

基于 SRP 模型的高原河流裂腹鱼产卵场生境脆弱性分析

张雨祯¹,姚凡¹,杨晓波¹,夏豪²,常理²,安瑞冬¹

(1. 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司)

摘要:以澜沧江上游支流色曲和麦曲中两个天然状态下的裂腹鱼类产卵场为研究区,以鲤科裂腹鱼属的澜沧裂腹鱼和光唇裂腹鱼为保护对象,构建敏感性-恢复力-压力度(SRP)模型评价指标体系,结合高分辨率遥感影像,综合分析了枯水年与丰水年产卵场生境脆弱性的时空特征;进一步将生境脆弱性指数与各评价指标值计算结果作为 LightGBM 的输入,再引入 SHAP 增强模型的可解释性,分析了生境脆弱性的驱动因素。结果表明:研究区生境脆弱性整体处于微度脆弱水平,但在不同水文年存在差异,色曲产卵场枯水年的平均生境脆弱性指数为 0.27,丰水年为 0.38;麦曲产卵场枯水年的平均生境脆弱性指数为 0.27,丰水年为 0.23;生境脆弱性指数在空间上呈岸滩高、中心低的分布格局,具有显著的空间聚集特性;水深的重要性占比为 48.2%,是影响生境脆弱性的主要因素。
关键词:裂腹鱼类产卵场;高原河流;生境脆弱性;SRP 模型;澜沧江上游

Analysis of habitat vulnerability of Schizothoracine spawning grounds in plateau rivers based on SRP model// Zhang Yuzhen¹, Yao Fan¹, Yang Xiaobo¹, Xia Hao², Chang Li², An Ruidong¹ (1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University; 2. Guiyang Engineering Corporation Limited, POWERCHINA)
Abstract: Taking two natural schizothoracine spawning grounds in the Sequ and Maiqu rivers, tributaries of the upper Lancang River, as the study areas, and *Schizothorax lantsangensis* and *Schizothorax lissolabiatu*s of the genus *Schizothorax* (Cyprinidae) as protected targets, an evaluation indicator system for the sensitivity-resilience-pressure (SRP) model was established. Combined with high-resolution remote sensing images, the spatiotemporal characteristics of habitat vulnerability of spawning grounds in dry and wet years were comprehensively analyzed. Furthermore, the habitat vulnerability index and calculated values of each evaluation indicator were used as inputs for the LightGBM model, and SHAP was introduced to improve model interpretability to identify driving factors of habitat vulnerability. The results show that the overall habitat vulnerability in study area is at slight vulnerability level, with differences observed across hydrological years. The average habitat vulnerability index of the spawning ground in the Sequ River is 0.27 in dry years and 0.38 in wet years; the average habitat vulnerability index of the spawning ground in the Maiqu River is 0.27 in dry years and 0.23 in wet years. Spatially, the habitat vulnerability index presents a distribution pattern of high values along riverbanks and low values in river channel center, exhibiting obvious spatial agglomeration. Water depth is the dominant factor affecting habitat vulnerability, with an importance contribution of 48.2%.
Key words: Schizothoracine fish spawning grounds; plateau rivers; habitat vulnerability; SRP model; the upper Lancang River

澜沧江上游西藏段位于青藏高原东南缘,水力资源蕴藏丰富^[1];然而该地区生产力低下,河段河道比降较大,生态系统结构简单,使其在遭受扰动时表现出高敏感性与低恢复力,生态环境十分脆弱^[2-3]。近年来,随着局部人类活动的影响,干流重要鱼类产卵场的生境条件发生改变,可能导致部分

区域不再适宜鱼类产卵,从而威胁了特有鱼类种群的延续^[4]。
生境脆弱性是栖息地在面对外部环境干扰时,易发生结构失衡、功能退化及其难以恢复的特性,反映了栖息地对环境变化的敏感程度及自我修复能力的强弱^[5],是评估生态系统稳定性和制定保护策略

基金项目:中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ22-H108);贵州省第八批高层次(“百”层次)创新型人才遴选培养计划项目(黔科合平台人才-GCC[2023]103)
作者简介:张雨祯(2000—),女,硕士研究生,主要从事生态水力学研究。E-mail:892977347@qq.com
通信作者:安瑞冬(1983—),男,研究员,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:anruidong@scu.edu.cn

的重要依据^[6-7]。现有脆弱性评价框架包括压力-状态-响应 (pressure-state-response, PSR) 模型^[8]、暴露-敏感-适应 (vulnerability scoping diagram, VSD) 模型^[9]、敏感性-恢复力-压力度 (sensitivity-resilience-pressure, SRP) 模型^[10]等,在陆地生态系统和较大空间尺度的应用中取得了丰富成果。当前水生态系统脆弱性研究多围绕物种、种群层面展开,群落尺度相关分析较为稀缺,针对栖息地、河段微生境单元开展的生境脆弱性量化研究尤为不足。国外相关研究多以气候变化为胁迫因子,评价指标涵盖水文气象 (流量变异、枯丰水期发生频率、水温)、化学及生物 (物种丰度、生物多样性、关键生活史阶段) 等指标^[11],且评价赋值多采用打分法、经验赋值法确定,一定程度上降低了研究结果的客观性与可比性。现有研究高度依赖大量野外调查与长期监测数据,在资料匮乏流域、偏远河段难以实施,限制了生境脆弱性评价在不同地区的推广。例如,Smith 等^[12]分别根据冷水鱼栖息地和河岸廊道的暴露度、敏感性和适应能力,构建美国西南部 3 个流域冷水鱼类栖息地及河岸廊道生境脆弱性评估框架,结果表明,冷水鱼类栖息地整体脆弱性高于河岸廊道,但该类研究

在裂腹鱼类产卵场中的应用仍有待拓展。

高原山区河流普遍存在河床地形、长时序水文资料短缺等难题,而遥感技术凭借其大范围同步观测、周期性重复获取数据以及不受地面条件限制等优势,可在空间尺度和时间尺度上有效补充实测数据的不足^[13]。基于此,本文利用高分辨率遥感影像,选取澜沧江上游色曲、麦曲两大支流上两个已知裂腹鱼类产卵场为研究区,采用 SRP 模型构建了适用于高原河流鱼类产卵场的生境脆弱性评价指标体系,分析枯水年和丰水年研究区生境脆弱性特点,并借助 LightGBM-SHAP 可解释机器学习模型分析生境脆弱性的驱动因素,以期为理解高原河流鱼类产卵场的自然生境脆弱性演变规律提供案例支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(图 1)是经调查确定的两个已知鱼类产卵场,位于人类活动强度极低的近自然状态区段,且在水文节律、水环境和物种分布上与干流具有相似性,具有良好的代表性。研究区海拔均在 3 000 m 以上,每年 10 月至次年 4 月为旱季,5—9 月进入雨

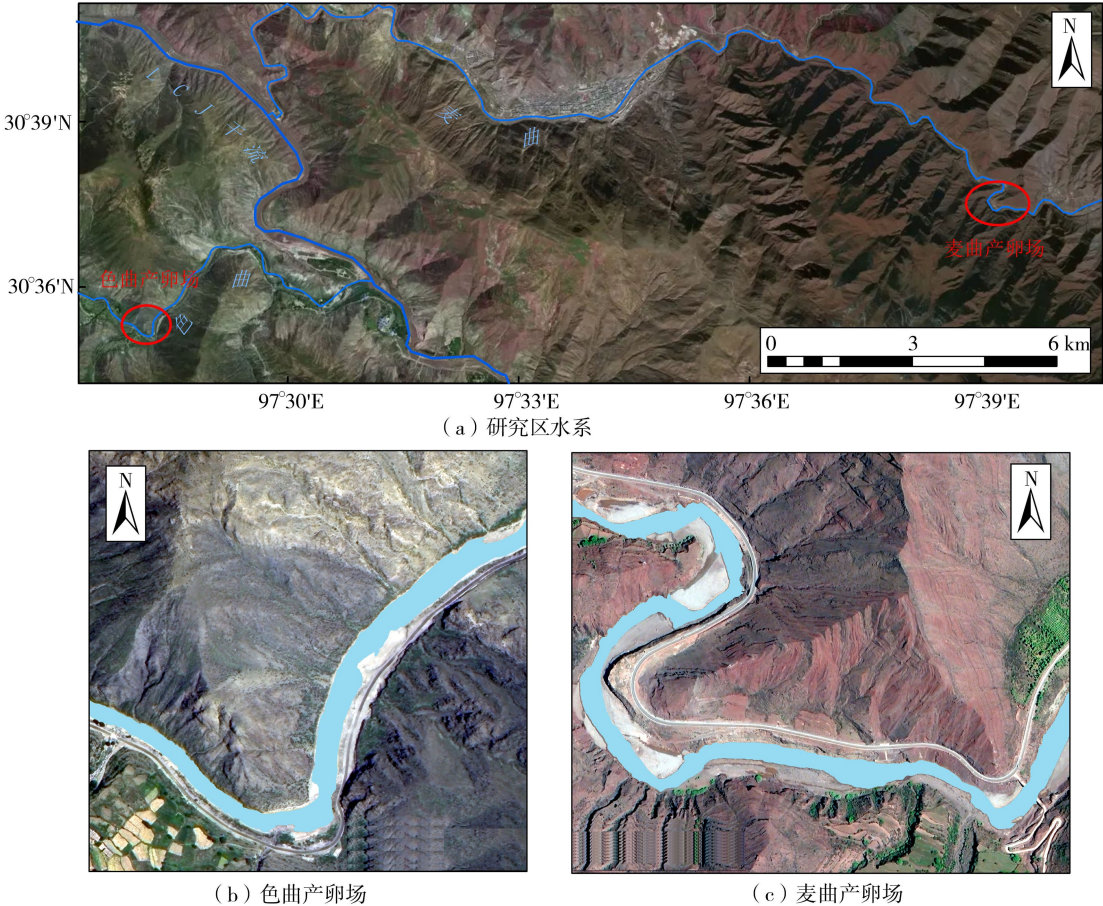


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

季,年降水量 400~600 mm。

研究对象澜沧裂腹鱼和光唇裂腹鱼均属底栖性鱼类,产出黏沉性鱼卵,其中澜沧裂腹鱼是澜沧江特有鱼类,被《中国物种红色名录》列入濒危物种,光唇裂腹鱼为易危物种。两类鱼类产卵期均为 4—7 月。

1.2 数据来源

数据主要提取自典型枯水年和丰水年鱼类产卵期研究区的遥感影像,水深数据提取自“吉林一号”高分 03D01 星和宽幅 01A 星遥感影像,分辨率为 0.75 m;叶绿素 a 质量浓度数据提取自 Sentinel-2 系列卫星遥感影像,分辨率为 10 m;表面温度和水面面积提取自 Landsat 8 遥感影像,分辨率为 30 m。以上所有数据已通过 ArcGIS 统一投影坐标系 WGS_1984_UTM_Zone_47N,分辨率统一为 1 m。底质数据来自 2024 年 4 月的实地调查,在色曲、麦曲两个产卵场河段共进行了 33 个监测点的测量,在每个监测点拍摄带有标尺的底质照片,如图 2 所示。

1.3 生境脆弱性指标体系构建

SRP 模型从栖息地的敏感性、恢复力与压力度

3 个维度揭示了生境脆弱性的形成机制,适用于结构不稳定、易受干扰区域的生境评价。相比其他方法,该模型更注重生态系统内部特性的刻画,并能有效反映外部扰动的影响。本文采用 SRP 模型,以生境脆弱性的内涵为基础^[14-15],结合目标鱼类的需求,构建适用于生境脆弱性的评价指标体系,如表 1 所示。

a. 敏感性:反映生态系统对内外部扰动的响应速度与幅度,及其发生结构功能变化或产生生态问题的潜在可能性^[11]。生态系统的敏感性越高,其稳定性越差,生境越脆弱。在天然的水文气象条件下,鱼类产卵栖息地的水深、流速、水温 and 水质等要素随季节与年际变化而波动,这些波动构成了系统本底扰动;流域内水利工程的建设可通过调节水文节律,放大或缓和该扰动。

b. 恢复力:指生态系统在扰动强度不超出其阈值时,自我调节与恢复至平衡态的能力。恢复力越低,抵御外部干扰的能力越差,生境越脆弱。对于鱼类产卵场而言,其恢复力与自身生境的质量及功能

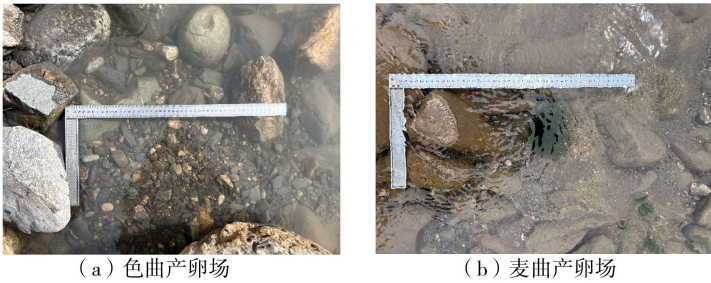


图 2 色曲和麦曲产卵场河流底质情况

Fig. 2 River substrate conditions of spawning grounds in the Sequ and Maiqu rivers

表 1 生境脆弱性评价指标体系

Table 1 Indicator system for habitat vulnerability assessment

准则层	指标层	生态学意义	计算方法及说明	指标评价依据	权重
敏感性	水深	为鱼类提供适当的活动空间,为鱼卵提供适宜的孵化环境	参考 Legleiter ^[16] 的 CAR 方法,用高分辨率遥感影像反演	根据目标鱼类水深适宜性曲线判断	0.337 0
	水温	促进性腺发育与成熟,激发产卵行为 ^[17]	使用 Landsat 8 热红外波段反演	根据目标鱼类水温适宜性曲线判断	0.381 8
	叶绿素 a 质量浓度	叶绿素 a 质量浓度是食物资源丰度的重要指示因子	参考 Gurlin 等 ^[18-19] 的两波段算法	负向	0.005 9
	底质	砾石间隙为鱼卵提供庇护与氧气交换条件 ^[20]	对实地调查带标尺的底质照片进行 Python 图像识别,统计其粒径组成	根据与已知裂腹鱼产卵场的相似性判断 ^[21-22]	0.000 5
恢复力	植被覆盖度	河岸带植被能净化水环境、供给养分,为水生生物提供生态屏障	由遥感影像归一化植被指数估算得到,表征地表植被覆盖程度 ^[13]	负向	0.066 6
	栖息地斑块的香农多样性指数	深潭和浅滩为鱼类提供了繁殖和避难场所,其交替分布体现了生境的多样性 ^[23]	由各生境类型面积占比及其对数值计算得到	负向	0.052 9
	栖息地连通性	栖息地斑块之间良好的连通性有利于鱼类完成各项生命活动	由相邻生境斑块面积占比计算得到,表征栖息地间的连通水平 ^[24]	负向	0.000 9
压力度	水面面积变化	反映水文变化节律	基于 Landsat 卫星统计多年水面面积数据	百分位法结合概率分布识别适宜范围 ^[25]	0.127 9
	栖息地破碎度	反映栖息地的完整性	由各栖息地斑块面积占比计算得到 ^[24]	正向	0.026 4

存在紧密关联。

c. 压力度:反映外部干扰强度及其对生态系统结构与功能的潜在破坏力。生态系统面临的压力增加,其潜在的脆弱程度也随之上升,当外部干扰强度超出其生态阈值时,环境较易发生突变和退化。多数研究中,该压力来源于气候变化和人类活动,但本文研究区人类干扰微弱,水文条件的天然波动成为系统的主要压力源。

1.4 目标鱼类产卵场适宜生境

鱼类产卵场需要满足繁殖个体对水动力、水温、底质的需求,提供足够的养分和丰富的生境类型,且栖息地斑块之间具有较好的连通性。澜沧裂腹鱼和光唇裂腹鱼的水深适宜范围为 0.2~4.5 m,偏好范围为 0.5~1 m^[26-27];澜沧裂腹鱼繁殖适宜水温需求范围为 9~15℃。本文使用的水深和水温适宜性曲线由相关研究资料^[27-28]综合确定,如图 3 所示。

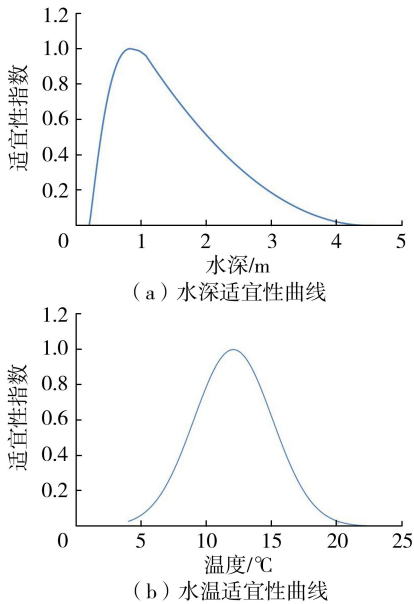


图3 目标鱼类水深与水温适宜性曲线

Fig. 3 Suitability curves of water depth and temperature for target fish

对于以刮食藻类为主的鱼类而言,水体中较高的叶绿素 a 质量浓度表明藻类资源较丰富,能为鱼类提供更充足的食物来源^[29]。研究区为已知的目标鱼类产卵场,叶绿素 a 质量浓度应在合理范围内,其质量浓度越高,产卵场生境越适宜。

目标鱼类多于水流平缓的砾石底浅滩产卵,受精卵落至砾石缝隙内,经水流冲刷刺激完成孵化。参照其他裂腹鱼类栖息地底质粒径组成,判别研究区底质适宜性。荣义峰等^[21]对裂腹鱼亚科的青海湖裸鲤产卵场底质进行了取样调查,发现小型、中型、大型卵石占比与非产卵场差异较大;Bai 等^[22]调查了澜沧裂腹鱼栖息地的底质组成。本文采用线性

回归分析法,建立两地底质类型占比的对应关系并进行回归拟合,当两地底质类型占比基本一致且整体变化趋势吻合良好时,则表明二者底质组成相似度较高^[30]。

河岸带植被可以减缓径流对河岸的冲刷,为鱼类提供生态屏障;深潭和浅滩则起到水流调节与水质净化的作用,其交替分布形成了复杂多样的生境,鱼类更倾向于在深潭、浅滩较密集的河段产卵^[23];栖息地斑块须具备足够的面积和连通性,鱼类才有足够的生存空间。因此将植被覆盖度、栖息地斑块的香农多样性指数和连通性作为生境脆弱性负向指标,栖息地破碎度为正向指标。

由于研究区为已知鱼类产卵场,其适宜性应处在良好状态,因此利用百分位法结合概率分布进行水面面积适宜性阈值的计算。将近 20 年产卵期水面面积数据进行正态分布拟合,利用概率密度函数分析各百分位点所对应的概率密度范围,从统计角度识别最可能出现的高适宜性区段。以色列产卵场为例,如图 4 所示,以 90%置信区间为参考,选取概率密度为 0.05 以上的水面面积范围为适宜范围,将水面面积累计概率分布的 25%~75% 定义为偏好范围。

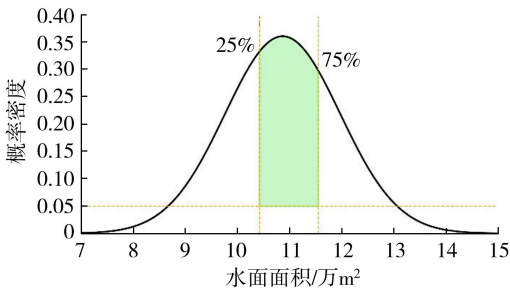


图4 色曲产卵场水面面积阈值

Fig. 4 Suitability threshold for water surface area of spawning grounds in the Sequ River

1.5 生境脆弱性评价与指标权重计算

鉴于生境脆弱性评价各指标的数据来源与表征特征差异显著,为规避主观赋权带来的偏差,选取熵权法客观量化各评价指标的实际信息贡献度。该方法依托信息论熵概念,利用各评价指标数据变异程度确定权重,适用于样本量相对充足、各评价指标内部差异明显的研究场景。评价指标值的差异越大,提供的信息量越多,对应熵值越低、权重越大。

为验证熵权法的适用性,计算各指标的变异系数,多数指标变异系数大于 0.2,说明各指标差异较显著,满足熵权法对数据的要求。计算各指标的方差膨胀因子(VIF),所有指标 VIF 小于 10,表明不存在多重共线性风险。

指标权重计算结果如表 1 所示。水深、水温权

重较高,反映出水动力条件对鱼类生境脆弱性的重要影响。将各指标标准化后的值进行线性加权组合,得到生境脆弱性指数 x ,其取值范围为 $[0,1]$:

$$x = \sum_{j=1}^m w_j Z_j \tag{1}$$

式中: w_j 为熵权法权重; Z_j 为指标 j 标准化值。

采用自然断点法对生境脆弱性指数计算结果进行分级,该方法可最大化类别间差异,减少组内异质性,已在生境脆弱性评估中广泛应用,分级结果见表 2。

1.6 空间自相关分析

为揭示生境脆弱性指数在空间上的分布格局及聚集特性,引入空间自相关分析方法^[29],其核心假设为地理学第一定律^[31],即空间上相近的事物比距离远的事物更相似,可用于分析生境脆弱性在不同空间单元间是否具有相关性。

分别采用全局空间自相关与局部空间自相关开展分析。其中,全局空间自相关用于衡量整个研究区数据的空间分布是否存在整体聚集或分散趋势,反映数据在全局尺度上的空间依赖性;局部空间自相关用于识别研究区每个位置的属性值与相邻位置的关联程度,定位具体的热点、冷点或异常值。

基于 ArcGIS 10.6 实现全局和局部莫兰指数的计算和可视化,全局空间自相关分析输出全局莫兰指数(Global Moran’s I)、 Z 值和 p 值。其中,全局莫兰指数用于衡量研究区整体空间自相关程度,其值越接近 1,表示空间正相关越强;越接近-1,表示空间负相关越强;接近 0 则表明空间分布近似随机。 Z 值为标准化检验统计量,用于衡量空间自相关偏离随机分布的程度,绝对值越大说明空间聚集或离散特征越显著; p 值为显著性检验概率,用于判断空间自相关是否具有统计学意义。

采用局部空间自相关分析识别研究区局部空间聚集特征,获取每个评价单元的局部莫兰指数值、 Z 值和 p 值。局部莫兰指数为正说明同类值存在空间聚集,为负说明异类值倾向邻近,近似于 0 则表示空间分布近似随机。当 $Z>0$ 且 $p<0.05$ 时,表示该单元及其邻域均为高值区域,形成显著的高-高聚集

区;当 $Z<0$ 且 $p<0.05$ 时,表示该单元为低值且邻域也为低值,形成显著的低-低聚集区。

1.7 生境脆弱性影响因素

轻量级梯度提升机(light gradient boosting machine, LightGBM)是一种高效的梯度提升决策树(GBDT),相比传统 GBM 或 XGBoost,LightGBM 引入了梯度单边采样(GOSS)和互斥特征绑定(EFB)等优化技术,在分类和回归任务中均表现出色,尤其适合用于生态环境、大数据预测等需要快速建模与实时更新的场景^[32-33]。本文在构建模型时,将数据按 80%、10%、10%划分为训练集、验证集和测试集。

SHAP(SHapley additive exPlanations)是一种基于合作博弈论中 Shapley 值原理的模型可解释性方法,其目标在于量化每个输入特征对模型预测结果的边际贡献^[34]。SHAP 通过比较包含与不包含某特征两种情况模型输出的差异,计算该特征在所有可能特征组合中的平均贡献值——Shapley 值,以此评估该特征的重要性的影响方向。SHAP 解释模型能够将原本不透明的机器学习模型输出转化为可量化的特征贡献值,从而显著提升模型的可解释性^[35]。将 LightGBM 与 SHAP 相结合(LightGBM-SHAP 模型),获得各生境脆弱性驱动因子的相对重要性排序,实现对各评价指标影响程度的深入分析。

2 结果与分析

2.1 各评价指标模拟结果

表 3 为研究区枯水年和丰水年各评价指标均值。

2.1.1 水深反演结果

选取鱼类产卵期(5—8 月)典型时相“吉林一号”卫星遥感影像反演水深,结果显示,色曲产卵场枯水年(8 月)的水深范围为 0~4.16 m,丰水年(7 月)为 0~5.24 m;麦曲产卵场枯水年(5 月)的水深范围为 0~4.70 m,丰水年(8 月)为 0~5.59 m。具体水深分布见图 5。

2.1.2 底质统计结果

根据 2024 年 4 月在研究区附近河流实地拍摄的带标尺图片对其底质粒径组成进行统计分析,粒

表 2 生境脆弱性分级结果及各等级面积占比

Table 2 Classification results of habitat vulnerability and area proportion of each grade

生境脆弱性分级	生境脆弱性指数	色曲产卵场各等级面积占比/%		麦曲产卵场各等级面积占比/%	
		枯水年	丰水年	枯水年	丰水年
潜在脆弱	0~<0.15	11.75	0.77	30.25	48.47
微度脆弱	0.15~<0.28	53.73	27.75	30.48	20.77
轻度脆弱	0.28~<0.37	13.60	31.54	7.69	5.82
中度脆弱	0.37~<0.51	11.91	13.53	26.64	23.29
重度脆弱	0.51~1	9.00	26.40	4.94	1.65

表 3 枯水年和丰水年各评价指标均值

Table 3 Mean values of each indicator in dry and wet years

研究区域及水文时期	水深/m	水温/℃	叶绿素 a 质量浓度/(μg/L)	底质	植被覆盖度	栖息地斑块的香农多样性指数	栖息地连通性	水面面积变化	栖息地破碎度
色曲枯水年	0.66	16.20	0.58	0.84	0.55	0.34	0.18	0.91	0.17
色曲丰水年	0.77	17.06	0.61	0.84	0.59	0.34	0.30	0.52	0.06
麦曲枯水年	0.71	14.66	0.63	0.85	0.64	0.47	0.20	0.94	0.09
麦曲丰水年	0.72	13.98	0.64	0.85	0.44	0.45	0.16	0.66	0.08

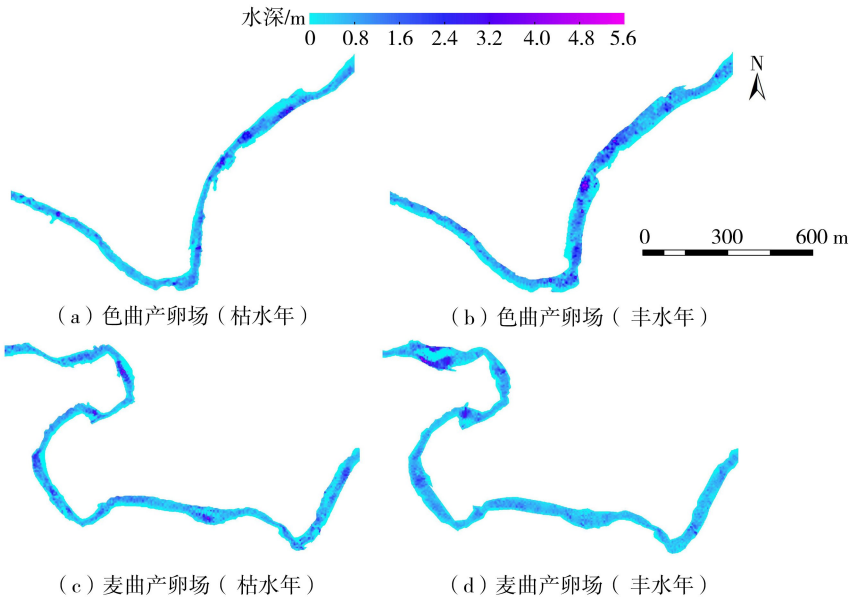


图 5 色曲和麦曲产卵场水深

Fig. 5 Water depth of spawning grounds in the Sequ and Maiqu rivers

径分布情况为:①大型卵石(>256.00 mm),色曲、麦曲占比分别为 1.74%、3.05%;②中型卵石(64.10~256.00 mm),色曲、麦曲占比分别为 28.33%、32.14%;③小型卵石(16.10~64.00 mm),色曲、麦曲占比分别为 30.69%、43.32%;④砾石(2.10~16.00 mm),色曲、麦曲占比分别为 35.28%、15.40%;⑤沙、泥和黏土(<2.00 mm),色曲、麦曲占比分别为 3.96%、6.09%。

色曲、麦曲产卵场的底质类型都以小型卵石、中型卵石和砾石为主,整体符合裂腹鱼类产卵需求。将研究区底质类型占比与其他 3 个裂腹鱼栖息地底质数据进行线性回归拟合,结果如图 6 所示,底质结

构整体具备较好的相似性,但存在拟合度较低的个别样本,可能与研究区、各产卵场生态条件的区域差异,生境质量及样本数量有限等因素有关。综合 3 组回归拟合结果,色曲产卵场底质相似度为 0.84,麦曲为 0.85。

2.2 生境脆弱性评价

2.2.1 空间分布特征

根据研究区生境脆弱性计算结果,色曲和麦曲产卵场生境脆弱性相应等级面积占比如表 2 所示,各生境脆弱性等级在研究区的分布如图 7 所示。

色曲产卵场生境脆弱性指数为 0.09~0.71,枯水年和丰水年均值分别为 0.27、0.38。枯水年产卵

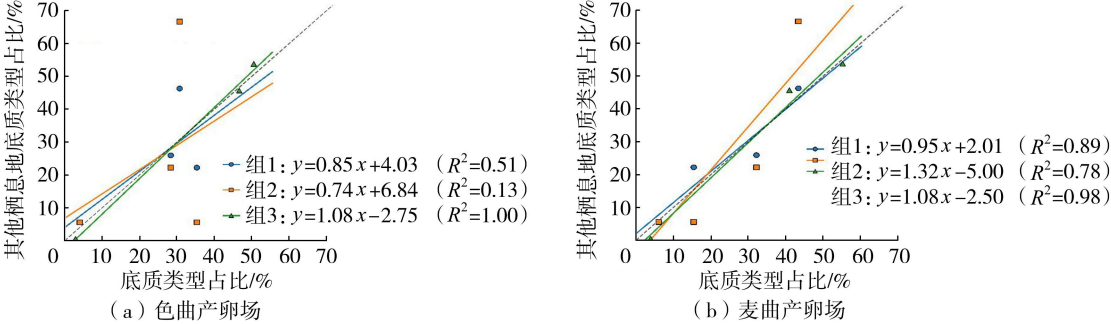


图 6 色曲和麦曲产卵场底质相似性

Fig. 6 Substrate similarity of spawning grounds in the Sequ and Maiqu rivers

潜在脆弱 微度脆弱 轻度脆弱 中度脆弱 重度脆弱

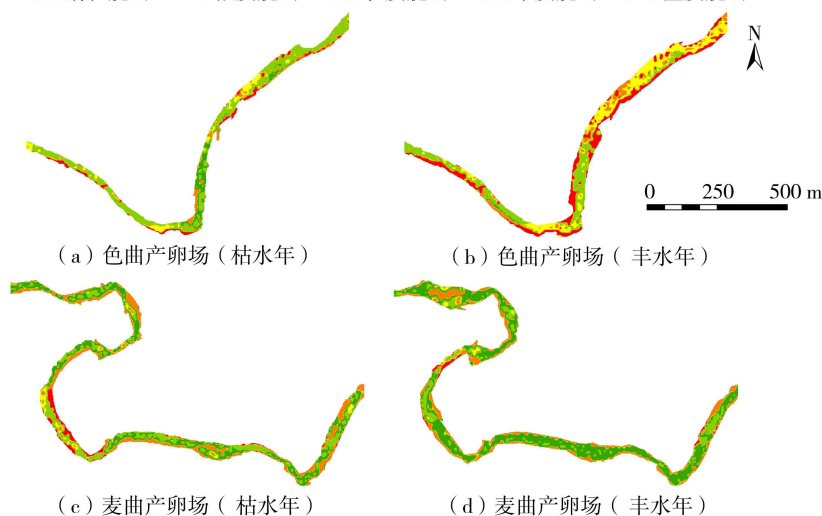


图 7 色曲和麦曲产卵场生境脆弱程度

Fig. 7 Distribution of habitat vulnerability degree of spawning grounds in the Sequ and Maiqu rivers

场生境总体处在微度脆弱状态,丰水年脆弱程度增加,潜在和微度脆弱区面积减少了约 37%,脆弱性较高的区域面积扩大,重度脆弱区面积增加了 17.4%。

麦曲产卵场生境脆弱性指数为 0.04~0.66,枯水年和丰水年的平均值分别为 0.27、0.23。枯水年产卵场生境总体处在微度脆弱状态,潜在、微度脆弱区面积达产卵场总面积的 60.5%;丰水年脆弱程度降低,重度、中度、轻度脆弱区的面积均有所减少,共减少 8.5%,潜在脆弱区面积占比则增加了 18.2%。

2.2.2 空间自相关分析

枯水年和丰水年色曲产卵场的全局莫兰指数分别为 0.69、0.76, Z 值分别为 860.06、469.57;麦曲

产卵场的全局莫兰指数分别为 0.87、0.84, Z 值分别为 513.75、820.12,且 p 值均小于 0.01,表明生境脆弱性在空间上呈现较强的正自相关,说明该空间聚集模式极为显著。

对色曲和麦曲产卵场的生境脆弱性进行局部空间自相关分析,其 LISA 聚类图如图 8 所示,其空间聚集类型均以高-高聚集、低-低聚集为主,高-高聚集区主要分布在河岸带、边滩、心滩等处,且其分布与生境脆弱性较高的区域基本重合,低-低聚集区则与生境脆弱性较低区域的空间分布基本吻合。

2.3 生境脆弱性的驱动因素

为了研究各评价指标对生境脆弱性的影响,以生境脆弱性为因变量,9 个评价指标为自变量,利用

空间聚集类型 不显著 高-高聚集区 高-低聚集区 低-高聚集区 低-低聚集区

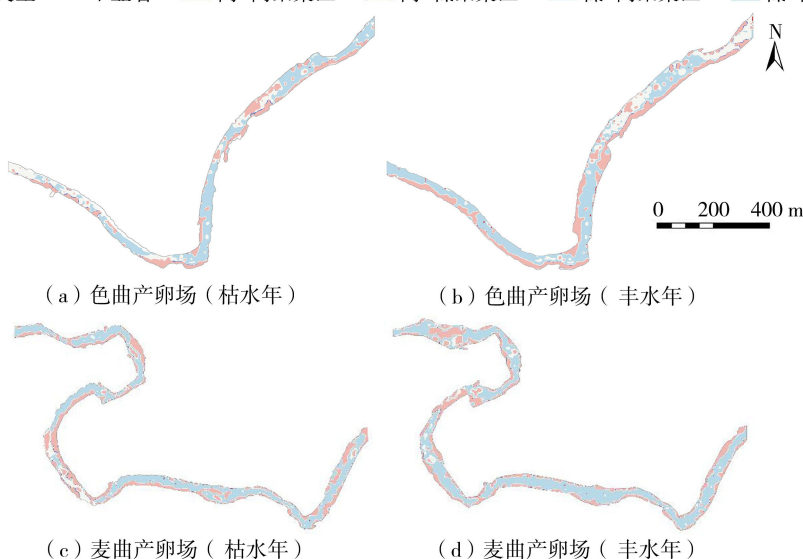


图 8 色曲和麦曲产卵场生境脆弱性局部空间自相关 LISA 聚类图

Fig. 8 LISA cluster map of local spatial autocorrelation for habitat vulnerability of spawning grounds in the Sequ and Maiqu rivers

LightGBM-SHAP 模型分析生境脆弱性的影响因素及各因素的重要性。

SHAP 分析结果显示,水深和水温对产卵场生境脆弱性影响最大,重要性占比分别为 48. 2%、23. 9%;栖息地破碎度、连通性和斑块的香农多样性指数影响次之,重要性占比分别为 8. 2%、6. 9%、6. 7%。叶绿素 a 质量浓度和水面面积变化的重要性占比不到 1%,对生境脆弱性的影响最小。

图 9 为各评价指标的 SHAP 蜂群图,每个点代表一个样本的指标值及其对生境脆弱性的贡献方向和大小。

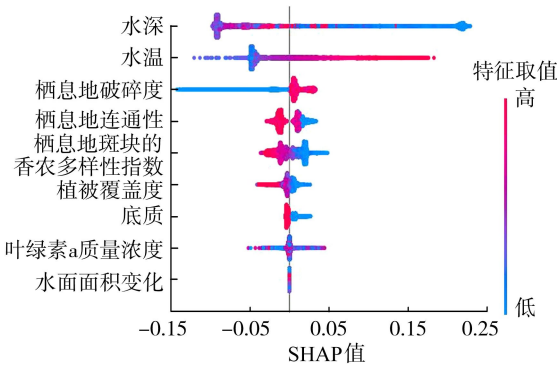


图 9 基于 SHAP 值的蜂群图

Fig. 9 Bee swarm plot based on SHAP values

当 SHAP 值小于 0 时该指标对生境脆弱性产生

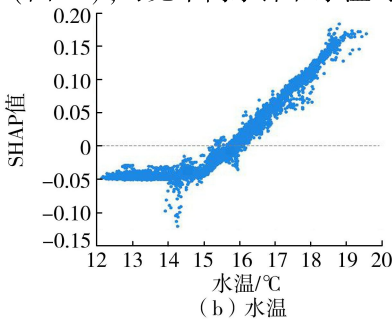
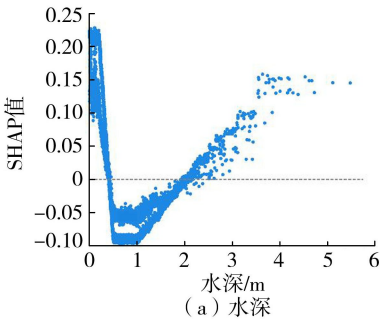


图 10 水深和水温的 SHAP 依赖图

Fig. 10 SHAP dependence plots of water depth and water temperature

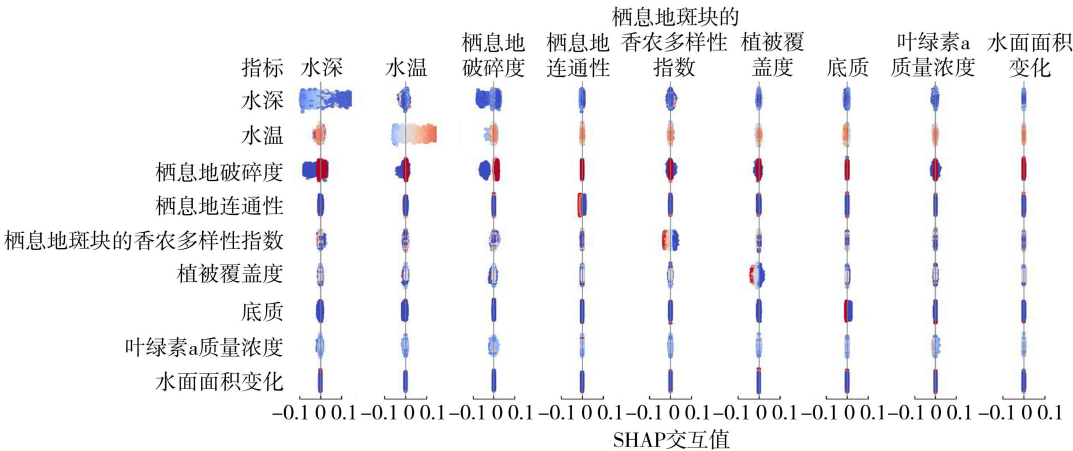


图 11 各评价指标交互作用

Fig. 11 Interaction effect of each evaluation indicator

负向贡献,SHAP 值大于 0 时则为正向贡献。可见,生境脆弱性指数与水深关系较为复杂,水深过高或过低均会导致生境脆弱程度加剧。同时,栖息地破碎度越高,研究区生境脆弱程度越高;相反,栖息地连通性、栖息地斑块的香农多样性指数、植被覆盖度及底质与生境脆弱性呈负向关系,提升栖息地连通性、增加生境多样性、提高植被覆盖或优化底质均可降低生境脆弱程度。叶绿素 a 质量浓度与水面面积两类指标,红蓝样本在 SHAP 值正负两侧分布较均匀,说明其对生境脆弱性的影响较小。

为进一步分析关键指标对生境脆弱性的影响规律,绘制水深和水温的 SHAP 依赖图(图 10)。图 10(a)显示,水深在 0.5~2 m 时对生境脆弱性有负向影响;水深大于 4 m 后,SHAP 值的变化趋于平缓,对生境脆弱性的贡献趋于稳定。由图 10(b)可知,水温对生境脆弱性有正向影响,SHAP 值随水温升高呈增大趋势;水温较低时 SHAP 值变化较平缓,水温高于 15℃ 后,SHAP 值上升速度加快,且在 16℃ 后 SHAP 值转为正值,表明水温超过该阈值后,产卵场生境脆弱程度显著加剧。

为进一步探究各评价指标耦合关系对研究区生境脆弱性的联合影响,绘制各评价指标交互作用图(图 11),可见中高水深和水温对生境脆弱性的影响

主要为负向作用,低水深和低水温的交互影响较弱;低水深和低栖息地破碎度的交互可缓解生境脆弱性,高水深与高栖息地破碎度的交互效应较弱或表现为正向作用;低水温与低栖息地破碎度的结合有利于降低生境脆弱性,较高水温和栖息地破碎度的交互效果仍不明显。

3 讨 论

a. 滩地通常处于水流浅、受水位波动和洪水冲刷影响显著的位置。浅水环境有利于鱼类上溯产卵,同时可提升鱼卵溶氧交换效率,但同时也伴随着水位变动大、流速和剪切力剧变、沉积物重构迅速的风险,易导致卵床底质孔隙结构频繁变化,从而降低鱼卵附着的稳定性,干扰孵化阶段氧气流通条件^[36]。

b. 尽管砾石浅滩常被认为是裂腹鱼类等砾石产卵鱼的重要栖息结构,但底质稳定程度直接决定了鱼卵的存活效率。Jaeger 等^[37] 研究显示,砂、粉泥等细颗粒沉积物进入砾石孔隙并堵塞,可能会大幅提升鱼卵与幼体的死亡率。滩地因受上、下游沉积物输入、频繁冲刷与再沉积过程的影响,更易产生细颗粒入侵或砾石结构重构情形。

c. 空间自相关分析结果表明,生境脆弱性存在显著空间连片分布特征,滩地附近出现显著的高-高聚集,说明该区域生境整体处于同步高风险状态。从生态保护与管理视角看,识别滩地高脆弱区具备实践指导价值:从生态管护角度而言,管控工作应优先关注并监测连片的高脆弱性区域,而非分散单点,因该类区域构成了潜在的系统性风险源,其既可能是鱼类产卵的关键场所,也可能在遭遇突发水文、沉积扰动时成为关键风险点。建议在该类高脆弱性聚集区部署水深、水温、底质颗粒监测断面,并在产卵季节保障适宜的生态流量、底质补给或淤积清理,通过适应性生态管理,缓解突发性水沙扰动对产卵生境的不利影响。

d. 水深是产卵场生境脆弱性变化的首要驱动因素,水深过高或过低均会加剧生境脆弱程度。陈明千等^[26] 研究证实,水深是鱼类产卵场最重要的几何形态指标,适宜的水深为底栖性鱼类完成繁殖行为提供了充足的活动空间,也为黏沉性鱼卵创造了适宜的孵化环境。然而过大的水深会增大水体压强,从而对黏沉性鱼卵的胚胎发育和仔鱼生长造成不利影响。鱼类在生长过程中对水温变化非常敏感,适宜的水温能促进性腺成熟及产卵活动,水温过低则会抑制繁殖行为并降低活动能力,导致其摄食量减少。澜沧裂腹鱼和光唇裂腹鱼属于冷水高原类

群,繁殖水温不宜过高,当夏季水温升高至 16℃ 后,光唇裂腹鱼停止繁殖^[38],与 SHAP 分析结果一致,即超过 16℃ 后水温上升会导致生境脆弱性加剧。

本文尚存在一些不足:①研究区地处高原山区,水深采用遥感反演方法估算,缺乏系统的实地监测资料验证,但该方法已被证实适用于数据匮乏地区的大范围估算^[16,39],且计算结果在空间分布上符合河道水文形态特征。②本文主要基于静态遥感指标构建脆弱性评价指标体系,未来可进一步结合水动力模拟与个体生物行为模型,揭示水文过程与鱼类生境响应之间的时序耦合机制,从而提升对栖息地生境脆弱性动态演变的解释力;同时,可考虑通过季节尺度或连续年份的监测数据,分析丰、枯水文条件变化下的生境恢复力差异,以完善 SRP 模型中恢复力的动态表征。③实际管理中,可依据生境脆弱性空间聚集特征,优先将高-高聚集区纳入生态修复重点区域,并在产卵季节实施生态流量调度,维持适宜的水深与水温条件,以确保鱼类活动与卵孵化环境的连续性。④可将脆弱性监测结果与流域生态红线划定相结合,建立高脆弱性预警区-生态修复优先区的分级管理体系,为高原河流鱼类保护提供量化支撑。

4 结 论

a. 研究区生境总体上处于微度脆弱状态,色曲产卵场枯水年和丰水年的生境脆弱性指数分别为 0.27、0.38,枯水年的脆弱程度较丰水年稍低;麦曲产卵场枯水年和丰水年的生境脆弱性指数分别为 0.27、0.23,丰水年的生境脆弱程度较丰水年稍低。这种差异可能与产卵场的河床地形及河岸形态有关。

b. 研究区生境脆弱性在空间上呈现河岸带边滩等滩地脆弱性较高(中度、高度脆弱),河道中心脆弱性较低(潜在、微度脆弱)的格局,并且有显著的空间聚集特性,高-高聚集区和低-低聚集区分别与高脆弱性区域和低脆弱性区域重合。

c. 水深和水温是研究区生境脆弱性的最主要驱动因素,重要性占比分别为 48.2%、23.9%;各驱动因素之间存在着一定的交互效应,可以放大或缓解生境脆弱性,体现了脆弱性变化的复杂性。

参考文献:

[1] 刘明典,朱峰跃,朱挺兵,等. 西藏水生生物资源与环境本底状况调查(2017—2021)[J]. 水产学报, 2025, 49(3): 116-139. (Liu Mingdian, Zhu Fengyue, Zhu Tingbing, et al. Status of aquatic organisms resources and their environments in Xizang from 2017 to 2021 [J]. Journal of Fisheries of China, 2025, 49(3): 116-139. (in

- Chinese))
- [2] 李志威,余国安,徐梦珍,等. 青藏高原河流演变研究进展[J]. 水科学进展,2016,27(4):617-628. (Li Zhiwei, Yu Guoan, Xu Mengzhen, et al. Progress in studies on river morphodynamics in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (4) : 617-628. (in Chinese))
 - [3] 陈文元. 高原山区河流水沙演变特征研究:以格尔木河为例[J]. 水资源开发与管理,2019(8):9-13. (Chen Wen Yuan, Study on water and sediment evolution characteristics of rivers in plateau mountainous areas: a case study of the Golmud River Basin [J]. Water Resources Development and Management, 2019 (8) : 9-13. (in Chinese))
 - [4] Wang Xin, Wang Peng, Deng Yu, et al. Impacts of cascade hydropower development on river ecosystem homeostasis: a review[J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131484.
 - [5] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100 (14) : 8074-8079.
 - [6] Zhang Jifei, Sun Jian, Ma Baibing, et al. Assessing the ecological vulnerability of the upper reaches of the Minjiang River[J]. Plos one, 2017, 12(7):e0181825
 - [7] 王晶,赵美茹,高紫妍,等. 京津冀水能粮生态系统脆弱性与经济韧性脱钩分析[J]. 水利经济, 2025, 43 (6) : 72-80. (Wang Jing, Zhao Meiru, Gao Ziyang, et al. Decoupling analysis of water-energy-food-ecology system vulnerability and economic resilience in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43 (6) : 72-80. (in Chinese))
 - [8] Hu Xiaolong, Ma Chao, Huang Peng, et al. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection: a case of Weifang City, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107464.
 - [9] Gong Jie, Jin Tao, Cao En, et al. Is ecological vulnerability assessment based on the VSD model and AHP-entropy method useful for loessial forest landscape protection and adaptative management? A case study of Ziwuling Mountain Region, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109379.
 - [10] Xu Min, Cao Cheng, Zhong Shuai, et al. Ecological vulnerability assessment and spatial-temporal variations analysis in typical ecologically vulnerable areas of China [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2024, 12: 1406444.
 - [11] Logez M, Bouraï L, Hette-Tronquart N, et al. Ecological vulnerability of aquatic ecosystems: a review [J]. Environmental Management, 2025, 75 (2) : 192-204.
 - [12] Smith D M, Friggens M M. Co-rodution of a vulnerability assessment for aquatic and riparian ecosystems in the southwestern United States [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2024, 60 (6) : 1293-1312.
 - [13] 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. Study on regional ecological vulnerability in plateau mountainous areas: a case study of Kangding City, Sichuan Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36 (3) : 206-215. (in Chinese))
 - [14] Dey C J, Tuononen E I, Hodgson E E, et al. What is habitat sensitivity? A quantitative definition relating resistance, resilience, and recoverability to environmental impacts [J]. Facets, 2024, 9: 1-9.
 - [15] 易雨君,丁航,叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价研究综述[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5) : 1-10. (Yi Yujun, Ding Hang, Ye Jingxu. Review of research on water ecological health assessment based on ecological integrity [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5) : 1-10. (in Chinese))
 - [16] Legleiter C J. Calibrating remotely sensed river bathymetry in the absence of field measurements: flow resistance equation-based imaging of river depths (FREEBIRD) [J]. Water Resources Research, 2015, 51 (4) : 2865-2884.
 - [17] 李洋. 筑坝河流鱼类产卵生态流量研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
 - [18] Gurlin D, Gitelson A A, Moses W J. Remote estimation of Chl-a concentration in turbid productive waters: return to a simple two-band NIR-red model? [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (12) : 3479-3490.
 - [19] 程豹,望雪,马金川,等. 澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征 [J]. 环境科学, 2019, 40 (4) : 1779-1787. (Cheng Bao, Wang Xue, Ma Jinchuan, et al. Spatial distribution characteristics of nutrients and chlorophyll-a under cascade reservoir construction in the Lancang River Basin [J]. Environmental Science, 2019, 40 (4) : 1779-1787. (in Chinese))
 - [20] 李茜,张天予,冯镜洁,等. 齐口裂腹鱼产卵场生境模拟和底质修复技术研究 [J]. 四川环境, 2024, 43 (4) : 84-93. (Li Qian, Zhang Tianyu, Feng Jingjie, et al. Study on spawning habitat simulation and substrate restoration technology of *Schizothorax prenanti* [J]. Sichuan Environment, 2024, 43 (4) : 84-93. (in Chinese))
 - [21] 荣义峰,班璇,周杨浩,等. 青海湖裸鲤自然产卵场的生境特征及无人机遥测判别:以泉吉河为例 [J]. 生态学报, 2022, 42 (22) : 9371-9382. (Rong Yifeng, Ban Xuan, Zhou Yanghao, et al. Habitat characteristics and UAV remote sensing identification of natural spawning grounds of *Gymnocypris przewalskii* in Qinghai Lake: a case study of the Quanji River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (22) : 9371-9382. (in Chinese))

[22] Bai Yanqin, Lin Chenyu, Huang Xiaolong, et al. Investigation and preliminary laboratory study on substrate preference of *Schizothorax lantsangensis* [J]. River Research and Applications, 2022, 38(1): 131-137.

[23] 李倩, 吕平毓, 彭期冬, 等. 基于深潭浅滩分布的长江上游保护区铜鱼产卵场地形分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊2): 273-278. (Li Qian, Lyu Pingyu, Peng Qidong, et al. Topographic analysis of *Coreius guichenoti* spawning grounds in protected areas of the upper Yangtze River based on the distribution of deep pools and shoals [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 273-278. (in Chinese))

[24] Wang Peifang, Shen Yaxiong, Wang Chengtang, et al. An improved habitat model to evaluate the impact of water conservancy projects on Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) spawning sites in the Yangtze River, China [J]. Ecological Engineering, 2017, 104: 165-176.

[25] 张莉, 林佳宁, 张远, 等. 浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4570-4579. (Zhang Li, Lin Jianing, Zhang Yuan, et al. Effects and thresholds of nutrients on benthic diatoms in different aquatic ecological regions of the Huntai River [J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4570-4579. (in Chinese))

[26] 陈明千, 脱友才, 李嘉, 等. 鱼类产卵场水力生境指标体系初步研究[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1303-1308. (Chen Mingqian, Tuo Youcai, Li Jia, et al. Preliminary study on the hydraulic habitat index system for fish spawning grounds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1303-1308. (in Chinese))

[27] 韩仕清, 李永, 梁瑞峰, 等. 基于鱼类产卵场水力学与生态水文特征的生态流量过程研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(6): 9-13. (Han Shiqing, Li Yong, Liang Ruifeng, et al. Study on ecological flow process based on hydraulic and ecohydrological characteristics of fish spawning grounds [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(6): 9-13. (in Chinese))

[28] 孙世举, 徐浩, 吴艳兰, 等. 基于 Sentinel-2 卫星遥感影像的巢湖及南淝河叶绿素 a 浓度反演[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(5): 58-66. (Sun Shiju, Xu Hao, Wu Yanlan, et al. Retrieval of chlorophyll-a concentration in the Chaohu Lake and Nanfei River based on Sentinel-2 satellite remote sensing images [J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44(5): 58-66. (in Chinese))

[29] 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. (in Chinese))

[30] 严鑫, 卿杰, 成必新, 等. 基于原位观测的金沙江下游黑水河鱼类栖息地河床底质和水流特征分析[J]. 环境工程, 2023, 41(增刊2): 819-823. (Yan Xin, Qing Jie, Cheng Bixin, et al. Analysis of riverbed substrate and flow characteristics of fish habitats in the Heishui River in the lower Jinsha River based on in-situ observations [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 819-823. (in Chinese))

[31] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. Economic Geography, 1970, 46(S1): 234-240.

[32] 谢勇, 项薇, 季孟忠, 等. 基于 Xgboost 和 LightGBM 算法预测住房月租金的应用分析[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(9): 151-155. (Xie Yong, Xiang Wei, Ji Mengzhong, et al. Application analysis of monthly housing rent prediction based on XGBoost and LightGBM algorithms [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(9): 151-155. (in Chinese))

[33] Sokhansefat S, Kanani-Sadat Y, Nasser M. Modeling vegetation dynamics in complex topography under impacts of climate change: integration of spatial clustering and optimized XGBoost [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 387: 125902.

[34] 潘梦瑶, 任瑛, 王思源, 等. 基于梯度提升算法和 SHAP 的石家庄 PM_{2.5} 和臭氧浓度预测及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2024, 44(7): 402-409. (Pan Mengyao, Ren Ying, Wang Siyuan, et al. Prediction of PM_{2.5} and ozone concentrations and analysis of influencing factors in Shijiazhuang based on gradient boosting algorithms and SHAP [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(7): 402-409. (in Chinese))

[35] Zhou Jun, Sun Chao, Liu Jie, et al. Risk spatial distribution and economic loss assessment for parallel reservoir group dam-break floods: a case study of southwest river basin in China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 59: 102364.

[36] Staentzel C, Kondolf G M, Schmitt L, et al. Restoring fluvial forms and processes by gravel augmentation or bank erosion below dams: a systematic review of ecological responses [J]. Science of the Total Environment, 2020, 706: 135743.

[37] Jaeger K L, Anderson S W, Leach A C, et al. Quantifying fine sediment infiltration in spawning gravel used by Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in the Sauk River Basin, Washington, 2018-2021 [R]. Reston: US Geological Survey, 2024.

[38] 孙洁. 基于耳石微结构的澜沧江光唇裂腹鱼产卵时间和仔鱼生长研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.

[39] O'Sullivan A M, Wegscheider B, Helminen J, et al. Catchment-scale, high-resolution, hydraulic models and habitat maps: a salmonid's perspective [J]. Journal of Ecohydraulics, 2020, 6(1): 53-68.

(收稿日期: 2025-09-05 编辑: 胡新宇)