

# 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

李明慧<sup>1, 3</sup> 周启刚<sup>1, 2, 3</sup> 孟浩斌<sup>1, 3</sup> 彭春花<sup>1, 3</sup> 刘栩位<sup>1, 3</sup> 周浪<sup>1, 31</sup>

(1. 重庆工商大学 环境与资源学院, 重庆 400067;

2. 生态环境空间信息数据挖掘与大数据集成重庆市

重点实验室, 重庆 401320; 3. 重庆工商大学 公共管理学院, 重庆 400067)

**【摘要】:** 三峡库区是长江上游生态环境集敏感、脆弱、复杂为一体的地区, 其生态安全格局的构建对维护区域生态安全、实现区域可持续发展具有重要作用。以三峡库区重庆段为研究区, 采用 2018 年土地利用现状数据和遥感数据, 构建生态服务重要性与生态敏感性评价体系, 综合确定生态源地; 以坡度、起伏度、土地利用类型确定阻力值, 采用最小累积阻力模型构建生态廊道, 最终形成三峡库区重庆段生态安全格局。研究结果表明: 三峡库区重庆段生态源地面积 13660.80km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 29.61%, 主要分布于巫溪、奉节、石柱、开州等区县; 生态廊道连接生态源地, 共 81 条, 总长度为 3069.29km, 廊道呈树状辐射分布, 呈现“东北-西南”树状分布的空间格局; 生态源地与生态廊道共同形成三峡库区东北生态城镇圈、三峡库区西南都市生态圈以及连接两圈的三峡库区中部走廊的“一廊两圈”生态安全格局。研究结果对保障三峡库区生态安全具有重要意义, 可为三峡库区生态环境环境保护提供科学依据。

**【关键词】:** 三峡库区 最小累积阻力模型 生态安全格局

**【中图分类号】:** X321 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-1916-11

随着我国生态文明建设全面推进, 生态环境保护已初见成效, 但生态环境与社会经济发展之间的矛盾依然突出, 各类问题纷繁复杂, 相互交织, 生态环境的安全形势依然严峻<sup>[1]</sup>。三峡库区位于长江中下游平原与四川盆地的结合部是长江流域重要的生态屏障区, 具有复杂的自然生态条件和社会经济特征<sup>[2]</sup>, 开展三峡库区生态安全格局的研究有助于有效缓解生态保护与经济之间的矛盾关系, 构建结果可为三峡库区的生态修复提供空间依据, 对系统维护三峡库区及国家的生态安全具有重要意义<sup>[3]</sup>。

生态安全格局着重维护区域生态过程的连通性与整体性, 构建生态安全格局是维护生态安全的有效途径<sup>[4]</sup>。当前, 众多学者对生态安全格局的构建方法展开了大量研究, 刘道飞等<sup>[5]</sup>利用最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, 即 MCR), 划定了林地、湿地、草地、水系 4 类核心生态空间, 构建“三带两区、五脉连江、林田相间”的长吉生态安全格局。傅微等<sup>[6]</sup>通过

**作者简介:** 李明慧(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境规划与管理. E-mail: 532592604@qq.com

周启刚 E-mail: zqg1050@126.com

**基金项目:** 重庆市技术创新与应用发展重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxxmX0021); 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0497); 重庆工商大学研究生创新型科研基金(yjscxx2020-094-26)

对北京市的水文、地质灾害、文化遗产等的系统分析, 判别关键性景观格局, 构建了不同安全水平的综合生态安全格局。FU 等<sup>[7]</sup>采用热点分析法, 因地制宜构建两个生态安全格局, 提出黄土高原丘陵沟壑区生态安全格局优化策略。HAO 等<sup>[8]</sup>利用 InVEST 模型, 选取多个阻力因子构建阻力表面, 并运用最小累积阻力模型来综合构建唐县生态安全格局。PENG 等<sup>[9]</sup>基于电路理论通过计算“阻力”或“电流”来模拟异质景观中的生态系统过程, 从而确定生态走廊和主要生态节点, 判定不同项目下生态安全格局的潜在压力。在众多学者对构建生态安全格局研究中, 最小累积阻力模型应用到生态安全格局构建中能科学的识别源地、修正阻力面及廊道范围<sup>[10]</sup>, 更适用于大尺度下区域的生态安全格局研究。

目前, 三峡库区生态安全构建研究尺度多以县域为主<sup>[11,12]</sup>, 从区域整体尺度上构建格局相关研究较少, 其中三峡库区生态安全格局相关研究均以土地利用数据为基础由源地和阻力面共同构建, 用以识别土地利用冲突和景观格局优化<sup>[13]</sup>, 未考虑生态源地之间物质和能量交换的生态廊道对整体格局的影响。故本文在源地和阻力面的基础上构建生态过程密切相关的生态廊道, 并提出以源地廊道比, 科学划分研究区生态安全格局。因此, 本文以三峡库区重庆段为研究对象, 采用 2018 年遥感数据与生态环境数据, 构建生态系统服务重要性与生态因子敏感性评价体系, 在综合评价结果上识别生态源地。以最小阻力模型判断生态阻力面, 采用最小成本距离构建生态廊道, 最终形成三峡库区重庆段的生态安全格局, 以期为三峡库区生态环境保护提供借鉴和参考。

## 1 研究区概况

三峡库区涵盖重庆市和湖北省的多个区县, 东起湖北夷陵区, 西至重庆江津区。三峡库区重庆段地理位置介于东经 105° 49' ~110° 12', 北纬 28° 31' ~31° 44', 共包括 22 个区县(图 1)。三峡库区重庆段位于长江上游末端, 地形、地貌复杂, 地表起伏大, 主要以山地、丘陵为主。该区域是长江上游生态敏感区之一, 生态环境脆弱, 同时又是我国西南部重要的生态走廊与生态屏障区, 研究区域物种资源丰富, 林地、耕地、水域、城市等生态要素分布广泛, 近年来库区人类活动加剧, 环境资源利用强度大, 经济发展与生态保护矛盾关系紧张, 亟需开展生态安全格局构建研究。



图 1 研究区概况

## 2 数据源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文以 2018 年为研究基准年, 涉及到的数据包括三峡库区重庆段土地利用类型、气象、DEM、TM、NDVI、土壤等数据。研究区遥感影像(Landsat8 OLI)与 DEM 均来源于地理空间云数据, 空间分辨率为 30m×30m; 土地利用数据来自遥感影像目视解译, 根据影像精度结合三峡库区实际情况, 将土地利用类型划分为水域、建设用地、林地、草地、耕地和未利用地六类; NDVI 数据

来源于遥感影像反演；气象数据来源于中国气象数据网；土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心的 1:100 万世界土壤数据库 (HWSD) 中国土壤数据集。研究粒度为 200m 时生态源地的连通性较好<sup>[14]</sup>，故本文空间分辨率统一为 200m。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 生态源地提取

生态源地是指生态系统相对稳定的区域，通过提供生态供给服务以及贡献生态服务功能，维持区域生态总体安全，促进生态系统服务功能的良性发展<sup>[15]</sup>。本研究叠加生态因子敏感性以及重要生态系统服务重要性两个层次的评价结果，识别其最优生态斑块作为生态源地。生态敏感性评价结合三峡库区集复杂、敏感、脆弱集一体的生态特性以及自然—社会组成的复合系统特点，参考相关文献<sup>[16]</sup>选取植被覆盖度、高程、坡度、土地利用类型、水体、生态保护区等 6 类作为生态敏感性因子，并对 6 类生态因子敏感性加权叠加，以自然断点法划分等级，最终获得评价结果。生态系统服务重要性评价结合重庆市三峡库区环境特征，选用水源涵养重要性<sup>[17]</sup>、土壤保持重要性<sup>[18]</sup>、生境质量<sup>[19]</sup>3 个指标构建生态系统服务重要性评价体系。在三峡库区重庆段生态敏感性评价及生态系统服务重要性评价结果的基础上，将上述两类图进行叠加，依据变异系数法确定指标权重，将计算结果按自然段法进行综合划分，提取优质斑块作为生态源地。

表 1 生态因子敏感性评价及生态系统服务重要性评价体系

| 评价类型        | 指标   | 计算公式  | 参数   |
|-------------|--|---|--|
| 生态因子敏感性评价   | 植被覆盖度<br>高程<br>坡度<br>土地利用类型<br>水体功能<br>生态保护区 | $P_i = \sum_{i=1}^{i=n} F_i W_i$  | $P_i$ 为生态敏感性综合评价得分； $W_i$ 为第 $i$ 个因子影响权重； $F_i$ 为第 $i$ 个因子的生态敏感性指数   |
| 生态系统服务重要性评价 | 水源涵养   | $SS_b = \sqrt[3]{\prod_{a=1}^3 C_a}$  | $SS_b$ 为第 $b$ 空间单元水源涵养重要性综合指数； $C_a$ 为 $a$ 因素重要性等级值  |
|             | 土壤保持   | $A = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$                                  | $A$ 为预测土壤侵蚀量； $R$ 为降雨侵蚀力； $K$ 为土壤可侵蚀因子； $L$ 为坡长因子； $S$ 为坡度因子； $C$ 为植被覆盖因子； $P$ 为土壤保持措施因子                     |
|             | 生境质量   | $Q_{xj} = H_{xj} \left( 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right)$ | $Q_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中像元 $x$ 的生境质量； $H_{xj}$ 为生境适宜性； $D_{xj}$ 为生境胁迫水平； $k = D_{xj}/2$ 为半饱和常数； $z=2.5$ 为归一化常量 |

### 2.2.2 生态综合阻力面构建

物种的扩散和生态因子在空间尺度下的流通，其受阻碍程度的差异化表现很大程度源于自然以及人为干扰因子的影响。生态阻力越大，物种的扩散过程越迟缓，生态服务及功能在流动中损失越多<sup>[20]</sup>。综合考虑研究区位于长江上游生态屏障区，集复杂、脆弱、敏感于一体的生态特性，选择土地利用类型和地貌因子两类主要阻力因子。其中土地利用类型直接影响研究区生境质量的高低程度以及生态系统的稳定型，按照各个斑块土地利用类型来评价生态阻力是前人研究中关于阻力面构建的常用方法。而研究区地貌复杂、地形起伏大，山多坡陡的地貌特征一定程度上将阻碍生态源地之间的生物流连通，干扰生物间的交流<sup>[21]</sup>。利用 ArcGIS 软件对各阻力面加权叠加得到综合阻力面。参考已有研究<sup>[22]</sup>，确定生态阻力权重及系数如表 2 所示。

### 2.3 生态廊道识别

生态廊道连通一定区域内彼此相邻的优质生态源地，构建出一条生物流连通性极佳的物种扩散通道，是沟通生态源地的桥梁<sup>[23]</sup>。生态廊道的构建能达到保护和恢复生物多样性、维护和传递生态功能的重要作用<sup>[24]</sup>。考虑生态廊道为相邻两级生态源地间拥有最小生态阻力通道的特点，在已提取的生态源地及构建的生态阻力方面基础上，基于最小累积阻力模型计算生态源地间最小累积阻力值的路径，从而提取生态廊道。基本公式如下：

表 2 生态阻力面因子权重与系数

| 阻力因子   |         | 权重   | 指标        | 阻力系数 |
|--------|---------|------|-----------|------|
| 土地利用类型 | 各地类因子阻力 | 0.5  | 林地        | 20   |
|        |         |      | 耕地        | 55   |
|        |         |      | 草地        | 70   |
|        |         |      | 水域        | 1    |
|        |         |      | 未利用地      | 80   |
|        |         |      | 建设用地      | 100  |
|        |         |      | 其他用地      | 500  |
| 地貌因子   | 坡度      | 0.25 | <8°       | 1    |
|        |         |      | 8° ~15°   | 10   |
|        |         |      | 15° ~25°  | 50   |
|        |         |      | 25° ~35°  | 75   |
|        |         |      | >35°      | 100  |
|        |         |      | <25°      | 1    |
|        | 起伏度     | 0.25 | 25° ~50°  | 10   |
|        |         |      | 50° ~70°  | 50   |
|        |         |      | 70° ~100° | 75   |
|        |         |      | >100°     | 100  |

$$R_{MC} = f_{min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (1)$$

式中： $R_{MC}$  为第  $j$  块生态源斑块到达相邻某点的最小累积阻力值； $f$  为最小累积阻力与生态过程拥有正相关关系的函数； $D_{ij}$

为物种从第  $j$  块生态源地到第  $i$  个景观栅格的空间距离； $R_i$  则定义为第  $i$  个景观栅格对某生态过程或物种运动的阻力系数。

### 3 结果分析

#### 3.1 生态源地识别

研究区生态系统服务功能重要性等级分布情况如图 2 所示，三峡库区重庆段三类生态系统服务功能重要性在空间上的分布存在一定相似性。其中，土壤保持高值在整个研究区零星分布，仅研究区东北部高值分布相对密集，主要因为土壤保持能力与三峡库区的土壤侵蚀敏感性有直接关系。水源涵养能力大部分区域处于较重要和中度重要等级，研究区东北部整体水源涵养能力明显高于其他区域，与降水量多、地形起伏大、植被覆盖度高有关。生境质量呈现两极分化，极重要与一般重要占比大，其中极重要区域集中于东北部的巫山、巫溪、石柱等区县，一般重要区域集中于重庆主城区，与东北部自然保护区数量多、面积大有关。

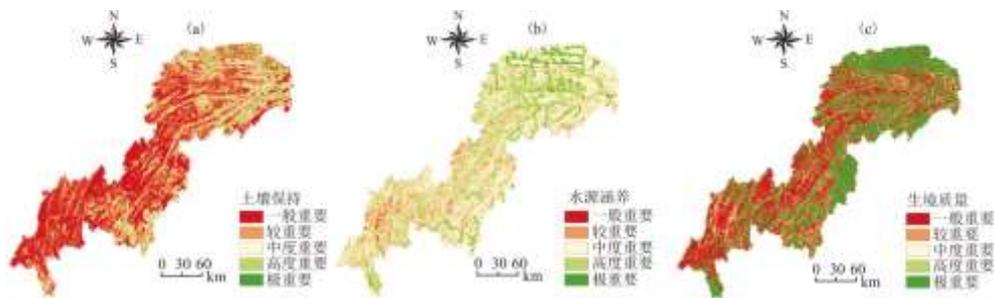


图 2 三峡库区重庆段生态系服务功能重要性等级

基于三峡库区重庆段水源涵养、生境质量、土壤保持等的计算，将 3 种生态系统服务评价结果进行等权叠加，依据自然断点法将研究区划分为极重要区、高等重要区、中等重要区、较重要区、一般重要区，形成三峡库区重庆段生态系统服务空间格局(图 3a)，评价结果见表 3。极重要区域面积 190.04km<sup>2</sup>，面积占比最小，占研究区总面积的 0.41%，主要分布于巫溪的红池坝国家森林公园、科研教育用地、石柱七曜山国家地质公园等。高度重要区域面积 3841.88km<sup>2</sup>，占研究区总面积的 8.33%，主要集中分布于巫山的生态红线范围内。中度重要区域面积 15654.18km<sup>2</sup>，占研究区总面积的 33.93%。较重要面积最大，为 15850.52km<sup>2</sup>，占研究区总面积的 34.36%。一般重要面积 10597.83km<sup>2</sup>，占研究区总面积的 22.97%，主要分布于重庆主城区及附近周边区县。

对地质地貌(坡度、高程)、水系防护(水域)、覆被类型(土地利用类型、植被覆盖度)和生态保护区(生态红线以及自然保护区)四类六种生态因子的生态敏感性进行单因子评价，评价结果如图 4 所示。植被覆盖度高值敏感区域主要分布于研究区的北部，敏感性整体由东北向西南降低。极敏感区域的土地利用类型多为有林地和水域，建设用地的敏感性最低。基于地质地貌进行的敏感性分析空间分布差异明显，这与库区地形复杂、地貌类型多样密切相关。基于水系防护与生态保护区的敏感性分析空间分布差异明显，主要与水系、生态保护区的空间分布有关，高值敏感性主要分布与长江两岸与研究区北部。

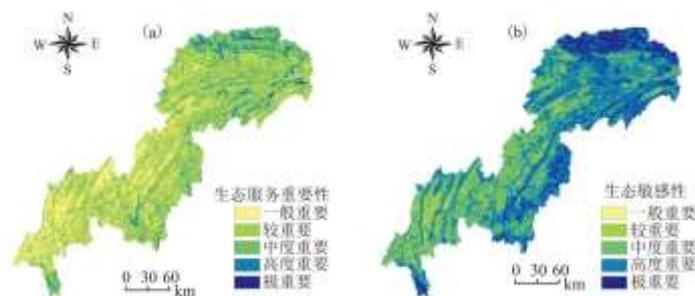


图 3 三峡库区重庆段生态敏感性空间格局等级

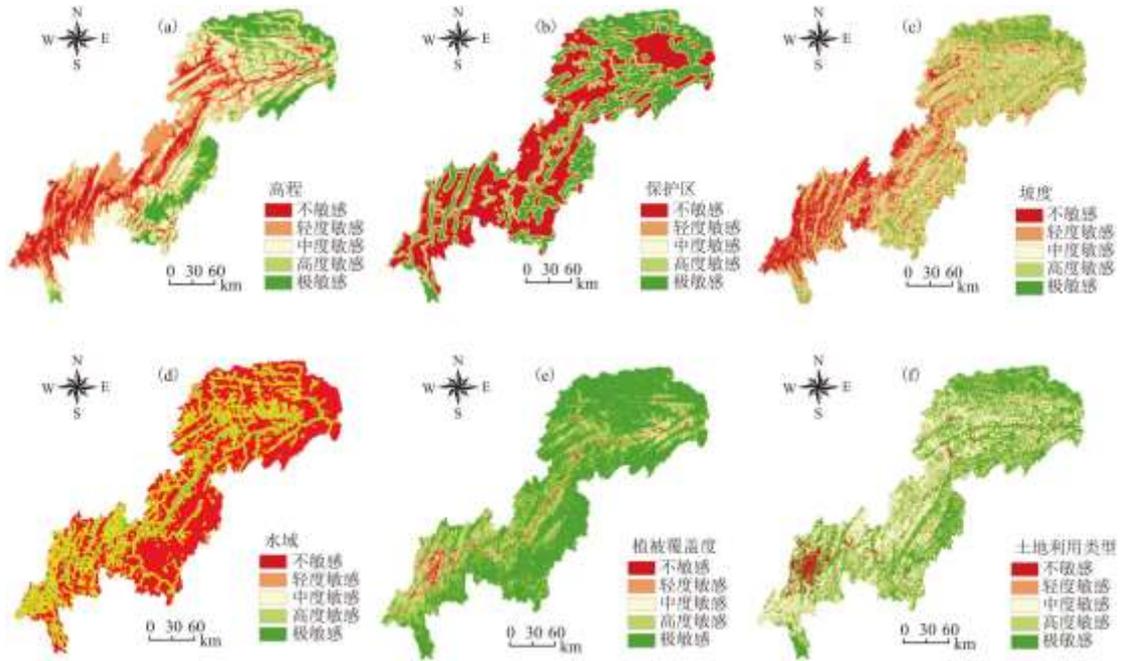


图 4 三峡库区重庆段单因子生态敏感性

单项生态因子敏感性加权叠加形成生态敏感性空间格局(图 3b), 其生态敏感性评价结果见表 3。极敏感区域面积 5263.45km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 11.41%, 主要集中分布于研究区的东北地区。高度敏感区域面积 21846.55km<sup>2</sup>, 面积占比最大, 占研究区总面积的 47.46%, 在整个研究区均有分布, 主要集中分布于研究区东北部和中部地区。中度敏感区域面积 22563.10km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 37.46%, 主要分布于西部和中部地区。轻度敏感区面积 1702.65km<sup>2</sup>, 占研究区总面积 3.69%, 主要分布于西南部区域。不敏感区面积 42.06km<sup>2</sup>, 面积占比最小, 占研究区总面积的 0.09%, 主要分布于重庆主城区范围。

表 3 生态系统服务重要性与生态因子敏感性评价结果

| 生态系统服务重要性 |                       |        | 生态因子敏感性 |                       |        |
|-----------|-----------------------|--------|---------|-----------------------|--------|
| 评价等级      | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 占比 (%) | 评价等级    | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 占比 (%) |
| 一般重要      | 10597.83              | 22.97  | 不敏感     | 42.06                 | 0.09   |
| 较重要       | 15850.52              | 34.36  | 轻度敏感    | 1702.65               | 3.69   |
| 中等重要      | 15654.18              | 33.93  | 中度敏感    | 17279.74              | 37.46  |
| 高度重要      | 3841.88               | 8.33   | 高度敏感    | 21846.55              | 47.35  |
| 极重要       | 190.04                | 0.41   | 极敏感     | 5263.45               | 11.41  |

对三峡库区重庆段生态系统服务重要性与生态因子敏感性的分析结果等权叠加, 将研究区划分为生态源地、一般性生态用地、非生态用地(图 5)。三峡库区重庆段生态用地共计 35474.13km<sup>2</sup>, 非生态用地共计 10660.31km<sup>2</sup>。在划分出的生态源地中剔除

小于 10km<sup>2</sup> 的碎小图斑，最终确定生态源地 13660.80km<sup>2</sup>，研究区生态源地各区县的面积分布如图 6 所示。重庆主城区的生态源地面积共计 428.50km<sup>2</sup>，仅占总研究区生态源地的 3.14%，其中渝中区和 大渡口 区无生态源地。巫溪县的生态源地面积为 2919.15km<sup>2</sup>，占 24.26%。总体来看研究区生态源地集中分布与三峡库区重庆段东北部，源地数量沿东北向西南逐渐减少，研究区东北部因自然保护区、生态红线数量多，面积大，同时东北部地区生态因子敏感性高，生态服务能力强，而研究区西南部为重庆市主城区，主要体现城市功能。

### 3.2 最小累积模型判定的生态阻力面

基于土地利用类型空间分布所形成的生态阻力空间分布如图 7a 所示，其生态阻力空间差异十分明显，大部分区域生态阻力值较低，空间分布主要呈西南-东北走向，东北、东南区域整体土地利用类型生态阻力值较低，其中水域生态阻力值最低，生态阻力高值分布区域主要集中在三峡库区重庆段主城区以及水域沿线分布的城镇。基于坡度和起伏度空间分布所形成的生态阻力空间分布如图 7b、7c 所示，三峡库区重庆段的坡度生态阻力大小空间分布呈西南-东北走向，北部生态阻力值最高，东部和南部生态阻力值次之，中部与西部生态阻力值最低；起伏度的生态阻力空间分布特征与坡度生态阻力空间分布特征相一致。将三个阻力面进行叠加形成综合阻力面(图 8)，研究区内综合生态阻力值差异明显，生态阻力值空间分布呈东北-西南走向，高生态阻力值主要集中分布在中部、西部和南部，丰都县和忠县整体生态阻力值最高。低生态阻力值空间分布主要在研究区东北地区，巫溪县整体生态阻力值最低。

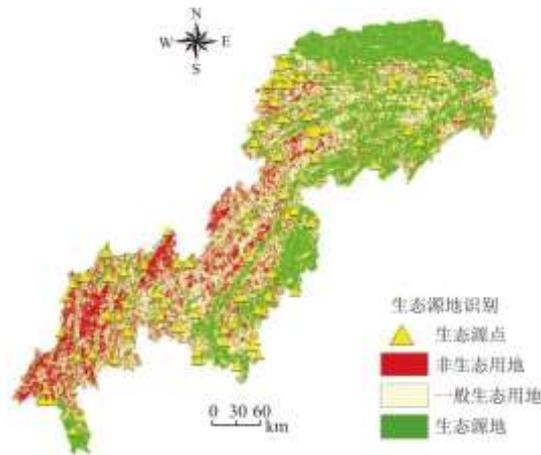


图 5 研究区生态源地

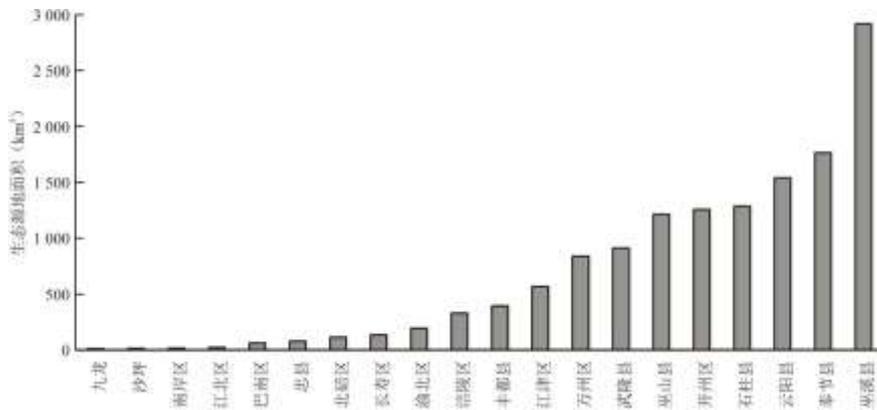


图 6 三峡库区重庆段各区县生态源地面积

### 3.3 生态廊道识别与生态安全格局构建

生态廊道的价值在于将不同区域连接形成更为完整的生态系统和提高其空间服务价值，主要承担物种迁移的传输通道、生物生存繁殖的生境等基础功能，同时承担防风滤污的保护隔离和生态景观建设等生态修复功能<sup>[25]</sup>。基于生态源地与综合阻力面，利用 ArcGIS 软件的距离分析模块来创建它们之间最小成本路径，以形成生态源地间的生态廊道(图 8)。

经统计，三峡库区重庆段生态源地共 81 条生态廊道，总长度为 3069.29km，广泛分布于研究区。研究区各区县生态廊道长度如图 9 所示，东北部生态廊道长度均大于研究区西南部，其中东北部的核心区域云阳县生态廊道长 392.86km，占整体生态廊道的 12.80%，西南部的江北区生态廊道长 18.24km，仅占 0.59%。研究区东北部廊道向四周发散，西南部廊道主要沿着研究区边缘走向，中部廊道则由西向东延伸。生态廊道沿东北向西南延伸，有效提高了各生态源地之间的空间连通性。

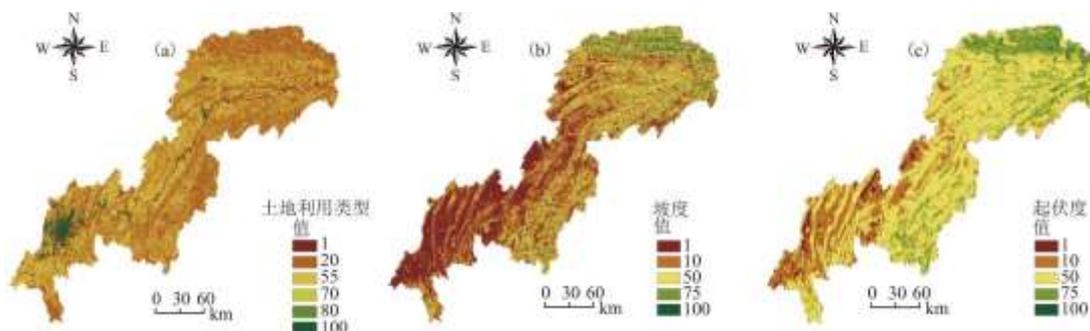


图 7 三峡库区重庆段生态阻力值

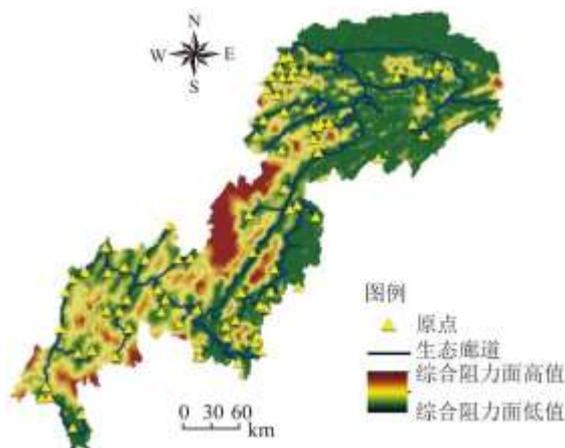


图 8 三峡库区重庆段生态廊道

生态安全格局是在一定社会、经济发展和生态保护目标的约束下，由一系列功能各异、相对独立的景观单元结合生态廊道构成的，能恢复或保持对区域生态系统有重要作用的生态过程畅通，从而保障区域生态安全的最优空间格局<sup>[26]</sup>。生态安全格局由生态源地与生态廊道共同组成，从区县尺度上，统计各区县的生态源地面积和生态廊道长度，计算源地廊道比表征区县生态源地与生态廊道的比重，其比重越大，越有利于生态过程的流动，具体见表 4。可以看出：研究区东北部的整体源地廊道比较高，西南部源地廊道较低。最终以源地廊道比结合研究区区县的空间位置划分三峡库区重庆段的生态安全格局(图 10)。

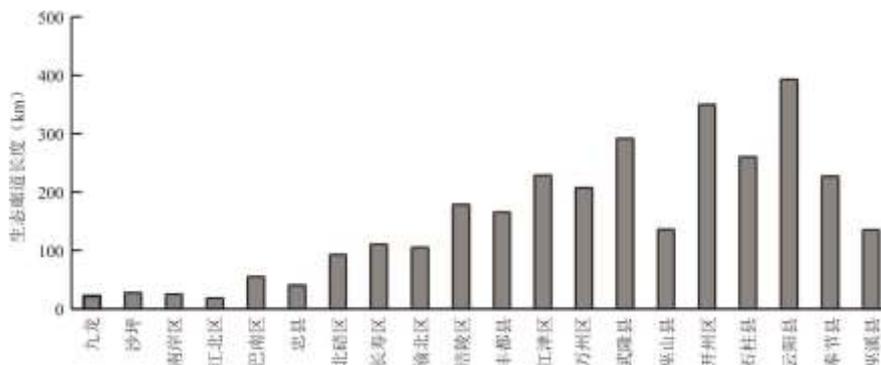


图9 三峡库区重庆段各区县生态廊道长度

生态源地主要分布在研究区东北部(巫溪、巫山、奉节、开县东北部及云阳东部)、中部(石柱东南部、丰都中部及东南部、武隆中部、涪陵东部)、西南部(江津南部、北碚北部、渝北中部及东部)。该区域生态用地比例高,生境质量较好,河网密布、水系发达,长江、嘉陵江、乌江等重要河流穿区而过,为生物资源保护、水资源安全和营养物质的保持提供了重要保障。连接生态源点的廊道呈树状辐射分布,呈现“东北-西南”树状分布的空间格局。从总体趋势看可总结为“一廊两圈”,其中,“两圈”为三峡库区东北城镇生态圈和三峡库区西南都市生态圈,“一廊”指连接两圈的三峡库区中部走廊。

表4 三峡库区重庆段各区县源地廊道比

| 生态安全格局  | 区县名称 | 生态源地(km <sup>2</sup> ) | 生态廊道(km) | 源地廊道比(km) |
|---------|------|------------------------|----------|-----------|
| 西南都市生态圈 | 九龙坡区 | 9.86                   | 21.89    | 0.45      |
|         | 沙坪坝区 | 12.74                  | 27.50    | 0.46      |
|         | 南岸区  | 17.16                  | 24.76    | 0.69      |
|         | 巴南区  | 61.19                  | 55.16    | 1.11      |
|         | 江北区  | 22.03                  | 18.24    | 1.21      |
|         | 北碚区  | 112.64                 | 92.97    | 1.21      |
|         | 长寿区  | 133.88                 | 110.16   | 1.22      |
|         | 江津区  | 565.66                 | 228.73   | 2.47      |
|         | 渝北区  | 192.87                 | 105.46   | 1.83      |
| 中部生态走廊  | 涪陵区  | 328.32                 | 178.44   | 1.84      |
|         | 忠县   | 78.44                  | 40.25    | 1.95      |
|         | 丰都县  | 394.32                 | 165.51   | 2.38      |
|         | 石柱县  | 1285.57                | 260.29   | 4.94      |
|         | 武隆县  | 912.19                 | 291.52   | 3.13      |

|         |     |         |        |       |
|---------|-----|---------|--------|-------|
| 东北城镇生态圈 | 开州区 | 1257.76 | 349.75 | 3.60  |
|         | 云阳县 | 1539.75 | 392.86 | 3.92  |
|         | 万州区 | 839.19  | 207.29 | 4.05  |
|         | 奉节县 | 1763.53 | 226.69 | 7.78  |
|         | 巫山县 | 1212.25 | 136.24 | 8.90  |
|         | 巫溪县 | 2919.15 | 135.59 | 21.53 |



图 10 三峡库区重庆段生态安全格局

## 4 结论与讨论

本文以三峡库区重庆段为研究区，分析生态服务重要性与生态敏感性评价结果，综合确定三峡库区重庆段生态保护重要空间，进而识别生态源地。通过土地利用类型、坡度、起伏度确定的生态阻力值，形成综合阻力面，以最小累积阻力模型识别生态廊道，提出源地廊道比，结合区县的空间位置，最终形成三峡库区重庆段生态安全格局，结论如下：

(1) 研究区生态源地空间分布差异较大，主要分布于东北部。三峡库区重庆段生态源地面积 13660.80km<sup>2</sup>，占研究区总面积的 29.61%，主要分布于巫溪、奉节、石柱、开州等敏感性高、生态服务能力强的区县。

(2) 生态廊道呈树状辐射分布，呈现“东北-西南”树状分布空间格局。生态廊道连接生态源地，共 81 条，总长度为 3069.29km，研究区生态廊道由东北部向四周发散，西南部廊道主要沿着研究区边缘走向，中部廊道则由西向东延伸。

(3) 由生态源地与生态廊道共同形成“一廊两圈”的生态安全格局。三峡库区东北城镇生态圈以水源涵养、土壤保持、生态系统多样性维护为主，三峡库区西南都市生态圈重点在于减缓城市边界扩展速度、提升生境质量，三峡库区中部生态走廊是保障东北郊县生态圈与三峡库区西南都市生态圈的生态过程的畅通性。“一廊两圈”的生态保护彼此协调，互相促进，构建重庆市三峡库区生态安全格局，加快形成三峡库区生态管控空间指南。

---

(4) 本文关于生态阻力值设定是由土地利用类型、坡度、起伏度共同组成,更加全面的考虑生态过程中的流通性问题,提升了生态阻力面的准确性。同时,本文与以往研究区的生态格局构建研究相比,在区域尺度上以生态敏感性和生态系统服务重要性共同确定生态源地,提高了源地识别的准确性,同时增加了生态廊道判定,以源地-廊道共同构建生态安全格局,对三峡库区生态恢复提供科学依据。因本文选取的研究区尺度较大,故生态源地的识别时,剔除的碎小图斑较多,各区县生态廊道的判定较粗糙,因此后期研究中需进一步缩小研究区,提高研究的精度,精准构建区域生态安全格局。

#### 参考文献:

- [1]段娟. 改革开放以来中国生态文明建设的经验启示与展望[J]. 中州学刊, 2018(9):63-70.
- [2]苏科, 黄志亮. 底子薄、空间窄、生态弱地区发展中政府-市场角色定位研究——以三峡重庆库区为例[J]. 西部论坛, 2019, 29(4):14-28.
- [3]解亚丽, 柯小玲, 闵园园, 等. 基于超效率 DEA 模型的三峡库区生态效率评价及空间演化格局分析[J]. 中国环境管理, 2020, 12(1):113-120.
- [4]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.
- [5]刘道飞, 宋崴, 王冬明, 等. 基于最小累积阻力模型的长吉生态安全格局构建[J]. 地理空间信息, 2019, 17(11):87-91, 11-12.
- [6]傅微, 俞孔坚. 基于生态安全格局的城市大规模绿化方法——北京百万亩平原生态造林[J]. 城市规划, 2018, 42(12):125-131.
- [7]FU Y J, SHI X Y, HE J. Identification and optimization strategy of county ecological security pattern:A case study in the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 112(C).
- [8]HAO Y, ZHANG N, DU Y, et al. Construction of ecological security pattern based on habitat quality in Tang County, Hebei, China[J]. The journal of applied ecology, 2019, 30(3).
- [9]PENG J, YANY Y, LIU Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. Science of The Total Environment, 2018, 644:781-790.
- [10]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.
- [11]李潇然, 李阳兵, 王永艳, 等. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7):1959-1967.
- [12]官冬杰, 赵祖伦, 王秋艳, 等. 三峡库区景观生态安全格局优化研究——以重庆市开州区为例[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2):171-177.
- [13]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.

[14]曾黎, 杨庆媛, 杨人豪, 等. 三峡库区生态屏障区景观格局优化——以重庆市江津区为例[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1364-1373.

[15]PENG J, ZHAO S Q, DONG J Q, et al. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities. *Environmental Modelling and Software*, 2019, 117:214-222.

[16]侯志华, 马义娟, 贾宇平. 太原市域生态敏感性综合评价[J]. 生态科学, 2018, 37(4):204-210.

[17]赵予爽, 刘春霞, 李月臣, 等. 重庆市生态系统服务功能重要性评价[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 34(3): 44-53, 141.

[18]杨伟州, 邱硕, 付喜厅, 等. 河北省生态功能区划研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4):269-276.

[19]李艳春. 区域生态系统服务功能重要性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.

[20]陈燕, 燕彩霞, 罗婵, 等. 长江三角洲生态系统服务重要性空间分布特征评价[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1):103-108.

[21]廖程浩, 刘雪华. 阳泉煤炭开采对区域植被影响范围的 3S 识别[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2):185-191.

[22]储金龙, 王佩, 顾康康, 等. 山水型城市生态安全格局构建与建设用地开发策略[J]. 生态学报, 2016, 36(23):7804-7813.

[23]HELI S, RISTO V, VILLE S, et al. Woodland key habitats and stream biodiversity: Does small-scale terrestrial conservation enhance the protection of stream biota[J]. *Biological Conservation*, 2014, 170:10-19.

[24]郑好, 高吉喜, 谢高地, 等. 生态廊道[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(2):137-144.

[25]倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1):204-216.

[26]俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 等. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10):5163-5175.