



外来水产动物引进的风险评估体系的构建与应用

张旭昕^{1,2}, 杜和禾², 曹贞洁², 吴莹², 周永灿², 孙云^{1,2*}

(1. 海南大学, 三亚南繁研究院, 海南 三亚 572022;

2. 海南大学, 海洋科技协同创新中心, 海南 海口 570228)

摘要: 为对引入我国的外来水产动物的风险进行定量地科学评估, 促进我国水产养殖业健康可持续发展, 本研究通过分析外来水产动物的生物性质、入侵机制和可能带来的生态风险, 以及外来水产动物传带疫情疫病的风险, 并结合风险可能存在的危害与影响和风险控制管理办法等因素确定风险评估的指标。利用层次分析法 (analytical hierarchy process, AHP) 和成对比较矩阵方法对各指标的权重进行计算, 构建了一个外来水产动物引进的风险定量评估体系。该评估体系包括 6 个一级指标 (外来种生物学性质、外来种生态风险、病原生物入境、病原生物暴露、危害与影响、外来种风险控制) 和 30 个二级指标。利用该评估体系对我国境内现有的 3 种外来水产动物进行定量地风险评估, 评估结果显示, 鳄雀鳝的风险值 R 为 3.948 6, 为高风险等级; 虾夷扇贝风险值 R 为 2.908 1, 为中风险等级; 锦绣龙虾风险值 R 为 1.868 8, 为低风险等级。研究表明, 该评估结果与我国农业农村部、生态环境部、海关总署等相关单位提供的资料高度吻合, 说明该模型在外来水产动物引进与养殖风险评估的相关工作中有重要的应用价值。本研究在一定程度上提高了风险评估体系对于不同类型水产动物的普适性, 同时融入了对输出国水产动物疫病的综合处理能力和相关政策法规的讨论。

关键词: 外来水产动物; 生物入侵; 风险评估体系; 层次分析法; 风险管理

中图分类号: S 937; X 176

文献标志码: A

我国的水产养殖业正处于健康稳定的绿色发展阶段^[1], 除了对本土水产生物资源的合理利用外, 国外优良水产动物品种的引进与养殖也同样发挥着重要作用。但与本土物种不同, 引进的外来物种更像是一把“双刃剑”, 若疏于管理, 则极有可能成为外来入侵物种 (invasive alien species, IAS) 并造成生物入侵, 其产生的经济损失甚至可以与火灾、洪水等自然灾害相提并论^[2]。生物入侵是指某种生物经人类有意或无意的活动后被带入其自然扩散机制和生物地理屏障所在范围之外

的地区, 并对该地区的生态环境、社会经济和公共卫生安全产生威胁的现象^[3]。与我国陆生生态系统相比, 我国水生生态系统更易遭到外来物种的入侵, 它们通过捕食、杂交、竞争等方式危害土著种与非生物环境^[4], 使我国部分河流、湖泊和海洋内的生物多样性降低, 本地生物群落的结构和水域内的生态环境遭到破坏^[5], 进而对水产养殖、航运贸易、休闲娱乐等人类社会活动产生十分不利的影 响^[6]。

为应对由于外来物种引进所引起的生物入侵

收稿日期: 2023-06-19 修回日期: 2023-08-08

资助项目: 海南省科技专项 (ZDKJ2021016); 海南大学协同创新中心科研项目 (XTCX2022HYB03)

第一作者: 张旭昕 (照片), 从事水产动物病害免疫防控研究, E-mail: zhangxuxin2017@163.com

通信作者: 孙云, 从事水产动物病害免疫防控研究, E-mail: ysun@hainanu.edu.cn



问题, 国内外把风险评估 (risk assessment, RA) 作为加强对外来物种入侵风险分析与管理的一项重要措施^[3,7]。外来物种风险评估通常是对外来物种的进入、定殖、传播、危害、管理等方面进行评估, 目的在于制订更为合理的引进与养殖策略, 进而消除或减少外来物种入侵所带来的危害^[8]。构建科学精准的评估指标体系是对外来物种风险评估的核心环节, 评估指标体系应在符合生物入侵过程与机制的同时, 具备科学性、准确性、可操作性与普适性。根据风险评估体系的不同处理方式, 将其分为定量评估、半定量评估和定性评估三种^[9]。

层次分析法 (analytical hierarchy process, AHP) 由美国运筹学科学家萨蒂 (Saaty) 于 20 世纪 70 年代提出^[10], 经过 40 多年的研发, AHP 已被广泛运用于几乎所有与多准则决策 (multi-criteria decision making, MCDM) 相关的应用中, 以其简单、灵活、严谨和可操作性强等优势, 成为最主流的分析方法之一^[11]。AHP 最初被应用于工业生产和经济管理, 近年来逐渐拓展到农业生产、生态资源利用与保护、自然灾害预测与防控等领域^[12-14]。随着 AHP 的不断发展, 改进层次分析法、模糊层次分析法和灰色层次分析法等多种针对不同分析特征和对象的分析方法相继出现, 提高了 AHP 的灵活性与使用广度^[15]。

在过去几十年里, 国内外学者对外来物种入侵的研究兴趣大增。随着研究的逐渐深入, 人们基于各外来物种的生物学特性、种群特点和入侵模式, 提出了一些外来物种风险评估体系, 部分评估体系如今依旧被众多国家广泛使用, 例如, 基于澳大利亚杂草评估系统改编的水生动物评估体系 FISK (fish invasiveness screening kit) 和 FI-ISK (freshwater invertebrate invasiveness scoring kit), 它们的评估对象分别为外来鱼类和外来水生无脊椎动物, 如今仍在更新并被部分欧美国家广泛使用^[16-17]。在我国, 外来种水生动物的风险评估及其相关研究经历了二十余年的发展, 在我国相关水生动物引进与管理工作中发挥着重要作用, 吴文广等^[18]所构建的莱州湾外来泥螺 (*Bullacta exarata*) 生态安全风险评估体系, 其科学的风险评价指标框架和对外来泥螺生态风险的精准分析, 为外来泥螺的引进监督和养殖管理提供了强有力的理论依据。刘泽天等^[19]将德尔菲法同层次分析法巧妙结合, 构建了新加坡石斑鱼虹彩病毒

(Singapore grouper iridovirus, SGIV) 发生风险评估模型, 在石斑鱼虹彩病毒综合防治领域取得较大突破。林强等^[20]则是利用所建立的养殖牡蛎副溶血性弧菌 (*Vibrio parahaemolyticus*) 风险评估模型, 分别计算出了某养殖场春夏秋冬副溶血性弧菌感染发生风险的概率, 在牡蛎养殖的病害防控应用中具有重要意义。但是, 面对我国水产养殖业的发展与当今市场日益多变的复杂需求, 外来种水产动物的风险评估及其相关研究领域依然存在着些许问题, 例如应用研究相比于理论研究较为滞后, 实际使用的灵活性与便捷性存在不足等问题。相比于过去文章中所介绍的评估体系, 本研究的亮点在于在一定程度上提高了风险评估体系对于不同类型水产动物的普适性, 同时融入了对输出国水产动物疫病的综合处理能力和相关政策法规的讨论。

本研究基于层次分析法建立外来水产动物引进的风险评估模型, 并对我国现存的 3 种外来水产动物鳄雀鳝 (*Atractosteus spatula*)、锦绣龙虾 (*Panulirus ornatus*) 和虾夷扇贝 (*Mizuhopecten yessoensis*) 进行定量风险评估, 其评估结果可为上述 3 种外来水产动物引进与养殖的风险管理提供理论依据。本研究的主要目的: ①构建可兼容物种自身风险和传带疫病风险两个方面的外来水产动物引进的风险评估体系; ②结合实际水产动物的引种情况和相关政策法规, 优化目前现有的定性或半定量的外来水产动物相关风险评估体系; ③填补我国水生生态系统外来物种风险管理的相关研究空缺。

1 材料与方法

1.1 风险评估体系的指标构成

为分析外来水产动物在引进与养殖中可能存在的风险, 本研究将基于定量评估方法展开, 从其自身生物风险和传带疫情疫病风险两方面, 结合风险可能存在的危害与影响和风险控制管理办法等因素确定风险评估的指标。其中, 外来种自身生物风险方面包含对外来种自身的生物学特性和生态风险的评估与分析, 例如外来种的引入是否会对现有的地方种和生态环境构成威胁; 而传带疫情疫病风险包含对外来种可能携带的病原生物的评估与分析, 例如相关政策法规能否对安全引种提供坚实保障和病原暴露的危险性评估等; 风险产生的危害与影响包含外来种造成生物入侵

或相关病害暴发后的后果及对人类健康、社会经济、生态环境等因素的影响; 相关风险管理办法包含对外来物种监测与管理措施的可行性, 对相关病害的诊断、治疗和防控办法的完善性(成本、效果及其他负面影响等)^[21-24]。参考国内外先进风险评估体系, 实验确定了外来水产动物引进的风险评估体系的指标, 共包含 6 个一级指标(即 6 个风险评估模块, 分别是外来种生物学特征 R1、外来种生态风险 R2、病原生物入境 R3、病原生物暴露 R4、危害与影响 R5 和外来种风险防控 R6) 和 30 个二级指标(图 1~图 6)。

1.2 各级指标的量化赋值标准和评判依据

本评估体系的突出特点是具有较为清晰明确的赋值标准和评判依据, 可以增加评估结果的准确性。本体系将全部二级指标划分为 6 个等级, 风险程度由低到高依次为: 0(可忽略风险)、1(极低风险)、2(微弱风险)、3(中等风险)、4(较高风险) 和 5(极高风险), 使用者可根据文献资料和专家意见, 对各二级指标进行打分, 各二级指标的具体评判细则见表 1。同时, 为了消除主观因素所带来的评估结果偏差, 本体系设置了针对各分值的更为明确的赋值标准与细则(表 2), 使用者可

在各分值的赋值标准与细则中寻找符合条件的分值, 最后, 结合实际情况进行打分, 各分值的赋值标准与细则见表 2。

1.3 各级指标权重的计算

层次分析法最关键的步骤之一是通过建立精确的成对比较矩阵来计算不同层次指标权重, 其具体步骤: ①首先, 确定了决策目标(即外来水产动物引进的风险评估), 依次构建决策层、准则层与方案层; ②对各个同级指标的重要程度进行比较与打分, 然后对打分结果进行讨论和归纳, 制作两两判别矩阵, 分别计算, 得出权重数值; ③验证权重系数分配的合理性, 利用 MATLAB 软件计算判断矩阵最大特征根 λ_{max} , 计算一致性指标 CI 对矩阵的一致性检验进行判断, 再根据平均随机一致性指标 RI 与一致性指标 CI 作商所得的结果, 即随机一致性比率判断权重系数的分配是否合理(<0.1 即为合理)^[24-25]。

风险评估指标之间的作用关系可根据其贡献分为连乘关系、累加关系和替代关系等^[25], 由于本体系中各级指标之间互不依赖且独立地对上一级指标的数值大小做出贡献, 故其关系均为累加关系。

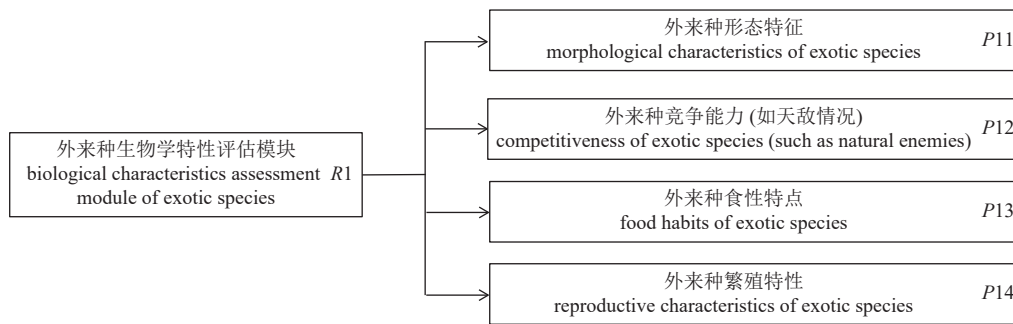


图 1 外来种生物学特征评估模块 R1

Fig. 1 Exotic species biological characterization assessment module R1

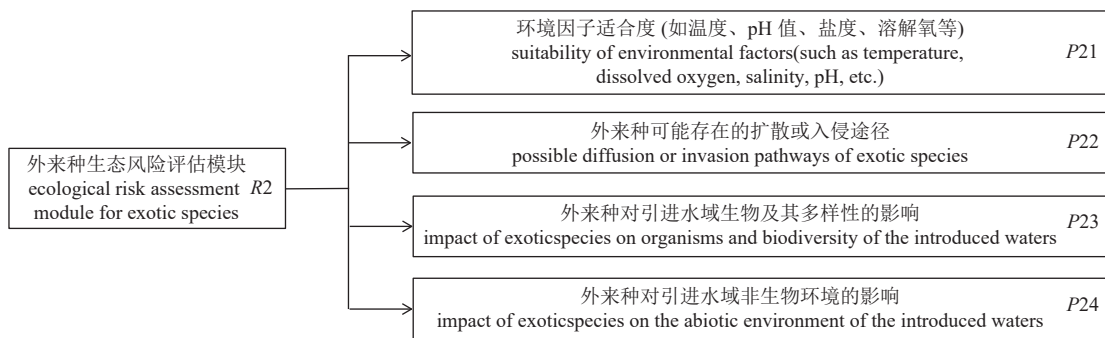


图 2 外来种生态风险评估模块 R2

Fig. 2 Ecological risk assessment module for exotic species R2

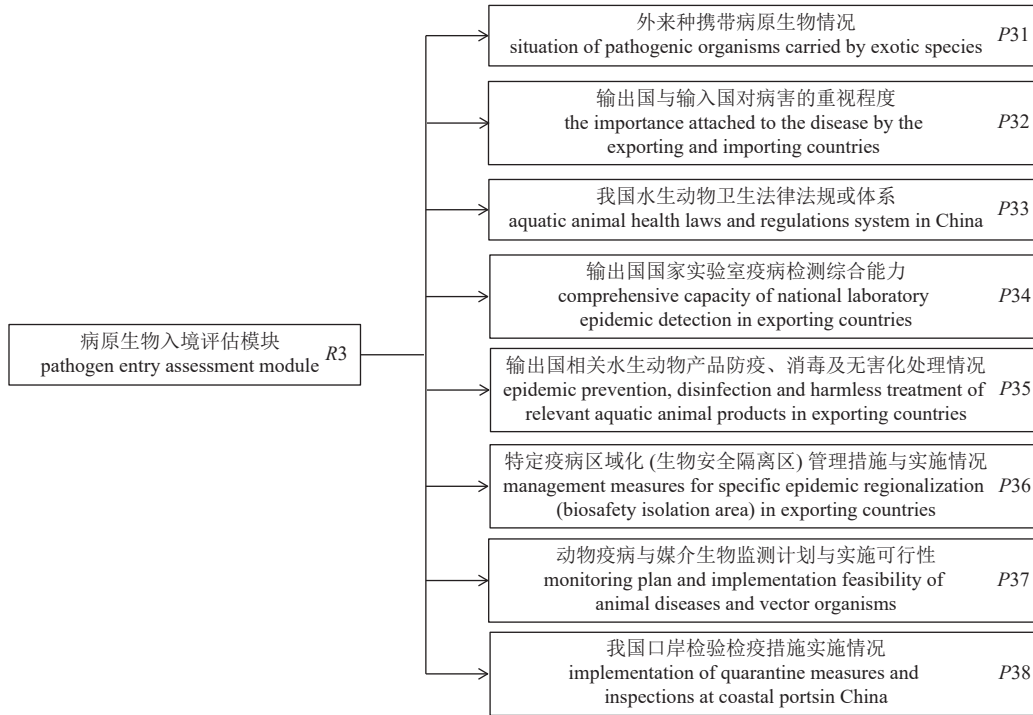


图 3 病原生物入境评估模块 R3

Fig. 3 Pathogen entrance assessment module R3

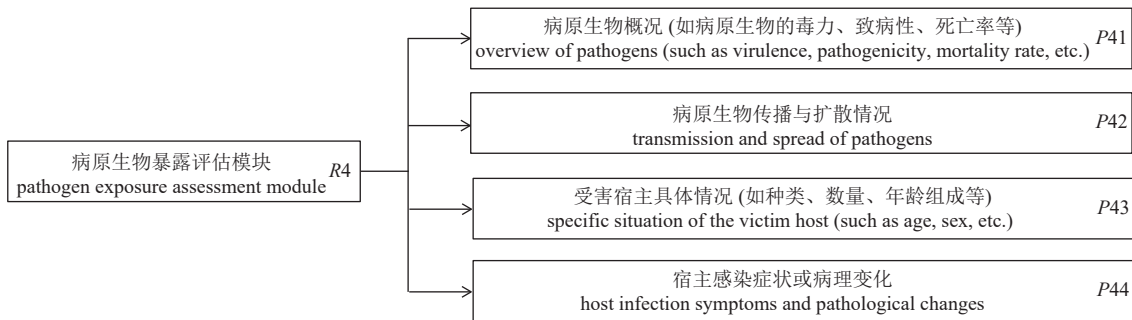


图 4 病原生物暴露评估模块 R4

Fig. 4 Pathogen exposure assessment module R4

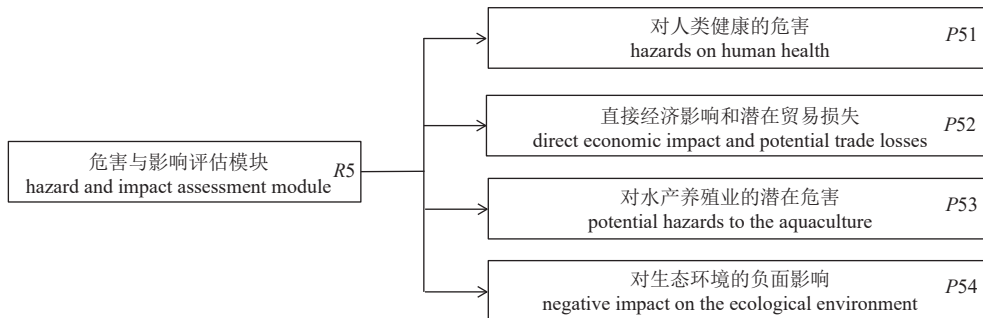


图 5 危害与影响评估模块 R5

Fig. 5 Hazard and impact assessment module R5

1.4 风险等级的设定

参考国际上现行的有害生物等级划分体系^[26]

和我国水生生物分级管理的需要, 同时结合本风险评估模型体系的具体情况, 将风险等级的数值

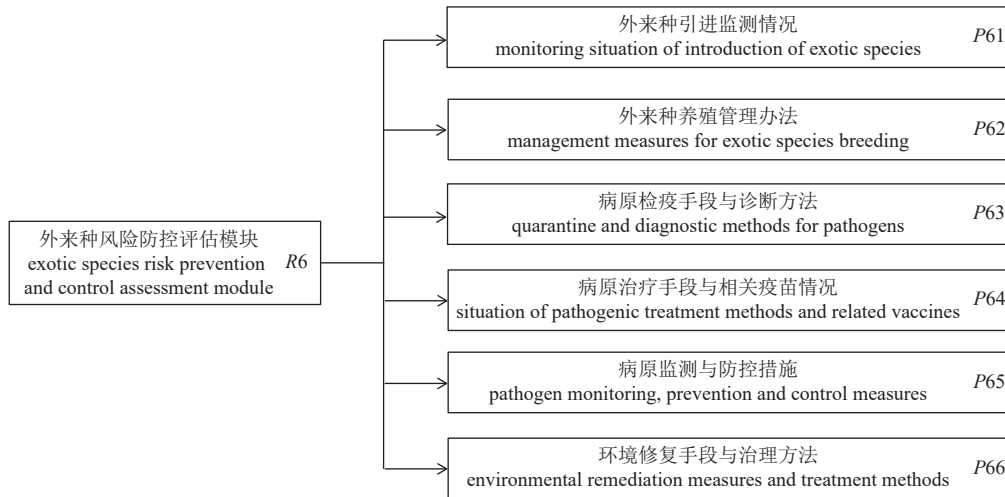


图 6 外来种风险防控评估模块 R6

Fig. 6 Exotic species risk prevention and control assessment module R6

表 1 各二级指标的评判细则

Tab. 1 Assessment rules and assignment criteria for each secondary index

二级指标 secondary index	各二级指标的具体评判细则 specific assessment rules for each secondary index
P11	请使用者对外来种的形态特征作简要概述, 并根据上述特性对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P12	(0)引入地内存在多种强势的天敌, 外来种竞争能力极弱, 只有在特定保护区内才能生存; (1)外来种竞争能力弱, 各种天敌都对外来种的生存构成巨大威胁; (2)外来种具备一定竞争能力, 但与引入地内天敌竞争时, 天敌占上风; (3)外来种具备一定竞争能力, 与天敌存在明显的捕食或竞争关系且二者势均力敌; (4)外来种竞争能力较强, 使得外来种在各种竞争中长期处于上风; (5)外来种竞争能力极强且区域内无任何有效天敌。
P13	请使用者简要概括外来种的食性特点, 并结合其食性特点分析其可能存在的风险并对风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P14	请使用者简要概括外来种的繁殖特性, 并结合其繁殖特性分析其可能存在的风险并对风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P21	(0)新生境几乎无法使外来种生存; (1)外来种在新生境中难以生存; (2)新生境基本满足外来种的生存条件; (3)新生境在满足外来种生存条件的同时也基本满足繁殖条件; (4)新生境各项条件较为适宜, 外来种的生存条件与繁殖条件均得到满足; (5)新生境非常适合外来种生存繁衍。
P22	请使用者查阅相关参考文献或资料, 对外来种可能存在的扩散或入侵途径进行简要概括, 并根据扩散或入侵途径的具体情况对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P23	请使用者查阅相关参考文献或资料, 简要论述外来种对引进水域生物及其多样性的影响, 同时说明其原因, 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P24	请使用者结合参考文献或相关资料, 简要概括外来种对引进水域相关非生物因素的影响(包括直接影响和潜在的间接影响), 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P31	请使用者对外来种可能携带的病原生物进行举例, 并根据病原生物种类对其风险程度进行打分: 0(不携带任何病原生物), 1(可能携带病原生物), 2(携带病原生物的种类较为单一), 3(携带3种及以上不同种类的病原生物), 4(携带病原生物种类较多), 5(携带病原生物种类十分繁多), 若本项打分为0, 则R3和R4也均为0。
P32	(1)双方国家对贸易物种的相关病害十分重视, (2)双方国家对贸易物种的相关病害较为重视, (3)双方国家对贸易物种的相关病害重视程度一般, (4)双方国家对贸易物种的相关病害重视程度偏低, (5)双方国家对贸易物种的相关病害重视程度很低。
P33	请使用者从我国相关水生动物卫生法律法规或体系的角度对我国抵御引种与养殖相关风险的能力进行论述, 并根据实际情况进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P34	请使用者结合参考资料对输出国的国家实验室疫病检测综合能力进行简要概述, 并结合专家建议根据其风险情况打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P35	请使用者结合输出国实际卫生情况, 对输出国相关水生动物产品的防疫、消毒及无害化处理等相关工作的情况及其成效进行简要论述, 并结合专家建议根据其风险情况打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P36	请使用者对输出国特定疫病区域化(生物安全隔离区)管理措施与实施情况进行简要论述并根据其合理性与安全性对风险程度打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P37	请使用者对即将输入我国的水生动物可能存在的疫病与相关媒介生物监测计划进行简要论述, 并从实施可行性(操作难度、安全性等方面)的角度对风险程度打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。

二级指标 secondary index	各二级指标的具体评判细则 specific assessment rules for each secondary index
P38	请使用者结合相关参考资料对我国相关地区口岸的检验检疫措施与实施情况进行简要论述, 并根据措施的合理性与实施的可行性对其风险程度打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P41	请使用者结合参考文献和实际养殖情况, 对外来种可能携带的主要病原生物的总体情况简要概括(如病原生物的毒力、致病性、死亡率等), 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P42	请使用者结合参考文献, 对病原生物传播与扩散情况进行简要概括(如宿主、传播载体、传播途径等), 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P43	请使用者结合相关资料, 对病原生物感染的引进宿主的具体情况简要概括(如种类、数量、年龄组成等), 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P44	请使用者结合参考文献和相关资料, 从物种商品价值角度入手, 对宿主感染症状或病理变化等进行简要总结, 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P51	(0)对人类健康几乎无影响; (1)可能引起人体的免疫功能下降, 对人类健康有着潜在的威胁; (2)可能会对人体健康产生不良影响, 但没有导致疾病发生; (3)外来种携带的病原体会感染人类, 进而对人类健康构成威胁; (4)历史上出现过危害人类健康的案例; (5)出现过多起个体或群体性发生危害或死亡的案例。
P52	(0)几乎无任何贸易损失或对经济无任何负面影响; (1)直接经济影响和潜在贸易损失均较小; (2)产生的直接经济影响和潜在贸易损失均在可控制范围内; (3)产生的直接经济影响和潜在贸易损失已经影响到了正常的生产生活; (4)产生的直接经济影响和潜在贸易损失较大且难以控制; (5)对社会经济的负面影响不可估量, 潜在贸易损失十分巨大。
P53	请使用者结合外来物种养殖的实际情况, 简要概括外来种对引入地区水产养殖业的潜在危害, 可从养殖可持续性、养殖资源及相关人员的生产生活秩序及其相关方面进行论述并根据实际情况进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P54	(0)外来种对引入地的生态环境几乎无负面影响; (1)外来种可能会对引入地的生态环境产生少许负面影响; (2)外来种对引入地生态环境的负面影响基本可控; (3)外来种会对引入地的生态环境产生一定程度的负面影响, 但通过生态系统调节可以恢复; (4)外来种会对引入地的生态环境造成一定程度的破坏; (5)外来种会对引入地的生态环境造成严重的破坏, 产生深远的影响。
P61	请使用者结合参考文献和实际情况, 对外来种引进监测措施进行简要概括, 并根据相关措施的合理性、实施难度与成本等因素对风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P62	请使用者结合参考文献和实际情况, 从外来种养殖管理层面对外来种引入的风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P63	请使用者结合参考文献, 简要概括相关病原的检疫手段与诊断方法(如有需要可以对相关内容进行补充), 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P64	请使用者结合参考文献和实际情况, 简要概括病原治疗手段与疫苗情况, 并根据治愈率、治疗或免疫成本等因素对风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P65	请使用者结合参考文献和实际情况, 对相关病原的监测、预防与控制措施进行简要概括, 并根据其难度、效果、成本等因素对风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。
P66	请使用者结合参考文献和实际情况, 对外来种引入后的相关区域环境修复手段与治理方法进行简要概括, 并对其风险程度进行打分: 0(可忽略风险), 1(极低风险), 2(微弱风险), 3(中等风险), 4(较高风险), 5(极高风险)。

表 2 各分值的评判标准与细则

Tab. 2 Assignment criteria and rules for each score

分值 score	各分值的赋值标准与细则 assignment criteria and rules for each score
0	(1)无法产生风险或产生风险的可能性极小(可忽略); (2)风险无法产生任何危害和损失; (3)存在切实可行的根除风险的有效途径。
1	(1)产生风险的可能性较低; (2)外界因素导致风险无法持续存在; (3)存在有效的措施和手段, 在风险产生负面影响前对风险进行防控。
2	(1)存在产生风险的可能性, 但风险所带来的危害、损失或负面影响较小; (2)相关政策和措施可以将风险产生的危害与损失降到可接受范围内; (3)存在多种切实可行的有效手段消除风险所产生的负面影响。
3	(1)存在产生风险的可能性, 但风险产生的危害、损失或负面影响均在可控范围内; (2)相关政策和措施可以在一定程度上为风险防控提供保障; (3)可能存在未知的风险, 导致在外来物种引进过程中可能出现一定程度的损失; (4)存在相对可行有效的手段对风险产生的负面影响进行控制。
4	(1)风险产生的可能性较大, 且风险产生的危害、损失或负面影响难以控制; (2)风险产生的危害、损失或负面影响具有一定持续性; (3)可能存在难以预判的风险, 导致外来物种引进过程产生的危害较为严重且无法避免; (4)外界因素导致相关防控措施难以实施或效果较差。
5	(1)风险产生的危害、损失或负面影响等十分巨大且无法挽回; (2)风险的产生、扩散机制复杂多样, 导致危害的影响范围巨大, 具有较强的持续性; (3)尚无有效方法对风险进行预防与控制; (4)由于政策、成本等因素, 导致某些中间环节无法实施, 进而无法为外来物种引进提供任何保障。

(即风险值)用 R 表示并设定了风险等级, 具体如下: 当 $0 \leq R \leq 1$ 时, 为可忽略的风险, 可以引进外来物种; 当 $1 < R \leq 2$ 时, 为低风险, 在国家政策允许的情况下可以外来物种进行引进; 当 $2 < R \leq 3$ 时, 为中风险, 要在海关等相关部门的严格管理下对外来物种进行有限地引进; 当 $3 < R \leq 4$ 时, 为高风险, 不建议引进, 如需进行引进, 则必须同海关等相关部门进行密切沟通, 在制订严密的引种策略与风险防控措施的情况下对外来物种进行规范引进; 当 $4 < R \leq 5$ 时, 为极高风险, 在任何

情况下都不能进行引进, 如有相关单位或个人擅自引进、释放或丢弃外来物种, 将依法追究其刑事责任。

1.5 外来水产动物引进与养殖风险评估模型的验证

为验证上述风险评估模型体系在实际外来水产动物引进的风险评估的正确性与合理性, 本研究利用所建模型对 3 种不同种类的外来水产动物进行风险评估, 各评估对象的详细情况见表 3。

表 3 评估对象的详细信息

Tab. 3 Detailed information on the subjects of assessment

引进物种 imported species	出口国 exporting country	引进规模 introduction scale	商业用途 commercial purpose
鳄雀鳝 <i>Atractosteus spatula</i>	美国 the United States	小规模 small scale	观赏鱼类 ornamental fish
锦绣龙虾 <i>Panulirus ornatus</i>	文莱 Brunei	中等规模 medium scale	名贵海产品 precious seafood
虾夷扇贝 <i>Mizuhopecten yessoensis</i>	日本 Japan	大规模 large scale	养殖、销售 aquaculture and sales

2 结果

2.1 各级指标权重的计算与函数表达式的建立

实验根据各级指标权重的计算方法计算出了权重值, 确定了各指标间的作用关系, 并建立了风险值 R 计算的最终函数表达式 (全部结果保留小数点后 4 位):

$$R=0.0964R_1+0.1675R_2+0.0923R_3+0.1523R_4+0.2172R_5+0.2743R_6$$

$$R_1=0.1072P_{11}+0.4445P_{12}+0.2832P_{13}+0.1651P_{14}$$

$$R_2=0.1798P_{21}+0.3040P_{22}+0.4263P_{23}+0.0899P_{24}$$

$$R_3=0.2998P_{31}+0.0524P_{32}+0.0634P_{33}+0.1821P_{34}+0.1174P_{35}+0.0938P_{36}+0.0799P_{37}+0.1112P_{38}$$

$$R_4=0.4944P_{41}+0.2472P_{42}+0.1070P_{43}+0.1514P_{44}$$

$$R_5=0.5582P_{51}+0.1835P_{52}+0.1440P_{53}+0.1143P_{54}$$

$$R_6=0.1072P_{61}+0.1864P_{62}+0.3056P_{63}+0.0788P_{64}+0.2621P_{65}+0.0599P_{66}$$

2.2 3 种水生动物的风险评估的二级指标打分

通过查阅文献综述、咨询专家和采访与观察实际养殖地等方法, 对 3 种外来水产动物鳄雀鳝、

锦绣龙虾、虾夷扇贝的信息进行收集, 对 3 个物种的论述内容分别见表 4、表 5 和表 6。根据以上内容对 3 个物种的各二级指标进行评分, 评分结果见表 7。

2.3 3 个评估对象风险等级的划分

根据上述对二级指标的打分情况, 经过计算获得 3 种水产动物的风险值 R 和风险登记评级结果 (表 8)。

本次风险评估中各评估对象的风险等级从大到小的顺序: 鳄雀鳝 > 虾夷扇贝 > 锦绣龙虾。其中, 鳄雀鳝的引进风险等级为高风险, 如有必要, 必须在有科学的引种策略和风险防控措施的前提下, 在海关等相关部门的密切配合下进行有限地引进; 虾夷扇贝的引进风险等级为中风险, 在严格的管理措施下可以进行规范引进; 锦绣龙虾的引入风险等级较低, 在国家政策允许的条件下可以引进。

3 讨论

本风险评估体系是基于国际中广泛应用的风险评估体系所提出的, 具有以下几个优势: ①本体系综合了物种自身生物风险和传带疫情疫病风险两个大方向, 同时又兼顾了经济效益、政策法规、生态环境等其他直接影响外来物种引进的因素; ②本模型通过量化指标的方法解决了指标间的不可公度问题, 将无法描述清楚的复杂问题转

表 4 鳄雀鳝评估过程中需论述补充的内容

Tab. 4 Supplementary discussion content during the assessment process of *A. spatula*

二级指标 secondary index	论述补充的内容 supplementary discussion content
P11	鳄雀鳝体长1.2~1.8 m, 体重45~72 kg, 为大型鱼类, 鱼身呈长筒形, 吻部前突, 短吻, 上下颌密布两排十分锋利的牙齿, 与鳄鱼相似, 寿命较长, 可达26~50年。
P12	鳄雀鳝性情凶猛且竞争能力极强, 虽然有天敌, 例如鳄鱼、渔貂、一些大型猛禽等, 但在我国江河、湖泊和水库等自然水体, 几乎很少见到可以压制鳄雀鳝的有效天敌。
P13	鳄雀鳝是性情凶猛的肉食性鱼类, 以多种大中小型鱼类为食, 偶尔也会捕食一些甲壳类动物、龟类或鸟类, 且食量巨大。
P14	鳄雀鳝每年5—8月交配产卵, 雌鱼每次产下14-20万枚卵, 其中少数可成功孵化, 卵呈淡绿色, 有剧毒, 黏附于水草或砾石上, 孵化期约6~8 d, 雄性6龄、雌性11龄左右可达性成熟。
P21	鳄雀鳝属于一种古老的鱼类, 适应能力极强, 一般的自然水域均可满足鳄雀鳝生存繁衍的需求。
P22	鳄雀鳝具有独特的外观, 经常被当做观赏鱼在我国水族馆中进行售卖, 除一些偶然的入侵外, 养殖逃逸与人为放生通常被认为是鳄雀鳝主要的扩散或入侵途径, 且一旦逃逸或放生, 捕获难度极大。
P23	鳄雀鳝的引入会对引入水体的生物与多样性造成毁灭性的打击, 首先, 鳄雀鳝会与土著鱼类发生竞争性排斥, 其次, 因其食性广、食量大, 鳄雀鳝栖息的水域内其他水生动物通常难以生存。
P24	鳄雀鳝的引入会对引入水体的非生物环境造成不可逆转的危害, 首先, 鳄雀鳝极强的竞争能力会导致引入水域内的非生物资源数量锐减, 其次, 鳄雀鳝的内脏与卵均有剧毒, 也可能污染水体环境。
P31	鳄雀鳝抗病能力较强, 但其可以成为多种鱼类病害的中间宿主, 包含细菌(弧菌属、链球菌属中的一些种类)、真菌(水霉、绵霉等)、寄生原生动物(小瓜虫等)、寄生甲壳类动物(溞类等)等多种不同类型。
P32	双方国家相关渔医管理机构对鳄雀鳝相关病害均极为重视。
P33	《中华人民共和国进境动物检疫疫病名录》、世界动物卫生组织(WOAH)《水生动物卫生法典》、《水生动物疾病诊断手册》等相关资料及国家政策性文件均可以作为抵御鳄雀鳝引种与养殖相关风险的有力支撑。
P34	美国有众多出色的动物疫病检测实验室, 例如美国亚利桑那大学水产养殖病理学实验室等, 其检测病害的综合能力得到了我国相关单位的高度认可。
P35	美国作为一个老牌农业强国, 也是世界上发达的农产品出口国, 在水产动物相关产品的防疫、消毒及无害化处理等工作上具有严谨的态度和丰富的经验, 其质量与成效得到了中方的高度肯定。
P36	美国相关养殖场与实验室对特定疫病区域化(生物安全隔离区)均有着十分严密的管理措施, 同时各相关单位会层层把关, 保证良好的实施情况。
P37	对于鳄雀鳝可能存在的疫病, 美国相关单位具备十分完善的媒介生物监测计划, 在充分考虑操作难度和安全性的情况下, 监测计划具备一定的可行性。
P38	我国相关口岸均有着相当严密的检验检疫措施, 海关等部门会保证相关措施的执行情况。
P41	鳄雀鳝可能携带的病原包括细菌(弧菌属、链球菌属中的一些种类)、真菌(水霉、绵霉等)、寄生原生动物(小瓜虫等)、寄生甲壳类动物(溞类等), 多是些毒力较强的病原, 存在着较大的致病风险和死亡率。
P42	对于鳄雀鳝可能携带的病原体, 水体、鱼体间的相互接触均可导致病原在同种或不同种类间传播与扩散, 且弧菌属、链球菌属中的一些种类还可以通过更为复杂的传播途径实现不同物种(如甲壳类、贝类等)之间的传播。
P43	多种病原从幼体到成体均可感染(除部分条件性致病菌外)。
P44	鳄雀鳝主要作为观赏鱼类在我国各地水族馆中进行销售, 若受到病原体的感染, 会表现出相对应的病症, 即使治疗痊愈, 但商品价值也会大打折扣。病原体还有可能通过相关设施和器具进行传播, 进而加大了其他水生动物的感染风险。
P51	鳄雀鳝性情凶猛, 而且牙齿十分锋利, 在养殖过程中有可能咬伤人类, 不仅如此, 鳄雀鳝的内脏与卵均有剧毒, 若有人不慎误食了其内脏或饮用了含有剧毒的水体, 则会对其健康造成极其严重的影响。
P52	由于鳄雀鳝的存在通常会导致水域内其他鱼类数量锐减, 因此, 在引进过程中, 若管理不当导致鳄雀鳝造成生物入侵, 则其产生的直接经济影响和潜在贸易损失很可能会影响到人们正常的生产生活。
P53	鳄雀鳝会通过捕食、竞争等方式, 严重影响引入水域内其他经济鱼类的繁衍生息, 因此, 在引入鳄雀鳝后必须要对其进行严格的管理, 若疏于管理, 则很有可能会对引入地的水产养殖业造成一定程度的负面影响。
P54	引入鳄雀鳝后, 若疏于管理, 则很有可能会严重危害引入地的生物多样性, 破坏引入地的生态环境。
P61	我国海关会对外来引入的鳄雀鳝进行实时监测, 确保外来鳄雀鳝不会威胁到本土水生物种与水域环境。
P62	引入的鳄雀鳝主要作为观赏鱼在水族馆内进行售卖, 可能引起的入侵风险极大, 我国相关部门已经通过立法的手段对其进行严格控制, 避免养殖逃逸或人为放生。
P63	对于鳄雀鳝的大部分相关病害, 我国海关检疫部门有着十分有效且可靠的检疫手段与诊断方法, 确保可以在第一时间检测是否存在高危病害。
P64	鳄雀鳝的多种疾病均是由细菌、真菌和寄生虫所致, 可以采取综合防治的手段进行控制, 因多数病原尚无可供大规模使用的疫苗, 故要做到勤监测、勤预防、早发现、早治疗。
P65	入境水生动物将全部标识、消毒并进行严密监测, 且引进相关数据全程可追溯, 相关病害待检测结果均显示阴性后方可放行。
P66	目前, 尚无有效办法修复鳄雀鳝对水域内生物所造成的创伤, 只能通过人工捕获并对相关区域进行全面排除、消毒等方法消除鳄雀鳝对其原有水域环境的影响。

表 5 锦绣龙虾评估过程中的论述补充内容

Tab. 5 Supplementary discussion content during the assessment process of *P. ornatus*

二级指标 secondary index	论述补充内容 supplementary discussion content
P11	锦绣龙虾最大体长达60 cm, 通常为20~35 cm, 是龙虾属中体型最大者, 通常栖息在水深1~10 m处。头胸甲略呈圆筒状并覆有软毛, 眼睛大且呈肾状, 腹部光滑且无横沟, 第一触角和步足具显眼的淡黄色和黑色环斑。
P12	锦绣龙虾的主要天敌为比目鱼, 但相比于天敌, 在养殖过程中应保证饵料充足, 防范锦绣龙虾种群内部自相残食。
P13	自然海域中的锦绣龙虾主要以一些贝类、小型蟹类、藤壶和海胆等为食, 偶尔也会摄食海藻等海洋植物。
P14	锦绣龙虾在5个月内繁殖2次, 交配后1~10 d产卵, 其胚胎发育分为11个时期: 受精卵、卵裂期、囊胚期、原肠期、膜内无节幼体期、七对附肢期、九对附肢期、十一对附肢期、复眼色素形成期、准备孵化期和孵化期。在水温29.2 °C, 盐度30, 受精卵经22~23d可孵化出叶状幼体。
P21	锦绣龙虾为世界名贵虾类之一, 野生资源十分稀缺, 人工养殖的锦绣龙虾若脱离了特定养殖环境, 会难以存活, 故将本项定为微弱风险。
P22	锦绣龙虾主要的扩散方式为养殖逃逸, 但因其行动迟缓且不善游泳, 故捕获难度较低, 且其种群在自然海域中数量较少, 很难发生生物入侵。
P23	自然海域中的锦绣龙虾主要以一些贝类、小型蟹类、藤壶和海胆等为食, 而人工养殖的锦绣龙虾一般只食用特定饵料, 几乎不会对引入水域内的生物多样性产生负面影响。
P24	一般情况下, 锦绣龙虾不会对引入水域的非生物环境产生负面影响。
P31	锦绣龙虾的抗病能力较强, 在养殖过程中一般不易感染病害, 但也有可能携带副溶血性弧菌、气单胞菌、水霉、固着类纤毛虫等病原生物。
P32	2019年, 我国与文莱签订输华野生水产品议定书; 2023年, 我国首次从文莱引进锦绣龙虾, 双方国家均给予高度重视。
P33	《中华人民共和国进境动物检疫疫病名录》、世界动物卫生组织(WOAH)《水生动物卫生法典》、《水生动物疾病诊断手册》等相关资料及国家政策性文件均可以作为抵御锦绣龙虾引种与养殖相关风险的坚实后盾。
P34	我国与文莱相关渔医实验室均有着严密的规章制度和专业的工作团队, 实验室疫病检测综合能力得到中方的认可, 但因为本次为我国首次从文莱引进锦绣龙虾, 因此, 有可能存在未知的风险, 导致引种过程出现不可控因素。
P35	在引进过程中, 文莱相关虾类产品的防疫、消毒及无害化处理等相关工作进行得十分井然有序, 但因为本次为我国首次从文莱引进锦绣龙虾, 因此, 有可能存在未知的风险, 导致引种过程出现不可控因素。
P36	文莱相关养殖场与实验室对特定疫病区域化(生物安全隔离区)均有着十分严密的管理措施, 同时各相关单位会层层把关, 保证良好的实施情况。
P37	对于锦绣龙虾可能存在的疫病, 文莱相关单位具备十分完善的媒介生物监测计划, 且可以保证相关监测方案的顺利实施。
P38	双方国家口岸均有着相当严密的检验检疫措施, 海关等部门会保证相关措施的执行情况。
P41	锦绣龙虾可能携带的病原生物, 如副溶血性弧菌、气单胞菌、假单胞菌、黄杆菌、黏孢子虫、固着类纤毛虫等, 均有着较高的致病性和死亡率, 其感染和传播的风险不能忽视。
P42	对于锦绣龙虾可能携带的病原体, 水体、水产动物间的相互接触均可导致病原的传播与扩散, 且副溶血性弧菌、气单胞菌、黏孢子虫等病原体还可以通过更为复杂的传播途径实现不同物种(如鱼类、贝类等)之间的传播。
P43	锦绣龙虾从幼体到成体均可受到感染, 部分寄生虫甚至可能威胁到虾卵。
P44	锦绣龙虾通常作为高档水产品产品在饭店中售卖, 一旦受到病原体的感染, 除了表现出对应疾病的症状外, 还会出现身体瘦弱、反应迟钝、外壳失去光泽等症状, 即使没有死亡, 也会失去其商品价值。
P51	锦绣龙虾主要作为高档海产品在我国部分地区酒店进行售卖, 从烹饪方法的角度看, 锦绣龙虾相关疫病感染人类的可能性很小, 因此对人类健康的负面影响较低。
P52	锦绣龙虾属于名贵虾类, 其售价高昂, 养殖成本也较大, 因此, 若是相关疫病暴发导致锦绣龙虾死亡, 定会产生巨大的经济影响和贸易损失。
P53	锦绣龙虾的引入对引入地水产养殖业的负面影响基本可控, 相关养殖场需对引入的锦绣龙虾进行严格的管理, 及时清理养殖所产生的垃圾和废料, 确保不影响其他水产动物的养殖, 即可将其负面影响降到最低。
P54	相关养殖场对引入的锦绣龙虾需进行严格的管理, 若疏于管理, 其养殖所产生的垃圾和废料则有可能对引入地的生态环境产生少许负面影响。
P61	我国海关会对外来引入的锦绣龙虾进行实时监测, 确保外来锦绣龙虾种群不会威胁其他本土虾类。
P62	锦绣龙虾主要作为名贵海产品在海鲜超市或饭店内进行售卖, 另外还有少许锦绣龙虾作为观赏虾类, 一般都是在特定的水域环境进行养殖, 故风险程度较低。
P63	对于锦绣龙虾相关病原体, 我国海关检疫部门有着十分有效且可靠检疫手段与诊断方法, 确保可以在第一时间发现携带病原的入境锦绣龙虾。
P64	目前, 对于锦绣龙虾的多种相关疾病, 可以采取综合防治的手段进行控制。虽然尚无可供大规模使用的疫苗, 但将免疫增强剂配合饲料进行投喂可以提高锦绣龙虾对部分病原的免疫力。
P65	入境水生动物将全部标识、消毒并进行严密监测, 且引进相关数据全程可追溯, 相关病害待检测结果均显示阴性后方可放行。
P66	目前, 对于池塘养殖, 只能通过清塘并对全塘进行消毒的方法消除锦绣龙虾相关病原对环境的影响, 而对于自然水域养殖, 尚无切实可行的有效方法对环境进行修复。

表 6 虾夷扇贝评估过程中的论述补充内容

Tab. 6 Supplementary discussion content during the assessment process of *M. yessoensis*

二级指标 secondary index	论述补充内容 supplementary discussion content
P11	虾夷扇贝壳高一般可超过20 cm, 右壳突出并呈现黄白色; 左壳稍平, 较右壳稍小, 呈紫褐色, 壳近圆形。右壳肋宽而低矮, 左壳肋则较细, 肋间较宽, 壳内面呈白色, 壳顶下方有三角形的内韧带。一般分布于底部比较坚硬、淤泥少的海区和水深不超过40 m的沿岸区。
P12	虾夷扇贝的天敌主要为一些海鸟和棘皮类动物(如海星等), 上述天敌虽然会捕食虾夷扇贝, 但很难对虾夷扇贝种群产生巨大伤害。
P13	虾夷扇贝为滤食性贝类, 主要以细小的浮游植物、浮游动物、细菌以及有机碎屑为食。
P14	虾夷扇贝为体外受精, 体外发育, 卵于受精后2~3 h产生第一极体, 63 h发育到“D”形幼体, 15~20 d当壳长达到220 μm时, 足形成, 进入附着期, 逐渐生长出次生壳变态为稚贝。壳长达3 mm时生长出放射肋, 壳长达6~10 mm时失去足丝, 附着生活结束。
P21	虾夷扇贝为冷水性贝类, 一般的海水环境都比较适合虾夷扇贝生存和繁殖。
P22	虾夷扇贝的主要扩散途径是在自然水域养殖过程中发生的养殖逃逸和人为遗弃, 由于虾夷扇贝行动能力较弱, 因此一般不会造成生物入侵。
P23	虾夷扇贝在养殖管理不当时可能会与本地土著种竞争生活空间及饵料资源等, 挤占本土物种的生态位, 或是与本地土著种杂交造成基因污染, 影响土著种的种质。
P24	当养殖密度过高时, 虾夷扇贝种群会通过大量摄食的方式改变水体中浮游动物和浮游植物的种类组成和数量, 进而影响水域的非生物环境。
P31	虾夷扇贝是多种贝类病害的宿主或携带者之一, 例如弧菌属、气单胞菌属的一些种类、类立克次体, 和一些未详细命名的病毒, 上述病原还可能造成混合感染, 危害多种双壳贝类。
P32	双方国家相关渔医管理机构对虾夷扇贝相关病害均极为重视。
P33	《中华人民共和国进境动物检疫疫病名录》、世界动物卫生组织(WOAH)《水生动物卫生法典》、《水生动物疾病诊断手册》等相关资料及国家政策性文件均可以作为抵御虾夷扇贝引种与养殖相关风险的有效支撑。
P34	日本国民的饮食以海鲜为主, 水产养殖业十分发达, 对于虾夷扇贝相关疫病的检测, 其国家渔医检测实验室的综合能力得到中方的高度认可。
P35	日方对于贝类相关动物产品的防疫、消毒及无害化处理等工作有着较为丰富的经验, 但介于本次模拟风险评估属于大规模引进, 因此, 依然有可能存在未知的风险导致虾夷扇贝引进过程出现不可控因素。
P36	日方对特定疫病区域化(生物安全隔离区)均有着十分严密的管理措施, 同时各相关单位会层层把关保证良好的实施情况。
P37	对于虾夷扇贝可能存在的疫病与相关媒介生物, 双方国家均有十分有效可靠的监测计划, 具有可操作性和安全性, 但介于本次模拟风险评估属于大规模引进, 因此, 虽然监测计划有效可靠, 但其风险依然不可忽略。
P38	双方国家口岸均有相当严密的检验检疫措施, 海关等部门会保证相关措施的执行情况。
P41	虾夷扇贝可能携带的病原体包含弧菌属、气单胞菌属的一些种类、类立克次体, 和一些未详细命名的病毒, 多数是致病性较强, 死亡率较高的病原体, 还有一小部分因尚无记载故其毒力未知。
P42	上述病原生物多为一些传播能力强、传播途径复杂、扩散范围较广的病原体, 且部分细菌类型的病原还可能感染鱼类和甲壳类动物。
P43	虾夷扇贝从幼体到成体均可受到感染, 且幼体死亡率明显高于成体。
P44	多数病害发病迅速且病程较短, 一旦发病则会出现大规模的死亡, 扇贝会完全失去其商品价值。
P51	虾夷扇贝营养丰富、肉质鲜美, 是人们餐桌上的美味佳肴, 虽然虾夷扇贝相关疫病不会侵染人类, 但若烹饪时没有清理干净, 其随身携带的一些微生物可能会对人类健康有潜在的负面影响。
P52	2023年5月, 我国农业农村部印发《关于公布第一批国家水产育种联合攻关计划的通知》, 选取虾夷扇贝等7个重要养殖品种为攻关对象, 在养殖过程中, 若相关病害暴发导致虾夷扇贝大规模死亡, 则其对社会经济的负面影响将不可估量, 产生的经济损失将十分巨大。
P53	可感染虾夷扇贝的病原体通常可以感染多种双壳贝类, 因此, 在养殖过程中, 必须对相关病害进行严格管控, 若相关病害暴发, 将会对引入地水产养殖业造成沉重打击。
P54	除疫病暴发对引入地其他贝类的负面影响外, 虾夷扇贝可能通过竞争的方式抢占其他土著种的生态位, 或是大量占据饵料资源、生活空间等, 破坏引入地的生态环境。
P61	我国海关会对外来引入的虾夷扇贝进行实时监测, 确保外来虾夷扇贝不会造成生物入侵。
P62	虾夷扇贝为我国沿海地区重要经济贝类, 主要用于大规模养殖和相关食品的加工, 相关部门在保证各贝类养殖场达到我国生物安全要求的同时, 还保证市场上流通的虾夷扇贝相关商品达到我国食品安全要求。
P63	对于虾夷扇贝相关病原体, 我国海关检疫部门有着较为有效且可靠的检疫手段与诊断方法, 确保可以及时发现携带病原的入境虾夷扇贝。
P64	目前, 对于虾夷扇贝的多种相关疾病, 可以采取综合防治的手段进行控制, 但尚无可供大规模使用的疫苗。
P65	入境水生动物将全部标识、消毒并进行严密监测, 且引进相关数据全程可追溯, 相关病害待检测结果均显示阴性后方可放行。
P66	目前, 对于池塘养殖, 只能通过清塘并对全塘进行消毒的方法消除虾夷扇贝相关病原对环境的影响, 而对于自然海域养殖, 尚无切实可行的有效方法对海洋环境进行修复。

表 7 3 个物种的二级指标评分结果

Tab. 7 Scores of each secondary index for the three species

二级指标 secondary index	鳄雀鳝 <i>A. spatula</i>	锦绣龙虾 <i>P. ornatus</i>	虾夷扇贝 <i>M. yessoensis</i>
P11	4	3	2
P12	5	2	3
P13	5	1	2
P14	5	1	2
P21	5	2	4
P22	5	1	3
P23	5	1	3
P24	4	1	3
P31	3	2	3
P32	1	1	1
P33	1	1	1
P34	2	3	2
P35	2	3	3
P36	1	1	1
P37	3	1	2
P38	1	1	1
P41	4	3	4
P42	4	4	4
P43	5	2	3
P44	4	5	4
P51	5	1	2
P52	3	4	5
P53	3	2	4
P54	5	2	3
P61	4	2	3
P62	3	1	2
P63	3	1	2
P64	4	3	3
P65	3	2	3
P66	5	1	3

表 8 3 个物种的风险评估结果

Tab. 8 Risk assessment results for three species

项目 item	鳄雀鳝 <i>A. spatula</i>	锦绣龙虾 <i>P. ornatus</i>	虾夷扇贝 <i>M. yessoensis</i>
R	3.948 6	1.868 8	2.908 1
风险等级 risk grade	高风险 high risk	低风险 low risk	中风险 medium risk

做到对症下药, 更为直观。其存在的不足主要有以下两点: ①本评估体系主要的评估对象为经济类外来水产动物 (例如养殖鱼虾、观赏鱼等), 对于水生植物和一些其他引种目的 (例如医疗、生态环境改善与修复等) 的水生动物, 本评估体系与它们之间的适配度不高; ②本评估体系对于传带疫情疫病风险的评估重点为外来物种可能携带的病原生物, 不太适用于评估其他可能传入的有害生物 (例如可能会随引入种一同潜入的有害植物、昆虫或其他水生动物等)。这些问题会在评估体系的进一步开发中加以解决。

外来物种的引进与养殖通常以农牧渔业经济发展为主要目的, 但也要考虑许多其他因素, 例如食品安全、经济成本、政治因素等, 这些因素的重要程度与经济发展同等重要^[27-28]。而且, 外来物种与生态环境间的关系不能被单纯定义为有益或是有害, 即使是一些外来的入侵物种, 它们同土著种或是非生物环境之间的关系也一定是一种积极与消极同时存在的相互作用关系^[28]。由于各外来物种的种类、商业用途、物种自身与传带病原的传播途径等存在巨大差异, 这导致它们与生态环境、社会经济、政策法规、风土人情等因素的关系, 也是错综复杂的。风险评估作为一个可以客观评价外来物种的工具, 其价值与意义在于为外来物种的管理提供建议与决策: 为区域内已经存在的外来物种提供科学的养殖或管理方案, 对可能造成负面影响 (如外来物种入侵或未知疫病暴发) 的外来物种的种群情况进行预测并提供监测建议, 为即将引入的外来物种提供有参考价值的引进策略, 同时为各种外来物种管理方案的可行性和有效性进行判断和预测^[7, 29-30]。

4 结论

在世界经济飞速发展的今天, 外来物种入侵仍是农林牧渔业发展的一大障碍。风险评估作为外来物种风险管理的根基, 同时也是众多国家防控外来入侵物种政策法规的重要依据, 在控制外

化为直观的、以数字形式呈现的评估结果; ③本评估体系通过补充论述的方法, 解决了部分复杂指标难以通过简单打分还原风险状况的问题, 这些论述内容在保证打分结果准确性的同时也可成为外来物种引进策略和管理措施的重要基础; ④相比于其他风险评估体系, 本体系更加适用于经济类水产动物, 而且模型体系中涉及的指标更能反映在实际引进与养殖过程中可能会暴露出的问题。因此, 在制订引种策略与管理措施时可以

来物种入侵的领域中发挥着无法被替代的巨大作用。本研究将外来水产动物引进与养殖风险评估体系同操作简单、可信度高的多目标综合评价方法, 即层次分析法相结合, 所得评估结果可以为我国外来物种的科学引进、健康养殖提供坚实的理论基础和可行的管理建议。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 操建华, 桑霏儿. 水产养殖业绿色发展理论、模式及评价方法思考 [J]. 生态经济, 2020, 36(8): 101-106, 153. Cao J H, Sang F E. Thinking on theory, model and evaluation method of aquaculture green development[J]. Ecological Economy, 2020, 36(8): 101-106, 153 (in Chinese).
- [2] Turbelin A J, Cuthbert R N, Essl F, *et al.* Biological invasions are as costly as natural hazards[J]. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2023, 21(2): 143-150.
- [3] Richardson D M, Pyšek P, Carlton J T. A compendium of essential concepts and terminology in invasion ecology[M]//Richardson D M. Fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011: 409-418.
- [4] Pyšek P, Hulme P E, Simberloff D, *et al.* Scientists' warning on invasive alien species[J]. *Biological Reviews*, 2020, 95(6): 1511-1534.
- [5] 陆琴燕, 刘永, 李纯厚, 等. 海洋外来物种入侵对南海生态系统的影响及防控对策 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2186-2193. Lu Q Y, Liu Y, Li C H, *et al.* Impacts of alien species invasion on the South China Sea ecosystem and related control strategies[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2186-2193 (in Chinese).
- [6] Cuthbert R N, Pattison Z, Taylor N G, *et al.* Global economic costs of aquatic invasive alien species[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145238.
- [7] 徐海根, 强胜, 韩正敏, 等. 中国外来入侵物种的分布与传入路径分析 [J]. 生物多样性, 2004, 12(6): 626-638. Xu H G, Qiang S, Han Z M, *et al.* The distribution and introduction pathway of alien invasive species in China[J]. *Biodiversity Science*, 2004, 12(6): 626-638 (in Chinese).
- [8] Robertson P A, Mill A C, Adriaens T, *et al.* Risk management assessment improves the cost-effectiveness of invasive species prioritisation[J]. *Biology*, 2021, 10(12): 1320.
- [9] Vanderhoeven S, Branquart E, Casaer J, *et al.* Beyond protocols: improving the reliability of expert-based risk analysis underpinning invasive species policies[J]. *Biological Invasions*, 2017, 19(9): 2507-2517.
- [10] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100. Deng X, Li J M, Zeng H J, *et al.* Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100 (in Chinese).
- [11] Ho W, Ma X. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267(2): 399-414.
- [12] Veisi H, Deihimfard R, Shahmohammadi A, *et al.* Application of the analytic hierarchy process (AHP) in a multi-criteria selection of agricultural irrigation systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 267: 107619.
- [13] 于小涵, 孙金辉, 徐海龙. 层次分析法在我国海洋生态系统中的应用进展 [J]. 天津农学院学报, 2023, 30(1): 80-83. Yu X H, Sun J H, Xu H L. Application progress of analytic hierarchy process in marine ecological assessment[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2023, 30(1): 80-83 (in Chinese).
- [14] Aydin M C, Birincioğlu E S. Flood risk analysis using gis-based analytical hierarchy process: a case study of Bitlis Province[J]. *Applied Water Science*, 2022, 12(6): 122.
- [15] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153. Guo J Y, Zhang Z B, Sun Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(5): 148-153 (in Chinese).
- [16] Mendoza R, Luna S, Aguilera C. Risk assessment of the ornamental fish trade in Mexico: analysis of freshwater species and effectiveness of the FISK (Fish Invasiveness Screening Kit)[J]. *Biological Invasions*, 2015, 17(12): 3491-3502.
- [17] Puntilla R, Vilizzi L, Lehtiniemi M, *et al.* First application of FISK, the freshwater fish invasiveness screening kit, in northern Europe: example of southern Finland[J]. *Risk Analysis*, 2013, 33(8): 1397-1403.
- [18] 吴文广, 张继红, 魏龔伟, 等. 莱州湾泥螺生态安全风险评估——基于 AHP 的 YAAHP 软件实现 [J]. 水产中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- 学报, 2014, 38(9): 1601-1610.
- Wu W G, Zhang J H, Wei Y W, *et al.* The ecological risk assessment of *Bullacta exarata* in Laizhou Bay: the YAAHP software implementation based on AHP[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1601-1610 (in Chinese).
- [19] 刘泽天, 张馨, 黄晓红, 等. 石斑鱼虹彩病毒病发生风险评估模型的建立和验证 [J]. 水产学报, 2022, 46(1): 85-94.
- Liu Z T, Zhang X, Huang X H, *et al.* Mechanism of oligochitosan improving non-specific immunity of *Epinephelus fuscoguttatus* (♀)×*E. lanceolatu* (♂)[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(1): 85-94 (in Chinese).
- [20] 林强, 李宁求, 付小哲, 等. 基于层次分析法的牡蛎养殖过程中副溶血弧菌风险评估模型建立和初步应用 [J]. 海洋湖沼通报, 2017(2): 116-122.
- Lin Q, Li N Q, Fu X Z, *et al.* Establishment and application of risk assessment model of *Vibrio parahaemolyticus* in oyster culture course through Analytic Hierarchy Processing[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017(2): 116-122 (in Chinese).
- [21] McGeoch M, Jetz W. Measure and reduce the harm caused by biological invasions[J]. *One Earth*, 2019, 1(2): 171-174.
- [22] 王亚民, 曹文宣. 中国水生外来入侵物种对策研究 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 7-13.
- Wang Y M, Cao W X. The strategies of aquatic invasive alien species (IAS) in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 7-13 (in Chinese).
- [23] 李亮, 浦华. 经济评估在动物卫生风险分析的应用与启示 [J]. 世界农业, 2011(3): 19-22.
- Li L, Pu H. The application and enlightenment of economic assessment in animal health risk analysis[J]. World Agriculture, 2011(3): 19-22 (in Chinese).
- [24] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1): 83-98.
- [25] 丁晖, 石碧清, 徐海根. 外来物种风险评估指标体系和评估方法 [J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 92-96.
- Ding H, Shi B Q, Xu H G. Index system and methodology for risk assessment of alien species[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(2): 92-96 (in Chinese).
- [26] 马英, 熊何健, 林源洪, 等. 外来海洋物种入侵风险评估体系的构建 [J]. 水产学报, 2009, 33(4): 617-623.
- Ma Y, Xiong H J, Lin Y H, *et al.* Construction of invasive risk assessment system for alien marine species[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(4): 617-623 (in Chinese).
- [27] Singh A K, Lakra W S. Risk and benefit assessment of alien fish species of the aquaculture and aquarium trade into India[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2011, 3(1): 3-18.
- [28] Ricciardi A, Kipp R. Predicting the number of ecologically harmful exotic species in an aquatic system[J]. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(2): 374-380.
- [29] 王以斌, 石红旗, 刘芳明, 等. 外来海洋物种入侵风险评估模式 [J]. 自然杂志, 2014, 36(2): 133-138.
- Wang Y B, Shi H Q, Liu F M, *et al.* An invasive risk assessment model of alien marine species[J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(2): 133-138 (in Chinese).
- [30] Perrin S W, Bærum K M, Helland I P, *et al.* Forecasting the future establishment of invasive alien freshwater fish species[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(11): 2404-2414.

Construction and application of risk assessment system for the introduction of exotic aquatic animals

ZHANG Xuxin^{1,2}, DU Hehe², CAO Zhenjie², WU Ying², ZHOU Yongcan², SUN Yun^{1,2*}

(1. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya 572022, China;

2. Collaborative Innovation Center of Marine Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The aquatic ecosystem is an important part of the earth's environment, and a healthy aquatic ecological environment is an important prerequisite for aquatic ecosystems to provide services and perform their functions, as well as a solid guarantee for the healthy development of modern aquaculture. However, in recent decades, biological invasions of exotic aquatic animals are considered to be a major driving factor in the vanishing of biodiversity in many aquatic ecosystems in China. Some exotic aquatic species have even caused irreversible damage

to some of China's aquatic ecosystems, with far-reaching hazards and adverse effects. In the past two decades, with the development in ecology, environmental science and other related disciplines, Chinese researchers have conducted increasingly in-depth research on invasive alien species (IAS). Through extensive analysis of the biological characteristics of invasive alien species and their invasion process and mode, it is found that apart from a few exceptions, biological invasion around the world are almost all caused by the active and passive diffusion of alien species caused by human activities. Among the many factors of alien species diffusion, the introduction and artificial breeding of alien species with economic and trade as the core purpose is one of the important factors, which includes not only the biological invasion caused by alien species themselves, but also the impact of pathogenic organisms carried by alien species on local species, ecological environment, the enormous threat posed to human health and other factors. Internationally, many countries regard the risk assessment of invasive alien species as an important measure for solving the problem of biological invasion. Conducting risk assessments of invasive alien species and formulating more scientific introduction policies and programs on the basis of the assessment results can effectively reduce the obstacles to aquaculture development and economic losses caused by biological invasions and other issues. However, the risk assessment methods currently adopted by most countries in the world are qualitative or semi-quantitative, and with regard to the accuracy of results, there is a significant gap between qualitative and quantitative assessments. Moreover, due to the large differences between terrestrial ecosystems and aquatic ecosystems, there are differences between terrestrial animals and aquatic animal in the process and mechanism of biological invasions. Most risk assessment systems are developed for terrestrial animals, and the adaptability between these risk assessment systems for terrestrial animals and aquatic animal is low, while the existing research and development of aquatic animal assessment systems are still relatively rudimentary. To further refine the research in related fields, this study took exotic aquatic animals as the main research object, analyzed the possible ecological risks and invasion mechanisms of common exotic aquatic animals, and used analytical hierarchy process (AHP) to construct a risk assessment system for the introduction of exotic aquatic animals. This risk assessment system consists of six primary indices (exotic species characterization, ecological risk assessment, pathogen entrance, pathogen exposure, hazard and impact, and exotic species risk prevention and control) and thirty-two secondary indices. Then, it was used to conduct quantitative risk assessments on three typical exotic aquatic animals in China. The assessment results show that the risk value (R) of *Atractosteus spatula* was 3.948 6 and the risk grade was high, strict introduction strategies and risk prevention measures needed to be formulated, and standardized introduction should be carried out in close communication with relevant departments such as customs. The R of *Mizuhopecten yessoensis* was 2.908 1, which means the risk grade was medium and it needed to be introduced with restrictions under strict management by customs and relevant departments. The R of *Panulirus ornatus* was 1.868 8 and its risk grade was low, indicating that it could be introduced if allowed by national policies. The assessment results were highly consistent with the information provided by relevant units such as the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, the Ministry of Ecology and Environment, and the General Administration of Customs in China, proving that this risk assessment system has important application value in the risk assessment of the exotic aquatic animals' introduction. Concurrently, quantitative risk assessment of exotic aquatic animals through the risk assessment system can provide theoretical support for scientific introduction and healthy farming effectively and accurately, and provide decision-making basis for risk management of exotic species.

Key words: exotic aquatic animals; biological invasion; risk assessment system; analytic hierarchy process; risk management

Corresponding author: SUN Yun. E-mail: ysun@hainanu.edu.cn

Funding projects: Hainan Province Science and Technology Special Fund (ZDKJ2021016); Hainan University Collaborative Innovation Center of Marine Science and Technology Scientific Research Project (XTCX2022HYB03)