

外来鱼类入侵风险评估体系及方法

窦寅¹, 吴军^{2①}, 黄成¹ (1. 南京大学生命科学院, 江苏 南京 210093; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 根据中国外来鱼类的入侵现状, 分析了建立外来鱼类入侵风险评估体系的重要性、必要性和应用前景。在现状调查、文献分析和专家咨询的基础上, 构建了一套包含 5 个一级指标、12 个二级指标、44 个三级指标的可量化的外来鱼类入侵风险评估指标体系, 确定了各指标权重, 并举例说明了该评估体系的应用。

关键词: 外来物种; 外来鱼类; 入侵风险评估; 指标体系

中图分类号: Q958.5917; X8 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2011)01-0012-05

Risk Assessment System and Method for Invasion of Alien Fishes DOU Yin¹, WU Jun², HUANG Cheng¹ (1. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract Based on the present status of invasion of alien fishes, the importance, necessity and applicability of a risk assessment system for invasion of alien fishes was addressed. On the basis of status surveys, literature review and expert consultation, a quantitative risk assessment system for invasion of alien fishes is designed, consisting of 5 first-grade indicators, 12 second-grade indicators and 44 third-grade indicators, as well as weight of each indicator in this system. Examples were cited to explain how to use the system.

Key words invasive species; alien fish; invasion risk assessment; indicator system

全球化的外来生物入侵问题导致了日益严重的地区特有物种衰竭, 生物多样性丧失, 生态环境变化和经济损失^[1-2]。我国地跨 5 个气候带, 绵长的海岸线和发达的内陆水系为大多数外来鱼类提供了适合的栖息环境。资料显示, 引进我国的有记录的外来鱼类达 89 种^[3], 常见的外来观赏鱼类达 103 种^[4], 中国境内异地引种鱼类达 26 种^[5]。频繁的外来鱼类引种加剧了我国外来鱼类入侵的进程, 盲目的鱼类引种已导致云南滇池、洱海等高原湖泊原有的鱼类区系受到严重威胁^[6]。

有关外来鱼类入侵的研究已日益受到重视。潘勇等综述了国内外鱼类入侵的历史及途径^[7], 提出了鱼类入侵的过程、机制及研究方法^[8]。熊飞等^[9]研究发现外来鱼类通过“下行效应”产生的连锁生态效应对抚仙湖土著鱼类产生了负面影响, 并提出了外来鱼类入侵的防治对策。

对外来物种入侵风险进行有效评估是防止入侵的最有效手段之一。近年来, 国内外相关研究不断发展, 如欧健等^[10]以互花米草入侵风险评价为例建立了厦门地区外来植物入侵风险评价指标体系及评价方法, WU 等^[11]建立了斑马贝在圣克罗伊盆地入侵危害的决策模型, 丁晖等^[12]提出了外来物种风险评估的指标体系和评估方法, 胡隐昌等^[13]和马英

等^[14]针对外来水生动物的入侵风险评估系统进行了研究, 这些研究皆为笔者建立外来鱼类风险评估体系提供了借鉴。

1 风险评估的前期准备

在进行风险评估之前, 应对被评估外来鱼类的物种信息 (包括该鱼种的生物学、生态学、遗传学、危害等)、引入地区的水环境信息 (包括水体基本信息、环境因子和环境干扰等), 以及该外来鱼种受人类活动影响情况 (包括人为有意或无意引入、对其防范意识和控制的技术等) 等资料作充分的收集、判别和确定, 以备风险评估时参考。

2 风险评估的指标体系

在分析和确定影响外来鱼种入侵可能性的各方面因素基础上, 将这些因素设置为若干类型和级别的可评价指标。因各级评价指标对外来鱼类入侵可能的作用程度各异, 同级指标之间并非简单的同等并列关系, 笔者通过对 10 位鱼类学和生态学专家拟

收稿日期: 2010-08-31

基金项目: 公益性行业科研专项经费项目 (200709017)

①通信作者 E-mail: wujun@nies.org

定的各级指标权重值进行统计分析, 确定了该体系中各级评估指标权重 (表 1)。

表 1 外来鱼类入侵风险评估指标体系及评分标准

Table 1 Risk assessment system for a alien fish invasion and its rating criteria

一级指标		二级指标		三级指标		不同分值所对应的评估标准						
名称	权重	名称	权重	名称	权重	0	1	2				
入侵历史与分布现状	0.15	入侵历史	0.60	是否存在入侵史 (P_{111})	0.10	否		是				
				对入侵地区本地种的影响 (P_{112})	0.50	降低 0~10%	降低 10% 以上	至少 1 种本地种灭绝				
				对入侵地区生态环境的影响 (P_{113})	0.25	不显著	显著	极显著				
				对入侵地区经济贸易的影响 (P_{114})	0.15	不显著	显著	极显著				
				评估地区分布情况	0.40	人工养殖规模 ¹⁾ (P_{121})	0.15	0~0.1%	0.1%~2.0%	>2.0%		
						人工养殖分布 (P_{122})	0.15	高度集中	比较集中	广泛分布		
						自然生态系统中的分布 (P_{123})	0.70	未发现	偶见	常见		
						环境适应能力	0.55	对水温的适应情况 (P_{211})	0.20	不适应	部分适应	完全适应
				定殖与建群的可能性	0.20	环境适应能力	0.55	对水化因子的适应情况 (P_{212})	0.20	不适应	部分适应	完全适应
								对水文条件的适应情况 (P_{213})	0.15	不适应	部分适应	完全适应
存在天然饵料资源的情况 (P_{214})	0.10	无	存在					充足				
存在有效天敌的情况 (P_{215})	0.15	较多	较少					无				
存在竞争压力的情况 (P_{216})	0.10	高	较高					较低				
遗传多样性高低 (P_{217})	0.10	很低	较高					极高				
生长繁殖能力	0.45	生长速度 (P_{221})	0.10					缓慢	一般	迅速		
		初次性成熟年龄 (P_{222})	0.30					>2 a	1~2 a	<1 a		
		繁殖次数 (P_{223})	0.35					每年或多年 1 次	每年 2~4 次	每年 4 次以上		
		年繁殖量 (P_{224})	0.10					低	中	高		
		繁殖方式 (P_{225})	0.10	两性繁殖	存在性逆转	单性繁殖						
育幼行为 (P_{226})	0.05	无	一般护幼行为	强烈护幼行为								
传播与扩散的可能性	0.20	个体易扩散性	0.35	个体形态特征可分辨程度 (P_{311})	0.20	易分辨	较难分辨	极难分辨				
				繁殖体形态特征 (P_{312})	0.30	浮性卵	黏附活动物体的黏性卵	黏附固定物体的黏性卵				
				个体或繁殖体在运输环境的存活率 (P_{313})	0.10	0~5%	>5%~50%	>50%				
				迁徙范围 (P_{314})	0.40	定居	一定范围	长距离迁徙				
				环境易扩散性	0.25	水域可流通性 (P_{321})	0.65	封闭水系	存在一定流通性	流通性强, 水系发达		
						水域受自然干扰次数 (P_{322})	0.35	极少	偶尔	频繁		
						人为传播的可能性	0.40	被目的性引种与传播的程度 (P_{331})	0.45	较低	一般	较高
				评估区渔业水产业发展的程度 (P_{332})	0.30			较低	一般	较高		
				其他人活动强度 (P_{333})	0.25			较低	一般	较高		
				影响与危害的评估	0.25			对本地物种的影响与危害	0.60	繁殖干扰 (P_{411})	0.30	无干扰
捕食危害 (P_{412})	0.35		广食性			专食性						
竞争压力 (P_{413})	0.20	无竞争	干扰式竞争			剥夺式竞争						
是否为病原体的媒介动物 (P_{414})	0.15	否	是									
对环境的影响与危害	0.10	对自然景观的影响 (P_{421})	0.40			无	一定程度破坏			较大程度破坏		
		对水环境质量的影响 (P_{422})	0.60			无	一定程度降低			较大程度降低		
对人类的影响与危害	0.30	是否为人畜病原体的媒介动物 (P_{431})	0.40			否	是					
		个体及其分泌物对人畜的危害 (P_{432})	0.30			无	一定危害			较大危害		
		对经济活动的影响 (P_{433})	0.30			无或较低	一般			较高		
预防与控制的难度	0.20	预防入侵的难度	0.50			引入渠道的规范性 (P_{511})	0.35			较高	一般	较低
				使用程序的规范性 (P_{512})	0.35	较高	一般	较低				
				公众对该外来鱼入侵的防范意识 (P_{513})	0.30	很强	一般	无或较低				
		控制入侵的难度	0.50	现有控制技术 (P_{521})	0.50	存在简便的控制方式	存在复杂的控制方式	没有可行的控制方式				
				控制所需成本 (P_{522})	0.20	无或较低	较高	极高				
				控制造成的负面效应 (P_{523})	0.30	无或较低	一定	较高				

1) 占水产养殖总面积比例。

根据生物入侵及控制的发生过程, 该体系设立了 5 个一级指标、12 个二级指标和 44 个三级指标, 并就每个三级指标给出 3 档不同分值 (0、1、2) 所对应的评估标准。在此基础上, 结合风险评估前期准备过程中搜集的资料, 可对每个三级指标打分。风险评估指标体系及评分标准见表 1。

3 风险评估总分值的计算

风险评估总分值的计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \sum_{k=1}^n \alpha_{ijk} P_{ijk} \quad (1)$$

式 (1) 中, W 为外来鱼类入侵风险评估总分值; α_i 为一级指标的权重分值; α_{ij} 为二级指标的权重分值; α_{ijk} 为三级指标的权重分值; P_{ijk} 为三级指标的评估值; n 为第 i 个一级指标下的第 j 个二级指标下的三级指标个数; m 为第 i 个一级指标下的二级指标个数。

根据外来鱼类入侵风险评估总分值 W , 可确定外来鱼类的风险级别和相应的管理措施 (表 2), 3 类风险级别的判定标准则依据使用该体系对若干种已知具风险和无风险的外来鱼作出的评分结果进行分析而确定。

表 2 风险评估总分值 (W)、风险级别及管理措施的对照
Table 2 Total score of risk assessment (W), risk grades and management measures

W 值	风险级别	管理措施
[0, 0.700)	可接受	可引进
[0.700, 1.000)	一定风险	需进一步获取信息, 采取防范监控措施
[1.000, 2.000]	不可接受	入侵风险高, 禁止引进

4 风险评估的应用举例

以尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) (以下简称罗非鱼) 在海南和江苏的入侵风险评估为例说明该指标体系的应用, 其三级指标的具体分值见表 3。

受篇幅所限, 笔者仅举例说明三级指标的评分方法。依据文献 [8-15], 罗非鱼存在入侵史, 因此无论是在江苏还是海南, P_{111} 分值均为 2.0。根据实地调查可知, 在海南, 罗非鱼被广泛养殖, 不仅人工养殖面积超过全省水产养殖总面积的 2%, 而且野外也广泛分布; 而在江苏, 罗非鱼只有在人工养殖条件下才能够自然越冬, 其养殖基地仅限于南京、连云港、徐州等地, 其养殖面积不及全省水产养殖总面积的 0.1%。据此, P_{121} 和 P_{122} 在海南的分值均为 2.0, 在江苏的分值均为 0。罗非鱼对海南的水温完全适

应, P_{211} 分值为 2.0 而在江苏地区由于冬季水温过低, 罗非鱼不能自然越冬, P_{211} 分值为 0。

表 3 尼罗罗非鱼在海南和江苏的入侵风险评估体系三级指标分值

Table 3 Values of the three grades of indicators of *Oreochromis niloticus* in Hainan and Jiangsu in the risk assessment system

指标名称	指标代码	不同省份指标分值	
		海南	江苏
是否存在入侵史	P_{111}	2.0	2.0
对入侵地区本地种的影响	P_{112}	1.0	1.0
对入侵地区生态环境的影响	P_{113}	1.0	1.0
对入侵地区经济贸易的影响	P_{114}	1.0	1.0
人工养殖规模 ¹⁾	P_{121}	2.0	0
人工养殖分布	P_{122}	2.0	0
自然生态系统中的分布	P_{123}	2.0	0
对水温的适应情况	P_{211}	2.0	0
对水化因子的适应情况	P_{212}	2.0	1.0
对水文条件的适应情况	P_{213}	2.0	0.5
存在天然饵料资源的情况	P_{214}	2.0	1.0
存在有效天敌的情况	P_{215}	1.0	1.0
存在竞争压力的情况	P_{216}	1.0	1.0
遗传多样性高低	P_{217}	0.5	0.5
生长速度	P_{221}	2.0	0.5
初次性成熟年龄	P_{222}	2.0	2.0
繁殖次数	P_{223}	2.0	1.0
年繁殖量	P_{224}	2.0	1.0
繁殖方式	P_{225}	0	0
育幼行为	P_{226}	2.0	2.0
个体形态特征可分辨程度	P_{311}	1.0	0
繁殖体形态特征	P_{312}	1.0	1.0
个体或繁殖体在运输环境的存活率	P_{313}	2.0	2.0
迁徙范围	P_{314}	1.0	1.0
水域可流通性	P_{321}	2.0	0
水域受自然干扰次数	P_{322}	2.0	0.5
被目的性引种与传播的程度	P_{331}	2.0	2.0
评估区渔业水产业发展的程度	P_{332}	2.0	2.0
其他人为活动强度	P_{333}	1.0	0
繁殖干扰	P_{411}	1.0	0.5
捕食危害	P_{412}	1.0	1.0
竞争压力	P_{413}	1.5	1.0
是否为病原体的媒介动物	P_{414}	0	0
对自然景观的影响	P_{421}	0.5	0.5
对水环境质量的影响	P_{422}	0	0
是否为人畜病原体的媒介动物	P_{431}	0	0
个体及其分泌物对人畜的危害	P_{432}	0	0
对经济活动的影响	P_{433}	2.0	0.5
引入渠道的规范性	P_{511}	2.0	1.0
使用程序的规范性	P_{512}	1.0	1.0
公众对该外来鱼入侵的防范意识	P_{513}	2.0	2.0
现有控制技术	P_{521}	2.0	0
控制所需成本	P_{522}	2.0	0
控制造成的负面效应	P_{523}	2.0	0

1) 占水产养殖总面积比例。

罗非鱼是典型的性成熟早、产卵周期短鱼类。

其在海南平均每年可繁殖 10 次以上,而在江苏,由于水环境的原因,每年仅繁殖 3~5 次,且生长速度明显慢于热带地区,故 P_{221} 在海南和江苏的分值分别为 2.0 和 0.5, P_{223} 在两地的分值分别为 2.0 和 1.0。罗非鱼具有口腔孵育幼鱼的习性,属于强烈的护幼行为,故 P_{226} 在两地的分值均为 2.0。在海南,罗非鱼广泛分布于自然水域,海南的自然水系发达,流通性强,故 P_{321} 分值为 2.0。在江苏,罗非鱼仅生存于封闭的人工养殖水域,故 P_{321} 分值为 0。在海南,罗非鱼除了受到与养殖有关的人为干扰外,还经常被养殖用于室内观赏,故 P_{333} 分值为 1.0。在江苏,由于罗非鱼离开人类就无法生存,因此停止人工养殖,任其自生自灭就是最有效的控制方式,几乎不需要任何花费,负面影响也很低,故 P_{521} 、 P_{522} 、 P_{523} 分值均为 0。而罗非鱼在海南已经逸生出 1 种普遍存在的具有强大生存优势的野生种群,故对其的控制难度很大, P_{521} 、 P_{522} 、 P_{523} 分值均为 2.0。虽然罗非鱼在江苏不能自然越冬,但若有一定规模的群体流入野外局部水体,就能迅速扩张,给当地鱼类造成一定的干扰式竞争压力^[16],故 P_{413} 分值为 1.0。

5 讨论

该评估体系适用于不同外来鱼类对于不同区域的入侵风险评估,但同一物种引入不同地区的入侵风险评估结果可能会大不相同。经计算,罗非鱼在海南的风险总分为 1.431, 风险不可接受,而在江苏为 0.724, 略高于临界值 0.700, 存在一定入侵风险,但风险性较低;这是因为罗非鱼在江苏不能形成可越冬的野生种群,在合理引种和严格监控条件下,罗非鱼完全可以引入江苏。

物种及环境信息是入侵风险评估的主要考虑因素,如 KOLAR^[17] 就是通过物种生活史和环境耐受性的特征来辨识与已入侵物种具有相似性的潜在入侵物种。因此,在评估前的资料准备阶段,搜集和更新更详实的物种及地域信息显得尤为重要,CASAL^[18] 的研究为获得全球范围内最新、最可靠的引进鱼类信息提供了很好的行动建议。当现有资料不全时,可求助于基于互联网的外来物种信息共享数据库,如全球入侵物种信息网络(GISIN)^[19]、美国政府组织建立的外来入侵物种网站(<http://www.invasivespeciesinfo.gov>)和水生外来物种网(<http://nas.er.usgs.gov>)等。如果仍然缺乏待评估物种信息,则需要在严格的人为控制下,开展有针对性的外来鱼类入侵风险实验研究,以获得评估系统所需的各类参数。

国内外关于外来生物入侵风险评估的研究成果很多。早期的外来种入侵预测模型,如生态气候模型^[20],假设气候是影响物种地理分布和种群密度的最重要因子,缺乏必要的生态学基础,但该模型成功地预测了德国胡蜂在南非的入侵^[21]。PETERSON 等^[22]提出了基于生物多样性信息学的预测外来种入侵的生态位模型,该模型假定生态位具有保守性,没有考虑外来物种引入后往往会产生进化适应这个问题,此外,也不能预测入侵种对入侵地生态系统结构和功能的影响。WU 等^[11]建立了斑马贝在圣克洛伊盆地入侵危害的决策模型,KOLAR^[17]提出了利用基因演算模型预测入侵种风险等级的定量化评估工具,这些数学模型的理论依据各异,但操作技术壁垒过高。齐相贞等^[23]提出了外来种干扰模型,进而揭示了外来种入侵的动力学机制,该模型为研究入侵过程提供了一种思路,但必须在实验室条件下模拟有关参数的值,才能对指导实践起到一定的辅助决策作用。胡隐昌等^[13]对其构建的外来水生动物的入侵风险评估系统的评估指标进行了详细的描述,但对该体系的具体应用及风险等级划分依据的说明不足,可操作性不强。丁晖等^[12]报道了外来物种风险评估指标体系和评估方法,该方法具有更大的灵活性和普适性。欧健等^[10]构建的厦门地区外来植物入侵风险评价指标体系为笔者的研究提供了可借鉴的基本框架与思路,但其属于区域性外来物种风险评价,仅针对厦门地区的外来植物,不包括更易入侵的外来动物。该体系各级指标的权重采用层次分析法(analysis hierarchy process AHP)确定,不能精确地反映人的实际思维,会影响最终的判定结果。马英等^[14]采用三角模糊数数值标度计算权重的方法对层次分析法做出改进,并设计了一级指标和二级指标的相对权重,从而更加精确地反映了人的实际思维。总之,目前对外来物种入侵风险的评价方法还没有一个统一的认识,而且针对外来鱼类建立的有效、可操作的体系尚不多见。

笔者研究构建的外来鱼类风险评估体系简明,易操作,便于决策部门有效地开展外来鱼类早期预警方面的工作。评估体系中一、二级指标不仅适合鱼类,也适合其他水生生物,但三级指标的具体内容及评分标准则只针对鱼类。此外,各级指标的权重值也仅针对鱼类,例如,水禽和水兽类与哺乳类的亲缘关系更近,携带人畜共患病原体的几率及危害性更大,则 P_{421} (对自然景观的影响)和 P_{431} (是否为人畜病原体的媒介动物)权重值要比该评估体系高得多。该评估体系各级指标的权重值主要由专家经验

评定, 三级指标分值则根据专家评分法确定, 偏向于定性评估, 在定量模式方面的研究还有待进一步完善。

致谢: 感谢为建立该体系提供咨询和宝贵意见的南京大学生命科学学院陈建秀教授、吴岷教授, 中国农业科学院郭建英研究员, 江苏省淡水水产研究所潘建林研究员、唐建清研究员、周刚研究员、陆全平研究员等专家学者。

参考文献:

- [1] LEV NE JM, D'ANTONIO CM. Forecasting Biological Invasions With Increasing International Trade [J]. *Conservation Biology*, 2003, 17(1): 322- 326.
- [2] PIMENTEL D, ZUNIGA R, MORRISON D. Update on the Environmental and Economic Costs Associated With Alien Invasive Species in the United States [J]. *Ecological Economics*, 2005, 52(3): 273- 288.
- [3] 李家乐, 董志国, 李应森, 等. 中国外来水生动植物 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2007: 10- 93.
- [4] 牟希东, 胡隐昌. 中国外来观赏鱼的常见种类与影响探析 [J]. *热带农业科学*, 2008, 28(1): 34- 40, 76.
- [5] 王迪, 吴军, 窦寅, 等. 中国境内异地引种鱼类环境风险研究 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(18): 8544- 8546.
- [6] 周伟. 云南湿地生态系统鱼类物种濒危机制初探 [J]. *生物多样性*, 2000, 8(2): 163- 168.
- [7] 潘勇, 曹文轩, 徐立蒲, 等. 国内外鱼类入侵的历史及途径 [J]. *大连水产学院学报*, 2006, 21(1): 73- 79.
- [8] 潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 等. 鱼类入侵的过程、机制及研究方法 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 687- 692.
- [9] 熊飞, 李文朝, 潘继征. 云南抚仙湖外来鱼类现状及相关问题分析 [J]. *江西农业学报*, 2008, 20(2): 92- 94.
- [10] 欧健, 卢昌义. 厦门外来植物入侵风险评价指标体系的建立——以互花米草入侵风险评价为例 [J]. *台湾海峡*, 2006, 25(3): 437- 443.
- [11] WU Y G, BARTELL SM, ORR J *et al*. A Risk-Based Decision Model and Risk Assessment of Invasive Mussels [J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 243- 255.
- [12] 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.
- [13] 胡隐昌, 李勇, 罗建仁, 等. 水生动物外来物种入侵风险评估系统的建立 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(10): 113- 115.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王迪, 吴军, 窦寅, 等. 江苏水产养殖鱼类外来物种调查及其生物入侵风险初探 [J]. *江西农业学报*, 2008, 20(11): 99- 102.
- [17] KOLAR C. Risk Assessment and Screening for Potentially Invasive Fishes [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2004, 38(3): 391- 397.
- [18] CASAL CMV. Global Documentation of Fish Introductions: The Growing Crisis and Recommendations for Action [J]. *Biological Invasions*, 2006, 8(1): 3- 11.
- [19] SIMPSON A. The Global Invasive Species Information Network: What's in It for You? [J]. *BioScience*, 2004, 54(7): 613- 614.
- [20] SUTHERST RW, MAYWALD G E. A Computerized System for Matching Climates in Ecology [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1985, 13(3/4): 281- 299.
- [21] TRIBE G D, RICHARDSON D M. The European Wasp *Vespa germanica* (Fabricius) (Hymenoptera: Vespidae), in Southern Africa and Its Potential Distributions as Predicted by Ecoclimatic Matching [J]. *African Entomology*, 1994, 2(1): 1- 6.
- [22] PETERSON A T, VIEGLAND A. Predicting Species Invasions Using Ecological Niche Modeling: New Approaches From Bioinformatics Address a Pressing Problem [J]. *BioScience*, 2001, 51(5): 363- 371.
- [23] 齐相贞, 林振山. 外来种入侵的不确定性动态模拟 [J]. *生态学报*, 2005, 25(9): 2434- 2439.

作者简介: 窦寅 (1986—), 女, 江苏扬州人, 硕士生, 主要从事水生生物学方面的研究。Email: douyin.june2@gmail.com