

Hu Y, Liu C F, Ding Y F, *et al.* The composition of invasive fish species and ecological risk assessment in Longyangxia Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(3): 032602. [胡烨, 刘超凡, 丁益帆, 等. 龙羊峡水库外来鱼类种类组成及生态风险评估 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(3): 032602.]

龙羊峡水库外来鱼类种类组成及生态风险评估

胡 烨^{1,2} 刘超凡^{1,3} 丁益帆^{1,4} 周 琼¹ 杨俊琳¹ 马宝珊¹ 吴金明¹

(1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223; 2. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 3. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 4. 武汉轻工大学动物科学与营养工程学院, 武汉 430023)

摘要: 为掌握龙羊峡水库外来鱼类组成现状、生态风险及高风险外来鱼类的潜在分布区, 从而制定针对性的防控对策。本研究于2023年5、9、12月及2024年5、7月对龙羊峡水库及其周边黄河流域开展了系统野外实地考察, 结合既有文献资料, 系统梳理了该水库当前的鱼类组成特征及外来鱼类的生态类型, 并采用AS-ISK工具对外来鱼类进行了风险等级评估。同时以典型外来鱼类池沼公鱼作为研究对象, 采用MaxEnt模型预测其在龙羊峡水库流域的潜在地理分布。结果显示: (1) 本研究实地调查共采集到21种鱼类, 隶属于4目6科16属, 其中外来鱼类11种; IRI指数结果显示优势种鱼类有6种, 其中外来鱼类占4种分别为: 鲫(*Carassius auratus*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)。 (2) 生态矩阵因子结果显示, 外来鱼类主要以端位口($R=0.64$)、产黏性卵($R=0.91$)、杂食性($R=0.72$)和底栖生活($R=0.45$)为主, 且大多数为定居性($R=0.73$), 适应静缓水环境($R=0.91$)。 (3) AS-ISK评估结果显示, 高、中、低风险鱼类分别为5、2和4种, 风险最高的5种鱼类依次为池沼公鱼、麦穗鱼、鲤、虹鳟、鲫。与历史数据对比并结合天气变化预测, 外来鱼类种类将呈现持续增加的趋势。 (4) MaxEnt模型的预测结果显示, 池沼公鱼高风险分布区域主要集中在龙羊峡库区、刘家峡库区及两库区之间的黄河流域, 龙羊峡水库库尾及以上为低风险区域。研究结果显示重点防范物种为池沼公鱼, 重点防范区域为龙羊峡库区库尾, 此结果可为黄河渔业高质量绿色发展提供数据支持和理论参考。

关键词: 外来鱼类; 风险评估; Maxent模型; 外来水生生物风险筛选工具(AS-ISK); 龙羊峡水库

中图分类号: S932.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)03-032602-09

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0313 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0313



黄河上游地区拥有丰富的水能资源和独特的冷水环境^[1]。龙羊峡水电站这一重要的大型水利工程就分布于该区域^[2]。随着社会经济的发展和人民生活水平的提升, 市场对高营养价值优质食品的需求不断增长^[3]。位于高海拔地区的龙羊峡水库充分利用其冷水资源优势, 成功引进了虹鳟、池沼公鱼等具有经济价值的外来鱼种进行养殖。赵娟^[4]在1995—1996年记录到龙羊峡水库引进了1.8亿粒池

沼公鱼卵进行增殖工作, 于2006年捕捞量达到1700吨。这些外来鱼类的引种养殖显著促进了当地的经济的发展, 然而, 外来鱼类可能会与土著鱼类竞争生存空间、争夺食物资源等, 并导致土著鱼类资源减少, 也会引起水库的水环境发生变化^[5], 并导致水库中鱼类群落结构发生深远变化。1981年王基琳等^[6]在龙羊峡水库开展了鱼类资源调查, 共记录到10种鱼类, 主要为土著物种, 包括花斑裸鲤

收稿日期: 2025-09-11; **修订日期:** 2025-11-06

基金项目: 农业农村部财政专项“黄河渔业资源与环境调查”(HHDC-2022-0103); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD08); 国家重点研发计划(2022YFB3206900和2022YFB3206905)资助 [Supported by the Financial Special Project of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, “Yellow River Fishery Resources and Environmental Survey”(HHDC-2022-0103); Special Fund for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Public Welfare Research Institutes (2023TD08); the National Key Research and Development Program of China (2022YFB3206900 and 2022YFB3206905)]

作者简介: 胡烨(2000—), 男, 硕士研究生; 主要从事渔业资源研究。E-mail: hy1112hf@163.com

通信作者: 吴金明, 研究员; 研究方向为濒危鱼类保护。E-mail: jinming@yfi.ac.cn

(*Gymnocypris eckloni*)、厚唇裸重唇鱼(*Gymnodiptychus pachycheilus*)和刺鲃(*Acanthogobio guentheri*)等。2005—2007年张建军等^[7]在研究中发现,龙羊峡水库土著鱼类数量明显减少,而外来鱼类数量则持续增加。卓玉等^[8]2022年的研究显示,外来物种显著降低了龙羊峡鱼类系统的发育多样性。刘旭等^[9]在2023年调查龙羊峡水库鱼类群落结构变化时发现,与水库蓄水前相比,土著鱼类减少2种,外来鱼类增加10种。

过高或过低的评估外来鱼类的生态风险,不仅阻碍了水产养殖的发展,而且不利于水域的生态产业链发展^[10]。水生生物风险评估工具(AS-ISK)是一种全球适用的水生物种入侵风险评估系统^[11]。Vilizzi等^[12]的研究表明,该系统在评估水生生物入侵时具有良好的适用性和准确性。AS-ISK采用“全面筛查(Horizon Scan)”方法,通过整合文献和数据对物种入侵风险进行评价,评估人员只需具备相关物种的基本生物学和生态学知识^[13—15]。本研究通过实地调查和检索现有文献的方法,统计了龙羊峡水库中外来鱼类的种类数量、生态习性等相关信息,并运用风险筛选工具(Aquatic Species Invasiveness Screening Kit, AS-ISK)对其进行了风险评估。采用MaxEnt模型,以典型外来鱼类池沼公鱼作为研究对象预测其在龙羊峡水库流域的潜在地理分布,以期为黄河流域渔业绿色高质量发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究依托“农业农村部专项黄河渔业资源与环境调查”(简称黄河专项),于2023年5、9、12月及2024年5、7月开展外来鱼类群落结构调查。根据研究需求和环境特点,共布设5个采样点位(图1)。

1.2 研究方法

通过实地考察与文献查阅,收集外来鱼类的生态特征及种类数量等数据。采集网具包括刺网(50 m×1.5 m,网目8 cm)和地笼(0.25 m×0.3 m×12 m,网目1.8 cm),每个采样点设置1个刺网与地笼,采样周期为24h。捕获的鱼类进行现场鉴定,并测量体长(精度为1 mm)和体重(精度为0.1 g)。对于无法现场鉴定的样本,采用10%的福尔马林溶液保存,并送至实验室进一步分析。物种鉴定依据《中国淡水鱼类检索》^[16]《黄河鱼类志》^[17]《中国条鳅志》^[18]进行。

1.3 数据分析

重要性指数 通过Pinkas^[19]相对重要性指数(Index of Relative Importance, IRI)来说明各物种在

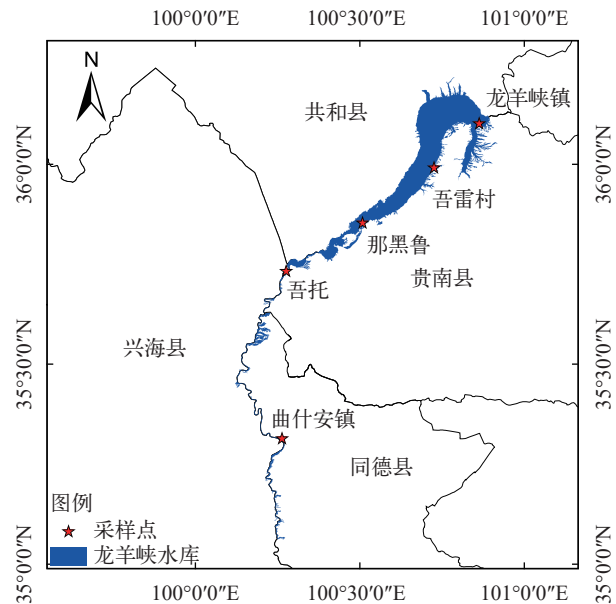


图1 龙羊峡水库采样示意图

Fig. 1 Sampling points of Longyangxia Reservoir

鱼类群落中的组成现状。计算公式:

$$IRI = (N\% + W\%) \times F\%$$

式中, $N\%$ 和 $W\%$ 分别表示某种鱼类的数量和重量占总数的百分比, $F\%$ 为该鱼类在2023—2024年出现的年度比例。IRI值大于1000表示该物种为优势种。

鱼类个体生态矩阵分析 采用鱼类个体生态需求矩阵(R)计算公式^[20]:

$$R = (S \times A) / n_s$$

式中, S 为鱼类群落的物种矩阵, A 为鱼类个体的生态特征矩阵, n_s 为群落中物种数。鱼类环境需求指数 $R[R_1, R_2, R_3, \dots, R_i]$ 中的 R_i 值代表某鱼种对环境因子的需求程度,值域为0到1, R_i 值越高,表示该鱼类对环境因子的影响越敏感^[21]。

1.4 风险评估方法

通过接受者特征曲线(ROC)分析中的约登指数(Youden's index)确定风险阈值,从而区分中风险和高风险物种^[14]。置信度级别用于计算置信因子,计算公式:

$$CF = \sum_{i=1}^{55} (CL_{Q_i}) / 4 \times 55$$

式中, CL 代表置信级别, CL_{Q_i} 代表每个问题的置信度,4表示最高置信度,55表示55个问题。所有统计均在R 4.3.2中完成。

1.5 最大熵模型MaxEnt

MaxEnt模型以最大熵原理为基础,是目前广泛

应用于物种分布模拟的重要工具。该模型通过将目标物种的已知分布点与多种环境变量(如气候、地形和人类活动等)进行拟合,推断其生态需求,从而预测其在研究区域的潜在适宜生境。

在<https://worldclim.org>网站获取温度、降雨等19个环境因子,并通过Arcgis软件处理得到龙羊峡水库流域的坡度、坡向、海拔、距居民点距离,共计23个环境因子。池沼公鱼分布点信息通过实地调查和文献搜集^[7, 9, 22–24]。

2 结果

2.1 种类组成及优势种

2023—2024年在龙羊峡水库共计捕获鱼类2597尾,总重130.522 kg,隶属于4目6科16属21种(表1),其中土著鱼类10种,外来鱼类11种。优势种包括鲫(*Carassius auratus*)、硬刺高原鳅(*Triplophysa scleroptera*)、花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、池沼公鱼(*Hypomesus olidus*),其IRI指数分别为3263、3259、2578、2576、2446和2213。其中外来鱼类优势种为鲫、麦穗鱼、虹鳟、池沼公鱼。

2.2 龙羊峡水库外来鱼类生态类型

基于2023—2024年的调查数据,本研究将外来鱼类划分为6大类共17个环境因子,涉及营养类型、繁殖方式、口部位置、栖息水层、水流偏好及洄游行为等属性,并据此构建了一个包含187个生态属性的个体生态学矩阵(表2)。分析表明,这些外来鱼类多表现为端位口型($R=0.64$)、以产黏性卵为主($R=0.91$)、食性杂食($R=0.72$)、底栖生活($R=0.45$),且绝大多数属定居性种类($R=0.73$),更适应静水或缓流环境($R=0.91$)。

2.3 风险等级评估

11种外来鱼类在龙羊峡水库的BRA评分范围为–5到31,风险阈值为15.1, AUC 值为1; BRA+CCA 评分范围为–13到39,风险阈值为18, AUC值为1。BRA评估分数的平均置信因子为 0.70 ± 0.026 ,这些结果说明AS-ISK能够很好地判断当前情景下外来鱼类在龙羊峡水库的入侵风险。

结果显示,龙羊峡水库中共识别出5种高风险外来鱼类,按评估得分从高至低依次为池沼公鱼、麦穗鱼、鲤、虹鳟和鲫;中风险外来鱼类2种,分别为棒花鱼和泥鳅;低风险外来鱼类4种,依次为鲇、子陵吻虾虎鱼、红尾副鳅和镜鲤(表3)。在综合考虑未来气候变化影响后,各类外来鱼类的评估得分平均上升了1.82分。风险等级发生相应变化:鲇和

镜鲤由低风险升为中风险;鲫由高风险降为中风险;而池沼公鱼、麦穗鱼、虹鳟和鲤仍维持高风险

表1 龙羊峡水库渔获物组成及重要性指数

Tab. 1 Composition and importance index of fish catches in Longyangxia Reservoir

目Order	科Family	种Species	IRI
鲤形目 Cypriniformes	鳅科Cobitidae	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	162
		条鳅亚科 Noemacheilinae	408
		<i>Triplophysa siluroides</i> *	13
		黄河高原鳅 <i>Triplophysa pappenheimi</i> *	59
		拟硬刺高原鳅 <i>Triplophysa pseudoscleroptera</i> *	3259
		硬刺高原鳅 <i>Triplophysa scleroptera</i> *	2
		东方高原鳅 <i>Triplophysa orientalis</i> *	2
		红尾副鳅 <i>Paracobitis variegates</i>	2
	鲤科Cyprinidae	裂腹鱼亚 Schizothoracinae	2578
		花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i> *	874
		黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i> *	481
		厚唇裸重唇鱼 <i>Gymnoditychus pachycheilus</i> *	6
		极边扁咽齿鱼 <i>Platypharodon extremus</i> *	3263
		鲤亚科 Cyprininae	774
		鲫 <i>Carassius auratus</i>	12
		鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	377
		镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis</i>	169
		刺鲃亚科gudgeons 刺鲃 <i>Acanthogobio guentheri</i> *	2576
		棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	
		麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	
鲑形目 Salmoniformes	鲑科Salmonidae	虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	2446
		池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	2213
鲇形目 Siluriformes	鲇科Siluridae	鲇亚科Silurinae	111
		鲇 <i>Silurus asotus</i>	
鲈形目 Perciformes	鰕虎鱼科 Gobiidae	子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	180

注: “*”表示土著鱼类

Note: “*”denotes indigenous fish species

等级。

2.4 潜在地理分布预测

通过Maxent预处理及环境因子之间关联性,剔除不合理及贡献率过低的环境因子,选取9个环境因子采用刀切法比较重要性,蓝色柱越长,表明对应环境因子对物种分布越重要(图2)。最终选定的环境因子包括年降水量、最湿月降水量、年均温、最热月最高温和距水体的距离共5个。

以池沼公鱼为高风险目标物种,MaxEnt模型的

模拟结果显示,经过10次重复运行后的平均AUC值为0.991。处于优秀水平,说明该物种的分布数据与所选环境因子之间存在显著关联,模型预测精度较高。研究采用10次重复运行的平均结果作为池沼公鱼的潜在地理分布数据,并将其导入ArcGIS 10.8进行重分类处理,依据分布概率(P)将潜在适生区划分为四个风险等级: $P \leq 0.07$ 为非风险区, $0.07 < P \leq 0.2$ 为低风险区, $0.2 < P \leq 0.5$ 为中风险区, $P \geq 0.5$ 为高风险区,得到池沼公鱼在龙羊峡水库流域潜

表2 2023—2024年龙羊峡水库外来鱼类个体生态学矩阵

Tab. 2 Ecological matrix of alien fish individuals in Longyangxia Reservoir from 2023 to 2024

物种名称Species	营养类型 Nutrition type			产卵类型 Spawning type				口位 Mouth position			生活水层 Stratum			水流 Current		洄游 Migratory	
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
1. 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
2. 鲫 <i>Carassius auratus</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
3. 鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
4. 镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
5. 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
6. 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
7. 虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
8. 池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
9. 鲢 <i>Silurus asotus</i>	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
10. 子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
11. 红尾副鳅 <i>Paracobitis variegatus</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
环境需求指数 R_i	0.72	0	0.27	0	0.91	0	0.09	0.64	0.09	0.27	0.18	0.36	0.45	0.09	0.91	0.73	0.27

注: E1. 杂食性; E2. 植食性; E3. 肉食性; E4. 浮性; E5. 黏性; E6. 漂流; E7. 沉性; E8. 端位; E9. 上位; E10. 下位; E11. 中上层; E12. 中下层; E13. 底栖; E14. 喜流水; E15. 喜静缓水; E16. 定居性; E17. 洄游性

Note: E1. Omnivorous; E2. Herbivorous; E3. Carnivorous; E4. Pelagic eggs; E5. Adhesive eggs; E6. Drifting eggs; E7. Demersal eggs; E8. With terminal mouth; E9. With upper mouth; E10. Hypostomatous; E11. Upper; E12. Lower; E13. Demersal; E14. Lotic; E15. Lentic; E16. Settled; E17. Migratory

表3 基于外来水生生物风险筛选工具的龙羊峡水库外来鱼类入侵风险等级

Tab. 3 Risk level of alien fishes in Longyangxia Reservoir basin with AS-ISK

物种Species	评估结果Result				置信度Confidence		
	BRA	等级Level	BRA+CCA	等级Level	BRA+CCA	BRA	CCA
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	20	高	26	高	0.67	0.68	0.58
池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	31	高	39	高	0.72	0.72	0.67
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	22	高	20	高	0.66	0.68	0.50
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	25	高	27	高	0.74	0.76	0.54
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	15	中	17	中	0.67	0.69	0.50
鲫 <i>Carassius auratus</i>	17	高	14	中	0.65	0.67	0.50
镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis</i>	-5	低	5	中	0.64	0.69	0.25
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	11	中	13	中	0.67	0.72	0.25
红尾副鳅 <i>Paracobitis variegatus</i>	-3	低	-13	低	0.67	0.69	0.46
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	-2	低	-1	低	0.67	0.72	0.25
鲢 <i>Silurus asotus</i>	1	中	5	中	0.64	0.69	0.25

注: BRA. 评分范围[-20, 1]为低风险, (1, 15.1]为中风险, (15.1, 68]为高风险; BRA+CCA. 评分范围[-32, 1]为低风险, (1, 18]为中风险, (18, 80]为高风险

Note: BRA. with a score range of [-20, 1] is considered low risk, (1, 15.1] is considered medium risk, and (15.1, 68] is considered high risk; BRA+CCA. with a score range of [-32, 1] is considered low risk, (1, 18] is considered medium risk, and (18, 80] is considered high risk

在入侵风险分布图(图 3)。结果显示潜在分布区域主要集中在龙羊峡库区、刘家峡库区及两库区之间的黄河流域, 而龙羊峡水库库尾及以上为低风险区域, 低风险区面积为 1893.78 km^2 , 中风险区为 1199.70 km^2 , 高风险区为 1053.27 km^2 。

3 讨论

3.1 龙羊峡水库外来鱼类生态类型及变动趋势

龙羊峡水库外来鱼类物种数从1981年蓄水前的0种增至目前的11种。随着蓄水时间增加, 水环境的改变, 外来鱼类逐渐增多, 主要以呈经济水产养殖或贸易品种的小型鱼类为主^[6]。虹鳟和池沼公鱼是出于经济目的被引入水库的鱼类物种, 目前已

有记录表明, 部分网箱养殖的虹鳟个体逃逸至自然水域, 而池沼公鱼则已在库区建立稳定种群。另一方面, 诸如麦穗鱼和棒花鱼等小型鱼类, 则很可能是随经济鱼类的引进过程被无意引入水库的^[22]。与2005—2007年蓄水后期的调查结果相比较, 本次调查新记录了泥鳅、红尾副鳅、镜鲤、棒花鱼、鲇和子陵吻虾虎鱼, 但未发现草鱼、鲢和鳙等物种。推测这些未发现的鱼类可能曾在早期被引入, 但水文条件的变化(如缺乏流水刺激), 未能完成其生命周期, 导致种群逐渐衰退^[25]。与土著鱼类相比^[9], 外来鱼类具有更广泛的食物选择范围; 其定居性意味着它们能在较小范围内繁殖, 增强对栖息区的控制力; 龙羊峡库区的静缓水环境更适合外来鱼类,

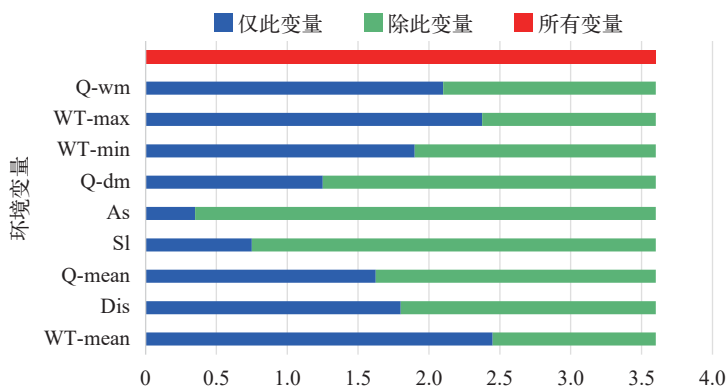


图 2 基于刀切法测试的环境因子对池沼公鱼分布的重要性分析

Fig. 2 Analysis of the importance of environmental factors on the distribution of pond smelt based on the knife cutting method

WT-mean. 年平均气温Annual Mean Temperature; Dis. 距水体点距离Distance to Water Body; Q-maen. 年降水量Annual Precipitation; SI. 坡度Slope; As. 坡向Aspect; Q-dm. 最干月份降水量Precipitation in the Driest Month; WT-min. 最冷月份最低温Minimum Temperature in the Coldest Month; WT-max. 最热月份最高温Maximum Temperature in the Hottest Month; Q-wm. 最湿月份降水量Precipitation in the Wettest Month

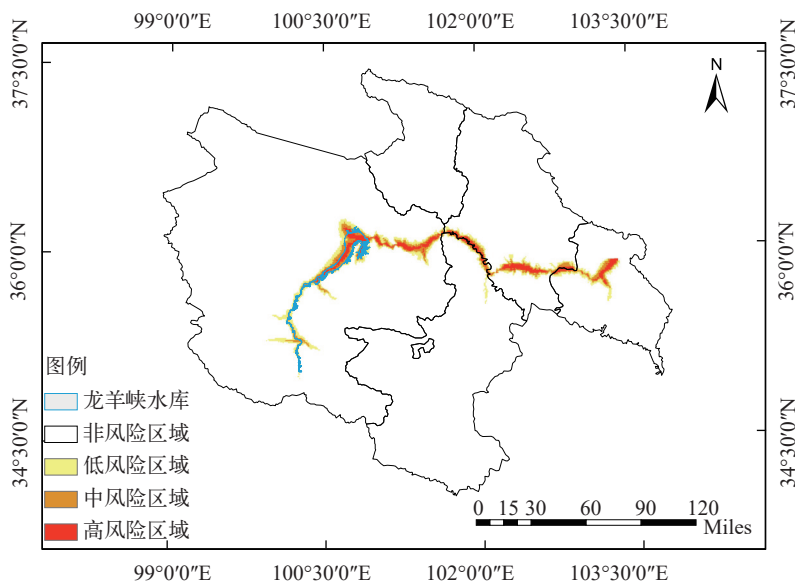


图 3 池沼公鱼在龙羊峡水库流域入侵风险区域分布图

Fig. 3 Distribution map of invasion risk areas of pond smelt in Longyangxia Reservoir Basin

而土著鱼类更偏好流水环境,这些生态压力可能导致土著鱼类种群数量下降。

未来气候变化可能会导致外来鱼类的总体风险增加。加入气候因子评估结果显示,整体分数上升,高风险外来鱼类的分数也有所提高。根据中国河流流域,黄河降雨和温度趋势评估预测^[26-29],未来2023—2100年黄河流域气温最大和最小气温分别将上升1.3—1.9℃和1.2—1.8℃,年降雨量增加3%—4.05%,而可用水资源呈现下降趋势。极端气候事件(例如洪水与干旱)可能促进外来物种的扩散,并削弱本地生态群落的抵抗能力,从而加剧生物入侵的进程^[30]。

3.2 现状成因探讨及外来鱼类影响

池沼公鱼、麦穗鱼、鲤、虹鳟和鲫均为经济引种进入水库养殖,龙羊峡水库利用高海拔冷水资源,在2008年大面积圈养虹鳟并形成完整体系,在1984年引种池沼公鱼等外来经济鱼类,并在1995—1996年投放1.8亿、2015年投放4.2亿、2020年投放10亿粒池沼公鱼鱼卵。池沼公鱼作为经济物种,已形成自然种群,每年8月20日—11月20日为龙羊峡水库的特殊捕捞期,池沼公鱼最高捕捞量达到1700 t^[7]。唐文家等^[22]在进行青海省的外来鱼类调查时发现,水产养殖引种过程中常会无意引入诸如泥鳅、棒花鱼和子陵吻虾虎鱼等小型杂鱼类。此外,调查还显示,部分小型外来鱼种如麦穗鱼和鲫已在龙羊峡水库实现自然定殖,并形成了稳定种群。龙羊峡水库周边池塘早在1980年就开始养殖鲤,据相关文献记载,曾因为暴雨等恶劣天气导致鲤逃逸到水库中^[22, 31, 32]。虹鳟也因管理不善,仍有少量个体从圈养设施逃逸到水库中。

外来鱼类的引进显著提高了渔业和水产养殖的产量和价值。例如,水产养殖中引进的外来鱼类占中国总产量的25%和全球总产量的17%^[33, 34]。然而,外来鱼类也对本地物种和生态系统造成了巨大的负面影响。首先是生态竞争,虹鳟处于水库食物链的较顶端,虹鳟以小型鱼类和水生无脊椎动物为食,对当地水域中的底栖生物和小型鱼种构成了较大的捕食压力,从而胁迫土著鱼类的生存空间。池沼公鱼以哲水蚤等浮游动物为食,造成与具有相似食性的土著鱼类争夺食物资源^[35]。此外,外来鱼类还会捕食土著鱼类的卵,导致其种群数量减少^[36]。外来鱼类相比土著鱼类具有更广泛耐受性,能更好适应栖息地的改变,麦穗鱼表现出较强的繁殖能力与较短的世代周期,在我国黄河上游、青藏高原及云南等地区的自然水体中均有分布,并被欧洲认定为入侵风险较高的鱼类物种之一^[22, 37, 38]。在高海

拔寒冷地区,麦穗和鲫尽管生长速度较慢,但它们会提前进入拐点年龄并增加年龄组成,这种生活史的可塑性使它们能够更好地适应环境,从而迅速扩大种群^[37, 39]。再次是外来鱼类可能携带对本地鱼类种群造成疾病或可能致命的寄生虫或病毒^[40]。最后是外来鱼类与土著鱼类之间会发生杂交,并导致本地特有鱼类物种的遗传侵蚀^[41]。已有调查发现本地鲤(*Cyprinus carpio*)和镜鲤(*Cyprinus specularis*)之间的杂交,显著减少了本地鱼类种群^[42]。

3.3 防控措施建议

外来鱼类风险评估能够预防潜在的生态破坏,并帮助政府、渔业管理部门提供基于科学数据的决策支持,确保决策者能够根据风险大小来制定相应的管理策略,如限制外来物种的引入、加强监测等;风险评估帮助识别最危险的外来物种,从而在管理和控制方面进行优先级排序,有助于合理分配资源,避免资源浪费。风险评估通常依赖于现有的数据和模型,但生态系统的复杂性及物种间互动的多样性,往往使得评估结果难以完全准确。AS-ISK已被用于我国长江流域^[14]、珠江流域^[13]、海河流域^[43]及雅鲁藏布江^[44]等多个水域的外来鱼类风险评估。结果表明,该工具能够在不同区域可靠地区分具有入侵性和非入侵性的物种,展现出良好的适用性。池沼公鱼入侵风险区域分布图显示库尾为低风险区,与李钧乐等^[45]研究相吻合,应在龙羊峡水库库尾加强土著鱼类的保护。

本研究风险评估结果显示,池沼公鱼、麦穗鱼、鲤、虹鳟和鲫为龙羊峡水库高风险外来鱼类。鉴于池沼公鱼、虹鳟为当地重要经济物种,且麦穗鱼、鲤、鲫已形成种群,提出以下防控措施:针对池沼公鱼繁殖特性,可适当延长特殊捕捞期,重点关注龙羊峡水库库尾区域;加强虹鳟网箱管理,制定逃逸管理措施;特殊捕捞期可适当增加捕捞种类,如麦穗鱼、棒花鱼、鲤、鲫;在后续工作中加入高风险外来鱼类与土著鱼类的营养和生态位宽度重叠度研究;加强民众防范意识,宣传外来鱼类对生态风险的影响;有组织、定点、进行特许外来鱼类宗教放生活动。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Jian S L. Advantages and countermeasures for developing green fisheries in Qinghai [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2010(2): 48-51. [简生龙. 发展青海绿色渔业的优势和对策 [J]. *青海农林科技*, 2010(2): 48-51.]

- [2] Qinghai Provincial Water Resources Department. The Rough Guide to Rivers and Lakes of Qinghai [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2018: 34-40. [青海省水利厅. 青海河湖概览 [M]. 武汉: 长江出版社, 2018: 34-40.]
- [3] Wang Z Z, Kong C, Lu M, *et al.* “13th Five-Year Plan” National Key R & D Program “Blue Granary Science and Technology Innovation” Key Special Science and Technology Layout and Review [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2024, **48**(2): 79-87. [王振忠, 孔聪, 鲁淼, 等. “十三五”国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项科技布局及评述 [J]. *海洋科学*, 2024, **48**(2): 79-87.]
- [4] Zhao J. Aquaculture status and industrialization development ideas of *Hypomesus olidus* in Longyangxia Reservoir [J]. *China Fisheries*, 2007, **384**(11): 16-17. [赵娟. 龙羊峡水库池沼公鱼增殖养殖现状及产业化发展思路 [J]. *中国水产*, 2007, **384**(11): 16-17.]
- [5] Hu Y, Wu J M, Liu X, *et al.* Study on the water quality assessment of Longyangxia Reservoir based on phytoplankton community structure [J]. *Freshwater Fisheries*, 2025, **55**(3): 92-105. [胡烨, 吴金明, 刘旭, 等. 基于浮游生物群落结构的龙羊峡水库水质评价研究 [J]. *淡水渔业*, 2025, **55**(3): 92-105.]
- [6] Wang J L, Cai M Y, Qin J G, *et al.* Investigation on the basic biology of fishery before impoundment of Longyangxia Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 1982, **3**(3): 2-11. [王基琳, 蔡明玉, 秦建光, 等. 龙羊峡水库蓄水前的渔业基础生物学调查 [J]. *水库渔业*, 1982, **3**(3): 2-11.]
- [7] Zhang J J, Feng H, Li K S, *et al.* Changes of fishery resources after the construction of cascade hydropower station from Longyang Gorge to Liujia Gorge in upper stream of Yellow River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2009, **39**(3): 40-45. [张建军, 冯慧, 李科社, 等. 黄河上游龙羊峡至刘家峡河段梯级水电站建设后鱼类资源变化 [J]. *淡水渔业*, 2009, **39**(3): 40-45.]
- [8] Zhuo Y, Li J L, Li Y Q, *et al.* Spatial distribution pattern of fish multifaceted biodiversity in the Longyangxia Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(3): 504-512. [卓玉, 李钧乐, 李英钦, 等. 龙羊峡水库鱼类多维多样性空间分布格局 [J]. *水生生物学报*, 2024, **48**(3): 504-512.]
- [9] Liu X, Shen L, Hu Y, *et al.* Characteristics and historical changes in the fish community structure in Longyangxia Reservoir [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2024, **31**(9): 1001-1014. [刘旭, 沈丽, 胡烨, 等. 龙羊峡水库鱼类群落结构变化 [J]. *中国水产科学*, 2024, **31**(9): 1001-1014.]
- [10] Li S, Chen J K, Wang X M. Global distribution, entry routes, mechanisms and consequences of invasive freshwater fish [J]. *Biodiversity Science*, 2016, **24**(6): 672-685. [郇珊, 陈家宽, 王小明. 淡水鱼类入侵种的分布、入侵途径、机制与后果 [J]. *生物多样性*, 2016, **24**(6): 672-685.]
- [11] Copp G H, Vilizzi L, Tidbury H, *et al.* Development of a generic decision-support tool for identifying potentially invasive aquatic taxa: AS-ISK [J]. *Management of Biological Invasions*, 2016, **7**(4): 343-350.
- [12] Vilizzi L, Copp G H, Hill J E, *et al.* A global-scale screening of non-native aquatic organisms to identify potentially invasive species under current and future climate conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(788): 147868.
- [13] Wei H, Liu C, Hu Y C, *et al.* Invasiveness identification using aquatic species invasiveness screening kit for non-native ornamental fish in China: A case study of non-native Loricaridae species [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(4): 494-503. [韦慧, 刘超, 胡隐昌, 等. 基于外来水生生物风险筛选工具评估外来观赏鱼在中国的入侵风险: 以甲鲃科鱼类为例 [J]. *生态与农村环境学报*, 2022, **38**(4): 494-503.]
- [14] Wan C Y, Fang K, Dong F, *et al.* Status and ecological risk assessment of alien fish in the Yangtze River basin [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2025, **49**(8): 61-73. [万朝阳, 方康, 董芳, 等. 长江流域外来鱼类现状与生态风险评估 [J]. *水产学报*, 2025, **49**(8): 61-73.]
- [15] Ruykys L, Ta K A T, Bui T D, *et al.* Risk screening of the potential invasiveness of non-native aquatic species in Vietnam [J]. *Biological Invasions*, 2021, **23**(7): 2047-2060.
- [16] Zhu S Q. The Synopsis of Freshwater Fishes of China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1995: 8-187. [朱松泉. 中国淡水鱼类检索 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 8-187.]
- [17] Li S Z. Fishes of the Yellow River & Beyond [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2017: 71-402. [李思忠. 黄河鱼类志 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2017: 71-402.]
- [18] Zhu S Q. The Loaches of the Subfamily Nemacheilinae in China (Cypriniformes: Cobitidae) [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House. 1989: 1-134. [朱松泉. 中国条鳅志 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989: 1-134.]
- [19] Pinkas L. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters [J]. *Fishery Bulletin*, 1971(152): 1-105.
- [20] Suen J P, Edwin E. Investigating the causes of fish community change in the Dahan River (Taiwan) using an autecology matrix [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **568**(1): 317-330.
- [21] Chen G Z, Qiu Y P, Li L P. Fish invasions and changes in the fish fauna of the Tarim Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 700-714. [陈国柱, 仇玉萍, 李丽萍. 塔里木盆地鱼类入侵及区系演变趋势 [J]. *生态学报*,

- 2017, **37**(2): 700-714.]
- [22] Tang W J, He D K. Investigation on alien fishes in Qinghai Province, China (2001-2014) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(3): 502-510. [唐文家, 何德奎. 青海省外来鱼类调查(2001-2014年) [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(3): 502-510.]
- [23] Ru H J, Wang H J, Zhao W H, *et al.* Fishes in the mainstream of the Yellow River: assemblage characteristics and historical changes [J]. *Biodiversity Science*, 2010, **18**(2): 169-176. [茹辉军, 王海军, 赵伟华, 等. 黄河干流鱼类群落特征及其历史变化 [J]. *生物多样性*, 2010, **18**(2): 169-176.]
- [24] Zhu S H, Huang X Y, Wang J S, *et al.* Exotic Fish Species Survey on the Section from Longyangxia to Lijiaxia in the Upper Reaches of the Yellow River [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2022, **8**(6): 43-46. [朱世海, 黄祥玉, 王建生, 等. 黄河上游龙羊峡段至李家峡段外来鱼种调查 [J]. *生物化工*, 2022, **8**(6): 43-46.]
- [25] Lu G, Wang C, Zhao J, *et al.* Evolution and Genetics of Bighead and Silver Carps: Native Population Conservation Versus Invasive Species Control [J]. *Ecology, Environment & Conservation*, 2020, **13**(6): 1351-1362.
- [26] Li H, Mu H, Jian S, *et al.* Assessment of rainfall and temperature trends in the Yellow River basin, China from 2023 to 2100 [J]. *Water*, 2024, **16**(10): 1441-1441.
- [27] Hu J Y, Wu Y P, Sun P C, *et al.* Predicting long-term hydrological change caused by climate shifting in the 21st century in the headwater area of the Yellow River Basin [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, **36**(6): 1-18.
- [28] Ren L, Song C, Wu W, *et al.* Reservoir effects on the variations of the water temperature in the upper Yellow River, China, using principal component analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020(262): 110339.
- [29] Ma X, Li Z, Ren Z, *et al.* Predicting future impacts of climate and land use change on streamflow in the middle reaches of China's Yellow River [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024(370): 123000.
- [30] Diez J M, D'Antonio C M, Dukes J S, *et al.* Will extreme climatic events facilitate biological invasions [J]? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, **10**(5): 249-257.
- [31] Jiang X, Wang J, Tang W, *et al.* Non-native freshwater fish species in the Yellow River Basin: origin, distribution and potential risk [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2021, **104**(3): 1-12.
- [32] Tang W, He D. Fish resource survey on Cihaxia to Jishixia stretches in the upper reaches of Yellow River (2005—2010) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(4): 600-608.
- [33] Lin Y, Gao Z, Zhan A. Introduction and use of non-native species for aquaculture in China: status, risks and management solutions [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2015, **7**(1): 28-58.
- [34] Shelton W L, Rothbard S. Exotic species in global aquaculture-A review [J]. *Israeli Journal of Aquaculture*, 2006, **58**(1): 3-28.
- [35] Lai Y. The relationship between the disappearance of Calanoida population and the introduction of *Hypomesus olidus* in Bosten Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, **30**(4): 136-139. [赖英. 博斯腾湖哲水蚤种群消失与池沼公鱼的关系 [J]. *水生生态学杂志*, 2009, **30**(4): 136-139.]
- [36] Pan Y, Cao W X, Xu L P, *et al.* Ecological effect of fish invasion and its management policy [J]. *Freshwater Fisheries*, 2005, **35**(6): 57-60. [潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 等. 鱼类入侵的生态效应及管理策略 [J]. *淡水渔业*, 2005, **35**(6): 57-60.]
- [37] Sun H H, Zhu R, Feng X, *et al.* Adaptation in life-history traits of exotic topmouth gudgeon from wetlands in Tibet Autonomous Region [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(12): 1780-1787. [孙欢欢, 朱仁, 冯秀, 等. 西藏湿地外来麦穗鱼生活史特征的适应性研究 [J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(12): 1780-1787.]
- [38] Andreou D, Arkush K D, Guégan J F, *et al.* Introduced pathogens and native freshwater biodiversity: A case study of *Sphaerothecum destruens* [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(5): e36998.
- [39] Qing H. Patterns of fishes diversity in Jialing river and resources vicissitude in the middle and lower basin [D]. Chongqing: Southwest University, 2010. [青弘. 嘉陵江流域鱼类多样性格局及中下游渔业资源变迁分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.]
- [40] Ye S, Li H, Qiao G, *et al.* First case of *Edwardsiella ictaluri* infection in China farmed yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Aquaculture*, 2009, **292**(1-2): 6-10.
- [41] Tang W, Chen Y. Hybridization between native barbless carp (*Cyprinus pellegrini*) and introduced common carp (*C. carpio*) in Xingyun Lake, China [J]. *Zoological Science*, 2012, **29**(5): 311-318.
- [42] Li F, Zhang J J, Yuan Y F, *et al.* Present situation and problems on fish introduction in Yellow River system [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(34): 15024-15026.
- [43] Li X J, Tang W Q, Zhao Y H. Risk analysis of fish invasion in Haihe River basin caused by the central route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *Biodiversity Science*, 2021, **29**(10): 1336-1347. [李雪健, 唐文乔, 赵亚辉. 南水北调中线工程对海河流域鱼类入侵风险分析 [J]. *生物多样性*, 2021, **29**(10): 1336-1347.]
- [44] Li S, Chen J, Wang X, *et al.* Invasiveness screening of non-native fishes for the middle reach of the Yarlung

- Zangbo River, Tibetan Plateau, China [J]. *River Research and Applications*, 2017, **33**(9): 1439-1444.
- [45] Li J L, Zhuo Y, Li Y Q, *et al.* Spatial patterns and drivers of multidimensional β diversity in the Longyangxia Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(03): 38-48. [李钧乐, 卓玉, 李英钦, 等. 龙羊峡水库鱼类多维度 β 多样性格局及其驱动因子 [J]. 水生生物学报, 2025, **49**(03): 38-48.]

THE COMPOSITION OF INVASIVE FISH SPECIES AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT IN LONGYANGXIA RESERVOIR

HU Ye^{1,2}, LIU Chao-Fan^{1,3}, DING Yi-Fan^{1,4}, ZHOU Qiong¹, YANG Jun-Lin¹, MA Bao-Shan¹ and WU Jin-Ming¹

(1. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. College of Animal Science and Nutritional Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: To understand the current composition, ecological risks, and potential distribution areas of high-risk invasive fish species in the Longyangxia Reservoir, and to develop targeted prevention and control measures, this study conducted systematic field investigations in the Longyangxia Reservoir and the surrounding Yellow River Basin in May, September, and December of 2023, as well as May and July 2024. These were complemented by a literature review to systematically summarize the current fish composition and ecological types of invasive fish in the reservoir. The AS-ISK tool was used to assess the risk level of each invasive species, and the MaxEnt model was used to predict its potential distribution of one typical invasive species, *Pseudorasbora parva*, across the Longyangxia Reservoir Basin. The results showed that: (1) A total of 21 fish species belonging to 4 orders, 6 families, and 16 genera were collected, including 11 invasive species. Based on the index of relative importance (IRI), 6 dominant species were identified, 4 of which were invasive: *Carassius auratus*, *Pseudorasbora parva*, *Oncorhynchus mykiss*, and *Hypomesus olidus*; (2) Ecological matrix factors revealed that invasive fish species were predominantly characterized by terminal mouth positions ($R=0.64$), adhesive egg production ($R=0.91$), omnivorous feeding habits ($R=0.72$), and benthic lifestyles ($R=0.45$), with most being resident species ($R=0.73$) adapted to calm water environments ($R=0.91$); (3) According to the AS-ISK assessment, there were 5 high-risk, 2 medium-risk, and 4 low-risk species, with the top 5 highest-risk species being *Hypomesus olidus*, *Pseudorasbora parva*, *Cyprinus carpio*, *Oncorhynchus mykiss*, and *Carassius auratus*. Compared with historical data and incorporating weather predictions, the number of invasive species is expected to continue increasing; (4) The MaxEnt model prediction indicated that high-risk area of *H. olidus* is mainly concentrated in the Longyangxia Reservoir, Liujiaxia Reservoir, and the Yellow River Basin between the two reservoirs, while the reservoir tail and upstream areas represent low-risk zones. The study highlight *H. olidus* as the key species for prevention, with the Longyangxia Reservoir tail being the primary focal zone. These findings provide data support and theoretical references for the supporting green and sustainable fisheries development in the Yellow River Basin.

Key words: Exotic fish species; Risk assessment; Maxent model; Aquatic Species Invasiveness Screening Kit (AS-ISK); Longyangxia Reservoir