

## 莱州湾泥螺生态安全风险评估—— 基于 AHP 的 YAAHP 软件实现

吴文广, 张继红\*, 魏冀伟, 方建光

(中国水产科学研究院黄海水产研究所,农业部海洋渔业可持续发展重点实验室,山东 青岛 266071)

**摘要:**以莱州湾西岸外来物种泥螺为例,运用 YAAHP 软件,采用层次分析法(AHP)对其生态安全风险进行了评估。以泥螺完整的生物入侵过程为依据,针对各阶段的关键特性,综合考虑外来物种的生物学、生活史特征、人为干扰影响因素、入侵地的生态系统状况等方面来选取评估指标,设计 6 个一级指标,30 个二级指标,设定了“可以引种”、“引种具有一定风险”和“禁止引种”3 个风险分级标准,构建了风险评价指标框架。通过对历史文献资料的分析、专家评分以及必要的调查实验等方法,对风险评估层次结构模型各项指标进行权重赋值。软件分析的结果显示,“具有一定风险”的权重值最高,为 0.507 6,其次为“可以引种”,权重值为 0.352 2,而“禁止引种”的权重值仅为 0.140 2,因此,得出的最终方案为引种具有一定的风险。本研究对占权重值较高的传入风险、定殖风险和扩散风险 3 项指标进行了灵敏度分析,结果表明,3 种指标的权重只影响评估结果的“具有一定风险”和“可以引种”的排列顺序,而不会影响“禁止引种”。因此建议,切勿盲目扩大泥螺的养殖规模,引入之后必须加强监督和管理。

**关键词:**泥螺;生态安全;风险评估;层次分析法;莱州湾

**中图分类号:**X 954; S 944

**文献标志码:**A

海洋外来物种的入侵会严重干扰和破坏入侵海域特定的生态系统的功能、结构及生物多样性<sup>[1-3]</sup>,如大米草(*Spartina angelica*)、厦门沙筛贝(*Mytilopsis sallei*)的入侵对当地生态系统造成严重破坏<sup>[4-5]</sup>。国内外多位学者分别从传播渠道、生态安全、社会经济影响等方面对陆地上的入侵生物进行了深入的研究<sup>[6-9]</sup>。而对海洋生物的入侵研究较少,缺乏全面性和系统性,以至于不能客观准确地对海洋外来物种入侵风险进行评估<sup>[10]</sup>。外来物种的引入类型主要分为 3 种:人为有意引入、无意引入以及自然传入<sup>[11]</sup>。泥螺(*Bullacta exarata*)则是作为养殖品种被引入到莱州湾西岸的,属人为有意引入类型<sup>[12]</sup>。自 2001 年泥螺被引入以来,其分布范围逐年扩大,2008 年莱州湾泥螺分布区比 2003 年扩大近 2 倍,现已

成为莱州湾西岸多数潮间带生物优势种<sup>[12-13]</sup>。目前来看,泥螺在莱州湾海域大面积底播增殖,短期内尚未对该海域生态安全造成危害,但长期而言是否对本地的生态和经济造成正面或负面影响,现在还难以定论。故要结合国内外风险评估经验及方法对泥螺进行风险分析与评估。开展外来物种风险评估对我国的生物多样性保护具有重要的意义<sup>[11]</sup>。

外来物种风险评估(risk assessment)是指对外来物种传入过程中产生的不确定事件进行识别、评估和处理,以最小的成本将各种不利后果减少到最低程度的科学管理技术<sup>[14]</sup>,它是开展外来物种风险管理的基础,是防止外来物种入侵的最有效手段之一。构建完整而科学的评价指标体系是外来物种风险评估的关键。指标体系的构建应

收稿日期:2014-03-24 修回日期:2014-05-05

资助项目:国家自然科学基金(41276172);海洋外来物种生态安全评价方法研究(DOMEPEP(MEA)-01-01-D);国家贝类产业技术体系(CARS-48)

通信作者:张继红,E-mail:zhangjh@ysfri.ac.cn

考虑科学性、完整性、操作性、实用性的统一,充分体现外来物种入侵生态学原理,融合目前生物入侵研究的理论成果,同时保证对外来物种入侵过程各阶段的完整体现<sup>[15]</sup>。目前国内外学者对外来物种的风险评估方法进行了许多研究<sup>[16-20]</sup>,层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)是风险评估方法之一<sup>[21]</sup>。

层次分析法(AHP)是一种多层次权重分析的决策方法,其基本原理是把复杂问题中的各因素划分成相互关联的有序层次,使之条理化,根据一定客观的判断,对每一层次中每两元素相对重要性给出定量表示,计算出每一层次全部元素的权重并加以排序,最终根据得出的排序结果进行决策和选择解决问题的措施<sup>[22]</sup>。目前,层次分析法正越来越受到国内外学术界的重视,AHP十分适用于具有定性的,或定性定量兼有的决策分析。现在已广泛地应用于经济管理规划、能源开发利用、城市产业规划、科研管理以及交通运输等方面<sup>[23-25]</sup>。针对传统的AHP算法具有不易判断矩阵构造、计算过程繁琐易出错、一致性调整繁琐等不足,本研究运用基于AHP的YAAHP(yet another AHP)软件对莱州湾泥螺进行生态风险评估,以便正确决策,尽早采取有效控制和防治措施,这对保护莱州湾滩涂生态安全及生态平衡具有重要意义,同时也为AHP的推广应用和改进提供理论依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 区域概况

莱州湾是渤海3大海湾之一,位于渤海南部,山东半岛北部,西起黄河口,东至龙口的妃姆角,是山东省重要渔盐生产基地,其海岸线长319.06 km,面积6 966.93 km<sup>2</sup>。有黄河、小清河、潍河等注入。海底地形单调平缓,由于河流泥沙堆积,水深大部分在10 m以内,海湾西部最深处达18 m。平均潮差(龙口)0.9 m,最大潮差2.2 m。西段受黄河泥沙影响,潮滩宽6~7 km,东段仅0.5 km。莱州湾滩涂辽阔,海滩地饵料资源丰富,有机质含量较高,盛产蟹、蛤、毛虾及海盐等,是中国重要的渔获和海盐生产区。

### 1.2 评价指标筛选与指标体系构建

以完整的生物入侵过程为依据,针对各阶段的关键特性,综合考虑外来物种的生物学、生活史

特征、人为干扰影响因素、入侵地的生态系统状况等方面来选取评估指标,并参考相关风险评价文献<sup>[17-21]</sup>,设计6个一级指标,30个二级指标,从而构建起泥螺风险评估指标体系。

### 1.3 层次分析法

AHP法的特点是合理地把定性与定量的决策相结合,利用较少的定量信息,把决策的思维过程层次化、数学化,为求解多准则或无结构特性的复杂决策问题提供了一种简便的决策方法。AHP法大体可以分为4个步骤:(1)建立层次结构分析模型;(2)采用1~9标度法对评价指标进行两两比较,构造判断矩阵;(3)进行层次单排序和层次总排序及其一致性检验;(4)根据分析计算结果,考虑相应的决策。

### 1.4 YAAHP 7.0 软件

本研究利用YAAHP 7.0软件构建了莱州湾泥螺生态安全风险评估的模型,并进行了矩阵一致性检验以及数据分析。YAAHP 7.0软件基于层次分析法原理,提供方便的层次模型构造、判断矩阵数据录入、排序权重计算、计算数据导出及灵敏度分析等功能,灵活易用,节省了大量的矩阵计算步骤及时间。

**一致性检验** 为保证层次单排序及总排序的可信性,需要对判断矩阵进行一致性检验,所以要检查随机一致性比率(CR)<sup>[25]</sup>,当 $CR < 0.1$ 时,则认为判断矩阵的一致性可以接受。当 $CR \geq 0.1$ 时,应对判断矩阵作适当修正。由于人的主观性以及客观事物的复杂性,在实际决策问题中,一次就构造出满足一致性要求的判断矩阵很难实现,经常需要对判断矩阵进行多次调整修正才能达到一致性要求。

YAAHP提供的实时一致性比例计算功能能够帮助用户对不一致判断矩阵进行人工调整。但人工调整判断矩阵的过程有一定的盲目性,需要凭借经验和技巧来完成,针对这种情况,YAAHP提供了不一致判断矩阵自动修正功能。该功能考虑人们决策时的心理因素,在最大程度保留专家决策数据的前提下,修正判断矩阵使之满足一致性比例。标记需要修正的判断矩阵,整个修正过程自动完成。

**灵敏度分析** 通过灵敏度分析,能够确定某个要素权重发生变化时,对各个备选方案权重产生了什么样的影响,从而引导用户在更高的层

次作出决策。利用 YAAHP 提供的灵敏度分析功能,能够动态地观察要素权重变化对备选方案权重的影响,还可以查看某个要素权重从 0 到 1 变化时备选方案权重的变化曲线。

### 1.5 数据来源

层次分析法的一个重要特征是用两两重要性程度之比的形式表示出两个评价指标的相对重要性等级。评价指标的权重决定了各个指标对风险评价目标的贡献大小<sup>[26]</sup>,本研究结合已有的文献<sup>[27-29]</sup>、现场调查数据及室内实验结果<sup>[12-13,30]</sup>,邀请海洋生态及风险评估方面的专家(主要来自政府机关、科研院所以及涉海企业),采用 1~9 及其倒数的标度方法(表 1)进行每两指标间的相对比较,对判断矩阵各项指标进行权重赋值<sup>[31-32]</sup>,最终经过 YAAHP 软件计算得出结果。

表 1 1~9 标度法及其含义  
Tab.1 1-9 sign method and meaning

1~9 标度 1-9 sign	重要程度 importance degree	说明 description
1	同等重要	对目标贡献相同
3	略为重要	重要
5	基本重要	确认重要
7	确实重要	程度明显
9	绝对重要	程度非常明显
2,4,6,8		表示重要程度介于以上 5 个得分两两之间
倒数	相反于重要程度	表示因子与比较得出判断标度的倒数

## 2 结果与分析

### 2.1 层次结构模型的构建

应用 AHP 解决实际问题,首先明确要分析决策的问题,并把它条理化,层次化,建立递进层次结构模型。AHP 要求的递阶层次结构一般由目标层、准则层和方案层 3 个层次组成。

目标层(最高层):泥螺生态安全评价为目标层,即决策问题的预定目标。

准则层(中间层):指影响目标实现的准则,这一层能允许有多个子层,每个子层可以有多个元素。外来物种的传入扩散过程的分段目前尚未统一。综合已有的资料,将泥螺入侵过程划分为传入、定殖、物种分布及密度、扩散、危害及防控管

理 6 个阶段。

(1) 传入阶段:引入途径包括人为有意引入、人为无意引入、物种传入次数及数量、引入途径的管理,例如相关法规控制情况、检疫措施等。

(2) 定殖阶段:包括对入侵地生态环境的适应、与土著种等之间的竞争。从 2 个方面考虑风险指标的选取:一是物种的适生性,主要考虑环境因素,如底质、水质环境(温度、盐度)、食物资源(丰度、质量)、生长限制因素等;二是物种自身的生物学特性及生活史特征,包括繁殖特征,如繁殖方式、繁殖频率,生长速度等。

(3) 物种分布及密度:在莱州湾西岸,尤其是黄河口地区,高密度的泥螺种群已经在当地造成了一定的影响,设置反映当前的分布及丰度状况的指标组,用以对物种的分布现状进行评价,包括分布范围、密度、分布区的状况。

(4) 扩散阶段:成功的扩散有赖于物种的生物学特性、迁移和扩散的方式和能力、以及入侵地的外部环境、制约机制的影响和作用等。扩散阶段评估指标的选取包括物种的迁移、扩散方式、扩散机制以及人为监测及自然控制机制等方面。

(5) 危害影响阶段:在莱州湾引入泥螺,可能对当地生态环境、经济、人类健康等造成一定的影响。因此,指标选取应包括对生态过程的影响、对生态系统因子的影响、对生长限制因素的竞争、与土著种产生竞争、对经济的影响以及对人类健康的影响。

(6) 防控阶段:对外来物种的防控包含预防及控制 2 个方面,且预防应是第一考虑要素。因此在此阶段选取的指标应包括防除措施、防治的代价及周期以及影响防除的其他未知因素等。

方案层(最底层):指促使目标实现的措施。参考国内外现行的外来物种分级管理策略,借鉴相关文献的等级划分方法,方案层设定为“可以引种”、“引种具有一定风险”和“禁止引种”3 个风险分级标准。综合以上分析,依据科学性、系统性、重要性、相对独立性、实用性、可操作性、灵活性原则,构建出泥螺风险评估递阶层次结构模型,包括 6 个一级指标(准则层 B),30 个二级指标(准则层 C)(图 1)。

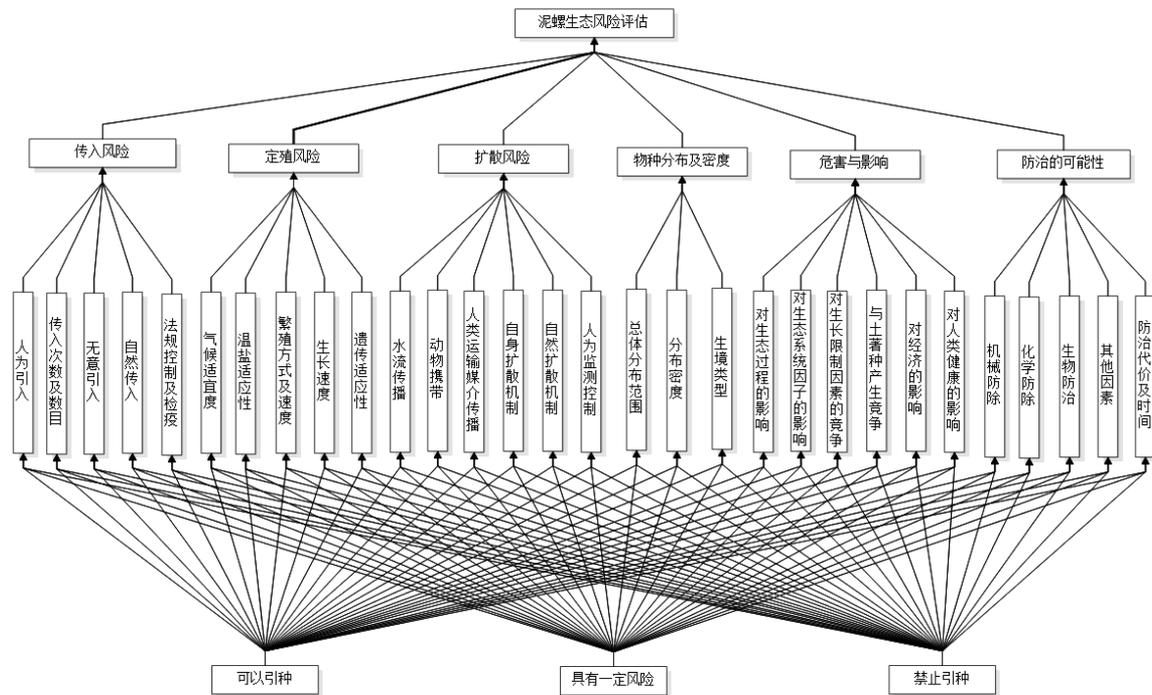


图1 泥螺风险评估层次结构模型

Fig. 1 Analytical hierarchy process model of risk assessment for *B. exarata*

## 2.2 判断矩阵的录入及结果导出

采用1~9标度方法(表1)进行每两元素间的相对比较,通过编制专家调查表对各指标进行赋值,获得各指标权重值。由于层次结构评价决策指标较复杂,需要录入的判断矩阵较多(判断矩阵共计37个),本研究只列举了主要的、具有代表性的录入矩阵截图(图2)、判断矩阵的结果导出表格(表2)以及30个二级指标的权重(表3),其他截图及判断矩阵结果导出表格省略。传入风险、定殖风险和扩散风险3项指标权重较高,占主要地位(表2);而泥螺生态风险评估最终结果显示,3种备选方案的权重排序为,引种具有一定风险>可以引种>禁止引种(表4)。

## 2.3 灵敏度分析

通过灵敏度分析,能够确定某个要素权重发生变化时,对各个备选方案权重产生的影响,从而引导用户在更高的层次作出决策。表2可见,传入风险、定殖风险以及扩散风险权重值较高,占主要地位,故只对这3个指标进行灵敏度分析。图3、4、5为软件中灵敏度分析的截图,图中横轴表示选中要素的权重,纵轴表示备选方案对选定决策目标的权重。可见,风险评估的结果都是“具有一定风险”和“可以引种”之间出现交点,与“禁

止引种”无交点,表明,该3个指标权重值的改变,只对评估结果的“具有一定风险”、“可以引种”产生影响。传入风险的权重在0.1400时,“具有一定风险”和“可以引种”出现交叉点,也就是当指标传入风险的权重小于0.1400时,风险评估的结果为“可以引种”,而传入风险的权重大于0.1400时,风险评估的结果为“具有一定风

图2 YAAHP软件中目标层—  
准则层判断矩阵录入Fig. 2 The entry of target layer-criterion  
layer judgment matrix in YAAHP software

表 2 泥螺生态风险评估判断矩阵  
Tab. 2 The judgment matrix of risk assessment for *B. exarata*

生态风险评估 risk assessment	扩散风险 spread risk	物种分布及密度 distribution and density	危害与影响 harm and influence	防治的可能性 the potential prevention	定殖风险 colonization risk	传入风险 introduction risk	权重 weight
扩散风险 risk assessment	1.000 0	2.000 0	5.000 0	3.000 0	0.333 3	0.200 0	0.123 2
物种分布及密度 distribution and density	0.500 0	1.000 0	4.000 0	2.000 0	0.250 0	0.166 7	0.081 4
危害与影响 harm and influence	0.200 0	0.250 0	1.000 0	0.333 3	0.142 9	0.111 1	0.027 8
防治的可能性 the potential prevention	0.333 3	0.500 0	3.000 0	1.000 0	0.200 0	0.142 9	0.054 1
定殖风险 colonization risk	3.000 0	4.000 0	7.000 0	5.000 0	1.000 0	0.333 3	0.250 1
传入风险 introduction risk	5.000 0	6.000 0	9.000 0	7.000 0	3.000 0	1.000 0	0.463 4

注:一致性比例(CR):0.042 0;对"泥螺生态风险评估"的权重( $W_i$ ):1.000 0;最大特征值( $\lambda_{\max}$ ):6.264 5

Notes: consistency ratio (CR): 0.042 0; the weight of risk assessment for *B. exarata* ( $W_i$ ): 1.000 0; eigenvalue of maximum ( $\lambda_{\max}$ ): 6.264 5

表 3 YAAHP 软件中 30 个二级指标的权重  
Tab. 3 The weight of 30 secondary indexes in YAAHP software

编号 number	二级指标 secondary index	权重 weight	编号 number	二级指标 secondary index	权重 weight
1	人为引入 artificial introduction	0.465 4	16	人为监测控制 artificial monitoring	0.150 9
2	传入次数及数目 times and number	0.345 5	17	总体分布范围 distribution range	0.649 1
3	无意引入 unconscious introduction	0.106 0	18	分布密度 distribution density	0.279 0
4	自然传入 natural introduction	0.049 4	19	生境类型 habitat type	0.071 9
5	法规控制及检疫 legal control	0.033 7	20	对生态过程的影响 influence on ecological process	0.061 7
6	气候适宜度 climate suitability	0.469 0	21	对生态系统因子的影响 influence on ecosystem factor	0.061 7
7	温盐适应性 thermohaline adaptability	0.204 8	22	对生长限制因素的竞争 competition for limiting factors	0.107 5
8	繁殖方式及速度 breeding method and speed	0.204 8	23	与土著种产生竞争 biological competition	0.171 0
9	生长速度 growth rate	0.065 8	24	对经济的影响 influence on economy	0.536 4
10	遗传适应性 genetic adaptability	0.055 6	25	对人类健康的影响 influence on human health	0.061 7
11	水流传播 current spread	0.150 9	26	机械防除 mechanical control	0.322 8
12	动物携带 animal vector	0.030 0	27	化学防除 chemical control	0.114 3
13	人类运输媒介传播 human transport	0.514 8	28	生物防治 biological control	0.052 3
14	自身扩散机制 itself spread	0.060 1	29	其他因素 other factors	0.187 8
15	自然控制机制 natural control	0.093 2	30	防治代价及时间 cost of prevention	0.322 8

表 4 泥螺生态风险评估最终结果

Tab. 4 The final result of risk assessment for *B. exarata* in Laizhou Bay

备选方案 alternative scheme	权重 weight
具有一定风险 a certain risk	0.507 6
禁止引种 forbidden introduction	0.140 2
可以引种 allowed introduction	0.352 2

险”;但是,与“禁止引种”没有交点,也就是传入风险的权重值的改变,不会影响“禁止引种”结果(图 3)。定殖风险的权重在 0.530 0 时,“具有一定风险”和“可以引种”出现交点(图 4),扩散风险的权重值为 0.420 0 时,出现交点。

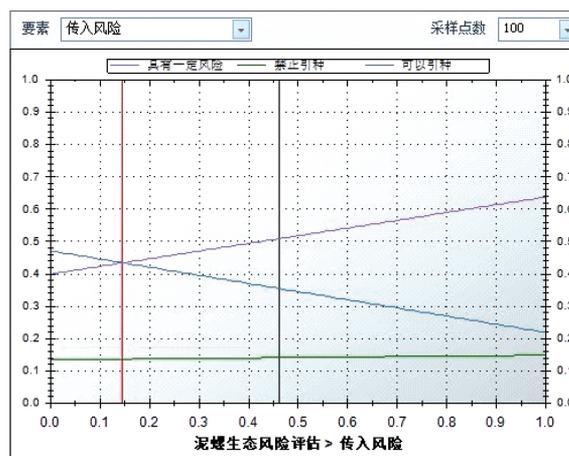


图 3 传入风险的灵敏度分析结果  
Fig. 3 The sensitivity analysis result of introduction risk assessment

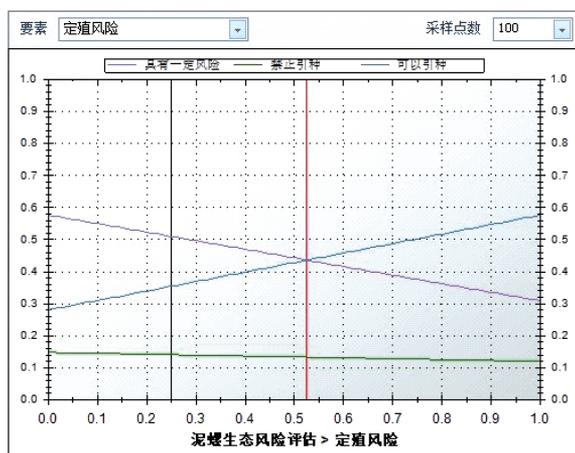


图4 定殖风险的灵敏度分析结果

Fig. 4 The sensitivity analysis result of colonization risk assessment

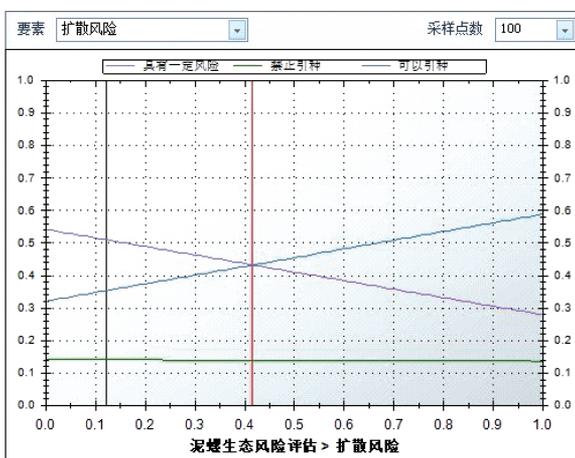


图5 扩散风险的灵敏度分析结果

Fig. 5 The sensitivity analysis result of spread risk assessment

### 3 讨论

#### 3.1 YAAHP 软件的分析结果

方案层“具有一定风险”的权重明显大于另外2个方案的权重,最终方案为“具有一定的风险”(表4)。之所以出现该结果,主要是因为一级指标传入风险(0.463 4)、定殖风险(0.250 1)以及扩散风险(0.123 2)的权重值较高(表2),在6个一级指标中占有较大比例。在传入风险方面,泥螺作为滩涂养殖贝类,人为引入的可能性大,投苗不受限制,会对当地生态安全造成一定威胁,具有一定风险,引种需谨慎;在定殖风险方面,其二级指标中气候适宜度权重较高(0.469 0,表3),

在其二级指标中占重要地位,其原因是莱州湾的气候、海水温盐度以及滩涂环境都较适宜泥螺的养殖,且泥螺在莱州湾潮间带能较好地生长及繁殖;在扩散风险方面,任何物种在生态或演化上的成功最终取决于其扩散的能力<sup>[33]</sup>,因此扩散对于外来物种的扩张极其重要。对于海洋外来物种而言,它们主要通过水体扩散,这类似于入侵植物借助水的被动扩散。许多水生生物具有浮游幼体期,它们随水流漂流,其个体扩散的距离随水流的差异而不同<sup>[34]</sup>,泥螺的生活史有卵袋、面盘幼虫等阶段<sup>[28]</sup>,可以借助水流进行长距离扩散<sup>[12]</sup>,从而增加了一级指标扩散风险的权重。

物种分布及密度、危害与影响和防治的可能性这3个一级指标的权重所占比例较小(表2),说明这3个指标在1~9标度方法赋值过程中的相对重要程度较低,从而导致对评价目标的贡献率降低。在物种分布及密度方面,泥螺在莱州湾西部大部分潮间带均有分布,密度最高可达256个/m<sup>2</sup>,生物量达230 g/m<sup>2</sup>,其最高密度通常出现在春夏两季。泥螺对底质的适应能力很强,从粘土(软泥)底质到粗粉砂(沙质)底质均可正常生活<sup>[13,29]</sup>,故莱州湾滩涂适宜泥螺的引种和养殖;在危害与影响方面,泥螺最初是作为一种经济贝类引入莱州湾的,是可供人类食用的主要软体动物之一。调查中也证实泥螺给当地养殖户带来一定的经济收益,且对人类健康无影响,所以适合引种;在防治的可能性方面,就防除的可能性而言,经调查,人为采捕及机械防除能有效控制、降低泥螺的种群密度,但不能彻底防除,因泥螺目前未发现有天敌存在<sup>[12,29]</sup>,故生物防治也不能有效防治泥螺,综合该项各个指标,泥螺引入具有一定的风险性。

#### 3.2 灵敏度分析

显然,泥螺的生态风险会随时间和空间的变化而变化。通过对其生态风险的灵敏度分析,可以动态地掌握泥螺的生态风险状况。运用YAAHP软件进行灵敏度分析时,风险评估指标的权重值越大,说明该指标的变化对风险评估的结果影响越大<sup>[35]</sup>,因此,在赋值时,尤其需要关注和谨慎。从图3、4、5可以看出,传入风险、定殖风险、扩散风险的权重只影响评估结果的“具有一定风险”和“可以引种”这2个结果排列顺序,而不会影响“禁止引种”这种结果。泥螺在莱州湾的引入,虽然短时间内未对当地生态环境造成明

显影响,但在抗逆力、传播与扩散、未发现天敌等几个方面已经显现出外来入侵种的特征,泥螺在莱州湾的养殖具有一定的风险性。因此切勿盲目扩大养殖规模,养殖过程中要严格控制,不能随意增加投放泥螺苗的数量,引入之后要按照预防为主的原则加强监督和管理。在发展滩面养殖时要严格控制,切忌盲目扩大滩面养殖规模,并采取隔离措施或设立缓冲区等防止泥螺的逃逸。

### 3.3 莱州湾泥螺生态风险评估

本研究以莱州湾外来物种泥螺为例,综合泥螺历史文献资料以及在莱州湾的入侵现状,借鉴已有风险评估文献资料,采用层次分析法,运用 YAAHP 软件对泥螺进行生态风险评估,建立了海洋外来物种生态风险评估模型。从评估结果看,通过该软件建立的风险评估方法,方便、结果可靠。外来物种风险评估的难点在于预测该物种在入侵地的定殖,扩散以及造成危害影响的可能性,并为外来物种的风险管理制定可降低风险的措施和方案<sup>[11]</sup>,层次分析法不能为决策者提供解决问题的新方案,只能根据权重排序从备选方案(方案层)中选择较优者,其评估结果带有较多的定性成分。目前,国际上还没有通用的海洋外来物种生态风险评估模型,大多是参照有害生物风险分析(pest risk analysis, PRA)模式来构建<sup>[18]</sup>。本研究所建立的生态风险评估方法,灵活易用,计算便捷,可以提高决策的效率。任何风险评估模型的应用都要经得起外来物种数量和种类的验证,但由于海洋外来物种的多样性、复杂性,且目前对于海洋外来物种的研究相对匮乏,故对不同种类的海洋外来物种进行生态风险评估时,需要根据其入侵特征对评价指标进行修正和增补,该评估方法还有待于在实践应用中进一步改进和完善。

## 4 结论

外来物种泥螺的引入对莱州湾有一定的生态风险,因此进行底播增殖时,不能盲目扩大规模,并且需要加强管理;YAAHP 软件进行层次分析是可行的,且操作简便,风险评估及灵敏度分析结果可信度较好,与现有的资料结果相一致。本研究可以为今后海洋外来物种的生态风险评估提供理论依据。

对参与评分问卷调查的专家、学者以及企业领导一并感谢!

### 参考文献:

- [1] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, *et al.* Human domination of the Earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494 - 499.
- [2] Wilcove D S, Rothstein D, Dubow J, *et al.* Quantifying threats to imperiled species in the United States [J]. *Biological Science*, 1998, 48(8): 607 - 615.
- [3] Cohen A N, Carlton J T. Accelerating invasion rate in a highly invaded estuary [J]. *Science*, 1998, 279(5350): 555 - 558.
- [4] Wu M L, Fang Z L. Rice grass and outside living beings invading [J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2005(1): 56 - 59. [吴敏兰,方志亮. 大米草与外来生物入侵. *福建水产*, 2005(1): 56 - 59.]
- [5] Wang J J, Huang Z G, Zheng C X, *et al.* Population dynamics and structure of alien species *Mytilopsis sallei* in Fujian, China [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1999, 18(4): 372 - 377. [王建军, 黄宗国, 郑成兴, 等. 厦门和东山外来物种沙筛贝的种群动态和结构. *台湾海峡*, 1999, 18(4): 372 - 377.]
- [6] Lin W L. Study on the legal issues of marine exotic species invasion [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. [林婉玲. 海洋外来物种入侵法律问题研究. 厦门: 厦门大学, 2008.]
- [7] Cockrell M L, Sorte C J B. Predicting climate-induced changes in population dynamics of invasive species in a marine epibenthic community [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, 440: 42 - 48.
- [8] Chan K, Bendell L I. Potential effects of an invasive bivalve, *Nuttallia obscurata*, on select sediment attributes within the intertidal region of coastal British Columbia [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, 444: 66 - 72.
- [9] 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. [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. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2186 - 2193.]
- [10] Liu F M, Miao J L, Zheng Z, *et al.* Present situation, hazards and prevention and control measures of marine invasive alien species into China [J]. *Coastal Engineering*, 2007, 26(4): 49 - 26. [刘芳明, 缪锦来, 郑洲, 等. 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, 2007, 26(4): 49 - 57. ]
- [11] Ou J. Study on risk assessment for alien species in Xiamen[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. [ 欧健. 厦门外来物种入侵风险评估研究. 厦门: 厦门大学, 2008. ]
- [12] Yuan C T, Liu J M, Bu X F, *et al.* Investigation report on *Bullacta exarata* culture and propagation in Dongying intertidal zone [ J ]. Shandong Fisheries, 2006, 23(3): 25 - 26. [ 苑春亭, 刘金明, 薄学锋, 等. 东营市潮间带泥螺增殖调查报告. 齐鲁渔业, 2006, 23(3): 25 - 26. ]
- [13] Wu W G, Leng Y, Zhang J H, *et al.* Preliminary study on characteristics and living environment of *Bullacta exarata* population in Yellow River Estuary, China [ J ]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(3): 38 - 45. [ 吴文广, 冷宇, 张继红, 等. 黄河口泥螺种群夏季分布特性及其与底质环境的关系. 渔业科学进展, 2013, 34(3): 38 - 45. ]
- [14] 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. [ 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. 生物多样性, 2004, 12(6): 626 - 638. ]
- [15] Peng Z B, Jiang Y, Jiang J S. Risk evaluation indicator system for exotic plant invasion in Hainan Island, South China [ J ]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2029 - 2034. [ 彭宗波, 蒋英, 蒋菊生. 海南岛外来植物入侵风险评估指标体系. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2029 - 2034. ]
- [16] Infantes E, Terrados J, Orfila A. Assessment of substratum effect on the distribution of two invasive *Caulerpa* ( Chlorophyta ) species [ J ]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 91(3): 434 - 441.
- [17] Fuentealba A, Alfaro R, Bauce É. Theoretical framework for assessment of risks posed to Canadian forests by invasive insect species [ J ]. Forest Ecology and Management, 2013, 302: 97 - 106.
- [18] Liu Y, Wu H X, Xue J Z. The ecology of invasions by marine exotic species [ J ]. Journal of Biosafety, 2013, 22(1): 8 - 16. [ 刘艳, 吴惠仙, 薛俊增. 海洋外来物种入侵生态学研究. 生物安全学报, 2013, 22(1): 8 - 16. ]
- [19] 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. [ 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. 水产学报, 2009, 33(4): 617 - 623. ]
- [20] Ou J, Lu C Y. Present situation of alien plants invasion and its risk assessment system in Xiamen city [ J ]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(10): 1240 - 1244. [ 欧健, 卢昌义. 厦门市外来物种入侵现状及其风险评价指标体系. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1240 - 1244. ]
- [21] Shi H Q, Jiang W, Yi D. Advances in study on invasive risk assessment of alien marine species [ J ]. Advances in Marine Science, 2005, 23(B12): 127 - 131. [ 石红旗, 姜伟, 衣丹. 外来海洋物种入侵风险评估研究进展. 海洋科学进展, 2005, 23(B12): 127 - 131. ]
- [22] Zhang Y Y, Yuan Y Y. Use AHP to evaluate E-commerce software usability quality evaluation [ J ]. Application Research of Computers, 2007, 24(4): 104 - 110. [ 张扬扬, 袁玉宇. 运用层次分析法分析电子商务软件易用性的评价. 计算机应用研究, 2007, 24(4): 104 - 110. ]
- [23] Wu J, Huang H B, Cao Q W. Research on AHP with interval-valued intuitionistic fuzzy sets and its application in multi-criteria decision making problems [ J ]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(24): 9898 - 9906.
- [24] Zhou X H, Fu C Y, Wang Z Q, *et al.* Researches on coal mine safety supervision system in China by AHP [ J ]. World Sci-tech R & D, 2010, 32(6): 815 - 817. [ 周西华, 傅传洋, 王志强, 等. 基于层次分析法的我国煤矿安全监察体系探析. 世界科技研究与发展, 2010, 32(6): 815 - 817. ]
- [25] Wang F, Zhang S, Ding T M. Evaluation on weight factors affecting artificial reefs site selection in Zhongshan area based on AHP [ J ]. Journal of Marine Sciences, 2008, 26(1): 65 - 71. [ 王飞, 张硕, 丁天明. 舟山海域人工鱼礁选址基于 AHP 的权重因子评价. 海洋学研究, 2008, 26(1): 65 - 71. ]
- [26] Liu C D, He T R, Su W C. Evaluation of Changshou Lake ecosystem health on the basis of fuzzy AHP [ J ]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(6): 57 - 61. [ 刘存东, 何太蓉, 苏维词. 基于模糊 AHP 的长寿湖生态系统健康评价. 水生态学杂志, 2009, 2(6): 57 - 61. ]
- [27] You Z J, Wang Y N, Dong R P, *et al.* Preliminary studies on the propagation of the mire snail, *Bullacta exarata* [ J ]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1993, 12(4): 233 - 239. [ 尤仲杰, 王一农, 董任彭, 等. 浙江沿海泥螺 *Bullacta exarata* 繁殖生物学初步观察. 浙江水产学院学报, 1993, 12

- (4):233 - 239. ]
- [28] You Z J, Lu D X, Wang Y N. Studies on reproductive biology of *Bullacta exarata* [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(1):30 - 35. [尤仲杰, 陆彤霞, 王一农. 泥螺的繁殖生物学研究. 热带海洋学报, 2003, 22(1):30 - 35. ]
- [29] Wang Y N, You Z J, Yu H, et al. Study on ecological habit of mud slug, *Bullacta exarata* [J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2003, 16(3):240 - 244. [王一农, 尤仲杰, 於宏, 等. 养殖泥螺生态习性研究. 宁波大学学报: 理工版, 2003, 16(3): 240 - 244. ]
- [30] Wu W G, Zhang J H, Fang J G, et al. Effects of salinity on oxygen consumption and ammonia excretion rate of different sizes of *Bullacta exarata* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(9): 2457 - 2461. [吴文广, 张继红, 方建光, 等. 盐度对不同规格泥螺耗氧率和排氨率的影响. 生态学杂志, 2013, 32(9):2457 - 2461. ]
- [31] 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. [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. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2):92 - 96. ]
- [32] Luo Z Q, Yang S L. Comparative study on several scales in AHP [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2004, 24(9):51 - 60. [骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较. 系统工程理论与实践, 2004, 24(9):51 - 60. ]
- [33] Pannell J R. Dispersal ecology: where have all the seeds gone? [J]. Current Biology, 2007, 17(10): 360 - 362.
- [34] Wan F H, Xie B Y, Yang G Q, et al. Invasion Biology [M]. Beijing: Science Press, 2011. [万方浩, 谢丙炎, 杨国庆, 等. 入侵生物学. 北京: 科学出版社, 2011. ]
- [35] Zhong D H, Zhang J S, Cao G J. Study on risk analysis for construction projects based AHP [J]. Journal of Tianjin University: Natural Sciences & Engineering and Technology, 2002, 35(2): 162 - 166. [钟登华, 张建设, 曹广晶. 基于 AHP 的工程项目风险分析方法. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2002, 35(2):162 - 166. ]

## The ecological risk assessment of *Bullacta exarata* in Laizhou Bay: the YAAHP software implementation based on AHP

WU Wenguang, ZHANG Jihong\*, WEI Yanwei, FANG Jianguang  
(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Yellow Sea Fisheries Research Institute,  
Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Ecological risk of alien species *Bullacta exarata* in Laizhou Bay was evaluated by analytic hierarchy process (AHP) method using YAAHP software. Evaluation indicators were selected by considering the key characteristics, such as the biology, life history characteristics, human disturbance factors, ecosystem status and so on. In this paper, six primary indexes and 30 secondary indexes were designed. Weights of these indicators were assigned according to the comprehensive analysis of published articles, expert ratings and our in situ measured results. Three risk grades were designed to construct the risk assessment system, which were “allowed introduction”, “a certain risk” and “forbidden introduction”. Software analysis results showed that the values of “a certain risk”, “allowed introduction” and “forbidden introduction” were 0.507 6, 0.352 2 and 0.140 2, respectively. Therefore, the final risk assessment result is “a certain risk”. Sensitivity analysis was done by the YAAHP software. In the paper, we only reported the main results of the three highest weights value indicators, incoming, colonization and proliferation risks. Sensitivity analysis results showed that the weight of the three indicators could only influence the sequence of the results of “a certain risk” and “allowed introduction”. Therefore, we suggest that we must not blindly introduce and expand the farming scale of the snail and it is better to strengthen supervision and management after the introduction.

**Key words:** *Bullacta exarata*; ecological security; risk assessment; analytic hierarchy process; Laizhou Bay

**Corresponding author:** ZHANG Jihong. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

### 《集美大学学报(自然科学版)》2015 年征订启事

《集美大学学报(自然科学版)》(ISSN 1007-7405 CN 35-1186/N)是由集美大学主办的自然科学类学术性期刊,创刊于 1981 年,国内外公开发行。季刊,大 16 开本,96 页,全年定价 48 元。

集美大学有近百年的办学历史,在国内外享有一定的知名度。本刊依托本校的学科优势,确定了面向海峡西岸经济区、面向海洋、面向世界的办刊目标,设立了“水产、食品与生物技术”、“航海技术与物流工程”、“船舶与机械工程”、“数理科学与信息工程”四个栏目。读者对象为高中等院校水产学科、航海学科、机电学科、信息学科和基础学科的师生,以及相关研究单位的科研工作者。

本刊采用自办发行和非邮发联合发行,国内读者可向我刊编辑部或非邮发联合征订服务部、首都医科大学期刊社订购,国外读者可向中国出版对外贸易公司订购(本刊国外代号 DK35007)。

联系方式如下:

- 1) 非邮发联合征订服务部:天津市大寺泉集北里别墅 17 号(邮编:300385)
- 2) 首都医科大学期刊社:北京市右安门外西头条 10 号(邮编:100054)
- 3) 中国出版对外贸易公司:北京市安外安华里 504 号(邮编:100011)
- 4) 本刊编辑部:中国厦门市集美区银江路 185 号(邮编:361021)

集美大学学报编辑部电话:0592-6181045,传真:0592-6180129,联系人:白蓉