

广西内陆水域外来鱼类入侵风险分析

何佳洋¹, 吴志强^{1,2*}, 黄亮亮^{1,2,3*}, 陈中兵⁴, 王冬杰⁵, 孙扬言¹, 文浩¹, 宋琦亮¹

¹桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; ²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 541004; ³广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; ⁴捷克生命科学大学环境科学学院应用生态学系, 布拉格 16521, 捷克; ⁵华南农业大学海洋学院, 广东 广州 510642

摘要:【目的】对广西内陆水域的外来鱼类进行入侵风险评估和适生区预测,为广西外来鱼类入侵防治及水生态环境保护提供科学依据。【方法】采用鱼类入侵风险和水生生物入侵能力筛查系统2个体系筛选广西内陆水域具有入侵风险的鱼类,并用最大熵模型预测高入侵风险鱼类在广西内陆水域的潜在适生区。【结果】广西内陆水域共记录有外来鱼类18种,其中13种鱼类具有高入侵风险,分别为尖齿胡鲂、尼罗罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、奥利亚罗非鱼、豹纹脂身鲂、齐氏罗非鱼、大口黑鲈、斑点叉尾鲴、短盖肥脂鲤、露斯塔野鲮、条纹鲮、麦瑞加拉鲮和食蚊鱼,2种具有中入侵风险,为丁鲷和太湖新银鱼。适生区预测结果表明,极易发生鱼类入侵的水域为黔江、郁江和南流江。【结论】对中、高入侵风险的鱼类均需重点监控且在具有高入侵风险水域应对外来鱼类开展持续性监测,并进行早期筛查。

关键词: 鱼类入侵; AS-ISK; MaxEnt; 广西



开放科学标识码
(OSID 码)

Risk analysis of alien fishes invasion in inland waters of Guangxi

HE Jiayang¹, WU Zhiqiang^{1,2*}, HUANG Liangliang^{1,2,3*}, CHEN Zhongbing⁴,
WANG Dongjie⁵, SUN Yangyan¹, WEN Hao¹, SONG Qiliang¹

¹College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; ²Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety Guarantee in Karst Areas, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; ³Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; ⁴Department of Applied Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Prague 16521, Czech; ⁵College of Marine Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract: 【Aim】 To provide a scientific basis for the prevention and control of alien fish invasion and aquatic ecological environment protection in Guangxi, risk assessment and suitable area prediction of alien fish invasion in the inland waters of Guangxi were performed. 【Method】 The alien fish invasion risk assessment system and aquatic biological invasion capability screening system (aquatic species invasiveness screening kit, AS-ISK) were used to screen fish species at risk of invading the inland waters of Guangxi, and the maximum entropy model (maximum entropy, MaxEnt) was used to predict fish at high risk of invasion in the inland waters of Guangxi. 【Result】 Eighteen species of alien fish were naturally distributed in the inland waters of Guangxi. Thirteen fish species, including *Clarias garipeinus*, *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis mossambicus*, *Oreochromis aureus*, *Pterygoplichthys pardails*, *Coptodon zillii*, *Micropterus salmoides*, *Ictalurus punctatus*, *Piaractus brachypomus*, *Labeo rohita*, *Prochilodus lineatus*, *Cirrhinus mrigala*, and *Gambusia affinis*, had high invasion risk, while *Tinca mosaics* and *Neosalanx taihuensis* had medium invasion risk. The prediction results of fish with high invasion risk showed that Qianjiang River, Yujiang River, and Nanliu River were the most vulnerable to fish invasion. 【Conclusion】 Both medium- and high-risk fish should be monitored, and continuous monitoring and early screening

收稿日期 (Received): 2022-05-05 接受日期 (Accepted): 2022-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(32068030、U20A2087); 教育部春晖计划(教外司人文[2020]703号); 广西渔业资源调查(GXZC2022-G3-001062-ZHQB)

作者简介: 何佳洋, 男, 博士研究生。研究方向: 鱼类生态学。E-mail: 983070363@qq.com

* 通信作者 (Author for correspondence), 吴志强, E-mail: wuzhiqiang@glut.edu.cn; 黄亮亮, E-mail: llhuang@glut.edu.cn

should be conducted in waters with a high risk of invasion.

Key words: fish invasion; AS-ISK; MaxEnt; Guangxi

近年来,外来物种入侵已成为当今世界环境面临的三大问题之一(生物栖息地丧失和气候变化),并严重影响全球生态系统结构和功能(Breshears *et al.*, 2022; Lieurance *et al.*, 2021)。随着世界经济一体化进程的加快,水产养殖、渔业观赏、水生态补偿等引起的国家间或水系间的引种越来越频繁,使得全球淡水鱼类入侵问题日益严重。鱼类入侵会对水域生态环境及土著种生存产生负面影响(Almela *et al.*, 2022)。近20年来,鱼类入侵问题已受到全球广泛关注。中国是世界上鱼类引种最多的国家之一,淡水外来鱼类种类高达439种,其中以作为观赏鱼引进居多(79.04%),其次是作为水产养殖品种引进(20.73%),以防控物种引进的种类最少(0.23%)(Xiong *et al.*, 2015)。目前,我国对淡水外来鱼类的研究仅集中在少数已产生大规模危害的入侵种的地理分布及生物学特性上,缺乏对其入侵机制、生态影响及风险评估的研究,与其他国家相比,研究力度略显薄弱(珊瑚等, 2016)。

广西岩溶地形发达,江河水系纵横,横跨北热带、南亚热带和中亚热带3个气候带,是中国水生生物多样性最为丰富的地区之一,同时也是我国遭受外来鱼类入侵最严重的地区之一(帅方敏等, 2020)。目前,广西内陆水域的入侵鱼类至少有9种(顾党恩, 2020; 赵立朝等, 2019; 郑雄等, 2019; Liu *et al.*, 2012),分别为短盖肥脂鲤 *Piaractus brachypomus* (Cuvier)、条纹鲮脂鲤 *Prochilodus lineatus* (Valenciennes)、麦瑞加拉鲮 *Cirrhinus mrigala* (Hamilton)、露斯塔野鲮 *Labeo rohita* (Ham.)、尖齿胡鲶 *Clarias gariepinus* (Burchell)、豹纹脂身鲶 *Pterygoplichthys pardails* (Castelnau)、齐氏罗非鱼 *Coptodon zillii* (Gervais)、尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* (L.) 和大口黑鲈 *Micropterus salmoides* L. 等。研究表明,广西内陆水域主要河流中均有入侵鱼类分布,部分入侵鱼类已经成功建立自然种群并成为入侵江段的优势种(李捷等, 2010; 帅方敏等, 2020; 张迎秋等, 2020)。外来鱼类入侵会导致淡水生态系统生物多样性下降,且很难将其从水生环境中彻底清除(雷娟等, 2016),必须做好早期监测和预警工作。因此,本文通过收集文献和课题组调

查等数据,制定广西内陆水域外来鱼类名录,采用鱼类入侵风险评估体系和水生生物入侵能力筛查系统筛选高入侵风险的鱼类,并用最大熵模型(maximum entropy, MaxEnt)对其在广西内陆水域的潜在适生区进行预测,以期为广西内陆水域的外来鱼类入侵早期防治和管理提供科学依据。

1 材料方法

1.1 外来鱼类数据

广西内陆水域外来鱼类数据基于本课题组近年在广西内陆水域(西江干流、漓江、桂江、湘江、资水、左江和右江等水系)的野外调查数据,此外,还通过《广西淡水鱼类志:第二版》(广西壮族自治区水产研究所等, 2006)、《珠江流域广西主要江河鱼类资源调查与研究》(李桂峰等, 2020)等专著和国内外文献进行补充,文献资料收集截至2021年11月6日。在Fishbase网站(<https://www.fishbase.org>)收集外来鱼类的原产地等信息,并以该网站物种名为准,检查物种名是否正确。

1.2 鱼类入侵风险评估

采用窦寅等(2011)建立的鱼类入侵风险评估体系和Copp *et al.* (2016)建立的水生生物入侵能力筛查系统(aquatic species invasiveness screening kit, AS-ISK)进行风险评估。

鱼类入侵风险评估体系共设立一级指标5个,二级指标12个,三级指标44个,指标体系和指标代码见附录I(扫描本文OSID码,查看附录I)。根据每个三级指标对应的评估标准(0, 1, 2)进行赋值,得到其评估值(P_{ijk}),进而计算鱼类入侵风险总分值(W): $0 \leq W < 0.700$ 为低入侵风险, $0.700 \leq W < 1.000$ 为中入侵风险, $1.000 \leq W < 2.000$ 为高入侵风险。

公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^5 a_i \sum_{j=i}^m a_{ij} \sum_{k=1}^n a_{ijk} P_{ijk}$$

式中, i 、 ij 、 ijk 分别代表一级指标、二级指标和三级指标的权重分值; m 代表第 i 个一级指标下的二级指标个数; n 代表第 i 个一级指标下的第 j 个二级指标下的三级指标个数。

AS-ISK 由基本风险评估模块(basic risk assessment, BRA)和气候变化评估模块(climate change assessment, CCA)共计55个问题组成,并对每个问

题的结果进行置信级别 (confidence level, CL) 评估:“低”“中”“高”“非常高”分别赋值为 1、2、3、4 (Laura *et al.*, 2021; Interesova *et al.*, 2020)。若 ASISK 评估分值 < 1 表示无入侵风险, ≥ 1 表示具有入侵风险。用受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC 曲线) 中的尤登指数 (Youden's index) 确定中风险和高风险的阈值 (Copp *et al.*, 2009)。根据以下公式进行置信因子的计算:

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

式中, CF 代表置信因子 (confidence factor), CL 代表置信级别, CL_{Q_i} 代表第 i 个问题的置信度级别。

1.3 鱼类潜在适生区预测

高入侵风险鱼类的分布经纬度数据来自本课题组野外采集数据以及文献资料等。

环境变量数据来自 WorldClim 网站 (<http://www.worldclim.org>), 当前气候数据是 50 年 (1950—2000 年) 数据的平均值, 未来气候数据选用 2050 年 (2040—2060 年的平均值) 全球气候模型 ACCESS1-0 (AC) 中温室气体排放量适中的 RCP45 模式, 用以代表该模式下的平均值。该数据集包含 19 种栅格大小为 25 km² 环境气候变量 (年均温、月均昼夜温差、等温性、温度季节性变化方差、最暖月最高温、最冷月最低温、年温度范围、最湿季均温、最早季均温、最暖季均温、最冷季均温、年均降水量、最湿月降水量、最早月降水量、降水量方差、最湿季降水量、最早季降水量、最暖季降水量、最冷季降水量) (谭谋和汪洋, 2021)。为了与环境数据的分辨率相匹配, 需要对分布数据进行筛选, 每个栅格中仅随机使用一条分布记录, 以减少采样带来的偏差 (Zhang *et al.*, 2020b)。为避免使用的环境变量之间出现较强的相关性, 使用 R 中的 usdm 包计算 vif 值 (方差膨胀因子), 剔除 vif 值超过 10 即共线性较强的环境变量 (Zhang *et al.*, 2020a)。处理后的物种分布数据与环境图层一起导入 MaxEnt 模型。

采用 ROC 曲线下的面积值 (area under curve, AUC) 评价模型预测结果的精确度。AUC 值越接近 1, 表明预测模型与环境因子相关性越高, 预测结果就越精确 (Zhang *et al.*, 2020b)。

使用 ArcGIS10.4 软件将预测结果的与广西内陆水域进行叠加, 并用 Adobe Illustrator 2019 对其高入侵风险外来鱼类的潜在适生区进行排版。

2 结果

2.1 广西内陆水域外来鱼类种类组成

由表 1 可知, 广西内陆水域共记录外来鱼类 18 种, 隶属 6 目 12 科 16 属, 以鲈形目 (6 种)、鲤形目 (5 种) 和鲇形目 (3 种) 数量最多。在科水平上, 以丽鱼科和鲤科的种类数最多, 均为 4 种; 在属水平上, 种类数超过 2 种的属仅有口孵罗非鱼属。

在引种途径上, 18 种外来鱼类由水产养殖、观赏鱼贸易和生物防治目的引进。其中, 出于水产养殖目的引进的种包括太湖新银 *Neosalanx taihuensis* Chen、短盖肥脂鲤、条纹鲮脂鲤、胭脂鱼 *Myxocyprinus asiaticus* Bleeker、丁鲷 *Tinca tinca* L.、麦瑞加拉鲮、露斯塔野鲮、团头鲂 *Megalobrama amblycephala* Yih、大口黑鲈、鳊 *Siniperca chuatsi* (Basilewsky)、尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、奥利亚罗非鱼 *Oreochromis aureus* (Steindachner)、莫桑比克罗非鱼 *Oreochromis mossambicus* Peters、斑点叉尾鲷 *Ictalurus punctatus* Rafinesque 和尖齿胡鲇 16 种; 出于观赏鱼贸易引进的只有豹纹脂身鲇 1 种; 出于生物防治目的引进的只有食蚊鱼 *Gambusia affinis* Baird & Girard 1 种。

在原产地, 外来鱼类来源于全球 6 个不同的区域, 其中原产于非洲的有尼罗罗非鱼、奥利亚罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、齐氏罗非鱼和尖齿胡鲇等 5 种; 原产于东南亚的有露斯塔野鲮和麦瑞加拉鲮 2 种; 原产于南美的有豹纹脂身鲇、短盖巨脂鲤和条纹鲮脂鲤等 3 种; 原产于北美的有大口黑鲈、斑点叉尾鲷和食蚊鱼 3 种; 原产于长江流域的有太湖新银鱼、胭脂鱼、团头鲂和鳊 4 种; 原产于新疆额尔齐斯河的有丁鲷 1 种。

2.2 鱼类入侵风险评估

鱼类入侵风险评估结果见表 2, 其中: 高入侵风险鱼类 13 种, 分别是尖齿胡鲇 (1.4645)、尼罗罗非鱼 (1.4235)、豹纹脂身鲇 (1.3620)、齐氏罗非鱼 (1.3295)、莫桑比克罗非鱼 (1.2970)、奥利亚罗非鱼 (1.297)、大口黑鲈 (1.2545)、斑点叉尾鲷 (1.242)、短盖肥脂鲤 (1.1700)、露斯塔野鲮 (1.0818)、条纹鲮脂鲤 (1.0585)、麦瑞加拉鲮 (1.0135) 和食蚊鱼 (1.0126); 中入侵风险的 2 种, 分别是丁鲷 (0.9865) 和太湖新银鱼 (0.7505); 其余 3 种鱼类入侵风险较低。以尖齿胡鲇的三级指标的评分结果为例, 见图 1。

表 2 基于外来鱼类入侵风险评估体系的评估结果

Table 2 The results of risk assessment system for invasion of alien fish species

物种 Species	评估结果 Results	风险级别 Risk level	物种 Species	评估结果 Results	风险级别 Risk level
尖齿胡鲇 <i>Clarias gariepinus</i>	1.4645	高 High	露斯塔野鲮 <i>Labeo rohita</i>	1.0818	高 High
尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	1.4235	高 High	条纹鲮脂鲤 <i>Prochilodus lineatus</i>	1.0585	高 High
豹纹脂身鲇 <i>Pterygoplichthys pardalis</i>	1.3620	高 High	麦瑞加拉鲮 <i>Cirrhinus mrigala</i>	1.0135	高 High
齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i>	1.3295	高 High	食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	1.0126	高 High
奥利亚罗非鱼 <i>Oreochromis aureus</i>	1.2970	高 High	丁鲷 <i>Tinca tinca</i>	0.9865	中 Medium
莫桑比克罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus</i>	1.2970	高 High	太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	0.7505	中 Medium
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	1.2545	高 High	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	0.6695	低 Low
斑点叉尾鲷 <i>Ictalurus Punetaus</i>	1.2420	高 High	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	0.6235	低 Low
短盖肥脂鲤 <i>Piaractus brachypomus</i>	1.1700	高 High	胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	0.5835	低 Low

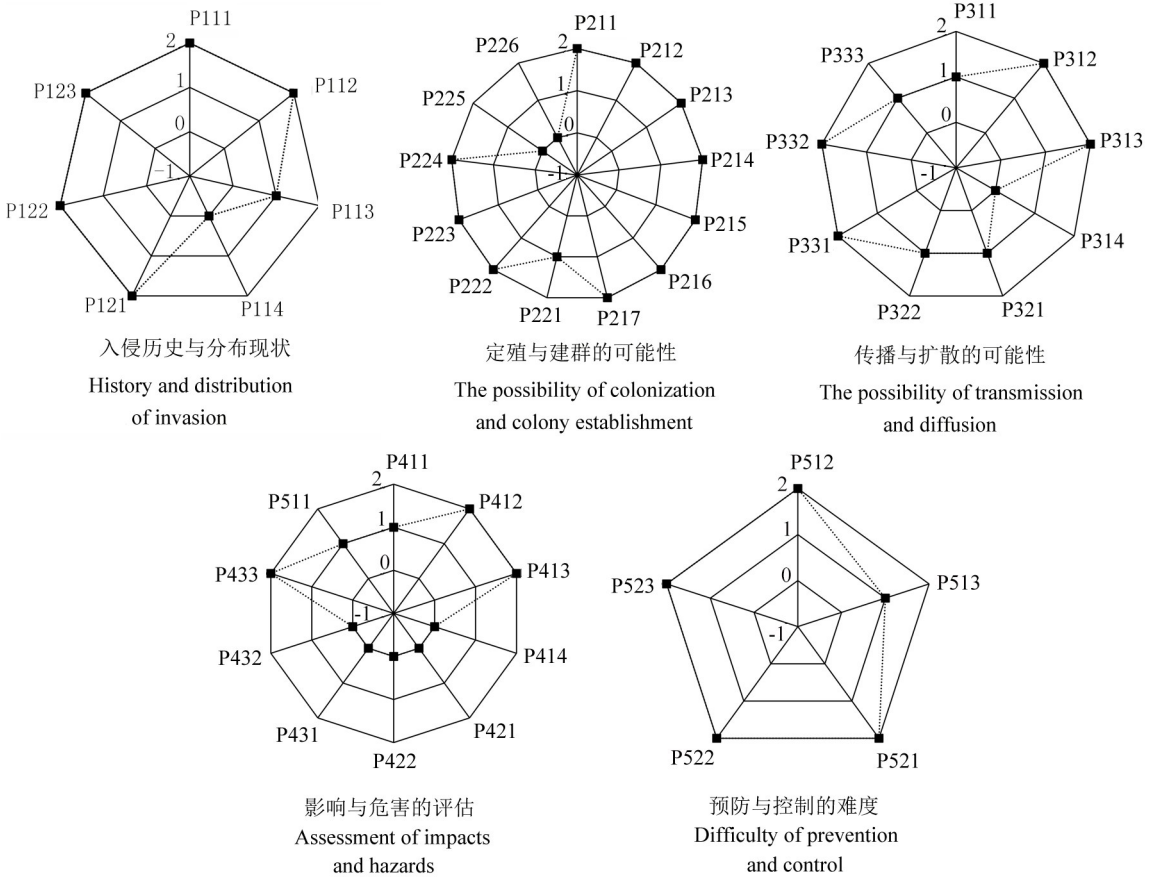


图 1 尖齿胡鲇的三级指标分值*

Fig.1 The score of the three level indices of *Clarias gariepinus* *

*: 扫描本文 OSID 码, 查看附录 I, 可知各指标代码。

*: Scan the OSID code of this paper, and see appendix I for the index code.

2.3 水生生物入侵能力筛查系统评估

ROC 曲线分析显示,基本风险得分(BRA)和综合得分(BRA+CCA)95%置信区间分别为 0.790~1.000 和 0.815~1.000,AUC 值均大于 0.5,表明筛查系统评估力较好。约登指数显示中等风险和高风险阈值分别为 8.5 (BRA)和 15.5 (BRA+CCA)。根据阈值,尖齿胡鲇、尼罗罗非鱼、豹纹脂身鲇、齐氏罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、奥利亚罗非鱼、大口黑

鲈、斑点叉尾鲷、短盖肥脂鲤、露斯塔野鲮、麦瑞加拉鲮、条纹鲮脂鲤和食蚊鱼具有高入侵风险;丁鲷和太湖新银鱼具有中等入侵风险;其余 3 种鱼类入侵风险低(图 2)。

2.4 高入侵风险鱼类的潜在适生区预测

综合 2 种评估体系结果,对具高入侵风险的 13 种外来鱼类在广西内陆水域的潜在适生区进行预测。13 种外来鱼类 ROC 曲线训练集及测试集 AUC

值在 0.985~0.996, 预测精度高。结果显示, 尖齿胡鲇、尼罗罗非鱼、奥利亚罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、豹纹脂身鲇、斑点叉尾鲷、短盖肥脂鲤、露斯塔野鲮、条纹鲮脂鲤、麦瑞加拉鲮和食蚊鱼的潜在适生区范围较大, 其中尼罗罗非鱼、奥利亚罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、斑点叉尾鲷、露斯塔野鲮和食蚊鱼的潜在适生区基本覆盖整个广西内陆水域, 齐氏罗非

鱼主要集中在黔江、郁江、南流江、桂江和浔江等局部江段, 大口黑鲈的潜在适生区面积相对较小, 黔江、邕江和南部入海河流是其潜在适生区。从潜在分布水系来看, 广西内陆水域黔江、郁江和南流江适宜指数最高, 是鱼类入侵风险最高的水域; 东北部和西北部山区河流湘江和资水江段以及红河流域百都河适宜指数最低, 发生入侵风险相对较低。

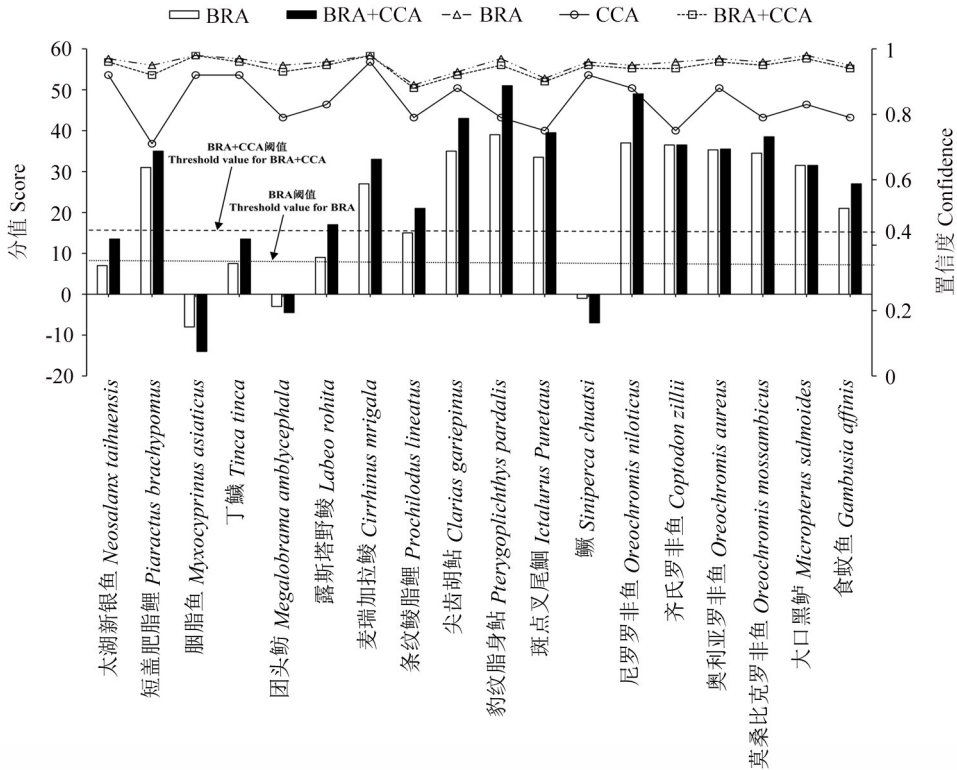


图 2 基于水生生物入侵能力筛查系统的评估结果

Fig.2 The results of aquatic species invasiveness screening kit V2.3

3 讨论

鱼类入侵风险评估体系是窦寅等(2011)建立的可量化的评估指标体系, 适用于不同区域外来鱼类的入侵风险评估。AS-ISK 是 Copp *et al.* (2016) 在杂草评估系统的基础上开发的风险评估工具, 适用于多个水生生物类群, 近年来已在欧洲、东南亚等地区应用(李雪健等, 2021)。与 AS-ISK 相比, 鱼类入侵风险评估体系应用较少, 但 2 种方法的评价内容具有较高的相似性, 较全面地覆盖了鱼类的生物学特征和评估区域的环境气候特征, 能准确量化外来鱼类的入侵风险能力。对外来鱼类的适生区预测是防止其入侵和管理防治的重要方法之一, 其中, Max-Ent 模型是目前应用较广的用于模拟给定环境条件下外来物种出现概率的物种分布模型(谭谋和汪洋,

2021), 已在麦穗鱼、鲫(张熙鹭等, 2014)、豹纹脂身鲇(姚骁, 2019)、大眼鳊、丁鲷(李雪健等, 2021)等外来鱼类上应用, 有模拟精度高、操作简便、结果稳定、所需样本量小等优点。

2 种评估体系结果均显示, 食蚊鱼、麦瑞加拉鲮、条纹鲮脂鲤、露斯塔野鲮、短盖肥脂鲤、尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、奥利亚罗非鱼、大口黑鲈、斑点叉尾鲷、尖齿胡鲇和豹纹脂身鲇 13 种鱼具有高入侵风险。其中, 食蚊鱼、尖齿胡鲇、斑点叉尾鲷和大口黑鲈是肉食性鱼类, 其他鱼类则是典型的杂食性鱼类(顾党恩, 2020)。肉食性鱼类在新栖息地容易存活和形成入侵, 主要是因为被捕食的鱼类往往短时间无法进化出相应的逃逸策略(Moyle & Light, 1996)。杂食性鱼类中, 那些食物来源更广泛、能适应低质量资源的种类更容易存

活,也更容易减少与土著种和其他种在食物资源上的竞争,食物来源的稳定性得到保证,从而促进种群的增长和扩张(Gido & Franssen,2010)。

尖齿胡鲂产于埃及尼罗河流域,1981年引入我国,目前在全国许多地区均有养殖(李华业等,1984)。然而,由于养殖逃逸,尖齿胡鲂进入自然水域,加之较强的建群、扩散能力,使得存在于我国华南地区许多自然水域中,在一些江段更是成为优势种(朱赟杰等,2016)。目前,已在邕江、郁江、西江梧州段、红水河等江段发现能自然繁殖的尖齿胡鲂种群(朱赟杰等,2017),说明其在广西内陆水域已经成功入侵。根据适生区预测结果,尖齿胡鲂在广西内陆水域的适生区范围最大,除资江和百都河等江段外,在广西内陆水域的各江段生境适合度都很高。养殖池塘缺少防护措施,是尖齿胡鲂能够发生逃逸而进入临近河流的首要原因,须加强养殖场的管理,严防养殖逃逸。

尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、奥利亚罗非鱼等罗非鱼均具有入侵历史,主要通过人为引进和养殖逃逸等方式入侵,目前已入侵至广西内陆水域各个江段(Gu *et al.*,2018)。罗非鱼会与土著鱼类竞争栖息地和饵料并捕食其鱼卵及幼鱼,影响着土著鱼类的生存和繁殖,目前已造成了严重的生态危害(Gu *et al.*,2015)。通过对几种罗非鱼的适生区预测,除资水江段外在广西内陆水域适宜性均较高,尤其在浔江、黔江、柳江、贺江等江段适宜性极高;而齐氏罗非鱼不属于口孵型罗非鱼,通过在水体筑巢穴进行产卵护幼,且生长速度较口孵非鲫鱼类慢,个体小,生产上已被其他罗非鱼品种替代(陈素芝和叶卫,1994;何耀升等,2013)。因此,现存的分布范围较其他罗非鱼窄,预测的适生区范围较为局限,其入侵防范的重点主要在黔江、郁江和南流江等江段。

豹纹脂身鲂于20世纪90年代出于观赏目的被引进广东省,由于其具有较强的生存和繁殖能力,对水质和食物要求远低于其他鱼类,已成为华南地区入侵风险最高的外来鱼类之一(李家乐,2007)。预测结果表明,广西内陆水域除湘江、资水、漓江等江段均为适生区。因此,对目前尚未占据的适生区域应采取重点防范,加强监管。大口黑鲈是经济价值高的名贵养殖的肉食性鱼类,也是重要游钓鱼类,目前在广西沿海一带被广泛养殖(肖

乔芝等,2020),预测结果表明,其适生区为邕江、黔江和南部入海河流等江段,因此,需要加强对大口黑鲈的养殖管理,防止其逃逸至野外危害土著鱼类。斑点叉尾鲂于1984年从美国密西西比河中游引进,经过30多年的研究及推广已作为广西大宗淡水养殖鱼类(李林等,2012;陶建军,2017)。在其性腺发育过程中,需要一个较长时间的适宜低温刺激,才能促使亲鱼性腺发育达到成熟产卵排精的程度(曾庆祥等,2009)。研究证实,广东、海南由于所处纬度较低,温度较高,冬季低温时间较短,不能完全满足斑点叉尾鲂冷刺激所需的较长时间的低温条件,因而斑点叉尾鲂未在广东和海南形成入侵(顾克恩,2020;曾庆祥等,2009)。但广西江段的水温普遍比广东江段低(帅方敏等,2020),此外根据其在抗逆力、传播与扩散(适生区范围基本涵盖整个广西内陆水域)、未发现天敌等已经显现出外来入侵物种的特征(卜跃先等,2008)。因此,需要开展大量的试验研究,以论证其对当地生态系统和经济发展的影响。

除此之外,高入侵风险鱼类食蚊鱼因其极强的耐受性与繁殖力,已成为世界性分布的外来入侵种,现已广泛分布于广西内陆水域(严云志等,2009),目前国内对食蚊鱼的入侵机制、适应性等方面内容已陆续开展研究,但还需结合广西内陆水域生境特点,选择可行的措施来对其进行控制和清除,既需要保证控制效果,还需避免对土著特有鱼类和水域溶岩生境造成破坏。麦瑞加拉鲮、条纹鲮脂鲤、露斯塔野鲮和短盖肥脂鲤等高入侵风险鱼类适生区预测范围已遍布整个广西内陆水域,但目前国内缺乏其入侵机制和生态适应性的研究,因此,急需开展其资源状况和种群变化趋势以及对土著鱼类和生态环境影响的研究,这是未来开展针对性防控、清除和治理工作的理论基础。对于中入侵风险的外来鱼类,如丁鱥和太湖新银鱼,由于人工养殖量大、环境适应性强,一旦逃逸极易在野外建群并威胁土著鱼类的多样性(公莉等,2022)。因此,对于中风险鱼类应持续开展监测评估,进一步确定其风险等级。而对于低风险鱼类,如胭脂鱼、团头鲂和鳊,应当判断是信息不足还是由于不具备入侵性特征而被评估为低风险(韦慧等,2021),进而确定是否重新进行评估或采取风险策略进行管理。

通过模型预测,广西内陆水域黔江、郁江和南

流江是鱼类高入侵风险的水域,这可能与广西地处热带,拥有较高的温度有关。通过计算尖齿胡鲇适生区环境变量贡献率(图3),发现与温度相关的环境变量(最暖季平均温度、最干季平均温度和等温性)贡献率高达78.4%,对尖齿胡鲇在广西内陆水域的潜在分布起到极大的作用。对于原产于热带地区的外来鱼类,温度是制约其种群分布和扩散的

最大因素。正因为温度等非生物环境的作用,大部分的外来鱼类更容易在与原产地更相似的生态系统生存并建立种群(Breshears *et al.*, 2022)。因此,掌握温度等非生物因子对外来鱼类分布和种群数量的影响以及栖息地的气候条件与原产地的差异,能够了解特定的水生生态系统更容易被哪些外来鱼类所入侵,从而采取相应的防控和管理措施。

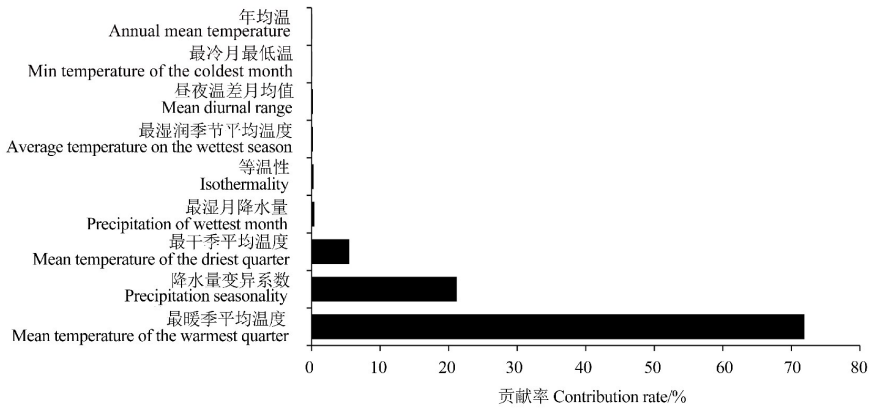


图3 尖齿胡鲇潜在适生区环境变量的贡献率

Fig.3 Contribution rate of environmental variables in potential suitable areas of *Clarias gariepinus*

华南地区由于地处热带和亚热带地区,外来物种数量更多,危害也更为严重。华南地区养殖了中国81%的外来鱼类,同时,华南地区也是我国观赏鱼进口的中转站和主要市场,大量的外来鱼类被引种、养殖、丢弃或者逃逸(Gu *et al.*, 2018)。广西岩溶地形发达,江河纵横,是我国重要淡水渔业生产基地和水生生物资源基因库(广西壮族自治区水产研究所等, 2006),其温暖的气候和密集的河网在促进外来鱼类养殖的同时也有利于逃逸后的外来鱼类生存、繁殖和扩散。因而对广西内陆水域的外来鱼类进行评估和筛选十分必要。

广西水能资源丰富,蕴藏量达到2.133亿kW,河流流域面积达到23.67 km²,境内河流众多,其中红水河滩多水急,被誉为中国水电资源的富矿(广西壮族自治区水产研究所等, 2006),规划的梯级从上至下共建有11个梯级(朱迪等, 2022)。随着全区水电工程的运行,形成库区的河段水位升高、流速降低、营养物质增加、水体的初级生产力提高(巴家文和陈大庆, 2012),为外来鱼类的定殖和扩散提供丰富的饵料来源,如:罗非鱼在红水河龙滩库区大量繁衍,并形成该江段的优势群体(薛联芳等, 2010)。此外,外来鱼类通过放生、逃逸等方式进入库区后将与土著鱼类竞争饵料资源和生活空间,短

盖肥脂鲤、豹纹脂身鲇、尖齿胡鲇、罗非鱼等还会捕食土著鱼类的卵和幼体;亲缘关系较近的外来鱼类,如尖齿胡鲇还可能与胡鲇 *Clarias batrachus* L. 杂交,污染其种质资源,造成种质资源退化(顾党恩等, 2012)。

综上所述,广西内陆水域的外来鱼类入侵较为严重,但目前该区域开展对外来鱼类入侵机制和防控对策的研究工作较为薄弱,为降低其生态危害,需严控人为引种、养殖和传播、加强黔江、郁江和南流江等江段外来鱼类的预警和监测等防控对策。此外,建议相关科研单位加大研究力度,系统研究广西外来鱼类的入侵生态机制、与土著鱼类的种间关系、防控对策及有效性等。

参考文献

- 巴家文, 陈大庆, 2012. 三峡库区的入侵鱼类及库区蓄水对外来鱼类入侵的影响初探. 湖泊科学, 24(2): 185-189.
- 卜跃先, 谢初昀, 刘鑫宇, 任宇, 2008. 引进外来物种的环境风险评价初探——以美国斑点叉尾鲷为例. 水利渔业, 28(1): 82-84.
- 陈素芝, 叶卫, 1994. 我国引进的罗非鱼类的初步研究. 动物学杂志, 29(3): 18-23.
- 窦寅, 吴军, 黄成, 2011. 外来鱼类入侵风险评估体系及方

- 法. 生态与农村环境学报, 27(1): 12-16.
- 公莉, 过龙根, 尹成杰, 杨姣姣, 杨雅兰, 2022. 洱海西太公鱼和太湖新银鱼生长特性及种群调控效果研究. 水生生态学杂志, 43(1): 117-123.
- 顾党恩, 2020. 华南地区主要河流外来鱼类的分布格局及其影响因素. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院大学.
- 顾党恩, 牟希东, 罗渡, 李莹莹, 汪学杰, 宋红梅, 罗建仁, 胡隐昌, 2012. 广东省主要水系外来水生动物初步调查. 生物安全学报, 21(4): 272-276.
- 广西壮族自治区水产研究所, 2006. 广西淡水鱼类志. 2 版. 南宁: 广西人民出版社.
- 何耀升, 林小涛, 孙军, 张鹏飞, 2013. 东江外来齐氏罗非鱼个体繁殖力初步研究. 生态科学, 32(1): 57-62.
- 李桂峰, 2020. 珠江流域广西主要江河鱼类资源调查与研究. 北京: 科学出版社.
- 李华业, 邓新华, 叶卫, 阮世玲, 1984. 引进淡水鱼良种——革胡子鲶. 淡水渔业, 1(1): 7-12.
- 李林, 严朝晖, 肖友红, 2012. 斑点叉尾鲇国内市场现状及产业发展前景浅析. 中国水产, 1(9): 35-36.
- 李家乐, 2007. 中国外来水生动植物. 上海: 上海科学技术出版社.
- 李捷, 李新辉, 贾晓平, 李跃飞, 何美峰, 谭细畅, 王超, 蒋万祥, 2010. 西江鱼类群落多样性及其演变. 中国水产科学, 17(2): 298-311.
- 李雪健, 唐文乔, 赵亚辉, 2021. 南水北调中线工程对海河流域鱼类入侵风险分析. 生物多样性, 29(10): 1336-1347.
- 雷娟, 廖永岩, 张艳秋, 方怀义, 徐淑庆, 2016. 外来鱼类风险评估方法与管理对策. 钦州学院学报, 31(7): 1-5, 32.
- 郦珊, 陈家宽, 王小明, 2016. 淡水鱼类入侵种的分布、入侵途径、机制与后果. 生物多样性, 24(6): 672-685.
- 帅方敏, 李新辉, 何安尤, 刘乾甫, 张迎秋, 武智, 朱书礼, 2020. 珠江水系广西江段鱼类多样性空间分布特征. 水生生物学报, 44(4): 819-828.
- 陶建军, 2017. 斑点叉尾鲇产业发展情况综述. 渔业致富指南, 1(13): 14-17.
- 韦慧, 刘超, 胡隐昌, 汪学杰, 牟希东, 顾党恩, 徐猛, 房苗, 2021. 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. 生态与农村环境学报, 38(4): 1-20.
- 谭谋, 汪洋, 2021. 栉方翅网蝽 *Corythucha arcuate* (Say) 在中国的潜在适生区预测. 生物安全学报, 30(2): 137-142.
- 肖乔芝, 陈利娟, 仇玉萍, 陈国柱, 2020. 滇池发现外来鱼类大口黑鲈. 动物学杂志, 55(6): 834-835.
- 薛联芳, 顾洪宾, 崔磊, 杨文正, 韦兵, 齐彦斌, 2010. 红水河干流梯级开发对水温累积影响的调查研究. 水力发电, 36(11): 5-8.
- 严云志, 陈毅峰, 陶捐, 2009. 食蚊鱼生态入侵的研究进展. 生态学杂志, 28(5): 950-958.
- 姚骁, 2019. 基于 GIS 的外来物种适生区预测及系统设计——以豹纹脂身鲶为例. 硕士学位论文. 桂林: 桂林理工大学.
- 曾庆祥, 朱恩华, 简少卿, 黄林海, 虞鹏程, 2009. 影响斑点叉尾鲇亲鱼自然产卵率的关键因素研究. 水产养殖, 30(10): 59-62.
- 赵立朝, 吴志强, 张曼, 郑雄, 李德越, 刘博文, 2019. 广西南部主要水系野生罗非鱼建群状况调查分析. 南方农业学报, 50(2): 397-404.
- 张熙鹭, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰, 2014. 基于 MaxEnt 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. 生物多样性, 22(2): 182-188.
- 张迎秋, 黄稻田, 李新辉, 刘乾甫, 李捷, 李跃飞, 杨计平, 朱书礼, 2020. 西江鱼类群落结构和环境影响分析. 南方水产科学, 16(1): 42-52.
- 郑雄, 赵立朝, 吴志强, 张洁, 黄亮亮, 汪开成, 张曼, 2019. 广西右江流域野生罗非鱼种群及其杂合性研究. 南方农业学报, 50(12): 2797-2805.
- 朱迪, 王崇, 杨志, 陈小娟, 2022. 筑坝河流鱼类生物完整性研究——以珠江流域红水河为例. 水生生态学杂志: 1-14. DOI:10.15928/j.1674-3075.202108300303..
- 朱贇杰, 顾党恩, 韦慧, 牟希东, 罗渡, 徐猛, 罗建仁, 胡隐昌, 2016. 华南地区外来鱼类革胡子鲶的建群状况. 淡水渔业, 46(1): 109-112.
- 朱贇杰, 顾党恩, 韦慧, 牟希东, 罗渡, 徐猛, 罗建仁, 胡隐昌, 2017. 华南地区外来鱼类革胡子鲶的繁殖生物学. 生态学杂志, 36(1): 137-143.
- ALMELA V D, PALMER S C F, ANDREOU D, GILLINGHAM P K, TRAVIS J M J, BRITTON J R, 2022. Predicting the influence of river network configuration, biological traits and habitat quality interactions on riverine fish invasions. *Diversity and Distributions*, 28(2): 257-270.
- BRESHEARS D D, ESPELETA J F, RAVI S, CAPLAN J S, GAFFORD G B, VILLEGAS J C, 2022. Biological invasions and climate change amplify each other's effects on dryland degradation. *Global Change Biology*, 28(1): 285-295.
- COPP G H, VILIZZI L, MUMFORD J, FENWICK G V, GODDARD M J, GOZLAN R E, 2009. Calibration of fisk, an invasiveness screening tool for nonnative freshwater fishes. *Risk Analysis an Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 29(3): 457-467.
- COPP G H, VILIZZI L, TIDBURY H, STEBBING P D, TRAKAN A S, MIOSSEC L, 2016. Development of a generic decision-support tool for identifying potentially invasive aquatic

- taxa: AS-ISK. *Management of Biological Invasions*, 7(4): 343–350.
- GIDO K B, FRANSSEN N R, 2010. Invasion of stream fishes into low trophic positions. *Ecology of Freshwater Fish*, 16(3): 457–464.
- GU D E, MA G M, ZHU Y J, XU M, LUO D, LI Y Y, WEI H, MU X D, LUO J R, HU Y C, 2015. The impacts of invasive Nile *Tilapia* (*Oreochromis niloticus*) on the fisheries in the main rivers of Guangdong Province, China. *Biochemical Systematics and Ecology*, 59(1): 1–7.
- GU D E, YU F D, XU M, WEI H, MU X D, 2018. Temperature effects on the distribution of two invasive *Tilapia* species (*Tilapia zillii* and *Oreochromis niloticus*) in the rivers of south China. *Journal of Freshwater Ecology*, 33(1): 521–534.
- INTERESOVA E A, VILIZZI L, COPP G H, 2020. Risk screening of the potential invasiveness of non-native freshwater fishes in the river Ob basin (West Siberian Plain, Russia). *Regional Environmental Change*, 20(2): 64.
- LAURA R, KIEU A T T, THUYET D B, 2021. Publisher correction; risk screening of the potential invasiveness of non-native aquatic species in Vietnam. *Biological Invasions*, 23(7): 2061.
- LIEURANCE D, KUEBBING S, MCCARY M A, NUEZ M A, 2021. Words matter; how to increase gender and lgbtqia+inclusivity at Biological Invasions. *Biological Invasions*, 24(2): 341–344.
- LIU X, MCGARRITY M E, LI Y, 2012. The influence of traditional Buddhist wildlife release on biological invasions. *Conservation Letters*, 5(2): 107–114.
- MOYLE P B, LIGHT T, 1996. Fish invasions in California: do abiotic factors determine success? *Ecology*, 77(6): 1666–1670.
- XIONG W, SUI X Y, LIANG S H, CHEN Y F, 2015. Non-native freshwater fish species in China. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 25(4): 651–687.
- ZHANG Z, CAPINHA C, KARGER D N, TURON X, MACISAAC H J, ZHAN A, 2020a. Impacts of climate change on geographical distributions of invasive ascidians. *Marine Environmental Research*, 159(1): 104993.
- ZHANG Z, MAMMOLA S, MCLAY C L, CAPINHA C, YOKOTA M, 2020b. To invade or not to invade? exploring the niche-based processes underlying the failure of a biological invasion using the invasive chinese mitten crab. *Science of the Total Environment*, 728(1): 138815.

(责任编辑:郭莹)

