全研究,本文综合考虑研究区的生态脆弱性,以林地这一自然地域为对象进行生物物种保护安全格局研究,设定适当的阈值进行源地斑块的筛选,利用景观连通性指数按等级划分生态源地。同时,本文选取多个阻力因子,如 NDVI、DEM、坡度、距河流距离和距道路距离构建综合生态阻力面,而非单一利用土地利用类型进行阻力面构建,提升阻力面构建的科学性。再者,本文进一步从网络廊道阻力、生态网络指数和生态廊道用地结构对三峡库区生态网络进行评价研究。在后续研究中可缩小研究范围,提高研究精度。

参考文献:

- [1]杨彦昆,王勇,程先,等.基于连通度指数的生态安全格局构建——以三峡库区重庆段为例[J].生态学报,2020,40(15):5124-5136.
- [2]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.
- [3]杨远琴,任平,洪步庭.基于生态安全的三峡库区重庆段土地利用冲突识别[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):322-332.
- [4]叶鑫,邹长新,刘国华,等.生态安全格局研究的主要内容与进展[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.
- [5]刘世梁,侯笑云,尹艺洁,等.景观生态网络研究进展[J].生态学报,2017,37(12):3947-3956.

-
- [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(4):761-768.
- [7] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3):471-484.
- [8] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例[J]. 地理研究, 2017, 36(3):429-440.
- [9] 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):1545-1553.
- [10] 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.
- [11] 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]. 生态学杂志, 2016, 35(6):1608-1616.
- [12] 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):354-363.
- [13] 徐文彬, 尹海伟, 孔繁花. 基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定[J]. 生态学报, 2017, 37(12):4019-4028.
- [14] 于婧, 汤昇, 陈艳红, 等. 山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建——以张家界市为例[J]. 生态学报, 2022(4):1-10.
- [15] 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(5):555-565.
- [16] 刘乙斐. 基于 MSPA 和 MCR 模型生态网络构建优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [17] 王正伟, 王宏卫, 杨胜天, 等. 基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例[J]. 生态学报, 2022, 42(1):91-104.
- [18] 沈润. 西双版纳景观破碎化演变与生态安全格局构建[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [19] 吴健生, 刘洪萌, 黄秀兰, 等. 深圳市生态用地景观连通性动态评价[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9):2543-2549.
- [20] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 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.
- [21] 如克亚·热合曼, 阿里木江·卡斯木, 哈力木拉提·阿布莱提. 基于 MSPA 和 MCR 模型的图木舒克市生态安全格局构建[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(5):229-237.
- [22] 黄苍平, 尹小玲, 黄光庆, 等. 厦门市同安区生态安全格局构建[J]. 热带地理, 2018, 38(6):874-883.

[23]潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10):3126-3136.

[24]俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999(1):10-17.

[25]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(9):2406-2412.