

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2022.03.013

# 外来养殖鱼类的人侵风险评估及防控对策 ——以尼罗罗非鱼为例

徐旭丹, 刘 强, 黄 伟, 杜 萍, 寿 鹿, 曾江宁\*

自然资源部第二海洋研究所, 自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室, 浙江 杭州 310012

**摘要:**【目的】筛选合适的指标建立一套外来养殖鱼类的生物入侵风险评估体系,并对外来养殖鱼类的生物入侵防控提出对策建议。【方法】通过文献资料的收集和整理,对外来养殖鱼类中典型入侵物种的入侵过程、影响危害和入侵生物学特性进行分析和归纳,从适应能力、繁殖能力、扩散能力3方面指示其入侵性;从对生物的影响和对环境的影响2方面指示其生态影响;从自然因素和人为因素2方面指示环境可入侵性,以上述3方面为框架进行评估体系构建。【结果】筛选20个指标构建了外来养殖鱼类的生物入侵风险评估体系,并举例说明该评估体系的应用。从法规政策、科学研究、治理技术和公众参与等4个方面针对性地提出外来养殖鱼类生物入侵风险防控对策。【结论】防范和治理入侵生物是一个系统工程。对于外来养殖鱼类的管理,既不能只考虑经济效益而置生态风险于不顾,也不能片面放大外来养殖良种的人侵风险。科学管控的关键在于完善制度建设、加强风险评估、发展防治手段、促进公众参与,使外来鱼类养殖业在严格受控的前提下发挥其经济效益,将其潜在的生态危害效应降到最低。

**关键词:** 尼罗罗非鱼; 外来养殖鱼类; 生物入侵; 风险评估



开放科学标识码  
(OSID 码)

## Risk assessment and control of the exotic farmed fish, the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

XU Xudan, LIU Qiang, HUANG Wei, DU Ping, SHOU Lu, ZENG Jiangning\*

Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography,  
Ministry of Natural Resources, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

**Abstract:** 【Aim】 Identification of appropriate indicators to develop a risk assessment method for biological invasion of exotic farmed fishes and to propose countermeasures for its prevention and control. 【Method】 The study analyzed the overall process of invasion, evaluated the damage, investigated the biological characteristics of typical invasive exotic farmed fish, and indicated their invasion from three aspects using literature data, viz., adaptability, reproduction capacity, and diffusion ability; indicated the ecological impacts in terms of both biological and environmental impacts; natural factors and human factors are considered to indicate the invasibility of environment, and the evaluation system was developed using these factors as a framework. 【Result】 Twenty indicators were screened to develop a risk assessment method for biological invasion potential of exotic farmed fishes, the application of which was further validated with the help of an example. The countermeasures for prevention and control of the biological invasion risk of farmed exotic fishes were proposed from four perspectives: laws and regulation, scientific research, governance technology, and public participation. 【Conclusion】 Prevention and management of invasive species is a systematic process. We should not just emphasize on economic gains while ignoring ecological hazards, nor can we unilaterally increase the risk of invasion of such farmed species. The key to successful scientific management and control is to improve strategic approaches, strengthen risk assessment, develop prevention and control methods, and promote public participation. Through such actions, the exotic fish farming business may reap economic benefits while maintaining strict control of invasive species and may minimize their potential ecological impact.

**Key words:** *Oreochromis niloticus*; exotic farmed fish; biological invasion; risk assessment

生物入侵是外来物种由原生存地传入本地后成为野生状态,并对本地生态系统造成一定危害的过程(周霞等,2002)。其主要危害在于改变本地群落或生态系统基本的生态学特征,导致生物多样性减少,甚至造成物种的灭绝,以及带来巨大的经济损失。由于所产生的生态风险具有很强的不确定性,缺乏有效的风险监控手段,生物入侵已发展成为全球性的生态问题之一(Vitousek *et al.*, 1997)。入侵生物涉及的物种门类繁多(丁晖等,2011;徐海根等,2004b),自然界中的植物、动物、微生物中均有成为某一生态系统入侵种的例子(杜予州等,2007;杨博等,2010;姚一建等,2002)。

在水产养殖领域,许多外来鱼类品种都是作为养殖良种从国外引进(刘芳明等,2007)。养殖者为了大幅度地增加产量、缩短生产周期以及降低生产成本,不断尝试引进新的养殖品种。引种过程通常仅以经济价值为衡量指标,对于生态风险评估工作的重要性认识不足,缺乏必要的前期论证和后期的追踪评估,盲目性较大。许多外来鱼类都属于种质优良的外来经济物种,能够产生可观的经济价值,但是这些物种如果逃脱人为控制,逐渐野化并建立自然种群,也同样可能带来巨大的生态危害(桑卫国等,2006)。

外来物种入侵风险评估是防控生物入侵非常重要的手段(丁晖等,2006)。对于不同类别的物种,需要针对性地构建不同的评估体系以保障评估的有效性。在构建评估体系的过程中,充分了解外来物种的生活习性、繁殖方式、扩散策略等生物学特性是工作的基础和关键。剖析典型外来入侵物种的生物学和生活史特征与入侵能力的关系,对于深入探究生物入侵过程与机制,提升入侵风险防控能力具有重要意义。本文以养殖鱼类中的典型外来入侵生物尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* (L.) 为例,分析入侵种之所以入侵成功的原因,从物种本身的生物学特性出发,筛选和归纳指示入侵性的评估指标,再综合生态影响和环境可入侵性,构建了针对外来养殖鱼类的入侵风险评估体系,并对外来养殖鱼类的入侵防控提出对策建议。

## 1 尼罗罗非鱼基本特征和养殖分布情况

尼罗罗非鱼是原产于热带、亚热带的暖水性鱼类,属鲈形目 Perciformes 丽鱼科 Cichlidae 罗非鱼属 *Oreochromis*,是罗非鱼属中个体较大的种类(王宾贤,

1979)。其繁殖力强、生长快、耐粗食、适应性强(陈胜军等,2007),在淡水、咸淡水和海水中都能生长(邓志欢,1988;梁妹和叶富良,2007;周大仁等,1982)。

罗非鱼的养殖范围已覆盖 100 多个国家和地区,是全球水产养殖最主要的鱼种之一(中国常驻联合国粮农机构代表处,2020)。其中,尼罗罗非鱼的养殖产量约占世界罗非鱼养殖产量的 70%,远超其他品种(张红燕等,2016)。我国是全球最大的罗非鱼生产国和出口国(代云云等,2014)。统计分析《中国渔业统计年鉴》发布的数据可以发现,中国大陆近 30 年来罗非鱼产量保持高速增长趋势。其中,广东、海南、广西、云南和福建是罗非鱼养殖最主要的省(自治区)。尼罗罗非鱼是我国罗非鱼养殖的主要品种(李家乐和李思发,2001;朱华平等,2008)。根据国家农业科学数据共享中心——渔业科学数据分中心 2017 年 11 月提供的数据,我国除西藏和青海外,其余各省(自治区)均有养殖尼罗罗非鱼(中国水产科学研究院渔业工程研究所,2017)。

## 2 尼罗罗非鱼的入侵过程及危害

到目前为止,国家环境保护行政主管部门(原环境保护部联合中国科学院)共制订并发布了四批外来入侵物种名单,该名单包含了对自然生态系统危害较为严重的 71 种外来入侵物种。其中,尼罗罗非鱼被列入第三批生物入侵种名单,是被列入外来入侵物种名单的 4 种鱼类之一。

### 2.1 入侵过程

尼罗罗非鱼入侵我国的主要途径是有意引种(潘勇等,2006;徐海根等,2004b)。1978 年 7 月,长江水产研究所首次从尼罗河苏丹境内引进 22 尾尼罗罗非鱼,1985—1999 年,湖南、北京、广东和上海又分别从埃及、苏丹、泰国、菲律宾和美国引进该鱼种(中国水产科学研究院渔业工程研究所,2017)。这些鱼很快作为养殖良种在我国大力推广养殖(吴福煌等,1980;张中英等,1980)。在养殖过程中一些尼罗罗非鱼逃逸到自然环境中,并逐渐在自然水系建群扩散。目前,尼罗罗非鱼已在我国南方地区的自然水系中广泛分布。近年来,广东省各主要水系(顾党恩等,2012a)、广西南部主要水系(赵立朝等,2019)、海南省南渡江水域(余梵冬等,2018)、福建省九龙江水域(方民杰,2015)等地均发现尼罗罗非鱼建立了一定规模的种群。

## 2.2 危害

尼罗罗非鱼对于生态系统的危害主要体现在 2 个方面。(1) 挤占生态位。尼罗罗非鱼适应能力很强,对生存环境水质要求不高,且繁殖力强、食性杂,会与本地物种在食物和空间等方面形成强烈竞争,在自然水域形成优势种群,造成本地鱼种减少或消失,物种多样性趋于单一(董杨等,2020;李高俊等,2020)。尼罗罗非鱼的筑巢行为对水体的扰动,还会破坏水底植被,进而影响其他水生生物的生存(徐海根和强胜,2004a)。(2) 污染环境。围隔试验表明,尼罗罗非鱼会增加水体营养负荷,引起浮游植物生物量增加,水体透明度降低,其上行效应明显大于下行效应(刘辉等,2008)。

## 3 尼罗罗非鱼入侵生物学特性分析

### 3.1 适应能力

尼罗罗非鱼有很强的适应能力,体现在对气候变化的适应以及抗病力等多方面。其对温度、盐度、溶解氧的耐受范围都很广。尼罗罗非鱼的适温范围为 16~42 ℃,最适温度为 24~32 ℃(李思发,1998)。根据吴福煌和刘寒文(1997)的试验结果,尼罗罗非鱼的最低致死温度为 5.5 ℃,最低摄食温度为 11 ℃,最低越冬温度为 13 ℃,最低繁殖温度为 20~21 ℃。尼罗罗非鱼经过驯化,能够耐受盐度为 32 的海水(么宗利等,2003)。尼罗罗非鱼对低氧的耐受能力很强,张中英等(1982)报道,尼罗罗非鱼的耗氧率为  $0.068 \sim 0.251 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,窒息点为  $0.07 \sim 0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,比青鱼、草鱼、鲫鱼等鱼种的窒息点都低。研究表明,尼罗罗非鱼鱼苗卵黄囊体积大,卵黄营养非常丰富,血液循环系统完善,心脏搏动速率高,呈现出很强的适应性及竞争力(谭细畅等,2012)。袁俊等(2015)采用实验室饲喂称重的方法研究尼罗罗非鱼和鲫鱼之间的空间竞争关系,结果显示,尼罗罗非鱼在空间竞争方面表现出较强的竞争优势。此外,嗜水气单胞菌和无乳链球菌人工感染试验结果表明,尼罗罗非鱼还具有较强的抗病力(柯剑,2011)。

### 3.2 繁殖能力

尼罗罗非鱼繁殖能力强且有强烈的护幼行为。尼罗罗非鱼 4 个月即可达性成熟,性成熟个体性腺每年成熟多次,分批产卵,产卵周期最短为 25 d(吴福煌等,1991)。与多种淡水鱼和海洋鱼类相比(陈刚,1996),性成熟早、繁殖周期短的特点非常突

出。成熟雄鱼营巢挖窝,亲鱼在窝中产卵受精后,雌鱼把受精卵衔入口中离去。受精卵在雌鱼口中孵化,一直到仔鱼能摄取天然饵料为止,一般历时 15 d 左右(仇潜如等,1979)。幼鱼会集聚于亲鱼附近几天,遇危险会被亲鱼衔入口中(张中英,1981)。

### 3.3 扩散能力

尼罗罗非鱼在分布范围上表现出很强的扩散能力。尼罗罗非鱼属热带鱼类,其在我国的适生区为广东、广西、海南等省(自治区)。这些地区水系发达,纵横交错,为尼罗罗非鱼在自然环境中的扩散提供了条件。同时,作为养殖良种,尼罗罗非鱼被人类大范围有意传播的可能性很高。经过数十年的发展,尼罗罗非鱼养殖产业已在我国形成较大规模,而各地养殖设施条件和管理水平参差不齐,使得养殖鱼从隔离状态下逃脱的情况屡屡发生。

## 4 外来养殖鱼类的生物入侵风险评估体系

外来物种风险评估是防止外来物种入侵的重要手段。生物入侵风险与物种的入侵性、生态影响和环境可入侵性密切相关。外来物种能否入侵成功,取决于其入侵性和环境可入侵性之间的相互作用。同时,外来物种对侵入的生态系统产生明显的负面影响也是该物种成为外来入侵生物的前提。本文吸取郑勇奇和张川红(2014)、胡隐昌等(2006)、窦寅等(2011)等建立的评估体系的优点,构建了一套外来养殖鱼类的入侵风险评估体系。该体系包含 20 个评估指标,覆盖物种的入侵性、生态影响和环境可入侵性 3 方面的评估内容。首先依据对一系列评估指标的赋分,分别对上述 3 方面因素进行等级划分,然后通过综合判断,得出外来养殖鱼类入侵某一地区的风险等级。

### 4.1 入侵性评估

入侵性评估主要基于外来养殖鱼类的适应能力、繁殖能力和扩散能力,聚焦于 9 个评估指标(表 1)。每个评估指标包含若干依据指标,用来综合考量对于该评估指标的赋分。每个评估指标的赋分分为 5 个等级(0、1、2、3、4 分),依次表示入侵性很弱、弱、中、强、很强,再根据各指标的权重计算出分值。权重是基于本课题的研究、参考文献以及专家咨询的综合结果。入侵性评估总分为 100 分,各评估指标分值=各指标赋分/(4×各指标权重)×100。

### 4.2 生态影响评估

外来养殖鱼类对生态系统影响主要基于对生

物的影响和对环境的影响 2 方面,聚焦于 4 个评估指标(表 2)。每个评估指标包含若干依据指标。因为量化评估对生态系统的影响难度较大,所以采取以定性评估为主的方式,每个评估指标的赋分分为 5 个等级(0、1、2、3、4 分),依次表示基本无影

响、影响较小、影响中等、影响较大和影响强烈,再根据各指标的权重计算出分值。生态影响评估总分为 100 分,各评估指标分值=各指标赋分/(4×各指标权重)×100。

表 1 入侵性评估指标及其权重  
Table 1 Evaluation indexes of invasiveness and their weights

| 指标类别<br>Index category     | 评估指标<br>Evaluation index                                                                                                                                                                            | 依据指标<br>Reference index                                                                                                                                             | 权重<br>Weight/% |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 适应能力<br>Adaptability       | 1.适温范围;2.盐度适应范围;3.对不良水体的耐受力;4.抗病力;5.食性与捕食能力 1. Suitable temperature range; 2. Salinity adaptation range; 3. Tolerance to poor water bodies; 4. Disease resistance; 5. Feeding and predatory ability | 最适温度、最适盐度、耗氧量、攻毒实验结果、胃肠内容物分析结果等 Optimal temperature, optimal salinity, oxygen consumption, challenge test results, gastrointestinal contents analysis results, etc. | 40             |
| 繁殖能力 Reproductive capacity | 1.繁殖力 1. Fertility                                                                                                                                                                                  | 初次性成熟时间、繁殖周期、产卵量等 Time of first sexual maturity, reproduction cycle, egg production, etc.                                                                           | 20             |
|                            | 2.子代存活率 2. Survival rate of offspring                                                                                                                                                               | 抚育行为、捕食压力等 Nurturing behavior, predation pressure, etc.                                                                                                             | 10             |
| 扩散能力<br>Diffusion ability  | 1.自然传播可能性;2.人为传播可能性 1. Possibility of natural transmission; 2. Possibility of human transmission                                                                                                    | 个体运动能力、生存习性、人为引种、放生活动等 Individual athletic ability, survival habits, artificial introduction, release activities, etc.                                              | 30             |

表 2 生态影响评估指标及其权重  
Table 2 Evaluation indexes of ecological impact and their weights

| 指标类别<br>Index category           | 评估指标<br>Evaluation index                   | 依据指标<br>Reference index                                                                                                                                           | 权重<br>Weight /% |
|----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 对生物的影响<br>Impact on biology      | 1.对人类健康的影响 1. Impact on human health       | 带入病原微生物等 Bring in pathogenic microorganisms, etc.                                                                                                                 | 30              |
|                                  | 2.对其他物种的影响 2. Impact on other species      | 挤占生态位、与土著生物竞争、破坏食物网功能、威胁生物多样性等 Squeeze the ecological niche, compete with indigenous organisms, disrupt the function of the food web, threaten biodiversity, etc. | 30              |
|                                  | 3.对遗传多样性的影响 3. Impact on genetic diversity | 与土著生物杂交、造成遗传污染等 Hybridization with indigenous organisms, causing genetic pollution, etc.                                                                          | 20              |
| 对环境的影响 Impact on the environment | 1.对环境的影响 1. Impact on the environment      | 破坏环境、导致灾害等 Destroy the environment, cause disasters, etc.                                                                                                         | 20              |

4.3 环境可入侵性评估

环境可入侵性评估主要基于自然因素和人为因素 2 方面,聚焦于 7 个评估指标(表 3)。每个评估指标包含若干依据指标。其中,部分评估指标与目标地区的可入侵性呈正相关(如气候条件相似性),部分评估指标与目标地区的可入侵性呈负相关(如天敌数量)。每个评估指标的赋分分为 5 个等级(0、1、2、3、4 分),依次表示环境可入侵性很弱、弱、中、强、很强,再根据各指标的权重计算出分值。环境可入侵性评估总分为 100 分,各评估指标分值=各指标赋分/(4×各指标权重)×100。

4.4 外来养殖鱼类的入侵风险等级

外来养殖鱼类的入侵风险等级分为高、中、低 3 级,根据入侵性、生态影响和环境可入侵性来综合

判断(表 4)。上述 3 方面的评估中,评估分值保留 1 位小数,评估等级:0.0~33.3 分为低,33.4~66.6 分为中,66.7~100.0 分为高。

4.5 风险评估体系的应用举例

以尼罗罗非鱼在浙江省的入侵风险评估为例说明该评估体系的应用,各指标赋分及依据如表 5 所示。

指标 1:适温范围。尼罗罗非鱼的适温范围较广,但是与典型的广温性鱼类相比,对于低温的耐受能力较差(龙华,2005)。赋分 3 分。

指标 2:盐度适应范围。尼罗罗非鱼在淡水、咸淡水和海水中都能生长(梁妹和叶富良,2007),具有极强的盐度适应能力(马爱军等,2018)。赋分 4 分。

指标 3:对不良水体的耐受力。尼罗罗非鱼对低溶解氧的耐受能力很强(张中英等,1982)。对稍

偏酸性的水体环境也有较强的适应性,能够耐受 pH 值为 6.0 的水体条件。同等条件下,鲤鱼在 pH 值低于 6.9 时,即出现大量死亡(万英杰和周之武,1990)。尼罗罗非鱼耐碱性能比草鱼、鳊鱼、鲢鱼等其他养殖种类高(雷衍之等,1985)。赵丽慧等(2013)研究表明,慢性驯化后的尼罗罗非鱼在较高

盐碱范围中仍保持一定的养殖生长性能,是开展耐盐碱选育的适宜种类。赋分 4 分。

指标 4:抗病力。尼罗罗非鱼抗病力较强,发病情况较少。但是也会因细菌感染、霉菌感染或寄生虫等发生一些鱼病(刘堂水,2007;郑澄伟,1985)。赋分 2 分。

表 3 环境可入侵性评估指标及其权重  
Table 3 Evaluation indexes of invasibility of environment and their weights

| 指标类别<br>Index category  | 评估指标<br>Evaluation index                                                                                                                                                                                         | 依据指标<br>Reference index                                                                                                                                                                                                                | 权重<br>Weight /% |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 自然因素<br>Natural factors | 1.气候条件相似性<br>1. Similarity of climatic conditions                                                                                                                                                                | 年平均温度、年温差等 Annual average temperature, annual temperature difference, etc.                                                                                                                                                             | 20              |
|                         | 2.水体环境适宜性<br>2. Water environmental suitability                                                                                                                                                                  | 水温、盐度、其他理化因子等 Water temperature, salinity, other physical and chemical factors, etc.                                                                                                                                                   | 30              |
|                         | 3.天敌数量<br>3. Number of natural enemies                                                                                                                                                                           | 天敌数量 Number of natural enemies                                                                                                                                                                                                         | 10              |
| 人为因素<br>Human factors   | 1.现有养殖规模;2.水产养殖业管理水平;<br>3.生物安全防控技术;4.人员防范意识<br>1. Existing aquaculture scale; 2. Aquaculture management level; 3. Biosafety prevention and control technical capabilities; 4. Personnel awareness of prevention | 养殖面积、养殖产量、法规政策完备性、管理规范性、养殖设备设施状况、公众受教育程度等 Cultivation area, aquaculture production, completeness of laws and policies, management standardization, status of aquaculture equipment and facilities, education level of the public, etc. | 40              |

表 4 外来养殖鱼类的入侵风险等级综合判断  
Table 4 Comprehensive judgment of invasive risk level of exotic farmed fish

| 编号 No. | 生态影响等级<br>Ecological impact level | 入侵性等级<br>Invasiveness level | 环境可入侵性等级<br>Invasibility level of environment | 入侵风险等级<br>Invasive risk level |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|
| 1      | 高 High                            | 高 High                      | 高 High                                        | 高 High                        |
| 2      | 高 High                            | 高 High                      | 中 Medium                                      | 高 High                        |
| 3      | 高 High                            | 高 High                      | 低 Low                                         | 中 Medium                      |
| 4      | 高 High                            | 中 Medium                    | 高 High                                        | 高 High                        |
| 5      | 高 High                            | 中 Medium                    | 中 Medium                                      | 高 High                        |
| 6      | 高 High                            | 中 Medium                    | 低 Low                                         | 中 Medium                      |
| 7      | 高 High                            | 低 Low                       | 高 High                                        | 中 Medium                      |
| 8      | 高 High                            | 低 Low                       | 中 Medium                                      | 中 Medium                      |
| 9      | 高 High                            | 低 Low                       | 低 Low                                         | 中 Medium                      |
| 10     | 中 Medium                          | 高 High                      | 高 High                                        | 高 High                        |
| 11     | 中 Medium                          | 高 High                      | 中 Medium                                      | 高 High                        |
| 12     | 中 Medium                          | 高 High                      | 低 Low                                         | 中 Medium                      |
| 13     | 中 Medium                          | 中 Medium                    | 高 High                                        | 高 High                        |
| 14     | 中 Medium                          | 中 Medium                    | 中 Medium                                      | 中 Medium                      |
| 15     | 中 Medium                          | 中 Medium                    | 低 Low                                         | 低 Low                         |
| 16     | 中 Medium                          | 低 Low                       | 高 High                                        | 中 Medium                      |
| 17     | 中 Medium                          | 低 Low                       | 中 Medium                                      | 低 Low                         |
| 18     | 中 Medium                          | 低 Low                       | 低 Low                                         | 低 Low                         |
| 19     | 低 Low                             | 高 High                      | 高 High                                        | 中 Medium                      |
| 20     | 低 Low                             | 高 High                      | 中 Medium                                      | 中 Medium                      |
| 21     | 低 Low                             | 高 High                      | 低 Low                                         | 低 Low                         |
| 22     | 低 Low                             | 中 Medium                    | 高 High                                        | 中 Medium                      |
| 23     | 低 Low                             | 中 Medium                    | 中 Medium                                      | 低 Low                         |
| 24     | 低 Low                             | 中 Medium                    | 低 Low                                         | 低 Low                         |
| 25     | 低 Low                             | 低 Low                       | 高 High                                        | 低 Low                         |
| 26     | 低 Low                             | 低 Low                       | 中 Medium                                      | 低 Low                         |
| 27     | 低 Low                             | 低 Low                       | 低 Low                                         | 低 Low                         |

表 5 尼罗罗非鱼在浙江省的入侵风险评估  
Table 5 Invasion risk assessment of the *Oreochromis niloticus* in Zhejiang Province

| 评估目标<br>Evaluation goal                                 | 指标类别<br>Index category                   | 评估指标<br>Evaluation index                                            | 赋分<br>Assign                                   | 分值<br>Score                                  | 评估等级<br>Evaluation level         |      |                                    |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|------|------------------------------------|
| 入侵性<br>Invasiveness                                     | 适应能力<br>Adaptability                     | 适温范围<br>Suitable temperature range                                  | 3                                              | 6.0                                          | 高 (79.5 分)<br>High (79.5 points) |      |                                    |
|                                                         |                                          | 盐度适应范围<br>Salinity adaptation range                                 | 4                                              | 8.0                                          |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 对不良水体的耐受力<br>Tolerance to poor water bodies                         | 4                                              | 8.0                                          |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 抗病力<br>Disease resistance                                           | 2                                              | 4.0                                          |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 食性与捕食能力<br>Feeding and predatory ability                            | 3                                              | 6.0                                          |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 繁殖能力<br>Reproductive capacity                                       | 繁殖力<br>Fertility                               | 3                                            |                                  | 15.0 |                                    |
|                                                         | 子代存活率<br>Survival rate of offspring      |                                                                     | 4                                              | 10.0                                         |                                  |      |                                    |
|                                                         | 扩散能力<br>Diffusion ability                |                                                                     | 自然传播可能性<br>Possibility of natural transmission | 2                                            | 7.5                              |      |                                    |
|                                                         |                                          | 人为传播可能性<br>Possibility of human transmission                        | 4                                              | 15.0                                         |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 生态影响<br>Ecological impact                                           | 对生物的影响<br>Impact on biology                    | 对人类健康的影响<br>Impact on human health           | 0                                | 0.0  | 中 (45.0 分)<br>Medium (45.0 points) |
|                                                         | 对其他物种的影响<br>Impact on other species      |                                                                     |                                                | 4                                            | 30.0                             |      |                                    |
|                                                         | 对遗传多样性的影响<br>Impact on genetic diversity |                                                                     |                                                | 1                                            | 5.0                              |      |                                    |
| 对环境的影响<br>Impact on the environment                     | 对环境的影响<br>Impact on the environment      |                                                                     | 2                                              | 10.0                                         |                                  |      |                                    |
|                                                         | 环境可入侵性<br>Invasibility of environment    |                                                                     | 自然因素<br>Natural factors                        | 气候条件相似性<br>Similarity of climatic conditions | 1                                | 5.0  | 低 (27.5 分)<br>Low (27.5 points)    |
|                                                         |                                          |                                                                     |                                                | 水体环境适宜性<br>Water environmental suitability   | 1                                | 7.5  |                                    |
| 天敌数量<br>Number of natural enemies                       |                                          | 3                                                                   |                                                | 7.5                                          |                                  |      |                                    |
| 人为因素<br>Human factors                                   |                                          | 现有养殖规模<br>Existing aquaculture scale                                | 0                                              | 0.0                                          |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 水产养殖业管理水平<br>Aquaculture management level                           | 1                                              | 2.5                                          |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 生物安全防控技术<br>Biosafety prevention and control technical capabilities | 1                                              | 2.5                                          |                                  |      |                                    |
|                                                         |                                          | 人员防范意识<br>Personnel awareness of prevention                         | 1                                              | 2.5                                          |                                  |      |                                    |
| 外来养殖鱼类的入侵风险等级 Invasion risk level of exotic farmed fish |                                          |                                                                     |                                                |                                              | 中 Medium                         |      |                                    |

指标 5:食性与捕食能力。尼罗罗非鱼的食性为杂食性 (Peterson *et al.*, 2006)。捕食能力较强,甚至可以主动追捕游泳动物和吞食较大型的食物 (刘焕亮等,1994)。赋分 3 分。

指标 6:繁殖力。尼罗罗非鱼性成熟早、繁殖周期短 (吴福煌等,1991)。但是其绝对繁殖力和相对繁殖力与其他鱼种相比较低 (金丽,2004; 李思发,1998; 赵立朝,2019)。赋分 3 分。

指标 7:子代存活率。在所有硬骨鱼群体中,只有 22% 的鱼类表现出一定程度的亲代抚育行为,其中双亲共同抚育的仅占 1/5 (Rocha *et al.*, 2008)。尼罗罗非鱼亲鱼筑巢产卵,雌鱼口含孵化的繁殖特性,以及强烈的护幼行为,有效保障了子代存活率 (王迪等,2008; 赵立朝,2019)。赋分 4 分。

指标 8:自然传播可能性。尼罗罗非鱼适宜生活的地区通常水系发达,水体的连通性有利于种群

在自然环境中的扩散。不过尼罗罗非鱼本身不具备典型的洄游特性。赋分 2 分。

指标 9:人为传播可能性。作为养殖良种,尼罗罗非鱼被人类大范围有意传播的可能性很高。而且因适应性强,易于存活,尼罗罗非鱼还作为民间放生活动的常见种类被投放到各类水体环境。赋分 4 分。

指标 10:对人类健康的影响。尚无文献资料表明尼罗罗非鱼会对人类健康造成直接影响。赋分 0 分。

指标 11:对其他物种的影响。尼罗罗非鱼与本地杂食性鱼类竞争强烈,会导致土著种大量减少甚至消失(Vos *et al.*, 1990; Weyl, 2008)。还会通过“上行效应”和“下行效应”对底栖—浮游生境耦合产生影响(梅雪英等, 2021)。赋分 4 分。

指标 12:对遗传多样性的影响。罗非鱼类种与种之间能自然交配繁殖(李家乐和李思发, 2001),但是远缘杂交较为困难(楼允东和李小勤, 2006; 杨弘等, 2004)。赋分 1 分。

指标 13:对环境的影响。尼罗罗非鱼可显著增加水中的总氮、总磷浓度,为浮游植物生长提供大量的营养盐,使浮游藻类密度增加,水体透明度降低(刘辉等, 2008; Zhang *et al.*, 2017)。赋分 2 分。

指标 14:气候条件相似性。浙江属亚热带季风气候,年平均温度 15~18℃,夏季平均温度 24~28℃,冬季平均温度 3~9℃。与尼罗罗非鱼的适生环境相比,浙江省夏季气候条件较适宜尼罗罗非鱼的生存,但是冬季温度较低,总体气候条件相似性较低。赋分 1 分。

指标 15:水体环境适宜性。尼罗罗非鱼对水体环境要求不高,在自然水域中是杂食性鱼类,主要摄食浮游动物和浮游植物(张中英等, 1979)。浙江省域内河流众多、水系发达。2021 年浙江省地表水环境质量月报显示,全省地表水总体水质为优或良。但是温度是限制尼罗罗非鱼适生区的主要环境因子,尼罗罗非鱼难以在浙江省自然水域中越冬。赋分 1 分。

指标 16:天敌数量。尼罗罗非鱼在浙江省范围内缺少有效的天敌,仅在一定程度上受到人类捕捞的压力。该指标与环境可入侵性呈反比,赋分 3 分。

指标 17:现有养殖规模。《2020 中国渔业统计年鉴》记载,2020 年浙江省罗非鱼养殖产量为 2320 t,仅占全国罗非鱼产量的 0.14%。赋分 0 分。

指标 18:水产养殖业管理水平。浙江省作为沿海发达省份,近年来水产养殖业提质增效成效显著,工厂化和集约化养殖占比较高,政府管理决策水平也较高。《2020 中国渔业统计年鉴》统计,2020 年浙江省拥有渔业执法机构 97 个;渔政管理人员 2275 名,其中 51% 的人员具有本科以上学历,40% 的人员持有渔业行政执法证,整体管理水平位于全国中上。该指标与环境可入侵性呈反比,赋分 1 分。

指标 19:生物安全防控技术。浙江省对于外来物种管理较为严格,是全国较早制定并颁布有关防治外来入侵物种地方法的省份(李静, 2012)。《浙江省渔业管理条例》从 2006 年 4 月 1 日起就原则上禁止引入外来水生物种。同时,浙江省大力推进现代渔业绿色发展,加大资金投入。根据《2020 中国渔业统计年鉴》,2020 年浙江省水产技术推广经费达 2.15 亿元,位居全国前列。该指标与环境可入侵性呈反比,赋分 1 分。

指标 20:人员防范意识。根据第七次全国人口普查数据,浙江省每 10 万人中有 16990 人具有大学(指大专及以上)文化程度,公众受教育程度在全国处于中上水平。该指标与环境可入侵性呈反比,赋分 1 分。

根据本文构建的外来养殖鱼类生物入侵风险评估体系,尼罗罗非鱼在浙江省的入侵风险等级为中。

## 5 防控对策

生物入侵正成为威胁我国生物多样性与生态环境的突出问题之一(万方浩等, 2002)。防范和治理入侵生物是一个系统工程。对于外来养殖鱼类的管理,既不能急功近利,只考虑经济效益而置生态风险于不顾,也不能“因噎废食”,片面放大外来养殖良种的入侵风险。以尼罗罗非鱼为例,现有调查表明尼罗罗非鱼已入侵我国广东、广西、海南等省(自治区)的许多自然水系;但同时,我国又是全球罗非鱼养殖产量最高的国家,是最大的罗非鱼出口国(代云云等, 2020),南方诸多省份的罗非鱼产业已形成由“种苗、饲料、加工、运输、出口”等环节构成的完整产业链,提供了大量的就业机会,创造了巨大的经济价值(王世表等, 2016)。胡隐昌(2007)将这种入侵种防治对策中的矛盾现象归结为外来物种管理的“罗非鱼效应”。尼罗罗非鱼在我国物资匮乏的年代被引入国内,进行推广养殖,在为人民生活提供优质蛋白来源方面发挥了重要

作用。如何科学管理外来养殖鱼类,平衡生态环境保护与经济发展的关系,是加强水生生物资源养护、加快构建现代养殖体系、推进水产绿色健康养殖的重要问题。对于我国现阶段的外来养殖鱼类管理,提出以下建议。

### 5.1 完善外来物种管理相关的法律法规

《中华人民共和国生物安全法》自2021年4月15日起施行。在此之前,我国已出台的法律、法规和行政规章中,涉及水产养殖领域外来物种管理的主要有《渔业法》《环境保护法》《海洋环境保护法》《进出境动植物检疫法》《动物防疫法》等。这些法律法规中存在一些针对外来物种的管理规定,但是整体上较为分散、不成体系。《中华人民共和国生物安全法》的颁布和实施必将有力改变上述局面,但是,《生物安全法》作为生物安全领域的基础性、综合性法律,起统领性的作用,全文与外来物种管理直接相关的条文仅有第十八条、第六十条、第八十一条等少数几条。对于外来入侵物种的评估、预警、检测监测、控制清除等工作都需要有关部门尽快出台相配套的管理办法和实施细则,特别是对于养殖品种的引进,包括国内不同地区间的引种过程,目前的管理还存在论证不足、监管不严等问题(李顺才,2004;王迪等,2009),应该更加严谨、科学。

在国家层面,建议设置专门的品种引进机构,对计划引进的品种进行充分的生态风险论证和经济效益分析,并通过在严密的隔离设施中的试养来验证并取得详实的生物学和养殖技术资料。在完全把握引进品种的生态安全的情况下,才可以进行推广养殖。在地方层面,地方各级人民政府也应该对国内异地引种的生态风险引起足够重视,设置专门的养殖品种的引种和监管的机构,建立健全管理规定,推行引种许可证制度、监测制度和责任追究制度。

同时,建议充分吸收国际先进的立法经验(刘春兴等,2009),在立足于国情的基础上,遵循循序渐进的原则,适时制定和出台生物入侵防治法,明确专门管理机构,建立涉及渔业、海洋、农业、环保、海关、工商等多部门的协调管理机制,进一步完善外来生物入侵防治的法律体系,从根本上防治外来物种入侵。

### 5.2 加强外来物种入侵风险评估相关研究

外来入侵生物一旦成功入侵往往很难根除,因

此防范生物入侵必须坚持“预防为主,防治结合”的方针(徐海根等,2004b)。在水产养殖领域,优良种质的引进是不应被禁止的。但是,引种过程本身又包含着较高的生物入侵风险,目前已经有许多因引种而引发的生物入侵实例(郇珊等,2016)。这就要求管理者要充分地对外来物种的经济效益与生态风险进行研究,系统地进行生物入侵风险评估,从而科学地作出管理决策。

目前,国内已开展了一些涉及外来养殖鱼类的生物入侵风险评估研究工作。窦寅等(2011)对外来鱼类入侵风险评估体系及方法进行了论述;胡隐昌等(2006)构建了一个水生动物外来物种入侵风险评估系统;马英等(2009)构建了外来海洋物种入侵风险评估体系;王以斌等(2014)构建了一种外来海洋物种入侵风险评估模式。

建议继续加强外来物种入侵风险评估相关研究。对于外来养殖鱼类,可以从危害严重、国内外高度关注的物种成功入侵我国的典型案例入手,明确入侵种的生物学和生活史特征与入侵能力的关系,评估入侵种对生态系统危害程度及相互作用,在此基础上筛选合适的风险评估指标和评估方法,建立和完善入侵理论,实现生态环境与社会经济的共生共赢。

### 5.3 加强生物入侵监测与综合治理技术研发应用

外来物种管理包括引入审批、风险评估、检验检疫、监测预警、消除控制和生态恢复等多个环节(方平等,2011)。对于已经对自然环境造成危害的外来入侵生物,彻底清除的难度巨大(胡隐昌等,2012)。而且,与昆虫、植物、微生物等类群的入侵生物相比,以尼罗罗非鱼为代表的外来养殖鱼类的监测与综合治理还存在一些特殊的困难。第一,生态学家和渔业管理者对经济鱼类的入侵问题存在认识上的差别(顾党恩等,2012b),会导致管理决策的分歧。第二,鱼类在水体中天然的隐蔽性,增加了入侵监测的难度。第三,水体的连通性使得生物治理、化学治理等手段的运用受到一定限制。因此,应加强监测与综合治理技术研发应用,运用技术手段尽可能降低生物入侵所带来的负面影响。

养殖生产的各个环节都有可能发生逃逸事件。对于外来养殖鱼类,养殖单位和个人应该加强对养殖环境的监测和管理,采取充分的防逃逸和隔离措施,严格将养殖物种控制在特定的养殖水域范围

内。防逃逸措施包括集中处理运输用水以防其中物种的逃逸;养殖池塘的出水口加双层防逃网;对可能遭受洪水危害的池塘严加保护等(范兆廷等, 2005)。对于养殖设备和养殖方式,建议制定统一的标准。如在海水网箱养殖中对所使用网箱的类型、网眼的大小以及网箱的抗风浪能力等予以规范。加强监测预警装置的研发,合理布局监测点位,形成系统性网络开展长期性监测,以便在发生外来养殖鱼类逃逸事件后,能及时发现和检测鱼群在环境中的扩散态势。

同时,大力发展外来入侵生物快速检测、隔离及紧急扑灭技术,对生物入侵的应急处置做出快速反应。对于小水域内逃逸尼罗罗非鱼的应急防治,国内已开展相关研究,筛选出一种有机磷类药物“灭非灵”,对尼罗罗非鱼的特异性灭除有显著效果(顾党恩等, 2018; 马光明等, 2014)。对入侵生物的治理应该综合运用生物、物理、化学等手段,将入侵生物的清除与资源化利用进行融合(高瑜等, 2012),充分发掘入侵物种的开发利用价值,以资源化利用促进入侵生物的生态防控。

#### 5.4 提升公众防范生物入侵的意识

提升公众意识是防范生物入侵的重要一环。对于外来养殖鱼类,民间放生是导致逃逸和扩散的主要间接途径,此外还包括观赏渔业的弃养等其他途径(高宇等, 2017)。民间放生活动往往缺乏专业指导,随意性较大,导致许多外来入侵物种被人为引入到其自然分布范围及扩散潜力以外的自然环境中,带来潜在的生物入侵风险。因此,应通过各种渠道,包括传统媒体和新媒体向广大群众宣传外来物种的危害性和防治的必要性,提高公众认识。此外,还应该开展针对性宣传教育,对养殖业相关从业人员加强生物入侵相关知识的培训,提高人员的生物安全意识。

#### 参考文献

陈刚, 1996. 中国淡水和近海鱼类的生态对策研究. 湛江水产学院学报, 16(2): 7-14.

陈胜军, 李来好, 杨贤庆, 岑剑伟, 吴燕燕, 刁石强, 2007. 我国罗非鱼产业现状分析及提高罗非鱼出口竞争力的措施. 南方水产, 3(1): 75-80.

代云云, 袁永明, 袁媛, 张红燕, 2014. 基于灰色定权聚类模型的罗非鱼国内市场潜力分析. 中国渔业经济,

32(2): 142-147.

代云云, 袁永明, 袁媛, 周桢, 2020. 中国罗非鱼产业安全预警分析. 江苏农业科学, 48(13): 327-332.

邓志欢, 1988. 尼罗罗非鱼海水养殖亩产吨鱼通过技术鉴定. 中国水产(4): 35.

丁晖, 徐海根, 强胜, 孟玲, 韩正敏, 缪锦来, 胡白石, 孙红英, 黄成, 雷军成, 乐志芳, 2011. 中国生物入侵的现状与趋势. 生态与农村环境学报, 27(3): 35-41.

董杨, 申志新, 王海桂, 李高俊, 蔡杏伟, 李芳远, 2020. 海南省外来淡水生物入侵现状、危害及防控策略. 水生生态学杂志, 41(3): 85-91.

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.

杜予州, 顾杰, 郭建波, 戴霖, 鞠瑞亭, 胡学难, 2007. 入侵害虫红火蚁在中国的适生性分布研究. 中国农业科学, 40(1): 99-106.

范兆廷, 陈松波, 陈伟兴, 2005. 水产引种对生态环境的影响及预防. 水产学杂, 18(1): 80-82.

方民杰, 2015. 九龙江华安段罗非鱼类的初步调查. 生物安全学报, 24(3): 201-207.

方平, 徐竹青, 胡隐昌, 2011. 我国外来水生物种入侵的对策研究. 中国渔业经济, 29(2): 93-97.

高瑜, 陈全震, 曾江宁, 2012. 浙江省海洋外来生物入侵影响与控制策略研究. 海洋开发与管理, 29(5): 101-107.

高宇, 刘鉴毅, 张婷婷, 冯广朋, 张涛, 杨刚, 庄平, 2017. 水产养殖逃逸对长江外来种入侵影响:以鲟鱼为例. 生态学杂志, 36(6): 1739-1745.

顾党恩, 牟希东, 罗渡, 李莹莹, 杨叶欣, 徐猛, 胡隐昌, 2012a. 广东省主要水系罗非鱼的建群状况. 生物安全学报, 21(4): 277-282.

顾党恩, 牟希东, 罗渡, 李莹莹, 汪学杰, 宋红梅, 罗建仁, 胡隐昌, 2012b. 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.

顾党恩, 余梵冬, 杨叶欣, 马光明, 胡隐昌, 牟希东, 徐猛, 刘超, 罗渡, 韦慧, 2018. “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. 生态学杂志, 37(10): 2985-2988.

胡隐昌, 2007. 我国外来水生生物发展现状及管理//中国植物保护学会生物入侵分会. “第一届全国生物入侵学术研讨会”论文摘要集. 福州: 中国植物保护学会生物入侵分会学术委员会: 209.

胡隐昌, 李勇, 罗建仁, 谭细畅, 2006. 水生动物外来物种入侵风险评估系统的建立. 华中科技大学学报(自然科学版), 34(10): 113-115.

胡隐昌, 宋红梅, 牟希东, 罗建仁, 2012. 浅议我国外来物种入侵问题及其防治对策. 生物安全学报, 21(4):

256-261.

- 金丽, 2004. 鱼类的繁殖习性和繁殖力. 生物学教学, 29(7): 5-6.
- 柯剑, 2011. 罗非鱼病原菌分离鉴定及不同品系间抗病力初步比较. 硕士学位论文. 上海: 上海海洋大学.
- 雷衍之, 董双林, 沈成钢, 1985. 碳酸盐碱度对鱼类毒性作用的研究. 水产学报, 9(2): 171-183.
- 李高俊, 顾党恩, 蔡杏伟, 李芳远, 王海桂, 余梵冬, 申志新, 2020. 海南岛“两江一河”淡水土著鱼类的种类组成与分布现状. 淡水渔业, 50(6): 15-22.
- 李家乐, 李思发, 2001. 中国大陆尼罗罗非鱼引进及其研究进展. 水产学报, 25(1): 90-95.
- 李静, 2012. 我国防治外来物种入侵法律制度的完善. 博士学位论文. 青岛: 中国海洋大学.
- 李顺才, 2004. 论外来入侵物种与特种动物引种. 野生动物, 25(4): 16-19.
- 李思发, 1998. 中国淡水主要养殖鱼类种质研究. 上海: 上海科学技术出版社.
- 酆珊, 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.
- 梁妹, 叶富良, 2007. 盐度对尼罗罗非鱼血清甲状腺素浓度和成活率的影响. 广东海洋大学学报, 27(3): 33-37.
- 刘春兴, 林震, 温俊宝, 骆有庆, 2009. 国外生物入侵管理体制改革的三种典型模式: 以新西兰、美国和日本为例. 中国行政管理(10): 109-112.
- 刘芳明, 缪锦来, 郑洲, 王以斌, 2007. 中国外来海洋生物入侵的现状、危害及其防治对策. 海岸工程, 26(4): 49-57.
- 刘辉, 谢贻发, 张修峰, 钟萍, 刘正文, 2008. 罗非鱼对水质的影响. 生态科学, 27(6): 494-498.
- 刘堂水, 2007. 养殖尼罗罗非鱼和斑点叉尾鮰细菌性病原分离与鉴定. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.
- 刘焕亮, 丁守河, 杨云龙, 史岚江, 刘晓恒, 1994. 尼罗罗非鱼摄食器官胚后发育生物学. 水产学报, 18(1): 8-17.
- 龙华, 2005. 温度对鱼类生存的影响. 中山大学学报(自然科学版), 44(6): 254-257.
- 楼允东, 李小勤, 2006. 中国鱼类远缘杂交研究及其在水产养殖上的应用. 中国水产科学, 13(1): 151-158.
- 马爱军, 崔文晓, 刘志峰, 张金生, 黄智慧, 杨双双, 刘晓菲, 杨凯, 张薇, 2018. 广盐性鱼类渗透压适应性与其生理可塑性机制研究. 海洋与湖沼, 49(6): 1308-1317.
- 马光明, 顾党恩, 牟希东, 罗建仁, 胡隐昌, 2014. “灭非灵”对外来鱼类尼罗罗非鱼的毒杀效果. 生态学杂志, 33(9): 2442-2447.
- 马英, 熊何健, 林源洪, 唐森铭, 2009. 外来海洋物种入侵风险评估体系的构建. 水产学报, 33(4): 617-623.
- 么宗利, 李思发, 李学军, 冯金海, 策金华, 张艳红, 2003. 尼罗罗非鱼和以色列红罗非鱼耐盐驯化初步报告. 上海水产大学学报, 12(2): 97-101.
- 梅雪英, RAZLUTSKU V, RUDSTAM L G, JEPPESEN E, 唐雅丽, 张修峰, 刘正文, 2021. 杂食性鱼类对浅水水体底栖—浮游生境耦合作用的影响: 微综述. 湖泊科学, 33(3): 667-674.
- 潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 殷守仁, 2006. 国内外鱼类入侵的历史及途径. 大连水产学院学报, 21(1): 72-78.
- 仇潜如, 张中英, 吴福煌, 胡玫, 王令玲, 1979. 尼罗罗非鱼的生物学及其饲养. 淡水渔业(12): 11-14.
- 桑卫国, 朱丽, 马克平, 2006. 外来种入侵现象、问题及研究重点. 地球科学进展, 21(3): 305-312.
- 谭细畅, 李新辉, 李跃飞, 李捷, 2012. 尼罗罗非鱼早期发育形态及其在珠江水系的空间分布. 生物安全学报, 21(4): 295-299.
- 万方浩, 郭建英, 王德辉, 2002. 中国外来入侵生物的危害与管理对策. 生物多样性, 10(1): 119-125.
- 万英杰, 周之武, 1990. 尼罗罗非鱼和鲤鱼对偏酸性水环境的适应性. 中国水产(4): 31.
- 王宾贤, 1979. 介绍新从国外引进的尼罗罗非鱼. 湖南水产科技(4): 38-39.
- 王迪, 吴军, 窦寅, 黄成, 2008. 江苏水产养殖鱼类外来物种调查及其生物入侵风险初探. 江西农业学报, 20(11): 99-102.
- 王迪, 吴军, 窦寅, 黄成, 2009. 中国境内异地引种鱼类环境风险研究. 安徽农业科学, 37(18): 8544-8546.
- 王世表, 宋怵, 黄磊, 2016. 中国罗非鱼产业现状、存在问题和发展对策. 中国渔业质量与标准, 6(5): 27-31.
- 王以斌, 石红旗, 刘芳明, 郑洲, 缪锦来, 2014. 外来海洋物种入侵风险评估模式. 自然杂志, 36(2): 133-138.
- 吴福煌, 仇潜如, 胡玫, 王令玲, 张中英, 1980. 尼罗罗非鱼的试养. 淡水渔业, 10(1): 17-21.
- 吴福煌, 刘寒文, 1997. 尼罗罗非鱼抗寒性状若干指标初探. 淡水渔业, 27(5): 14-15.
- 吴福煌, 刘寒文, 邹世平, 王令玲, 仇潜如, 1991. 尼罗罗非鱼的生长与繁殖力的标准参数测定. 淡水渔业, 11(1): 23-26.
- 徐海根, 强胜, 2004a. 中国外来入侵物种编目. 北京: 中国环境科学出版社.
- 徐海根, 强胜, 韩正敏, 郭建英, 黄宗国, 孙红英, 何舜平, 丁晖, 吴海荣, 万方浩, 2004b. 中国外来入侵物种的分布与传入路径分析. 生物多样性, 12(6): 626-638.
- 杨博, 央金卓嘎, 潘晓云, 徐海根, 李博, 2010. 中国外来陆生草本植物: 多样性和生态学特性. 生物多样性, 18(6): 660-673.
- 杨弘, 夏德全, 刘蕾, 吴婷婷, 2004. 奥利亚罗非鱼(♀)、

- 鳊(♂)及其子代间遗传关系的研究. 水产学报, 28(5): 594-598.
- 姚一建, 魏铁铮, 蒋毅, 2002. 微生物入侵种和防范生物武器研究现状与对策. 中国科学院院刊, 17(1): 26-30.
- 余梵冬, 王德强, 顾党恩, 胡隐昌, 朱海, 佟延南, 李芳远, 申志新, 2018. 海南岛南渡江鱼类种类组成和分布现状. 淡水渔业, 48(2): 58-67.
- 袁俊, 李朝晖, 蔡垚, 任源浩, 许昊, 虞蔚岩, 2015. 外来物种尼罗罗非鱼和本地物种鲫鱼混养的初步研究. 黑龙江畜牧兽医 (7): 202-204.
- 张红燕, 袁永明, 贺艳辉, 王红卫, 代云云, 2016. 世界罗非鱼生产和贸易现状分析. 农业展望 (5): 77-80.
- 张中英, 1981. 尼罗罗非鱼繁殖成长的特性. 中国水产 (6): 26-27.
- 张中英, 仇潜如, 胡玫, 王令玲, 吴福煌, 1980. 尼罗罗非鱼. 中国水产 (2): 19.
- 张中英, 胡玫, 吴福煌, 1982. 尼罗罗非鱼耗氧率的初步研究. 水产学报, 6(4): 369-378.
- 张中英, 吴福煌, 仇潜如, 王令玲, 胡玫, 1979. 对引进尼罗罗非鱼的分类鉴定. 淡水渔业, 9(9): 2-6.
- 赵立朝, 2019. 广西南部主要河流罗非鱼建群状况及形态差异分析. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学.
- 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.
- 赵丽慧, 策金华, 张艳红, 任炳琛, 王飞, 梁从飞, 庄青青, 颜标, 赵金良, 2013. 不同盐、碱度下 3 品系尼罗罗非鱼幼鱼网箱养殖的生长比较. 南方水产科学, 9(4): 1-7.
- 郑澄伟, 1985. 罗非鱼疾病及其防治. 福建水产 (1): 24-29.
- 郑勇奇, 张川红, 2014. 外来树种生物入侵风险评价. 北京: 科学出版社.
- 中国常驻联合国粮农机构代表处, 2020. 全球渔业和水产养殖最新状况. 世界农业 (7): 110.
- 中国水产科学研究院渔业工程研究所, 2017. 国家农业科学数据中心-渔业科学数据分中心-渔业统计常见品种图鉴数据库. (2017-11-24) [2021-3-22]. <http://fishdata.fish-info.cn/detail.asp?db=FishData&table=A040112&id=160>.
- 周大仁, 戈汝学, 陈忠林, 1982. 尼罗罗非鱼海水养殖试验. 海洋渔业 (6): 272-274.
- 周霞, 张林艳, 叶万辉, 2002. 生态空间理论及其在生物入侵研究中的应用. 地球科学进展, 17(4): 588-594.
- 朱华平, 卢迈新, 黄樟翰, 2008. 罗非鱼健康养殖实用新技术. 北京: 海洋出版社.
- PETERSON M S, SLACK W T, WAGGY G L, FINLEY J, WOODLEY C M, PARTYKA M L, 2006. Foraging in non-native environments: comparison of Nile Tilapia and three co-occurring native centrarchids in invaded coastal Mississippi watersheds. *Environmental Biology of Fishes*, 76: 283-301.
- ROCHA M J, ARUKWE A, KAPOOR B G, 2008. *Fish Reproduction*. Abingdon: Taylor & Francis Group.
- VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, MELILLO J M, 1997. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 277: 494-499.
- VOS L D, SNOEKS J, AUDENAERDE D T V D, 1990. The effects of Tilapia introductions in Lake Luhondo, Rwanda. *Environmental Biology of Fishes*, 27: 303-308.
- WEYL O L F, 2008. Rapid invasion of a subtropical lake fishery in central Mozambique by Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Pisces: Cichlidae). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18: 839-851.
- ZHANG X, MEI X, GULATI R D, 2017. Effects of omnivorous tilapia on water turbidity and primary production dynamics in shallow lakes: implications for ecosystem management. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27: 245-254.

(责任编辑:陈晓雯)