

长江中上游(含洞庭湖)外来鱼类入侵风险评估

田盼盼, 邓华堂, 王导群, 俞立雄, 高雷, 刘绍平, 陈大庆, 段辛斌, 王珂, 田辉伍*

中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站, 湖北武汉 430223

摘要:

【目的】了解长江中上游水域外来鱼类现状并评估其入侵风险。

【方法】2022年5—7月、10—12月, 在长江中上游干支流22个江段以及洞庭湖、洪湖使用定置刺网、流刺网和地笼开展了外来鱼类调查。

【结果】调查期间共采集到鱼类8目24科135种, 包括外来鱼类20种。其中, 长江江津段调查到外来鱼类种类最多, 各监测站点出现频率最高的外来种为杂交鲟。通过鱼类入侵性筛选实验(FIST), 初步筛选出尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、散鳞镜鲤等6种高入侵风险鱼类, 使用鱼类入侵性筛选试剂盒(FISK)对鱼类入侵风险做进一步分析, 共确定了齐氏罗非鱼、麦瑞加拉鲮、革胡子鲶等8种鱼类具有较高入侵风险。使用ROC曲线对FISK评分结果进行验证, 显示AUC值为0.944, 表明FISK评估方法对物种入侵性的判别能力较高, 能够判别当前和气候变化情景下外来鱼类在研究水域是否具有入侵风险。

【结论】基于上述外来鱼类入侵风险评估结果, 长江中上游水域已存在多种高入侵风险鱼类, 可能将严重危害长江中上游的渔业资源及水生生态系统的结构和功能。建议加大对高入侵风险物种的管理和控制力度, 同时加强土著鱼类种群资源保护, 从而避免入侵种对长江土著鱼类资源造成巨大破坏, 本研究可为长江土著鱼类资源保护提供对策。

关键词: 外来鱼类; 入侵风险; 鱼类入侵性筛选; 长江中上游

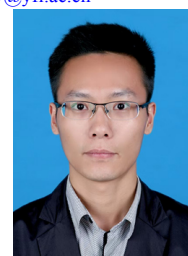
外来生物入侵被认为是导致全球生物多样性下降的第二大因素^[1], 是导致全球生物多样性丧失的主要原因之一^[2-3]。此外, 全球化进程使得众多新的外来种传入速率进一步加快^[4], 外来入侵生物正在以史无前例的速度扩张^[5], 新的生态危害与生物入侵风险不断加大。如何判断外来生物的入侵力及入侵风险, 对外来生物的早期监测预警已成为入侵生态学研究的重点之一^[6-7]。

长江流域生境复杂多样, 生物多样性极其丰富^[8], 是我国重要的水生生物宝库, 2017年前, 长江鱼类分布记录有18目37科163属443种^[9]。近几十年来由于涉水工程建设、污水排放、外来种入侵、过度捕捞等原因, 流域生态环境不断恶化, 水生生物资源持续衰

第一作者: 田盼盼, 从事水生生物研究, E-mail: 2515028484@qq.com



通信作者: 田辉伍, 从事渔业资源保护与水生生物研究, E-mail: tianhw@yfi.ac.cn



资助项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202001); 国家自然科学基金(51909271, 32202942, 51509262); 中国三峡建设管理有限公司项目(JG/18056B, JG/18057B); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2023TD09); 重庆市水产科技创新联盟(2021183)

收稿日期: 2023-12-06

修回日期: 2024-02-26

文章编号:

1000-0615(2025)06-069310-11

中图分类号: S 937

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



退, 重点保护物种濒危程度加剧。长江十年禁渔令的实施对于修复长江生境, 恢复水生生物资源, 拯救濒危生物等具有重大意义^[10], 但同时也给部分长江水域外来物种入侵创造了条件。2006年, 我国从国外引进的鱼类超过65种, 我国包括长江在内众多水系均受到不同程度外来鱼类入侵的影响^[11]。长江上游水域鱼类以特有鱼类为主, 水生态系统群落结构相对中下游水域更为简单和脆弱, 外来鱼类的入侵将对长江上游水域生态系统安全造成严重威胁。长江中游地区分布的众多湖泊通常利于广适性鱼类和外来种的生存, 外来入侵种在湖泊中的发展将可能导致土著鱼类数量锐减和生态系统崩溃。本研究拟对长江中上游流域外来鱼类现状进行调查, 评估外来鱼类入侵的风险, 探讨外来鱼类对土著鱼类的影响, 为长江土著鱼类资源保

护提供对策。

1 材料与方法

1.1 调查时间与江段

为了解长江中上游(含洞庭湖)水域外来鱼类现状, 调查人员于2022年5—7月和10—12月在长江干流13个江段(武穴、荆州、宜昌、万州、涪陵、奉节、江津、合江、泸州、宜宾、攀枝花、巧家、丽江)、长江支流7个江段(汉江、清江、赤水河、乌江、嘉陵江、岷江、普渡河)以及2个干流湖泊(洞庭湖、洪湖)开展外来鱼类调查, 调查各个江段的外来鱼种类组成情况。参照《外来入侵水生动物重点调查技术规范(试行)》中相关要求, 在每个江段各设置27个采样点(图1)。

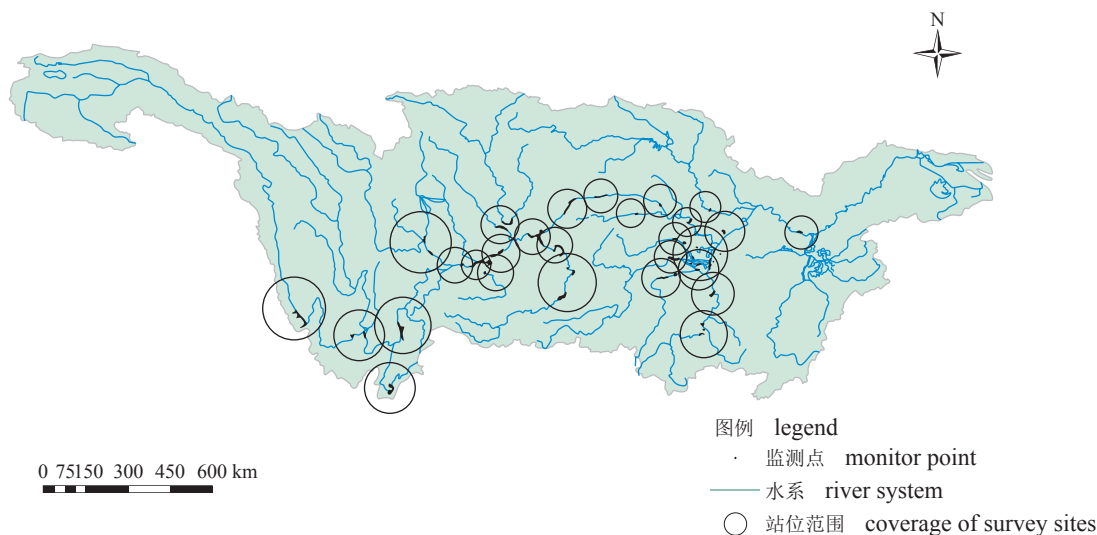


图1 长江中上游调查点位图

Fig. 1 Survey points in the middle and upper reaches of the Yangtze River

1.2 鱼类资源调查

在持有渔政管理部门批准捕捞许可证的前提下对调查江段进行鱼类样本的采集, 参照相关文献^[12-13]现场鉴定调查样本, 实验过程严格遵守实验动物伦理规范。在每个调查江段每个采样点调查3 d, 分别使用定置刺网、流刺网和地笼作业, 所有网具网目大小均为200 mm。定置刺网(长50 m、高1.5 m)放置12 h(通常为当日18:00—次日6:00); 流刺网(长50 m、高1.5 m)放置2 h(通常为当日9:00—当日11:00); 地笼(长10 m、口面面积0.24 m²)放置24 h(通

常为当日18:00—次日18:00)。分类统计和鉴定所有鱼类样品, 统计每个调查点位每种外来入侵鱼类的种类和数量并记录相关生物学信息, 然后进行无害化处理, 土著物种则放生回原生境, 死亡个体用10%甲醛溶液固定, 带回实验室内复核, 样本保存于中国水产科学研究院长江水产研究所标本室。

1.3 数据统计

记录的外来物种根据发生率(各江段出现频率)并进行分类, 分为低($\leq 25\%$)、中($>25\% \sim 50\%$)和高($\geq 51\% \sim 100\%$)。此外, 根据前期研

究结果^[14], 记录的外来鱼类详细信息包括原生范围、基本气候带、保护级别以及引入时间等。

1.4 数据分析

鱼类来源比较 为比较两个非正态分布的独立样本差异, 采用 Te Mann Whitney U 检验来比较本地鱼类和外来鱼类的发生率情况, 同时使用 IBM SPSS Statistics 23.0 软件进行 Spearman 相关性分析来检验外来物种数量和调查到物种总数之间的显著性。

风险评估 为量化外来鱼类的入侵, 对入侵风险分两个阶段进行入侵风险探讨。首先, 使用鱼类入侵性筛选实验 (FIST) 进行初步筛选^[14]。其后, 采用鱼类入侵性筛选试剂盒 (FISK) 进行入侵风险分析, FISK 整合了多个类群的水生生物和生态学特征, 具有较广的适用性, 可对外来生物引入、定殖、扩散和影响过程中的风险进行有效评估^[15], 该工具在评估全球 120 个地区的 819 种外来水生生物的潜在入侵风险中取得了较好评估效果^[16], 同时 FISK 工具也被用于评估长江流域外来鲟 (Acipenseriformes) 入侵风险, 在长江流域具有一定的适用性^[17]。最后使用 IBM SPSS Statistics 23 软件绘制接收者操作特征曲线 (receiver operating characteristics curve, ROC 曲线)。ROC 曲线的 x 轴

和 y 轴分别代表评估方法的专一度和敏感度, 线下面积 (AUC) 的范围为 0.5~1.0。其值越趋近 1, 评估方法对物种入侵性的判别能力越高。根据 ROC 曲线, 使用 Youden 的 J 统计^[18] 和最接近图左上角的点以完全的灵敏度或特异性确定最大化真阳性率和最小化假阳性率的最佳阈值^[15,19-20]。

参照相关文献^[21-22], 本研究 FIST 筛选考虑的生物学特征包括最大体长、繁殖压力、建群历史、野外繁殖能力、与本地物种的竞争能力、食性广度、温度耐受性和低溶解氧耐受性。在确定一个物种的特征后, 根据所考虑的 8 个特征, 将每个物种的特征分为低 (+)、中 (++) 和高 (+++) 三个等级^[22]。在计算中, 只有一个物种符合“+++”的标准使用“1”进行量化, 而低于“++”或“+”的分数被量化为“0”。FIST 的评分标准见表 1。对每个筛选标准的频率分布 (FD, %) 的百分比值进行了列举, 这些入侵性是根据风险水平计算的 FD 值来衡量。当一个物种的“+++”的 FD 值在所有筛选标准中均超过 50% 时, 该物种被归类为高风险物种, FD 值在 30%~50% 的物种被归类为中风险物种, 而在 30% 以下的物种被归类为低风险物种。

FISK 是基于问卷-评分系统的半定量方法, 问卷包括 49 个基础风险评估问题, 这些问题分

表 1 鱼类入侵性筛选试验的评分标准
Tab. 1 Scoring criteria for fish invasiveness screening tests

特征 trait	标准 criteria	得分 score	特征 trait	标准 criteria	得分 score
最大体长(L)/cm maximum length	20<L≤40	+	与本地物种竞争能力 competition with native species	低/不存在	+
	40<L≤60	++		中度	++
	L> 60	+++		高	+++
相对频率(P)/% relative frequency	0<P≤10	+	食性 feeding habits	窄食性	+
	10<P≤30	++		较广食性	++
	30<P≤100	+++		广食性	+++
建群历史 history of establishment	0~7个国家	+	对温度适应性 temperature tolerance	低	+
	8~15个国家	++		中度	++
	> 15个国家	+++		高	+++
在野外繁殖的能力 ability to breed in the wild	低	+	对低溶解氧耐受性 tolerance to low dissolved oxygen	低	+
	中度	++		中度	++
	高	+++		高	+++

注: “+”表示特征分为低; “++”表示特征分为中; “+++”表示特征分为高; 下同。
Notes: “+” indicates that the feature is classified as low; “++” indicates that the feature is of medium level; “+++” indicates that the feature is highly rated; the same below.

为“生物地理学/历史”和“生物学/生态学”两组，分别有 3 个子类和 5 个子类，各部分名称和得分范围^[16]：驯化/栽培 (-2~4 分)、气候/分布及引入风险、是否在别处入侵 (与第 2 部分得分总和的范围为 -1~20 分)、不受欢迎的特征 (-1~12 分)、资源开采 (0~7 分)、繁殖 (-4~7 分)、扩散机制 (-6~9 分)、耐受性特征 (-6~9 分)，分数范围为 -20~68。

由于 FISK 对每个物种的每个响应都有确定性得分 (1=非常不确定；2=大多不确定；3=大多确定；4=非常确定)，评估者回答问题时，需列出依据和答案置信度，分数体现了物种入侵的能力以及利于入侵的优势条件^[16, 23]；分数小于 1 时，为低或无入侵风险；分数大于等于 1 即有入侵风险，且分数越高，入侵风险越高。

$$CF = \sum_{i=1}^{49} C_{Qi} / (4 \times 49)$$

式中，CF 为置信因子，C_{Qi} 为第 i 个问题的置

信度。评估所需的资料来自 Fishbase 网站、国际应用生物科学中心数据库 (CABI)、全球入侵物种数据库 (GISD) 等。

2 结果

2.1 外来鱼种类组成

调查期间共采集到 135 种鱼类，隶属于 8 目 24 科，包括外来鱼类 20 种 (表 2)，占鱼类总种类数的 14.81%。江津江段调查到的外来鱼类种类数最多，为 11 种，其次为宜宾和万州江段，均为 7 种，丽江江段和洪湖未监测到外来鱼类，其他江段采集到的外来鱼类为 1~6 种。根据 22 个江段外来鱼类的发生率，只有 10% (2 种) 的外来鱼类发生率较高，5% (1 种) 的发生率中等，其余 85% (17 种) 的发生率较低。调查记录的外来物种起源地最多的是亚洲 (50%)，其次是非洲 (15%)、北美洲 (15%)、欧洲 (15%) 和南美洲 (5%)。已记录的外来鱼类中有 65% (13 种) 属于

表 2 外来鱼类基本信息及引入时间

Tab. 2 Basic information and invasion timeline of exotic fishes

种类 species	原生范围 native range	基本气候带 basic climatic zone	发生率/% incidence rate	保护状况 conservat-ion status	引入年份 introduction year	参考文献 references
杂交鲟 <i>Acipenser</i> sp.	亚洲	寒温带	63.64	未评估	—	—
散鳞镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis amurensis</i>	欧洲	温带	54.55	未评估	1958	[24]
麦瑞加拉鲮 <i>Cirrhina mrigala</i>	亚洲	亚热带	27.27	未评估	1962	[24]
梭鲈 <i>Sander lucioperca</i>	欧洲	温带	22.73	无危	1960	[25]
大鳞鲂 <i>Luciobarbus capito</i>	欧洲	温带	22.73	易危	2003	[26]
尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	非洲	热带	18.18	无危	1978	[24]
齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i>	非洲	热带	18.18	无危	1978	[24]
斑点叉尾鲷 <i>Ictalurus punctatus</i>	北美洲	温带	13.64	无危	1983	[27]
湘云鲫 <i>Carassius auratus wucaiensis</i>	亚洲	温带	13.64	未评估	—	—
革胡子鲶 <i>Clarias lazera</i>	非洲	热带	13.64	未评估	1981	[24]
鲢 <i>Cirrhinus molitorella</i>	亚洲	温带	9.09	最少关注	—	—
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	北美洲	温带	4.55	无危	1983	[24]
绿太阳鱼 <i>Lepomis cyanellus</i>	北美洲	温带	4.55	未评估	1999	[28]
松浦镜鲤 <i>Cyprinus carpio Songpu</i>	亚洲	温带	4.55	未评估	1984	[24]
丁鲋 <i>Tinca tinca</i>	亚洲	温带	4.55	无危	1998	[29]
短盖巨脂鲤 <i>Colossoma branchipomuns</i>	南美洲	热带	4.55	未评估	1985	[24]
锦鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	亚洲	温带	4.55	未评估	—	—
西伯利亚鲟 <i>Acipenser baerii</i>	亚洲	寒温带	4.55	极危	1995	[30]
青海湖裸鲤 <i>Gymnocypris przewalskii</i>	亚洲	温带	4.55	无危	—	—
食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	亚洲	温带	4.55	无危	1924	[11]

温带气候带, 20% (4 种) 和 10% (2 种) 属于热带和寒温带地区。根据世界自然保护联盟 (IUCN) 红色名录的保护状况, 50% 的物种未进行评估, 40% 的物种属于无危级别, 调查到的大鳞鲃处于易危状态, 西伯利亚鲟处于极危状态。

2.2 鱼类来源比较

Mann-Whitney U 检验结果显示, 外来鱼类 ($U=473.0$, $P<0.001$) 的发生率显著低于本地种, 此外, Spearman 等级相关性表明, 外来鱼类的

数量与各江段调查到的鱼类总数量 ($R=0.567$, $P<0.05$) 显著正相关。

2.3 入侵风险评估

根据选择标准, 对调查到的 20 个外来物种进行入侵性筛选。FIST 结果显示, 6 种 (30%)、6 种 (30%) 和 8 种 (40%) 分别被认为具有高、中、低入侵风险。高风险物种包括尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、散鳞镜鲤、绿太阳鱼、麦瑞加拉鲮、食蚊鱼 (表 3)。

表 3 外来鱼类入侵性筛选实验结果
Tab. 3 Results of invasive screening test for exotic fishes

物种 species	最大 体长 maximum length	相对 频率 relative frequency	建群 历史 history of establishment	野外繁殖 能力 ability to breed in the wild	与本地物种 竞争能力 competition with native specie	食性 feeding habits	温度耐 受性 temperature tolerance	对低溶解氧 耐受性 tolerance to low dissolved oxygen	入侵风险 百分比/% invasion risk
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	+	++	+++	+++	+++	+++	++	+++	高(62.5)
齐氏罗非鱼 <i>C. zillii</i>	+	++	+++	+++	+++	+++	++	+++	高(62.5)
散鳞镜鲤 <i>C. carpio</i> var. <i>specularis amurensis</i>	+	+++	++	+++	+++	+++	+	+++	高(62.5)
杂交鲟 <i>Acipenser</i> sp.	+++	+++	++	++	+++	+++	++	++	中(50.0)
斑点叉尾鲟 <i>I. punctatus</i>	+	++	++	+++	+++	+++	+++	+	中(50.0)
梭鲈 <i>S. lucioperca</i>	+	++	+++	++	+++	++	++	+	低(25.0)
大口黑鲈 <i>M. salmoides</i>	+	+	++	+++	+++	++	+	++	低(25.0)
大鳞鲃 <i>L. capito</i>	++	++	+++	++	+++	++	++	+++	中(37.5)
绿太阳鱼 <i>L. cyanellus</i>	+	+	+	+++	+++	+++	+++	+++	高(62.5)
麦瑞加拉鲮 <i>C. mrigala</i>	+	+++	+	+++	+++	+++	+	+++	高(62.5)
松浦镜鲤 <i>C. carpio</i> Songpu	+	+	+++	++	++	+++	++	++	低(25.0)
丁鲈 <i>T. tinca</i>	+	+	+++	++	+++	+++	++	+++	中(50.0)
短盖巨脂鲤 <i>C. branchipomuns</i>	+	+	+++	++	+++	+++	+	++	中(37.5)
锦鲤 <i>C. carpio</i>	+	+	+	+	+	++	++	++	低(12.5)
湘云鲫 <i>Triploid crucian</i>	+	++	+	+	+	++	+++	+++	低(25.0)
鲮 <i>C. molitorella</i>	+	++	+	++	+	++	+	+++	低(12.5)
革胡子鲶 <i>C. lazera</i>	++	++	++	+++	+++	+++	+	+++	中(50.0)
西伯利亚鲟 <i>A. baerii</i>	+++	+	+	+	+	++	++	+	低(12.5)
青海湖裸鲤 <i>G. przewalskii</i>	++	+	+	+	+	++	++	+++	低(12.5)
食蚊鱼 <i>G. affinis</i>	+	+	+	+++	+++	+++	+++	+++	高(62.5)

Youden's J 提供的最佳阈值被选择为 17, 这是用于校准 FISK 以区分中等和高风险物种的分数。由于该阈值导致无入侵物种被列为低风险物种, 因此实验保留了低风险物种的 FISK 评分区间为-15~0。FISK 评分结果显示, 12 种 (60%) 物种被归类为中等风险, 8 种 (40%) 物种被分类为高风险 (表 4)。FIST 初步筛选给出 6 种 (30%) 为入侵物种, 14 种 (70%) 为非入侵物

种。其中, 非入侵性的 14 个物种中, FISK 能够正确地将 85.71% 归类为中等风险, 入侵性的 6 个物种中 FISK 评估能够将 83.33% 归类为高风险。此外, 被 FIST 归类为非入侵性的 14 个物种的 FISK 评分为 6.5~25.0, 而被 FIST 分类为入侵性的 6 个物种的得分为 19~32, 外来鱼类的平均 CF 为 0.869。

20 种外来物种在长江中上游 (含洞庭湖) 水

表 4 基于外来水生生物风险筛选工具的鱼类入侵风险等级

Tab. 4 Risk level of fish invasion based on FISK for exotic aquatic organisms

种类 species	FISK评分 FISK score	置信因子 confidence factor	入侵性 invasiveness
齐氏罗非鱼 <i>C. zillii</i>	32.0±2.5	0.885±0.015	高
麦瑞加拉鲮 <i>C. mrigala</i>	26.0±2.0	0.845±0.025	高
散鳞镜鲤 <i>C. carpio</i> var. <i>specularis amurensis</i>	26.0±3.0	0.880±0.010	高
革胡子鲶 <i>C. lazera</i>	25.0±1.5	0.865±0.015	高
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	25.0±1.0	0.935±0.035	高
食蚊鱼 <i>G. affinis</i>	24.0±0.5	0.890±0.010	高
杂交鲟 <i>Acipenser</i> sp.	24.0±3.0	0.915±0.010	高
大鳞鲃 <i>L. capito</i>	21.0±1.0	0.840±0.020	高
绿太阳鱼 <i>L. cyanellus</i>	19.0±1.0	0.825±0.035	中
梭鲈 <i>S. lucioperca</i>	15.0±2.0	0.825±0.025	中
大口黑鲈 <i>M. salmoides</i>	15.0±1.5	0.905±0.025	中
短盖巨脂鲤 <i>C. branchyomuns</i>	14.0±1.0	0.880±0.010	中
斑点叉尾鲷 <i>I. punctatus</i>	13.0±2.0	0.890±0.010	中
丁鲋 <i>T. tinca</i>	13.0±1.5	0.870±0.015	中
松浦镜鲤 <i>C. carpio</i> Songpu	8.5±1.0	0.845±0.020	中
青海湖裸鲤 <i>G. przewalskii</i>	8.0±2.5	0.855±0.015	中
锦鲤 <i>C. carpio</i>	7.0±1.0	0.875±0.010	中
鲮 <i>C. molitorella</i>	7.0±1.5	0.830±0.020	中
湘云鲫 <i>Triploid crucian</i>	7.0±1.0	0.860±0.035	中
西伯利亚鲟 <i>A. baerii</i>	6.5±2.0	0.860±0.020	中

域的风险评估分值为 6.5~32.0，风险阈值为 17，使用 ROC 曲线 (图 2) 对 FISK 评估结果进行验

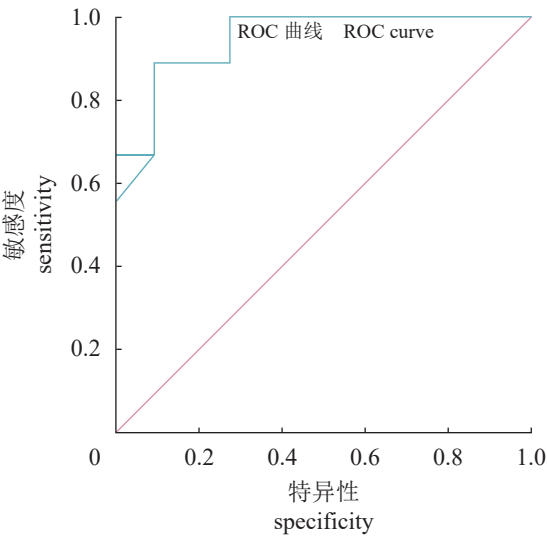


图 2 基于 ROC 曲线的外来鱼类入侵风险评估结果的灵敏性评价

Fig. 2 The effectiveness of risk outcome of exotic fishes based on ROC curve analysis

证，其 AUC 值为 0.944 (0.839~1.000)，说明 FISK 评估方法对物种入侵性的判别能力较高，能够判别当前和气候变化情景下外来鱼类在长江中上游 (含洞庭湖) 水域是否具有入侵风险。

3 讨论

3.1 外来鱼类种类组成

本次调查发现长江中上游水域外来鱼类有 20 种，对比长江渔业资源与环境调查 (2017—2021) 专项中 2017—2021 年使用刺网、地笼等网具在整个长江流域调查到的 30 种外来鱼类^[9]，有很多相同的物种 (杂交鲟、丁鲋、鲮、麦瑞加拉鲮、散鳞镜鲤、锦鲤、食蚊鱼、大口黑鲈等)，同时未采集到露斯塔野鲮 (*Labeo rohita*)、莫桑比克罗非鱼 (*O. mossambicus*)、下口鲶 (*Hypostomus plecostomus*)、大眼华鲮 (*Sinibrama macrops*) 等外来鱼类个体。这种差异的产生很可能是由于调查方法、调查时间和调查江段的不同所导致。本研究中记录的绝大多数外来物种都

来自热带和温带地区, 同时亚洲、欧洲、非洲以及北美洲来源鱼类较多, 而南美洲最少。南美洲拥有地球上最多样化的鱼类动物群, 存在的淡水和海洋动物群物种加起来超过 9 000 种, 约占世界各地总数的 27%^[31], 我国从国外引进的鱼类主要来源于南美洲 (156 种, 35.54%)^[32], 但更多是作为观赏鱼引入, 而本次调查到的外来鱼类更多是养殖品种逃逸。

外来鱼种类数从江段分布来看, 干流>支流>湖泊, 在干流三峡水库区江段采集到的外来鱼种类数较多。1988—1989 年, 三峡水库蓄水前外来鱼种类数仅 2 种, 到 2008 年的蓄水初期增加到了 8 种^[33], 2020 年董纯等^[34]在库区共监测到外来鱼类 16 种。本次调查在库区发现外来鱼类 11 种, 三峡库区外来鱼类入侵形势不断严峻^[35-36]。这可能是因为库区的环境和饵料基础更能满足外来鱼类的生存需要, 在大坝阻隔作用下, 库区水深加深、流速减缓、水体营养物资不断累积, 这为外来鱼类的生存提供了充足的栖息空间和食物^[37]。

3.2 外来鱼类入侵风险评估

外来种入侵风险等级主要是依据风险阈值进行划分, 而风险阈值是根据物种的得分通过 Youden 指数计算而来, 故风险阈值会受到评估者、评估区域等因素的影响, 不同区域的风险阈值存在一定差异。本研究风险阈值为 17, 而甲鲇科 (Loricariidae) 鱼类在中北部生态区的风险阈值为 12.5, 而金鱼在珠江下游、湄南河和雅鲁藏布江中游的风险阈值分别为 31、31 和 37^[38]。尽管不同地区外来鱼类入侵风险阈值存在一定差异, 但 Dodd 等^[39]研究表明外来鱼类在不同流域间的入侵风险变化较小, 风险阈值对得分显著高于或低于阈值的物种风险等级评估影响较小。通常得分显著高于阈值的鱼类都有强大的环境适应力^[40]、表型适应性^[41]、繁殖能力^[42]和竞争力^[43]。本研究中 FISK 确定的 8 种高风险鱼类, 均有着极强适应能力, 如食蚊鱼有着很宽的盐度和温度生存范围, 还可在重污染环境及低溶解氧的水体中生存^[44]。相比本地鲃对化学污染敏感、对干扰的耐受能力较差, 杂交鲃可以耐受一定盐度, 部分杂交鲃还能耐受长时间干露, 较本地鲃具有更多优势^[17]。而革胡子鲃在溶解氧低至 0.128 mg/L 的水域中仍

能正常存活, 生长速率是本地鲃的 5~6 倍^[45]。齐氏罗非鱼和尼罗罗非鱼均有着极强的环境适应能力, 以尼罗罗非鱼为例, 其对温度、盐度、溶解氧的耐受范围都很广, 适温范围为 16~42 °C^[46]。尼罗罗非鱼繁殖能力强且有强烈的护幼行为, 与多种淡水鱼和海洋鱼类相比^[47], 性成熟早、繁殖周期短的特点非常突出, 幼鱼一般会集聚于亲鱼附近, 遇危险会被亲鱼衔入口中^[48]。本研究 FISK 确定的 8 种高风险鱼类在分布范围上均表现出很强的扩散能力。这 8 种鱼类多属热带或亚热带鱼类, 在我国有着较广的适生区, 而长江水系发达, 纵横交错, 为这些外来鱼类在自然环境中的扩散提供了条件。

8 种高入侵风险鱼类中, 罗非鱼和食蚊鱼入侵后将捕食本土鱼类的鱼卵, 挤占本土鱼类的食物和生存空间, 导致本土鱼类种群发展受限。革胡子鲃作为典型的肉食动物, 对本土鱼类威胁较大, 也能通过竞争作用影响本土胡子鲃和其他本土鱼类的生存。而散鳞镜鲤、麦瑞加拉鲃和大鳞鲃对本地鱼类也有着极强的竞争排斥。

3.3 长江流域土著鱼类资源保护对策

为避免外来鱼类数量持续增加对长江土著鱼类多样性造成影响, 采取有效措施来应对外来鱼类入侵迫在眉睫。建议通过以下途径开展长江流域外来鱼类防治: ①加强宣传教育。本研究评估的高入侵风险鱼类中, 罗非鱼、散鳞镜鲤、麦瑞加拉鲃和大鳞鲃等作为养殖良种, 已在我国形成较大养殖规模, 被认为大范围传播的风险很高, 应对养殖业相关从业人员加强生物入侵相关知识的培训。②建立长江流域外来鱼类入侵风险评价体系。目前国内暂无专门针对长江流域外来鱼类入侵风险评价体系, 建议针对长江流域生态环境特点, 选取合适的指标建立更适合长江流域的评价体系。③开展重点监测。针对本研究确定的杂交鲃、罗非鱼、散鳞镜鲤和麦瑞加拉鲃等 8 种高入侵风险鱼类开展重点调查, 在三峡库区、鱼类保护区等重要区域设置固定监测站点。④开展本土特有鱼类资源保护。针对长江上游珍稀特有鱼类开展增殖放流、繁殖研究、栖息地生境修复等多项保护措施以保护本土特有鱼类的资源量。

参考文献 (References):

- [1] Runyon J B, Butler J L, Friggens M M, *et al.* Invasive species and climate change[M]/Finch D M. Climate change in grasslands, shrublands, and deserts of the Interior American West: a review and needs assessment. Fort Collins: U. S. Department of Agriculture, Forest Service: Rocky Mountain Research Station, 2012: 97-115.
- [2] Levine J M, D'Antonio C M. Forecasting biological invasions with increasing international trade[J]. *Conservation Biology*, 2003, 17(1): 322-326.
- [3] 鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 等. 近十年中国生物入侵研究进展[J]. 生物多样性, 2012, 20(5): 581-611.
- Ju R T, Li H, Shi Z R, *et al.* Progress of biological invasions research in China over the last decade[J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(5): 581-611 (in Chinese).
- [4] Weber E, Li B. Plant invasions in China: what is to be expected in the wake of economic development?[J]. *Bioscience*, 2008, 58(5): 437-444.
- [5] Catford J A, Vesk P A, Richardson D M, *et al.* Quantifying levels of biological invasion: towards the objective classification of invaded and invulnerable ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 44-62.
- [6] Daehler C C, Carino D A. Predicting invasive plants: prospects for a general screening system based on current regional models[J]. *Biological Invasions*, 2000, 2(2): 93-102.
- [7] Benke K K, Steel J L, Weiss J E. Risk assessment models for invasive species: uncertainty in rankings from multi-criteria analysis[J]. *Biological Invasions*, 2011, 13(1): 239-253.
- [8] 刘飞, 林鹏程, 黎明政, 等. 长江流域鱼类资源现状与保护对策[J]. 水生生物学报, 2019, 43(S): 144-156.
- Liu F, Lin P C, Li M Z, *et al.* Situations and conservation strategies of fish resources in the Yangtze River basin[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(S): 144-156 (in Chinese).
- [9] 杨海乐, 沈丽, 何勇凤, 等. 长江水生生物资源与环境本底状况调查 (2017—2021)[J]. 水产学报, 2023, 47(2): 1-28.
- Yang H L, Shen L, He Y F, *et al.* Status of aquatic organisms resources and their environments in the Yangtze River system (2017-2021)[J]. *Journal of fisheries of China*, 2023, 47(2): 1-28 (in Chinese).
- [10] 曹文宣. 十年禁渔是长江大保护的重要举措[J]. 水生生物学报, 2022, 46(1): 1.
- Cao W X. 10-year fishing ban is an important measure for the great protection of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(1): 1 (in Chinese).
- [11] 王亚民, 曹文宣. 中国水生外来入侵物种对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 7-13.
- Wang Y M, Cao W X. The strategies of aquatic invasive alien species (IAS) in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 7-13 (in Chinese).
- [12] 陈宜瑜. 中国动物. 硬骨鱼纲: 鲤形目 (中卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- Chen Y Y. Fauna of China: Perciformes: Cypriniformes (Volume II) [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese).
- [13] 乐佩琦. 中国动物志. 硬骨鱼纲: 鲤形目 (下卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 273-431.
- Le P Q. Fauna of China. Osteophora: Cypriniformes (Volume III) [M]. Beijing: Science Press, 1999: 273-431 (in Chinese).
- [14] Magalhães A L B, Orsi M L, Pelicice F M, *et al.* Small size today, aquarium dumping tomorrow: sales of juvenile non-native large fish as an important threat in Brazil[J]. *Neotropical Ichthyology*, 2017, 15(4): e170033.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李奥璞, 范俊韬, 钱锋, 等. 长江流域外来鲟入侵风险评估、适生区预测及影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1717-1728.
- Li A P, Fan J T, Qian F, *et al.* Invasion risk assessment, suitability regions prediction and influencing factors analysis of exotic sturgeon and paddlefish in the Yangtze River Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(5): 1717-1728 (in Chinese).
- [18] Youden W J. Index for rating diagnostic tests[J]. *Cancer*, 1950, 3(1): 32-35.
- [19] Bewick V, Cheek L, Ball J. Statistics review 13: receiver operating characteristic curves[J]. *Critical Care*, 2004, 8(6): 508-512.
- [20] Tricarico E, Vilizzi L, Gherardi F, *et al.* Calibration of FI-ISK, an invasiveness screening tool for nonnative freshwater invertebrates[J]. *Risk Analysis*, 2010, 30(2): 285-292.
- [21] Saba A O, Ismail A, Zulkifli S Z, *et al.* Species composition and invasion risks of alien ornamental freshwater fishes from pet

- stores in Klang Valley, Malaysia[J]. Scientific Reports, 2020, 1(1): 17205.
- [22] Lawson Jr L L, Hill J E, Hardin S, *et al.* Evaluation of the fish invasiveness screening kit (FISK v2) for peninsular Florida[J]. Management of Biological Invasions, 2015, 6(4): 413-422.
- [23] 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.
- 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 (in Chinese).
- [24] 李振宇, 解焱. 中国外来入侵种 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- Li Z Y, Xie Y. Invasive alien species in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002 (in Chinese).
- [25] 付监贵, 张振早, 李彩娟, 等. 温度对不同体质量梭鲈幼鱼耗氧率、排氨率及窒息点的影响 [J]. 水产养殖, 2018, 39(10): 18-22.
- Fu J G, Zhang Z Z, Li C J, *et al.* Effect of temperature on oxygen consumption rate, ammonia excretion rate and suffocation point of *Sander lucioperca* juvenile[J]. Journal of Aquaculture, 2018, 39(10): 18-22 (in Chinese).
- [26] 徐伟, 耿龙武, 李池陶, 等. 大鳞鲃的人工繁殖、胚胎发育和耐盐碱测定 [J]. 水产学报, 2011, 35(2): 255-260.
- Xu W, Geng L W, Li C T, *et al.* The artificial propagation, embryonic development and saline-alkali tolerant experiment of *Barbus capito*[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(2): 255-260 (in Chinese).
- [27] 楼允东. 我国鱼类引种研究的现状与对策 [J]. 水产学报, 2000, 24(2): 185-192.
- Lou Y D. Present situation and countermeasure of the study on fish introduction in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2000, 24(2): 185-192 (in Chinese).
- [28] 夏奉梅, 陈会明, 罗永强, 等. 绿太阳鱼 *Lepomis cyanellus* Rafinesque, 1819 入侵贵州的风险 [J]. 贵州科学, 2022, 40(3): 33-36.
- Xia F M, Chen H M, Luo Y Q, *et al.* Invasion risk of *Lepomis cyanellus* Rafinesque, 1819 in Guizhou Province[J]. Guizhou Science, 2022, 40(3): 33-36 (in Chinese).
- [29] 李家乐, 董志国, 李应森, 等. 中国外来水生动植物 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2007.
- Li J L, Dong Z G, Li Y S, *et al.* Foreign aquatic animals and plants from China[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2007 (in Chinese).
- [30] 吴文呈, 徐强松. 西伯利亚鲟的养殖优点与建议 [J]. 福建水产, 2000(2): 78-80.
- Wu W C, Xu Q S. Advantages and proposals about the culture of *Acipenser baeri* Brandt[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2000(2): 78-80 (in Chinese).
- [31] Reis R E, Albert J S, Di Dario F, *et al.* Fish biodiversity and conservation in South America[J]. Journal of Fish Biology, 2016, 89(1): 12-47.
- [32] Xiong W, Sui X Y, Liang S H, *et al.* Non-native freshwater fish species in China[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2015, 25(4): 651-687.
- [33] 解崇友, 牛亚兵, 罗德怀, 等. 三峡库区重要支流鱼类多样性初探 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2747-2756.
- Xie C Y, Niu Y B, Luo D H, *et al.* A preliminary study on fish diversity for some important branches of Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 2747-2756 (in Chinese).
- [34] 董纯, 杨志, 朱其广, 等. 三峡水库外来鱼类资源状况初步研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(5): 928-938.
- Dong C, Yang Z, Zhu Q G, *et al.* Preliminary study on resource status of alien fish in Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(5): 928-938 (in Chinese).
- [35] 魏念, 张燕, 吴凡, 等. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1858-1869.
- Wei N, Zhang Y, Wu F, *et al.* Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1858-1869 (in Chinese).
- [36] 林鹏程, 刘飞, 黎明政, 等. 三峡水库蓄水后长江上游鱼类群聚沿河流-水库梯度的空间格局 (英文)[J]. 水生生物学报, 2018, 42(6): 1124-1134.
- Lin P C, Liu F, Li M Z, *et al.* Spatial pattern of fish assemblages along the river-reservoir gradient caused by the Three Gorges Reservoir (TGR)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(6): 1124-1134.
- [37] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 254-258.
- Zhang Y, Zheng B H, Liu H L, *et al.* Characteristics of phytoplankton composition with analysis of its impact factors after impounding of the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(2): 254-258 (in

- Chinese).
- [38] 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: 以甲鲶科鱼类为例 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(4): 494-503.
- 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 Loricariidae species[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4): 494-503 (in Chinese).
- [39] Dodd J A, Vilizzi L, Bean C W, *et al.* At what spatial scale should risk screenings of translocated freshwater fishes be undertaken—river basin district or climo-geographic designation?[J]. *Biological Conservation*, 2019, 230: 122-130.
- [40] Arbačiauskas K, Lesutienė J, Gasiūnaitė Z R. Feeding strategies and elemental composition in Ponto-Caspian peracaridans from contrasting environments: can stoichiometric plasticity promote invasion success?[J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58(5): 1052-1068.
- [41] Reid D F, Orlova M I. Geological and evolutionary underpinnings for the success of Ponto-Caspian species invasions in the Baltic Sea and North American Great Lakes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, 59(7): 1144-1158.
- [42] Grabowska J. Reproductive biology of racer goby *Neogobius gymnotrachelus* in the Włocławski Reservoir (Vistula River, Poland)[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2005, 21(4): 296-299.
- [43] MacNeil C, Prenter J. Differential microdistributions and inter-specific interactions in coexisting native and introduced *Gambusia* spp. (Crustacea: Amphipoda)[J]. *Journal of Zoology*, 2000, 251(3): 377-384.
- [44] Staub B P, Hopkins W A, Novak J, *et al.* Respiratory and reproductive characteristics of eastern mosquitofish (*Gambusia holbrooki*) inhabiting a coal ash settling basin[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2004, 46(1): 96-101.
- [45] 汪留全, 程云生. 池养条件下革胡子鲶仔幼鱼摄食习性与生长的初步研究 [J]. 水产学报, 1990, 14(2): 105-113.
- Wang L Q, Cheng Y S. On the feeding habits and growth for larval of *Clarias lazera* under pond nursery[J]. *Journal of fisheries of China*, 1990, 14(2): 105-113 (in Chinese).
- [46] 李思发, 李晨虹, 李家乐, 等. 尼罗罗非鱼五品系生长性能评估 [J]. 水产学报, 1998, 22(4): 28-35.
- Li S F, Li C H, Li J L, *et al.* On station evaluation of growing performance of five strains of Nile tilapia[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1998, 22(4): 28-35 (in Chinese).
- [47] 陈刚. 中国淡水和近海鱼类的生态对策研究 [J]. 湛江水产学院学报, 1996, 16(2): 7-14.
- Chen G. Ecological strategy of freshwater and inshore fishes in China[J]. *Journal of Zhanjiang Fisheries College*, 1996, 16(2): 7-14 (in Chinese).
- [48] 徐旭丹, 刘强, 黄伟, 等. 外来养殖鱼类的入侵风险评估及防控对策——以尼罗罗非鱼为例 [J]. 生物安全学报, 2022, 31(3): 278-288.
- Xu X D, Liu Q, Huang W, *et al.* Risk assessment and control of the exotic farmed fish, the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Journal of Biosafety*, 2022, 31(3): 278-288 (in Chinese).

Risk assessment of invasive fish species in the middle and upper reaches of the Yangtze River (including Dongting Lake)

TIAN Panpan , DENG Huatang , WANG Daoqun , YU Lixiong , GAO Lei , LIU Shaopin ,
CHEN Daqing , DUAN Xinbin , WANG Ke , TIAN Huiwu *

National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing, Yangtze River Fisheries Research Institute,
Chinese Academy of Fishery Science, Wuhan 430223, China

Abstract: To understand the current status of exotic fishes in the middle and upper reaches of the Yangtze River and to assess their invasion risks, investigations on exotic fishes were conducted using fixed gill nets, drift nets, and ground traps at 22 river sections of the main stream and tributaries of the middle and upper reaches of the Yangtze River, as well as at Dongting Lake and Honghu Lake from May to July and from October to December in 2022. The results showed that a total of 135 species of fish belonging to 8 orders 24 families 20 species of exotic fishes were collected during the survey period. The investigation in the Jiangjin section revealed the highest number of exotic fish species, with the highest occurrence frequency being the exotic sturgeon. Through the Fish Invasion Screening Test (FIST), six high risk invasive fish species were preliminarily screened, including *Oreochromis niloticus*, *Coptodon zillii* and *Cyprinus carpio*. Further analysis of invasion risk was conducted using the Fish Invasion Screening Kit (FISK), and a total of 8 species of fish were identified as high invasion risk, *C. zillii*, *Clarias lazera* and *Cirrhina mrigalaculding*. The ROC curve was used to validate the FISK scoring results, which showed an AUC value of 0.944, indicating that the FISK evaluation method has a high ability to distinguish species invasiveness and can distinguish whether foreign fish have invasion risks in the study water under current and climate change scenarios. Research has shown that based on the risk assessment results of invasive fish species mentioned above, there are already multiple high-risk fish species in the middle and upper reaches of the Yangtze River, which may seriously endanger the fishery resources and the structure and function of the aquatic ecosystem in the middle and upper reaches of the Yangtze River. It is recommended to increase the management and control of high-risk invasive species, while strengthening the protection of indigenous fish populations, in order to avoid significant damage to the Yangtze River indigenous fish resources caused by invasive species. This study can provide countermeasures for the protection of Yangtze River indigenous fish resources.

Key words: exotic fishes; invasion risk; invasive screening of fish; the middle and upper reaches of the Yangtze River

Corresponding author: TIAN Huiwu. E-mail: tianhw@yfi.ac.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2022YFC3202001); National Natural Science Foundation of China (51909271, 32202942, 51509262); China Three Gorges Construction Engineering Corporation Project (JG/18056B, JG/18057B); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD09); Aquatic Science and Technology Innovation Alliance of Chongqing (2021183)