

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.

Xu J H, Sun D L, Zhang H, Wen H J, Wu J P, Huang Y. 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.

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

许嘉慧^{1,2}, 孙德亮³, 张虹³, 文海家⁴, 吴健平^{1,2}, 黄艳^{1,2,*}

1 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241

2 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241

3 重庆师范大学 GIS 应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331

4 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045

摘要: 进行生态风险多尺度综合评价, 对环境管理及风险决策具有重要意义。以三峡库区滑坡重点监测县域为例, 基于“危险性-脆弱性-潜在损失”三维模型, 以随机森林模型评估滑坡危险性, 采用景观格局指数表征生态脆弱性, 利用生境质量核算潜在生态损失, 进行网格、行政、子流域多尺度下的滑坡灾害生态风险评价, 提出适合各尺度的风险管理措施, 在此基础上选择最适宜尺度并结合研究区实际情况进行验证。结果表明, 生态风险等级较高区域集中于长江两岸沿线, 三峡库区建设对研究区滑坡生态风险产生较大影响; 两两尺度风险分布结果具有一定相似性, 而三种尺度共同作用结果又存在一定差异; 子流域尺度在保证生态结构完整性的前提下评价结果好于其他两种尺度, 更适合三峡库区县域的生态风险评价; 研究区东部风险防范类型相对单一, 而西部风险防范类型较多, 需做到精细化管理。研究增加了多尺度综合评价实例, 对今后开展整个三峡库区滑坡生态风险研究奠定一定理论和实践基础。

关键词: 滑坡灾害生态风险; 多尺度评价; 生态脆弱性; 风险管理; 三峡库区

Multi-scale ecological risk assessment and risk management of landslide disasters: a case study of Wanzhou-Wushan section in the Three Gorges Reservoir area

XU Jiahui^{1,2}, SUN Deliang³, ZHANG Hong³, WEN Haijia⁴, WU Jianping^{1,2}, HUANG Yan^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2 School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

3 Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

4 Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China

Abstract: The multi-scale comprehensive analysis of ecological risk assessment is of great significance to environmental management and risk-based decision making. This study takes key monitoring counties with frequent landslides in the Three Gorges Reservoir area as examples. Based on the three-dimensional model of “Hazard-Vulnerability-Damage”, the random forest model was applied to evaluate the landslide hazard, the landscape pattern index was selected to characterize the ecological vulnerability, and the habitat quality was used to calculate the potential ecological damage. We carried out the ecological risk assessment of landslide disasters under the grid, administrative, and sub-watershed scales, and proposed risk management measures suitable for each scale. The results indicate that areas with higher ecological risk levels were

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505501); 国家自然科学基金项目(42071306); 国家自然科学基金项目(41807498)

收稿日期: 2021-05-18; **网络出版日期:** 2023-02-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhuang@geo.ecnu.edu.cn

concentrated along the banks of the Yangtze River at any scale, since the construction of the Three Gorges Reservoir area had a greater impact on the ecological risk of landslides in the study area. The risk distribution results of each two scales were comparable to a certain extent, while certain differences existed in the results of the overlay of three scales. The evaluation result of the sub-watershed scale was preferable than the other two scales under the premise of ensuring the integrity of the ecological structure, and was more suitable for the Three Gorges Reservoir area. The eastern part of the study area had a relatively homogeneous type of risk prevention, while the western part had a variety of types of risk prevention, which required refined management. This study adds a multi-scale comprehensive assessment example, and lays a theoretical and practical basis for future research on ecological risk assessment of landslides in the entire Three Gorges Reservoir area.

Key Words: ecological risk of landslide disasters; multi-scale assessment; ecological vulnerability; risk management; the Three Gorges Reservoir area

生态风险评价是基于地理信息系统(GIS)等技术手段及生态学等理论知识,评估生态系统受风险源干扰时,系统本身遭受破坏的可能^[1]。近年来,越来越多研究结合流域及景观生态学,进行区域性的生态风险评价^[2]。滑坡是世界上发生数量最多的自然灾害之一,其对区域内的人类生命财产及生态环境质量造成了严重的威胁^[3]。进行滑坡灾害生态风险评价,对保护生物多样性、促进经济社会可持续发展具有重要现实意义。

目前滑坡灾害生态风险评价模型可分为“危险性-易损性”二维模型及“危险性-脆弱性-潜在损失”三维模型^[4-8]。“危险性-易损性”二维模型侧重于滑坡发生概率及其对生态系统可能造成的影响,缺乏生态系统的暴露响应表征^[6]。王慧芬等^[4]基于“危险性-脆弱性-潜在损失”三维模型对西南五省进行滑坡灾害生态风险评价,结果表明三维模型可体现信息间的交互状态,增强风险评价时效性;吴健生等^[5]同样基于该三维评价框架,融入生态系统结构与功能、格局与过程的关联信息,增强对风险机理的认知。基于三维评价框架,可为生态风险评价与管理提供更为系统全面的参考。

尺度即研究时采用的空间评价单位,基于不同尺度的风险评价结果也有所不同^[9]。早在 20 世纪 90 年代,学者们就认识到尺度对风险评价的重要性。Hunsaker 等^[10]通过风险表征结果确定区域边界尺度,为大尺度风险评估提供参考。Landis^[11]认为多尺度生态风险评估将会成为环境管理及决策的广义量化工具。尽管意识到多尺度风险评估的重要性,多尺度生态风险评价案例并不多见。谢花林^[12]以内蒙古自治区赤峰市翁牛特旗为例,计算研究区不同半径格网尺度下生态风险情况,结果表明半径越大,区内生态风险正相关关系存在下降趋势;马胜等^[13]以陕西省米脂县高渠乡为例,评价格网、行政、子流域尺度下生态风险情况,并确定子流域尺度可有效表征研究区生态风险的空间分异。基于单一尺度的滑坡灾害生态风险评价日益成熟,但鲜有多尺度的风险评价对比与整合研究^[4-6]。

受复杂地形地貌、人类活动及气候水文影响,三峡库区滑坡灾害频发,生态环境结构及功能产生一定变化^[14-15]。准确评估三峡库区滑坡灾害生态风险情况,制定恰当风险管理措施是十分必要的。以往滑坡危险性评价研究对象仅针对三峡库区某一县域,孙德亮等^[16]将三峡库区奉节县评价模型,成功应用至与其环境条件相似的巫山县,其结果为基于同一模型进行所有环境条件相似县域的风险评价提供了可能。因此,本文以三峡库区滑坡重点监测县域为例,基于“危险性-脆弱性-潜在损失”模型,多尺度评价滑坡灾害生态风险情况,确定研究区生态风险评价适宜尺度并提出相应风险管理措施,为今后开展整个三峡库区滑坡生态风险研究奠定基础。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

本文研究区为三峡库区(重庆段)最东部,地跨东经 107°55′—110°11′,北纬 30°24′—31°28′,包括万州、云

阳、奉节、巫山四个区县,幅员面积约 14162 km²(图 1)。全区地势东北高、西南低,以山地、丘陵为主;处大巴山褶皱带、川鄂湘黔隆起褶皱带和川东平行岭谷的交汇处,构造应力场复杂;境内寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系等地层均有出露,岩性以砂岩、泥灰岩、粘土岩、灰岩为主。据统计,2001 年至 2016 年,研究区发生滑坡 4320 例,约占整个重庆市滑坡发生数量的 28%。

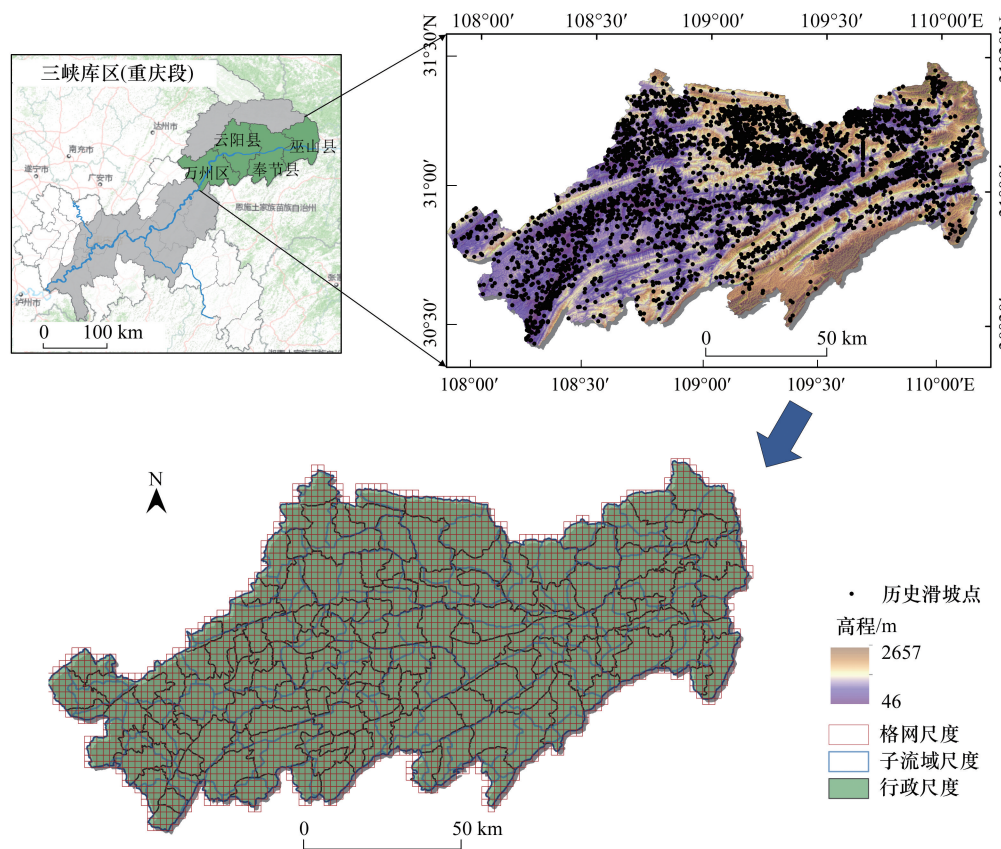


图 1 研究区位置,历史滑坡分布及研究尺度划分图

Fig.1 Location of the study area, historical landslide distribution and research scale division map

1.2 数据

本研究使用数据包括滑坡点、子流域、数字高程模型、地质资料、河流、道路、土地利用、归一化植被指数、降雨、兴趣点(POI)等多个数据集(表 1)。

表 1 数据及数据源

Table 1 Data and data source

名称 Names	数据来源 Data source	类型 Types	精度 Resolution
滑坡点 Landslide points	重庆市地质监测站	数据表	
子流域 Sub-watershed	中国科学院资源环境科学数据中心	矢量	二级流域
数字高程模型 Digital elevation model	地理空间数据云平台	栅格	90 m
地质资料 Geological data	国家地质资料数据中心	矢量	1:20 万
河流及道路 River and road	重庆市水利局及重庆市交通委员会	矢量	1:10 万
土地利用 Landuse	中国科学院资源环境科学数据中心	栅格	30 m
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	Landsat-8 OLI	栅格	30 m
降雨 Rainfall	各区县气象局	数据表	
兴趣点 Point of interest	网络爬虫	数据表	

2 研究方法

本文借助“生态风险=危险性×脆弱性×潜在损失”框架,基于随机森林模型评估滑坡灾害危险性,采用景观格局指数表征生态脆弱性,利用生境质量核算潜在生态损失,综合度量多尺度下的滑坡生态风险情况,并基于“三基色”原理进行生态风险防范分区(图2)。

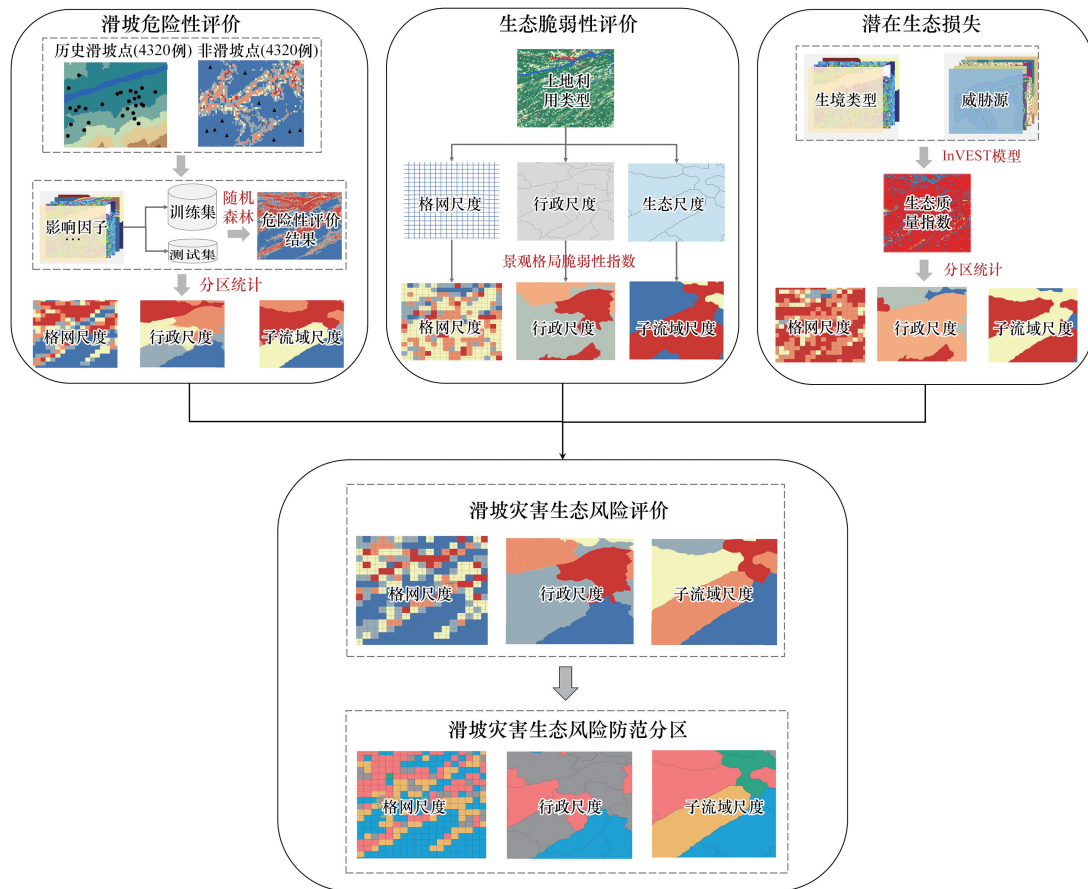


图2 多尺度滑坡灾害生态风险评价与风险管理流程图

Fig.2 Research flow chart of multi-scale ecological risk assessment and risk management of landslide disasters

2.1 基于随机森林的滑坡危险性评价

随机森林在处理缺失值、异常值时容忍度较高,不易产生过拟合现象,具有较高的预测精度和稳定性,是近几年滑坡危险性评价运用较多的集成算法之一^[17-18]。其核心思想是组合 k 棵互不关联的决策树模型,每棵决策树分别进行判断,对 k 棵决策树预测结果采用投票的方式得到随机森林最终输出结果。随机森林可降低单一决策树带来的片面性和不准确性问题:

$$H(x) = \arg \max_z \sum_{i=1}^k I(h_i, x) = Z \quad (1)$$

其中, $H(x)$ 表示随机森林模型, h_i 为单个决策树模型, Z 表示输出变量, $I(\cdot)$ 为示性函数。

选取地形地貌(高程、坡向、坡度、曲率)、地质构造(岩性、倾坡)、环境条件(距河流距离、归一化植被指数、土地利用、多年平均降雨)和人类工程活动(距道路距离、POI核密度)四方面影响下的12个影响因子,构建滑坡灾害危险性指标体系^[18]。其中,POI根据百度地图分类,共包括餐饮、商店、居民点、公司企业及政府机关、交通设施和旅游景点六大类。将研究区4320例历史滑坡及基于信息量模型的危险性分区图中随机

选取的等量非滑坡点(4320 例)作为样本输入,采用十折交叉验证,选取最优样本构建随机森林模型,并将该模型应用至整个研究区,得到全域滑坡危险性评价图。

2.2 基于景观格局的生态脆弱性

生态脆弱性即滑坡影响生态系统时,生态系统对其的响应情况^[6,19]。目前有很多方法量化表达生态系统脆弱性^[20–23],景观格局指数可剖析景观信息与生态脆弱性间的关联性,较适用于大范围的风险评价研究^[5,24]。因此,本研究基于景观敏感度和景观适应度来计算生态脆弱性^[19–20]:

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

$$LSI = \sum_{i=1}^n (a \times FN_i + b \times FD_i + c \times SIDI) \times V_i \tag{3}$$

$$LAI=PRF\times SHDI\times SHEI \tag{4}$$

式中,LVI 为景观生态脆弱性,LSI 为景观敏感度,LAI 为景观适应度。LSI 由景观破碎度(FN_i)、分形维倒数(FD_i)、优势度(SIDI)和易损度(V_i)计算而得;LAI 由斑块丰度密度指数(PRD)、Shannon 多样性指数(SHDI)及 Shannon 均匀性指数(SHEI)计算而得。 i 为景观类型,即耕地、林地、草地、园地、河流、建筑用地、交通用地、工矿用地和其他用地; n 为景观类型总数目,即 n 为 9;系数 a 、 b 、 c 为各景观指数的权重,依次设定为 0.5、0.3、0.2^[25], V_i 值依次赋值 3、5、5、3、1、1、1、1、7。

2.3 基于生境质量的潜在生态损失

生态损失即生态系统受滑坡干扰后,未来一段时间呈现出的状态。基于 InVEST 模型的生境质量评估由于参数获取方便,适用于不同尺度的生境质量评估,被广泛应用于生态质量评估^[26–27]。InVEST 评估模型主要考虑:(1)各威胁源的相对权重及最大胁迫距离;(2)各物种生境的生境适宜性及其对胁迫因子的敏感性。结合研究区实际情况,将城镇居民用地、农村居民用地、工矿用地、耕地及交通用地作为威胁源,林地、草地、园地、耕地、水域作为物种生境,并对模型中的参数进行赋值^[26–31](表 2)。

表 2 InVEST 模型参数
Table 2 Parameters of the InVEST model

	城镇居民用地 Urban residential land	农村居民用地 Rural residential land	工矿用地 Industrial and mining land	交通用地 Transportation land	耕地 Farmland	生境适应性 Habitat adaptability
相对权重 Relative weight	0.8	0.7	0.4	0.4	0.25	
最大影响距离 Maximum influence distance/km	5	3	3	1	1	
类型 Type	指数	指数	指数	线性	线性	
林地 Woodland	0.5	0.2	0.8	0.5	0.1	1
草地 Grassland	0.5	0.3	0.8	0.4	0.3	0.8
园地 Garden land	0.6	0.3	0.6	0.4	0.4	0.6
耕地 Farmland	0.6	0.3	0.7	0.5	0.3	0.4
水域 Water	0.7	0.3	0.8	0.7	0.3	1

3 结果与分析

3.1 多尺度滑坡灾害生态风险评价

滑坡危险性评价接收者操作特征曲线(ROC)下面积(AUC)值为 0.986,表明预测结果可信度较高。将危险性、脆弱性和潜在损失结果相乘,归一化并分区统计后即可得到不同尺度的滑坡灾害生态风险值,基于自然断点法将结果重分类为 5 种评价等级。

为尽量保证景观完整性及定量评估准确性,本文选取 2 km×2 km 作为基本格网单元^[19,25],计算研究区 3781 个格网尺度下(图 1)的生态风险值。由图 3,滑坡灾害高-较高危险区集中分布于研究区中部,即长江两

岸沿线,表明三峡库区的建设对研究区滑坡发生造成了较大影响;对于生态脆弱性,研究区大部分地区属于中等-高脆弱区,较低-低脆弱区主要分布在西部万州县域,较高脆弱区分布集中在东部三个县域;潜在生态损失从西至东逐渐增加。生态风险高-较高区域主要分布于研究区中部,即长江两岸沿线,低-较低风险区分布于研究区西部、中南部以及东北部,而中等风险区空间分布相对破碎。

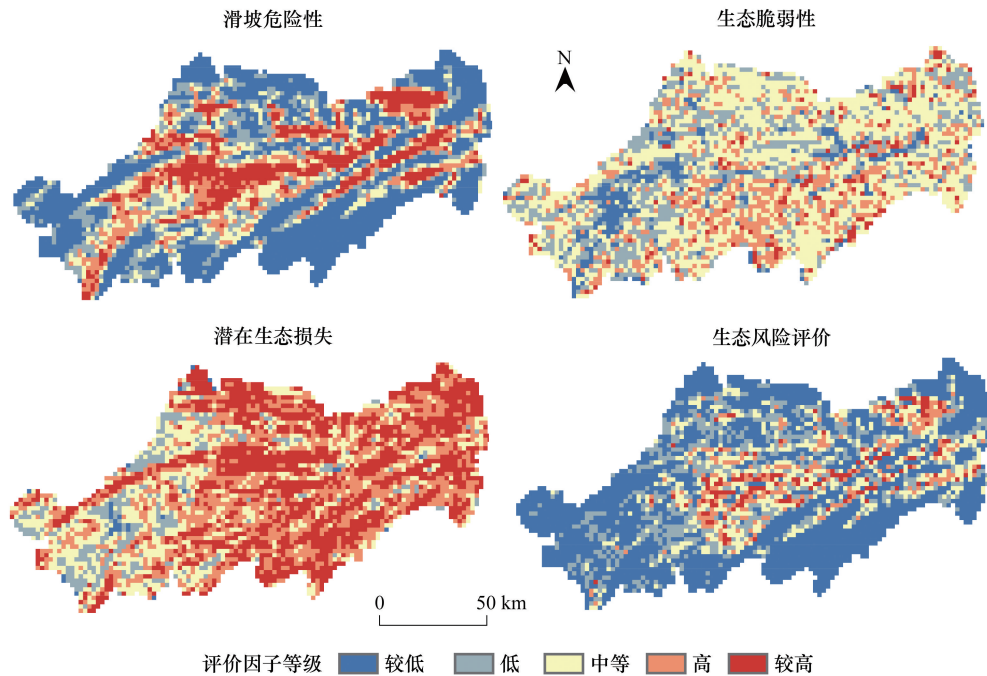


图3 2 km × 2 km 格网尺度下滑坡灾害生态风险评价因子及风险等级

Fig.3 Ecological risk assessment factors and result of landslide disaster under grid scale

以研究区下辖的 131 个乡镇进行行政尺度的风险评价(图 1)。由图 4,该尺度下,研究区滑坡灾害高-较高危险区集中分布于长江两岸乡镇,较低-低危险性区域则集中分布于研究区西部及中南部;就生态脆弱性而言,研究区大部分地区属于低-中等脆弱区,高-较高脆弱区分布较为零散;潜在生态损失高-较高的区域集中分布在研究区中部及东部,包括奉节及巫山两个县全域范围,研究区西部潜在生态损失普遍较低;最后,由生态风险评价结果,研究区大部分地区属于低-较低风险区,且主要分布于研究区西部、中南部及东北部乡镇,生态风险中等-高-较高区域主要分布于长江两岸沿线乡镇。

基于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的二级流域数据^[32],计算子流域尺度(共 85 个)的生态风险值。图 5 表明,子流域尺度下,研究区滑坡高-较高危险区分布于长江两岸子流域,较低-低危险区则集中分布于研究区西部及中南部;研究区大部分地区属于低-中等脆弱区,高-较高脆弱区分布主要分布于中南部;潜在生态损失由西向东逐渐增加;研究区西部大部分地区属于生态风险低-较低区域,生态风险中等-高-较高区域主要分布于长江两岸流域。

3.2 多尺度滑坡灾害生态风险对比

不同尺度的滑坡风险类型及其面积所占比例稍有不同,但无论何种尺度,从较低风险区到较高风险区,风险面积占比逐渐减少(图 6),且生态风险等级较高的区域均为长江两岸沿线,表明本研究区生态风险结构受三峡库区工程影响较大。格网尺度、行政尺度及子流域尺度下,研究区滑坡灾害生态风险均值依次为 2.01、2.14 和 2.13,均属于中风险区间。叠加分析各尺度风险评价结果(表 3),结果表明,无论何种叠加尺度,从较低风险区域到较高风险区域,重叠面积逐渐减少,较低风险区域重叠面积最多;同时,格网与子流域尺度、行政与子流域尺度、格网与行政尺度重叠部分面积依次为 45.31%、40.70% 和 42.14%,两两尺度风险分布结果具有

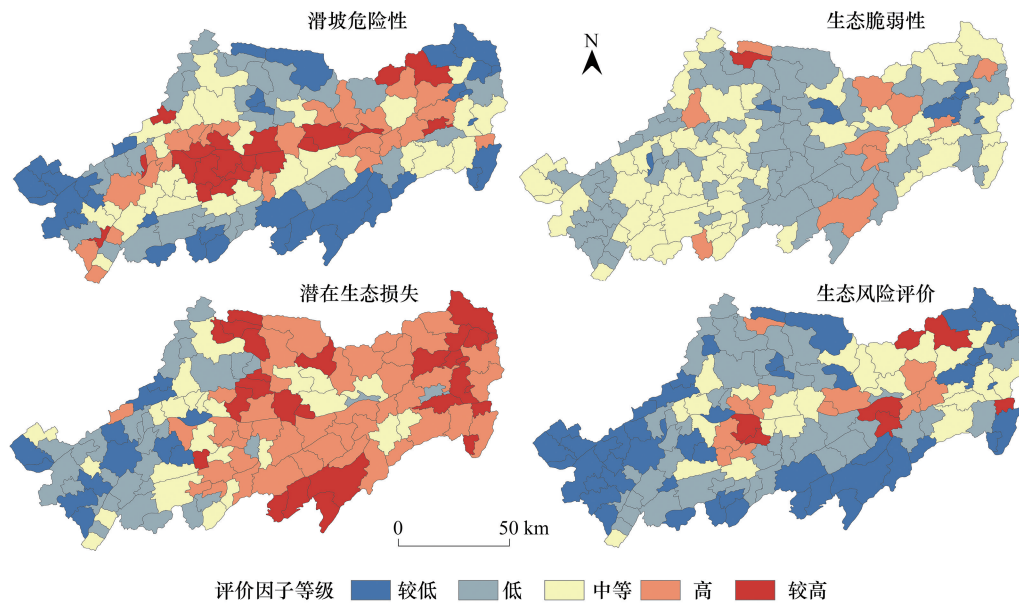


图 4 行政尺度下滑坡灾害生态风险评价因子及风险等级

Fig.4 Ecological risk assessment factors and result of landslide disaster under administrative scale

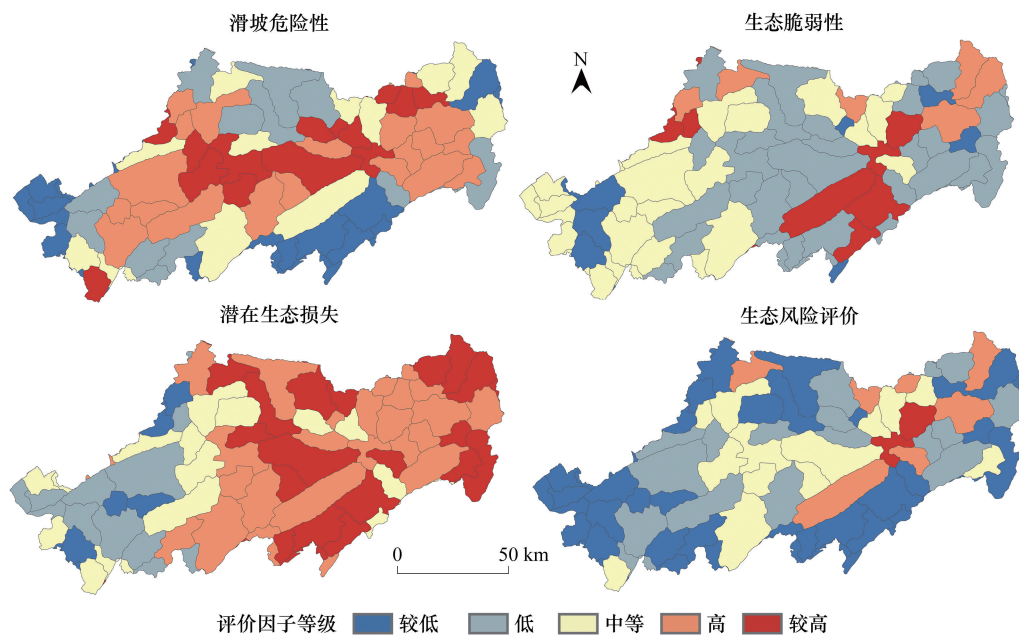


图 5 子流域尺度下滑坡灾害生态风险评价因子及风险等级

Fig.5 Ecological risk assessment factors and result of landslide disaster under sub-watershed scale

一定相似性,而三种尺度共同重叠面积占比较小(25.25%),表明三种尺度共同作用的生态评价结果又存在一定差异。

为进一步探讨评价结果空间分布情况,本文对风险结果进行空间自相关分析。结果表明,格网、行政、子流域尺度下 Moran's I 空间自相关指数依次为 0.526、0.283 和 0.376,均通过 0.001 水平显著性检验。格网尺度下的空间自相关性最高,且为显著正相关,即高风险区周围地区的生态风险值亦高,低风险区域周围地区的生态风险值亦低,即空间趋同集聚现象明显;其次是子流域尺度,行政尺度下的空间自相关性最低,风险空间集

聚结果与风险表征结果匹配度相对最低。

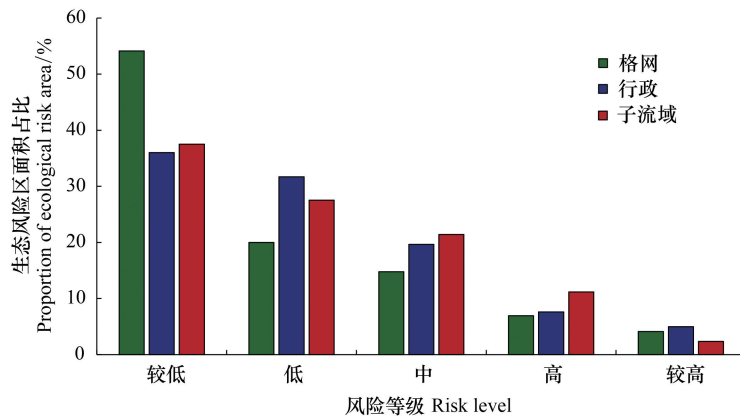


图 6 不同尺度下生态风险区面积占比

Fig.6 The proportion of ecological risk areas under each scale

表 3 不同尺度风险区叠加面积占比

Table 3 Percentage of overlay risk areas under each scale

尺度叠加 Overlay of scales	较低 Very low/%	低 Low/%	中 Medium/%	高 High/%	较高 Very high/%	合计 Overall/%
格网与行政 Grid & administrative scale	28.65	9.19	4.86%	1.41	1.19	45.31
格网与子流域 Grid & sub-watershed scale	26.78	7.16	5.26	1.22	0.28	40.70
行政与子流域 Administrative & sub-watershed scale	23.35	9.27	8.09	0.91	0.51	42.14
格网与行政与子流域 Grid & administrative & sub-watershed scale	20.15	2.89	2.07	0.08	0.06	25.25

3.3 多尺度滑坡灾害生态风险防范分区

基于主导因子进行风险防范分区,有利于明确滑坡灾害生态风险的内在作用机理,进而针对性地提出防范策略。本文基于“三基色”原理,即将危险性、脆弱性、生态损失评价结果依次输入红色、绿色、蓝色波段,确定主导因子并将主导因子一致的区域划为同一类进行防范^[5,33](图 7)。

避让监测预警区,危险性高且损失较高,集中分布于研究区中部,即长江两岸沿线,建议积极监测滑坡及支护危险边坡,同时避免人类活动产生的生境破坏;避让保护兼顾区,脆弱性高且损失较高,在子流域尺度下在研究区西部靠近中部有少量分布;监测保护恢复区,危险性高且脆弱性高的区域,应最大程度避免人为活动的影响,保持景观的整体性;综合风险管理区,整体风险较高,风险结构平衡,倡导综合滑坡监测、生态环境保护、建筑活动避让的风险管理;自然适应调控区,风险防范冷点,集中分布于研究区西部、南部以及东北部部分地区,脆弱性及潜在损失较低,主导因素不明显,风险等级整体较低,可依托生态系统自身恢复和适应能力抵御灾害。

总的来说,研究区东部风险防范类型相对单一,西部风险防范类型较多,分异较为明显,需做到精细化管理。针对危险性主导区域,需详细了解致灾因子,开展滑坡隐患点排查工作,关注汛期,采取适当措施(如工程治理或搬迁等),尽量减少人类活动对本就敏感的地质环境产生影响;对于脆弱性主导区域,需增强生态系统多样性与生态弹性,对于必须建设开发的区域,需尽量保持生态系统斑块边缘的自然度,减少破碎化,降低风险暴露。本研究结果可为当地政府进行风险决策时提供理论支撑。

4 讨论

选择合适的空间尺度是景观生态学的重要议题。目前生态风险评价集中在单一空间尺度,鲜有多尺度综

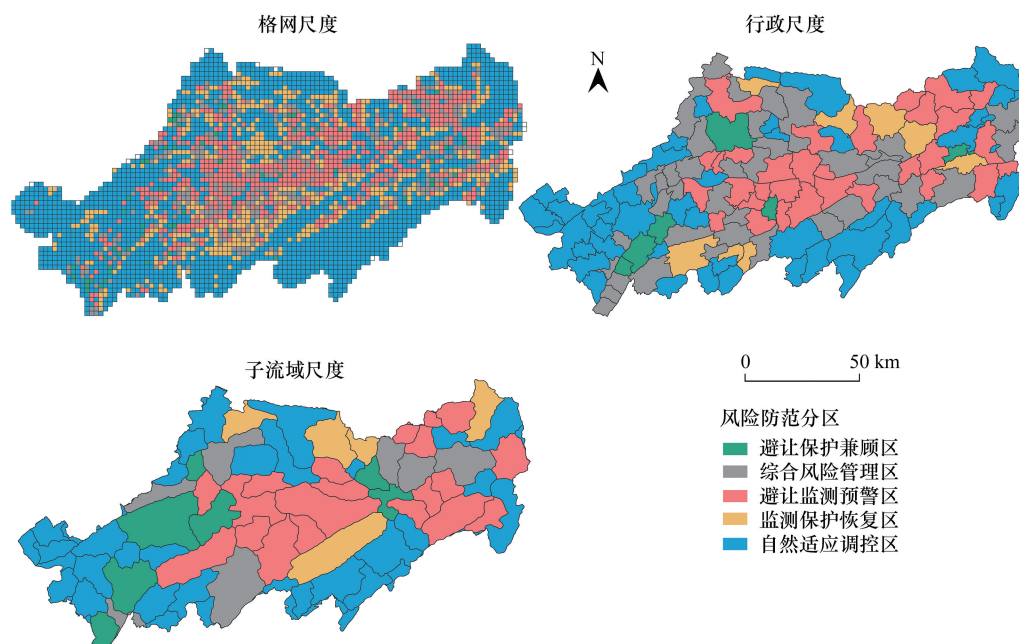


图7 滑坡灾害生态风险防范分区

Fig.7 Ecological risk prevention mapping of landslide disasters

合对比研究。本文在对比分析多尺度风险评价结果基础上,进一步选择研究区生态风险评价的适宜尺度。叠加各尺度风险评价(表3)表明:格网与子流域尺度风险区重叠面积比例最大(45.31%),风险分布结果最为相似,因此以格网和子流域尺度作为适宜尺度备选。格网尺度的滑坡生态风险评价虽具有空间位置的高度精确性,但在一定程度上破坏景观生态系统完整性^[2],尤其对于地形复杂的三峡库区而言,基于格网尺度保持生态完整性较为困难。子流域尺度可最大程度保证研究区景观生态系统完整性,且子流域尺度下的 Moran's *I* 结果较好,显著性较强,风险集聚特征与其风险结果分布趋势较为相似。

为进一步探讨子流域尺度下滑坡生态风险结果的合理性,本文结合研究区四个县域在该尺度下的风险分布合理性进行验证。从西至东(万州-云阳-奉节-巫山),研究区地势依次增高,高-较高生态风险区占比依次增加。除万州区,云阳、奉节、巫山均是国家重点生态功能县,具有典型的山地生态系统特征,良好的生态环境本是该区域最大的优势,但该区地形起伏大,海拔较高,滑坡数量均大于万州区;再加上三峡库区的修建和运行,大量移民迁入,人类活动对局部生态系统的连通性和完整性造成一定破坏,造成生物多样性减少等生境退化现象^[34]。而万州平均海拔相对降低,地势相对平缓,区内滑坡数量相对较少,较少有大型沟壑或沟壑交汇的区域,生态脆弱性及潜在生态损失低于其余三个县域,因此其滑坡生态风险现状好于其他三个县域。

结合研究区实际情况分析表明,子流域尺度的生态风险评价结果与现实情况基本吻合,在保证基本单元内生态完整性的前提下评价结果精度好于其他两种尺度,在未来进行整个三峡库区或类似地形条件区域的滑坡灾害生态风险评价时可优先考虑该尺度。

5 结论

本文以三峡库区滑坡重点监测县域为例,基于“危险性-脆弱性-潜在损失”框架,评价多尺度下的滑坡灾害生态风险,提出适合各尺度的风险管理措施,在此基础上选择最适宜尺度并结合研究区实际情况进行验证。结果表明:生态风险等级较高区域集中于长江两岸沿线,三峡库区建设对研究区滑坡生态风险产生较大影响;两两尺度风险分布结果具有一定相似性,而三种尺度共同作用的风险评价结果又存在一定差异;子流域尺度在保证生态结构完整性的前提下评价结果好于其他两种尺度,更适合三峡库区滑坡县域的生态风险评价;研

究区东部风险防范类型相对单一,而西部风险防范类型较多,需做到精细化管理。

本研究增加了多尺度综合评价实例,为当地政府进行风险决策时提供理论支撑,对今后开展整个三峡库区生态风险研究奠定一定理论和实践基础。然而,本研究尚存在一些不足,如未进行不确定性分析等。未来研究将进一步采用如蒙特卡洛^[5]等方法,考虑滑坡灾害生态风险评价中的不确定因素,制定更为科学、恰当的风险管理措施。

参考文献 (References):

- [1] 余欣,余瑞林,孙松峰,邓伟平. 基于 CiteSpace 的生态风险评价研究进展与启示. 生态学报, 2022, 42(24): 1-14.
- [2] 彭建,党威雄,刘焱序,宗敏丽,胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.
- [3] Sun D L, Shi S X, Wen H J, Xu J H, Zhou X Z, Wu J P. A hybrid optimization method of factor screening predicated on GeoDetector and Random Forest for Landslide Susceptibility Mapping. Geomorphology, 2021, 379: 107623.
- [4] 王慧芳,林子雁,肖焱,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.
- [5] 吴健生,罗宇航,王小玉,赵宇豪. 城市滑坡灾害生态风险不确定性分析及风险管理——以深圳市为例. 生态学报, 2020, 40(11): 3612-3621.
- [6] 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.
- [7] 刘希林,余承君,尚志海. 中国泥石流滑坡灾害风险制图与空间格局研究. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(5): 721-731.
- [8] 高彬媛,李琛,吴映梅,郑可君,武燕. 川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1603-1613.
- [9] 余玉洋,李晶,周自翔,马新萍,张城. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. 生态学报, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [10] Hunsaker C T, Graham R L, Suter II G W, O'Neill R V, Barnhouse L W, Gardner R H. Assessing ecological risk on a regional scale. Environmental Management, 1990, 14(3): 325-332.
- [11] Landis W G. Twenty years before and hence; ecological risk assessment at multiple scales with multiple stressors and multiple endpoints. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2003, 9(5): 1317-1326.
- [12] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. 生态学报, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [13] 马胜,梁小英,刘迪,段宁,陈海. 生态脆弱区多尺度景观生态风险评价——以陕西省米脂县高渠乡为例. 生态学杂志, 2018, 37(10): 3171-3178.
- [14] 许嘉慧,孙德亮,王月,文海家,王丹舟. 基于 GIS 与改进层次分析法的奉节县滑坡易发性区划. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2020, 37(2): 36-44.
- [15] 王舒,张骞,王子芳,余泳,向书江,高明. 基于 GIS 的三峡库区生态风险评估及生态分区构建. 生态学报, 2022, 42(11): 4654-4664.
- [16] Sun D L, Xu J H, Wen H J, Wang Y. An optimized random forest model and its generalization ability in landslide susceptibility mapping: application in two areas of three gorges reservoir, China. Journal of Earth Science, 2020, 31(6): 1068-1086.
- [17] 张书豪,吴光. 随机森林与 GIS 的泥石流易发性及可靠性. 地球科学, 2019, 44(9): 3115-3134.
- [18] Sun D L, Xu J H, Wen H J, Wang D Z. Assessment of landslide susceptibility mapping based on Bayesian hyperparameter optimization: a comparison between logistic regression and random forest. Engineering Geology, 2021, 281: 105972.
- [19] 何清清,李月臣,何君,朱康文. 重庆市景观格局脆弱性及其驱动因素研究. 中国资源综合利用, 2019, 37(6): 61-67.
- [20] 张玉娟,曲建光,李丹,叶猛猛,何鲲. 松花江流域(哈尔滨段)景观格局脆弱性变化及空间关联格局分析. 地理与地理信息科学, 2019, 35(6): 105-110.
- [21] 黄和平,杨宗之. 基于 PSR-熵权模糊物元模型的森林生态安全动态评价——以中部 6 省为例. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 42-51.
- [22] 任红玉,赵宇鸾. 贵阳市岩溶山区快速城市化地区生态脆弱性评价. 生态科学, 2020, 39(4): 252-258.
- [23] 王世东,郭磊. 焦作市北山资源枯竭型地区在经济转型过程中的生态脆弱性评价. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3442-3451.
- [24] 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.
- [25] 张行,陈海,史琴琴,张敏,刘迪. 陕西省景观生态脆弱性时空演变及其影响因素. 干旱区研究, 2020, 37(2): 496-505.
- [26] 李胜鹏,柳建玲,林津,范胜龙. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [27] 陈雅倩,赵丽,陶金源,张蓬涛. 基于 InVEST 模型的未利用地开发前后生境质量评价——以唐县为例. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1093-1102.
- [28] 周亮,唐建军,刘兴科,党雪薇,慕号伟. 黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响——以兰州、西安-咸阳及太原为例. 应用生态学报, 2020, 32(1): 261-270.
- [29] 朱增云,阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3408-3420.
- [30] 朱杰,龚健,李靖业. 青藏高原东部生态敏感区生境质量时空演变特征——以青海省河湟谷地为例. 资源科学, 2020, 42(5): 991-1003.
- [31] 吴楠,陈红枫,冯朝阳,蒋洪强,吴文俊,李岱青,赵洋尘. 基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5): 1119-1127.
- [32] 徐新良,庄大方,贾绍凤,胡云峰. GIS 环境下基于 DEM 的中国流域自动提取方法. 长江流域资源与环境, 2004, 13(4): 343-348.
- [33] Marsboom C, Vrebos D, Staes J, Meire P. Using dimension reduction PCA to identify ecosystem service bundles. Ecological Indicators, 2018, 87: 209-260.
- [34] 李灿,吴娇,李月臣. 三峡库区生态敏感区生态系统服务价值及生态安全变化——以重庆市云阳、奉节、巫山三县为例. 水土保持研究, 2020, 27(5): 304-310, 317-317.