

# 基于时间序列的滑坡灾害生态风险评价与多尺度风险管理研究 ——以三峡库区为例

于宪煜<sup>1,2,3\*\*</sup>, 张梦寒<sup>1</sup>

(1: 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

(2: 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 武汉 430068)

(3: 生态环境岩土与河湖生态修复学科引智创新示范基地, 武汉 430068)

**摘要:** 三峡库区作为国家典型生态脆弱区和滑坡灾害频发区之一, 滑坡灾害的发生严重威胁着库区生态系统的健康和稳定。因此, 开展三峡库区滑坡灾害生态风险评价对于库区环境治理和生态风险防范至关重要。基于“易发性-脆弱性-潜在损失”三维模型, 考虑长时间序列影响, 采用随机森林模型评估滑坡灾害易发性, 借助景观格局指数表征生态脆弱性, 利用生态系统服务定量核算滑坡灾害潜在生态损失, 开展 2000-2020 年三峡库区滑坡灾害生态风险评价, 并划分风险防范分区, 提出相应风险管理措施。结果表明: ①滑坡灾害生态风险较高和高值区域分布较为散乱, 但整体呈现沿长江两岸的带状分布特征, 中等风险和较低风险表现出沿长江及其支流两岸向外围扩散, 低风险区域占研究区总面积的 60%左右, 主要集中于三峡库区的外围。②2000-2010 年研究区滑坡易发性和生态脆弱性呈增加趋势, 而潜在生态损失显著降低, 使得滑坡生态风险呈下降趋势; 2010-2020 年情况相反, 研究区滑坡生态风险呈现上升趋势, 且最终高和较高等级滑坡灾害生态风险地区呈扩张趋势。③按照风险结构主导因子、风险变化趋势和潜在生态损失将研究区分为 16 种风险防范分区, 通过合理调整风险管理的力度和侧重点, 制定研究区整体、分段和重点区县多尺度风险分段管理策略, 以期实现灾害综合防范、管理精准施策和资源高效配置。

**关键词:** 滑坡灾害生态风险; 滑坡易发性; 生态脆弱性; 潜在生态损失; 三峡库区

## Ecological Risk Assessment and Multi-scale Risk Management of Landslide Disasters Based on Time Series: A Case Study of Three Gorges Reservoir Area, China

Yu Xianyu<sup>1,2,3\*\*</sup>, Zhang Menghan<sup>1</sup>

(1: School of Civil Engineering, Architecture and the Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2: Key Laboratory of Health Intelligent Perception and Ecological Restoration of River and Lake, Ministry of Education, Wuhan 430068, China)

(3: Innovation Demonstration Base of Ecological Environment, Geotechnical and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Wuhan 430068, China)

\* 2024-10-25 收稿; 2025-02-11 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (41807297) 资助。

\*\*通信作者; E-mail: yuxianyu@hbut.edu.cn.

**Abstract:** The Three Gorges Reservoir Area (TGRA), being one of the country's typical ecologically vulnerable areas and areas prone to frequent landslide disasters, the occurrence of landslide disasters severely endangers the health and stability of the reservoir area's ecosystem. Therefore, the ecological risk assessment of landslide disasters in the Three Gorges Reservoir Area is crucial for the environmental management and ecological risk prevention in the reservoir area. Based on the three-dimensional model of “susceptibility-vulnerability-potential loss”, considering the impact of long - time series, the random forest model was adopted to evaluate the susceptibility of landslide disasters. Landscape pattern indices were used to represent ecological vulnerability, and the potential ecological losses caused by landslide disasters were quantitatively calculated through ecosystem services. The ecological risk assessment of landslide disasters in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020 was carried out. Risk prevention zones were divided, and corresponding risk management measures were proposed. The results indicate that: ①Areas with relatively high and high ecological risks of landslide disasters are scattered in distribution, yet on the whole, they show a zonal distribution along both banks of the Yangtze River. Areas with moderate and relatively low risks spread from both banks of the Yangtze River and its tributaries to the periphery. Low - risk areas account for about 60% of the total area of the study region, mainly concentrated on the periphery of the Three Gorges Reservoir Area. ②The landslide susceptibility and ecological vulnerability in the study area showed an increasing trend from 2000 to 2010, while the potential ecological loss was significantly reduced, resulting in a decreasing trend of landslide ecological risk; the opposite is true from 2010 to 2020, when the landslide ecological risk in the study area showed an increasing trend, and the ecological risk areas of the final high and higher-grade landslide hazard showed an expanding trend. ③The study area was divided into 16 risk prevention zones according to the dominant factors of the risk structure, the trend of risk change, and the potential ecological losses. By reasonably adjusting the intensity and focus of risk management, a multi - scale risk - segmented management strategy for the overall study area, different sections, and key districts and counties is formulated. This aims to achieve comprehensive disaster prevention, precise management measures, and efficient resource allocation.

**Key words:** ecological risk of landslide disasters; landslide susceptibility; ecological vulnerability; ecological potential damage; TGRA

生态风险评价是综合运用统计学、生态学、环境科学等多学科知识,并借助遥感、地理信息系统等诸多技术方法,评估一种或多种因素对生态系统及其组分造成不利影响的可能性<sup>[1]</sup>。其目的在于借助评价结果制定相应的灾害防控措施以及生态保护决策,以便更好地开展环境保护工作<sup>[2]</sup>。滑坡作为世界上最常见且最具危害性的自然灾害之一,不仅严重威胁着人民的生命财产安全,同时也使得生态环境面临极大的风险<sup>[3]</sup>。因此,开展滑坡生态风险评价对于促进经济、社会和生态环境可持续发展具有十分重要的意义。

目前,常见的滑坡灾害生态风险评价模型有“概率-损失”二维模型和“危险性-脆弱性-潜在损失”三维模型<sup>[4]</sup>。其中,“概率-损失”模型侧重于风险发生的概率及可能造成的后果,缺乏从风险源到风险受体的暴露响应过程<sup>[5,6]</sup>。而“危险性-脆弱性-潜在损失”模型则正是融入了这一过程,使得风险因果链更加完整<sup>[7-9]</sup>。针对“危险性-脆弱性-潜在损失”三维模型的定量表达,危险性聚焦滑坡灾害发生的概率,即滑坡易发性,常见的研究模型主要包含经验驱动模型和数据驱动模型两种,其中基于数据驱动的随机森林模型有较高的稳定性和预测精度,能有效处理异常值问题,是滑坡灾害预测最常用的方法之一<sup>[10,11]</sup>。脆弱性是系统及其组成成分在面对外界人为干扰和内部自身环境变化时所表现出的敏感性和自我恢复能力,是生态

系统作为风险受体暴露在滑坡风险源下的直接响应<sup>[12,13]</sup>。相关评价方法主要有模糊评价法、指标体系综合评分法和景观格局指数法等<sup>[14-16]</sup>。其中,景观格局指数法适用于区域、流域、城市等较大尺度的空间分析,能够揭示灾害胁迫下生态系统所表现出的敏感性和适应性特征<sup>[16]</sup>。潜在损失即系统遭受风险源干扰和胁迫后未来一段时间内可能表现出的状态<sup>[4]</sup>。生态系统服务作为人与自然连接的纽带,对维持生态系统可持续发展和保障人类社会发展等方面具有举足轻重的作用<sup>[17]</sup>。三峡库区作为重要的水土保持区、水源涵养和洪水调控区以及生物多样性保护区,土壤保持、水源涵养、粮食供给以及生境质量等生态系统服务对维护三峡库区生态安全至关重要<sup>[18-20]</sup>。

然而,滑坡灾害生态风险是一个动态变化的过程,单一年份的“危险性-脆弱性-潜在损失”三维模型虽能实现滑坡灾害生态风险的量化,却难以满足后续风险防范区划和管理策略制定的深层次需求<sup>[21]</sup>。滑坡灾害生态风险是生态系统受滑坡风险长期干扰所累积形成的结果,而当前滑坡灾害生态风险研究多聚焦于特定时间节点下的静态特征,忽略了风险时间上的演变趋势<sup>[22]</sup>。时间序列通过选取多个时间节点对研究主体进行分析,增强研究结果时间上的连贯性,并聚焦研究结果变化趋势,可为预测未来结果提供有力的依据<sup>[23,24]</sup>。实验结果表明,与传统研究中进行不连续时间的评价相比,基于时间序列的持续评价能够获得更加准确的风险状态,单年份的生态风险评价存在偶然性,多年结果更能代表该时间段的风险状况,可为防范化解区域生态风险提供更加全面的参考<sup>[25,26]</sup>。滑坡灾害生态风险研究的最终目的在于指导风险管理策略的制定。然而,当前相关研究较少,或策略制定过于宽泛,难以为后续风险管理决策提供全面参考<sup>[9]</sup>。然而,滑坡灾害生态风险是一个动态变化的过程,单一年份的“危险性-脆弱性-潜在损失”三维模型虽能实现滑坡灾害生态风险的量化,却难以满足后续风险防范区划和管理策略制定的深层次需求<sup>[21]</sup>。滑坡灾害生态风险是生态系统受滑坡风险长期干扰所累积形成的结果,而当前滑坡灾害生态风险研究多聚焦于特定时间节点下的静态特征,忽略了风险时间上的演变趋势<sup>[22]</sup>。时间序列通过选取多个时间节点对研究主体进行分析,增强研究结果时间上的连贯性,并聚焦研究结果变化趋势,可为预测未来结果提供有力的依据<sup>[23,24]</sup>。实验结果表明,与传统研究中进行不连续时间的评价相比,基于时间序列的持续评价能够获得更加准确的风险状态,单年份的生态风险评价存在偶然性,多年结果更能代表该时间段的风险状况,可为防范化解区域生态风险提供更加全面的参考<sup>[25,26]</sup>。因此,本文聚焦研究区整体、分段以及重点区县这三个尺度的风险特征,旨在通过合理调整风险管理的力度和侧重点,实现灾害综合防范、管理精准施策和资源高效配置。

三峡库区因其特殊的地理位置、多变的气候条件以及频繁的人类工程活动等诸多因素,使得库区内滑坡灾害、水土流失、生物多样性减少等问题日益凸显<sup>[27]</sup>。同时,三峡库区又是国家典型生态脆弱区和重点生态功能区,选取三峡库区作为研究区一定程度上具有特殊性和代表性<sup>[28]</sup>。因此,本文构建长时间序列下的“危险性-脆弱性-潜在损失”三维框架,量化三峡库区滑坡灾害生态风险,并分析其空间分布特征;探究 2000-2020 年三峡库区滑坡灾害生态风险变化趋势,增加风险结果时间维度上的连续性;最后进行滑坡灾害生态风险防范分区划分,并制定研究区整体、分段和重点区县多尺度风险防范策略,为区域生态风险机理研究和风险防范措施优化提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

三峡库区(28°56'~31°44'N, 106°16'~111°28'E, 如图 1 所示)位于大巴山、川东和川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元交汇处<sup>[29]</sup>。库区总面积约 5.8 万平方公里,地势东高西低,整体地形以山地、丘陵为主;

受峡谷和盆地特殊地形的影响,库区呈现典型的亚热带湿润季风气候,多年平均气温为 15~18℃,年降水量分布在 1000-1900mm 之间,具有明显的空间性和季节性;库区内地层复杂,断裂褶皱发育,从新元古界前震旦系到新生界第四系均有出露,以三叠系和侏罗系地层分布较广泛,岩性以泥岩、砂岩、页岩、灰岩为主<sup>[30,31]</sup>。受多变气候、复杂地形以及人类工程建设活动的影响,库区内滑坡等地质灾害频发<sup>[32]</sup>。据统计,自 2003 年蓄水以来,三峡水库已发现 5000 多处滑坡,其中 600 多处滑坡具有明显的活动性,这对当地居民生命财产安全、水利基础设施以及周边生态环境造成重大威胁<sup>[33]</sup>。

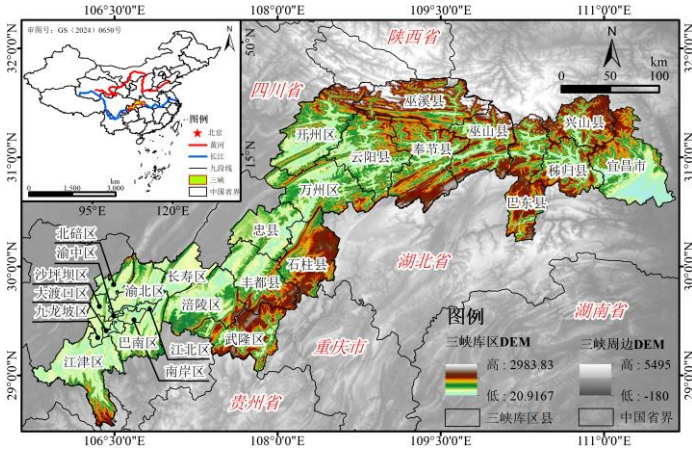


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

本文使用数据主要包括数字高程模型、土地利用、地质灾害、降水、土壤、潜在蒸散发、归一化植被指数、社会经济统计数据等多个数据集。考虑到数据精度和实验工作量,将数据统一重采样为 100 m 分辨率,数据信息如表 1 所示。

表 1 研究区数据来源

Table 1 Data sources of the study area

| 名称      | 数据来源                                                                                                          | 精度/m   | 类型  |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----|
| 高程      | 美国国家航空航天局 ASTER GDEM V3 数据<br>( <a href="https://earthdata.nasa.gov">https://earthdata.nasa.gov</a> )         | 30     | 栅格  |
| 归一化植被指数 | 美国国家航空航天局 MOD13Q1 数据<br>( <a href="https://search.earthdata.nasa.gov">https://search.earthdata.nasa.gov</a> ) | 250    | 栅格  |
| 根系限制层深度 | 中国 100m 分辨率基岩深度 ( <a href="http://globalchange.bnu.edu.cn">http://globalchange.bnu.edu.cn</a> )               | 100    | 栅格  |
| 滑坡点     | 中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )                                   | -      | 数据表 |
| 土地利用    | 中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )                                   | 30     | 栅格  |
| 子流域     | 中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )                                   | 二级流域   | 矢量  |
| 降雨      | 国家地球系统科学数据中心 ( <a href="https://www.geodata.cn">https://www.geodata.cn</a> )                                  | 1000   | 栅格  |
| 潜在蒸散发   | 国家地球系统科学数据中心 ( <a href="https://www.geodata.cn">https://www.geodata.cn</a> )                                  | 1000   | 栅格  |
| 土壤      | FAO 世界土壤数据库 ( <a href="https://www.fao.org">https://www.fao.org</a> )                                         | 500    | 栅格  |
| 地质资料    | 中国地质调查局 ( <a href="https://www.cgs.gov.cn">https://www.cgs.gov.cn</a> )                                       | 1:20 万 | 矢量  |
| 统计数据    | 中国县域统计年鉴、湖北省统计年鉴、重庆市统计年鉴                                                                                      | -      | 数据表 |

2 研究模型与研究方法

本文基于风险因果链模型，识别风险源、暴露-响应过程和生态终点，构建时间序列下的“易发性-脆弱性-潜在损失”生态风险评价三维框架，并借助典型指标量化模型进行 2000-2020 年三峡库区滑坡灾害生态风险评价和风险管理研究，如公式（1）所示<sup>[34]</sup>。

$$R = S \times V \times D \tag{1}$$

式中， $R$  为滑坡灾害生态风险的风险值（Risk）； $S$  为滑坡易发性（Susceptibility）， $V$  为生态脆弱性（Vulnerability）， $D$  为生态环境的潜在损失（Damage），实验流程如图 2 所示。

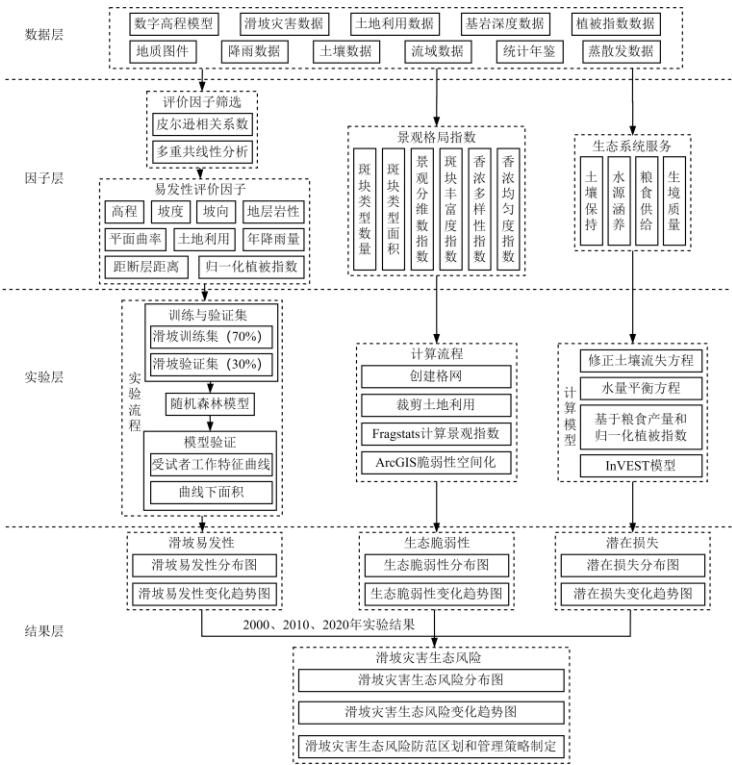


图 2 实验流程图

Fig.2 Experimental flow chart

2.1 基于 RF 模型的滑坡易发性

随机森林（Random Forest, RF）算法是一种基于决策树的集成学习算法，该算法结合了“Bootstrap aggregating”和“Random subspace”方法，通过“Bootstrap”随机自主采样的方法生成决策树，即从原始数据中随机有放回的重重复抽取样本，形成多个子数据集。然后通过构建决策树对每一个数据集进行建模，最终将这些决策树模型组合，通过多数分类或者取平均值的方得出最终的预测结果<sup>[35]</sup>。随机森林模型通过随机重复抽取样本构建模型，在保证较高的准确性下，同时可以有效避免模型出现过拟合问题<sup>[36]</sup>。

本文在借鉴前人研究的基础上，选取高程、坡向、坡度、平面曲率、地层岩性、距断层距离、年降雨量、归一化植被指数、土地利用作为研究区滑坡易发性评价因子（附图 I 和附图 II）<sup>[37,38]</sup>。利用皮尔逊相关系数和多重共线性分析进行评价因子筛选，结果表明因子间不存在明显的相关性和多重共线性（附图 III 和附表 I）<sup>[39]</sup>。随机抽取 70% 的滑坡面和等量非滑坡数据（共计 62926 个栅格单元）构建训练样本集，剩

余 30%的滑坡面（13484 个栅格单元）作为验证集，并采用五折交叉验证确保数据集划分均衡性和无偏性（详见附表 II）<sup>[40]</sup>。训练随机森林模型（决策树的数量：80；决策树最大深度：25）并得出滑坡易发性结果。借助受试者工作特征曲线和曲线下面积进行模型精度验证，结果表明模型预测准确率较高，得出的滑坡易发性结果较为可靠（附图 IV）<sup>[41]</sup>。

2.2 基于景观格局的生态脆弱性

生态脆弱性即面对滑坡灾害风险时生态系统所表现出的敏感性和自我恢复能力<sup>[42]</sup>。以景观作为生态脆弱性的研究对象符合景观生态学中格局与过程耦合的关联视角，强调景观格局对特定生态功能与过程的影响，能够在不依赖大量实测数据的条件下实现对生态脆弱性的时空分异性表达<sup>[43]</sup>。计算公式如（2）-（5）所示。

$$LVI = LSI \times (1 - LAI) \tag{2}$$

$$LSI = \sum_{i=1}^n U_i \times V_i \tag{3}$$

$$U_i = aFN_i + bFD_i + cDO_i \tag{4}$$

$$LAI = PRD \times SHDI \times SHEI \tag{5}$$

式中，*LVI* 为综合脆弱性指数，敏感度指数 *LSI* 是由景观干扰度指数（*U<sub>i</sub>*）和易损度指数（*V<sub>i</sub>*）计算得来，用来反映系统受到外界干扰后表现出的敏感程度<sup>[44]</sup>。适应度指数 *LAI* 即系统遭受外界干扰时所表现出的适应和自我恢复能力，选取与景观多样性相关的斑块丰富度指数（*PRD*）、香浓多样性指数（*SHDI*）及香浓多样性指数（*SHEI*）构建<sup>[45]</sup>。*U<sub>i</sub>* 由景观破碎度（*FN<sub>i</sub>*）、分形维数倒数（*FD<sub>i</sub>*）和优势度（*DO<sub>i</sub>*）组成。其中，*i* 为景观类型，即耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地；*n* 为景观类型总数，即 *n* 为 6。*a*、*b* 和 *c* 是各个指数的权重，*a*+*b*+*c*=1，结合前人研究及研究区实际情况依次设置为 0.5、0.3、0.2<sup>[45,46]</sup>。*V<sub>i</sub>* 即在外界干扰下损失程度的大小，参照前人研究经验进行标准化处理后分别为：耕地 0.14、林地 0.23、草地 0.23、水域 0.04、建设用地 0.04、未利用地 0.32<sup>[44,47,48]</sup>。

2.3 基于生态系统服务的潜在生态损失

生态系统服务是自然为人类提供的各种惠益，包括调节服务、支持服务、供给服务和文化服务，对维持生态系统可持续发展和保障人类社会等方面具有举足轻重的作用<sup>[49]</sup>。而滑坡灾害的发生导致生态系统结构受损、功能失调及稳定性下降，这些直接表现为生态系统服务功能的减弱<sup>[8]</sup>。因此，本研究选取土壤保持、水源涵养、粮食供给和生境质量 4 种生态系统服务表征滑坡灾害胁迫下生态系统的潜在生态损失。基于相关模型对其进行量化，并将结果栅格图层归一化消除量纲影响，再进行等权重空间叠加，得到生态系统遭到滑坡灾害胁迫后表现出的综合潜在生态损失，计算模型如表 2 所示<sup>[9,50]</sup>。

表 2 生态系统服务模型及相关参数

Table 2 Ecosystem service models and related parameters

| 生态系统服务 | 模型和方法                      | 相关参数                                   |
|--------|----------------------------|----------------------------------------|
| 土壤保持   | 修正通用土壤流失方程 <sup>[51]</sup> | 降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长坡度因子、植被覆盖因子、水土保持措施因子 |
| 水源涵养   | 水量平衡法计算 <sup>[52]</sup>    | 年降雨量、年蒸散发、根系限制层深度、植物可用含水量、土地利用、子流域     |
| 粮食供给   | 基于三峡库区县域粮食生产总量及            | 三峡库区各区县粮食产量、归一化植被指数                    |

### 3 结果

#### 3.1 滑坡灾害生态风险

采用人工阈值法分别将易发性、脆弱性和潜在损失划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级，等级越高，相应的性质越强<sup>[47]</sup>。其中，滑坡易发性等级高和较高区域占比不足研究区总面积的 5%，主要分布于长江沿岸海拔较低的地区，中等和高低易发区域分布于高易发区外围的长江及其支流沿岸，低易发区分布广泛，多见于远离水系的地区。2000-2020 年滑坡灾害高和较高易发区面积呈先增大后减小趋势，且最终呈缩减趋势（附图 V）。研究区生态脆弱性呈现明显的“东北和西南高，中间低”的格局，高脆弱和较高脆弱区占研究区总面积的 10% 左右，主要分布于渝中、巴东等人类工程活动剧烈的区域，中等脆弱区主要分布于长江沿岸，低脆弱区和较低脆弱区面积占比大且分布较为广泛，主要分布于林地分布较为密集的中部和北部地区。2000-2020 年研究区生态脆弱性呈先上升后下降趋势（附图 VI）。研究区潜在损失呈现“东北高西南低”的空间分布特征，高损失区分布于库区东部的秭归、巴东、奉节等地，以及库区南部的万州、石柱、武隆等区县的南部地区，低值区主要分布于库区西南的渝中基期周边区县，库区中部的丰都、万州等人口密集的城区，2000-2020 年三峡库区整体潜在损失呈现出明显的先减少后增加的趋势（附图 VII）。

将研究区 2000、2010 和 2020 年滑坡易发性、生态脆弱性和潜在生态损失的栅格图层分别进行统一分辨率处理后再进行归一化处理，利用公式（1）得到 2000、2010 和 2020 年三峡库区滑坡灾害生态风险分布图，并采用人工阈值法将其划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级，等级越高，代表区域内滑坡灾害生态风险越大<sup>[9]</sup>。由图 3（a）-（c）可以看出，研究区滑坡灾害生态风险高和较高等级区域虽分布较为散乱，但总体仍呈现出沿长江两岸的带状分布特征，在江津、奉节、巫山、秭归、巴东等区县分布较为广泛；中等风险和较低风险表现为沿长江及其支流两岸向外围扩散，与高风险和较高风险区域分布相比中等风险和较低风险的聚集程度更高；低风险区域占研究区总面积的 60% 左右，主要集中于三峡库区的外围。由图中 2000-2020 年各个风险等级面积占比可知，2000-2020 年高风险和较高风险地区面积呈先增加后减少的趋势，且最终面积增加 627.03km<sup>2</sup>，表明研究区 2000-2020 年滑坡灾害生态风险高和较高等级区域呈扩张趋势。这主要是由于 2000-2010 年三峡库区滑坡易发性和生态脆弱性呈增加趋势，而生态系统服务能力显著下降、潜在生态损失显著降低，使得研究区滑坡灾害生态风险呈下降趋势；2010-2020 年三峡库区滑坡易发性降低、生态脆弱性下降，而生态系统服务能力显著提升、潜在生态损失显著增加，使得研究区滑坡灾害生态风险呈现上升趋势。

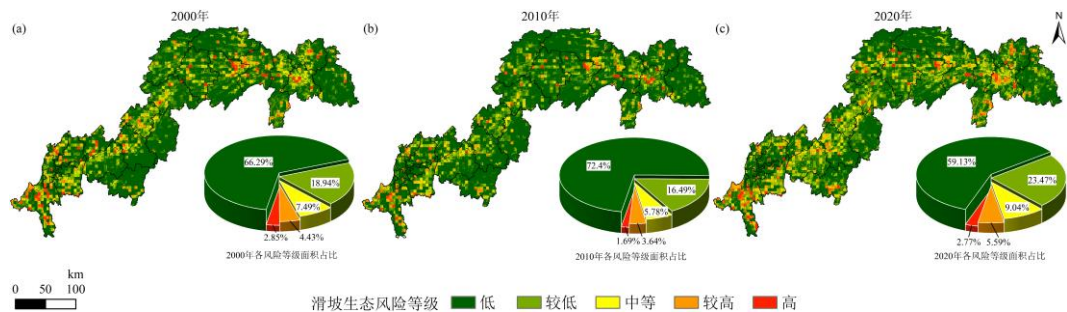


图 3 2000-2020 年研究区滑坡灾害生态风险空间分布及面积占比

Fig.3 Spatial distribution and area proportion of ecological risk of landslide disasters in the study area from 2000

to 2020

### 3.2 滑坡灾害生态风险防范分区

参照已有研究和三峡库区的实际情况, 本文对于风险防范分区的划分重点关注 2020 年滑坡灾害生态风险主导因子、2000-2020 年滑坡灾害生态风险的变化趋势和 2020 年研究区潜在生态损失<sup>[22,47]</sup>。首先, 将研究区滑坡易发性、生态脆弱性的高和较高两个等级合并为高值区, 中等、较低和低三个等级合并为低值区, 从而得到高易发-高脆弱(综合型)、高易发-低脆弱(避让型)、低易发-高脆弱(保护型)和低易发-低脆弱(自适应型)4 种风险主导因子结构类型, 如图 4(a)所示。其次, 利用 2020 年与 2000 年研究区滑坡灾害生态风险值做差, 得到 2000-2020 年风险变化趋势, 其中风险不变区域占比较少, 为了简化风险分区, 将其并入周围的风险增加区域中, 即得到研究区风险增加(紧急管控区)和风险降低(恢复发展区)2 种风险变化趋势, 如图 4(b)所示。随后, 将研究区潜在生态损失的高和较高两个等级合并为高值区, 中等、较低和低三个等级合并为低值区, 从而得到研究区低损失(I 区)和高损失(II 区)2 种潜在生态损失类型, 如图 4(c)所示。最后, 将上述三个栅格图层相交, 得到研究区 16 种滑坡灾害生态风险防范分区, 如图 4(d)和附表III所示。

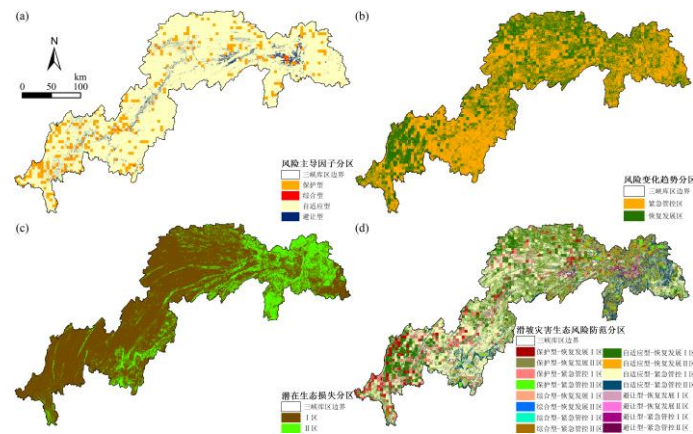


图 4 研究区滑坡灾害生态风险防范分区

Fig.4 Zoning of Ecological Risk Prevention for Landslide Disasters in the Study Area

## 4 讨论

### 4.1 三峡库区整体风险管理策略

本文对于每类风险防范区域采取以“以风险主导因子管理为主, 风险变化趋势管理和潜在损失管理为辅”的原则, 制定相应的风险管理和应对措施。由图 5 可以看出, 三峡库区以自适应型风险防范区域为主, 占研究区总面积的 83.42%。其次为保护型和避让型风险防范区域, 综合型风险防范区域面积占比较少。因此, 研究区整体风险防范应以生态系统自适应力为主, 库区东部和南部应在保障区域生境高质量的同时, 密切关注风险变化趋势, 做好风险调控工作。库区西部和北部应着力于提升区域内生境质量, 并重点管控滑坡生态风险增加问题。对于长江沿岸应做好滑坡灾害预防和生态脆弱性保护的两手抓, 针对人口较为密集的重庆市主城区、万州城区、秭归城区及宜昌市区, 应特别加强日常公众宣传教育及风险管理体系的完善工作, 政府相关部门需加大滑坡灾害和生态脆弱性的管理投入, 制定详尽的风险应急预案, 确保时刻准备应对可能发生的紧急情况。

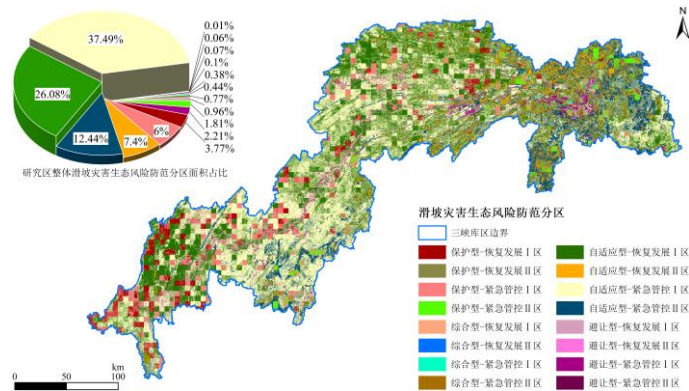


图 5 研究区整体滑坡灾害生态风险防范分区及面积占比

Fig.5 Overall Zoning of Ecological Risk Prevention for Landslide Disasters in the Study Area and Area Proportion

#### 4.2 三峡库区分段风险管理策略

根据研究区位置分布将其分为库首（宜昌市区、兴山、秭归、巴东、巫山、奉节）、库中（巫溪、云阳、开州、万州、忠县、石柱、丰都、武隆）、库尾（涪陵、长寿、渝北、北碚、江北、沙坪坝、渝中、大渡口、南岸、九龙坡、巴南、江津）三段，如图 6 所示。由图 6（a）可以看出，库首段风险防范应以生态系统自我适应为主，重点关注区域内的风险变化趋势，对于长江沿岸区域应采取滑坡风险避让和生态环境保护“两手抓”的综合管理策略，使得区域内生态系统保持正常良好运行状态。由图 6（b）可以看出库中段风险防范应主要以生态系统自我适应为主，库中段北部区县应加以人为辅助，加强生态脆弱问题的治理与恢复工作，同时提升区域生态系统服务能力。对于长江沿岸应予以重点监测，规避风险，增强生态系统自适应力。库中段南部区县应在保障生态系统自身服务的同时，加强对于风险变化趋势的调控。由图 6（c）可以看出库尾段风险防范策略中，应以提升生态系统自适应能力为主导。在强化区域生态系统适应能力能力的同时，应特别关注区域内的生态脆弱状况，并积极落实生态环境治理、恢复与保护的工作部署。针对重庆市主城区外围的江津、巴南、涪陵、长寿等区县，需加大对风险变化趋势的调控、滑坡灾害的监测预警以及区域内生态环境恢复与保护等工作的人员和财政投入力度。

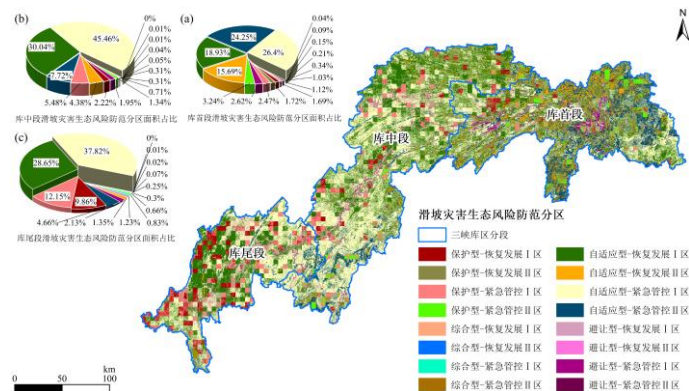


图 6 研究区分段滑坡灾害生态风险防范分区及面积占比

Fig.6 Zoning of Ecological Risk Prevention for Landslide Disasters in Segments of the Study Area and Area Proportion

4.3 三峡库区重点区县风险管理策略

如图 7 (a) - (d) 所示，分别选取研究区各段具有典型代表性的区县：库首段秭归县、库中段万州区和武隆区、库尾段江津区，进行针对性风险防范策略的制定。如图 7 (a) 所示，脐橙之乡秭归县为例，秭归县地层构造复杂、地势起伏大、地质环境极为脆弱。整体应采取生态系统自适应型风险管理对策，秭归县北部应在保障生态系统自身服务的同时，辅助以人为监测，加强对风险变化趋势的关注。对于境内长江沿岸应重点识别风险主导因子，制定针对不同风险主导因子的风险管理对策。秭归县南部，应在保障区域内生态系统高服务能力的基础上，对于风险变化趋势予以关注。如图 7 (b) 所示，万州区地处长江河谷地带，地处库区中部经济中心，作为长江上游最大的深水良港，具有极高的生态地位。整体以生态系统自适应性防范各类风险，辅助人为保护，提升区域内生态系统服务能力，针对境内长江沿岸应统筹兼顾，防范化解滑坡灾害风险的同时，密切关注生态高脆弱区的治理工作。如图 7 (c) 所示，以旅游业为支柱产业的武隆区，人文景观资源和森林资源优势得天独厚，应在生态系统自我调节的基础上，密切关注区域内生态风险的变化趋势，必要时予以人为干预防治风险恶化，并增强区域内生态系统服务能力。如图 7 (d) 所示，江津区以低山丘陵地貌为主，整体应以提升生态系统服务能力为抓手，分区制定具有针对性的风险管理对策。江津区北部应主要以生态治理和恢复为主，降低区域生态脆弱性；江津区东北部应时刻防范滑坡风险以及滑坡和生态脆弱共同主导的综合型风险；而江津区南部则主要利用生态系统自我调节能力化解区域内风险。

结合研究区实际情况和以往研究结果表明，上述风险分布状况与研究实际情况较为吻合，且有关研究区万州-巫山段风险管理策略与以往研究结果一致，但前人研究区范围较小，且风险防范策略制定较为笼统，缺乏可实践性<sup>[47]</sup>。本文从三峡库区整体、分段和重点区县多种尺度制定滑坡灾害生态风险防范措施，可为区域风险防范提供更加全面的参考。

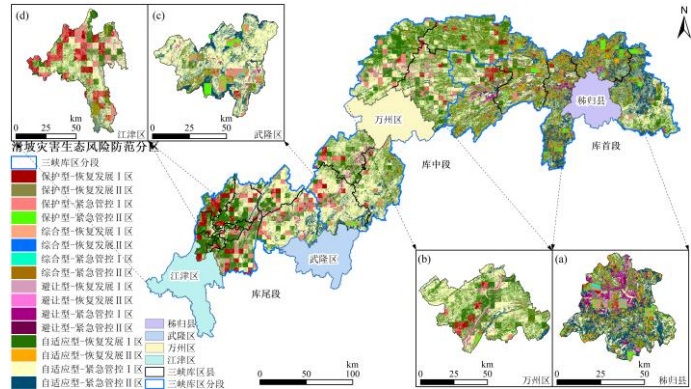


图 7 研究区重点区县滑坡灾害生态风险防范分区

Fig.7 Zoning of Ecological Risk Prevention for Landslide Disasters in Key Districts and Counties of the Study Area

5 结论

本文以三峡库区为例，基于“易发性-脆弱性-潜在损失”三维框架模型，在考虑时间序列影响下，采用随机森林模型评估滑坡灾害易发性，利用景观格局指数表征生态脆弱性，借助生态系统服务定量核算潜在生态损失，综合估算研究区滑坡灾害生态风险，并依据“风险主导因子-风险变化趋势-潜在生态损失”

完成生态风险防范分区及风险防范策略拟定。结果表明：①研究区滑坡灾害生态风险以低风险为主，占研究区总面积的 60%左右；其次为较低风险区和中等风险区主要分布于长江及其支流沿岸；较高风险区和高风险区占研究区总面积的 10%以下，分布较为散乱，但整体呈沿长江沿岸的带状分布特征。②2000-2010 年三峡库区滑坡易发性和生态脆弱性呈增加趋势，而潜在生态损失显著降低，使得研究区滑坡生态风险呈下降趋势；2010-2020 年三峡库区滑坡易发性降低、生态脆弱性下降，而潜在生态损失显著增加，使得研究区滑坡生态风险呈现上升趋势，且最终三峡库区滑坡生态风险高和较高等级地区呈扩张趋势。③按照风险结构主导因子、风险变化趋势和潜在生态损失将研究区分为 16 种风险防范分区，并依据“风险结构主导因子为主，风险变化趋势和潜在生态损失为辅”的风险防范策略制定原则，分别拟定研究区整体、分段和重点区县的风险防范策略。

## 6 参考文献

- [1] Yao L, Zhang X, Luo J, et al. Identification of Ecological Management Zoning on Arid Region from the Perspective of Risk Assessment. *Sustainability*, 2023: 9046.
- [2] Xing W, Liu M, Zhang Q, et al. Research on ecological risk assessment and risk level prediction in the central urban area of Chongqing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024: 897.
- [3] Yu X, Xia Y, Zhou J, et al. Landslide Susceptibility Mapping Based on Multitemporal Remote Sensing Image Change Detection and Multiexponential Band Math. *Sustainability*, 2023: 2226.
- [4] Shan Y, Li W, Zhou S, et al. Ecological risk assessment of landslide hazards in the upper reaches of the Yangtze River region. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, (24): 1-13. DOI: 10.20103/j.stxb.202405131077. [单云锋, 李为乐, 周胜森, 曲歌, 许强. 长江上游区域滑坡灾害生态风险评估. *生态学报*, 2024, (24): 1-13.]
- [5] Arrogante-Funes P, Bruzón A G, Arrogante-Funes F, et al. Integration of Vulnerability and Hazard Factors for Landslide Risk Assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021.
- [6] Mosaffaie J, Jam A S, Sarfaraz F. Landslide risk assessment based on susceptibility and vulnerability. *Environment Development and Sustainability*, 2024: 9285-9303.
- [7] Shi Z, Xiang F, Guo Y. Ecological risk of geohazards and its combination patterns: A case study of an ecologically fragile region, NW China. *Ecological Informatics*, 2023: 102153.
- [8] Du Y, Peng J, Zhao S, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters in mountainous areas of Southwest China: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(09): 1544-1561. DOI: 10.11821/dlxb201609007. [杜悦悦, 彭建, 赵士权, 胡智超, 王仰麟. 西南山地滑坡灾害生态风险评价——以大理白族自治州为例. *地理学报*, 2016, 71(9): 1544-1561.]
- [9] Wang H, Lin Z, Xiao Y, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters based on potential loss of ecosystem services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3553-3562. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201910.019. [王慧芳, 林子雁, 肖赓, 卢慧婷, 章文, 詹云军, 严岩. 基于生态系统服务潜在损失的滑坡灾害生态风险评价. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3553-3562.]
- [10] Xu S, Ma Y, Liu J, et al. Lightweight Network Based on Multi-scale Feature Learning for Landslide Susceptibility Assessment. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024: 1-18. DOI: 10.13203/j.whugis20240301. [徐胜华, 马钰, 刘纪平, 王琢璐. 多尺度特征学习的轻量化滑坡易发性评价方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024: 1-18.]

- [11] Guo F, Wu D, Ge M, et al. The Influence of Continuous Variable Factor Classification and Machine Learning Model on the Accuracy of Landslide Susceptibility Evaluation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024: 1-17. DOI: 10.13203/j.whugis20230413. [郭飞, 吴迪, 葛民荣, 董进龙, 房浩, 田东方. 连续变量因子分级和机器学习模型对滑坡易发性评价精度的影响. 武汉大学学报(信息科学版), 2024: 1-17.]
- [12] Guo X, Zhang Z, Zhang X, et al. Landscape vulnerability assessment driven by drought and precipitation anomalies in sub-Saharan Africa. *Environmental Research Letters*, 2023: 064035.
- [13] Zhao Z, Ma Q, Ma C, et al. Analysis and Prediction of Ecological Vulnerability of the Central Plains Urban Agglomeration Based on the SRP Model. *Environmental Science*, 2024: 1-14. DOI: 10.13227/j.hjlx.202403011. [赵宗泽, 马倩, 王一, 马超, 王宏涛. 基于 SRP 模型的中原城市群生态脆弱性分析与预测. 环境科学, 2024: 1-14.]
- [14] Wang X, Zheng Y, Sun Z, et al. Evolution and Simulation of Ecological Vulnerability in Qinghai-Xizang Plateau Nature Reserve. *Environmental Science*, 2024: 1-15. DOI: 10.13227/j.hjlx.202403096. [王晓峰, 郑媛元, 孙泽冲, 周继涛, 王筱雪, 朱梦娜. 青藏高原自然保护区生态脆弱性演化与模拟. 环境科学, 2024: 1-15.]
- [15] Zhang Y, Su L. Ecological Vulnerability Assessment and Driving Factors Analysis in the Middle Yellow River Basin Based on SRP Model. *Environmental Science*, 2024: 1-16. DOI: 10.13227/j.hjlx.202407129. [张艳, 苏兰欣. 基于 SRP 模型的黄河流域中段生态脆弱性评价及驱动因素分析. 环境科学, 2024: 1-16.]
- [16] Huang M, Zhong Y, Feng S, et al. Spatial-temporal characteristic and driving analysis of landscape ecological vulnerability in water environment protection area of Chaohu Basin since 1970s. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 977-988. DOI: 10.18307/2020.0407. [黄木易, 仲勇, 冯少茹, 张嘉晖. 1970s 以来巢湖流域水环境保护区景观生态脆弱性时空特征及驱动解析. 湖泊科学, 2020, 32(4): 977-988.]
- [17] Zhou D, Yang M, Su J, et al. Research progress in evaluating the value of watershed ecosystem services. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(04): 149-164. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00005. [周德良, 杨明霞, 苏靖雅, 白玉. 流域生态系统服务价值评估研究进展. 中国沙漠, 2024, 44(04): 149-164.]
- [18] Xiao Q, Hu D, Xiao Y. Assessing changes in soil conservation ecosystem services and causal factors in the Three Gorges Reservoir region of China. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2017: S172-S180.
- [19] He J, Zhao Y, Wen C. Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Water Supply Services in the Three Gorges Reservoir Area of China Based on Supply-Demand Balance. *WATER*, 2022: 2271.
- [20] 陈丹, 曾卫, 郭凯睿, 王福海. 2000—2020 年三峡库区生态系统服务时空演变及驱动力研究. *西部人居环境学刊*, 2023, 38(04): 127-134.
- [21] Singh G G, Sajid Z, Khan F, et al. Rethinking disaster risk for ecological risk assessment. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023: 1249567.
- [22] Yang F, Jin X, Liu J, et al. Assessing landscape ecological risk in rapidly urbanized areas from the perspective of spatiotemporal dynamics. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(18): 253-261. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305242. [杨帆, 金晓斌, 刘晶, 张晓琳, 宋家鹏, 李权荃, 周寅康. 时空动态视角下快速城市化地区景观生态风险评价与分区. 农业工程学报, 2023, 39(18): 253-261.]
- [23] Chen T, Huang Q, Wang Q. Differentiation characteristics and driving factors of ecosystem services relationships in karst mountainous area based on geographic detector modeling: A case study of Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 6959-6972. DOI: 10.5846/stxb202109012470. [陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异

特征及驱动力解析——以贵州省为例. 生态学报, 2022, 42(17): 6959-6972.]

- [24] Wen S, Hu B, Xie W, et al. Land Use Senario Simulation and Habitat Quality Change in Pinglu River Economic Belt Based on PLUS-InVEST Model. *Environmental Science*, 2024: 1-18. DOI: 10.13227/j.hjxx.202407166. [文少强, 胡宝清, 谢薇薇, 高春莲. 基于 PLUS-InVEST 模型的平陆运河经济带土地利用情景模拟及生境质量变化. *环境科学*, 2024: 1-18.]
- [25] Yan Z, Wang Y, Wang Z, et al. Spatiotemporal Analysis of Landscape Ecological Risk and Driving Factors: A Case Study in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Remote Sensing*, 2023: 4884.
- [26] Wei Y, Zhou P, Zhang L, et al. Spatio-temporal evolution analysis of land use change and landscape ecological risks in rapidly urbanizing areas based on Multi-Situation simulation - a case study of Chengdu Plain. *ecological indicators*, 2024: 112245.
- [27] Li Q, Kou X, Niu L, et al. Spatiotemporal variations and its driving factors of soil conservation services in the Three Gorges Reservoir area in China. *Frontiers in Environmental Science*, 2023: 1266169.
- [28] Zhao W, Chen Y, Li Y, et al. Long-term dynamic evolution and transformation of rural sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16): 6907-6922. DOI: 10.20103/j.stxb.202311162490. [赵雯欣, 陈艳, 李阳兵, 王清荣, 邵景安. 三峡库区乡村坡耕地长时间序列动态演变与转型. *生态学报*, 2024, 44(16): 6907-6922.]
- [29] Tian Y, Zhu J, Li Q, et al. Spatial and temporal distribution of soil conservation and its driving forces in the Three Gorges Reservoir Area. *hinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1164-1174. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202004.019. [田宇, 朱建华, 李奇, 冯源, 李宸宇, 肖文发. 三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1164-1174.]
- [30] Yang S, Ye R, Fu X, et al. Study on Early Warning Rainfall Threshold of Rainfall Induced Landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *South China Geology*, 2023, 39(3): 445-454. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0013.2023.03.004. [杨诗诗, 叶润青, 付小林, 吴润泽, 熊能, 文天龙. 三峡库区降雨型滑坡预警雨量阈值研究. *华南地质*, 2023, 39(3): 445-454.]
- [31] Li H, Cao B, Zhao P, et al. Spatial-temporal Variation of Rainfall Erosivity in the Three Gorges Reservoir Area Based on Different Models. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(05): 1265-1281. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2024.05.005. [李辉丹, 曹帮俊, 赵鹏, 罗歆, 张云奇. 基于不同模型的三峡库区降雨侵蚀力时空变化分析. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(05): 1265-1281.]
- [32] Du L, Chen J, Li M, et al. The application of airborne LiDAR technology to landslide survey:A case study of Zhangjiawan Village landslides in Three Gorges Reservoir area. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2019, 31(1): 180-186. DOI: 10.6046/gtzyyg.2019.01.24. [杜磊, 陈洁, 李敏敏, 郑雄伟, 李京, 高子弘. 机载激光雷达技术在滑坡调查中的应用——以三峡库区张家湾滑坡为例. *国土资源遥感*, 2019, 31(1): 180-186.]
- [33] Li Y, Xie X, Jin B, et al. Comprehensive risk management of reservoir landslide-tsunami hazard chains: a case study of the Liangshuijing landslide in the Three Gorges Reservoir area. *Landslides*, 2024: 1-21.
- [34] Zhu Q, Cai Y. Impact of ecological risk and ecosystem health on ecosystem services. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(05): 1303-1317. DOI: [朱青, 蔡永立. 生态风险与生态系统健康对生态系统服务的影响. *地理学报*, 2024, 79(05): 1303-1317.]
- [35] Wu X, Song Y, Chen W, et al. Analysis of Geological Hazard Susceptibility of Landslides in Muli County Based on Random Forest Algorithm. *Sustainability*, 2023: 4328.
- [36] Xie D, Li Y, Zhou K, et al. Information extraction and system construction of digital forest system based on multisource remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(05): 1281-1294. DOI: 10.11834/jrs.20242655. [谢东辉, 李益, 周坤, 张智祥, 金霖, 阎广建, 穆西晗, 李文航, 冯功耀. 基于多源遥感数据的数字林场信息提取与系统构建. *遥感学报*, 2024, 28(05): 1281-1294.]

- [37] Yu L, Wang Y, Pradhan B. Enhancing landslide susceptibility mapping incorporating landslide typology via stacking ensemble machine learning in Three Gorges Reservoir, China. *Geoscience Frontiers*, 2024, 15(4): 101802. DOI: 10.1016/j.gsf.2024.101802.
- [38] Wang Y, Cao Y, Xu F, et al. Reservoir Landslide Susceptibility Prediction Considering Non-Landslide Sampling and Ensemble Machine Learning Methods. *Earth Science*, 2024, 49(05): 1619-1635. DOI: 10.3799/dqkx.2022.407. [王悦, 曹颖, 许方党, 周超, 余蓝冰, 吴立星, 汪洋, 殷坤龙. 考虑非滑坡样本选取和集成机器学习方法的水库滑坡易发性预测. *地球科学*, 2024, 49(05): 1619-1635.]
- [39] Zhao F, Miao F, Wu Y, et al. Refined landslide susceptibility mapping in township area using ensemble machine learning method under dataset replenishment strategy. *Gondwana Research*, 2024, 131: 20-37. DOI: 10.1016/j.gr.2024.02.011.
- [40] Wu L, Zeng T, Liu X, et al. Landslide Susceptibility Assessment Based on Ensemble Learning Modeling. *Earth Science*, 2024, 49(10): 3841-3854. DOI: 10.3799/dqkx.2022.451. [邬礼扬, 曾韬睿, 刘谢攀, 郭子正, 刘真意, 殷坤龙. 基于集成学习建模的滑坡易发性评价. *地球科学*, 2024, 49(10): 3841-3854.]
- [41] Zhou C, Gan L, Wang Y, et al. Landslide Susceptibility Prediction based on Non-Landslide Samples Selection and Heterogeneous Ensemble Machine Learning. *Journal of Geo-information Science*, 2023, 25(08): 1570-1585. DOI: 10.12082/dqxxkx.2023.220934. [周超, 甘露露, 王悦, 吴宏阳, 喻进, 曹颖, 殷坤龙. 综合非滑坡样本选取指数与异质集成机器学习的区域滑坡易发性建模. *地球信息科学学报*, 2023, 25(08): 1570-1585.]
- [42] Ma L, Hou K, Tang H, et al. A new perspective on the whole process of ecological vulnerability analysis based on the EFP framework. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139160. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139160.
- [43] Li D, Zhong S, Yu H. Landscape functional assessment research progress and insights. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16): 7401-7415. DOI: 10.20103/j.stxb.202306131259. [李代超, 钟淑璇, 虞虎. 景观功能评估研究进展. *生态学报*, 2024, 44(16): 7401-7415.]
- [44] Zhang Y, Zhan J, Gong J. Landscape pattern vulnerability and its influencing factors on a semi-arid lake basin: A case study of Liangcheng County. *Arid Zone Research*, 2022, 39(4): 1259-1269. DOI: 10.13866/j.azr.2022.04.26. [张云霞, 张金茜, 巩杰. 半干旱区湖盆景观格局脆弱性及其影响因素——以凉城县为例. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1259-1269.]
- [45] He M, Zhang L, Wei Y, et al. Landscape Pattern Vulnerability and Its Driving Forces in Different Geomorphological Divisions in the Middle Yellow River. *Environmental Science*, 2024, 45(06): 3363-3374. DOI: 10.13227/j.hjlx.202307117. [何梦真, 张乐涛, 魏仪媛, 郑泽豪, 王清源. 黄河中游不同地貌分区景观格局脆弱性及其驱动力. *环境科学*, 2024, 45(06): 3363-3374.]
- [46] Wang H, Wang L, Liu X, et al. Analysis of landscape pattern vulnerability in Dasi river basin at the optimal scale. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 10727. DOI: 10.1038/s41598-024-61634-x.
- [47] Xu J, Sun D, Zhang H, et al. Multi-scale ecological risk assessment and risk management of landslide disasters: a case study of Wanzhou-Wushan section in the Three Gorges Reservoir area. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4594-4603. DOI: 10.5846/stxb202105181296. [许嘉慧, 孙德亮, 张虹, 文海家, 吴健平, 黄艳. 多尺度滑坡灾害生态风险评价与风险管理——以三峡库区万州-巫山段为例. *生态学报*, 2023, 43(11): 4594-4603.]
- [48] Xu E, Wang H, Li Y, et al. Analysis of changes and driving forces of landscape pattern vulnerability at Qianping Reservoir in Central China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196(10): 981. DOI: 10.1007/s10661-024-13094-z.
- [49] Zhou J, Yang J, Zhang W. Spatiotemporal Variation and Trade-off Synergistic Relationship of Ecosystem Services in Gannan Prefecture. *Environmental Science*, 2024: 1-17. DOI: 10.13227/j.hjlx.202403255. [周杰, 杨洁, 张文柳. 甘南州生态系统服务时空变化及权衡协同关系. *环境科学*, 2024: 1-17.]

- [50] Ling Y, Yang Y, Xu J, et al. Impacts of urbanization on the supply and demand relationship of typical ecosystem ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(13): 5289-5304. DOI: 10.5846/stxb202205271498. [凌云, 杨宜男, 许迦龙, 王立, 王子豪, 孙艺妍, 姚晨心, 王原. 京津冀地区城市化对典型生态系统服务供需关系的影响. *生态学报*, 2023, 43(13): 5289-5304.]
- [51] Li M, Li Y, Fan M, et al. Comprehensive Evaluation of Ecosystem Services in Garzê Prefecture Based on the Dynamic Coupling Relationship of Water-soil-carbon. *Environmental Science*, 2024: 1-20. DOI: 10.13227/j.hjlx.202405240. [黎猛, 李雅琪, 樊敏, 周乐乐, 喻萧斌. 基于“水-土-碳”动态耦合的甘孜州生态系统服务综合评估. *环境科学*, 2024: 1-20.]
- [52] Wang J, Xing Y, Chang X, et al. Analysis of Spatial Distribution of Ecosystem Services and Driving Factors in Northeast China. *Environmental Science*, 2024, 45(09): 5385-5394. DOI: 10.13227/j.hjlx.202311022. [王佳琪, 邢艳秋, 常晓晴, 杨红. 东北地区生态系统服务空间分布及其驱动因子分析. *环境科学*, 2024, 45(09): 5385-5394.]
- [53] Yu H, Tang J, Chen R. Spatiotemporal Evolution Characteristics and Multi-scale Spatial Balance and Matching Analysis of Ecosystem Service Supply and Demand in Hubei Province. *Environmental Science*, 2024, 45(11): 6477-6488. DOI: 10.13227/j.hjlx.202312019. [余昊轩, 汤江龙, 陈荣清. 湖北省生态系统服务供需时空演变特征及其多尺度的空间平衡与匹配分析. *环境科学*, 2024, 45(11): 6477-6488.]
- [54] Xie M, Zhou H, Jia W, et al. Spatiotemporal Changes and Driving Factors of Ecosystem Services in Taiyuan City. *Environmental Science*, 2024: 1-13. DOI: 10.13227/j.hjlx.202404020. [解铭威, 周慧获, 贾文贞, 冉藜, 王向荣, 陈耸. 太原市生态系统服务时空变化及其驱动因素. *环境科学*, 2024: 1-13.]