

文章编号:1000-0615(2009)04-0617-07

## 外来海洋物种入侵风险评估体系的构建

马英<sup>1</sup>, 熊何健<sup>2</sup>, 林源洪<sup>3</sup>, 唐森铭<sup>4</sup>

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021;

2. 集美大学生物工程学院, 福建 厦门 361021;

3. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021;

4. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:**为了评估外来海洋物种入侵的风险,根据外来海洋物种入侵特点,在文献分析和专家咨询的基础上,采用层次分析和三角模糊数数值标度计算权重的方法,设计5个一级指标和20个二级指标,构建了外来海洋物种入侵风险评估体系。利用该评估体系对7种(类)典型海洋外来种进行了风险评估。评估结果表明,互花米草和对虾白斑病毒为极高风险等级;沙筛贝、米氏凯伦藻和帕金虫为高风险等级,罗非鱼为中风险等级;大菱鲆为低风险等级。由于传统层次分析法的“1~9标度”方法不能精确地反映人的实际思维,从而影响最终的判定结果,本评估体系借鉴了三角模糊数表示的改进方法来计算权重值,并对一级指标和二级指标的相对权重均进行了权重设计,得出的结果更加精确地反映了人的实际思维。外来海洋物种入侵风险评估体系的建立将为外来海洋物种入侵风险管理提供决策依据和参考。

**关键词:**外来海洋物种;生物入侵;风险评估;层次分析法(AHP);三角模糊数

**中图分类号:**S 917

**文献标识码:**A

生物入侵是指生物由原产地经自然的或人为的途径侵入到另一个新环境,在新环境中定居、建群,并对入侵地的生态环境、生物多样性、农林牧渔业生产以及人类健康造成破坏性影响,导致入侵地生态系统失衡和经济社会进展紊乱的现象。生物入侵是一个不可逆的过程,造成的生态或进化后果相当严重,外来种一旦入侵成功,要彻底消除它极为困难,而用于控制和治理的费用会更大。因此,对已传入的或计划引进的外来物种要及时进行入侵风险评估,以便正确决策,尽早采取有效控制 and 防治措施。

国际上一些发达国家把风险评估作为加强对外来入侵种管理的一项重要措施。美国在上世纪70年代就建立了一个对尚未在加州定殖的有害生物进行打分的模型,该模型的最大优点在于它不仅考虑外来物种对经济的影响,还综合考虑了对社会及环境影响的重要性<sup>[1]</sup>。美国还开展了一系列有关杂草和水生外来生物的风险评

估<sup>[2-3]</sup>。澳大利亚制定了国家杂草战略,提出了杂草风险评价系统(weed risk assessment system, WRAS)<sup>[4]</sup>。该系统正确识别了370种(类)杂草中所有危害严重的杂草,此后,又对该系统进行了改进并用于新西兰的杂草风险评估。该杂草风险评价系统经常被后来的评价系统借鉴和引用,具有一定的代表性。

加拿大的风险评估工作由专门的机构负责进行。加拿大将有害生物风险分析(pest risk analysis, PRA)分成3部分:有害生物风险评估、有害生物风险管理和有害生物风险交流。与有关贸易部门进行风险交流作为PRA的独立部分是加拿大的特色<sup>[1]</sup>。1991年国际粮农组织等海洋污染科学专家组(GESAMPS)推荐了水产生物引进的“评估决策模式”,对是否引进某种养殖生物做出决策<sup>[5]</sup>。上述评估模型基本上都是以回答问题进行打分的方式进行,偏向于定性评估,定量模式相对缺乏<sup>[6]</sup>,而且评估对象一般限于某一类

收稿日期:2008-11-05

修回日期:2009-01-28

资助项目:国家“908”专项评价项目资助(908-02-03-09)

通讯作者:唐森铭, Tel: 0592-2195260, E-mail: tsm@21cn.com

生物(杂草、养殖动物、压舱水等),针对性较强。

我国的PRA工作起步较早,在国际上处于较领先的地位,在制定植物检疫政策方面发挥了积极的作用。陈洪俊等<sup>[7]</sup>全面总结了我国PRA的历史与现状。从总体上看,我国的PRA定性评估较多,定量评估较少。侧重于定殖后的适生研究,对传入可能性、特别是经济影响、生态影响方面没有更多的涉及<sup>[8]</sup>。在评估对象上,有关我国农业有害生物和检疫对象的风险分析报道较多,但从外来物种的范畴和生物多样性保护角度开展的研究还较少<sup>[9]</sup>。对外来生物入侵的风险评估工作是在最近几年才开始的,而且评估多集中在对陆地生物入侵的研究上,对海洋生物入侵的风险评估刚刚起步,相关研究报道较少<sup>[10-11]</sup>。目前所建立的风险评价体系多是利用1~9标度法进行各指标权重的计算,存在一定的局限性<sup>[12-13]</sup>。

本文采用层次分析法<sup>[14-15]</sup>和改进的权重值计算方法<sup>[13]</sup>,构建了外来海洋生物入侵风险评估体系,并利用该评估体系对互花米草等典型海洋外来种进行了风险评估,为外来海洋生物入侵风险管理提供决策依据和参考。

## 1 外来海洋物种入侵风险评估体系的指标构成、各指标的定义及量化赋值

### 1.1 指标构成

外来物种的入侵过程具有阶段性特征,其入侵过程通常分为引入和逃逸期(外来种的传入)、种群建立期(外来种的定殖)、停滞或潜伏期和扩散期<sup>[16]</sup>。外来物种一旦入侵成功,就会对入侵地生态系统造成破坏性影响,其破坏后果严重的程度以及对其进行控制和处理的难度是衡量外来物种入侵风险大小的重要评估指标。因此,根据外来种入侵特点,采用专家系统咨询与规划决策中的重要方法——层次分析法,并参考相关文献<sup>[17]</sup>,设计5个一级指标,并分析各一级指标的影响因素,设立20个二级指标,构建评估指标体系。

### 1.2 评估指标的定义

一级指标 $P_1$ ,传入可能性——外来物种通过各种渠道引入本地的可能性,由4个二级指标组成,分别是: $P_{11}$ ,国外分布情况; $P_{12}$ ,有意传入的可能性; $P_{13}$ ,无意传入的可能性; $P_{14}$ ,截获的频率与数量。

一级指标 $P_2$ ,定殖的可能性——指外来物种

在引入地建立种群的可能性,由4个二级指标组成,分别是: $P_{21}$ ,气候适宜度; $P_{22}$ ,发芽率或存活率; $P_{23}$ ,抗逆性; $P_{24}$ ,其它限制因子适合度。

一级指标 $P_3$ ,扩散的可能性——外来物种在引入地传播、迁移、扩散的可能性。由5个二级指标组成,分别是: $P_{31}$ ,生长速度; $P_{32}$ ,繁殖能力; $P_{33}$ ,可利用的传播媒介与距离、迁徙特性; $P_{34}$ ,国内适生范围; $P_{35}$ ,天敌情况。

一级指标 $P_4$ ,危害与影响——外来物种对引入地的经济、环境、生物多样性和人体健康等方面已经或可能造成的不利影响。由4个二级指标组成,分别是: $P_{41}$ ,对经济的影响; $P_{42}$ ,对生态环境的影响; $P_{43}$ ,对生物多样性的影响; $P_{44}$ ,对人类健康的影响。

一级指标 $P_5$ ,风险管理——外来物种防治的可行性与代价,由3个二级指标组成。 $P_{51}$ ,检验鉴定难度; $P_{52}$ ,控制处理难度; $P_{53}$ ,防治过程对本地生态系统的影响。

各二级指标的涵义见表1中的赋值标准和依据。

### 1.3 指标的量化赋值

指标的量化是为了解决指标间的不可公度问题。本体系将各指标风险值划分为5个等级,即将风险性由低到高划分为:无风险或风险极低(0分)、低度风险(1分)、中度风险(2分)、高度风险(3分)和极高风险(4分),根据文献资料和专家意见,给出赋值标准(表1)。

## 2 风险评估模型的建立(指标间的关系及数学模型)

外来物种风险评估指标之间的关系和作用是不同的,根据其贡献可以分为连乘关系、累加关系和替代关系等<sup>[9]</sup>。当指标之间互相依存,共同对上一级指标的数值大小做出贡献,这些指标之间的关系为连乘关系,本体系各一级指标之间的关系即为连乘关系;当指标之间互不依赖,独立地对上一级指标的数值大小作出贡献,这些指标之间的关系为累加关系,本体系一级指标 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_5$ 中各二级指标之间的关系即为累加关系;当某一指标为最大时,即可替代同级的其他指标对上一级指标的贡献,这些指标之间的关系为替代关系,本体系一级指标 $P_4$ 中各二级指标之间的关系为替代关系。

表 1 外来海洋物种入侵风险评估体系  
Tab. 1 Invasive risk assessment system for alien marine species

一级指标 primary index	二级指标 secondary index	赋值标准和依据(0~4分) evaluating criterion and basis (0-4 points)
		0分(无风险或风险极低);1分(低风险);2分(中风险);3分(高风险);4分(风险极高) 0 point (none or very low); 1 point (low); 2 points (medium); 3 points (high); 4 points (very high)
$P_1$ , 传入的可能性 probability of introduction	$P_{11}$ , 国外分布情况	按分布国占世界国家的百分比计: <1% (0); 1%~5% (1); 5%~20% (2); 20%~40% (3); >40% (4)
	$P_{12}$ , 有意传入	可能性极小(0); 存在有意传入可能(1); 国外有引入事例(2); 国内有引入事例(3); 国内有多次引入事例(4)
	$P_{13}$ , 无意传入	可能性极小(0); 存在无意传入可能(1); 国外有无意传入事例(2); 国内有无意传入事例(3); 国内有多次无意传入事例(4)
	$P_{14}$ , 截获频率与数量	历史上从未被截获或只截获过少数几次, 截获数量少(1); 偶尔被截获, 有一定的数量(2); 经常被截获或截获数量大(4)
$P_2$ , 定殖的可能性 probability of establishment	$P_{21}$ , 气候相似度	不适宜(0); 较不适宜(1); 基本满足生存和繁殖条件(2); 较适宜(3); 非常适宜(4)
	$P_{22}$ , 发芽率或存活率	<1% (0); 1%~10% (1); 10%~30% (2); 30%~60% (3); >60% (4)
	$P_{23}$ , 抗逆性	生存能力弱, 抗逆性差(1); 抗逆性一般(2); 对生长环境要求不严格, 在非极端生境中能较快速度的生长(3); 抗逆性强, 具有抵御极端温度、干旱或贫瘠等环境胁迫因子的能力, 或能以某种特定方式渡过不利环境(4)
	$P_{24}$ , 其它限制因子适合度	专一性强, 适宜生境单一, 或宿主的种类和数量少(1); 适合度窄, 适宜生境数量少, 如仅能捕食某几种生物, 或寄主数量少(2); 适合度较宽, 适宜生境多, 或寄主种类少, 但数量较大(3); 适合度宽, 可利用生境很多, 无明显限制因子, 或寄主范围极广(4)
$P_3$ , 扩散可能性 probability of migration	$P_{31}$ , 生长速度	生长速度慢(1); 生长速度一般(2); 生长速度较快(3); 生长速度很快(4)
	$P_{32}$ , 繁殖特性	只有一种繁殖方式, 繁殖周期长, 单个生物产生后代数量少(1); 只有一种繁殖方式, 繁殖周期较长, 单个生物产生后代数量较多(2); 只有一种繁殖方式, 繁殖周期较短, 单个生物产生后代数量较多(3); 能进行多种繁殖方式(植物), 繁殖周期短, 单个生物产生后代数量多(4)
	$P_{33}$ , 可利用的传播媒介与距离、迁徙特性	仅能利用风、浪、潮流、生物携带、运输工具等1~2种途径进行短距离传播或迁徙(1); 可利用上述1~2种途径进行较长距离传播或迁徙(2); 可利用多种途径进行较长距离传播或迁徙, 扩散范围较大(3); 能利用多种途径进行远距离传播, 扩散范围大(4)
	$P_{34}$ , 国内适生范围	自然条件下无法生存(0); 国内适生范围<5% (1); 5%~15% (2); 15%~40% (3); 国内40%以上地区能够适生(4)
	$P_{35}$ , 天敌的情况	存在多种天敌, 控制能力强(0); 存在天敌或竞争性物种, 但控制能力较弱(2); 无有效天敌(4)
$P_4$ , 危害与影响 hazard and impact	$P_{41}$ , 对经济的影响	无明显经济损失(0); 影响一种或多种经济物种, 造成直接经济损失20~100万元, 或造成间接经济损失100~500万元(1); 直接经济损失100~1000万元, 或间接损失500~5000万元(2); 直接经济损失1000万~1亿元, 或间接损失5000万~5亿元(3); 直接经济损失1亿元以上, 或间接损失5亿元以上(4)
	$P_{42}$ , 对生态环境的影响	对生态环境无明显影响(0); 改变(破坏性)当地环境中土壤结构、矿物元素、盐碱度、溶氧量、pH值等中的某一项(1); 改变其中2项(2); 改变其中2项以上(3); 对当地生境、地貌、水文特征等破坏性地改变(4)
	$P_{43}$ , 对生物多样性的影响	对当地物种影响较弱(1); 能与当地物种竞争, 减少当地物种可利用的生境空间(2); 能捕食土著生物, 减少当地生物多样性, 或与当地物种杂交, 造成遗传污染(3); 能明显减少当地生物多样性(4)
$P_5$ , 风险管理 prevention and control	$P_{44}$ , 对人类健康的影响	对人类健康无影响(0); 对人类健康有一定影响, 但不会导致人类发生严重疾病(1); 植株或其附属物有毒, 或携带病原菌, 危害人畜健康, 能够导致人体发生严重疾病(2); 有少数危害案例出现(3); 出现多起个案或群体性危害案例或死亡案例(4)
	$P_{51}$ , 检验鉴定难度	检疫方法可靠、快捷(1); 现有检疫方法可靠性很差, 花费时间长(4); 其它介于二者之间, 根据物种具体情况打分
	$P_{52}$ , 控制处理难度	现有防治方法简单有效, 除害率80%以上, 成本低(1); 除害率50%~80%, 成本较低(2); 除害率50%以下, 方法复杂, 成本高(3); 现有防治方法基本无效(4)
	$P_{53}$ , 防治过程对本地生态系统的影响	防治手段对生态系统基本无负面影响(0); 影响较小, 药物能在短期内降解(1); 有一定影响, 药物不能在短期内降解(2); 影响较大, 药物能残留时间较长(3); 会造成持续严重影响(4)

本体系涉及多层次、多指标,各层次指标的重要性(即权重)是不同的。层次分析法中最早采用 Saaty<sup>[14]</sup>提出的 1~9 标度法进行各指标权重的计算,但该法适于各指标重要性排序的判断,而不适于精确的权重计算,得出的指标权重值与人的思维一致性较差,可能会影响最终的判断结果<sup>[12-13]</sup>。本体系采用三角模糊数数值标度<sup>[13]</sup>计算出各指标的权重值,得出结果与专家对指标权重打分具有较好的一致性。

根据指标间的作用关系和计算出的指标权重值,建立以下数学模型。

$$\text{风险值: } R = P_1^{0.0942} P_2^{0.1178} P_3^{0.1819} P_4^{0.3785} P_5^{0.2274}$$

其中,  $P_1 = 0.1629 P_{11} + 0.3874 P_{12} + 0.2484 P_{13} + 0.2012 P_{14}$

$$P_2 = 0.1721 P_{21} + 0.2467 P_{22} + 0.4247 P_{23} + 0.1385 P_{24},$$

$$P_3 = 0.2001 P_{31} + 0.2214 P_{32} + 0.1582 P_{33} + 0.1582 P_{34} + 0.2214 P_{35}$$

$$P_4 = \text{Max}(P_{41}, P_{42}, P_{43}, P_{44})$$

$$P_5 = 0.1896 P_{51} + 0.4502 P_{52} + 0.3602 P_{53}$$

当  $P_{21} = 0$  或  $P_{34} = 0$  时,  $R = 0$

参考国内外现行有害生物等级划分体系<sup>[18-19]</sup>和外来物种分级管理的需要<sup>①</sup>,借鉴相关文献的等级划分方法,并根据对一些常见海洋外来生物风险评估得分的实际情况,设定风险分级标准:当  $0 \leq R \leq 1.5$  时,为低风险等级,可以引种;当  $1.5 < R \leq 2.5$  时,为中风险等级,可以有限制地引种,但要有严格的管理措施;当  $2.5 < R \leq 3$  时,为高风险等级,不建议引种;当  $3 < R \leq 4$  时,为极高风险、不可接受等级,不能引种。

### 3 典型外来海洋物种风险评估

根据已建立的外来海洋物种入侵风险评价体系,通过查阅文献和网络数据库,以及实地调查,并参考专家意见,对互花米草(*Spartina alterniflora*)、沙筛贝(*Mytilopsis sallei*)、罗非鱼(*Tilapia spp.*)、对虾白斑病毒(white spot baculovirus)、大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)、帕金虫(*Perkinsus spp.*)等 7 个种(类)典型外来海洋物种的各二级

指标进行打分,根据上述评估模型计算出各一级指标的值,进而计算出风险值  $R$ (表 2)。

表 2 评价结果表明,在评价的 7 种外来海洋物种中,互花米草和对虾白斑病毒的风险值均大于 3.5,为风险极高、不可接受等级。该评价结果与它们在入侵地的实际危害情况相符,应严格控制其进一步蔓延。沙筛贝的风险值介于 2.5 和 3 之间,为高风险等级。沙筛贝的各项评价指标中,高分值主要集中在定殖、扩散和危害与影响方面,这几项的评分结果均达到 3 以上。作为一种有害赤潮藻,米氏凯伦藻的高分值主要集中在其扩散性和危害性两方面,其控制处理困难,一旦暴发赤潮,损失巨大。在本评估体系中,米氏凯伦藻的风险值为 3,是高风险等级的高限。帕金虫害虽然未在全国造成重大影响,但它对贝类养殖的危害不容低估( $P_{41}$  得分为 4),现已经发现多例贝类感染的重大死亡事件<sup>[20]</sup>。由于该指标的权重值较高,所以尽管帕金虫其它各单项得分并不是很高,最终的  $R$  值也达到高风险等级范围。

罗非鱼和大菱鲂均为水产经济养殖品种,由于水产养殖多采用封闭式模式,限制了这些物种在野外的扩散,目前并未发现对野生种群造成危害或出现遗传污染的明显证据,但其潜在的危害,如可能与当地物种竞争,减少当地物种可利用的栖息空间和食物、与当地物种杂交导致种质退化或减少土著生物多样性等,也不容忽视。罗非鱼属广盐性鱼类,海、淡水中均可生存,生长速度快,繁殖能力以及对环境的适应能力均较强,经济效益显著。但罗非鱼竞争力很强,在自然界可迅速建群,食性广、食量大,可捕食鱼卵,并具有遗传污染倾向,对当地食物链、鱼类多样性等有一定影响<sup>[21]</sup>。从专家对其各单项指标打分的情况来看,其  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_{43}$  等指标值均大于 2(中风险等级以上),尽管其扩散的可能性较低,风险管理( $P_5$ )也较容易(0.64),最终风险值  $R$  为 1.83,达到中风险等级水平。建议在生产上有限制地引种,并采取严格的管理措施,防止其逃逸扩散。大菱鲂属于冷水性鱼类,对温度等海水指标要求较高,自然条件下生存能力较差,大菱鲂评价结果为低风险水平。由于大多数引进的水产养殖品种,肉质鲜美,在野外的天敌比较多,因此只要加以严密控

① 石红旗,姜伟,衣丹. 外来海洋物种入侵风险评估模式建议与预警分析[OL]. 中国外来海洋生物物种基础信息数据库, <http://bioinvasion.fig.org.cn>

制,防治逃逸,就可以将引进海洋外来种的风险降到最低。在进行充分评估的基础上,积极引进外

来优良品种,提高水产养殖效率和蛋白质产量,仍然是今后海洋经济发展的支撑点。

表 2 7 个典型外来海洋物种入侵风险评估  
Tab.2 Risk grade judgment of 7 typical alien marine species

指标 index	外来海洋物种 alien marine species						
	互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	沙筛贝 <i>Mytilopsis sallei</i>	罗非鱼 <i>Tilapia spp.</i>	对虾白斑病毒 White Spot Baculovirus	米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>	大菱鲂 <i>Scophthalmus maximus</i>	帕金虫 <i>Perkinsus spp.</i>
$P_{11}$	3	2	2	4	3	2	2
$P_{12}$	4	0	4	0	0	4	1
$P_{13}$	1	4	0	4	3	0	3
$P_{14}$	1	2	2	3	2	1	2
$P_{21}$	3	3	3	4	2	2	3
$P_{22}$	4	3	4	4	3	3	2
$P_{23}$	4	4	3	4	3	1	2
$P_{24}$	3	3	2	3	2	2	2
$P_{31}$	3	3	3	4	3	3	2
$P_{32}$	4	4	3	4	4	3	3
$P_{33}$	2	3	1	4	3	2	2
$P_{34}$	4	3	1	3	3	2	2
$P_{35}$	4	3	0	4	3	1	2
$P_{41}$	4	3	0	4	4	0	4
$P_{42}$	4	2	0	0	3	0	0
$P_{43}$	4	2	3	1	2	1	2
$P_{44}$	0	0	0	0	2	0	0
$P_{51}$	1	1	1	3	2	1	2
$P_{52}$	4	3	1	4	4	1	3
$P_{53}$	3	2	0	2	1	0	2
$P_1$	3.23	1.72	2.28	2.25	1.53	2.08	1.86
$P_2$	3.69	3.42	3.05	3.86	2.69	1.84	2.17
$P_3$	3.32	3.10	1.58	3.68	3.10	2.12	2.14
$P_4$	4	3	3	4	4	1	4
$P_5$	3.07	2.26	0.64	3.09	2.54	0.648	2.45
R 值 R values	3.53	2.73	1.83	3.50	3.00	1.04	2.76
风险等级 risk grade	极高 very high	高 high	中 medium	极高 very high	高 high	低 low	高 high

#### 4 讨论

本文在对外来海洋物种入侵状况及其原因的调查、分析基础上,采用层次分析法,构建了外来海洋物种入侵风险评估体系,并利用该评估体系对互花米草等 7 种典型外来海洋物种进行了风险评估。从评估结果来看,本文构建的体系能够较客观地反映外来海洋物种的风险等级水平。

本体系在专家咨询的基础上,对评估体系的一级指标和二级指标的相对权重均进行了权重设计,避免了将各级指标权重等同的简单处理方法,使得构建的数学模型更可靠。另一方面,在外来物种风险评估体系的构建中,一般多采用 1~9 标

度法计算各指标的权重值<sup>[12,14]</sup>。作者也尝试过这种方法,但发现计算出的权重值与专家打分或人的主观期望值之间相去较远。因此,本研究借鉴了一种基于三角模糊数表示的改进方法来计算权重值<sup>[13]</sup>,得出的结果更加精确地反映了人的实际思维,与专家对指标权重的打分之间具有较好的一致性,从而提高了该数学模型的实用性。

需要指出的是,外来海洋生物门类多,生活方式各不相同。有耐盐植物、浮游藻类、鱼、虾、贝类等,还有随同海洋外来种引入或传播的病原微生物。本研究采用同一个评估体系对各类外来海洋物种进行评估,这种方法比较简单、容易使用、便于统一,但目前对海洋外来种研究仍然不够,基础

资料相对欠缺。难免会存在对某些具体指标打分困难的情况。对于不同类型的外来海洋生物,各具体指标还要针对不同的特点进行增补,这些有待今后通过进一步研究加以充实和完善。

感谢于仁成研究员、王立俊研究员、王金辉研究员、陈彬研究员、王初升研究员、张玉生研究员、朱小明教授、黄哲强高工、洪雄业高工、黄健高工、黄瑞高工、李和阳博士、郑榕辉硕士等在风险评估体系评分过程中给予的支持。

#### 参考文献:

- [1] 邓铁军. 国内外有害生物风险分析(PRA)的研究发展[J]. 广西农学报, 2004, (1): 46-50.
- [2] Risk Assessment and Management Committee. Aquatic nuisance species task force [C]. The generic nonindigenous aquatic organisms risk analysis review process, Washington, DC: 1996.
- [3] Thomas P A. Weed risk assessment and prevention in Hawaii: Status and practicalities [M]// Groves R H, Panetta F D, Virtue J G, eds. Weed Risk Assessment. Victoria, Australia: CSIRO Publishing, 2001: 176-181.
- [4] Pheloung P C, Williams P A, Halloy S R. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions [J]. Journal of Environmental Management, 1999, 57 (4): 239-251.
- [5] GESAMP (IMO/FAO/Unesco/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). Reducing environmental impacts of coastal aquaculture [R]. Reports and Studies, 1991, (47): 35.
- [6] Kolar C S. Risk assessment and screening for potentially invasive fishes [J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 2004, 38: 391-397.
- [7] 陈洪俊, 范晓虹, 李蔚民. 我国有害生物风险分析(PRA)的历史与现状 [J]. 植物检疫, 2002, 16 (1): 28-32.
- [8] 周国梁, 李尉民, 印丽萍, 等. 有害生物风险分析的现状与发展趋势 [C]. 外来有害生物检疫及防除技术学术研讨会论文集. 南京: 江苏省植物病理学会, 2005: 185-188.
- [9] 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.
- [10] 石红旗, 姜 伟, 衣 丹. 外来海洋物种入侵风险评估研究进展 [J]. 海洋科学进展, 2005, 23 (增刊): 127-131.
- [11] 赵淑江, 朱爱意, 张晓举. 我国的海洋外来物种及其管理 [J]. 海洋开发与管理, 2005, (3): 58-66.
- [12] 张文鸽, 黄 强. 层次分析法(AHP)的标度分析及其在水利工程评价中的应用 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34 (3): 152-156.
- [13] 吴士芬, 张颖超, 刘雨华. AHP 标度改进研究及其在 IDS 评估中的应用 [J]. 信息安全, 2007, 23 (3-3): 70-71.
- [14] Saaty T Y. The analytic hierarchy [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [15] 韩中庚. 数学建模方法及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 6.
- [16] 丁建清, 解 焱. 中国外来种入侵机制及对策 [M]//汪 松, 谢彼德, 解 焱. 保护中国的生物多样性(二). 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 107-128.
- [17] 欧 健, 卢昌义. 厦门外来植物入侵风险评估指标体系的建立——以互花米草入侵风险评估为例 [J]. 台湾海峡, 2006, 25 (3): 437-444.
- [18] Daehler C C, Denslow J S, Ansari S, et al. A risk assessment system for screening out invasive pest plants from Hawaii and other Pacific islands [J]. Conserv Biol, 2004, 18: 360-368.
- [19] Weber E, Gut D. Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe [J]. J Nat Conserv, 2004, 12: 171-179.
- [20] 梁玉波, 王立俊, 张喜昌. 贝类病原性寄生虫种类 [J]. 海洋环境科学, 2002, 21 (2): 69-73.
- [21] De Silva S S, Subasinghe R P, Bartley D M, et al. Tilapias as exotics in the Asia-Pacific: a review [R]. FAO Fisheries Technical Paper, 2004, 453: 63.

## Construction of invasive risk assessment system for alien marine species

MA Ying<sup>1</sup>, XIONG He-jian<sup>2</sup>, LIN Yuan-hong<sup>3</sup>, TANG Sen-ming<sup>4</sup>

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Bioengineering College of Jimei University, Xiamen 361021, China;

3. School of Science of Jimei University, Xiamen 361021, China;

4. The Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** To assess the invasion risk of alien marine species, an invasive risk assessment system was constructed based on the characters of introduced marine species and on the analysis of literatures and expert consultancy. The system has 5 primary and 20 secondary indexes, and was constructed using analytic hierarchy process (AHP) method and trigonometrical fuzzy numbers for determining the weight of each index of the system. The invasive risks for 7 typical alien marine species were assessed, subsequently. The results of the system identified the risk grade of cordgrass *Spartina alterniflora* and White Spot Baculovirus as very high, *Mytilopsis sallei*, *Karenia mikimotoi* and *Perkinsus* spp. , as high, *Tilapia* spp. , as medium, and *Scophthalmus maximus*, as low levels of risk grade. Because traditional “1 – 9 scale” method is unable to reflect the real thought accurately, which leads to incorrect judgments, an improved scale method based on trigonometrical fuzzy numbers was used in the present assessment system, and the relative weights of both primary and secondary indexes were designed. Thus the assessing results reflect the real thought more accurately. It is believed that the construction of this risk assessment system will provide beneficial suggestions in decision makings for the managements of tackling alien marine species.

**Key words:** alien marine species; biological invasion; risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); trigonometrical fuzzy numbers