



基于 SRP 模型的黄河流域(聊城—济南段) 生态地质脆弱性评价

李宁^{1,2}, 黄伟荣^{1,2*}, 蒋超华^{1,2}, 徐秀凤^{1,2}, 王璨^{1,2}, 富隋小庆^{1,2}

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013)

摘要:黄河流域(聊城—济南段)作为生态屏障与经济活动密集区的复合型区域, 其生态地质脆弱性评价对协调区域可持续发展具有重要意义。针对传统研究多聚焦单一生态地质问题、忽略多因素耦合效应的不足, 本研究以 SRP(敏感性—恢复力—压力度)模型为理论框架, 集成层次分析法(AHP)与 GIS 空间分析技术, 构建包含 3 个维度 13 项指标的生态地质脆弱性评价体系。通过量化地形地貌、工程地质、生态地质、人类活动等关键因子交互作用, 揭示研究区脆弱性空间分异规律。结果表明: 研究区脆弱性呈现显著空间分异, 脆弱性低及轻度脆弱区占主导地位, 合计占比 63.55%, 主要分布于黄河以北平原(如德州乐陵市、济南平阴县), 该区域地形平坦、地层稳定、植被覆盖良好, 因而生态恢复力较强; 高度脆弱区及较高脆弱区占比 19.34%, 集中分布于断裂带密集区(聊城中部)、基岩山区(莱芜、钢城区)及大城市中心(济南历下区、德州德城区), 占比分别为 4.03% 和 15.31%; 断裂带密集区(如聊城中部)及基岩山区(如莱芜)因地质结构破碎、人类活动干扰强烈, 呈现高度脆弱性; 大城市中心(如济南)因高人口密度与经济压力, 生态恢复能力弱, 脆弱性较高。

关键词:黄河流域; 生态地质脆弱性评价; SRP 模型; 生态保护与修复

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.06.009

0 引言

生态地质学作为一门融合生态学与地质学的交叉学科^[1], 其研究范畴聚焦于地球系统多圈层(岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈及生物圈)的交互作用机制^[2]。在全球城镇化与工业化进程加速的背景下, 人类活动对地质生态系统的扰动效应显著加剧, 已成为影响区域生态安全格局与可持续发展模式的关键制约因素^[3-6]。构建科学的生态地质脆弱性诊断与评估体系, 正逐步成为地球系统科学框架下的前沿研究核心议题^[7]。

生态地质脆弱性评价是评估区域生态地质环境对内外干扰的敏感程度、自我恢复能力以及所承受压力大小的重要手段^[8-11]。目前, 已有多种评价模型和方法应用于生态地质脆弱性研究, 其中 SRP 模型(敏感性—恢复力—压力度模型)综合考虑了生态

系统的多种属性, 较为全面地反映生态地质脆弱性的本质特征, 在区域生态环境评价中得到广泛应用^[12-14]。

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带, 其生态地质环境的稳定性对区域可持续发展至关重要^[15]。聊城—济南段作为典型的生态—经济矛盾区域, 近年来面临土壤盐渍化、地面沉降、地下水污染等专项地质环境问题。现有研究多聚焦单一问题, 对多因子耦合作用下的生态地质脆弱性综合评价仍显不足。例如, 鲁峰等^[16]针对泰山区域提出生态修复模式, 但未系统考虑社会经济压力对脆弱性的影响; 李元征等^[17]虽基于 GIS 开展生态敏感性评价, 却未整合恢复力与压力度指标。这种综合性评价的缺失, 导致区域生态保护策略缺乏精准性与可操作性。因此, 本研究以 SRP 模型为核心, 耦合自然与人文因子, 构建多维评价体系, 旨在为黄河流域

收稿日期:2025-03-31; 修订日期:2025-05-06; 编辑:曹丽丽

地调项目:黄河流域(聊城—济南段)生态地质调查评价, 山东省物化探勘查院

作者简介:李宁(1998—), 男, 山东单县人, 助理工程师, 主要从事水工环地质调查与研究工作; E-mail: 1849748343@qq.com

* 通信作者:黄伟荣(1982—), 男, 河北河间人, 高级工程师, 主要从事水工环及矿产地质调查与研究工作; E-mail: 103674658@qq.com

生态屏障建设与高质量发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区涵盖聊城市、德州市、济南市三市全域,地处鲁中山地北缘与黄河冲积平原过渡带,地形南高北低,自南向北依次分布中低山区、山前冲洪积倾斜平原及黄河冲积平原(图 1)。气候属暖温带半湿润一半干旱季风气候,多年平均气温 13.2℃,多年平均降水量 594 mm/a,多年平均蒸发量 1 075 mm/a。水系以黄河为主体,支流呈放射状分布,兼有卧虎山水库等人工水利设施^[18]。

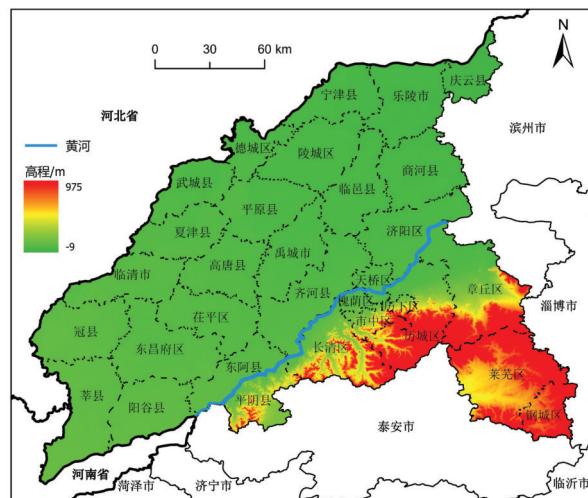


图 1 研究区范围图

地质构造受齐河-广饶断裂和聊城-兰考断裂控制,形成济阳坳陷、临清坳陷与鲁中隆起并存的格局。基岩地层从新太古代至新生代广泛出露,南部以中酸性岩浆岩为主,北部以第四系松散沉积物覆盖。水文地质特征表现为两大含水岩组:松散岩类孔隙水(黄河冲积平原)和碳酸盐岩裂隙岩溶水(鲁中山地),前者分布广且动态稳定,后者富水性差异

$$EVI = ESI + ERI + EPI = \sum_{i=1}^n S_i \times W_i + \sum_{i=1}^n R_i \times W_i + \sum_{i=1}^n P_i \times W_i \quad (1)$$

式中: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; S_i 、 R_i 、 P_i 分别代表敏感性、恢复力、压力度第 i 个评价指标的权重值; W_i 分别为每个评价指标的分级赋值。EVI、ESI、EPI 为正向指数,数值越大代表脆弱性、敏感性、压力度越高;ERI 为负向指数,数值越大代表恢复力越低。

显著,与地下水系统密切关联。

生态地质环境整体呈现脆弱性与动态演化特征。土壤盐渍化问题长期存在,近年随治理措施推进呈局部缓解趋势。地面沉降与地下水超采密切相关,沉降速率随管控政策实施逐步趋缓。水土流失类型空间分异明显,黄河南北分别以水蚀和风蚀为主导;黄河悬河段受河道淤积与人类活动干扰,稳定性面临持续挑战,南北岸演化趋势呈现反向性。

2 研究方法

2.1 SRP 模型原理

SRP 模型即“敏感性—恢复力—压力度”模型,该模型从生态系统对干扰的抵抗能力、受到干扰后的恢复能力以及所承受的外部干扰程度 3 个维度来综合评估生态系统的脆弱性^[19]。敏感性反映了生态地质系统对内外干扰的响应程度,敏感性越高,系统在受到干扰时越容易发生变化。恢复力体现了生态地质系统受到干扰后自我修复和恢复的能力,恢复力越强,系统从受损状态恢复到原有状态的速度越快。压力度则衡量了外部因素对生态地质系统施加的压力大小,压力度越大,系统所面临的脆弱性风险越高^[20]。通过这 3 个方面的综合考量,可以更全面、准确地评估生态地质脆弱性^[21]。SRP 模型为脆弱性评价提供框架(敏感性—恢复力—压力度),AHP 用于量化各指标权重,确保评价结果的客观性。两者结合实现“模型框架—指标量化—综合评估”的完整流程,具体计算过程如下:

首先根据指标权重加权计算生态地质敏感性指数(ESI)、恢复力指数(ERI)及压力度指数(EPI),再综合计算生态地质脆弱性指数(EVI),计算见公式(1):

$$EVI = ESI + ERI + EPI = \sum_{i=1}^n S_i \times W_i + \sum_{i=1}^n R_i \times W_i + \sum_{i=1}^n P_i \times W_i \quad (1)$$

2.2 评价指标选取

SRP 模型从敏感性(Sensitivity)、恢复力(Resilience)和压力度(Pressure)3 个维度对生态地质脆弱性进行评价。本研究基于该模型,结合研究区实际情况,选取了一系列评价指标,构建了生态地质脆弱性评价指标体系(图 2)。

2.2.1 敏感性指标

地形地貌方面,选取坡度和地表起伏度。坡度

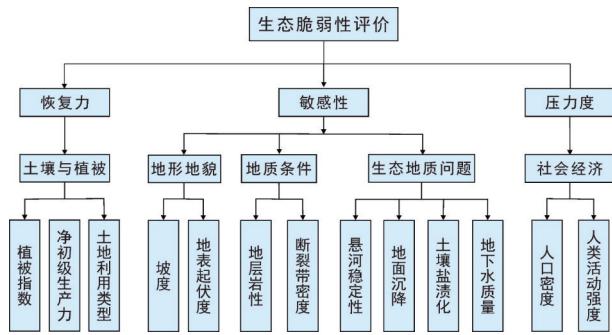


图 2 生态地质环境脆弱性评价指标体系

影响地表植被发育和水土流失程度,坡度越大,植被生长越困难,水土流失风险越高,生态地质脆弱性增加;地表起伏度反映区域地形破碎程度,起伏度越大,地质灾害发生可能性越大,生态地质条件越恶劣。

地质条件指标包括地层岩性和断裂带密度。不同的地层岩性对土壤植被发育和地表稳定性有显著影响,如坚硬基岩有利于保持地表稳定,而松散岩层则容易引发地质灾害;断裂带密度反映区域地壳稳定性,断裂带越密集,地层岩体强度和稳定性越低,生态地质稳定性越差。

生态地质问题选取悬河稳定性、地面沉降、土壤盐渍化和地下水环境质量。悬河一旦决堤,将对周边地区造成严重灾害;地面沉降会导致建筑物损坏、土地沼泽化等问题;土壤盐渍化影响农业生产和土壤生态系统;地下水环境质量直接关系到人类健康和植被生长,这些问题均对生态地质脆弱性产生重要影响。

2.2.2 恢复力指标

净初级生产力(NPP)和归一化植被指数(ND

VI)是衡量植被生长状况和生态系统功能的重要指标。NPP 表示绿色植物通过光合作用产生的有机物总量减去自养呼吸后的剩余部分,NPP 越高,植被生长越旺盛,生态系统的能量积累和物质循环能力越强,生态地质恢复力越好;NDVI 能直观反映植被覆盖度和生长状况,NDVI 值越大,植被覆盖度越高,生态地质稳定性越高。

土地利用类型反映了人类活动对自然生态系统的干预程度。不同土地利用类型的生态功能和抗干扰能力不同,例如林地、湿地等自然生态用地具有较强的生态调节功能,而建设用地则对生态系统破坏较大。本研究将土地利用类型分为未利用地、草地、耕地、林地、湿地、水体、人造地表等,用于评估生态恢复力。

2.2.3 压力度指标

人口密度和人类活动强度(以 GDP 衡量)用于表征压力度。人口密度反映了人类活动的集中程度,高密度的人口聚集会对自然资源造成过度开发和破坏,增加生态地质环境的压力;GDP 能在一定程度上反映地区的经济发展水平和人类活动强度,GDP 越高,人类对生态地质环境的改造和扰动越大,生态地质脆弱性可能越高。

2.3 数据来源

本次研究数据主要来源于数据共享平台及实测资料的转化(表 1)。人口密度、GDP 等社会经济数据源自中科院资源环境科学数据平台;地形地貌数据通过数字高程模型(DEM)获取;地质条件数据源于区域地质勘查报告;生态地质问题数据通过野外实地监测、采样分析等转化而来;土壤和植被数据源自国家地球系统科学数据中心。

表 1 数据类型及来源

序号	数据类型	比例尺/分辨率	来源机构	年份	获取途径
1	DEM	30m	地理空间数据云	2020	https://www.gscloud.cn
2	地质条件	1:20 万	山东省地质调查院	2020	区域地质勘查报告
3	生态地质问题	1:20 万	山东省物化探勘查院	2022	黄河流域(聊城—济南段)生态地质调查评价报告
4	人口密度与 GDP	500m	中科院资源环境科学数据平台	2020	https://www.resdc.cn/
5	土壤和植被	500m	国家地球系统科学数据中心	2020	https://www.geodata.cn/

2.4 基于 GIS 的评价指标量化与分级

由于不同指标的数据类型和空间精度存在差异,在 GIS 平台支持下对原数据进行处理。运用栅格表面分析、焦点分析、密度分析、要素转栅格、栅格重分类等功能,将各因子数据类型统一为 30 m ×

30 m 的栅格,并统一投影到同一个坐标系。在参考相关标准规范、以往研究成果及研究区实际情况的基础上,结合自然断点法分级工具,构建了本次评价指标分级标准(表 2),初步得出了单因子评价结果(图 3)。

表 2 评价指标分级标准表

因子层	指标层	脆弱性低	轻度脆弱	中度脆弱	较高脆弱	高度脆弱
地形地貌	坡度/°	<3	[3,7)	[7,13.5)	[13.5,22)	>22
	地表起伏度/m	<4	[4,12)	[12,23)	[23,37)	>37
地质条件	地层岩性	松散岩层	厚层碳酸盐岩	层状碳酸盐岩 夹碎屑岩	层状较坚硬 碎屑岩	块状坚硬基岩
	断裂带密度/(km · km ⁻²)	<4	[4,10)	[10,15)	[15,21)	>21
生态地质问题	悬河稳定性	非悬河区	基本稳定	次不稳定	不稳定	—
	地面沉降量/mm	0~50mm	—	50~100mm	100~200mm	—
	土壤盐渍化	非盐碱土	碱害型	轻度盐渍土	中度盐渍土	—
	地下水环境质量	I类	II类	III类	IV类	V类
土壤与植被	NDVI	>0.48	[0.40,0.48)	[0.325,0.40)	[0.248,0.325)	<0.248
	NPP/(g · C · m ⁻²)	>3777	[3333,3777)	[2830,3333)	[1269,2830)	<1269
	土地利用类型	未利用地	草地、耕地	林地、灌木	湿地、水体	建设用地
社会经济	人口密度/(人 · km ⁻²)	<650	[650,1350)	[1350,3000)	[3000,6000)	>6000
	GDP/(万元 · km ⁻²)	<3750	[3750,10300)	[10300,28000)	[28000,109000)	>109000
分级赋值		1	3	5	7	9

2.5 层次分析法确定权重

运用层次分析法(AHP)确定各评价指标权重。首先构建层次结构模型,将目标层设为生态地质脆弱性评价,准则层分为自然环境、土壤环境、地质环境、生态地质问题4个方面,指标层为选取的13个具体评价指标。

权重确定过程中,通过专家打分法,依据 Saaty 1~9 标度法对指标重要性进行两两比较,构建判断矩阵。以“敏感性”准则层为例,判断矩阵及权重计算结果如表 3 所示。

经检验,各矩阵一致性比率(CR)均小于 0.1,满足一致性要求。最终确定的权重结果显示(表 4),土壤盐渍化、地面沉降、地层岩性、断裂带密度、人类活动强度是权重较大的 5 个指标,表明这些因素对生态地质脆弱性影响较大。

表 3 敏感性因子层判断矩阵

指标	地形地貌	地质条件	生态地质问题	权重
地形地貌	1	1/3	1/5	0.0584
地质条件	3	1	1/2	0.2689
生态地质问题	5	2	1	0.4535
一致性检验 $\lambda_{\max} = 3.009, CI = 0.0045, CR = 0.008 < 0.1$				

3 综合评价及结果

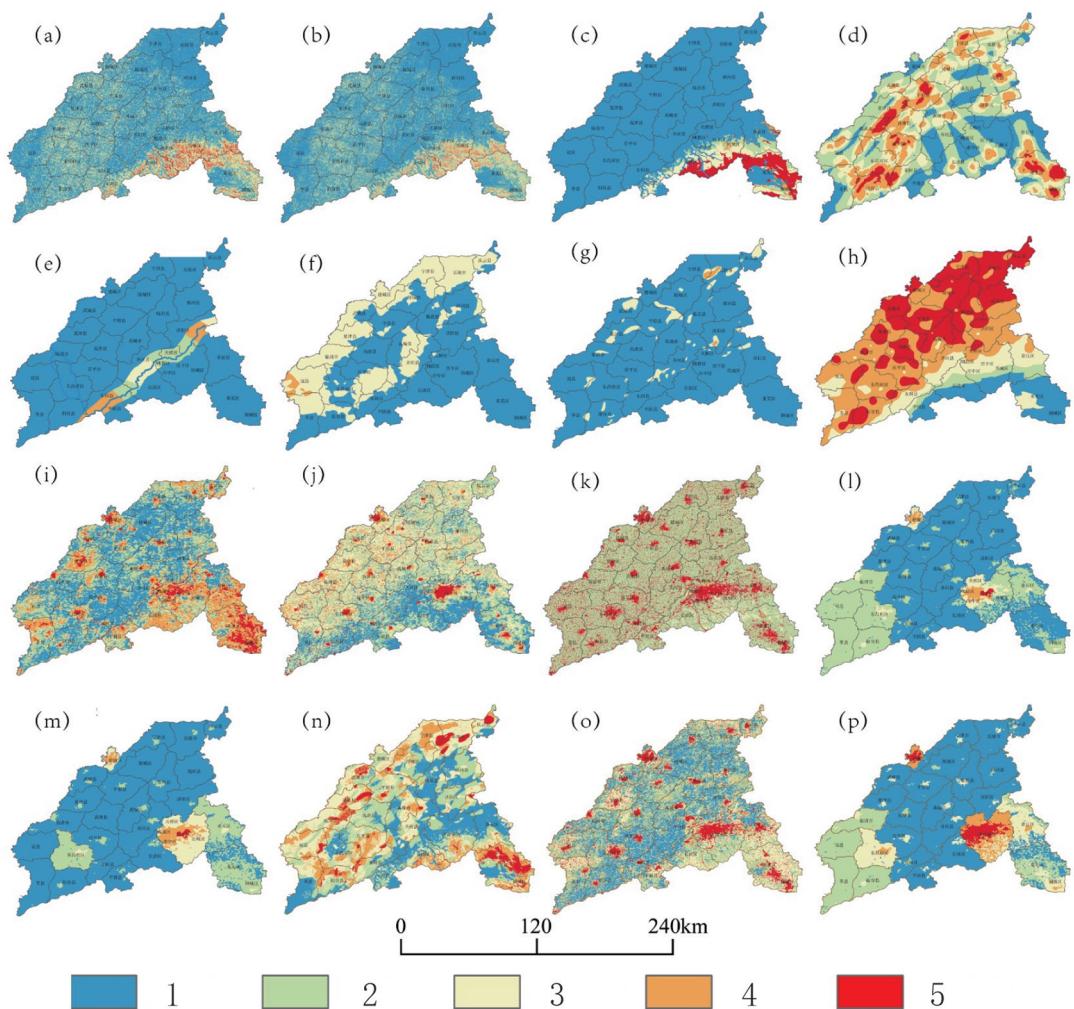
3.1 敏感性、恢复力和压力建模及评价

依据单一指标评估结果,通过指标权重加权计算敏感性指数(ESI)、恢复力指数(ERI)及压力建模指数(EPI),并综合得出生态地质脆弱性综合指数

(EVI)。如表 5 及图 3 的(n)、(o)、(p)所示,敏感性指数(ESI)以轻度脆弱及以下为主(占 49.6%),集中分布于研究区中部(聊城东昌府区)和东北部(德州乐陵市、庆云县),高度脆弱区主要集中在南部基岩山区(济南历城区、莱芜区)及西北部平原断裂带密集区(聊城阳谷县);恢复力指数(ERI)脆弱性低和轻度脆弱区域分别占据了 31.04% 和 30.55%,这些区域通常植被覆盖较好;而较高和高度脆弱区域则主要位于城镇地区,如济南历下区、德州德城区;压力建模指数(EPI)与人类活动密切相关,较高和高度脆弱区主要分布在城市周边的人口密集带,如济南、德州、聊城的市中心,凸显经济发展对生态地质环境的压力集中效应。

表 4 评价指标权重及排序

准则层	因子层		指标层		最终权重	排序
	因子	权重	指标	权重		
敏感性	地形地貌	0.0584	坡度	0.6000	0.0350	11
			地形起伏度	0.4000	0.0234	12
	地质条件	0.2689	地层岩性	0.5500	0.1479	3
			断裂带密度	0.4500	0.1210	4
恢复力	生态地质问题	0.4535	悬河稳定性	0.1607	0.0729	6
			地面沉降	0.3572	0.1620	2
			土壤盐渍化	0.3989	0.1809	1
			地下水质量	0.0832	0.0377	9
压力建模	土壤与植被	0.0906	NDVI	0.3873	0.0351	10
			NPP	0.1698	0.0154	13
			土地利用类型	0.4429	0.0401	8
	社会经济	0.1286	人口密度	0.3500	0.0450	7
			人类活动强度	0.6500	0.0836	5



a—坡度; b—地形起伏度; c—地层岩性; d—断裂带密度; e—悬河稳定性; f—地面沉降; g—土壤盐渍化; h—地下水质量; i—NDVI; j—NPP; k—土地利用类型; l—人口密度; m—GDP; n—敏感性指标叠加; o—恢复力指标叠加; p—压力度指标叠加; 1—脆弱性低; 2—轻度脆弱; 3—中度脆弱; 4—较高脆弱; 5—高度脆弱。

图 3 单要素指标赋分情况

表 5 敏感性、恢复力、压力度和脆弱性各等级面积统计表

等级	敏感性(ESI)		恢复力(ERI)		压力度(EVI)		生态地质脆弱性(EVI)	
	面积/km ²	占比						
脆弱性低	7222.88	24.72%	9070.72	31.04%	17673.34	60.48%	8431.44	28.85%
轻度脆弱	7271.25	24.88%	8926.50	30.55%	5835.06	19.97%	10139.82	34.70%
中度脆弱	8520.10	29.16%	6124.52	20.96%	3558.92	12.18%	5000.24	17.11%
较高脆弱	4722.44	16.16%	2569.03	8.79%	1404.03	4.80%	4475.17	15.31%
高度脆弱	1486.33	5.08%	2532.24	8.67%	751.67	2.57%	1176.34	4.03%

3.2 脆弱性评价结果分析

如图 4a 所示,研究区的生态地质脆弱性等级以轻度脆弱区为主导(占 34.70%),其次是低脆弱性区域(占 28.85%)和中度脆弱区(占 17.11%),这些区域主要集中在黄河以北的平原地带。该地区地势平坦,地层稳定,生态状况优良,具有较强的抗干扰和恢复能力。

较高脆弱区的面积占 15.31%,主要分布在聊城市中部和德州市北部的断裂带密集区域。断裂活动破坏了地层结构,降低了地质稳定性,加上人类活动的不合理性,例如过度开采地下水和大规模工程建设,进一步加剧了生态地质的脆弱性,容易引发地面沉降、地裂缝等自然灾害。

高度脆弱区的面积占 4.03%,主要分布在大城

市的中心区域和基岩山区。大城市的中心区域城市化程度高,人口密集,人类活动强度大,生态恢复力较弱。基岩山区的岩石性质不稳定,易于风化,地质灾害频发,例如济南市南部山区容易发生崩塌、滑坡等自然灾害,生态地质脆弱性高。

4 生态地质脆弱性分区与分析

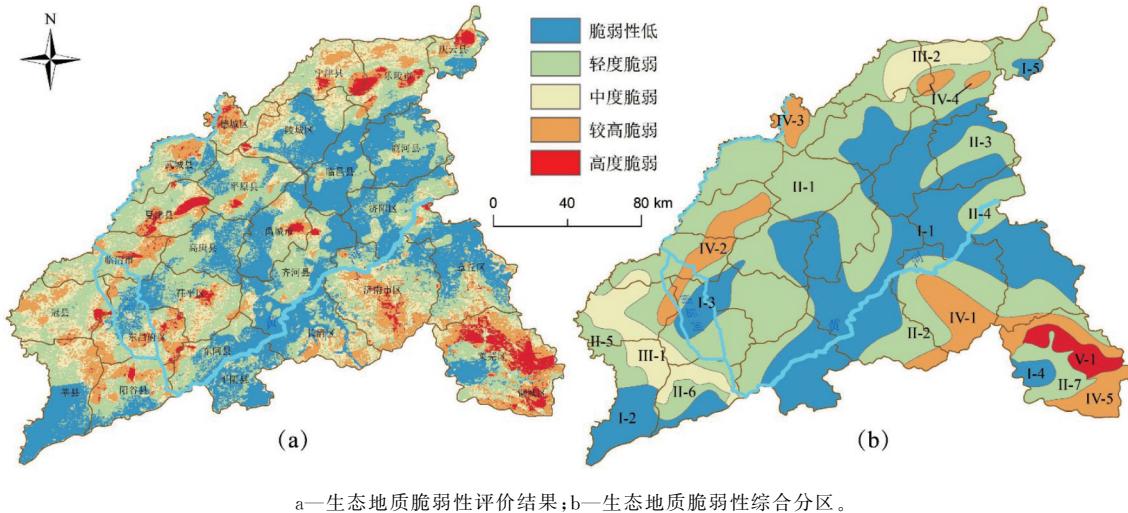
4.1 分区结果及生态保护修复建议

基于生态地质脆弱性评估,依据脆弱性等级和空间分布的相似性与差异性,同时尽可能保持地域的完整性,进行了生态地质脆弱性分区(图 4b)。

研究区域被划分为 20 个不同的分区,这些分区

的脆弱性等级分布显示出明显的空间聚集性和区域分带性特征。黄河以北的平原地区主要表现为中轻度脆弱区,这得益于地形的稳定性以及较强的生态恢复能力;相比之下,断裂带密集区域(例如聊城中部)和基岩山区(例如莱芜)由于地质结构的破碎和人类活动的强烈干扰,表现出高度的脆弱性;大城市中心(如济南)由于高人口密度和经济压力,生态恢复能力较弱,因此脆弱性较高。

为了深入分析各分区生态地质脆弱性的成因,对生态地质较高脆弱和高度脆弱的区域进行了细致的剖析,并提出了相应的生态保护与修复建议,详细内容见表 6。



a—生态地质脆弱性评价结果;b—生态地质脆弱性综合分区。

图 4 生态地质脆弱性评价及分区图

4.2 评价结果的区域差异与成因分析

研究区生态地质脆弱性的区域差异是自然本底条件与人类活动长期交互作用的结果,呈现显著空间分异特征。自然因素奠定脆弱性基础:南部基岩山区地表起伏大、地质结构破碎,岩石风化强烈,在降水等外营力作用下易发生崩塌、滑坡等灾害,生态地质敏感性高;北部冲积平原地形平坦、地层稳定,形成低敏感性的自然基底。断裂密集区因岩体完整性差、地下水径流复杂,加剧地面沉降、地裂缝等隐患;气候水文过程则通过物质迁移引发次生问题,平原区干旱导致土壤盐渍化,山区强降雨加剧水土流失,削弱生态系统恢复力。

人类活动通过叠加效应显著强化脆弱性。城市化进程中,人口与经济活动高度集聚导致城市中心区自然生态空间被挤占,植被覆盖度下降,生态系统

服务功能减弱,恢复力降低;高强度资源开发(如地下水过度开采)引发区域性地质灾害风险。农业生产中,不合理灌溉与施肥导致平原区土壤盐渍化加剧、地下水质量问题开始显现。

区域脆弱性呈现“南北分异、城山高值”格局:黄河以北平原区自然稳定性强、生态恢复力较高,以中轻度脆弱区为主;断裂密集区与基岩山区因地质条件复杂且受人类活动强烈干扰,形成敏感性与压力度双高的脆弱区域;大城市中心区因人口经济压力超载与生态系统退化,呈现“高压力—低恢复”的显著脆弱性特征。这种分异本质是地质构造演化与人类活动干扰在不同时空尺度上的非线性叠加,揭示了自然—社会双系统交互作用下生态地质脆弱性的形成机理。

表 6 生态地质脆弱性分区与保护建议

生态地质脆弱性分区	面积 /km ²	占比 /%	地质背景	主要生态地质问题	生态保护与修复重点
莱芜山区生态地质高度脆弱区(V-1)	759.3	1.67	鲁中低山丘陵区,条带状黑云二长花岗岩出露,孙祖-铜冶店断裂带(破碎带宽达200~500 m)与五色崖断裂带交会,地表坡度普遍>30°	暴雨诱发花岗岩风化层崩塌、植被覆盖率<35%导致水土流失	在地质灾害防控方面,于断裂带附近及高陡边坡设置位移监测点,采用锚杆、锚索等加固措施,增强山体稳定性;生态修复工程上,种植侧柏、刺槐等耐旱、固土能力强的树种;建立生态监测预警体系,实时监测植被生长和地质活动变化情况
济南南部山区生态地质较高脆弱区(IV-1)	2022.0	4.44	泰山余脉过渡带,寒武-奥陶系灰岩/页岩互层,千佛山断裂带(右旋走滑性质)控制地貌发育,市中区段人口密度>5 000人/km ²	构造破碎带滑坡、高人口压力下的生态侵占	统筹地质灾害防治与生态系统修复,推进水土流失综合治理,加强水源涵养林建设,实施生态移民与土地整治,构建山水林田湖草系统保护格局,提升生态系统服务功能
冠县-夏津生态地质较高脆弱区(IV-2)	1169.1	2.57	黄河冲积平原,第四系粉质黏土夹粉砂层,隐伏断层(落差5~10 m)控制地下水径流,潜水埋深<2 m	硫酸盐型土壤盐渍化、地面沉降速率15~20 mm/a	建立土壤盐渍化综合防治体系,采用深耕晒垡、灌排配套的方式,降低土壤盐分;推广滴灌、喷灌等节水农业技术,减少地下水开采;种植耐盐植物,如盐地碱蓬、柽柳等,改良土壤
德城区生态地质较高脆弱区(IV-3)	411.0	0.9	鲁西北冲积平原,全新世黄河改道沉积层,松散砂层厚度>30 m,地下水漏斗中心水位埋深>40 m	建筑密集区地面沉降、浅层地下水硝酸盐超标	强化地下水污染防治,对工业污染源进行严格监管,确保达标排放;对污水进行集中处理,减少污水入渗;地面沉降管控方面,严格控制地下水开采量,加强地下水水位监测
宁津东-乐陵市生态地质较高脆弱区(IV-4)	334.4	0.73	河间洼地,第四系黏土-粉砂互层结构,隐伏断层导水性强,潜水矿化度>3 g/L	苏打盐渍化、地裂缝	实施盐碱地改良与生态修复工程,建立地裂缝监测预警网络,发展耐盐植物资源培育,推广生态循环农业模式,完善生态保护补偿机制,促进区域可持续发展
钢城区生态地质较高脆弱区(IV-5)	748.8	1.64	鲁中低山丘陵,黑云二长花岗岩与寒武系灰岩接触带,孙祖断裂带控制的深切河谷地貌	花岗岩球状风化体失稳、生物多样性指数低	开展花岗岩风化区生态修复,对风化体采取加固措施,如喷射混凝土护坡;加强生物多样性保护,建设森林碳汇基地

5 结论

(1) 基于 SRP 模型框架,结合黄河流域(聊城—济南段)生态地质特征,从敏感性、恢复力与压力度 3 个维度筛选并厘定了 13 项关键指标因子,通过层次分析法(AHP)构建分级标准与权重矩阵,建立了适用于该区域的生态地质脆弱性评价模型。

(2) 区域脆弱性空间分异显著,脆弱性低及轻度脆弱区占主导地位(合计 63.55%),主要分布于黄河以北平原(如德州乐陵市、济南平阴县),得益于地形平坦、地层稳定及植被覆盖良好;而高度及较高脆弱区占比 19.34%,集中分布于断裂带密集区(聊城中部)、基岩山区(莱芜、钢城区)及大城市中心(济南历下区、德州德城区),其成因与地质结构破碎、人类活动干扰强烈密切相关。

(3) 针对不同脆弱区特征提出差异化治理对策:断裂带密集区强化地质灾害防控,部署自动化监测

网络并实施工程加固,管控地下水开采以遏制地面沉降;基岩山区聚焦生态韧性提升,治理崩塌滑坡隐患并推广耐旱固土植被种植,建设生物多样性保护与森林碳汇基地;平原农耕区针对土壤盐渍化与地下水超采,推广节水灌溉与耐盐植物种植,配套灌排工程与盐碱地改良措施,划定地下水禁限采区;城市中心区控制开发强度,修复生态空间、治理污染,推进生态移民与土地整治,构建系统保护格局。

参考文献:

- [1] 赖芳. 大渡河中下游沿岸生态环境脆弱性时空分布及地质影响因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [2] 边其军, 阮云钊, 郭俊良, 等. 大别山区生态地质调查探索与实践: 以罗山县为例[J]. 四川有色金属, 2023(1): 5~9.
- [3] 袁西龙, 李清平, 贾永山, 等. 黄河三角洲生态地质环境演化及其原因探索[J]. 地质调查与研究, 2008(3): 229~235.
- [4] 李煜, 罗红, 胡元平, 等. 基于 GIS 技术的生态地质脆弱性评价: 以武汉市汉江沿岸带为例[J]. 资源环境与工程, 2023, 37(2): 234~243.
- [5] 段星星, 邱德明, 白金. 浅析生态地质调查思路: 以黄河源为例

[J]. 地质论评, 2020, 66(S1): 159–160.

[6] 彭建兵, 申艳军, 金钊, 等. 秦岭生态地质环境系统研究关键思考[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4344–4358.

[7] 谭向前, 寇磊, 阎惠香, 等. 神农架林区大九湖湿地生态地质剖面调查研究[J]. 资源环境与工程, 2023, 37(2): 208–216.

[8] 聂洪峰, 肖春蕾, 戴蒙, 等. 生态地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 2021, 8(1): 1–12.

[9] 陈树旺, 邢德和, 丁秋红, 等. 生态地质调查评价: 以辽宁铁岭地区为例[J]. 地质与资源, 2012, 21(6): 540–545.

[10] 王琳. 黄河流域河南段生态环境地质问题及驱动力分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.

[11] 李航. 生态地质调查与评价[D]. 北京: 中国地质科学院, 2022.

[12] 王长生, 王大可. 试论 1:5 万生态地质调查[J]. 中国区域地质, 1997(1): 57–60.

[13] 欧阳渊, 刘洪, 张景华, 等. 西南山区生态地质调查技术方法研究[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 218–242.

[14] 李剑锋, 朱玉晨, 刘春雷, 等. 晋江流域生态环境脆弱性评价[J]. 华东地质, 2022, 43(1): 94–101.

[15] 郭秀岩, 韩祥银, 王心兵. 黄河(山东段)悬河稳定性评价[J]. 山东国土资源, 2009, 25(4): 25–30.

[16] 鲁峰, 王强, 韩新, 等. 黄河流域下游泰山区域生态地质环境问题及修复模式[J]. 山东国土资源, 2022, 38(3): 63–69.

[17] 李元征, 冯智志, 李立, 等. 基于 GIS 的黄河流域陆地生态系 统生态敏感性评价[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(4): 219–225.

[18] 王尧, 陈睿山, 夏子龙, 等. 黄河流域生态系统服务价值变化评估及生态地质调查建议[J]. 地质通报, 2020, 39(10): 1650–1662.

[19] 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.

[20] 孙智杰, 曾嘉, 王辛, 等. 基于 GIS 的通城县生态环境地质脆弱性评价[J]. 资源环境与工程, 2023, 37(5): 560–566+629.

Ecological Geological Vulnerability Assessment of the Yellow River Basin (Liaocheng–Jinan Section) Based on SRP Model

LI Ning^{1,2}, HUANG Weirong^{1,2}, JIANG Chaohua^{1,2}, XU Xiufeng^{1,2}, WANG Can^{1,2}, FUSUI Xiaoqing^{1,2}

(1. Shandong Physical and Chemical Exploration Institute, Shandong Jinan 250013, China; 2. Shandong Geological Exploration Engineering Technology Research Center, Shandong Jinan 250013, China)

Abstract: The Yellow River Basin (Liaocheng–Jinan section) is a composite region serving as an ecological barrier and a densely populated economic activity zone. The eco–geological vulnerability assessment has great significance to coordinate regional sustainable development. Aiming to address the limitations of traditional studies that focus on single eco–geological issues and overlook multifactorial coupling effects, by using SRP (Sensitivity–Resilience–Pressure) model as the theoretical framework, integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS spatial analysis techniques, an eco–geological vulnerability assessment system has been constructed. It comprises 13 indicators across three dimensions. Through quantifying the interactions of key factors, such as topography, engineering geology, eco–geology, and human activities, spatial differentiation patterns of vulnerability in the study area have been revealed. The vulnerability in the study area shows significant spatial differentiation, with low vulnerability and mild vulnerability areas dominating, accounting for a total of 63.55%. It is mainly distributed in the plains north of the Yellow River (Leling city in Dezhou city, Pingyin county in Jinan city). The terrain in this area is flat, the strata are stable, and the vegetation coverage is good, therefore the ecological restoration ability is strong. The proportion of highly vulnerable areas and highly vulnerable areas is 19.34%, mainly distributed in densely populated fault zones (central Liaocheng city), bedrock mountainous areas (Laiwu city, Gangcheng district of Laiwu city), and major urban centers (Lixia district of Jinan city, Decheng district of Dezhou city), accounting for 4.03% and 15.31% respectively. Areas with dense fault zones (such as central Liaocheng city) and bedrock mountainous areas (such as Laiwu city) exhibit high vulnerability due to fragmented geological structures and strong human activity interference. Due to high population density and economic pressure, ecological restoration capacity of big city centers (such as Jinan city) is weak and vulnerable.

Key words: Yellow River Basin; eco–geological vulnerability assessment; SRP model; ecological protection and restoration