



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2505132

引用格式: 刘娜, 刘洪, 宋志, 等. 基于敏感性-恢复力-压力度模型的白龙江流域生态地质脆弱性评价[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(20): 8559-8572.

Liu Na, Liu Hong, Song Zhi, et al. Eco-geological vulnerability assessment of Bailong River Basin based on SRP model[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(20): 8559-8572.

基于敏感性-恢复力-压力度模型的白龙江流域生态地质脆弱性评价

刘娜^{1,2}, 刘洪², 宋志^{2*}, 胡新露¹, 陈浩², 肖许亮³

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 成都 610218;
3. 四川黄金集团有限公司, 成都 610213)

摘 要 针对长江上游生态屏障建设需求,以生态地质多样性显著的白龙江流域为研究区,基于敏感性-恢复力-压力度(sensitivity-recovery-pressure,SRP)概念模型构建了涵盖地质构造、气候环境、植被覆盖和人类活动4个维度14项指标的评价体系。通过层次分析法-熵权法组合赋权确定生态地质脆弱性指数(eco-geological vulnerability index,EVI),结合空间自相关分析与地理探测器方法,系统揭示流域生态地质脆弱性空间分异规律及多因子驱动机制。结果表明:流域生态地质脆弱性呈现显著空间集聚特征(Moran's $I=0.78, p<0.01$),脆弱等级以微度脆弱为主(68.56%),极度脆弱区(2.92%)集中分布于构造活跃的陡峭地形带。地理探测器识别出活动断裂密度($q=0.8325$)和历史地震强度($q=0.1368$)为关键自然驱动因子,GDP密度($q=0.0494$)与人口密度($q=0.0511$)构成主要人为压力源。因子交互效应呈现双因子增强或非线性增强特征,活动断裂密度与历史地震强度的协同作用($q=0.9199$)显著加剧区域脆弱性。生态地质脆弱性是自然地质本底与人类活动扰动协同作用的结果,建议建立高脆弱区立体监测网络并实施差异化生态修复策略。研究成果可为白龙江流域地质-生态系统协同治理提供科学依据和决策参考。

关键词 生态地质; 脆弱性评价; 敏感性-恢复力-压力度(SRP)模型; 白龙江; 地理探测器; 莫兰指数

中图分类号 P66 TP79 X141; **文献标志码** A

Eco-geological Vulnerability Assessment of Bailong River Basin Based on SRP Model

LIU Na^{1,2}, LIU Hong², SONG Zhi^{2*}, HU Xin-lu¹, CHEN Hao², XIAO Xu-liang³

(1. College of Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey (Southwest Geological Science and Technology Innovation Center), Chengdu 610218, China;
3. Sichuan Gold Group Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

[Abstract] In order to meet the needs of ecological barrier construction in the upper reaches of the Yangtze River, the Bailong River Basin with significant ecological and geological diversity as the research area was selected. Based on the sensitivity-resilience-pressure (SRP) conceptual model, an evaluation system comprising 14 indicators across four dimensions-geological structure, climatic environment, vegetation cover, and human activities was constructed. The eco-geological vulnerability index (EVI) was determined through a combination of analytic hierarchy process and entropy weight method. Through spatial autocorrelation analysis and geographical detector method, the spatial differentiation patterns and multi-factor driving mechanisms of eco-geological vulnerability in the basin were systematically investigated. The results demonstrate that the eco-geological vulnerability of the basin exhibits significant spatial agglomeration characteristics (Moran's $I=0.78, p<0.01$). The vulnerability level is predominantly characterized by micro-vulnerability (68.56%), with extremely vulnerable areas (2.92%) concentrated in tectonically active steep terrain regions. Geodetector analysis reveals active fault density ($q=0.8325$) and historical earthquake intensity ($q=0.1368$) as key natural driving factors, while GDP density ($q=0.0494$) and population density ($q=0.0511$) constitute the primary sources of human-induced pressure. The interactive synergy between active fault density and historical earthquake intensity ($q=0.9199$) significantly exacerbates regional vulnerability. This research indicates that eco-geological vulnerability results from the combined effects of natural geological background conditions and human activity disturbances. It is recommended to establish three-dimensional monitoring networks for high-vulnerability areas and implement differentiated ecological restoration strategies. The findings provide a scientific

收稿日期: 2025-07-09; 修订日期: 2026-01-31

基金项目: 四川省自然资源投资集团科研项目(川资投函[2025]300号);中国地质调查项目(DD20221776,DD20230247)

第一作者: 刘娜(2000—),女,汉族,山西吕梁人,硕士研究生。研究方向:生态地质、国土空间规划。E-mail:1832623559@qq.com。

* 通信作者: 宋志(1982—),男,汉族,四川达州人,博士,正高级工程师。研究方向:国土空间规划、生态修复、地球科学适宜性评价。E-mail:35842126@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

basis and decision-making reference for collaborative management of the geo-ecological system in the Bailong River Basin.

[**Keywords**] ecological geology; vulnerability assessment; sensitivity-recovery-pressure (SRP) model; Bailong River; geographical detector; Moran's index

生态安全,指的是人类在生产、生活等诸多层面,免受生态破坏、环境污染等不利因素影响的保障程度^[1],是实现可持续发展的重要基础,也是高质量发展的内在要求^[2]。当前,生态系统正面临着严峻威胁,相关生态问题不仅会对生态环境造成一定影响,同时也会对人类的生存构成威胁,对经济社会的长远发展形成重大阻碍^[3]。在此背景下,生态安全被视为“有效协调人类社会经济活动和生态保护之间的关系”的关键抓手^[4],通过优化国土生态安全格局、推进生态修复与建设,化解保护与发展的矛盾,维护生态网络的连通性和生态过程的完整性,从而持续改善区域生态安全状况。这也是对“生态环境是人类生存的基本要求,其质量会对人类生活以及社会经济的可持续发展产生一定的影响”^[5]这一根本关切的积极回应。

“生态地质学”的有关概念最早由 Trofimov 等^[6-7]提出,作为一门新兴交叉学科,其核心在于探究地质环境系统与生态系统之间的相互作用机制^[8-10],对国土空间生态保护修复工作具有重要的理论支撑作用^[11]。该学科通过整合生态学、地质学、土壤学、地球化学等多学科,致力于揭示岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈及生物圈之间的耦合关系及其对生态环境的调控作用^[12],从更宏观的角度理解地质与生态系统的内在联系,为生态环境保护和地质灾害防治提供了新的理论依据和实践方法。

自 20 世纪 70 年代起,专家们开始将“脆弱性”这一概念引入生态研究领域,并逐步拓展至其他领域^[13-14]。但是现有成果多聚焦于生态要素的表层特征分析,往往忽视了区域生态环境的地质基础。实际上,生态环境系统与地质环境系统是相互依存、相互影响、相互制约的统一体,任何单方面的研究都无法全面揭示二者协同演化的本质规律^[15]。张景华等^[13]探索了基于条件的生态脆弱性评价工作,提出生态地质脆弱性的概念,以地质条件对生态环境发生发育的制约机制研究为基础,并对西昌市进行了脆弱性评价。计杨等^[16]参考了基于生态地质条件开展评价的思想,从生态环境与地质环境两个方面选取指标开展评价,研究了岷江上游流域震前震后生态地质安全演变。这些研究都强调了地质环境与生态环境的相互作用,能够更精准地识别生态风险和脆弱环节。

脆弱性评价通常包含构建评价指标体系、选择方法、综合评估的流程^[17]。常见的评价模型有:压

力-状态-响应 (pressure-state-response, PSR) 模型^[18]、暴露-敏感-适应 (vulnerability-scoping-diagram, VSD) 模型^[19-20]、暴露度-敏感性-应对能力 (exposure-sensitivity-capacity, ESC) 模型^[21]、敏感度-恢复力-压力度 (sensitivity-recovery-pressure, SRP) 模型、物元模型^[22]等。例如,基于 SRP 模型的评价体系在地质灾害易发区^[23-24]应用效果好,能整合自然与人文驱动因子的非线性影响。评价方法主要有:熵权法^[25]、层次分析法^[26]、主成分分析法^[27-28]、灰色关联度分析法^[29]、变异系数法^[30]、神经网络^[31]等。赵宗泽等^[32]利用熵权法构建中原城市群生态脆弱性评价指标体系。Xu 等^[33]采用云模型优化层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 测算主观权重,熵权法量化客观权重,构建组合赋权模型研究石羊河流域生态环境脆弱性。陈宗敏等^[34]结合空间主成分分析与地理探测器模型研究渭河流域甘肃段生态脆弱性。权重确定上,层次分析法凭专家经验,熵权法基于数据离散程度客观赋权,二者结合 (AHP-熵权法) 在沁河流域^[10]和康定市^[35]生态脆弱性研究中具有科学性与稳健性。

白龙江流域处青藏高原东缘向四川盆地过渡带,是长江上游重要水源涵养区与生态屏障带,地形破碎,地质构造活跃,受强扰动事件影响大^[36-37]。因极端降雨等因素,地质灾害频发,水土流失与生态退化严重,形成“地质-生态”链式灾害风险,威胁区域生态安全^[38-39]。但现有研究多集中于单一地质灾害风险评估,缺乏多维度系统评价^[40-41]。为此,构建基于 SRP 模型,用 AHP-熵权法组合赋权,结合空间自相关分析和地理探测器的生态地质脆弱性评价体系,填补过渡带生态地质脆弱性评价空白,为长江上游生态屏障建设提供治理参考。

1 研究区生态地质背景

白龙江流域 (32°10'N ~ 34°20'N, 103°30'E ~ 105°40'E) 地处青藏高原东缘构造活跃带,是长江上游嘉陵江的一级支流,发源于甘肃省甘南藏族自治州碌曲县与四川若尔盖县交界的郎木寺,流经甘肃省迭部县、舟曲县、宕昌县、武都区、文县,以及四川省广元市,最终在广元昭化汇入嘉陵江^[42] (图 1),处于西南生态地质大区北部边缘地带。流域面积约 3.18 万 km²,位于青藏高原、黄土高原和四川盆地三大地貌单元的交汇处,整体呈西北-东南走向。

该区域受多期构造运动影响,岩性复杂,地层

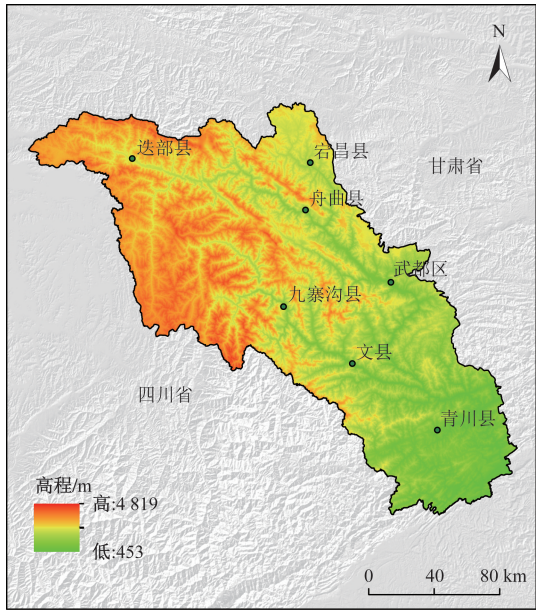


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographic location map of the study area

从志留系到第四纪均有出露。三叠系以前以海相碎屑岩及碳酸盐岩建造为主,之后转为陆盆相碎屑岩与山麓堆积相,伴中性火山岩建造。软弱与坚硬岩石互层,形成易滑地层^[43-44]。流域内活动断裂发育,如白龙江断裂带等,变形速率达5~10 mm/年,历史地震频发,岩体破碎,滑坡、泥石流灾害常见^[36-38]。流域地形起伏大,平均海拔约2 000 m,坡度陡峻,平均坡度约31°,局部超40°^[36-37,43,45]。气候属北亚热带向暖温带过渡,年均温8~15℃,年降水量400~900 mm,集中于6~9月,多大雨、暴雨,易引发泥石流^[36,38,44]。植被种类多,分布差异大,垂直分带明显,从阔叶林到针叶林再到草本植物。覆盖度中等,上游草本植被为主、覆盖度高,中游植被差、地表多裸露,是泥石流高发区^[36,38]。土壤类型多样,持水能力较差,抗侵蚀能力弱,强降雨下易被侵蚀。土地利用类型多样,以坡耕地为主^[38]。人口分布不均,开发程度差异大,经济发展水平不一,陇南地区相对发达^[37]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

研究数据主要涵盖地质与地形、气候与水文、生态与土壤、社会经济与土地利用四类。地质与地形数据包括历史地震强度(earthquake-china提取)、活动断裂密度(全国100万活动断裂提取)、地质建造类型(全国50万地质图提取)、地貌类型、坡度(基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)计算);气候与水文数据(年平均气温、年平均降水

量)基于全国2 400多个气象站点日观测数据通过整理、计算和ANUSPLIN空间插值处理生成;生态与土壤数据含植被覆盖度(Landsat 8 NDVI反演)、植被类型及土壤属性(1:100万土壤类型图联合HWSD数据库);社会经济与土地利用数据包括人口密度、GDP与土地利用类型(土地利用数据采用中国科学院资源环境科学与数据中心发布的中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC),空间分辨率为30 m,数据基于Landsat系列遥感影像经人工目视解译生成,采用6个一级类、25个二级类的CNLUCC分类体系)。数据来源如表1所示。预处理阶段,统一采用高斯-克吕格投影(CGCS2000_3_Degree_GK_CM_105E投影),所有栅格数据重采样至30 m×30 m。

表1 数据源

Table 1 Data source

数据名称	数据来源
DEM	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
坡度	基于DEM计算
土地利用类型	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
人口密度、GDP数据	资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/)
气温、降水量数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
土壤数据	世界土壤数据集(HWSD)
地貌类型	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/main/)
地震数据	地质云(https://geocloud.cgs.gov.cn/)
植被数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
活动断裂	国家地震科学数据中心(http://data.earthquake.cn)
地质建造	地质云(https://geocloud.cgs.gov.cn/)

2.2 基于SRP模型构建评价指标体系

依据白龙江流域生态地质特征,运用SRP模型,将其生态地质脆弱性指标分为敏感性、恢复力和压力度三个维度(图2),具体指标情况如图3所示。

通过综合既有研究基础,依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007),并运用自然间断点分级法,对指标体系实施分级,最终将所有评价指标科学划分为5个等级体系,如表2所示。

2.3 数据标准化处理

由于原始指标具有多源异质性,在量纲差异、属性特征区别及数值量级跨度悬殊等因素影响下,难以开展有效的横向比较分析^[46]。因此,针对定量指标采用极差标准化法^[47]、对定性指标实施分级赋值标准法分别进行数据规范化处理,最终使所有指标数值统一映射至0~1。

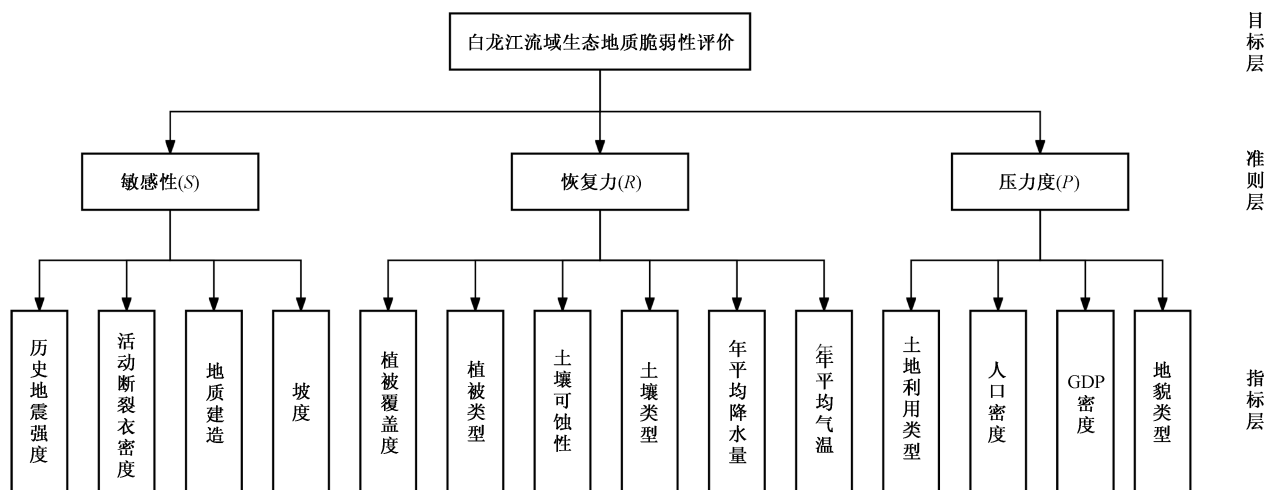


图2 白龙江流域生态地质脆弱性评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of eco-geological vulnerability in Bailong River Basin

表2 白龙江流域生态地质脆弱性评价指标分级标准

Table 2 Grading standard of eco-geological vulnerability assessment index in Bailongjiang River Basin					
指标	分级标准				
	微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	高度脆弱	极度脆弱
历史地震强度	<0.04	0.04~0.18	0.18~0.38	0.38~0.61	0.61~1.05
活动断裂密度/ (km·km ⁻²)	<3 500.61	3 500.61~10 501.84	10 501.84~19 336.73	19 336.73~30 005.26	30 005.26~42 674.15
地质建造	第四系松散沉积物建造	中酸性岩建造、碱性岩建造、基性-超基性岩建造	古生界碎屑岩建造、中生界碎屑岩建造、新生界碎屑岩建造	前寒武纪基性变质岩建造、古生界长英质-泥质变质岩建造、中生界泥质—长英质变质岩建造	中生界碳酸盐岩建造、古生界碳酸盐岩建造
坡度/(°)	<8	8~15	15~25	25~35	>35
植被覆盖度/%	>75	60~75	45~60	30~45	<30
植被类型	阔叶林	针阔叶混交林	针叶林、灌丛	草甸、栽培植被	草原、高山植被、草丛
土壤腐蚀性/ [t·hm ² ·h· (hm ² ·mm·MJ) ⁻¹]	<0.009 93	0.009 93~0.013 714	0.013 714~0.015 336	0.015 336~0.017 336	>0.017 336
土壤类型	黄棕壤	黄褐土	黑土、石灰(岩)土	黑毡土、草毡土、寒冻土、黄壤、黑钙土、红黏土、粗骨土、灰褐土、沼泽土、寒钙土	褐土、棕壤、暗棕壤、水稻土、石质土、紫色土、山地草甸土
年平均降水量/mm	<912	912~1 061	1 061~1 262	1 262~1 491	>1 491
年平均气温/℃	>12	8~12	5~8	2~5	<2
土地利用类型	林地	草地	水域	耕地	城乡、工矿、居民用地、未利用土地
人口密度/ (人·km ⁻²)	<63	63~170	170~296	296~391	>391
GDP密度/ (万元·km ⁻²)	<186	186~878	878~1 691	1 691~2 129	>2 129
地貌类型	湖泊、中高海拔冲积洪积平原	中高海拔中起伏山地、高海拔中起伏山地	中海拔中起伏山地、低海拔小起伏山地、中海拔冲积洪积平原	中高海拔黄土梁峁、中高海拔大起伏山地、低海拔冲积洪积台地、中海拔大起伏山地	高海拔极大起伏山地、高海拔大起伏山地、中高海拔极大起伏山地

2.3.1 极差标准化

程度越高(如活动断裂密度),逆向指标则相反(如植被覆盖度)。

定量指标可分为正向指标与逆向指标[式(1)、式(2)]。正向指标表示数值越大生态地质脆弱性正相关指标:

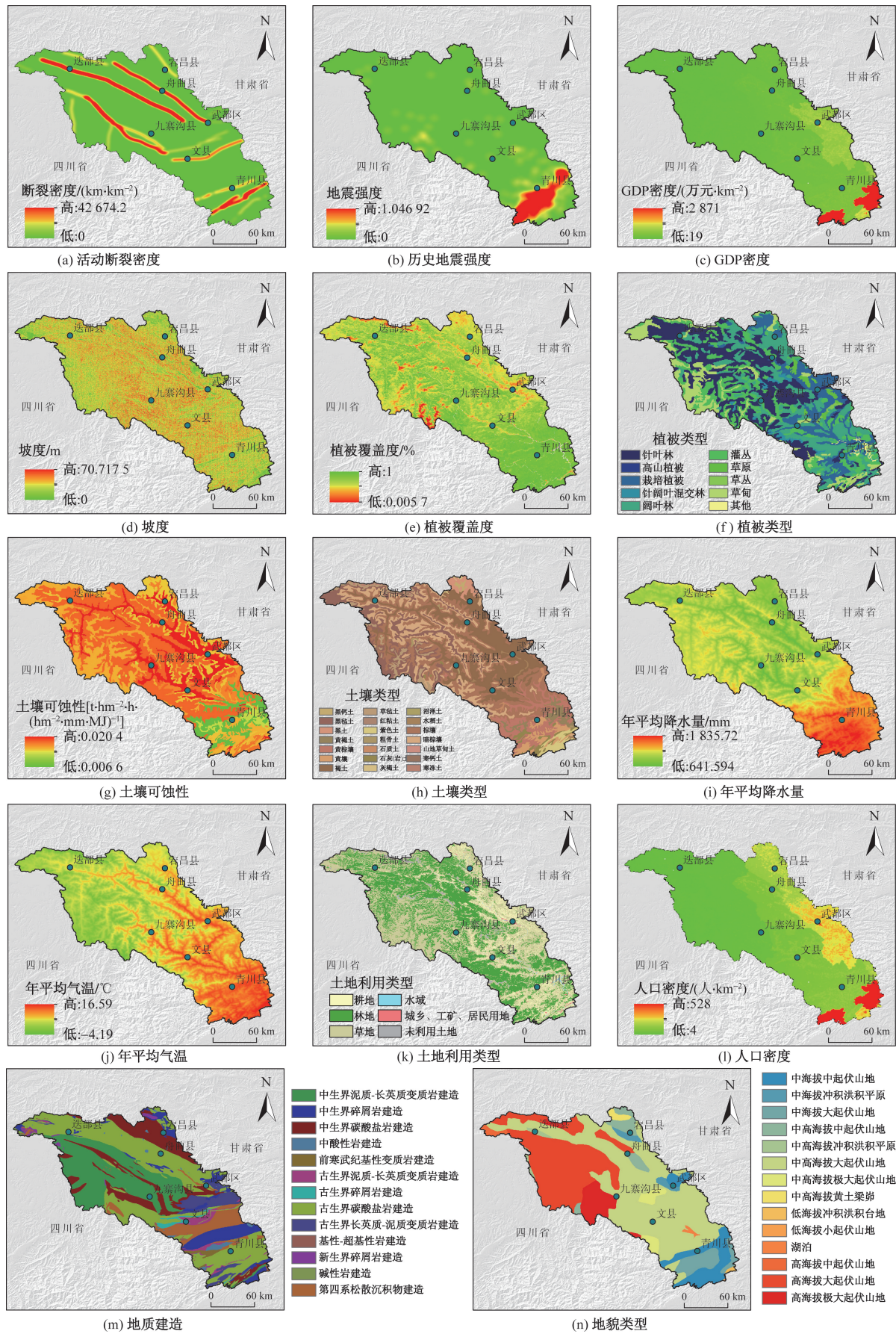


图3 白龙江流域单因子指标评估图

Fig.3 Evaluation chart of single factor index in Bailongjiang River Basin

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

负相关指标:

$$y_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: y_i 为第 i 个指标进行标准化后的标准化值; x_i 为第 i 个指标进行标准化前的原始值; $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为第 i 个指标在进行标准化前的最小值和最大值。

2.3.2 分级赋值标准化

定性指标的量化处理结合白龙江流域地质生态特征及参考文献[48-49],对分类指标分级赋值后,按正向指标进行标准化计算,结果如表3所示。

2.4 层次分析法

基于SRP模型框架构建三级递阶层次结构,通过专家咨询与文献支持构建判断矩阵,并利用一致性比率CR[式(3)]验证合理性($CR < 0.1$),随后计算权重 W_{1j} 。

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)RI} \quad (3)$$

式(3)中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值; n 为矩阵阶数; RI 为随机一致性指数。

2.5 熵权法

进一步采用熵权法弥补层次分析法的主观局限性^[50]。首先,对预处理后的14项指标数据构建标准化矩阵 $X = (x'_{ij})_{m \times n}$ (标准化处理之后的数据),其中, m 为栅格单元数, n 为指标数。其次,计算第 j 项指标的熵值 e_j 与差异系数 g_j ,计算公式分别为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (5)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

最终熵权 W_{2j} 由差异系数归一化确定,即

$$W_{2j} = \frac{g_j}{\sum_{k=1}^n g_k} \quad (7)$$

经熵权法计算获得权重结果 W_{2j} 。

将熵权法和层次分析法的权重计算结果组合[式(8)]得到两种方法的生态地质脆弱性评价综合权重 W_j ,可实现主客观赋权方法的优势互补(表4)。

$$W_j = \frac{W_{1j}W_{2j}}{\sum_{j=1}^n W_{1j}W_{2j}} \quad (8)$$

2.6 生态地质脆弱性指数计算

基于SRP模型,借助空间分析工具对白龙江流域生态地质脆弱性指数进行栅格计算,计算公式为

$$\begin{aligned} EVI &= ESI + ERI + EPI \\ &= \sum_{i=1}^n S_i W_i + \sum_{i=1}^n R_i W_i + \sum_{i=1}^n P_i W_i \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中: EVI 为生态地质脆弱性指数; ESI 为生态地质敏感性指数; ERI 为生态地质恢复力指数; EPI 为生态地质压力度指数; n 为各维度评价指标的个数; S_i 、 R_i 和 P_i 分别为敏感性、恢复力、压力度第 i 个评价指标的权重值; W_i 为各评价指标的标准化结果。

根据生态地质脆弱性指数,在ArcGIS采用自然间断法将白龙江流域生态地质脆弱区分为5级,即微度脆弱(0.012 148 ~ 0.121 492)、轻度脆弱(0.121 492 ~ 0.207 816)、中度脆弱(0.207 816 ~ 0.322 914)、高度脆弱(0.322 914 ~ 0.455 278)、极度脆弱(0.455 278 ~ 0.748 779),分析研究区生态地质脆弱性情况。

表3 定性指标脆弱性赋值
Table 3 Qualitative index vulnerability assignment

指标	脆弱性赋值				
	1	3	5	7	9
土地利用类型	林地	草地	水域	耕地	城乡、工矿、居民用地、未利用土地
地貌类型	湖泊、中高海拔冲积洪积平原	中高海拔中起伏山地、高海拔中起伏山地	中海拔中起伏山地、低海拔小起伏山地、中海拔冲积洪积平原	中高海拔黄土梁峁、中高海拔大起伏山地、低海拔冲积洪积台地、中海拔大起伏山地	高海拔极大起伏山地、高海拔大起伏山地、高海拔极大起伏山地
土壤类型	黄棕壤	黄褐土	黑土、石灰(岩)土	黑毡土、草毡土、寒冻土、黄壤、黑钙土、红黏土、粗骨土、灰褐土、沼泽土、寒钙土	褐土、棕壤、暗棕壤、水稻土、石质土、紫色土、山地草甸土
植被类型	阔叶林	针阔叶混交林	针叶林、灌丛	草甸、栽培植被	草原、高山植被、草丛
地质建造	第四系松散沉积物建造	中酸性岩建造、碱性岩建造、基性-超基性岩建造	古生界碎屑岩建造、中生界碎屑岩建造、新生界碎屑岩建造	前寒武纪基性变质岩建造、古生界长英质-泥质变质岩建造、中生界泥质-长英质变质岩建造	中生界碳酸盐岩建造、古生界碳酸盐岩建造

表4 白龙江流域生态地质脆弱性评价综合权重
Table 4 Comprehensive weight of eco-geological vulnerability assessment in Bailong River Basin

指标	W_{1j}	W_{2j}	W_j (综合)
历史地震强度	0.068 0	0.270 5	0.217 28
活动断裂密度	0.191 2	0.227 0	0.512 32
地质建造	0.312 3	0.015 5	0.057 01
坡度	0.076 5	0.022 4	0.020 21
植被覆盖度	0.093 6	0.002 1	0.002 37
植被类型	0.029 0	0.044 1	0.015 10
土壤可蚀性	0.017 5	0.010 6	0.002 19
土壤类型	0.029 0	0.014 6	0.005 00
年平均降水量	0.042 6	0.018 2	0.009 12
年平均气温	0.012 2	0.017 7	0.002 55
土地利用类型	0.012 4	0.108 5	0.015 94
人口密度	0.033 2	0.093 9	0.036 79
GDP	0.058 7	0.148 3	0.102 73
地貌类型	0.017 7	0.006 6	0.001 39

2.7 生态地质脆弱性空间自相关分析

为揭示白龙江流域生态地质脆弱性的空间集聚特征与异质性规律,设置3 km×3 km的渔网,采用空间自相关分析方法,结合全局莫兰指数、局部莫兰指数^[51]与局部热点分析(Getis-Ord Gi*),系统解析脆弱性空间分布模式。

2.7.1 全局空间自相关

采用全局Moran's I指数(I_g),如式(10)所示,评估脆弱性整体空间关联性。

$$I_g = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式(10)中: n 为格网个数; x_i 和 x_j 分别为第*i*个、第*j*个格网的脆弱性指数均值; W_{ij} 为空间权重矩阵; $\bar{x}$ 为脆弱性均值。

Moran's I取值范围为[-1,1],正值表示正相关(高-高或低-低聚集),负值表示负相关(高-低或低-高离散),接近0则为随机分布。通过Z检验($p<0.05$)判定显著性。

2.7.2 局部空间自相关

利用局部Moran's I指数(I_i),见式(11),识别脆弱性空间集聚类型(高-高、低-低、高-低、低-高)。局部莫兰指数的计算公式为

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (11)$$

式(11)中: S 为空间权重矩阵各元素之和。

结合Getis-Ord Gi*热点分析,进一步量化高值(热点区)与低值(冷点区)的空间显著性。

2.8 生态地质脆弱性驱动因素分析

地理探测器(Geodetector)^[52]基于空间分异性

理论,通过量化自变量与因变量在空间分布上的耦合特征,揭示多要素间的相互作用及其对目标现象的驱动机制。主要应用其因子探测与交互作用探测两大模块。

(1)因子探测器。通过计算*q*值[式(12)],量化单个自变量(*X*)对因变量(*Y*)空间异质性的解释能力。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (12)$$

式(12)中: N_h 、 σ_h^2 分别为第*h*层样本数及方差; N 、 σ^2 分别为总体样本数及方差;*q*值范围为[0,1],值越大表示*X*对*Y*的驱动效应越显著。

(2)交互探测器。分析两因子(X_1 与 X_2)的协同效应,判定交互类型(表5)。

表5 交互作用类型
Table 5 Types of interaction

判据依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 评价结果

3.1 单因子评价

白龙江流域单因子生态地质脆弱性空间差异显著(图4)。中上游地区如若尔盖县、九寨沟县,构造虽活跃但远离主断裂带,地震强度低,风险微至轻度;中下游如舟曲县、武都区,受周边地震影响,风险升至轻至中度;下游青川县等靠近龙门山断裂带,受强震影响大,地震强度高,风险极高,且易引发泥石流等次生灾害,使生态系统恢复困难。

活动断裂密度方面,北部和西北部的迭部县、宕昌县靠近青藏高原东缘断裂带,密度高,地质灾害风险极高;中部和南部相对低,但局部有高密度断裂带,仍易引发灾害。地质建造上,北部和西北部构造复杂,岩石断裂、错动普遍,极为脆弱,灾害频发;中部和南部相对稳定,但受周边活动影响,仍处中至轻度脆弱。坡度方面,中南部如舟曲县、文县坡度陡,风险极高;北部和西部地势平缓,脆弱性低。

植被覆盖度差异明显,大部分区域覆盖较好,能降低灾害风险;但中南部的舟曲县、文县等地植被覆盖度低,生态稳定性差。植被类型分布不均,中

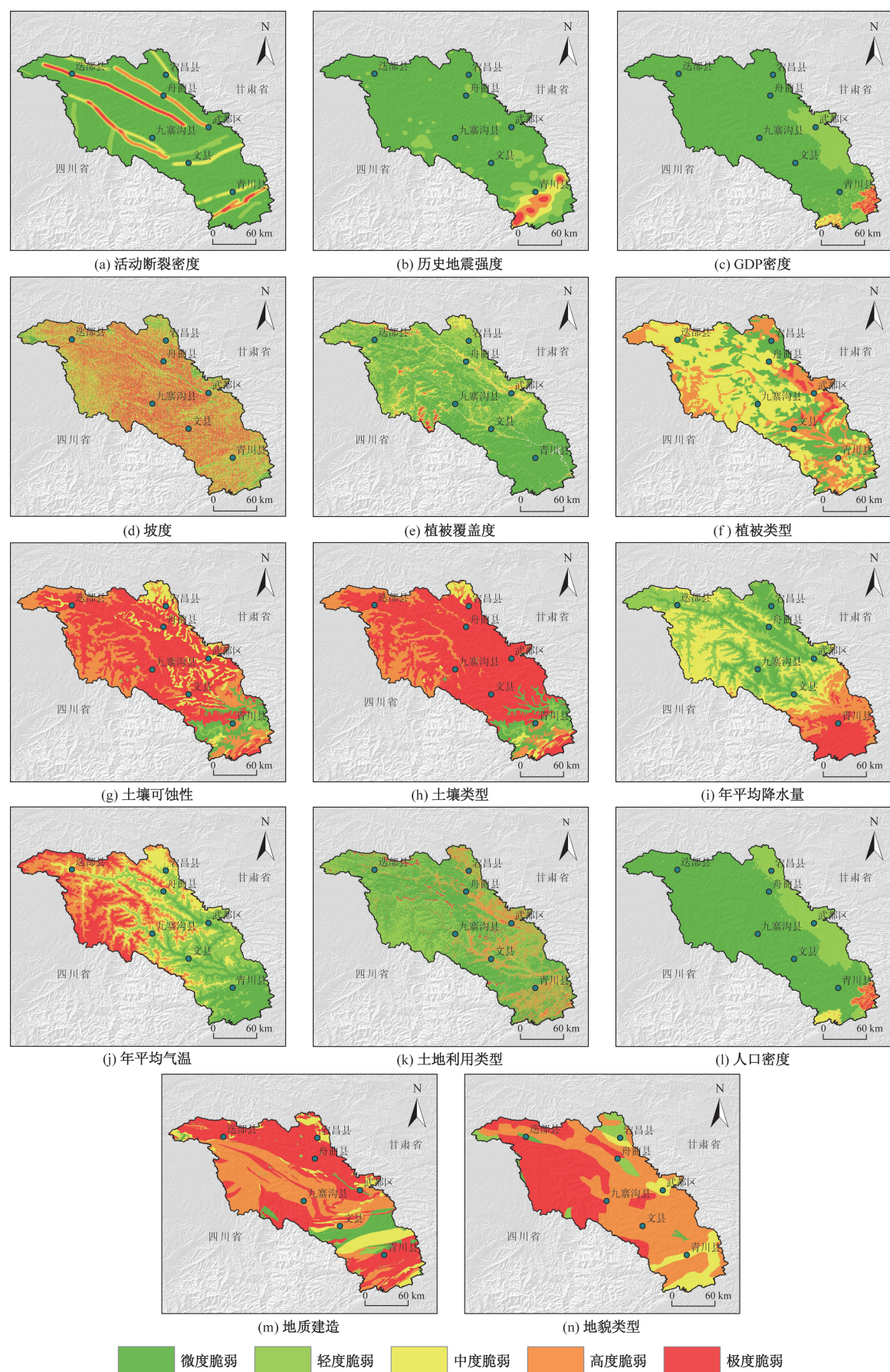


图4 白龙江流域生态地质脆弱性单因子评价图

Fig. 4 Single factor evaluation map of eco-geological vulnerability in Bailongjiang River Basin

投稿网址:www.stae.com.cn

南部植被脆弱性高,生态稳定性差;北部和西部相对稳定。土壤可蚀性方面,大部分区域土壤可蚀性高,中上游地区土壤易被侵蚀,水土流失风险高;下游地区植被覆盖度较高,可蚀性稍低,但仍存在中度脆弱区。土壤类型上,中上游地区土壤易被侵蚀,风险高;下游地区相对稳定,但有局部中度脆弱区域。

年平均降水分布不均,南部和东部降水多且集中,易引发灾害;北部和西部降水少,生态地质较稳定,但干旱可能抑制植被生长。年平均气温方面,北部和西部高海拔地区气温低,生态恢复能力弱;中南部气温高,脆弱性低。土地利用类型上,大部分区域以林地和草地为主,稳定性好;但中南部因耕地和建设用地增加,生态地质脆弱性升高。人口密度方面,大部分地区密度低,影响小;但南部地区密度高,可能加剧生态退化和灾害风险。GDP 密度方面,大部分地区经济活动强度低;南部地区经济活跃,增加了生态地质脆弱性。地貌类型上,北部和西部地形起伏大,风险高;中部和东部河谷深切,易发滑坡和泥石流;南部和东南部地势平缓,脆弱性低。

3.2 综合评价

白龙江流域生态地质脆弱性呈现出明显的空间分异规律,从微度脆弱到极度脆弱均有分布,但以微度脆弱为主。不同脆弱性级别的区域在流域内有着相对集中的分布趋势,且面积占比差异较大,微度脆弱区域面积最大,占比 68.56%,其余依次递减,极度脆弱区域面积最小,仅占 2.92%(表 6、图 5)。

微度脆弱区面积 22 029.43 km³,占流域总面积的 68.56%,主要分布在流域的西北部和中南部等相对较为开阔的地区(图 5)。这些区域地势相对平缓,地质构造相对稳定,且植被覆盖良好,生态系统的自我修复和调节能力较强,能够有效缓解地质作用对生态环境的负面影响,使得地质脆弱性较低。轻度脆弱区域面积 4 629.81 km³,占比 14.41%。在流域内呈零散分布,广泛分布在微度脆弱区域的周

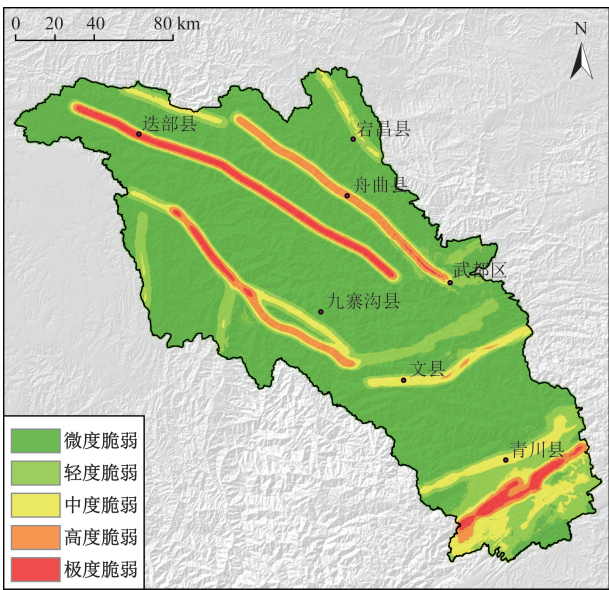


图 5 白龙江流域生态地质脆弱性评价图
Fig. 5 Eco-geological vulnerability assessment map of Bailongjiang River Basin

边,以及一些局部地形变化稍大的区域(图 5)。中度脆弱区域面积 2 959.27 km³,占比 9.21%(图 5),在流域内主要集中在地势起伏相对较大的中东部地区和部分山谷地带,如九寨沟县周边的部分区域。这些区域由于地形复杂,地势陡峭,降水集中且强度较大时,易引发坡面径流和土壤侵蚀,同时地质构造的复杂性也可能导致局部地区存在一定的地质灾害隐患,如小型崩塌、滑坡等,进而使生态地质脆弱性上升至中度级别。高度脆弱区域面积 1 571.82 km³,占比 4.78%(图 5)。多呈条带状分布在一些主要山脉、河谷以及地质断裂带附近,这些地方地质构造运动活跃,岩石破碎,地层稳定性差,加上降水集中,极易发生滑坡、泥石流等地质灾害,对生态环境造成严重威胁,生态地质脆弱性较高。极度脆弱区域面积 939.70 km³,占比 2.92%,主要分布在断裂带发育极高、地形地貌极为险峻的区域,这些区域通常处于地质构造的强烈活动地带,岩石风化破碎严重,地层结构松散,地形坡度极大,且在暴雨等极端气候条件下,几乎是地质灾害的频发区,生态环境极其不稳定,生态地质脆弱性达到了极度级别。

4 讨论

4.1 生态地质脆弱性空间聚集特征分析

白龙江流域生态地质脆弱性的全局莫兰指数为 0.78,且 $p < 0.01$,说明白龙江流域生态地质脆弱性在空间上呈现出较强的正相关关系。具体来说,随着空间分布位置的聚集,生态地质脆弱性表现出

表 6 白龙江流域生态地质脆弱性面积统计表 Table 6 Statistical table of eco-geological vulnerability area in Bailongjiang River Basin		
生态地质脆弱性分级	面积/km ²	占比/%
微度脆弱	22 029.43	68.56
轻度脆弱	4 629.81	14.41
中度脆弱	2 959.27	9.21
高度脆弱	1 571.82	4.89
极度脆弱	939.70	2.92

更高的相似性;相反,当空间分布位置较为离散时,生态地质脆弱性呈现出更多的差异。这进一步意味着白龙江流域的生态地质脆弱性呈现出高值连片与低值连片的分布特征。

进一步利用白龙江流域的生态地质脆弱性指数计算局部莫兰指数,得到白龙江流域生态地质脆弱性空间关联的局部指标(local indicators of spatial association,LISA)聚类图(图6),可以看出,生态地质脆弱性主要以高-高聚集和低-低聚集为主,其中,高-高聚集区主要分布在白龙江流域东北部和西南部,低-低聚集区主要分布在白龙江流域中南部和中部。再继续对生态地质脆弱性指数进行热点分析,进一步量化了热点区和冷点区,不同置信水平下的热点和冷点强度如图7所示。

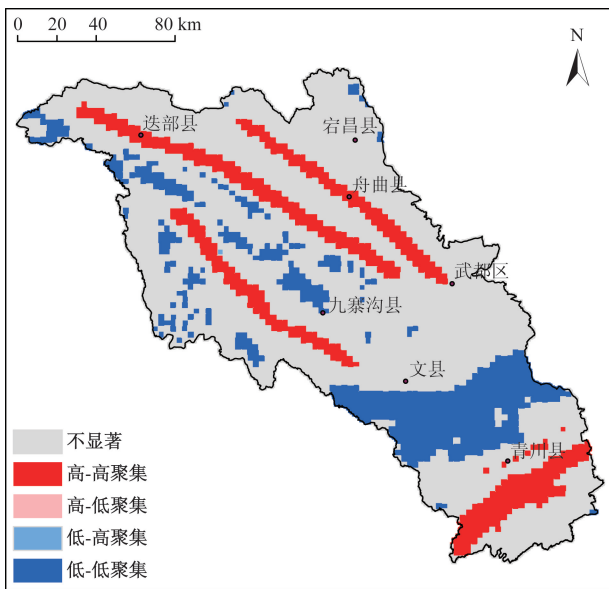


图6 白龙江流域生态地质脆弱性 LISA 聚类图
Fig. 6 LISA cluster diagram of eco-geological vulnerability in Bailongjiang River Basin

4.2 生态地质脆弱性驱动因素分析

以生态地质脆弱性指数为因变量,14项指标为自变量,运用地理探测器对白龙江流域生态地质脆弱性进行驱动力分析。

白龙江流域因子探测结果如图8所示,可见各因子对白龙江流域生态地质脆弱性的影响程度差异较大。其中,活动断裂密度($q = 0.8325$)和历史地震强度($q = 0.1368$)是影响生态地质脆弱性的关键因子,这与白龙江流域地处青藏高原东缘、地质构造复杂、地壳运动活跃的实际情况相吻合。该区域活动断裂发育,历史上多次发生强烈地震,这些地质活动导致岩石破碎、地层稳定性差,极易引发滑坡、泥石流等地质灾害,严重威胁生态系统稳定性。年平均降水($q = 0.0926$)和年平均气温($q =$

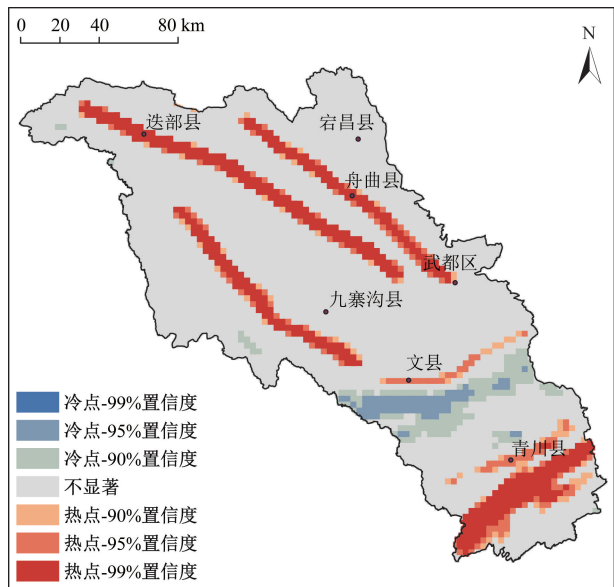


图7 白龙江流域生态地质脆弱性热点分析图
Fig. 7 Hotspot analysis map of eco-geological vulnerability in Bailong River Basin

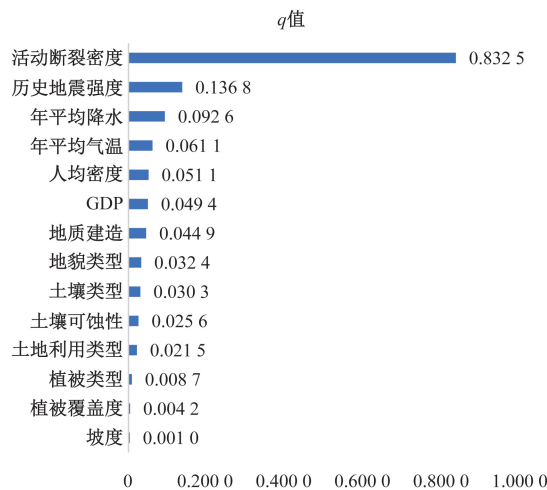


图8 因子探测结果图
Fig. 8 Factor detection result

0.0611)也具有显著影响,白龙江流域降水集中且强度较大,容易引发坡面径流和土壤侵蚀,而气温变化则影响岩石风化和土壤水分蒸发,进而加剧地质灾害风险。人口密度($q = 0.0511$)和GDP($q = 0.0494$)等人类活动因子也发挥了重要作用,流域内部分地区人口密集、经济活动频繁,过度开发、植被破坏等问题较为突出,进一步加剧了生态地质脆弱性。相对而言,坡度($q = 0.0010$)、植被覆盖度($q = 0.0042$)等因子虽影响较小,但也对生态地质状况有一定影响,如局部陡坡地带因坡度大、植被覆盖不足,土壤侵蚀和地质灾害风险相对较高。总体而言,白龙江流域生态地质脆弱性是自然因素和人类活动综合作用的结果,其中地质活动和气候条

件是主要自然驱动因素,而人口增长和经济发展则是重要的人为驱动因素。

从交互探测结果(图9)中可以看出,各指标的交互作用结果为双因子增强或非线性增强,说明各个指标对白龙江流域生态地质脆弱性的影响不是孤立的、单独作用的,而是协同增强的。其中,活动断裂密度与历史地震强度的组合对生态地质脆弱性影响极为显著, q 值高达0.9199,远超历史地震强度单独作用的 q 值,表明二者存在显著的协同作用,这与流域内活动断裂易引发表层变形和历史强震进一步削弱岩石完整性的实际情况相吻合,进而加剧了地质灾害风险。同时,活动断裂密度与年平均降水、坡度等因子组合时也展现出协同作用,其组合 q 值均大于各因子单独作用的 q 值之和,这在白龙江流域体现为降水集中易引发滑坡、泥石流,

而活动断裂带因岩石破碎更易在高降水和陡坡条件下发生地质灾害。此外,年平均降水与土壤可蚀性、GDP的组合,年平均气温与坡度、土壤类型、人口密度的组合等均显示出协同作用,进一步说明了气候因子和地形地貌因子、人类活动因子之间的相互影响。总体来看,白龙江流域生态地质脆弱性是多种因子协同作用的结果,其中地质活动因子与气候因子、地形因子的交互作用尤为显著,这些因子通过不同机制相互增强,加剧了白龙江流域的生态地质脆弱性。因此,在制定生态保护和地质灾害防治策略时,应充分考虑这些因子的交互作用,以提高措施的有效性和针对性。

4.3 生态保护修复建议

以白龙江流域为研究区,基于SRP(敏感性-恢复力-压力度)模型,选取14个评价指标,采用层次

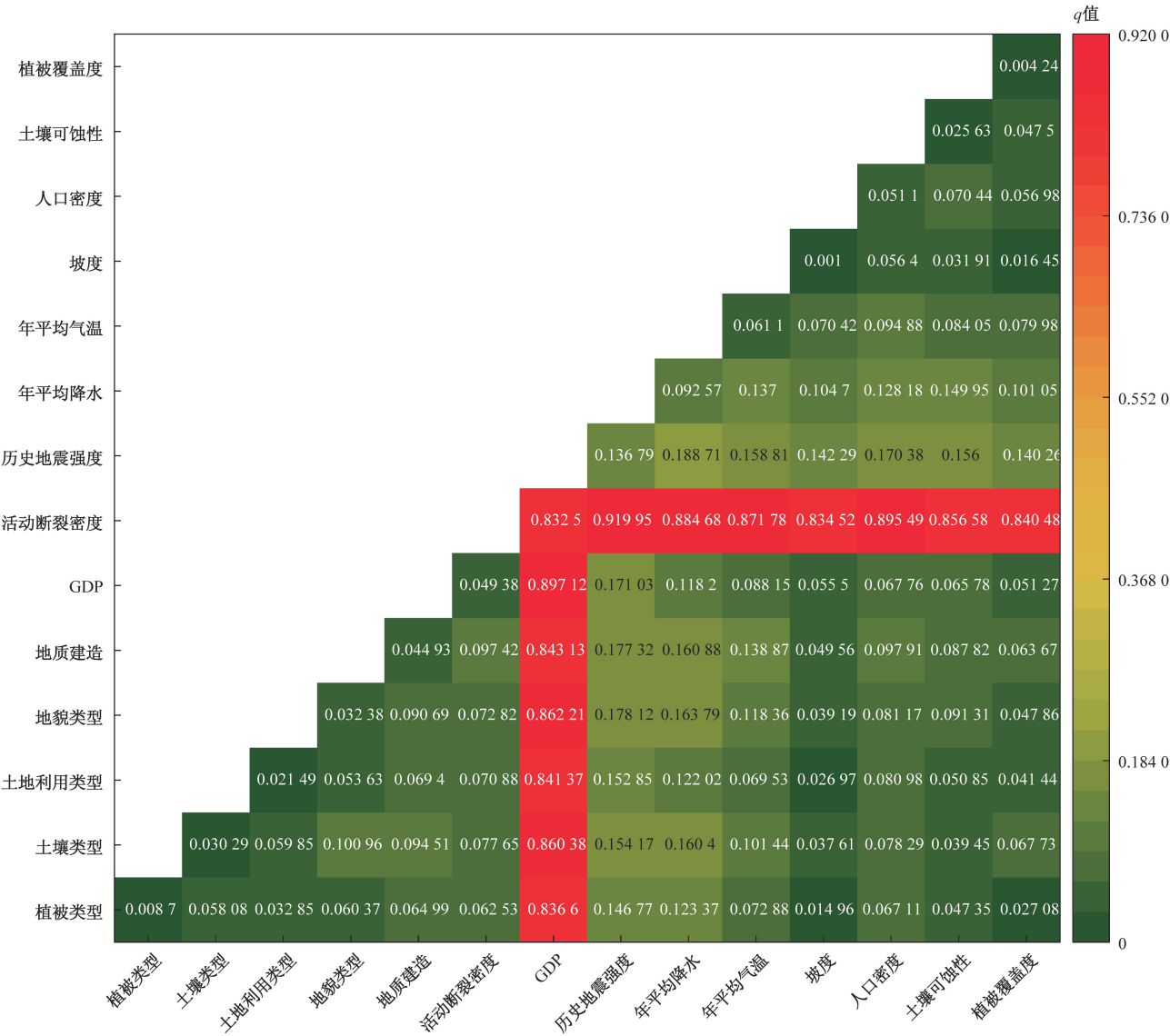


图9 白龙江流域生态地质脆弱性交互探测结果

Fig. 9 Interactive detection results of eco-geological vulnerability in Bailongjiang River Basin

分析法-熵权法进行综合权重的确定,运用空间自相关分析揭示白龙江流域生态地质脆弱性的空间集聚特征与异质性规律,并借助地理探测器进行驱动因素分析。

通过多种方法综合评估了白龙江流域的生态地质脆弱性,可为长江上游生态屏障白龙江建设提供精细化治理的参考,具有一定的应用价值。未来研究中建议进一步加强对这些因子的监测与管理,利用遥感、地理信息系统(GIS)、无人机等现代技术手段,定期监测植被覆盖度、土地利用变化、土壤侵蚀等生态指标,提高监测效率和精度,尤其是对高脆弱区的重点关注,加强地质灾害监测与预警体系建设,对已知的地质灾害隐患点进行工程治理,如加固山体、修建挡土墙、疏浚河道等,并且对受地质灾害威胁的居民区进行搬迁避让。同时深入探究各因子之间的复杂交互作用机制,以更精准地识别脆弱性来源,为白龙江流域的生态保护与可持续发展提供更具针对性和有效的决策支持。

5 结论

(1)白龙江流域生态地质脆弱性呈现显著空间集聚特征($\text{Moran's } I = 0.78, p < 0.01$),脆弱等级以微度脆弱为主(68.56%),极度脆弱区(2.92%)集中分布于构造活跃的陡峭地形带。

(2)地理探测器识别出该流域活动断裂密度($q = 0.8325$)和历史地震强度($q = 0.1368$)为关键自然驱动因子,GDP($q = 0.0494$)与人口密度($q = 0.0511$)构成主要人为压力源。

(3)白龙江流域因子交互效应呈现双因子增强或非线性增强特征,活动断裂密度与历史地震强度的协同作用($q = 0.9199$)显著加剧区域脆弱性。

(4)白龙江流域生态地质脆弱性是自然地质本底与人类活动扰动协同作用的结果,建议建立高脆弱区立体监测网络并实施差异化生态修复策略。

参 考 文 献

- [1] 沈祺林,牟凤云,朱诗柔,等.山地城市生态安全评价及多情景格局预测:以重庆市为例[J].科学技术与工程,2025,25(6):2627-2636.
Shen Qilin, Mou Fengyun, Zhu Shirou, et al. Ecological security assessment and multi-scenario pattern prediction of mountain cities: a case study of Chongqing[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2627-2636.
- [2] 杭鑫,朱士华,李心怡,等.太湖流域近二十年生态环境状况变化特征及驱动因素分析[J].科学技术与工程,2025,25(1):416-429.
Hang Xin, Zhu Shihua, Li Xinyi, et al. Analysis on characteristics of eco-environmental changes and driving factors in Taihu Lake Basin over recent twenty years[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 416-429.
- [3] 邓居豪,朱煜峰,龚循强,等.环鄱阳湖城市群生态环境质量时空演变及驱动因子分析[J].科学技术与工程,2025,25(32):14062-14075.
Deng Juhao, Zhu Yufeng, Gong Xunqiang, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of eco-environmental quality in Poyang Lake City Cluster[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(32): 14062-14075.
- [4] 余瑞,鲁珊,郑志元,等.城市扩张对区域生态安全格局影响研究——以合肥市为例[J].科学技术与工程,2023,23(26):11327-11337.
Yu Rui, Lu Shan, Zheng Zhiyuan, et al. Impact of urban expansion on regional ecological security pattern: a case study of Hefei City[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11327-11337.
- [5] 倪春雨,何文,姚月锋.基于Landsat 8的漓江流域生态环境质量及其影响因素分析[J].科学技术与工程,2024,24(12):5227-5238.
Ni Chunyu, He Wen, Yao Yuefeng. Eco-environmental quality and influencing factors in the Lijiang River Basin based on Landsat 8[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12): 5227-5238.
- [6] Trofimov V T, Ziling D G, Averkina T I. Geocology as a term and interdisciplinary science[J]. Earth Science Frontier, 1994, 49(5): 43-55.
- [7] Trofimov V T. Ecological geology, environmental geology, geocology: contents and relations[J]. Moscow University Geology Bulletin, 2008, 63(2): 59-69.
- [8] 何政伟,黄润秋,孙传敏,等.浅议“生态地质学”[J].国土资源科技管理,2003(3):69-72.
He Zhengwei, Huang Runqiu, Sun Chuanmin, et al. Discussion on “ecogeology”[J]. Land Resources Technology Management, 2003(3): 69-72.
- [9] 李文明,李健强,徐永,等.西北生态地质调查研究进展与展望[J].西北地质,2022,55(3):108-119.
Li Wenming, Li Jianqiang, Xu Yong, et al. Progress and prospect of ecological geology survey in northwest China[J]. Northwest Geology, 2022, 55(3): 108-119.
- [10] 刘森,刘义,苗志加,等.沁河流域上游沁源县生态地质脆弱性评价与分区[J].中国地质调查,2024,11(2):97-107.
Liu Miao, Liu Yi, Miao Zhijia, et al. Ecological geological vulnerability assessment and zoning of Qinyuan County in the upper reaches of Qin River Basin[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(2): 97-107.
- [11] 聂洪峰,肖春蕾,任伟祥,等.生态地质研究进展与展望[J].中国地质调查,2021,8(6):1-8.
Nie Hongfeng, Xiao Chunlei, Ren Weixiang, et al. Progress and prospect of ecogeological research[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 1-8.
- [12] 刘洪,黄瀚霄,欧阳渊,等.基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山地区西昌市为例[J].沉积与特提斯地质,2020,40(1):91-105.
Liu Hong, Huang Hanxiao, Ouyang Yuan, et al. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(1): 91-105.

- [13] 张景华, 欧阳渊, 刘洪, 等. 基于主控要素的生态地质脆弱性评价——以四川省西昌市为例[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 181-191.
- Zhang Jinghua, Ouyang Yuan, Liu Hong, et al. Eco-geological vulnerability assessment based on major controlling factors: a case study of Xichang City, Sichuan Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 181-191.
- [14] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008(2): 18-25.
- Li He, Zhang Pingyu, Cheng Yeqing. The concept of vulnerability and its assessment methods[J]. Advances in Geographical Sciences, 2008(2): 18-25.
- [15] 黄润秋. 生态环境地质的基本特点与技术支持[J]. 中国地质, 2001(11): 20-24.
- Huang Runqiu. Basic characteristics and technical support of ecological environment geology[J]. Chinese Geology, 2001(11): 20-24.
- [16] 计扬, 巴仁基, 肖成志, 等. 岷江上游 1995—2020 年生态地质环境安全评价与时空演化分析[J]. 现代地质, 2024, 38(3): 648-659.
- Ji Yang, Ba Renji, Xiao Chengzhi, et al. Ecological and geological environmental safety assessment and spatiotemporal evolution analysis of the upper Minjiang River from 1995 to 2020[J]. Modern Geology, 2024, 38(3): 648-659.
- [17] 邹桃红, 罗蕾, 刘家福. 张掖市山丹县生态脆弱性时空动态分析[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 132-140.
- Zou Taohong, Luo Lei, Liu Jiafu. Spatial-temporal dynamic analysis of ecological vulnerability in Shandan County, Zhangye City[J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition), 2024, 45(3): 132-140.
- [18] 徐洲洋. 基于 PSR 模型的四川生态系统健康时空动态研究[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 251-258.
- Xu Zhouyang. Spatial-temporal dynamics of ecosystem health in Sichuan Province based on PSR model[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 251-258.
- [19] 徐盼盼, 徐嘉敏, 商逸纹, 等. 基于 VSD 模型的陕南城市群水资源脆弱性评价及影响因子研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 319-327, 343.
- Xu Panpan, Xu Jiamin, Shang Yiwen, et al. Water resource vulnerability assessment and impact factors of southern Shaanxi urban agglomeration based on VSD model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 319-327, 343.
- [20] Berrouet L, Villegas-Palacio C, Botero V. A social vulnerability index to changes in ecosystem services provision at local scale: a methodological approach[J]. Environmental Science and Policy, 2019, 93: 158-171.
- [21] 杨俊, 关莹莹, 李雪铭, 等. 城市边缘区生态脆弱性时空演变——以大连市甘井子区为例[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 778-787.
- Yang Jun, Guan Yingying, Li Xueming, et al. Urban fringe area ecological vulnerability space-time evolution research: the case of Ganjingzi District, Dalian[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 778-787.
- [22] 刘倩倩, 张鑫, 吴寒青. 基于模糊物元模型旅游生态安全测度及障碍因子分析——以安徽省为例[J]. 林业经济, 2022, 44(8): 42-60.
- Liu Qianqian, Zhang Xin, Wu Hanqing. Measurement of tourism ecological security and analysis of barrier factors based on the fuzzy matter-element model: a case study of Anhui Province[J]. Forestry Economics, 2022, 44(8): 42-60.
- [23] Cai Y, Guo X, Liu J, et al. Ecological geological vulnerability assessment in northern Shanxi Province (China) based on sensitivity resilience pressure (SRP) model[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 8063.
- [24] Luo M, Jia X, Zhao Y, et al. Ecological vulnerability assessment and its driving force based on ecological zoning in the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111658.
- [25] 李雨露, 张继刚. 岷江流域生态脆弱性时空演变及影响因素分析[J]. 四川林业科技, 2024, 45(5): 10-19.
- Li Yulu, Zhang Jigang. Analysis of spatial-temporal evolution of ecological vulnerability and its influencing factors in the Minjiang River Basin[J]. Sichuan Forestry Science and Technology, 2024, 45(5): 10-19.
- [26] Das U, Behera B. Geospatial assessment of ecological vulnerability of fragile eastern Duars Forest integrating GIS-based AHP, CRITIC and AHP-TOPSIS models[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2024, 15(1): 2330529.
- [27] 汪倩, 袁波, 吴剑, 等. 基于主成分分析法与系统动力学的水资源承载力评价——以庆阳市为例[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(6): 51-59.
- Wang Qian, Yuan Bo, Wu Jian, et al. Water resource carrying capacity evaluation based on principal component analysis and system dynamics: a case study of Qingyang City[J]. Journal of the Yangtze River Scientific Research Institute, 2025, 42(6): 51-59.
- [28] Fu X, Liu Y. Ecological vulnerability assessment and spatiotemporal characteristics analysis of urban green-space systems in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Sustainability, 2024, 16(6): 2289.
- [29] 王立坤, 宋瑞丽, 裴巍, 等. 基于改进 TOPSIS 模型的黑龙省西部半干旱地区农业旱灾脆弱性评价[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(1): 66-73.
- Wang Likun, Song Ruili, Pei Wei, et al. Evaluation of agricultural drought vulnerability in semi-arid areas of western Heilongjiang Province based on an improved TOPSIS model[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(1): 66-73.
- [30] 吴晨阳. 矿山生态地质环境脆弱性评价与恢复治理模式研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2022.
- Wu Chenyang. Assessment and restoration treatment pattern research on ecological and geological vulnerability of mine environment[D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2022.
- [31] 吴君毅. 基于深度学习的重庆市生态地质脆弱性评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.
- Wu Junyi. Study on ecological and geological vulnerability assessment of Chongqing municipality based on deep learning[D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2023.
- [32] 赵宗泽, 马倩, 王一, 等. 基于 SRP 模型的中原城市群生态脆弱性分析与预测[J]. 环境科学, 2024, 46(3): 1621-1632.
- Zhao Zongze, Ma Qian, Wang Yi, et al. Analysis and prediction of ecological vulnerability of central plains urban agglomeration based on SRP model[J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1621-1632.

- [33] Xu C, Hu X, Wang X, et al. Spatiotemporal variations of eco-environmental vulnerability in Shiyang River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111327.
- [34] 陈宗敏, 周冬梅, 张军, 等. 渭河流域甘肃段生态脆弱性时空演变分析[J]. *热带农业工程*, 2024, 48(1): 148-156.
Chen Zongmin, Zhou Dongmei, Zhang Jun, et al. Analysis of spatial-temporal evolution of ecological vulnerability in Gansu section of Weihe River Basin[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2024, 48(1): 148-156.
- [35] 苏悦, 刘洪, 杨武年, 等. 高原山地区域生态脆弱性研究——以四川省康定市为例[J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(3): 206-215.
Su Yue, Liu Hong, Yang Wunian, et al. Ecological vulnerability of highland mountain areas: a case study of Kangding City, Sichuan Province[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(3): 206-215.
- [36] 毛佳睿. 基于多源遥感的白龙江流域地质灾害监测与易发性动态评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
Mao Jiarui. Geological disaster monitoring and susceptibility dynamic evaluation of Bailongjiang River Basin based on multi-source remote sensing[D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2021.
- [37] 林临心. 白龙江易灾流域滑坡时空演化及其对泥石流活动的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Lin Linxin. Spatial-temporal evolution of landslides in the Bailongjiang disaster-prone river basin and its impact on debris flow activity[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [38] 晁增祖. 白龙江流域泥石流高发区不同覆被坡面侵蚀特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Zhao Zengzu. A study on the erosion characteristics of different slope covers in the debris flow prone areas of the Bailongjiang River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [39] 周妍妍. 基于生态地质环境耦合机制的白龙江流域泥石流灾害风险评价与预测[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Zhou Yanyan. Risk assessment and prediction of debris flow disasters in the Bailongjiang River Basin based on the coupling mechanism of ecological and geological environment[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [40] Kamran M, Yamamoto K. Evolution and use of remote sensing in ecological vulnerability assessment: a review[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110099.
- [41] Dai X, Feng H, Xiao L, et al. Ecological vulnerability assessment of a China's representative mining city based on hyperspectral remote sensing[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109663.
- [42] 赵万奎, 张富, 安平山. 甘肃白龙江流域水土流失成因分析及治理对策[J]. *甘肃科技*, 2013, 29(20): 5-7.
Zhao Wankui, Zhang Fu, An Pingshan. Analysis of the causes of soil erosion and governance countermeasures in the Bailongjiang River Basin of Gansu[J]. *Gansu Science and Technology*, 2013, 29(20): 5-7.
- [43] 魏宏庆, 沈永平, 魏鹏慧, 等. 白龙江中游干旱河谷水土流失与地理环境[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(5): 1023-1028.
Wei Hongqing, Shen Yongping, Wei Lihui, et al. Soil and water loss and geographical environment in the arid valley of the middle reaches of the Bailongjiang River[J]. *Journal of Arid Land Geography*, 2019, 42(5): 1023-1028.
- [44] 吴杰, 陈冠, 孟兴民, 等. 白龙江流域滑坡降雨临界值[J]. *山地学报*, 2022, 40(6): 875-886.
Wu Jie, Chen Guan, Meng Xingmin, et al. Rainfall thresholds for landslides in the Bailongjiang River Basin[J]. *Mountain Research*, 2022, 40(6): 875-886.
- [45] 李媛茜, 张毅, 苏晓军, 等. 白龙江流域潜在滑坡 InSAR 识别与发育特征研究[J]. *遥感学报*, 2021, 25(2): 677-690.
Li Yuanqian, Zhang Yi, Su Xiaojun, et al. Identification and development characteristics of potential landslides in the Bailongjiang River Basin using InSAR[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(2): 677-690.
- [46] 武帅, 田冰, 顾世杰, 等. 基于 PSRM 模型的京津冀地区生态脆弱性时空演变[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5630-5640.
Wu Shuai, Tian Bing, Gu Shijie, et al. Spatial-temporal evolution of ecological vulnerability in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on the PSRM model[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5630-5640.
- [47] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. *地理学与国土研究*, 2002(1): 67-71.
Zuo Wei, Wang Qiao, Wang Wenjie, et al. Research on indicators and standards for regional ecological security assessment[J]. *Geography and Territorial Research*, 2002(1): 67-71.
- [48] 南颖, 吉喆, 冯恒栋, 等. 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4790-4798.
Nan Ying, Ji Zhe, Feng Hengdong, et al. Ecological security assessment of the Tumen River area based on remote sensing and GIS[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4790-4798.
- [49] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. *生态学报*, 2015, 35(21): 7117-7129.
Ma Jun, Li Changxiao, Wei Hong, et al. Assessment of ecological fragility in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21): 7117-7129.
- [50] 杨天翼, 赵强, 王奎峰, 等. 基于层次分析法和熵权法综合评价山东省水生态安全[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(6): 566-571, 579.
Yang Tianyi, Zhao Qiang, Wang Kuifeng, et al. Comprehensive evaluation of water ecological security in Shandong Province based on analytic hierarchy process and entropy weight methods[J]. *Journal of Jinan University (Natural Science Edition)*, 2021, 35(6): 566-571, 579.
- [51] 喻春哲, 于欢, 项清, 等. 四川省生态脆弱性时空分异及其驱动机制[J]. *环境科学*, 2024, 45(12): 6922-6934.
Yu Chunzhe, Yu Huan, Xiang Qing, et al. Spatial-temporal differentiation of ecological vulnerability and its driving mechanisms in Sichuan Province[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(12): 6922-6934.
- [52] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geographical detector: principle and application[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.