

广西内陆水域外来鱼类的现状及应对策略

邹有存¹, 吴志强^{1,2}, 刘昊¹, 乔梁¹, 何佳洋¹, 陈一竹¹, 黄亮亮^{1,3}

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006; 2. 桂林理工大学 广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林, 541006; 3. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006)

摘要: 通过实地采样等手段, 对广西内陆水系外来鱼类的种类和分布开展了深入的研究, 研究表明: 广西内陆水域共记录外来鱼类23种, 隶属于7目13科20属, 其中鲈形目(9种)和鲤形目(5种)是主要类群。水产养殖引种是外来鱼类引入的首要途径, 涉及种类占比高达82.61%。齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*)与尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)已成为绝对优势种, 分布范围覆盖几乎全部调查样点。13种鱼类已形成入侵, 4种处于建群阶段。空间分布上, “北齐南尼”南北地理分异, 源于齐氏罗非鱼对低温更强的适应性与高繁殖力; 干支流差异格局, 红水河(16种)等干流物种数远高于上游支流。水电站建设造成的静水环境显著改变了本土鱼类的生境, 为适应静水环境的外来鱼类提供了扩张的“生态位机会”。需构建“源头预防、监测预警、控制清除、公众参与”的四位一体化防控策略体系。本研究可为广西乃至我国南方地区的水域生态安全保障和生物多样性保护提供科学依据和决策参考。

关键词: 外来鱼类; 分布特征; 应对策略; 内陆水域; 广西

中图分类号: S 932.4; Q 958.1

文献标志码: A

生物入侵是全球三大环境问题之一, 影响全球生态系统结构和功能^[1-2]。水产养殖、观赏渔业等原因导致的跨区域引种日益频繁, 部分外来种逃逸并建立自然种群, 导致全球范围内的淡水鱼类入侵问题日益严重^[3-4]。作为水产养殖大国和引进国, 已引入的淡水外来鱼类据不完全统计高达439种, 部分物种已成功逃逸并建群, 对我国本土水生生物群落及其栖息地构成了日益严峻的威胁^[5]。

广西壮族自治区气候横跨北热带至中亚热带。地缘位置优越, 西南与越南接壤, 东连广东, 北邻湘黔, 西接云南, 南临北部湾。其典型的喀斯特地貌和丰沛的降水孕育了以珠江水系为主体的复杂立体水网, 并与云南、贵州及越南水网紧密连通(图1), 成为外来鱼类扩散的天然廊道。广西是生物多样性热点区域和淡水渔业主产区,

也是我国遭受外来鱼类入侵最严重的地区之一^[6]。

水利设施、航道开发和过度捕捞使鱼类通道受阻、产卵场消失, 导致渔业资源急剧衰退^[7]。外来鱼类不仅与本地土著鱼类争夺食物和生存空间, 捕食其鱼卵和幼鱼, 还可能通过杂交导致本地物种基因污染, 甚至引发疾病传播, 对渔业资源和水域生态系统的健康稳定造成了不可逆转的损害^[8]。

目前, 广西内陆水域外来鱼类的研究多集中于单一物种或局部水域的调查, 鱼类群落结构或某种外来鱼类的建群状况、繁殖特性及群体形态差异等研究, 缺乏对整个广西地区外来鱼类入侵现状的系统宏观性分析^[9-17]。因此, 本文旨在通过实地采样等手段, 全面梳理和总结近年来广西内陆水域外来鱼类的入侵现状, 并在此基础上,

收稿日期: 2025-08-19 修回日期: 2025-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(32060830); 广西科技计划项目(桂科 AD25069074); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2025414)

作者简介: 邹有存(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为鱼类生态学。E-mail: zouyoucun@qq.com

通信作者: 吴志强, E-mail: wuzhiqiang@glut.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

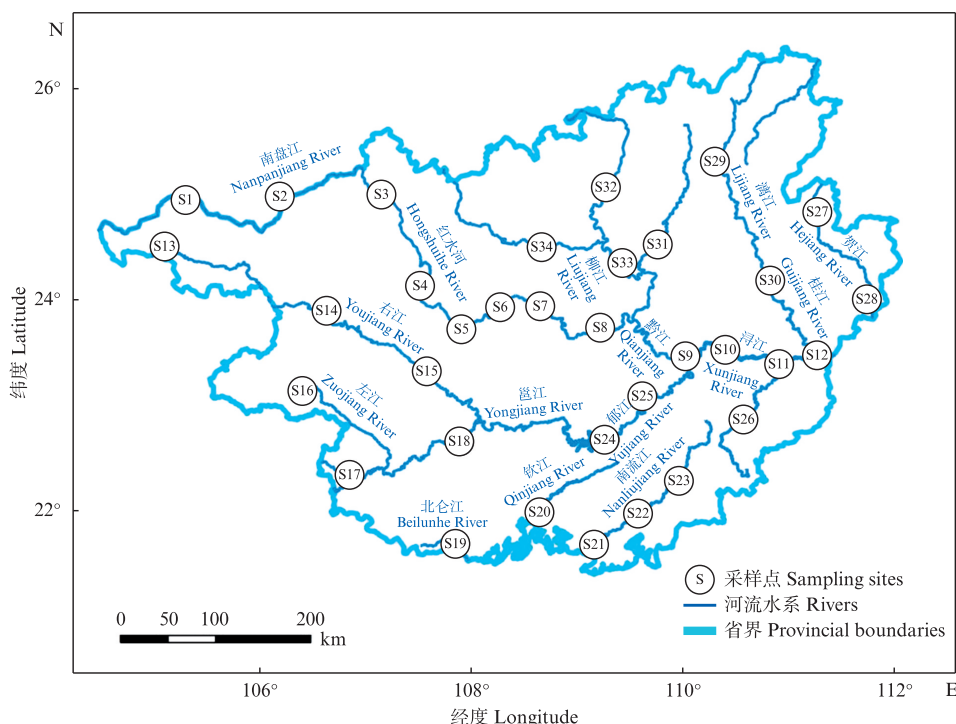
系统地提出一套防控策略体系。

1 研究方法

1.1 研究区域

本研究团队在 2023 年度完成大规模、系统性的广西内陆水域外来鱼类调查项目,首次对广西内陆包括南盘江、红水河、黔江在内的主要江段进行了全面的外来鱼类资源调查采样工作。调

查以广西内陆水域为研究对象,选择南盘江、红水河、黔江、浔江、右江、左江、贺江、漓江、邕江、郁江、南流江、北仑河、钦江等主要江段为主要水域,根据地理连续性及流域关系,将上述江段进一步整合划分为 12 个水系单元:南盘江、红水河、柳江、黔江、浔江、右江、左江、邕江-郁江、贺江、桂江、南流江和其他河流,于主要水系设置采样点共 34 个(图 1)。



S1 天生桥; S2 隆林; S3 天峨; S4 岩滩; S5 大化; S6 都安; S7 红渡; S8 来宾; S9 武宣; S10 平南; S11 藤县; S12 梧州; S13 田林; S14 百色; S15 平果; S16 靖西; S17 龙州; S18 扶绥; S19 那良; S20 陆屋; S21 合浦; S22 张黄; S23 博白; S24 贵港; S25 横州; S26 容县; S27 富川; S28 信都; S29 桂林; S30 昭平; S31 鹿寨; S32 融水; S33 柳州; S34 河池。

S1 Tianshengqiao; S2 Longlin; S3 Tian'e; S4 Yantan; S5 Dahua; S6 Du'an; S7 Hongdu; S8 Laibin; S9 Wuxuan; S10 Pingnan; S11 Tengxian; S12 Wuzhou; S13 Tianlin; S14 Baise; S15 Pingguo; S16 Jingxi; S17 Longzhou; S18 Fusui; S19 Naliang; S20 Luwu; S21 Hepu; S22 Zhanghuang; S23 Bobai; S24 Guigang; S25 Hengzhou; S26 Rongxian; S27 Fuchuan; S28 Xindu; S29 Guilin; S30 Zhaoping; S31 Luzhai; S32 Rongshui; S33 Liuzhou; S34 Hechi

图 1 广西内陆水域外来鱼类采样点图

Fig. 1 Map of sampling sites of alien fish in the inland waters of Guangxi

1.2 采样方法

分别在 4 个季节进行采样,于 2023 年 2 月、5—6 月、8—9 月、11—12 月在广西内陆水域 34 个采样点采集外来鱼类样本,主要采集方式为渔船捕捞。渔船捕捞根据不同河段生境特征选择合适的网具,水浅且急的江段,采用单层刺网(20~50 m×1~2 m,网目 1~6 cm);水深且缓的江段,采用地笼(0.3 m×0.25 m,总长 8 m,网目 4 mm)为主,刺网为辅的方式。每点布设 3 张单层刺网,根据实际情况调整网具规格,平行于河岸放置,间

距>50 m;地笼每点布设 5 个,置于缓流区水底。每次采样持续 12 h。同时,对采样点附近的市场进行补充采样,并走访相关渔业人员,对外来鱼类数据进行补充。采集样品参考《广西淡水鱼类志(第二版)》《珠江鱼类志》《我国常见外来水生生物识别手册》和《中国外来水生动植物》等资料现场鉴定,测量体长(±1 mm)、体质量(±0.1 g)等基础生物学指标,对三种罗非鱼进行繁殖特性研究,取尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*)和伽利略罗非鱼

(*Sarotherodon galilaeus*)的性腺称取质量并鉴定雌雄,并判断发育分期情况,卵巢成熟或接近成熟的罗非鱼样本,从两侧卵巢的前、中、后3个部位采集约0.1 g的卵粒样本,进行卵粒计数(N)。依据文献研究^[14-16]资料及相关网络数据库资料,对采集到的外来鱼类按引种目的分为水产养殖引种、观赏鱼类引种和生物防治引种;按原产地分为非洲、亚洲、欧洲、南美洲等^[18]。

动物试验由桂林理工大学实验动物伦理委员会批准,批准号 GLUT-EAEC2023001。

1.3 数据分析

1.3.1 外来鱼类组成的相似性

基于采样数据构建各主要水系外来鱼类的存在-缺失矩阵(Presence-absence matrices, PAMs),继而采用 Jaccard 相似性系数(Jaccard similarity coefficient, J_{sc})来分析主要外来鱼类物种组成的相似性。计算公式如下:

$$J_{sc} = \frac{c}{a + b - c} \quad (1)$$

式中: J_{sc} 为相似性系数; a 为第一个水系的外来鱼类物种数; b 为第二个水系的外来鱼类物种数; c 为两水系之间共有的外来鱼类物种数。相似级别参照赵金发等^[19]设置:极不相似 $0 < J_{sc} < 0.25$,不相似 $0.25 \leq J_{sc} < 0.50$,中等相似 $0.50 \leq J_{sc} < 0.75$,极相似 $0.75 \leq J_{sc} < 1.00$ 。

1.3.2 基于群落组成的地理聚类分析

引入 Bray-Curtis 相似性指数进行聚类分析,分析 12 个水系外来鱼类组成的相似性。将原始丰度数据转换为相对丰度(即各物种数量占该样点外来鱼类总数量的百分比),生成物种-样本点矩阵^[20],以消除样本量差异的影响。并采用组平均链接法(Group average)进行聚类,在 Primer 5 中完成。

以原始丰度数据为基础,计算样本间的 Bray-Curtis 距离矩阵,并进行主坐标分析(Principal coordinates analysis, PCoA)。为对 PCoA 所展示的群落结构差异提供统计学支持,采用了置换多元方差分析(Permutational variance analysis of variance, PERMANOVA)。该分析以 Bray-Curtis 距离矩阵为基础,通过设置 999 次置换,检验不同分组之间群落组成的总体差异是否具有统计学显著性。当 PERMANOVA 结果显示总体存在显著差异时,采用成对检验(pairwiseAdonis 函数)来确定具体哪些组别之间

存在显著差异。整个分析检验均使用到 vegan 包,两两分组检验使用 pairwiseAdonis 包。以上分析均在 R 4.3.0 软件中进行。

1.3.3 罗非鱼繁殖特性研究

每个水系选取 30 尾卵巢成熟或接近成熟的罗非鱼样本,部分采样点卵巢成熟样本较少,仅对样本量较为充足的样点进行分析,估算个体繁殖力,包括个体绝对繁殖力(F)、体长相对繁殖力(F_L)和体质量相对繁殖力(F_w),公式如下:

$$F = N \times W_o / W_s \quad (2)$$

$$F_L = F / L \quad (3)$$

$$F_w = \frac{F}{W_n} \quad (4)$$

式中: F 为绝对繁殖力,粒; N 为样本卵粒数; W_o 为卵巢质量,g; W_s 为样本质量,g; F_L 为体长相对繁殖力,粒/mm; L 为体长,mm; F_w 为体质量相对繁殖力,粒/g; W_n 为净体质量,g。

1.3.4 外来鱼类入侵现状判断

本研究中外来鱼类为广西内陆水域自然河流中已有分布的鱼类,所以入侵现状判断主要集中在建群和入侵两个阶段,判断依据参考顾党恩^[16]对华南地区主要河流外来鱼类入侵现状来判别。形成了能够自我维持的种群,对本地生态系统构成了最大的威胁,判断为入侵种;对于未达到建群判别标准,或疑似因放生和养殖逃逸被采集的物种则判断为处于引入阶段。

2 广西内陆水域外来鱼类入侵现状

2.1 外来鱼类种类组成

2023 年在广西内陆水域共采集到外来鱼类 7 690 尾,23 种,隶属于 7 目 13 科 20 属。相较于帅方敏等^[14]于 2014—2016 年对珠江水系广西江段 15 个站点的鱼类资源调查得到的 11 种及何佳洋等^[15]以广西内陆水域为研究区域,通过文献收集及历史调查数据,截止至 2021 年 11 月 6 日共记录有外来鱼类 18 种有所增加,反映了外来鱼类入侵问题的日益严峻。

在目级分类上,鲈形目(Perciformes)的种类最多,有 9 种,占 39.13%;其次是鲤形目(Cypriniformes),有 5 种,占 21.74%;鲶形目(Siluriformes)有 4 种,占 17.39%;脂鲤目(Characiformes)有 2 种,占 8.70%;而鲟形目(Acipenseriformes)、鲑形目(Salmoniformes)和鲱形目(Cyprinodontiformes)各只有 1 种。

表 1 广西内陆水域外来鱼类名录
Tab. 1 List of alien fishes in the inland waters of Guangxi

目 Orders	科 Family	属 Genus	物种 Species	来源地 Origin	引种目的 Purpose
鲟形目 Polyodontidae	匙吻鲟科 Polyodontidae	匙吻鲟属 <i>Polyodon</i>	匙吻鲟 <i>Polyodon spathula</i>	北美洲 North America	水产养殖 Aquaculture
鲑形目 Salmoniformes	银鱼科 Salangidae	银鱼属 <i>Neosalanx</i>	太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	亚洲 Asia	水产养殖 Aquaculture
脂鲤目 Characiformes	原唇齿脂鲤科 Prochilodontidae	鲮脂鲤属 <i>Prochilodus</i>	条纹鲮脂鲤 <i>Prochilodus lineatus</i>	南美洲 South America	水产养殖 Aquaculture
	脂鲤科 Characidae	肥脂鲤属 <i>Piaractus</i>	短盖肥脂鲤 <i>Piaractus brachypomus</i>	南美洲 South America	水产养殖 Aquaculture
鲤形目 Characidae	鲤科 Cyprinidae	野鲮属 <i>Labeo</i>	露斯塔野鲮 <i>Labeo rohita</i>	亚洲 Asia	水产养殖 Aquaculture
		鲮属 <i>Cirrhinus</i>	麦瑞加拉鲮 <i>Cirrhinus mrigala</i>	亚洲 Asia	水产养殖 Aquaculture
		鲮属 <i>Megalobrama</i>	厚颌鲮 <i>Megalobrama pellegrini</i>	亚洲 Asia	水产养殖 Aquaculture
		鲤属 <i>Cyprinus</i>	锦鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>haematopterus</i>	亚洲 Asia	观赏 Ornamental
			散鳞镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis</i>	欧洲 Europe	水产养殖 Aquaculture
鲇形目 Siluriformes	鲇科 Bagridae	拟鲇属 <i>Pseudobagrus</i>	长吻鲇 <i>Leiocassis longirostris</i>	亚洲 Asia	水产养殖 Aquaculture
	骨甲鲇科 Loricariidae	翼甲鲇属 <i>Pterygoplichthys</i>	豹纹脂身鲇 <i>Pterygoplichthys pardalis</i>	南美洲 South America	观赏 Ornamental
	鲶科 Ictaluridae	叉尾鲶属 <i>Ictalurus</i>	斑点叉尾鲶 <i>Ictalurus punctatus</i>	北美洲 North America	水产养殖 Aquaculture
	胡子鲇科 Clariidae	胡子鲇属 <i>Clarias</i>	革胡子鲇 <i>Clarias lazera</i>	非洲 Africa	水产养殖 Aquaculture
鲈形目 Cyprinodontiforme	胎鲈科 Poeciliidae	食蚊鱼属 <i>Gambusia</i>	食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	北美洲 North America	生物防治 Biocontrol
鲈形目 Perciformes	丽鱼科 Cichlidae	口孵非鲫属 <i>Oreochromis</i>	尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	非洲 Africa	水产养殖 Aquaculture
			红罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus</i> × <i>O. niloticus</i>	非洲 Africa	水产养殖 Aquaculture
		帚齿非鲫属 <i>Sarotherodon</i>	伽利略罗非鱼 <i>Sarotherodon galilaeus</i>	非洲 Africa	水产养殖 Aquaculture
		切非鲫属 <i>Coptodon</i>	齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i>	非洲 Africa	水产养殖 Aquaculture
		丽体鱼属 <i>Parachromis</i>	马拉丽体鱼 <i>Parachromis managuensis</i>	北美洲 North America	水产养殖 Aquaculture
	塘鳢科 Eleotridae	尖塘鳢属 <i>Oxyeleotris</i>	云斑尖塘鳢 <i>Oxyeleotris marmorata</i>	亚洲 Asia	水产养殖 Aquaculture
	太阳鱼科 Centrarchidae	太阳鱼属 <i>Lepomis</i>	蓝鳃太阳鱼 <i>Lepomis macrochirus</i>	北美洲 North America	水产养殖 Aquaculture
			绿太阳鱼 <i>Lepomis cyanellus</i>	北美洲 North America	观赏 Ornamental
		黑鲈属 <i>Micropterus</i>	大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	北美洲 North America	水产养殖 Aquaculture

在科级分类上,丽鱼科(Cichlidae)和鲤科(Cyprinidae)的种类最多,各有 5 种;其次是太阳鱼科(Centrarchidae),有 3 种;其余各科均只有 1~

2 种。丽鱼科鱼类,尤其是各种罗非鱼,是广西水域入侵最为成功的类群。

从引种目的分析,为水产养殖而引进的种类

高达 19 种,占总数的 82.61%,这表明养殖逃逸是广西外来鱼类问题的最主要源头。其次,为观赏目的引进的物种有 3 种,包括已造成严重生态问题的豹纹翼甲鲇(*Pterygoplichthys pardalis*);为生物防治(灭蚊)引进的食蚊鱼(*Gambusia affinis*)也已广泛分布。

从物种原产地来看,广西外来鱼类来源极为广泛,呈现全球化特征。亚洲和北美洲是并列的最大来源地,各贡献了 7 个物种(各占 30.43%);其次为非洲(5 种,21.74%),主要为各类罗非鱼;南美洲和欧洲也有少量物种输入。

2.2 主要入侵鱼类

在 23 种外来鱼类中,有 13 种已经成功入侵,形成了能够自我维持的种群,它们对本地生态系统构成了很大的威胁。

核心入侵种:齐氏罗非鱼(出现频率为 89.71%)、尼罗罗非鱼(77.94%)、伽利略罗非鱼(52.94%)和革胡子鲇(47.06%)。这 4 种鱼类分布最广,出现频率最高。

重要入侵种:豹纹翼甲鲇(41.91%)、麦瑞加拉鲃(38.24%)、露斯塔野鲮(35.29%)、斑点叉尾鲷(35.29%)、大口黑鲈(17.65%)、食蚊鱼(13.24%)、马拉丽体鱼(13.24%)、短盖肥脂鲤(6.62%)、云斑尖塘鳢(6.62%)。

此外,另有 4 种鱼类处于建群阶段,包括太湖新银鱼、条纹鲮脂鲤、长吻鮠和蓝鳃太阳鱼,已建立可繁殖种群,但扩散范围有限;还有 6 种鱼类处于引入阶段,包括匙吻鲟、厚颌鲂、锦鲤等,这些物种目前仅零星发现,尚未形成可自我维持的野外种群,但其潜在的生态适应性意味着未来可能发展为入侵种,需持续监测防控。

2.3 空间分布格局

从整体上看,广西外来鱼类的分布已完成了从最初的引入“点”(如个别养殖场、城市观赏鱼市场)到区域性“面”的广泛扩散。结果显示,在所有被调查的主要水系中,均发现了外来鱼类的踪迹。以齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、伽利略罗非鱼和革胡子鲇为代表的核心入侵物种,其分布范围尤为广泛,出现频率极高,表明它们已经成功克服了广西内部不同水系间的自然地理障碍,建立了能够自我维持和持续扩散的野生种群。

2.3.1 温度驱动的南北分异格局

齐氏罗非鱼和尼罗罗非鱼丰度在多数水系

中占有较高的比例,齐氏罗非鱼在全部 34 个样点均有捕获记录,出现频率高达 89.71%,而后是尼罗罗非鱼则在 33 个样点被采集,频率为 77.94%。这两种罗非鱼凭借其强大的环境适应性、高效的繁殖策略和广食性,已成功在广西几乎所有类型的水体中定殖并建立起庞大的野生种群。从种群的相对优势度来看,齐氏罗非鱼在桂北水系占据绝对主导地位,而尼罗罗非鱼则在桂中和桂南水系成为更主要的优势种。这种相对优势度的南北分异构成了“北齐南尼”的宏观格局。这种南北分异的格局可能与不同物种对温度的适应性差异有关。本研究还发现^[21],桂北地区冬季可观察到尼罗罗非鱼和齐氏罗非鱼的踪迹,其体型普遍较小但数量较多,表明尼罗罗非鱼和齐氏罗非鱼在广西境内经过长期驯化,已适应桂北地区的低温天气,能成功实现自然越冬。

对广西内陆水域罗非鱼繁殖生物学的研究结果显示,整体上种群多呈现雌性多于雄性的特点,尼罗罗非鱼雌雄比为 1.11:1,齐氏罗非鱼雌雄比为 0.99:1,伽利略罗非鱼雌雄比为 2.18:1。繁殖力方面,齐氏罗非鱼[F:(2 645±1951)粒/尾;FL:(19±12)粒/mm;FW:(26±20)粒/g]远高于尼罗罗非鱼[F:(1 028±646)粒/尾;FL:(6±4)粒/mm;FW:±4 粒/g]和伽利略罗非鱼[F:(1 042±502)粒/尾;FL:(6±3)粒/mm;FW:(6±4)粒/g]。这种差异反映了它们不同的繁殖对策,非口孵型的齐氏罗非鱼倾向于产大量小卵“快速繁殖、高死亡率”的“r-策略”,以高繁殖数量应对多变生境和竞争压力,使其具备更强的入侵和扩散潜力;而口孵型的尼罗罗非鱼和伽利略罗非鱼则倾向于产少量大卵“慢速繁殖、低死亡率”的“k-策略”,通过亲代抚育行为提高后代存活率,更适应资源相对稳定的环境。齐氏罗非鱼表现出更强的繁殖能力以此来应对多样化的生境条件,后代多的特点,也导致其驯化速度更快,更能快速适应低温等环境条件,更偏向于在资源更为丰富的独流入海河流和竞争压力较小的桂北地区繁殖,齐氏罗非鱼近年来不断向北扩散与其繁殖策略密切相关。

这种“北齐南尼”的格局,是不同罗非鱼物种热适应性差异在地理空间上的直接投射。冬季最低水温构成了热带鱼类向北扩散的“硬约束”,只有那些能够耐受或适应较低水温的物种(如齐氏

罗非鱼)才能突破这一屏障。谭细畅等^[22]的研究发现,罗非鱼已在漓江灵渠等水域形成稳定种群分布,其分布范围已延伸至珠江水系北端,并对长江水系构成潜在入侵风险。随着全球气候变暖,这一界线有向北推移的趋势,值得高度警惕。

2.3.2 干支流物种组成差异

在外来鱼类物种数上,红水河的外来鱼类种类最多(16种),浔江次之(14种),而后是黔江(13种)。南盘江的外来鱼类种类最少,有7种,其次是桂江漓江有8种,贺江和其他河流各有9种。总体来看,干流的外来鱼类物种多样性高于支流。这可能与干流更强的连通性、更复杂多样的生境以及更频繁的人类活动(如航运、水产养殖)有关。西江流域在广西境内进行了高度的水电梯级开发,形成了由11座水利枢纽组成的梯级电站群,水电站建设造成的静水环境显著改变了本

土鱼类的生境,为适应静水环境的外来鱼类提供了扩张的“生态位机会”。梯级水电站的建设,将原本湍急的河流(流水生境)改造为流速平缓的库区(静水生境),这种环境的剧变对适应流水环境的本土鱼类(如“四大家鱼”等)的产卵和生存造成了巨大冲击,导致其种群衰退,且支流受影响情况高于干流^[23]。与此同时,这种类似湖泊的环境却高度契合了罗非鱼、革胡子鲶等外来物种的生态习性,为其提供了理想的繁殖和栖息场所,从而加速了其种群扩张和优势地位的形成。这些水利枢纽的建成引起土著鱼类减少、外来鱼类增多,从而导致鱼类群落结构发生变化^[24]。这一格局清晰地表明,干流河段,特别是那些流速平缓、水体开阔的区域,为外来鱼类提供了更优越的栖息和繁殖条件。

表2 广西内陆水域外来鱼类空间分布
Tab. 2 Spatial distribution of alien fish in the inland waters of Guangxi

物种 Species	NPJ	HSH	QJ	XJ	YJ	ZJ	YYJ	HJ	GJ	LJ	NLJ	OR
匙吻鲟 <i>Polyodon spathula</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
条纹鲢脂鲤 <i>Prochilodus lineatus</i>	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
短盖肥脂鲤 <i>Piaractus brachypomus</i>	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
露斯塔野鲮 <i>Labeo rohita</i>	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
麦瑞加拉鲮 <i>Cirrhinus mrigala</i>	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
锦鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>haematopterus</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
散鳞镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
长吻鲇 <i>Leiocassis longirostris</i>	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
豹纹脂身鲇 <i>Hypostomus plecostomus</i>	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
斑点叉尾鲷 <i>Ictalurus punctatus</i>	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
革胡子鲶 <i>Clarias lazera</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
伽利略罗非鱼 <i>Tilapia galilaeus</i>	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
马拉丽体鱼 <i>Parachromis managuensis</i>	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
红罗非鱼 <i>O. mossambicus</i> × <i>O. niloticus</i>	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
云斑尖塘鳢 <i>Oxyeleotris marmorata</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
蓝鳃太阳鱼 <i>Lepomis macrochirus</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
绿太阳鱼 <i>Lepomis cyanellus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

注:“0”为不存在该物种,“1”为存在该物种。各水系代码为:南盘江(NPJ);红水河(HSH);黔江(QJ);浔江(XJ);右江(YJ);左江(ZJ);邕江-郁江(YYJ);贺江(HJ);桂江(GJ);柳江(LJ);南流江(NLJ);其他河流(OR)。

Notes: "0" indicates the absence of the species, and "1" indicates its presence. The river system codes are as follows: Nanpan River (NPJ); Hongshui River (HSH); Qian River (QJ); Xun River (XJ); You River (YJ); Zuo River (ZJ); Yong-Yu River (YYJ); He River (HJ); Gui River (GJ); Liu River (LJ); Nanliu River (NLJ); Other Rivers (OR).

2.3.3 水系间相似性

通过 Jaccard 相似性系数分析发现,浔江-黔江($J_{sc}=0.93$)、浔江-右江($J_{sc}=0.93$)、红水河-黔江($J_{sc}=0.81$)等在地理上相邻或属于上下游关系的干流水系,其外来鱼类组成表现出极高的相似性,反映了物种沿水流的自然扩散和相似的人类活动(如养殖模式)的双重影响。而地理位置遥远、水文条件差异大的南盘江-贺江($J_{sc}=0.23$),其物种组成则极不相似。

对外来鱼类群落结构进行的主坐标分析(PCoA)显示,前2个主坐标轴(PCoA1和PCoA2)分别解释了群落总体变异的32.45%和20.16%。在PCoA1排序轴上,该轴主要反映了干流与支流的差异,浔江和黔江的得分显著区别于其他所有水系,表明其群落结构的独特性。第二主坐标轴(PCoA2)则进一步揭示了支流间的梯度分异,其中左江、邕江-郁江与南盘江等水系在排序轴上呈现出明显的分离趋势。

表3 广西内陆水域主要水系外来鱼类组成相似性分析结果
Tab. 3 Similarity analysis of alien fishes in main water system in the inland waters of Guangxi

	NPJ	HSJ	QJ	XJ	YJ	ZJ	YYJ	HJ	GJ	LJ	NLJ	OR
NPJ		0.41	0.50	0.47	0.50	0.55	0.55	0.23	0.36	0.27	0.46	0.45
HSJ	7		0.81	0.76	0.33	0.50	0.59	0.44	0.25	0.38	0.53	0.37
QJ	7	13		0.93	0.39	0.50	0.60	0.44	0.29	0.44	0.53	0.35
XJ	7	13	13		0.93	0.39	0.50	0.60	0.44	0.29	0.44	0.53
YJ	6	7	7	7		0.62	0.50	0.33	0.36	0.44	0.64	0.54
ZJ	6	9	8	8	8		0.54	0.36	0.29	0.57	0.69	0.73
YYJ	6	10	9	9	7	7		0.46	0.29	0.38	0.57	0.46
HJ	3	8	7	7	5	5	6		0.46	0.29	0.38	0.57
GJ	4	5	5	5	5	4	4	5		0.46	0.29	0.38
LJ	4	8	8	7	7	8	6	7	5		0.60	0.40
NLJ	6	10	9	9	9	9	8	6	5	9		0.62
OR	5	7	6	6	7	8	6	4	4	6	8	

注:表格左下角数据为共有物种数,左上角数据为 J_{sc} 。各水系代码为:南盘江(NPJ);红水河(HSJ);黔江(QJ);浔江(XJ);右江(YJ);左江(ZJ);邕江-郁江(YYJ);贺江(HJ);桂江(GJ);柳江(LJ);南流江(NLJ);其他河流(OR)。

Notes: Data in the lower-left triangle indicate the number of shared species, while data in the upper-right triangle represent Jaccard similarity coefficient (J_{sc}). The river system codes are as follows: Nanpanjiang River (NPJ); Hongshuihe River (HSJ); Qianjiang River (QJ); Xunjiang River (XJ); Youjiang River (YJ); Zuojiang River (ZJ); Yong-Yujiang River (YYJ); Hejiang River (HJ); Guijiang River (GJ); Liujiang River (LJ); Nanlijiang River (NLJ); Other Rivers (OR).

表4 主要水系外来鱼类组成 PERMANOVA 两两检验
Tab. 4 The PERMANOVA two-by-two test for the alien fish composition by main river systems

	NPJ	HSJ	QJ	XJ	YJ	ZJ	YYJ	HJ	GJ	LJ	NLJ
HSJ	0.033										
QJ	0.030	0.021									
XJ	0.029	0.038	0.126								
YJ	0.029	0.032	0.024	0.029							
ZJ	0.087	0.028	0.035	0.022	0.035						
YYJ	0.159	0.020	0.029	0.034	0.054	0.369					
HJ	0.073	0.029	0.031	0.020	0.033	0.258	0.044				
GJ	0.029	0.028	0.030	0.037	0.035	0.031	0.029	0.205			
LJ	0.060	0.102	0.026	0.036	0.028	0.037	0.028	0.340	0.285		
NLJ	0.061	0.100	0.030	0.031	0.036	0.119	0.172	0.165	0.027	0.091	
OR	0.462	0.034	0.028	0.026	0.032	0.091	0.198	0.090	0.032	0.034	0.024

注:数据为PERMANOVA分析结果的 P 值。 $P<0.05$ 的数值已加粗,表示水系间群落组成存在显著差异。各水系代码为:南盘江(NPJ);红水河(HSJ);黔江(QJ);浔江(XJ);右江(YJ);左江(ZJ);邕江-郁江(YYJ);贺江(HJ);桂江(GJ);柳江(LJ);南流江(NLJ);其他河流(OR)。

Notes: Table data show P -values from PERMANOVA analysis. Values in bold indicate a significant difference ($P<0.05$) in community composition between river systems. The river system codes are as follows: Nanpanjiang River (NPJ); Hongshuihe River (HSJ); Qianjiang River (QJ); Xunjiang River (XJ); Youjiang River (YJ); Zuojiang River (ZJ); Yong-Yujiang River (YYJ); Hejiang River (HJ); Guijiang River (GJ); Liujiang River (LJ); Nanlijiang River (NLJ); Other Rivers (OR).

PCoA 所揭示的群落结构差异,与置换多元方差分析(PERMANOVA)结果高度吻合(表4),PCoA 排序显示浔江(XJ)和黔江(QJ)在群落组成上高度相似并共同区别于其他水系,PERMANOVA 检验也证实了这一点:浔江与黔江之间的差异不显著($P=0.126$),但它们与其他几乎所有水系均存在显著差异(多数 $P<0.05$)。同样,右江(YJ)也与除邕江-郁江(YYJ)外的多数水系表现出显著差异。共同证实了不同水系间外来鱼类群落组成的显著不同。

总体而言,反映了“连通则相似,隔离则相异”的外来鱼类群落分布格局,以浔江-黔江为代表的干流系统因其高度连通性,形成了外来物种扩散的主要廊道和高度同质化的群落。而其他水系则根据其相互间的连通程度和地理距离,表现出从高度相似到显著相异的连续变化,其中还存在一些由特定因素导致的特殊关联。本文揭示的严峻入侵现状与清晰的分布规律,迫切要求我们必须构建一套系统、科学且有针对性的防控策略体系。

3 外来鱼类入侵应对策略研究

3.1 国际生物入侵应对策略

国际上,生物入侵已成为一个严重的环境问题,各国采取了多种应对策略。《生物多样性公约》等条约要求缔约国采取措施防止、控制或消除外来物种的威胁^[25]。

(1)完善的制度与法律框架:美国以《莱西法案》等为核心,建立了多维度法规体系,并成立国家入侵物种委员会(NISC)进行统一协调。(2)科学的风险评估与信息支撑:各国普遍建立了风险评估与许可制度,并依托全球入侵物种数据库(GISD)等平台共享信息。日本《关于防止特定外来生物致生态系统损害的法律》:建立了一套科学的外来物种名录分类体系,将物种分为入侵性外来种(IAS)、未判定外来种(UAS)和非限制类外来种,进行分级管理和严格规制^[26]。(3)综合的防控技术与公众参与:综合性的防控技术与广泛的公众参与确保了策略的落地与实效。例如,美国在应对亚洲鲤鱼时,综合运用了声学威慑系统和电子屏障等先进技术^[27]。而澳大利亚则为公众参与树立了典范,通过广泛的环保教育和宣传,成功构建了全民参与的监测、报告和清除体

系,将公众力量转化为防控工作的重要组成部分。

3.2 我国外来鱼类入侵应对策略

我国针对外来鱼类入侵的法律呈现出逐步完善但整体仍显分散的特点。在国家层面,现有的法律架构由多个层次构成。《中华人民共和国生物安全法》为外来物种防控提供了基本法律依据,2021年新修订的《中华人民共和国刑法》补充了相关的刑事责任。在此之下,多部门联合发布了《外来入侵物种管理办法》与《重点管理外来入侵物种名录》,对管理工作进行了细化。此外,相关规定也散见于《渔业法》《环境保护法》《进出境动植物检疫法》《海洋环境保护法》《动物防疫法》等既有法律之中。在地方层面,也已出现针对特定区域的立法实践。流域立法方面,如《长江保护法》和《黄河保护法》,均包含了禁止非法引入外来物种的条款。省级立法方面,部分省份如云南省湖南省等,也已颁布了地方性的外来物种管理条例。

3.3 广西外来鱼类入侵应对策略

3.3.1 完善地方立法和管理机制

2022年,广西壮族自治区生态环境厅等6部门联合印发《广西进一步加强外来物种入侵防控工作方案》,要求建立广西加强外来物种入侵防控工作厅际联席会议制度和广西外来入侵物种专家库,有关部门按照职责分工,切实加强外来物种入侵的源头管控。2024年发布《广西壮族自治区生态文明建设促进条例》,第十六条规定了县级以上人民政府应当建立健全外来物种入侵防控协调机制,加强对外来物种入侵的防范和应对,开展源头预防、监测与预警、治理与修复,维护生物安全。以及《广西壮族自治区红树林资源保护条例》《广西壮族自治区湿地保护条例》也对外来物种入侵有相关的规定。《广西壮族自治区生物多样性保护战略与行动计划(2025—2035年)》将构建外来入侵物种数据库,完善外来入侵物种监测防控体系。实施齐氏罗非鱼等重点管理外来入侵物种综合防治列入重点项目清单。

广西必须在现有基础上,构建一个系统化、区域化的综合防控体系。这不仅要求加快制定一部符合地方特色的《广西壮族自治区外来水生生物管理条例》,更需要激活并强化跨部门的协调机制,以形成监管合力。

3.3.2 提升评估监测能力与加强区域协作

气候变化会引起全球水温持续升高,一方面增加了温水鱼类的热栖息地,另一方面本地种的原生产卵场、索饵场等栖息地迁移或丧失,导致生物入侵和栖息地丧失加剧。据研究^[28],尼罗罗非鱼中高适生区质心南移、南方流域许多低中适生区转变为高适生区、高适生区也有向更高纬度流域扩张的趋势,应对这些挑战,要加强评估监测能力。

胡隐昌等^[29]建立了水生动物外来物种信息数据库,包括名录检索、引用文献检索和专家名录检索等相关内容,初步构建了水生动物外来物种入侵风险评估的基础;但有关鱼类入侵评价体系的研究很少,仅有窦寅等^[30]初步构建了包含5个一级指标、12个二级指标、44个三级指标的外来鱼类入侵风险量化评估指标体系。

建立适合广西气候水文条件和生物多样性特点的外来鱼类入侵风险评估指标体系,并结合AS-ISK和ENSARS等工具,适时更新评估手段,重新评估入侵风险。强化监测网络:在全省重要河段、外来物种养殖区、保护区和湿地设立监测点位,利用eDNA^[31]、AI图像识别^[32]等先进技术定期监测。建立区域信息共享平台:广西应加强与国内广东、云南以及国际(越南)在水生生物入侵方面的信息共享和协调管理,建立快速响应机制。

3.3.3 加强综合治理与资金投入

设立专项资金:设立外来鱼类综合治理专项财政资金,支持监测、防控、科研和专业人员培养。投入资金打造跨部门、跨层级的外来鱼类综合治理协同平台,实现信息共享和资源整合,避免部门间推诿。

应用综合治理技术,借鉴国内外经验,结合广西实际情况,推广应用物理清除、生物防治和行为控制等综合治理措施。马光明等^[33]提出“灭非灵”对尼罗罗非鱼的应急防治有积极的效果,通过急性毒性试验方式,测定了“灭非灵”对尼罗罗非鱼幼鱼[体长(4.0±0.23)cm,体质量(2.5±0.44)g]的24、48、72和96h半致死浓度和其在环境中的安全浓度。“灭非灵”对尼罗罗非鱼的毒杀效果非常显著($P<0.01$),暴露在0.10、0.17和0.20mg/L药液中的尼罗罗非鱼在96h内全部死亡,而草鱼、鲮、鲫、斑马鱼、唐鱼和泥鳅均能正

常生长;“灭非灵”对尼罗罗非鱼幼鱼的24、48、72和96h半致死浓度分别为0.167、0.077、0.057和0.043mg/L,安全浓度为0.0043mg/L,然而,该方法的生态风险尚需审慎评估,其对本土物种的亚致死效应以及对水生无脊椎动物等非目标生物的潜在影响仍不明确^[34]。因此,在进行更全面的生态风险评估之前,其应用应严格限定于与其他水系隔离的小型、封闭水体。

3.3.4 强化公众教育与意识提升

通过多种渠道(海报、宣传栏、微信公众号、主题宣传活动)普及外来鱼类的危害,开发休闲渔业渔获物记录应用,鼓励用户上传渔获识别鱼类,减少外来鱼类的放生行为,提升公众的生态安全意识和主体责任感。严厉打击非法引进、养殖和随意放生外来物种的行为,尤其要加强对水族市场和主要投放点的宣传和监管。建立举报奖励机制,鼓励公众积极参与外来物种防控的监督和检举。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] GOZLAN R E, BRITTON J R, COWX I, et al. Current knowledge on non-native freshwater fish introductions [J]. *Journal of Fish Biology*, 2010, 76(4): 751-786.
- [2] RAHEL F J, OLDEN J D. Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species [J]. *Conservation Biology*, 2008, 22(3): 521-533.
- [3] DIDHAM R K, TYLIANAKIS J M, GEMMELL N J, et al. Interactive effects of habitat modification and species invasion on native species decline [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(9): 489-496.
- [4] DEXTRASE A J, MANDRAK N E. Impacts of alien invasive species on freshwater fauna at risk in Canada [J]. *Biological Invasions*, 2006, 8(1): 13-24.
- [5] 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.
- [6] RADHAKRISHNAN K V, LAN Z J, ZHAO J, et al. Invasion of the African sharp-tooth catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) in South China [J]. *Biological Invasions*, 2011, 13(8): 1723-1727.
- [7] 吴志强, 黄亮亮. 漓江鱼类生物多样性及其与环境的关系研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WU Z Q, HUANG L L. A study on fish biodiversity and its relationship with the environment in the Lijiang River [M]. Beijing: Science Press, 2017.

- [8] 郦珊, 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.
- 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.
- [9] 刘昊, 吴志强, 乔梁, 等. 广西内陆水域外来鱼类的种类及分布特征[J]. 南方农业学报, 2024, 55(12): 3728-3737.
- LIU H, WU Z Q, QIAO L, et al. Species and distribution characteristics of non-native fish in inland waters of Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(12): 3728-3737.
- [10] 管嘉俊, 郑惠芳, 乔庆, 等. 广西主要养殖区内逃逸尼罗罗非鱼形态差异分析[J]. 南方农业学报, 2017, 48(11): 2071-2077.
- GUAN J J, ZHENG H F, QIAO Q, et al. Morphological variation analysis on escaped *Nile tilapia* from main aquaculture areas in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(11): 2071-2077.
- [11] 朱赞杰. 外来鱼类革胡子鲶在华南地区的分布和种群生物学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- ZHU Y J. Distribution and population biology of alien *Clarias gariepinus* in south China [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [12] 赵立朝, 吴志强, 张曼, 等. 广西南部主要水系野生罗非鱼建群状况调查分析[J]. 南方农业学报, 2019, 50(2): 397-404.
- ZHAO L C, WU Z Q, ZHANG M, et al. Establishment of wild tilapia population community in main rivers of southern Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(2): 397-404.
- [13] 汪开成, 吴志强, 武琳, 等. 广西红水河外来红腹罗非鱼形态差异分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(10): 2208-2216.
- WANG K C, WU Z Q, WU L, et al. Morphological Variation Analysis on Redbelly Tilapia (*Coptodon zillii*) of Hongshui River in Guangxi [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(10): 2208-2216.
- [14] 帅方敏, 李新辉, 何安尤, 等. 珠江水系广西江段鱼类多样性空间分布特征[J]. 水生生物学报, 2020, 44(4): 819-828.
- SHUAI F M, LI X H, HE A Y, et al. Fish diversity and distribution pattern of the pearl river system in Guangxi [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(4): 819-828.
- [15] 何佳洋, 吴志强, 黄亮亮, 等. 广西内陆水域外来鱼类入侵风险分析[J]. 生物安全学报, 2023, 32(2): 168-177.
- HE J Y, WU Z Q, HUANG L L, et al. Risk analysis of alien fishes invasion in inland waters of Guangxi [J]. Journal of Biosafety, 2023, 32(2): 168-177.
- [16] 顾党恩. 华南地区主要河流外来鱼类的分布格局及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- GU D E. Distribution patterns and influencing factors of non-native fishes in the main rivers of South China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [17] 朱召军, 吴志强, 黄亮亮, 等. 漓江上游鱼类物种组成及其多样性分析[J]. 四川动物, 2015, 34(1): 126-132.
- ZHU Z J, WU Z Q, HUANG L L, et al. Species composition and diversity of fish in the upper reach of Lijiang River[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2015, 34(1): 126-132.
- [18] KANG B, VITULE J R S, LI S, et al. Introduction of non-native fish for aquaculture in China: a systematic review[J]. Reviews in Aquaculture, 2023, 15(2): 676-703.
- [19] 赵金发, 刘永, 李纯厚, 等. 西沙群岛北礁珊瑚礁鱼类种类组成及变化特征[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 7384-7400.
- ZHAO J F, LIU Y, LI C H, et al. Composition and variation characteristics of coral reef fish species in Beijiao Atoll of the Xisha Islands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7384-7400.
- [20] GU D E, YU F D, HU Y C, et al. The species composition and distribution patterns of non-native fishes in the main rivers of South China [J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4566.
- [21] 乔梁, 吴志强, 刘昊, 等. 广西内陆水域常见野生罗非鱼的种群结构及其分布特征[J]. 南方农业学报, 2025, 56(1): 324-333.
- QIAO L, WU Z Q, LIU H, et al. Population structure and distribution characteristics of common wild tilapia in inland waters of Guangxi [J]. Journal of Southern Agriculture, 2025, 56(1): 324-333.
- [22] 谭细畅, 李新辉, 李跃飞, 等. 尼罗罗非鱼早期发育形态及其在珠江水系的空间分布[J]. 生物安全学报, 2012, 21(4): 295-299.
- TAN X C, LI X H, LI Y F, et al. Early development and spatial distribution of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the Pearl River [J]. Journal of Biosafety, 2012, 21(4): 295-299.
- [23] 魏琨宇, 崔磊, 陈浩, 等. 基于鱼类生物完整性评价梯度水电站对金沙江中游水生生态系统健康的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2025, 34(4): 771-785.
- WEI K Y, CUI L, CHEN H, et al. Assessing the impact of cascade hydropower stations on the aquatic ecosystem health in the middle reaches of Jinsha River based on fish-

- index of biotic integrity [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2025, 34(4): 771-785.
- [24] LIU H, WU Z Q, QIAO L, et al. Seasonal and spatial distribution patterns of non-native fishes in inland waters of Guangxi [J]. Water, 2024, 16(21): 3062.
- [25] 董波, 刘迪. 外来水生生物入侵的现状、影响及防控对策 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(10): 134-144.
- DONG B, LIU D. The situation, influence and management methods of alien aquatic organism invasion in China [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2024, 54(10): 134-144.
- [26] 庞洁, 刘洋, 陈洁. 外来入侵物种现状与防控体系建设——全球视野和中国例证 [J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(10): 131-140.
- PANG J, LIU Y, CHEN J. Situation and prevention and control system construction of invasive alien species [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(10): 131-140.
- [27] CUPP A R, BREY M K, CALFEE R D, et al. Emerging control strategies for integrated pest management of invasive carps [J]. Journal of Vertebrate Biology, 2021, 70(4): 21057.
- [28] 方康. 重要外来养殖鱼类生物入侵风险评估 [D]. 荆州: 长江大学, 2023.
- FANG K. Risk assessment of biological invasion of important alien cultured fishes [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.
- [29] 胡隐昌, 宋红梅, 牟希东, 等. 浅议我国外来物种入侵问题及其防治对策 [J]. 生物安全学报, 2012, 21(4): 256-261.
- HU Y C, SONG H M, MU X D, et al. Invasion of exotic species and their control measures taken in China [J]. Journal of Biosafety, 2012, 21(4): 256-261.
- [30] 窦寅, 吴军, 黄成. 外来鱼类入侵风险评估体系及方法 [J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1): 12-16.
- DOU Y, WU J, HUANG C. Risk assessment system and method for invasion of alien fishes [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(1): 12-16.
- [31] 李晨虹, 凌岚馨, 谭娟, 等. 环境DNA技术在水生生物监测中的挑战、突破和发展前景 [J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(3): 564-574.
- LI C H, LING L X, TAN J, et al. Challenge, breakthrough and future perspectives of environmental DNA technology in monitoring aquatic organisms [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(3): 564-574.
- [32] 夏超, 陈新军, 刘必林, 等. 基于深度学习的金枪鱼延绳钓渔获图像识别技术分析 [J]. 上海海洋大学学报, 2025, 34(2): 307-319.
- XIA C, CHEN X J, LIU B L, et al. Analysis of deep learning-based tuna longline catch image recognition technique [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2025, 34(2): 307-319.
- [33] 马光明, 顾党恩, 牟希东, 等. “灭非灵”对外来鱼类尼罗罗非鱼的毒杀效果 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2442-2447.
- MA G M, GU D E, MU X D, et al. Poison effect of "Mie fei ling" on the alien Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(9): 2442-2447.
- [34] 顾党恩, 余梵冬, 杨叶欣, 等. “灭非灵”对观赏鱼养殖池塘中外来种尼罗罗非鱼的杀灭效果 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2985-2988.
- GU D E, YU F D, YANG Y X, et al. Killing effect of "Miefeiling" on alien Nile tilapia in ornamental aquaculture [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10): 2985-2988.

Status and countermeasures for alien fish species in the inland waters of Guangxi

ZOU Youcun¹, WU Zhiqiang^{1,2}, LIU Hao¹, QIAO Liang¹, HE Jiayang¹, CHEN Yizhu¹, HUANG Liangliang^{1,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Areas, Guilin 541006, Guangxi, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: Through field sampling, this study investigated the species composition and distribution of alien fishes in Guangxi's inland waters. The results indicate: (1) Species composition and sources: A total of 23 alien fish species, belonging to 7 orders, 13 families, and 20 genera, were recorded. Perciformes (9 species) and Cypriniformes (5 species) are the dominant orders. Aquaculture introduction is the primary pathway, accounting for 82.61% of the species. (2) Status and distribution: *Coptodon zillii* and *Oreochromis niloticus* have become the dominant species, distributed across nearly all survey sites. Thirteen species are considered invasive, and four are in the establishment stage. Spatially, a geographical pattern of "C. zillii in the north, O. niloticus in the south" originates from the stronger adaptability to low temperatures and higher fecundity of *Coptodon zillii*; a mainstream-tributary disparity pattern is also evident, where the species number in mainstreams such as the Hongshui River (16 species) is far higher than in upstream tributaries. The lentic environments created by hydropower dam construction have significantly altered the habitats of native fish, providing 'ecological niche opportunities' for the expansion of alien species adapted to such conditions. (3) Control strategies: An integrated control framework is proposed, comprising four key components: source prevention, monitoring and early warning, control and eradication, and public participation. This research provides a scientific basis for policymaking and reference for ensuring aquatic ecological security and biodiversity conservation in Guangxi and southern China.

Key words: alien fish species; distributional characteristics; countermeasures; inland waters; Guangxi