

气候变化下中国罗非鱼潜在入侵区预测

陈灵芝^{1,2}, 钟亚娜¹, 冯 程², 颜云榕¹

1. 广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524088

2. 广东海洋协会, 广东 广州 510220

摘要: 罗非鱼作为中国引入的重要经济鱼类, 具有较强的环境适应和资源利用能力。其入侵潜力对本土生态系统造成了严重负面影响, 而未来气候变化的不确定性进一步增加了罗非鱼入侵防治工作的复杂性。选取中国华南地区广泛分布的 3 种罗非鱼——尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)、莫桑比克罗非鱼 (*O. mossambicus*) 及齐氏罗非鱼 (*Coptodon zillii*), 结合 MaxEnt 模型与 CMIP6 气候模型数据, 对 3 种时间跨度 (当前、2041—2060 年、2081—2100 年) 和 4 种情景 (SSP126、SSP245、SSP370、SSP585) 下罗非鱼的潜在入侵区域进行了预测。结果表明: 1) 广东和广西是罗非鱼入侵治理的重点区域; 2) 未来罗非鱼潜在高风险入侵区面积有增加的趋势; 3) 罗非鱼潜在高风险入侵区有向高纬度迁移的趋势; 4) 冬季温度和降水的协同作用是导致罗非鱼高风险入侵区面积扩增的主要环境驱动因素。

关键词: 罗非鱼; 入侵物种; 物种分布; MaxEnt 模型; 气候变化

中图分类号: S 937

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Prediction of potential invasion areas of tilapia in China under climate change

CHEN Lingzhi^{1,2}, ZHONG Yana¹, FENG Cheng², YAN Yunrong¹

1. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2. Guangdong Ocean Association, Guangzhou 510220, China

Abstract: Tilapia, an economically significant fish introduced to China, exhibits strong environmental adaptability and resource utilization capabilities. However, its invasive potential has also posed severe threats to native ecosystems, and future climate change uncertainties further complicate the prevention and control of tilapia invasion. Thus, we selected three tilapia species widely distributed in South China (*Oreochromis niloticus*, *O. mossambicus*, *Coptodon zillii*) to predict their potential invasion areas during three periods (Current, 2041–2060, 2081–2100) and four climate scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) by using the MaxEnt model and CMIP6 climate data. The results reveal that: 1) Guangdong and Guangxi Provinces are the key regions for tilapia management. 2) The area of potential high-risk invasion areas might increase in the future. 3) These high-risk areas are likely to shift toward higher latitudes. 4) The synergistic effects of winter temperature and precipitation are the primary environmental drivers of the expansion of high-risk invasion areas.

Keywords: Tilapia; Invasive species; Species distribution; MaxEnt model; Climate change

中国面临严峻的外来物种入侵问题。根据生态环境部发布的《2020 中国生态环境状况公报》，全国已发现 660 多种外来入侵物种，其中 71 种因对生态系统造成或具有潜在威胁而被列入《中国外

收稿日期: 2025-01-20; 修回日期: 2025-03-05

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目 (U20A2087); 广东省普通高校青年创新人才类项目 (2022KQNCX025)

作者简介: 陈灵芝 (1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源养护与利用。E-mail: soyandreachen@163.com

通信作者: 颜云榕 (1975—), 男, 教授, 博士, 研究方向为渔业资源开发与保护。E-mail: yryan_gdou@163.com

来物种入侵名单》。随着国际商贸活动日益频繁,物种入侵事件呈上升趋势^[1],因养殖、观赏、生物防治等目的引入的外来物种在本地生境大量繁殖^[2]。例如,东方食蚊鱼(*Gambusia holbrooki*)最初被当作疟疾防治生物被引入,因其食性广、繁殖能力和极端环境耐受力强,在非原生生境大量繁殖并对本土物种构成重大威胁^[3];福寿螺(*Pomacea* sp.)最初用于水产养殖,引入后十年内即在我国大面积扩散,对生态环境、粮食产量、食品安全等造成显著影响^[4]。研究表明,外来物种入侵已成为导致全球生物多样性下降的第二大因素,仅次于栖息地破坏,约20%的物种灭绝事件与之相关^[5]。其中,鱼类入侵对当地生态系统多样性的影响尤为突出。对全球1055条河流的分析显示,在非本地物种占比超过1/4的河流中,入侵热点区域与濒危鱼类物种高发区高度重合^[6]。

罗非鱼原产于非洲,属于鲈形目、丽鱼科,主要由口孵罗非鱼属(*Oreochromis*)、切非鲫属(*Coptodon*)和帚齿罗非鱼属(*Sarotherodon*)等3个属的上百个种类组成^[7]。罗非鱼作为联合国粮农组织(FAO)推荐的优质养殖物种,自20世纪90年代引入中国后,其产业规模迅速增长,目前中国已成为罗非鱼养殖、出口及消费的第一大国^[8]。然而在推动经济增长的同时,罗非鱼因适应能力强、繁殖迅速、食性广的特点而在中国本土野外环境中大量繁殖,对生态系统多样性产生了严重影响^[9-11]。大量渔业资源调查发现,尼罗罗非鱼(*O. niloticus*)、莫桑比克罗非鱼(*O. mossambicus*)和齐氏罗非鱼(*C. zillii*)作为外来物种在我国华南地区具有较高丰度且分布广泛,入侵态势严重^[12]。莫桑比克罗非鱼和齐氏罗非鱼分别于1950年代和1978年被我国引进,均因养殖性能不佳被弃用,但因其优异的环境耐受性,被广泛应用于育种工作;尼罗罗非鱼具有优良的养殖性状,自1970年代被引进后,在我国大量养殖,是当前我国罗非鱼养殖中最常见的品种^[13]。大量的养殖活动不可避免地伴随着生物的逃逸,使非本地物种在野外的入侵概率增加^[14],而我国南方作为罗非鱼主要养殖区域,本地生态系统多样性面临着严峻的挑战。

气候变化是塑造生物分布格局和生态功能的关键因素^[15],对生物生存和分布具有深远影响^[16]。在全球变暖的背景下,物种的地理分布将发生显著变化。对环境具有较强耐受性的物种能更好地适应

未来气候变化,而对环境稳定性依赖较强的物种在未来气候变化的背景下可能面临种群数量下降的危险^[17]。作为外来入侵物种,罗非鱼凭借其较强的环境适应能力,可能在未来占据更大的生态位,因此加强罗非鱼物种入侵防治工作至关重要。在中华人民共和国生态环境部发布的《关于发布中国外来入侵物种名单(第三批)的公告》中,尼罗罗非鱼被列为治理对象;在中华人民共和国农业农村部会同自然资源部、生态环境部、住房和城乡建设部、海关总署和国家林草局联合发布的《重点管理外来入侵物种名录》(自2023年1月1日起施行)中,齐氏罗非鱼被纳入治理名单。在全球气候变化背景下,预测罗非鱼潜在分布变化对其防控治理具有重要意义。因此,本研究选取尼罗罗非鱼、莫桑比克罗非鱼和齐氏罗非鱼这3种在中国野外环境中广泛分布的入侵物种,通过分析气候变化背景下其分布格局的演变,为未来防范罗非鱼物种入侵提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 罗非鱼分布数据的获取及处理

本研究中3种罗非鱼的物种位点均通过GBIF生物数据库(www.gbif.org)获取。作为外来入侵物种,罗非鱼对异质环境具有强适应能力,如仅收集研究区域内的分布数据进行模型拟合可能会导致其生态位宽度被低估。因此,本研究基于全球范围2024年数据集进行检索和建模,由于研究的核心目标是识别我国范围内的罗非鱼潜在入侵区域,故在后续分析中主要关注我国范围内罗非鱼的潜在入侵分布情况,以期为我国罗非鱼入侵防控工作提供更精准的科学依据。最终获取尼罗罗非鱼的有效位点203个,莫桑比克罗非鱼170个,齐氏罗非鱼83个,共计456个。通过R包ENMTools(V1.1.2)对位点数据进行清洗,剔除重复及具有高度空间自相关性的位点,确保每个栅格单元(空间分辨率:2.5 arc-minutes)内仅存在1个物种位点^[18],最后筛选出428个有效位点数据。

1.2 环境数据获取及筛选

1.2.1 环境数据获取

CMIP6(第六次国际耦合模式比较计划,Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)由世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)主导,是当前全球气候建模领域

重要的研究计划^[19]。相较 CMIP5 (第五阶段国际耦合模式比较计划) 模型, CMIP6 模型使用共享社会经济路径 (Shared socioeconomic pathways, SSPs) 和典型浓度路径 (Representative concentration pathways, RCPs) 的矩阵框架对气候变化进行预测。其中, 共享社会经济路径表征未来可能出现的不同经济发展模式及政府决策类型, 而典型浓度路径则用于模拟未来温室气体排放情景。通过不同路径的组合, 该框架能够模拟未来不同发展情景下的气候变化, 展现出更优的模拟能力^[20-22]。本研究选取了当前、2041—2060 年、2081—2100 年 3 个时间尺度, 以及 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 共 4 种情景下的气候数据。气候模型选用 BCC-CSM2-MR, 该模型由国家 (北京) 气候中心研发, 对中国地区气候具有良好的模拟能力^[23-25]。通过 WorldClim (www.worldclim.org) 网站获取空间分辨率为 2.5 arc-minuets 的生物气候因子环境图层^[26], 共计 19 种变量。

1.2.2 环境因子筛选

环境因子间的高度相关性可能引发模型过拟合, 而引入低贡献值的环境变量则会增加模型复杂度, 导致预测性能下降甚至进一步加剧过拟合风险。因此, 本研究根据环境因子相关性系数及建模贡献值进行筛选, 剔除冗余变量^[27]。使用 R 包 ENMeval (V2.0.4) 对环境因子进行筛选, 使用 Spearman 秩相关性系数去除强相关环境因子, 设置阈值为 0.8, 并根据环境变量贡献值去除低贡献值变量, 降低模型复杂程度, 防止过拟合现象出现^[28]。

1.3 模型建立及评估

1.3.1 模型介绍

MaxEnt 模型是物种分布模型 (Species Distribution Models, SDMs) 中的一种, 能够基于物种位点数据及其环境数据对物种潜在分布区进行模拟预测。该模型已被广泛应用于物种分布预测研究, 为动物保护和入侵物种防治提供重要技术支持^[29-32]。其核心算法基于最大熵原理, 通过机器学习估算物种的生态位, 根据输入的环境变量和物种出现位点数据, 计算事件发生的概率, 并将预测结果输出到每个栅格单元。MaxEnt 软件 (V3.4.4) 通过美国自然历史博物馆 (American Museum of Natural History, AMNH) 官方网站下载获取^[33]。

1.3.2 模型参数优化

MaxEnt 模型默认参数为开发者早期对不同区域的 266 种物种进行预测所得的参数, 但对于不同

的数据具有局限性^[34]。模型的复杂度与特征函数组合 (Feature combination, FC) 和正则化乘数 (Regularization multiplier, RM) 选择显著相关, 合适的 FC 和 RM 选择可降低模型复杂度^[35]。本研究使用 R 包 “ENMeval” 对研究对象及环境因子数据集进行参数调优, 分别计算 6 种参数组合模型的 AIC 值 (赤池信息量准则), 组合类型设置为: H、L、LQ、LQH、LQHP、LQHPT (H: 铰链要素, L: 线性要素, Q: 二项式要素, P: 乘积要素, T: 阈值要素)。并对 RM 值进行调节, 从 0 开始每次增幅为 0.1, 递增至 4。结果显示, 当 FC 类型为 LQHPT 且 RM 为 1 时, AIC 值最小 (图 1), 其余参数保持默认设置。采用自然间断点分级法 (Jenks' natural breaks method) 对入侵等级进行分类, 将出现概率为 0~0.07 分类为非入侵区, 0.07~0.24 分类为低风险入侵区, 0.24~0.52 分类为中等风险入侵区, 0.52~1.00 分类为高风险入侵区。

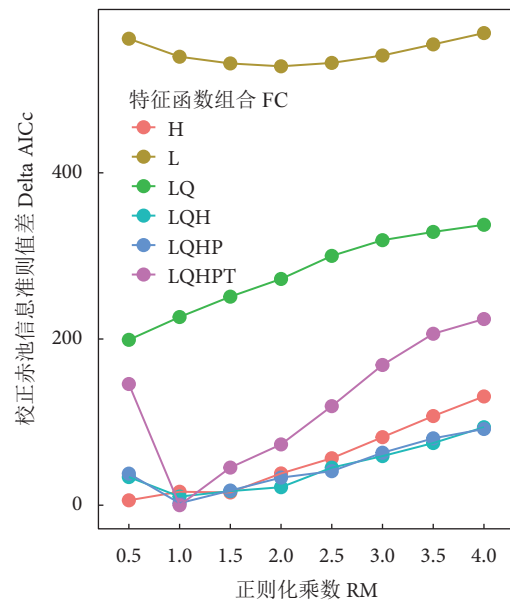


图1 模型特征函数组合 (FC) 与正则化乘数 (RM) 选择
Fig. 1 Selection of model feature class combinations (FC) and regularization multiplier (RM)

1.3.3 模型建立及性能评估

采用受试者操作特征曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 下面积 (AUC) 作为模型精度检测方法。多数研究认为 AUC 值在 0.5~0.7 之间, 表明模型的预测能力一般; 0.7~0.9 之间, 表明模型的预测能力较好; >0.9 则表明模型预测能力优秀^[36]。本研究模型中训练集 AUC 值为 0.948, 测试集 AUC 值为 0.937, 认为该模型具有较好的预测能力 (图 2)。

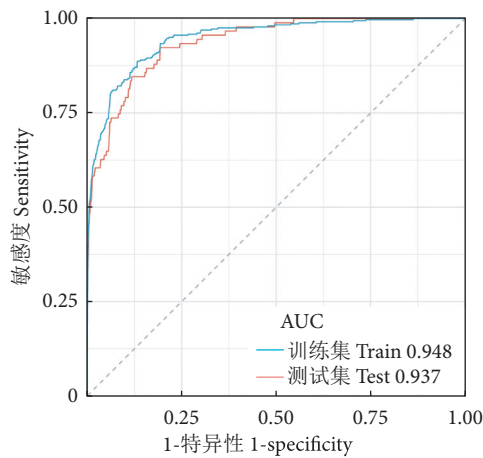


图2 模型受试者操作特征曲线

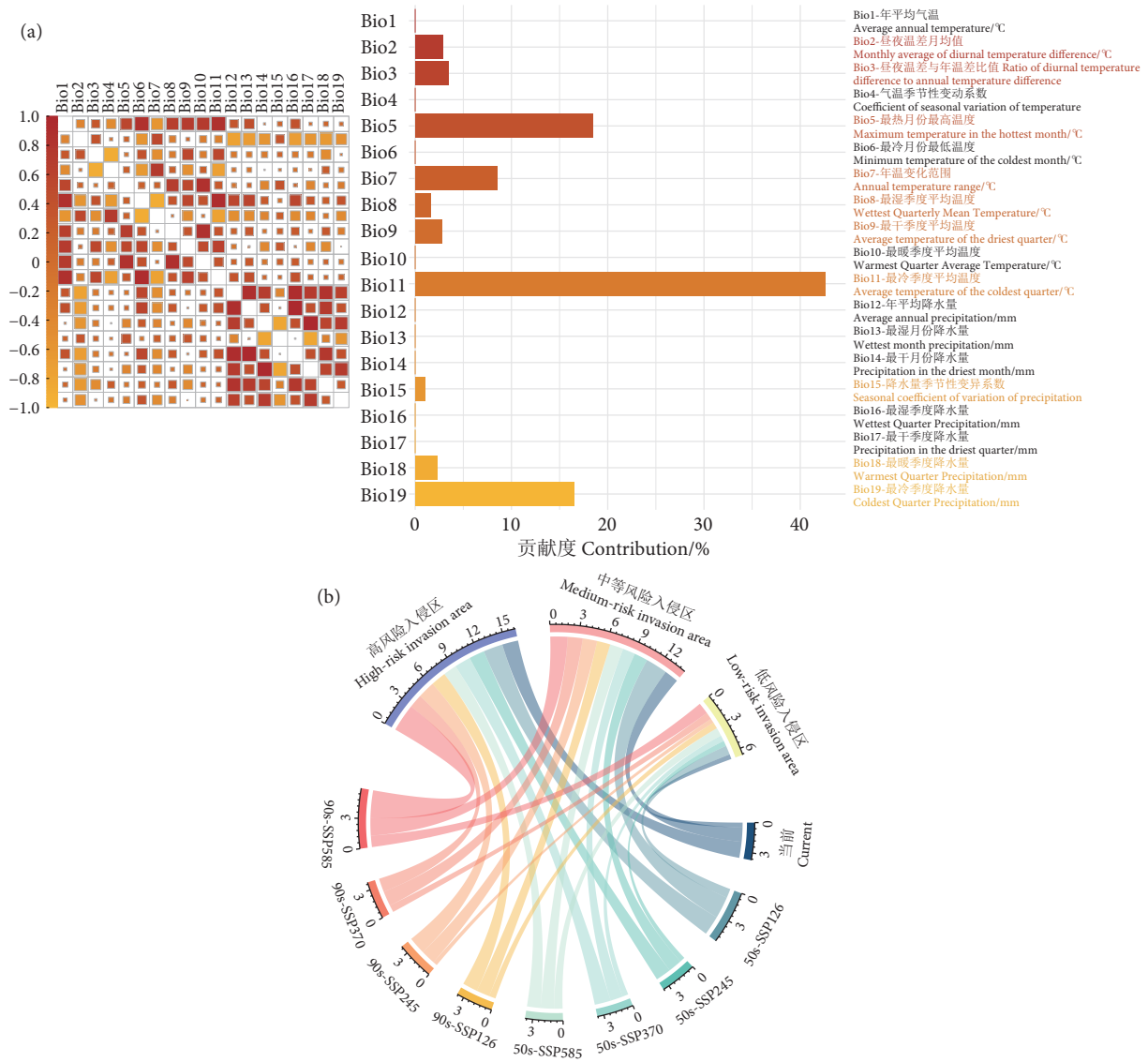
Fig. 2 Model ROC curve

2 结果

2.1 关键环境因子

通过各环境因子贡献比例分析得出, Bio11

(最冷季度平均温度, 42.58%)、Bio5 (最热月份最高温度, 18.43%) 和 Bio19 (最冷季度降水量, 16.51%) 3 个环境因子对罗非鱼分布预测具有较强的解释度, 累计贡献率达 77.52%。其余环境因子的贡献率分别为 Bio2 (昼夜温差月均值) 2.83%, Bio3 (昼夜温差与年温差比值) 3.5%, Bio7 (年温变化范围) 8.54%, Bio8 (最湿季度平均温度) 1.56%, Bio9 (最干季度平均温度) 2.75%, Bio15 (降水量季节性变异系数) 0.98%, Bio18 (最暖季度降水量) 2.29% (图 3-a)。Bio11、Bio5、Bio19 在预测模型中具有最高贡献值, 因此将这 3 个环境因子作为决定罗非鱼入侵风险的关键环境因子。3 个关键环境因子中, Bio11 和 Bio19 为最冷季度环境变量, 这 2 个环境因子均与罗非鱼入侵概率呈正相关关系, Bio5 为最热月份环境变量, 该因子与罗非鱼入侵概率呈负相关关系 (图 3-c)。



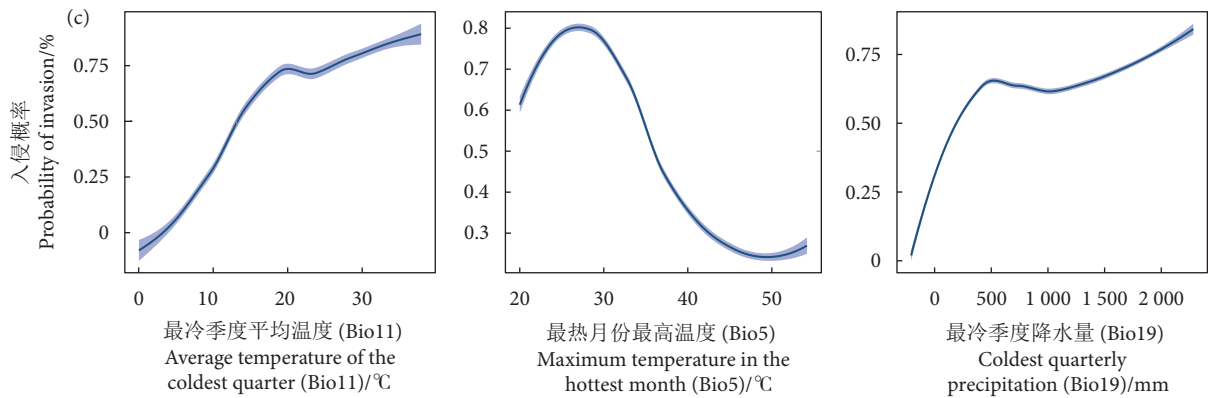


图3 模型结果信息图

注：a. 各环境因子相关性及其贡献值；b. 不同情境下高风险入侵区、中等风险入侵区、低风险入侵区分布（2041—2060 简称为 50s，2081—2100 年简称为 90s，单位： 10^4 km^2 ）；c. 3 个关键环境因子响应曲线。

Fig. 3 Model results information graph

Note: a. Correlation and contribution values of various environmental factors; b. Distribution of high-risk invasion areas, medium-risk invasion areas, and low-risk invasion areas under different scenarios (2041–2060 is abbreviated as "50s", and 2081–2100 is abbreviated as "90s", with units in 10^4 km^2); c. Response curves of three key environmental factors.

2.2 当前潜在入侵风险区

当前罗非鱼潜在入侵区域分布于广东、广西、台湾、海南、云南、福建地区，其潜在高风险入侵区域面积约为 $170\,216.6\text{ km}^2$ (图 3-b)，主要集中在广东、广西全省（区）沿岸和台湾省全岛沿岸 (图 4)，且当前高风险入侵区质心区域位于广东和广西交界处 ($110^{\circ}53'34.8''\text{E}$, $22^{\circ}38'38.4''\text{N}$) (图 5)。在云南南部、海南中部、福建南部存在着罗非鱼的

中等风险入侵区。

2.3 罗非鱼的潜在分布格局变化

在对未来罗非鱼潜在入侵区的预测中，8 种情景中，4 种情景的高风险入侵区面积增加，另外 4 种发生缩减 (图 3-b，图 6)。8 种情景的高风险入侵区累计面积变化为 $103\,039.0\text{ km}^2$ (增幅 60.53%)。在 2081—2100 年 SSP585 情景和 2041—2060 年 SSP126 情景下，高风险入侵区面积显著扩增，分别增

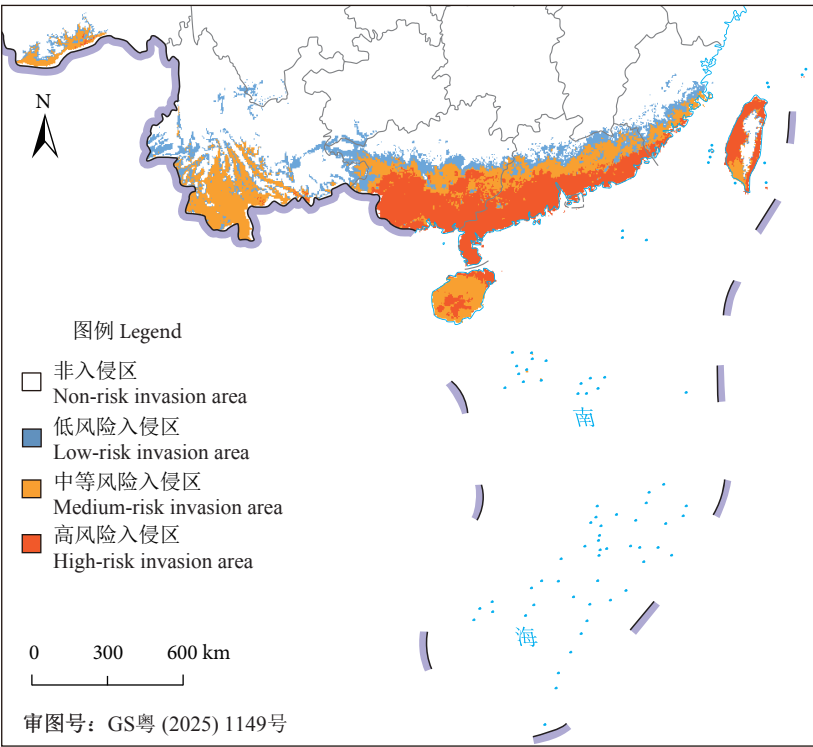


图4 罗非鱼当前潜在入侵区域

Fig. 4 Potential invasive range of tilapia at present

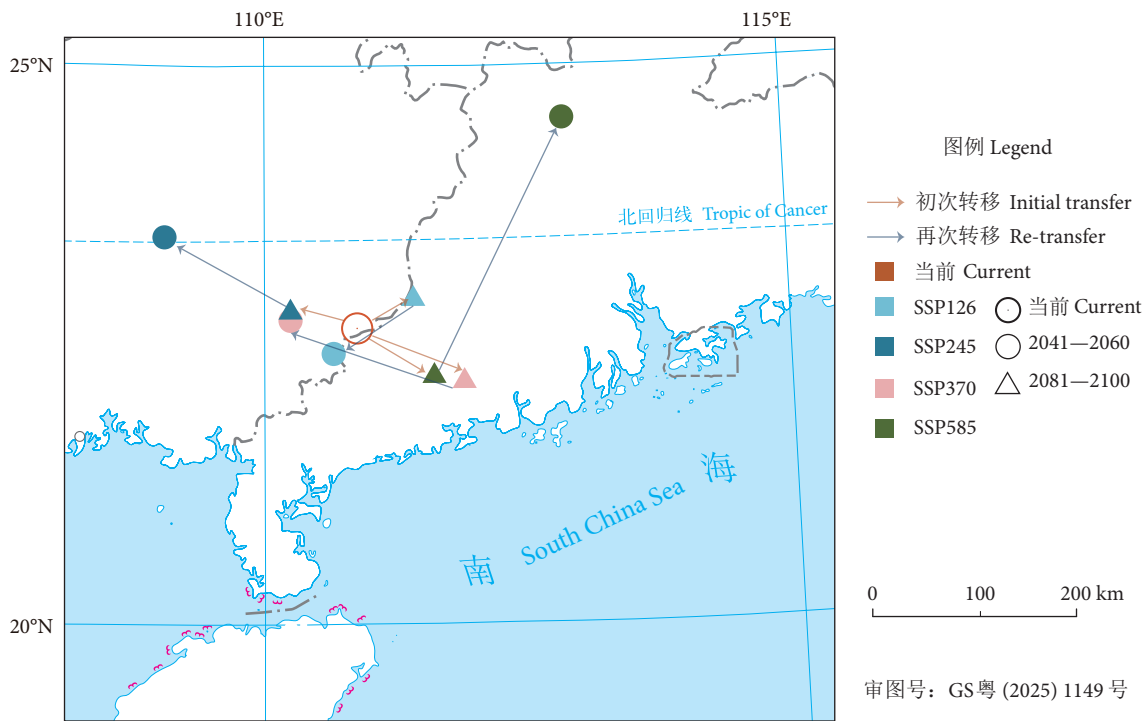
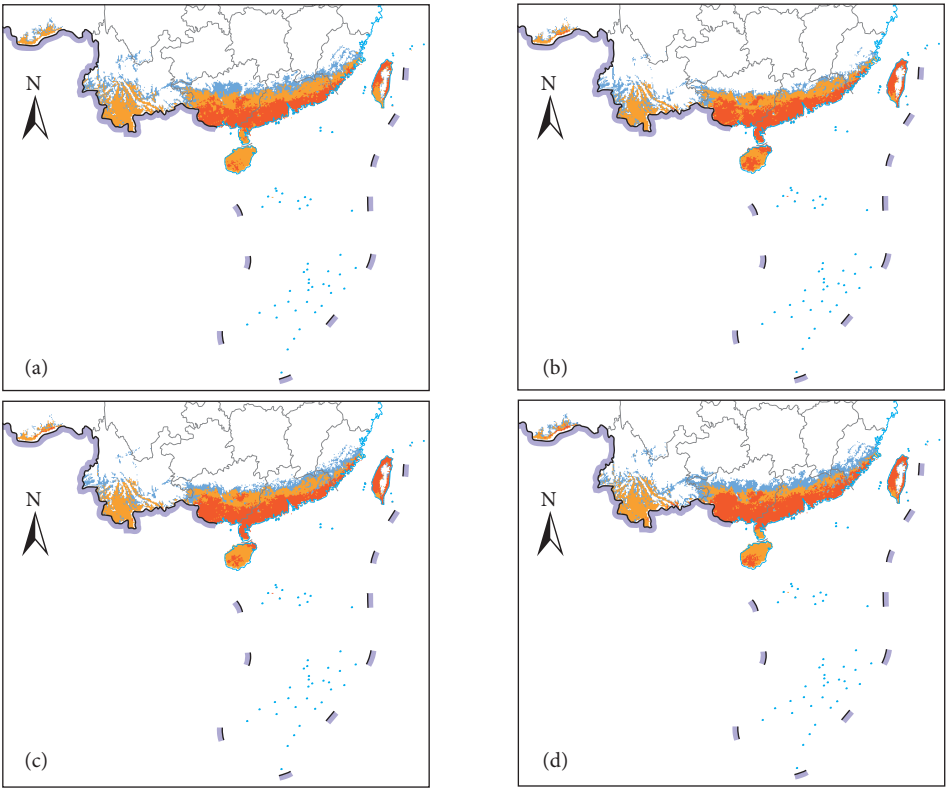


图5 高风险入侵区质心迁移
Fig. 5 Centroid migration of high-risk invasion areas

加至 293 400.6 km² (增幅 72.37%) 和 205 940.6 km² (增幅 20.98%)。而在 2041—2060 年的 SSP585 情景和 2081—2100 年的 SSP370 情景下, 高风险入侵区面积则显著缩减, 分别减少至 143 172.8 km² (降幅 15.89%) 和 143 933.6 km² (降幅 15.44%)。尽管高风

险入侵区面积增加与缩减的情景数量相等, 但面积增加的幅度远大于缩减的幅度。可以推断, 在未来气候变化下, 罗非鱼高风险入侵区更可能呈扩增趋势。

通过对未来罗非鱼高风险入侵区质心迁移的分



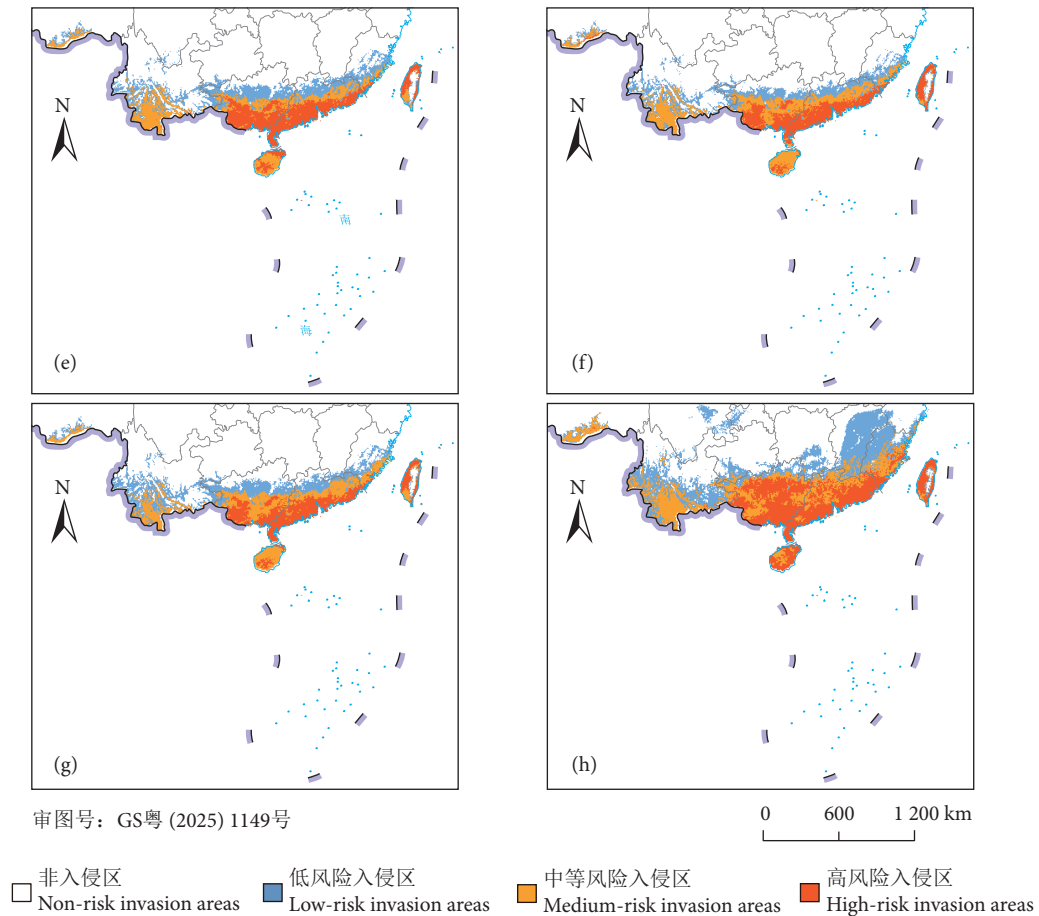


图6 罗非鱼未来入侵区域变化

注: a、c、e、g 时间尺度为 2041—2060 年; b、d、f、h 时间尺度为 2081—2100 年; a、b 为 SSP126 情景; c、d 为 SSP245 情景; e、f 为 SSP370 情景; g、h 为 SSP585 情景。

Fig. 6 Future change in invasive area of tilapia

Note: a, c, e and g are on the timescale of 2041—2060; b, d, f and h are on the timescale of 2081—2100; a and b represent the SSP126 scenario; c and d represent the SSP245 scenario; e and f represent the SSP370 scenario; g and h represent the SSP585 scenario.

析发现, 8 种情景中, 5 种情景质心向高纬度迁移, 3 种情景质心向低纬度迁移(图 5), 较当前质心位置(110°53'34.8"E, 22°38'38.4"N)累计垂直迁移距离为 231.03 km (高纬度方向), 总体趋势向高纬度地区迁移。

3 讨论

3.1 罗非鱼入侵的生态经济影响与管理挑战

生物入侵已成为全球众多国家面临的重大生态挑战, 而中国则是被严重影响的国家之一。1965—2017 年, 亚洲因物种入侵导致的经济损失总计达 4 326 亿美元, 其中中国的损失高达 1 747 亿美元(40.38%)^[37]。为提升水产养殖产量而引入外来物种是引发物种入侵问题的主要原因^[38], 而入侵物种会对当地生态和经济带来不同的影响。在巴布亚新几内亚的库土布湖(Lake Kutubu), 本土鱼类是当

地居民的主要蛋白质来源, 由于长期过度捕捞致使多数本土鱼类物种濒危。2010 年突发洪水事件将罗非鱼偶然带入当地湖泊, 但罗非鱼的入侵并未导致本地濒危物种数量的进一步下降, 反而由于捕捞重心由本土物种向罗非鱼转移, 不仅为当地生物多样性提供了保护, 还保障了食物供应的稳定性^[39]。然而这种积极结果并非普遍现象, 针对我国珠江流域的研究表明, 外来物种生物量每增加 1%, 当地渔民收入平均减少 20.19 元·船⁻¹·月⁻¹^[40]。

罗非鱼因出色的生长特性而被视为提高水产养殖产量的潜在生物资源^[41]。但在捕捞业中, 渔民更倾向于捕捞高商业价值的鱼类。巴西东北部一项针对 30 个水库、历时 30 年的研究发现, 罗非鱼的引入并未提升单位捕捞努力量渔获量(Catch per unit of fishing effort, CPUE)和以捕鱼为生的渔民收入, 反而导致高商业价值物种的 CPUE 下降^[42]。

这种选择性捕捞行为可能为罗非鱼创造了更大的生态位空间,进而加剧了其作为入侵物种的负面影响。生态学研究发现,入侵物种的种群增长趋势符合经典的S形曲线(逻辑斯蒂增长模型)^[43]。因此,通过捕捞控制将入侵物种的种群维持在较低的生长速率阶段,是减轻其负面影响的关键策略。然而,由于罗非鱼的低商业价值导致的捕捞压力不足,可能促进了其在本地生态系统中的种群扩张。

为降低罗非鱼对本土生态系统的负面影响,目前采取了多种方法控制其种群数量。物理方法如捕捞和电鱼,虽有明显效果,但需消耗大量的人力物力;化学控制方法如使用有机杀鱼剂[如灭非灵(Miefeiling)]可以有效去除水体中的罗非鱼^[44];在生物控制方法中,研究显示,本土鱼类物种丰度与外来鱼类入侵程度呈显著负相关性,且实验模拟证明本土物种对齐氏罗非鱼的生长、栖息地选择和繁殖具有抑制作用,然而这种抵抗作用并不能完全阻止罗非鱼的定殖^[45];更为安全且有效的方法是利用染色体操作技术,通过释放不育的雄性罗非鱼来控制其繁殖^[39]。然而众多方法的实施需依赖于对罗非鱼潜在入侵区域的准确识别,以降低物种入侵的防治成本。因此,本研究探讨了全球气候变化背景下罗非鱼潜在入侵区域的变化,以期制定更有针对性的管理策略提供科学依据。

3.2 当前罗非鱼高风险入侵区预测与模型验证

本研究通过当前罗非鱼潜在入侵区预测模型,准确识别出广东和广西全省沿岸及海南中部是当前罗非鱼潜在高风险入侵区,该模型预测结果与现有的渔业资源调查数据高度吻合。Gu等^[46]于2018年将自身收集的数据与大量文献中的数据进行整合分析,对罗非鱼在中国野外的分布进行统计,所得的分布范围与本研究模型预测的一致性较高(图7)。

3.3 气候驱动的罗非鱼入侵风险:低温限制、高温胁迫与降水效应

温度和降水是决定罗非鱼入侵风险的关键环境因子,本研究发现影响其入侵风险的3个关键环境因子为:最冷季度平均温度、最热月份最高温度和最冷季度降水量。低温严重影响着罗非鱼的生存,研究表明尼罗罗非鱼幼鱼在冷胁迫下,半致死温度为9.4℃,冷应激可导致其机体自由基和脂质代谢失调,降低其体内超氧化物歧化酶(SOD)活性,减少巨噬细胞的呼吸爆发和吞噬活性,增加丙二醛(MDA)含量,对其生理适应产生不利影响^[47]。高

温对罗非鱼的生存也具有限制作用,无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*)是在罗非鱼养殖中经常爆发的一种疾病,该疾病常在夏季爆发,且致死率高,是当前限制罗非鱼产业发展的重要因素^[48]。无乳链球菌在35℃的溶血活性为28℃的5倍,且其*cylE*(β -溶血素/细胞溶素)、*cfb*(CAMP因子)和*PI-2b*(菌毛骨架)基因的表达均发生上调^[49]。高温不仅影响罗非鱼病原微生物的致病性,还会影响其群落性别组成。研究表明,高温可促使罗非鱼性腺向雄性方向发育^[50],群落性别结构的转变可能对其繁殖速度产生影响。罗非鱼主要分布于华南地区,该地区具有雨热同期的特点,更高的降水量往往伴随着更加潮湿温暖的环境,且同时保证了其分布流域的水源充足,因此降水可能不会直接影响罗非鱼的生存,但对其分布具有重要调控作用。

3.4 未来气候情景下罗非鱼入侵区的高风险扩增与温度-降水协同效应

对罗非鱼未来潜在入侵区的模型预测表明,在全球气候变化背景下,其潜在高风险入侵区域面积可能出现增加,且其分布质心将向高纬度迁移。在3个关键环境因子中,最冷季度平均温度的贡献度大于其他2个因子之和,表明其是决定罗非鱼高风险入侵区的最主要因素。在全部8种模拟情景中,最冷季度平均温度均呈上升趋势,增温幅度介于0.52~5.48℃之间。其中,2081—2100年SSP585情景的增温最显著,其对应的高风险入侵区面积扩张也最大,两者趋势相吻合。最冷季度温度变化与降水量变化具有一致性,两者具有协同作用,共同决定了罗非鱼高风险入侵区面积的扩增。伴随着温度的升高,最热月份最高温度的限制作用也随之升高,但其限制能力较弱,因此越冬温度和降水量的增加是决定罗非鱼未来高风险入侵区域变化的主导因素。

4 结论与展望

本研究基于MaxEnt模型与CMIP6气候数据,综合分析了气候变化背景下尼罗罗非鱼、莫桑比克罗非鱼和齐氏罗非鱼在中国的潜在入侵区分布格局及其驱动机制,主要结论如下:1)当前高风险入侵区识别:广东、广西全省沿岸及海南中部为当前罗非鱼潜在入侵的核心区域,高风险区面积达170 216.6 km²,模型预测结果与实地调查数据高度吻合(AUC>0.9),验证了模型的可靠性;2)未来

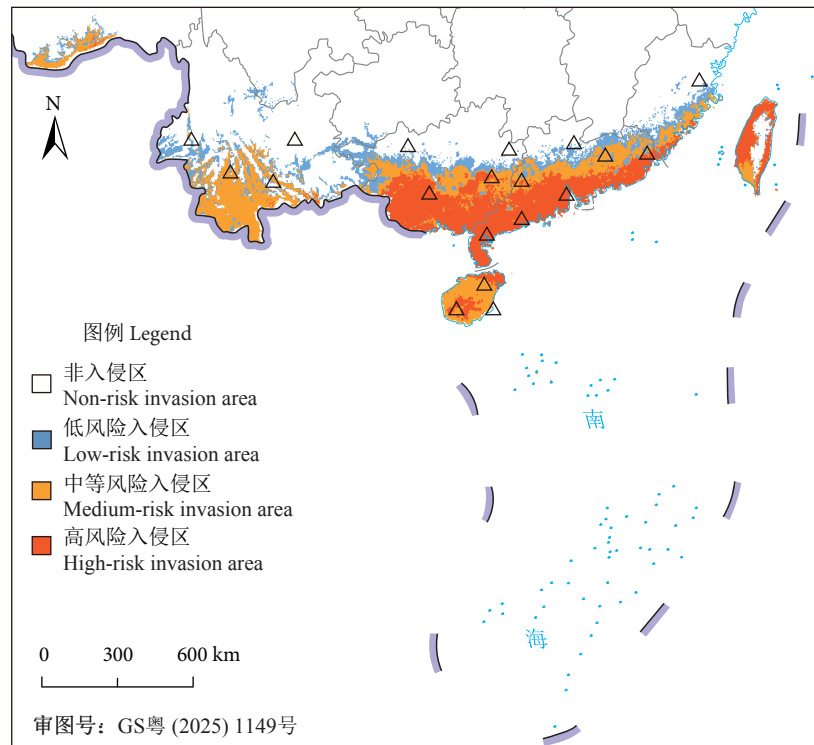


图7 当前模型与野外资源调查分布数据对比

注: 野外资源调查的数据未包含香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省。
图中三角形为 Gu 等^[46] 2018 年调查所得在中国河流中建立的自然罗非鱼种群。

Fig. 7 Comparison of current model with distribution data from field resource surveys

Note: The data from field resource surveys do not include the Hong Kong Special Administrative Region, the Macao Special Administrative Region and Taiwan Province. The triangles in the figure represent the national tilapia population established in Chinese rivers from the survey of Gu et al^[46] in 2018.

入侵区动态趋势: 在 SSP585 (2081—2100 年) 等高温高排放情景下, 高风险区面积最大增幅达 72.37%, 且质心向高纬度迁移 231.03 km, 表明气候变化将显著扩大罗非鱼的适生范围; 3) 关键气候驱动因子: 最冷季度平均温度与冬季降水的协同作用是高风险区扩增的主导因素, 而最热月份最高温度的抑制作用相对有限; 4) 生态经济启示: 罗非鱼入侵治理需重点关注华南地区, 并警惕其向高纬度扩散的风险, 同时需平衡水产养殖的经济效益与生态保护需求, 推动可持续管理策略。

在全球气候变化背景下, 罗非鱼对我国生态系统的入侵风险呈现显著加剧趋势, 亟需建立科学导向的动态防控体系。基于物种分布模型预测, 广东、广西等高风险区域的精准治理应成为防控核心, 建议融合高分辨率水文数据 (如流域特征、季节性水位波动) 构建区域尺度预测模型, 通过“风险分级—动态预警—靶向清除”的递进式管理, 实现治理成本与生态效益的最优平衡。当前防控技术体系面临着三重挑战: 1) 入侵物种清除技术普遍

存在环境副作用显著 (如化学杀灭剂)、经济成本高昂 (如物理捕捞) 或可持续性不足 (如生物防治风险) 等问题; 2) 罗非鱼作为低附加值物种, 渔民自发性捕捞意愿缺失导致其种群控制困难, 需通过深加工产业链延伸 (如鱼蛋白提取、生物基产品开发等) 重构其经济价值; 3) 养殖逃逸作为主要入侵途径, 需建立覆盖苗种培育、运输监管和养殖许可的全链条防控机制, 特别是对南方开放式养殖模式实施生态准入制度。未来罗非鱼治理应着力突破“生态-经济”二元困境: 在宏观层面, 将入侵风险评估纳入水产养殖规划, 优先在生态敏感区推广循环水养殖等环境友好模式; 在技术层面, 重点研发基因驱动等靶向控制技术, 同步构建基于区块链的养殖溯源系统。唯有通过科学预警、技术创新与制度约束的协同推进, 方能在保障渔业经济发展的同时守住生态安全底线。

参考文献:

[1] 丁晖, 徐海根, 强胜, 等. 中国生物入侵的现状与趋势[J]. 生态与

- 农村环境学报, 2011, 27(3): 35-41.
- [2] YONGO E, ZHANG P F, MUTETHYA E, et al. The invasion of tilapia in South China freshwater systems: a review[J]. *Lakes Reservoirs: Sci Policy Manage Sustain Use*, 2023, 28(1): e12429.
 - [3] PIRRONI S, de PENNAFORT DEZEN L, SANTI F, et al. Comparative gut content analysis of invasive mosquitofish from Italy and Spain[J]. *Ecol Evol*, 2021, 11(9): 4379-4398.
 - [4] YANG Q Q, LIU S W, HE C, et al. Distribution and the origin of invasive apple snails, *Pomacea canaliculata* and *P. maculata* (Gastropoda: Ampullariidae) in China[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 1185.
 - [5] DUEÑAS M A, HEMMING D J, ROBERTS A, et al. The threat of invasive species to IUCN-listed critically endangered species: a systematic review[J]. *Global Ecol Conserv*, 2021, 26: e01476.
 - [6] LEPRIEUR F, BEAUCHARD O, BLANCHET S, et al. Fish invasions in the world's river systems: when natural processes are blurred by human activities[J]. *PLoS Biol*, 2008, 6(2): e28.
 - [7] EL-SAYED A M, FITZSIMMONS K. From Africa to the world: the journey of Nile tilapia[J]. *Rev Aquac*, 2023, 15(S1): 6-21.
 - [8] 肖炜, 祝璟琳, 喻杰, 等. 罗非鱼产业技术与发展趋势 (上)[J]. *科学养鱼*, 2022(5): 24-25.
 - [9] 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.
 - [10] SHUAI F M, LI X H, LIU Q F, et al. Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) invasions disrupt the functional patterns of fish community in a large subtropical river in China[J]. *Fish Manag Ecol*, 2019, 26(6): 578-589.
 - [11] GU D E, MA G M, ZHU Y J, et al. The impacts of invasive Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) on the fisheries in the main rivers of guangdong province, china[J]. *Biochem Syst Ecol*, 2015, 59: 1-7.
 - [12] 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.
 - [13] XIONG W, GUO C, GOZLAN R E, et al. Tilapia introduction in China: economic boom in aquaculture versus ecological threats to ecosystems[J]. *Rev Aquac*, 2023, 15(1): 179-197.
 - [14] 高宇, 刘鉴毅, 张婷婷, 等. 水产养殖逃逸对长江外来种入侵影响: 以鲟鱼为例[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1739-1745.
 - [15] PEARSON R G, DAWSON T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?[J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2003, 12(5): 361-371.
 - [16] PÖRTNER H O. Climate impacts on organisms, ecosystems and human societies: integrating OCLTT into a wider context[J]. *J Exp Biol*, 2021, 224(Suppl_1): jeb238360.
 - [17] RAIHAN A. A review of the global climate change impacts, adaptation strategies, and mitigation options in the socio-economic and environmental sectors[J]. *J Environ Sci Econ.*, 2023, 2(3): 36-58.
 - [18] WARREN D L, MATZKE N J, CARDILLO M, et al. ENMTools 1.0: an R package for comparative ecological biogeography[J]. *Ecography*, 2021, 44(4): 504-511.
 - [19] O'NEILL B C, TEBALDI C, van VUUREN D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. *Geosci Model Dev*, 2016, 9(9): 3461-3482.
 - [20] SÉFÉRIAN R, BERTHET S, YOOL A, et al. Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6[J]. *Curr Clim Change Rep*, 2020, 6(3): 95-119.
 - [21] XIN X G, WU T W, ZHANG J, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon[J]. *Int J Climatol*, 2020, 40(15): 6423-6440.
 - [22] CHEN H P, SUN J Q, LIN W Q, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes[J]. *Sci Bull*, 2020, 65(17): 1415-1418.
 - [23] JIN H M, QIAO L, WANG S C, et al. Performance evaluation of surface air temperature simulated by the Beijing climate central climate model based on the climate complexity[J]. *Clim Dyn*, 2024, 62(5): 4331-4342.
 - [24] SANG Y, REN H L, SHI X, et al. Improvement of soil moisture simulation in eurasia by the Beijing climate center climate system model from CMIP5 to CMIP6[J]. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(2): 237-252.
 - [25] LIU Y W, ZHAO L, TAN G R, et al. Evaluation of multidimensional simulations of summer air temperature in China from CMIP5 to CMIP6 by the BCC models: from trends to modes[J]. *Adv Clim Chang Res*, 2022, 13(1): 28-41.
 - [26] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. *Int J Climatol*, 2017, 37(12): 4302-4315.
 - [27] LI Z J, LIU Y M, ZENG H. Application of the MaxEnt model in improving the accuracy of ecological red line identification: a case study of Zhanjiang, China[J]. *Ecol Indic*, 2022, 137: 108767.
 - [28] KASS J M, MUSCARELLA R, GALANTE P J, et al. ENMeval 2.0: redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions[J]. *Methods Ecol Evol*, 2021, 12(9): 1602-1608.
 - [29] LI Y Q, YANG Y, GU D Z, et al. Investigation of the impact of diverse climate conditions on the cultivation suitability of *Cinnamomum cassia* using the MaxEnt model, HPLC and chemometric methods in China[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 25686.
 - [30] WANG F, YUAN X Z, SUN Y J, et al. Species distribution modeling based on MaxEnt to inform biodiversity conservation in the central urban area of Chongqing municipality[J]. *Ecol Indic*, 2024, 158: 111491.
 - [31] CHEN N N, YUAN L, WU H X, et al. Climate change's influence on chelydra serpentina's global and Chinese distribution and invasion: a MaxEnt model-based prediction[J]. *Glob Ecol Conserv*, 2024, 54: e03137.
 - [32] WU K F, WANG Y J, LIU Z S, et al. Prediction of potential invasion of two weeds of the genus *Avena* in Asia under climate change based on Maxent[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 950: 175192.
 - [33] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum

- entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecol Model*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [34] BARBER R A, BALL S G, MORRIS R K A, et al. Target-group backgrounds prove effective at correcting sampling bias in MaxEnt models[J]. *Divers Distrib*, 2022, 28(1): 128-141.
- [35] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [36] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. *Pattern Recognit Lett*, 2006, 27(8): 861-874.
- [37] LIU C, DIAGNE C, ANGULO E, et al. Economic costs of biological invasions in asia[J]. *NeoBiota*, 2021, 67: 53-78.
- [38] KANG B, VITULE J R S, LI S, et al. Introduction of non-native fish for aquaculture in China: a systematic review[J]. *Rev Aquac*, 2023, 15(2): 676-703.
- [39] THRESHER R E, SMITH R, CUTAJAR J. Optimizing the impacts of an invasive species on the threatened endemic biota of a remote RAMSAR site: tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Lake Kutubu, Papua New Guinea[J]. *Biol Invasions*, 2020, 22(9): 2661-2670.
- [40] XIA Y G, ZHAO W W, XIE Y L, et al. Ecological and economic impacts of exotic fish species on fisheries in the Pearl River basin[J]. *Manag Biol Invasions*, 2019, 10(1): 127-138.
- [41] VAJARGAH M F. A review of the physiology and biology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *J Aquac Mar Biol*, 2021, 10(5): 244-246.
- [42] ATTAYDE J L, BRASIL J, MENESCAL R A. Impacts of introducing Nile tilapia on the fisheries of a tropical reservoir in north-eastern Brazil[J]. *Fish Manag Ecol*, 2011, 18(6): 437-443.
- [43] SOTO I, AHMED D A, BALZANI P, et al. Sigmoidal curves reflect impacts and dynamics of aquatic invasive species[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 872: 161818.
- [44] GU D E, ZHANG C, SU L, et al. The effectiveness of a specific piscicides for the control of an invasive fish *Coptodon zillii* in an urban lake[J]. *Manag Biol Invasions*, 2024, 15(4): 535-547.
- [45] GU D E, JIA T, WEI H, et al. Biotic resistance to fish invasions in southern China: evidence from biomass, habitat, and fertility limitation[J]. *Ecol Appl*, 2023, 33(8): e2819.
- [46] GU D E, YU F D, YANG Y X, et al. Tilapia fisheries in Guangdong Province, China: socio-economic benefits, and threats on native ecosystems and economics[J]. *Fish Manag Ecol*, 2019, 26(2): 97-107.
- [47] QIANG J, CUI Y T, TAO F Y, et al. Physiological response and microRNA expression profiles in head kidney of genetically improved farmed tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*) exposed to acute cold stress[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 172.
- [48] ZHANG Z. Research advances on tilapia streptococcosis[J]. *Pathogens*, 2021, 10(5): 558.
- [49] KAYANSAMRUJ P, PIRARAT N, HIRONO I, et al. Increasing of temperature induces pathogenicity of *Streptococcus agalactiae* and the up-regulation of inflammatory related genes in infected Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Vet Microbiol*, 2014, 172(1): 265-271.
- [50] WANG Y Y, SUN L X, ZHU J J, et al. Epigenetic control of *cyp19a1a* expression is critical for high temperature induced Nile tilapia masculinization[J]. *J Therm Biol*, 2017, 69: 76-84.