

基于变异系数法的龙羊峡水库消落带生态敏感性评价

禹琴^{1,2}, 李奇³, 方海燕⁴, 杜文林⁵, 李龙⁶, 牛百成^{1,2,7}

(1. 青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 青海师范大学

青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 青海 西宁 810008;

3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 4. 中国科学院

地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 5. 青海黄河上游水电开发

有限责任公司龙羊峡发电分公司, 青海 海南 811899; 6. 青海省自然资源遥感中心, 青海 西宁 810008;

7. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: [目的] 对河流型水库消落带开展生态敏感性评价, 明晰区域土壤侵蚀、生物多样性下降等生态风险, 为水库生态安全保障提供决策依据。[方法] 以黄河上游龙羊峡水库消落带为研究对象, 运用 GIS 技术, 对研究区内的土壤侵蚀敏感性、生物多样性敏感性、生境敏感性及地形敏感性 4 个关键因子开展评价; 基于变异系数法确定各因子对综合生态敏感性的权重, 计算综合生态敏感性。[结果] ① 研究区生境敏感性与生物多样性敏感性中度偏高, 土壤侵蚀敏感性中度偏低, 地形敏感性整体呈现较低水平。② 地形敏感性与生境敏感性因子在综合生态敏感性计算中的权重最高, 分别为 38.4% 和 25.5%。③ 研究区内 75.49% 的区域综合生态敏感性处于中度偏低等级。[结论] 龙羊峡水库消落带综合生态敏感性的主导因素为地形与生境敏感性因子, 空间分布呈现出库首>库腹>库尾的特点, 库首区域需优先保护。

关键词: 龙羊峡水库; 消落带; 生态敏感性; 变异系数法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0245-10

中图分类号: X826, P95

文献参数: 禹琴, 李奇, 方海燕, 等. 基于变异系数法的龙羊峡水库消落带生态敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 245-254. Yu Qin, Li Qi, Fang Haiyan, et al. Ecological sensitivity evaluation of water level fluctuation zone in Longyangxia reservoir based on coefficient of variation method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 245-254. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.002; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.002.

Ecological sensitivity evaluation of water level fluctuation zone in Longyangxia reservoir based on coefficient of variation method

Yu Qin^{1,2}, Li Qi³, Fang Haiyan⁴, Du Wenlin⁵, Li Long⁶, Niu Baicheng^{1,2,7}

[1. School of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008,

China; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation

(Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China; 3. Power China

Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 4. Key Laboratory of Water Cycle and

Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100101, China; 5. Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Longyangxia

Power Generation Branch Hainan Tibetan Autonomous Prefecture, Xining, Qinghai 811899, China; 6. Qinghai Remote

Sensing Center for Natural Resources, Xining, Qinghai 810008, China; 7. Key Laboratory of Mountain Surface Process and

Hazards, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, MWR, Chengdu, Sichuan 610041, China]

Abstract: [Objective] Evaluation of the ecological sensitivity of water-level fluctuation zones of river-type

收稿日期: 2025-03-11

修回日期: 2025-05-15

采用日期: 2025-05-15

资助项目: 青海省基础研究计划项目“基于复合指纹法的龙羊峡水库泥沙来源定量判别研究”(2022-ZJ-942Q); 国家自然科学基金项目“黄河龙羊峡水库风沙—水沙入库的复合指纹定量判别研究: 以茫拉河和沙沟河流域为例”(42107372); “中国北方农牧交错带土壤多营力复合侵蚀变化与风险评估”(42330502)

第一作者: 禹琴(1995—), 女(汉族), 四川省江油市人, 硕士研究生, 研究方向为自然地理综合研究。Email: yuqinjq@163.com。

通信作者: 牛百成(1987—), 男(汉族), 甘肃省会宁县人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持、物源定量判别研究。Email: niubch@foxmail.com。

reservoirs can clarify ecological risks, such as soil erosion and biodiversity decline in the region, in order to provide a basis for decision-making regarding the ecological safety of reservoirs. [Methods] The water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir was taken as the research object, and GIS technique was used to evaluate four key factors: soil erosion sensitivity, biodiversity sensitivity, habitat sensitivity, and topographic sensitivity in the study area. The weight of each factor on comprehensive ecological sensitivity was determined, and comprehensive ecological sensitivity was calculated using the coefficient of variation method. [Results] ① The habitat and biodiversity sensitivities were moderately high, soil erosion sensitivity was moderately low, and topographic sensitivity was generally low. ② The topographic and habitat sensitivity factors had the highest weights in the comprehensive ecological sensitivity calculation at 38.4% and 25.5%, respectively. ③ A moderately low level of comprehensive ecological sensitivity was observed in 75.49% of the study area. [Conclusion] Topography sensitivity and habitat sensitivity were the dominant factors in the ecological sensitivity of the water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir. The spatial distribution is characterized by the head of the reservoir showing higher sensitivity than the belly, and the belly showing higher sensitivity than the tail. Priority should be given to protecting the reservoir head.

Keywords: Longyangxia reservoir; water level fluctuation zone; ecological sensitivity; coefficient of variation method

在中国水利水电事业与水资源管理需求持续推进的背景下,生态水利工程与生态修复技术相结合是实现水库生态安全与可持续管理的关键途径^[1]。水库作为兼具水资源调节、蓄水储能、防洪灌溉等多重功能的基础设施^[2],其建设和运行对促进经济社会发展发挥重要作用,同时也加剧了区域生态压力^[3]。因此,水库规划与管理需综合权衡经济发展与生态保护,尤其需关注人为调控下库岸形成的消落带,这一特殊地带因水位高频大幅涨落呈周期性水淹或出露,其生态修复成为亟待解决的问题^[4-5]。作为水域和陆域生态系统连接的交集区,消落带在维护库岸稳定,拦截泥沙及改善水库水质等方面有着不可替代的作用^[6]。作为生态系统中的敏感区域,消落带极易受到外界污染和破坏^[7],在降雨径流与波浪侵蚀等外力作用下,土壤稳定性显著降低,侵蚀强度明显高于周边环境,导致生态功能进一步削弱^[6]。加之周期性淹水限制植被生长,消落带成为对水生态环境演化有重要作用的“生态交错区(ecotone)”^[8]。

由于生态功能区的恢复力水平与生态敏感性具有负相关关系^[9],生态敏感性研究有利于了解区域生态风险范围及生态系统抗扰能力。当前关于区域生态敏感性研究多聚焦于市县级或流域尺度等较为宏观的空间范围,对水库消落带这类呈狭长型条带状的小范围区域关注不足。中国水库消落带的研究焦点集中于三峡,多以水淹胁迫下植物群落组成变化及水位波动带土壤理化性质差异等方面的研究为主^[10-11]。在库区生态敏感性方面的研究中,李辉^[12]基于3S技术,通过选取水土流失敏感性、石漠化敏感性和地质灾害敏感性因子,发现三峡上游重庆市万州

地区的高山峡谷区因岩石破碎导致水土流失敏感性极高,泥沙进入水库抬高河床,严重威胁三峡大坝生态安全。刘春霞等^[13]通过对土壤侵蚀、石漠化、生境和酸雨因子的分析,定量揭示了三峡重庆段以高度生态敏感为主的空间分布特征。生态敏感区的形成是多因素共同作用的结果,其评价因子权重划分方法存在差异,多数研究主要采用层次分析法和专家打分法(德尔菲法)等主观赋权法^[14-15],此类方法依赖专家经验判断,虽结果具有指导意义,但过程受主观因素影响,缺乏对客观条件变化的考虑,往往具有主观性和不确定性。客观赋权法则基于客观数据驱动,如有研究使用熵权物元模型^[16]对三峡库区丰都段生态敏感性评价进行权重确定,消除了权重计算时的主观影响,但忽略了指标本身的重要程度;变异系数法^[17-18]作为客观赋权法,则通过计算数据间的变异程度来确定权重,不但能较好地弥补主观赋权的局限性,同时不受量纲影响,可充分挖掘指标信息以提升结果的准确性和实用性,已有研究将变异系数法和机器学习相结合,在贵阳市息烽县生态敏感性评价中验证了结果与实际情况的高度匹配性,丰富了生态敏感性评价方法和模型^[19]。

考虑到目前有关高寒区水库消落带的研究资料十分匮乏,这一研究现状既限制了对高寒区水库消落带生态特性的深入了解,同时也不利于相关部门制定科学的生态保护方案。因此,科学合理选取评价因子,开展高寒区水库消落带的生态敏感性评价工作显得尤为重要。龙羊峡作为全国尺度上的生态敏感区和水土保持重要功能区,库区水土流失严重,库坝工程导致周期性淹水引发植被退化、岸坡失

稳等问题。结合李亦秋等^[20]研究,龙羊峡及以上流域的生物多样性敏感度达极高水平,生物多样性成为库区生态失衡的关键驱动因子,加之坡度是导致库岸在水蚀、涌浪作用下产生地质灾害的主要原因,本研究基于龙羊峡水库生态特征与文献支撑选取土壤侵蚀、生物多样性、生境及地形敏感性这4个指标^[15]定量评估消落带生态风险,以综合反映消落带生态要素现状。权重计算则采用变异系数法以减少主观干扰,通过GIS技术叠加计算得到综合生态敏感性结果。研究结果将有助于进一步洞悉龙羊峡水库消落带的生态现状,可为高寒区相似水库生态保护和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

龙羊峡水库(35°46′—36°13′N,100°23′—100°50′E)为黄河上游梯级水库群中具备多年调节功能的大型水库,也是最大的高原水库,坝址位于共和盆地东部^[21]。自1986年10月运行以来,在“冬蓄夏泄”调度模式下^[22],库岸形成“冬淹夏露”的消落带。按照工程设计,水库死水位2 530 m,最高水位2 600 m,总库容 $2.47 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[23]。实际运行中水位近年来多保持在2 580 m以上,变化仅20 m,消落带面积约56 km²。在水位急剧变化及人类活动作用下,此类界面的植被类型及生物多样性存在差异,多次实地调查发现消落带存在土壤侵蚀、滩地崩塌及水土流失风险,威胁库区及下游生态安全。本研究以海拔2 580~2 600 m的20 m消落带为研究对象,结合水库地形地貌、土壤质地及距坝距离,将其划分为库首、库腹和库尾消落带。其中,库首邻近大坝,水深且流速缓慢,地表砾石堆积,植被稀少;库腹位于水库中部,受风沙作用形成大面积风沙物质为主的落沙坡;库尾是黄河入库口,消落带泥沙物质含量大。

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 数据来源

本研究采用的龙羊峡库区2023年遥感数据为欧空局发布的哨兵2号(S2)L1C多光谱图像,土壤数据来自世界土壤数据库(HWSD v1.1),气象资料(2011—2022年1 km空间分辨率的年平均降水数据)源自国家青藏高原科学数据中心,数字高程地图(地理空间数据云)和土地覆被类型数据(<https://zenodo.org/records/12779975>)为30 m分辨率。为保证数据分析的一致性,对上述数据进行投影变化并统一坐标为WGS_1984_UTM_Zone_47N,空间分辨率统一为30 m×30 m。

1.2.2 评价指标体系构建

(1) 土壤侵蚀敏感性指数。采用降雨侵蚀力因子(R)、土壤质地因子(K)、坡度坡向因子(LS)及植被与经营管理因子(C)识别消落带土壤侵蚀的区域^[24]。 R 因子依据《生态建设项目土壤流失量测算导则(SL 773—2018)》方法计算; K 因子通过EPIC模型结合土壤有机碳与土壤质地数据计算 K_{epic} 值^[25],再经土壤可蚀性因子公式修正获取 K 值;根据蔡崇法^[26]的研究,通过 C 值与植被覆盖度的关系计算 C 值; LS 因子基于DEM数据,经填洼处理后使用焦点统计得到地形起伏度表征,即以地面一定范围内的最大高差作为土壤侵蚀敏感性评价中的地形指标。各因子经自然断点法分级后叠加计算得到最终结果 SS_j (表1),计算公式为

$$R_d = 0.067 \times P_n^{1.627} \quad (1)$$

式中: R_d 代表多年平均降雨侵蚀力因子[$\text{MJ} \cdot \text{mm} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; P_n 表示多年平均降雨量(mm)。

$$K_{\text{epic}} = \left[0.2 + 0.3e^{-0.0256S_{\text{AN}} \left(1 - \frac{S_{\text{IL}}}{100}\right)} \right] \times \left(\frac{S_{\text{IL}}}{C_{\text{LA}} + S_{\text{IL}}} \right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25\text{SOC}}{\text{SOC} + e^{(3.72 - 2.95\text{SOC})}} \right] \times \left\{ 1 - \frac{0.7(1 - S_{\text{AN}})}{(1 - S_{\text{AN}}) + e^{(22.9(1 - S_{\text{AN}}) - 5.51)}} \right\} \quad (2)$$

$$K = (-0.01383 + 0.51575K_{\text{epic}}) \times 0.1317 \quad (3)$$

式中: S_{AN} , S_{IL} , C_{LA} , SOC 分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%)。

$$C = \begin{cases} 1 & (f=0) \\ 0.6508 - 0.3436 \times \lg f & (0 < f < 78.3\%) \\ 0 & (f \geq 78.3\%) \end{cases} \quad (4)$$

$$SS_j = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^n B_i} \quad (5)$$

式中: f 表示植被覆盖度; SS_j 指 j 单元上的土壤侵蚀敏感性指数; B_i 为第 i 项因子敏感性等级值。

(2) 生物多样性敏感性指数。采用归一化植被指数NDVI估算植被覆盖度 F_v ,用以衡量生态敏感性分析中的生物多样性指数。计算公式为

$$F_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (6)$$

式中: $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 指无植被或裸土的NDVI值; NDVI_{veg} 指完全为植被的NDVI值。

(3) 生境敏感性指数。由于龙羊峡水库消落带目前并没有建立大范围的保护区,借鉴消落带生境敏感性的相关研究^[15],本文用地表覆被类型表示生境敏感性。

考虑到“水域”在水陆交界区的关键作用及易受损特性,将水域划分为重度敏感区域。

(4) 地形敏感性指数。实地考察发现陡坡区域

地质灾害风险较大,且坡度大小直接影响土壤侵蚀、水文过程、土地利用及植被类型。本文选用坡度作为地形敏感性主要指标。

表 1 土壤侵蚀敏感性分级

Table 1 Sensitivity classification of soil erosion

等级	降雨侵蚀力 R	坡度坡向 LS	土壤可蚀性 K	植被与经营管理 C	土壤侵蚀敏感性	分级赋值
不敏感	1 229~1 259	<20	<0.005 000	0~0.04	1.31~2.43	1
轻度敏感	1 259~1 283	20~28	0.005 000~0.005 046	0.04~0.11	2.43~3.2	3
中度敏感	1 283~1 311	28~47	0.005 046~0.017 814	0.11~0.22	3.2~3.95	5
重度敏感	1 311~1 349	47~104	0.017 814~0.019 726	0.22~0.61	3.95~4.78	7
极度敏感	1 349~1 448	104~197	>0.019 726	0.61~1.00	4.78~6.30	9

注: R 单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$; K 单位为 $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm)$; LS 无量纲; C 无量纲。

1.2.3 变异系数法

变异系数即标准差系数,也叫离散系数、差异系数,可用于度量单位和平均数不同时的两个或多个资料的差异程度^[27]。本研究参照《生态功能区划暂行规程》及相关文献^[15,28],使用变异系数法计算 4 项敏感性指数权重,变异系数越小,表明对评价对象的区分能力弱,赋较低权重;反之,则赋予较高权重,以此来反映结果的差异性。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (7)$$

$$D_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{x}_i)^2} \quad (8)$$

$$R = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{D_i/\bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n (D_i/\bar{x}_i)} \quad (9)$$

式中: r_i 表示第 i 项评价因子指数; \bar{x} , D , A 分别为评

价因子均值、标准差及变异系数; R 为各评价因子归一化权重。

1.2.4 综合生态敏感性指数

自然断点法(natural break)是基于数据的自然分组来划分不同类别,该方法能够使各级的内部方差之和最小,各类别之间差异最大,以此实现科学评价^[20]。

依据公式(10)加权求和生成综合生态敏感性结果,借助 GIS 空间分析模块,将各指数和综合敏感性通过自然断点法分成“不敏感、轻度、中度、重度和极度敏感”5 个等级(表 2),以此完成龙羊峡水库消落带生态敏感性分析。

$$Z = \sum_{i=1}^n R_i T_i \quad (10)$$

式中: Z 为生态敏感性指数; R_i 为归一化权重系数; T_i 指 i 项评价因子指数。

表 2 龙羊峡水库消落带生态敏感性评价指标分级结果

Table 2 Grading results of ecological sensitivity evaluation indicators for water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir

等级	土壤侵蚀敏感性	生物多样性敏感性	生境敏感性	地形敏感性	分级赋值
不敏感	1.31~2.43	0.79~1	裸地	0°~5°	1
轻度敏感	2.43~3.2	0.53~0.79	耕地	5°~10°	3
中度敏感	3.2~3.95	0.31~0.53	草地	10°~20°	5
重度敏感	3.95~4.78	0.12~0.31	水域	20°~30°	7
极度敏感	4.78~6.30	0~0.12	林地	30°~70°	9

2 结果与分析

2.1 单因子敏感性

2.1.1 土壤侵蚀敏感性评价

基于 GIS 软件空间分析模块整合 R , K , LS 和 C 因子得到土壤侵蚀敏感性空间分布特征(图 1)及面积比例(表 3)。龙羊峡水库消落带的轻度敏感区面积比例最大(29.89%),与不敏感(27.71%)和中度敏感区(26.31%)共同构成 83.91% 的主体分布,而重度

敏感(11.41%)和极度敏感区(4.69%)比例相对较低。从水库不同位置来看,库首的重度(16.58%)和极度(8.43%)土壤侵蚀敏感区比例高于库腹和库尾,库腹的中度和轻度敏感区均匀分布,二者合计比例为 73.48%;库尾不敏感区面积比例超过 50%,轻度敏感区次之。

2.1.2 生物多样性敏感性评价

基于植被覆盖度计算得到生物多样性敏感性空间分布特征(图 2)及面积比例(表 3)。龙羊峡水库消

落带生物多样性以中度敏感区比例最高(38.81%),轻度敏感区次之(20.47%),极度、重度和不敏感区比例较低,分别占 15.4%,13.78%和 11.54%,说明消落带的植被生长状况较差,导致生物多样性敏感性整体呈中度偏高水平。空间分布上表现为低海拔的重

度水淹区有较高的生物多样性敏感性水平,库首、库腹以及库尾均以中度敏感为核心特征,但库首中度敏感区的面积比例高达 26.90%,与轻度敏感(26.43%)和极度敏感区(20.03%)面积比例相近,库腹和库尾的中度敏感区比例均超 50%。

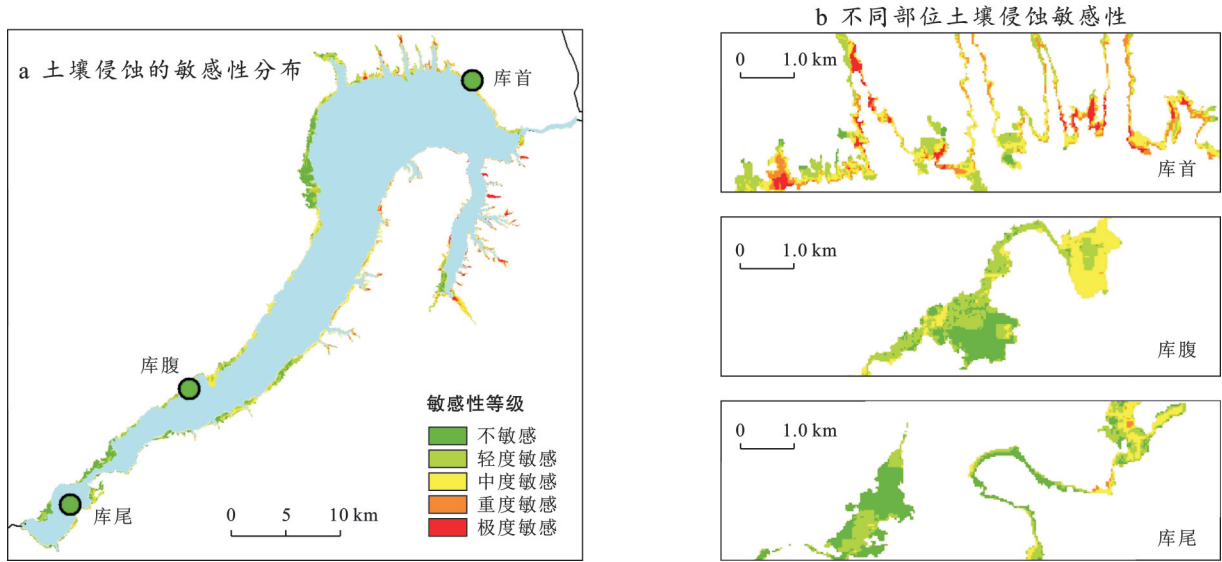


图 1 龙羊峡水库消落带土壤侵蚀敏感性等级空间分布

Fig.1 Spatial distribution soil erosion sensitivity grade in water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir

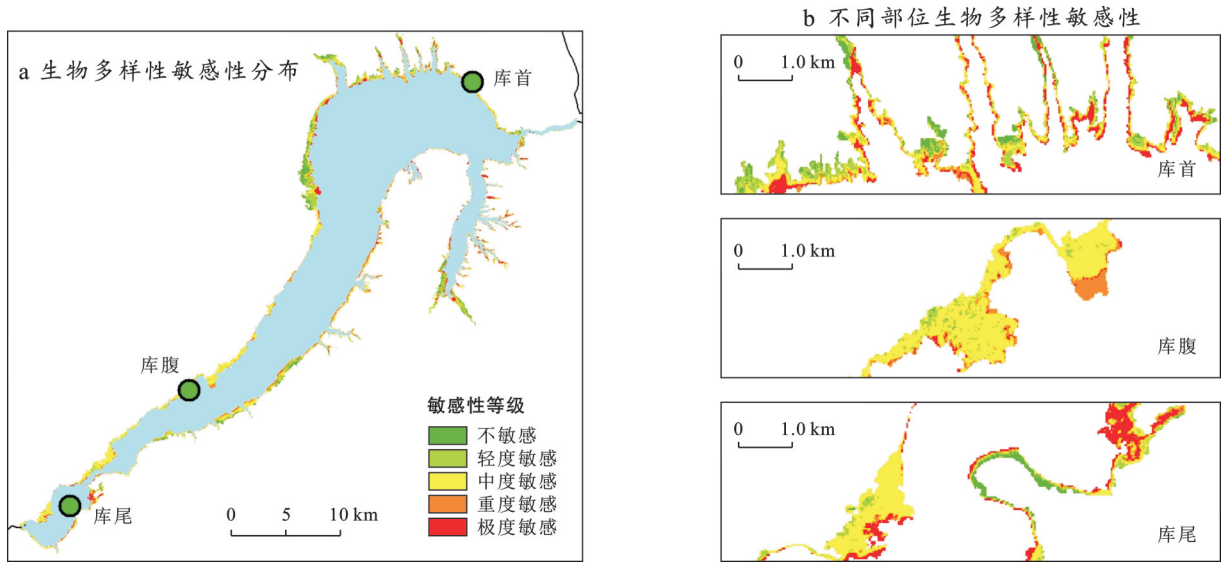


图 2 龙羊峡水库消落带生物多样性敏感性等级空间分布

Fig.2 Biodiversity sensitivity grade in water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir

2.1.3 生境敏感性评价

生境是指生物生活和繁衍的场所。它对人类活动的敏感程度称生境敏感性程度^[29]。结合土地覆被数据分析得出生境敏感性空间分布特征(图 3)及面积比例(表 3)。龙羊峡水库消落带的重度和中度生境敏感区占 74.16%,不敏感区占 21.83%。空间分布上表现为库首以中度敏感区为主,占 46.30%,重度敏感区占 34.35%;库腹和库尾均以重度敏感区为主,所占比例分别为 48.60%和 37.81%,其次为不敏感区,

分别占 30.29%和 36.56%。

2.1.4 地形敏感性评价

对消落带坡度评价结果进行分级得到地形敏感性空间分布特征(图 4)及面积比例(表 3)。总体来看,经过多年蓄水运行后,龙羊峡水库消落带中坡度小于 20°的区域超过 76%,缓坡区面积比例较大。由此得出龙羊峡水库消落带的地形不敏感区占 46.38%,而轻度敏感区有 30.19%,地形敏感性等级整体较低。库区不同位置均以不敏感为主,轻度敏

感区次之,中度和重度敏感区面积相对较小,极度敏感区比例最小,而支流汇入区及沟谷地区,地形敏感性相对较高。

2.2 综合生态敏感性

2.2.1 敏感性因子权重结果及分析

变异系数法计算的权重结果(表 4)表明地形与

生境敏感性是主导综合生态敏感性的核心因子。其中,地形敏感性因子归一化权重达 38.4%,其敏感性整体偏低;生境敏感性因子权重次之(25.5%),生物多样性敏感性因子和土壤侵蚀敏感性因子对综合生态敏感性的贡献弱于地形与生境因子,二者权重分别为 24.4% 和 11.7%。

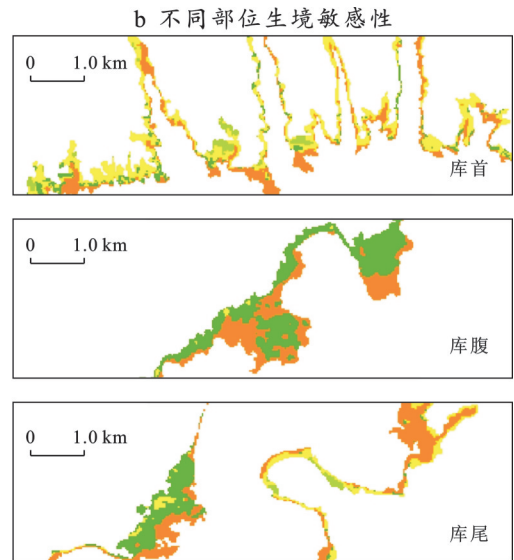
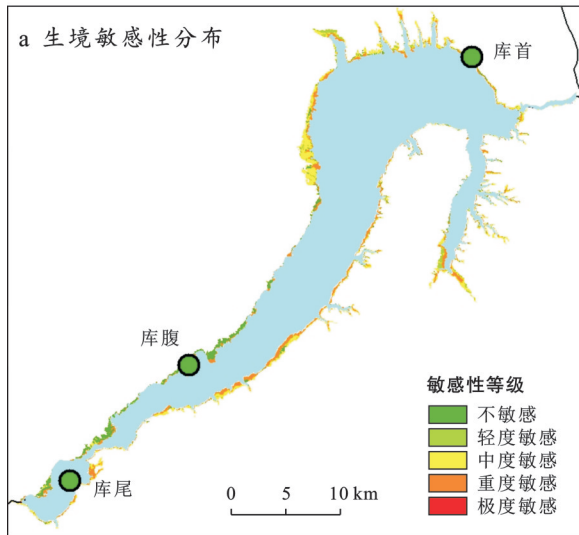


图 3 龙羊峡水库消落带生境敏感性等级空间分布

Fig.3 Habitat sensitivity grade in water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir

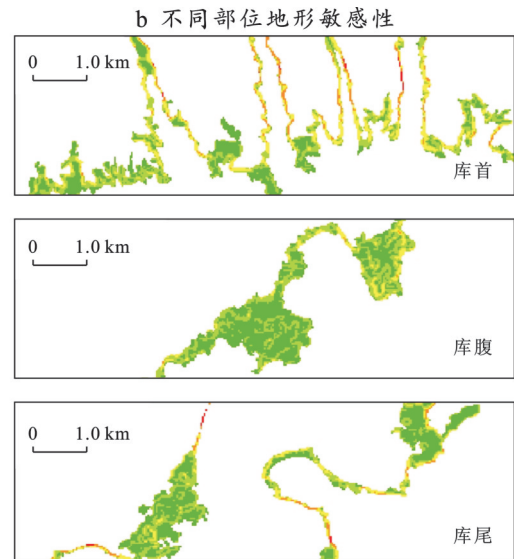
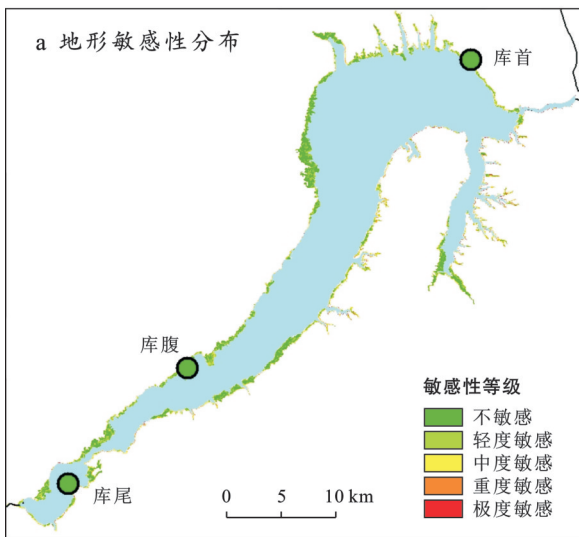


图 4 龙羊峡水库消落带地形敏感性等级空间分布

Fig.4 Topographic sensitivity grade in water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir

风沙胁迫叠加低水位期雨水冲刷作用加剧了库岸泥沙进入消落带的可能性,高能量物质流动使其生态系统较为脆弱。地表覆被类型差异体现消落带的生境差异,水域和草地分别代表重度和中度敏感性等级,消落带出露期以一年生草本植物为主,沙生植物沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)这一流动沙地的先锋植物因其具有耐旱耐盐碱、幼苗期根系生长

快等特点,对极端环境有较强的适应性^[30]而在消落带有大量分布,进一步反映出高寒区水库消落带恶劣的生境条件。与此同时,库腹大面积沙丘区植物覆盖度和物种多样性低,生物多样性敏感性等级高于库尾和库首。消落带地势起伏度和植被与经营管理因子整体表现为轻度敏感和不敏感,加之缓坡面积最大,即使该区域的降雨侵蚀力高,但雨水汇流时

并没有太多势能,从而不会导致太强的土壤侵蚀作用。从空间分布来看,陡坡、峭壁和垂直壁主要集中在库首沟壑及沙沟河入库的高山峡谷区,降雨侵蚀

力自东向西递减,在土壤可蚀性的双重驱动下使得库首土壤侵蚀敏感性最高,整体表现出库首>库腹>库尾的特点。

表 3 龙羊峡水库消落带各敏感性因子敏感性等级面积比例
Table 3 Area percentage in sensitivity class for each sensitivity factor in water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir

评价因子	区域	敏感性等级					单位:%
		不敏感	轻度敏感	中度敏感	重度敏感	极度敏感	
土壤侵蚀敏感性	库首	23.62	25.55	25.82	16.58	8.43	
	库腹	17.51	34.77	38.71	8.38	0.64	
	库尾	56.08	35.02	8.06	0.84	0	
	合计	27.71	29.89	26.31	11.41	4.69	
生物多样性敏感性	库首	16.03	26.43	26.9	10.6	20.03	
	库腹	6.59	12.84	51	21.47	8.1	
	库尾	6.01	14.74	54.95	11.2	13.1	
	合计	11.54	20.47	38.81	13.78	15.4	
生境敏感性	库首	12.27	7.06	46.3	34.35	0.02	
	库腹	30.29	0.26	20.84	48.6	0	
	库尾	36.56	0.86	24.77	37.81	0	
	合计	21.83	4	35.16	39	0.01	
地形敏感性	库首	46.01	27.47	15.04	8.29	3.19	
	库腹	48.34	33.21	12.98	4.72	0.75	
	库尾	44.47	33.42	15.24	5.92	0.94	
	合计	46.38	30.19	14.5	6.85	2.08	

2.2.2 综合生态敏感性评价

各单因子敏感性结果经加权叠加计算得到综合生态敏感性整体呈中度偏低态势(图 5),中度偏低敏感性区占消落带面积的 75.49%。具体来看,极度敏感区的面积为 4.52 km²,占 8.14%;重度敏感区面积为 9.09 km²,占 16.37%;中度敏感区面积为 11.50 km²,占 20.72%;轻度敏感区面积为 13.84 km²,占

24.93%;不敏感区面积为 16.57 km²,比例达 29.84%。从空间分布来看,库首以不敏感(27.04%)和轻度敏感(24.6%)为主;库腹 72.24% 的区域为中度偏低的生态敏感性,重度敏感区占 19.48%,极度敏感区占 8.28%。库尾消落带各敏感性等级的面积比例随敏感性等级升高而降低,不敏感区比例最大,为 41.04%。

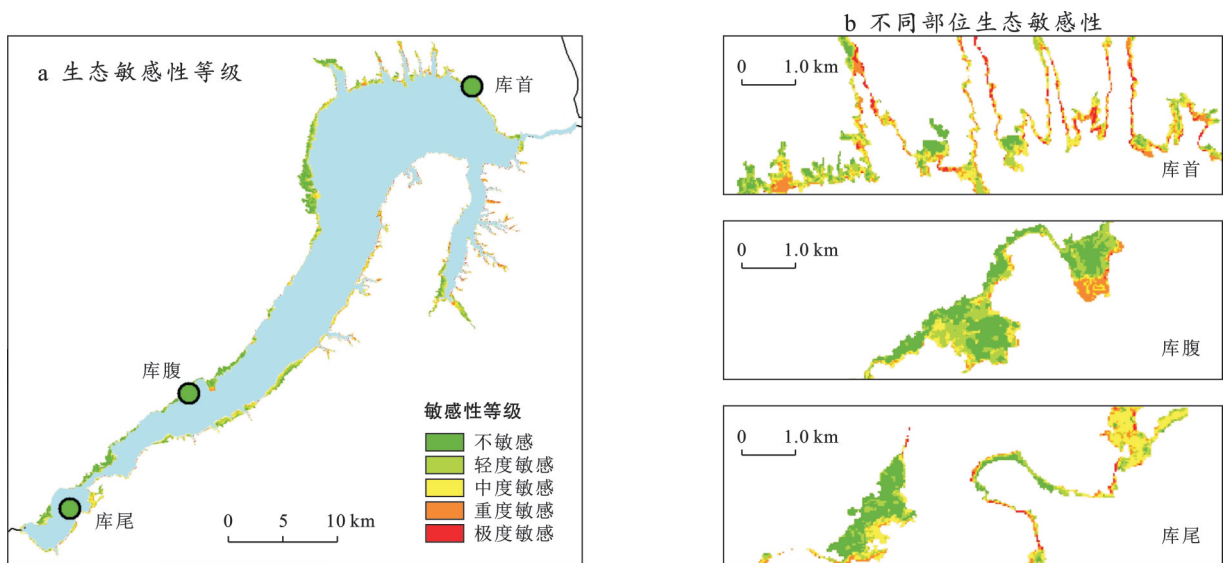


图 5 龙羊峡水库消落带生态敏感性等级空间分布

Fig.5 Ecological sensitivity grade in water level fluctuation zone of Longyangxia reservoir

水库消落带的综合生态敏感性等级表现出库首最高,库腹次之,库尾相对较低的特点(表5)。库首不敏感和轻度敏感区比例大,但中度及以上敏感区同样占较高比例,库首的极度敏感区为3个区域中最大。库腹的敏感性等级呈现中度偏低特点,但值得注意的是,库腹与库首区域一致,均有较大比例的重度和极度敏感区,显示出一定的复杂性。相比之下,库尾不敏感区比例高达41.04%,轻度敏感区域为21.17%,而中度及以上敏感区域面积总体占较小比例,显示出库尾生态敏感性较其他区域低的鲜明特点。

表4 研究区各敏感性因子的权重结果
Table 4 Weighting results for each sensitivity factor of study area

评价因子	平均值	标准差	变异系数	归一化权重
土壤侵蚀敏感性	3.133	0.924	0.295	0.117
生物多样性敏感性	0.436	0.268	0.613	0.244
生境敏感性	2.543	1.628	0.640	0.255
地形敏感性	8.140	7.855	0.965	0.384

表5 研究区综合生态敏感性等级面积比例
Table 5 Area percentage of integrated ecological sensitivity rating at study area 单位:%

区域	不敏感	轻度敏感	中度敏感	重度敏感	极度敏感
库首	27.04	24.60	18.93	18.72	10.70
库腹	22.77	25.01	24.46	19.48	8.28
库尾	41.04	21.17	17.96	14.81	5.02
消落带合计	29.84	24.93	20.72	16.37	8.14

3 讨论

植物生长受地形、气候、水文特征及土壤条件等多因素影响^[31],海拔梯度引发的淹水时间差异是影响水库消落带植被丰富度、多度及多样性的关键因子。龙羊峡水库消落带的生物多样性敏感性等级整体表现为中度偏高,植被覆盖度与海拔高度呈正相关,该趋势与已有的水库消落带物种多样性研究结果相似,可能是因为高海拔区水淹程度轻,淹没时间短,植被生长干扰因素单一,因此生物多样性和植被覆盖度高于重度水淹区^[32]。周期性水淹压力限制了原生植被的生长繁殖,水库淹没区与非淹区优势种差异明显。如三峡水库消落带植被类型受水位调控的影响,蓄水前有丰富的常绿阔叶林、针叶林和灌木林资源,经长期水位变动后,生活周期较短的草本植物为现存优势种^[33],且群落单一化程度随库龄增长加剧^[34],与龙羊峡水库消落带野外植被调查结果一致,周期性水淹改变了消落带的生境条件,形成以草本植物为优势的特点,此现象进一步揭示了水淹胁迫对生物多样性敏感性的深刻影响。龙羊峡与三峡

水库库腹消落带的生物多样性敏感性呈现异质分化格局,三峡库腹区水量丰沛,植物覆盖度和生物多样性最优^[15],但位于高寒区的龙羊峡水库库腹区在风沙作用下形成有大面积落沙坡,地表风沙物质覆盖为主,生境恶劣,植物覆盖度小且种类单一。综合考虑各因子共同作用得出龙羊峡水库消落带的综合生态敏感性整体表现为中度偏低,总体生态系统较为良好。极度敏感区集中于库首北部及沙沟河支流汇入区,沙沟河是水库的最大支流,夏季出露期,支流两岸地势较陡,加之土质疏松,降雨侵蚀力强,土壤侵蚀作用显著。同时,水淹-出露交替破坏土壤团聚体稳定性,土壤抵抗外力破坏能力降低,在地形敏感性的双重作用下,库首成为极度敏感区,相关部门应重点关注该区域土壤侵蚀和植被恢复问题。例如,通过筛选适生物种,构建“微地形改造+植被固土”协同调控体系试验以此来减少消落带土壤侵蚀的发生^[35]。对于生态敏感性较低的库腹和库尾区则因地制宜地开展生态保护与开发,从而实现龙羊峡水库消落带生态的可持续发展。

本研究为明晰龙羊峡水库消落带生态问题及制定生态保护措施提供一定的参考价值,同时也存在一些不足,小尺度区域的生态敏感性研究只能反映局部生态敏感性特点,不足以准确反映整体情况。鉴于高寒区自然条件的特殊之处,开展相关研究过程中还需深入对比分析类似水库消落带生态敏感性研究结果,以此实现更精准的高寒区水库消落带生态敏感性评价指标选择,提升研究结果的准确性和可靠性。

4 结论

(1) 龙羊峡水库消落带生物多样性和生境敏感性中度偏高,土壤侵蚀敏感性整体为中度偏低等级,地形敏感性较低。这表明水库消落带在生物多样性和生境方面面临较大的生态压力,需要加强关注和保护。

(2) 地形和生境因子在综合生态敏感性评价中权重较高,分别为38.4%和25.5%。凸显出地形复杂性和生境多样性在保持消落带生态系统稳定性方面具有显著影响。

(3) 龙羊峡水库消落带75.49%的区域综合生态敏感性为中度及以下等级,在空间上呈现出库首最高、库腹次之、库尾最低的趋势。说明消落带对外界变化具备一定的抗干扰能力,生态系统相对稳定。库首是消落带生态保护的重点区域,应采取更加有针对性和有效的措施来应对库首区域潜在的生态问题。

参考文献(References)

- [1] 邓铭江,黄强,畅建霞,等.广义生态水利的内涵及其过程与维度[J].水科学进展,2020,31(5):775-792.

- Deng Mingjiang, Huang Qiang, Chang Jianxia, et al. Connotation, process and dimensionality of generalized ecological water conservancy [J]. *Advances in Water Science*, 2020,31(5):775-792.
- [2] Ma Chunhui, Xu Xiaoyan, Yang Jie, et al. Safety monitoring and management of reservoir and dams [J]. *Water*, 2023,15(6):1078.
- [3] Lu Xiaochun, Liu Xiao, Xiong Bobo, et al. Water distribution characteristics of slopes based on the high-density electrical method [J]. *Water*, 2023,15(5):895.
- [4] 杨志超,马萧萧,常世举,等.抽水蓄能电站水库岩质边坡消落带复绿实践及效果评估[J].*长江科学院院报*, 2024,42(7):86-93.
- Yang Zhichao, Ma Xiaoxiao, Chang Shiju, et al. Practical restoration and effect evaluation of vegetation in the water-level fluctuation zone of the rocky slope in pumped storage power station reservoir [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024,42(7):86-93.
- [5] 饶洁,唐强,冯韞,等.三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式[J].*水土保持学报*,2024,38(1):310-318.
- Rao Jie, Tang Qiang, Feng Yun, et al. Habitat condition and vegetation restoration patterns in the water level fluctuation zone of the Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(1):310-318.
- [6] 贺秀斌,鲍玉海.三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J].*中国水土保持科学*,2019,17(4):160-168.
- He Xiubin, Bao Yuhai. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges reservoir [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019,17(4):160-168.
- [7] 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. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges reservoir region in Chongqing municipality, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(21):7117-7129.
- [8] 李姗泽,邓玥,施凤宁,等.水库消落带研究进展[J].*湿地科学*,2019,17(6):689-696.
- Li Shanze, Deng Yue, Shi Fengning, et al. Research progress on water-level-fluctuation zones of reservoirs: A review [J]. *Wetland Science*, 2019,17(6):689-696.
- [9] Zhang Yiyan, Yang Yongjun, Chen Zanxu, et al. Multi-criteria assessment of the resilience of ecological function areas in China with a focus on ecological restoration [J]. *Ecological Indicators*, 2020,119:106862.
- [10] 陈忠礼,冯源,朱姿涵,等.水库消落带植物生态学研究热点:以三峡水库为例[J].*草业科学*,2024,41(8):1909-1923.
- Chen Zhongli, Feng Yuan, Zhu Zihan, et al. Review of research hotspots on plant ecology of the water level fluctuation zones of reservoirs: A case study of the Three Gorges reservoir [J]. *Pratacultural Science*, 2024,41(8):1909-1923.
- [11] Cui Junfang, Tang Xiangyu, Zhang Wei, et al. The effects of timing of inundation on soil physical quality in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges reservoir region, China [J]. *Vadose Zone Journal*, 2018,17(1):180043.
- [12] 李辉.基于3S技术的“后三峡时代”万州区生态敏感性评价研究[J].*资源开发与市场*,2018,34(2):160-165.
- Li Hui. Study on ecological sensitivity index in Wanzhou district of Three Gorges reservoir area based on “3S” technology [J]. *Resource Development & Market*, 2018,34(2):160-165.
- [13] 刘春霞,李月臣,杨华,等.三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J].*地理学报*,2011,66(5):631-642.
- Liu Chunxia, Li Yuechen, Yang Hua, et al. RS and GIS-based assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorges reservoir area of Chongqing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(5):631-642.
- [14] Yu Jie, Li Fengting, Wang Ying, et al. Spatiotemporal evolution of tropical forest degradation and its impact on ecological sensitivity: A case study in Jinghong, Xishuangbanna, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020,727:138678.
- [15] 张晓媛,李辉,周启刚,等.基于变异系数法的三峡库区消落带生态敏感性评价研究[J].*农业与技术*,2023,43(20):113-118.
- Zhang Xiaoyuan, Li Hui, Zhou Qigang, et al. Study on ecological sensitivity assessment of water-fluctuating zone in Three Gorges reservoir area based on variation coefficient method [J]. *Agriculture and Technology*, 2023,43(20):113-118.
- [16] 王成,刘秀华,刘勇,等.基于熵权物元模型的三峡库区生态敏感性评价[J].*西南大学学报(自然科学版)*, 2013,35(1):59-64.
- Wang Cheng, Liu Xiuhua, Liu Yong, et al. Evaluation of eco-environmental sensitivity in Three Gorges reservoir area based on the entropy-weighted matter-element model [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013,35(1):59-64.
- [17] Wu Xueling, Tang Shiyi. Comprehensive evaluation of ecological vulnerability based on the AHP-CV method and SOM model: A case study of Badong County, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,137:108758.
- [18] 陈红光,李晓宁,李晨洋.基于变异系数熵权法的水资源系统恢复力评价:以黑龙江省2007—2016年水资源情况为例[J].*生态经济*,2021,37(1):179-184.
- Chen Hongguang, Li Xiaoning, Li Chenyang. Resilience evaluation of water resource system based on coefficient of variation-entropy weight method: A case study of water resources in Heilongjiang Province from 2007 to

- 2016 [J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(1):179-184.
- [19] Zhang Zefang, Wang Changming, Lv Baohong. Comparative analysis of ecological sensitivity assessment using the coefficient of variation method and machine learning [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196(10):1000.
- [20] 李亦秋, 鲁春霞, 邓欧, 等. 流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区[J]. *生态学报*, 2014, 34(11):3081-3089.
Li Yiqiu, Lu Chunxia, Deng Ou, et al. Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11):3081-3089.
- [21] 解阳阳, 王义民, 黄强. 龙羊峡水库年末水位控制与汛期弃水研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(1):223-227.
Xie Yangyang, Wang Yimin, Huang Qiang. Year-end water level control and water discharge in flood season for Longyangxia reservoir [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(1):223-227.
- [22] 侯素珍, 王平, 郭彦, 等. 龙羊峡水库水沙调控特征分析[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(6):151-156.
Hou Suzhen, Wang Ping, Guo Yan, et al. Analysis of water and sediment regulation of Longyangxia reservoir [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(6):151-156.
- [23] 尚可政, 杨德保, 王式功, 等. 黄河上游水电工程对局地气候的影响[J]. *干旱区地理*, 1997, 20(1):57-64.
Shang Kezheng, Yang Debao, Wang Shigong, et al. Influence of water conservancy and power projects on local climate at upper reaches of the Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 1997, 20(1):57-64.
- [24] 张蕴潇, 孙紫英. 基于 3S 技术内蒙古水土保持普查土壤侵蚀模型建立及参数提取[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(4):108-112.
Zhang Yunxiao, Sun Ziyang. Establishing the Inner Mongolia soil erosion model of soil and water survey and extracting parameters based on 3s [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2012, 33(4):108-112.
- [25] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5):381-383.
- [26] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2):19-24.
Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(2):19-24.
- [27] 吴媚, 顾赛赛. 变异系数的统计推断及其应用[J]. *铜仁学院学报*, 2010, 12(1):139-141.
Wu Mei, Gu Saisai. The statistical inference of variation coefficient of sample and its applications [J]. *Journal of Tongren University*, 2010, 12(1):139-141.
- [28] 张静, 秦公伟, 苏雪萌, 等. 秦巴山片区生态敏感性评价及地形梯度特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5):332-342.
Zhang Jing, Qin Gongwei, Su Xueming, et al. Evaluation of ecological sensitivity and its topographic gradient characteristics in Qinling-Bashan Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5):332-342.
- [29] 李月臣, 刘春霞, 汪洋, 等. 重庆市生境敏感性评价研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 26(1):30-34.
Li Yuechen, Liu Chunxia, Wang Yang, et al. The analysis of the sensitivity of bio-inhabitation in Chongqing [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2009, 26(1):30-34.
- [30] Chen Guoxiong, Zhao Jiecai, Zhao Xin, et al. A psammophyte *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq. A potential food crop [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2014, 61(3):669-676.
- [31] Bendix J, Hupp C R. Hydrological and geomorphological impacts on riparian plant communities [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(16/17):2977-2990.
- [32] 张羲, 于一雷, 李胜男, 等. 南水北调北京段大宁水库消落带植被分布特征及多样性[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(4):40-49.
Zhang Yi, Yu Yilei, Li Shengnan, et al. Vegetation distribution and diversity in the water-level-fluctuation zone of Daning reservoir, Beijing section, middle route of the south-to-north water diversion [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(4):40-49.
- [33] Liu Muxing, Du Wenzheng, Zhang Hailin. Changes of preferential flow path on different altitudinal zones in the Three Gorges reservoir area, China [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(2):177-188.
- [34] Lu Zhijun, Li Lianfa, Jiang Mingxi, et al. Can the soil seed bank contribute to revegetation of the drawdown zone in the Three Gorges reservoir region? [J]. *Plant Ecology*, 2010, 209(1):153-165.
- [35] 涂怡, 陈虎, 尹雯, 等. 湖北省清江流域土壤侵蚀时空变化及影响因子研究[J]. *湖北民族大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(4):593-600.
Tu Yi, Chen Hu, Yin Wen, et al. Study on spatial and temporal changes of soil erosion and influencing factors in Qingjiang River basin of China's Hubei Province [J]. *Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition)*, 2024, 42(4):593-600.