

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2013.01.002

海洋外来物种入侵生态学研究

刘 艳, 吴惠仙, 薛俊增*

上海海洋大学, 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306

摘要: 海洋外来物种入侵已成为最为严重的全球性环境问题之一。海洋生态系统类型多样、环境复杂,其生物入侵的监测、控制与管理难度相对较大。我国对陆地外来生物的入侵已开展了较为深入的研究,但对于海洋外来生物的入侵研究仍处于起步阶段,对其入侵监测、入侵机制、入侵危害的程度以及防治等问题缺乏基础数据。本文在分析国内外海洋外来生物入侵现状的基础上,概述其入侵生态学研究形势及相关成果,包括海洋外来物种的入侵途径、入侵过程、入侵生态效应以及全球变化对入侵的影响等。海洋外来生物的入侵可能对海洋生态系统造成直接或间接的影响,如种间竞争破坏生态环境、与土著种杂交造成遗传污染、病原生物及有毒藻类导致海洋生态灾害加剧等。此外,从政策和法规、入侵风险评估、监测和公共宣传教育、生物信息系统和有效管理机制等方面提出对我国海洋外来物种入侵的防治策略。本研究为我国海洋外来物种的进一步研究提供了参考。

关键词: 海洋外来物种; 入侵生态学; 生态效应; 生物安全

The ecology of invasions by marine exotic species

Yan LIU, Hui-xian WU, Jun-zeng XUE*

Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The invasion by exotic marine species is one of the most irreversible environmental problems facing this habitat. The diverse marine ecosystems and their complex environments bring challenges in terms of monitoring, control and management of these exotic species. Studies on terrestrial biological invasion in China have been numerous; but fewer studies have focused on marine exotic species in marine environment near China. Most marine exotic species analyses have been published without sufficient field investigation and experimental data. The lack of basic data regarding hazards assessment, prevention and control measure analyses remains the main challenge in those studies. In this paper, we analyzed the current situation, pathways, process and ecological effects of invasions and effects of global changes on invasions by marine exotic species. The exotic marine species have produced a great deal of negative impacts on the marine ecosystem. They compete or mate with native species, introduce pathogens and toxic algae that will directly or indirectly damage the marine ecosystem. At last, the paper highlights the need to develop databases and information management system, risk assessment methodologies and plans, continue research, publish results, and develop education materials for the general public. This paper provided direction for further research in China.

Key words: exotic marine species; ecology of invasions; ecological effect; biosafety

海洋占地球总面积的 71%, 是地球上最大的水体。浩瀚的海洋为人类提供了丰富的资源和宝贵的能源,但它同时是一个开放的生态系统,是众多污染物汇集之地。随着世界贸易和经济全球化的发展,海洋运输日益频繁,海洋外来物种(exotic marine species)的传播与入侵日趋严重。海洋外来物种是指出现在其过去或现在的自然分布范围及扩散潜力以外的海洋物种、亚种或以下的分类单元

(杨圣云等,2001)。当海洋外来物种在自然或半自然生态系统或生境中建立了种群,改变或危害本地生物多样性的时候,就成为外来海洋入侵种(exotic marine invasive species)(石红旗等,2005)。

外来物种入侵已被列为国际生态研究重点(Diversity,2000),同时成为世界海洋生态环境面临的四大问题(外来物种入侵、海洋污染、渔业资源过度捕捞、生境破坏)之一(杨圣云等,2001)。海洋入

收稿日期(Received): 2012-09-17 接受日期(Accepted): 2012-12-20

基金项目: 上海市科委海洋科技临港专项(10dz1210900); 上海市教委重点学科建设项目(J50701)

作者简介: 刘艳,女,博士研究生。研究方向: 海洋生态学。E-mail: nickyliu_winner@hotmail.com

* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: jzxue@shou.edu.cn

入侵物种可能是植物或动物,也可能是海洋病毒或细菌。入侵物种通过改变环境条件和资源的可利用性对本地物种产生影响,不仅使生物多样性减少,而且使系统的能量流动、物质循环等功能受到很大的影响,严重时可能会导致整个生态系统的崩溃(杨圣云等,2001)。

我国海岸线总长 18000 km,跨越 5 个气候带,生态系统类型多,这种自然特征使我国更容易遭受海洋外来生物入侵的危害。近年来,我国海洋生物入侵呈现数量增多、传入频率加快、蔓延范围扩大、危害加剧和经济损失加重的趋势,对我国海洋生态环境造成了重大影响。但我国对海洋外来种的研究多集中于有意引种造成的入侵案例。本文阐述国内外不同途径引入的海洋外来物种入侵生态学研究概况,提出对我国海洋外来生物入侵的防治策略,以期为相关研究提供参考。

1 海洋外来物种入侵现状

20 世纪 80 年代中期欧洲里海的斑马贻贝 *Dreissena polymorpha* Pallas 通过船舶压载水入侵美国的伊利湖,因伊利湖有着与欧洲相似的温度和适宜的环境,斑马贻贝迅速繁殖,并蔓延到北美五大湖和密西西比河,给美国的生态环境和经济带来巨大损失(Garton *et al.*, 1993)。据估计,仅在美国的伊利湖,在未来 10 年,商业上将损失 20 亿美元;整个渔业也将损失 20 亿美元(白敏冬等,2010)。更不幸的是,数量巨大的斑马贻贝附着在输水管道上,使发电厂和自来水公司的供水系统和其他设施不能正常运转,直接影响到人类的生活和生产。正是由于这次事件,20 世纪 90 年代美国把立法的焦点转移到了外来物种入侵方面;同时,全世界开始重视海洋外来物种的研究。1997 年,澳洲检疫局(AQIS)估计,超过 172 种生物侵入澳大利亚海域,大部分通过压载水传播,仅腰鞭毛虫 *Dinoflagellate* sp. 就造成 8000 万美元的损失,其毒素通过贝类进入人类的食物链,影响人类健康(Mackenzie, 1999)。美国西海岸的旧金山湾是世界上最大的外来入侵生物集居区,20 世纪 90 年代已发现 212 种外来生物(Cohen *et al.*, 1995)。

近年来,随着我国海洋运输事业的发展和海水养殖品种的引入,外来海洋生物也日益增多,我国正面临日趋严峻的海洋生物入侵压力。20 世纪 60 年代,原产于美国的大米草 *Spartina anglica* Hubbard

作为改良滩涂的潮间带植物被引入我国,大米草在我国东部沿海滩涂大量繁殖,严重排挤其他物种,导致近岸海洋红树林生态系统被破坏,滩涂鱼、虾、贝、藻等海洋生物大量死亡(梁玉波和王斌,2001;吴敏兰和方志亮,2005)。1990 年首次在厦门马銮湾发现原产于中美洲的沙筛贝 *Mytilopsis sallei* Reeluz,1993 年又在福建东山发现该种,大量迅速繁殖的沙筛贝将土著藤壶 *Balanus* spp.、牡蛎 *Crassostrea gigas* Thunberg 排挤,几乎占据了这些海域海岸带所有的基石与养殖设施(王建军等,1999)。目前,沙筛贝在福建部分海湾已大量繁殖,造成本土底栖生物多样性减少,对低昂地生态系统造成严重打击(梁玉波和王斌,2001;罗玮等,2001)。1997 年秋至 1998 年春我国东海海域和南海粤东海域暴发大面积赤潮,主要是球形棕囊藻 *Phaeocystis globosa* Scherffel,其引入和传播方式疑似船舶压载水携带,但尚未明确(陈菊芳等,1999;杨圣云等,2001)。据统计,2001 年前我国已从国外引进海洋鱼类 10 种、虾类 2 种、贝类 9 种、藻类 4 种、棘皮动物 1 种,无意中带入了几百种外来海洋生物(梁玉波和王斌,2001)。

全球每年因海洋生物入侵造成的直接经济损失达数千亿元(林婉玲,2008),其中,仅因压载水排放造成的入侵经济损失便高达 1000 亿美元(李俊成等,2003)。2004 年,中华人民共和国环境保护总局公布的包括海洋生物在内的生物入侵造成的直接经济损失高达 574 亿元,其中相当部分是因压载水造成。海洋入侵物种对我国生态系统、种质资源造成的间接经济损失每年达 1000 余亿元(林婉玲,2008)。

2 海洋外来物种入侵途径

海洋外来生物的传播与入侵,已成为当今海洋生物与生态研究中的一个重大问题。海洋外来生物入侵途径大致可以分为无意引入和有意引入 2 种(赵淑江等,2005)。值得注意的是,许多海洋物种并非只通过一种途径被引入,很可能通过 2 种或多种途径被引入,在时间上也并非只有一次被引入,可能通过多次被引入(赫林华等,2005)。因此,多途径、高频率的引入大大提高了海洋外来物种在新栖息地定居的可能性。

2.1 无意引进

2.1.1 船舶 (1) 船底携带外来附着生物。海洋

生物通过海流携带和自身游泳能力,形成了现有生物区系的基本格局。世界各大洋受到大陆阻隔、水温、洋流、冲淡水等制约因素,形成了各自特有的土著生物群落,并且这些制约因素影响了本地种的进一步扩散(徐海根等,2004)。船底携带使营附着生活的物种得以进一步扩散,成为新栖息地的外来物种。

(2)船舶压载水。20 世纪初以来,船舶压载水已成为海洋外来生物入侵的一个重要媒介(Barrett-O'Leary, 1998; Carlton, 1985; Clare *et al.*, 1997)。船舶压载水和船底沉积物中有大量的浮游植物、浮游动物、无脊椎动物幼虫、鱼卵和仔稚鱼。船舶在不同海域往来的同时,不同海区的压载水被四处转运,这等于船舶运输着出发地生态系统中的水生生物群体跨越大洋屏障到达另一个生态环境中(Carlton, 1993)。据报道,94%的潜在有害海洋生物通过船舶压载水被携带离开目的港(Barry *et al.*, 2000);英国海岸带的 60 个外来入侵污损生物中,至少有一半来自入境船舶排放的压载水和船体表面携带的污损生物(Clare *et al.*, 1997)。据估计,每年全球船舶携带的压载水大约有 120 亿 t,平均每立方米压载水中有浮游植物 1.1 亿株(Mackenzie, 1999; Ruiz *et al.*, 2000)。1999 年国际上被确认由船舶压载水传播入侵的生物就有 500 余种(Carlton, 1999)。中华绒螯蟹 *Eriocheir sinensis* Milne-Edwards 1910 年由压载水从我国传入德国,1912 年到比利时,20 世纪 20 年代到达丹麦沿岸,30 年代在波罗的海、荷兰和法国水域均有记录(徐海根等,2004)。这种从亚洲传到欧洲的蟹(在河口咸淡水繁殖),成为欧洲破坏堤岸和网具的外来入侵种。

2.1.2 运河 运河能够连接不同的生物地理区系,部分运河因盐度或温度形成相应的阻隔带,以抑制部分生物通过运河进行扩散。但是,仍然有一些生物利用自身游泳能力突破原有的地理阻隔,顺利跨越运河并在新环境中繁衍生息。因此,运河在扩大不同洋域生物的分布上,有着重要的意义(Gollasch *et al.*, 2006)。全长 170 km 的苏伊士运河,连通了地中海和红海的生物区系;巴拿马运河连通了大西洋和太平洋的生物区系,部分广盐性生物种类能够自由穿梭于运河两端,成为另一海域的外来生物(Cohen, 2006)。

2.2 有意引入

2.2.1 水产养殖 为了海水养殖业的发展,人们有

意识地引入新的养殖种类,如鱼、虾、贝、藻等(沈国英等,2010)。多数引入种都能够产生较大的经济效益;部分物种在养殖过程中逃逸或遭人类遗弃进入自然海域,这些引入种一般对环境具有较强的耐受能力,通过生态位竞争、杂交等方式对生态环境及本地种造成巨大的影响(Naylor *et al.*, 2005)。

2.2.2 观赏性物种及食用海鲜 水族馆及海鲜市场因消费需要引入观赏性生物以及生鲜食品,而这些生物被有意或无意地释放到自然环境中,建群、生长并成为入侵生物,对海洋环境造成极大破坏(Chapman *et al.*, 2003)。如从亚得里亚海引到加利福尼亚水族馆的绿藻 *Caulerpa taxifolia* Agardh (Jousson *et al.*, 2000),通过释放孢子到当地海洋生态系统中,逐渐成为优势种并导致土著海洋植物大规模消亡。

2.2.3 科学研究活动 有些科研试验需要引入外来种,但这些生物有时会因管理不善等原因进入新栖息环境中,成为海洋系统中的入侵生物。例如,原本生活在加利福尼亚圣地亚哥盐沼中的白骨壤 *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh., 因植物生理学研究需要被栽种到新西兰(Callaway & Zedler, 2004),继而大量繁殖成为新西兰红树林中的入侵种。

2.2.4 生境修复和管理 为保滩护堤、促淤造陆、开辟海滨牧场等,许多国家在河口、港湾的滩涂区域引入了禾本植物、被子植物以及贝类(Daehler & Strong, 1996)。但是,部分植物的快速生长会严重排挤其他物种,干扰甚至威胁当地生态系统(梁玉波和王斌,2001)。近几年,美国加利福尼亚为修复河口贝床从其他海湾引入牡蛎,这些牡蛎被认定为引入其他外来种的潜在载体(Cohen & Zabin, 2009)。

3 海洋外来物种的入侵过程

Richardson *et al.* (2000) 认为,生物入侵是一个过程,这个过程需要一个物种克服各种生物及非生物屏障,其过程中各个阶段可以根据其需要克服的屏障加以定义和划分。一般入侵过程分为 3 个阶段:到达、建立、扩散,最终达到某种平衡状态(郑景明和马克平,2010)。首先,外来种从远距离区域通过各种途径被引入新区域,其中大部分个体和物种在运输途中死亡,少部分物种的个体存活下来,并成功地生长和繁殖,形成一个小群落;其次,通过运输和引入阶段进入新的生态系统后,这个小种群面

面临着因遗传多样性贫乏而导致的危机,多数物种的小种群逐渐消亡;再次,少部分种群克服了种群奠基者的瓶颈效应,建立了稳定的种群,其中有极少数的外来物种在新栖息地建群后未对当地生态环境造成威胁,其生存、繁殖不依赖新栖息地的资源,称为非入侵性外来种,而大多数外来种则会在自我维

持种群的基础上不断繁殖,在占据相当面积的生境后,继续向其他新的生境扩散,形成生物入侵现象。
有关外来种入侵过程的研究涉及生态学、进化生物学、生物地理学等多门学科的前沿领域(图 1)。因此,海洋外来物种入侵生态学的研究是一个综合性、多学科交叉的工作。

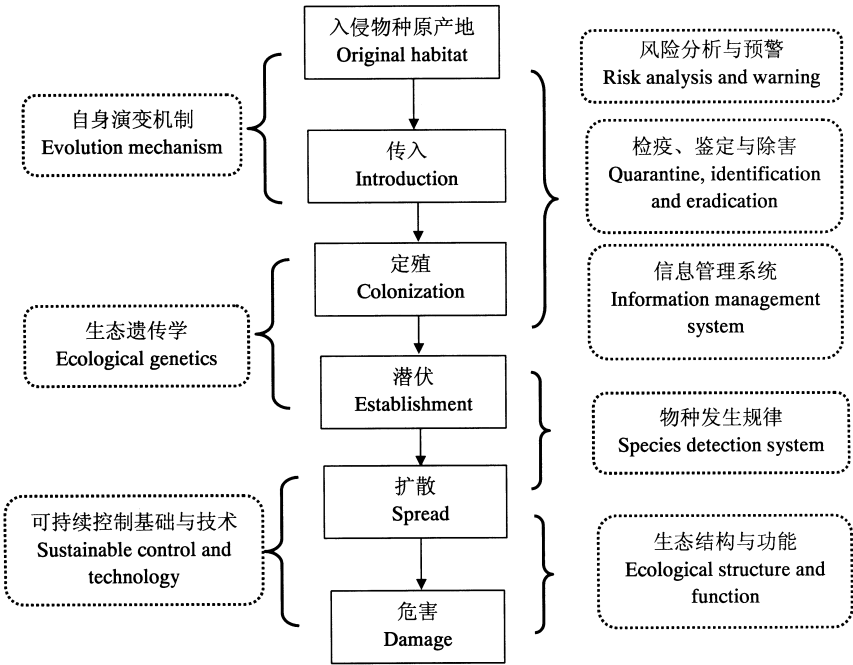


图 1 外来物种入侵过程及其所属研究领域
Fig. 1 Key research components on invasion process of exotic species

4 海洋外来物种入侵的生态学效应

外来物种对引种区域生态系统的影响大致可分为 3 种:(1)被看成是生态系统的“积极”因素;(2)对新环境没有任何明显影响;(3)对新生态系统有明显影响,有时甚至是毁灭性影响。大量研究表明,生物入侵是威胁海洋生态系统多样性的主要原因,对海洋生态系统造成的负面影响较大。

4.1 与本地生物杂交,造成遗传污染

外来种被引入后,与本土生物杂交,改变当地生态系统的遗传多样性,从而造成遗传污染,此类事件多发于海水养殖引种。例如,我国北方的土著栉孔扇贝 *Chlamys farreri* Preston 的繁殖期是 4~6 月,引入养殖的虾夷扇贝 *Patinopecten yessoensis* Jay 繁殖期是 2~4 月,自然条件下外来虾夷扇贝能与土著栉孔扇贝成功杂交获得后代(杨爱国等, 2004)。在自然海区中养殖的红鲍 *Haliotis rufescens* Swainson、绿鲍 *H. fulgens* Philippi 以及虾夷扇贝,会

对我国 2 种土著贝类(皱纹盘鲍 *H. discus* Reeve 和近江牡蛎 *Ostrea rivularis* Gould)造成严重的遗传污染。由于从国外大量、频繁引入各类鲍、牡蛎等亲体,目前我国海域已经很难找到纯种皱纹盘鲍、近江牡蛎等土著经济海洋种类(梁玉波和王斌,2001)。

4.2 带入病原生物

我国海水养殖对虾经常发生大规模流行病毒病害,其主要是因从虾病流行地区引进带病毒的苗种所致,如引进凡纳对虾 *Penaeus vannamei* Boone 时,附在病虾身上的桃拉病毒被同时引入(徐丽美等,2005)。另外,被引入的其他经济类海水养殖种也可能携带病原生物。例如:牙鲆 *Paralichthys olivaceus* Temminck & Schlegel 的亲鱼和鱼卵为我国海水养殖注入了活力,但也留下了淋巴囊肿病毒(汪岷和马广勇,2006);大菱鲆 *Scophthalmus maximus* L. 的亲鱼和苗种可携带虹彩病毒(樊廷俊等, 2006);2000 年我国北方滩涂养殖的菲律宾蛤 *Venerupis philippinarum* Adams & Reeve 仔突然大规模死

亡,主要原因是病原生物帕金虫 *Perkinsus* sp. 的危害 (Choi & Park, 1997), 帕金虫是一种世界性的海洋寄生性原生动物,极有可能由外来海洋生物宿主带入。

船舶在河口、浅水区和邻近污水排放处加装的压载水可能含有一些致病的细菌和病毒,如霍乱和伤寒等。这些病菌和病原体能直接危及人类健康,也可能进入并存活于某些水生物体如蛤、蚌、牡蛎及其他贝类中,食用后威胁人类健康 (Endresen *et al.*, 2004)。目前,每天随船周游世界的压载水生物多达 7000 种,其中包括相当数量的有毒赤潮藻类、有严格地域流行特点的病原体以及其他已界定为高风险的海洋入侵生物 (David & Perkovic, 2004)。它们即使经过数月的航程,仍可能以变异的形式存活于船舶携带的压载水和沉积物中,进而导致流行病的传播,威胁本地物种。

4.3 与土著种竞争,破坏海洋生态平衡

20 世纪 80 年代,北美大西洋海岸的一种栉水母——淡海栉水母 *Mnemiopsis leidyi* Agassiz 通过压载水被带到黑海 (Vonogradov *et al.*, 1989), 并迅速繁殖,导致当地鱼类近乎灭绝,当地水产养殖业萧条 (Shiganova, 2002)。在黑海中,其数量达到 10 亿 t, 几乎取食了所有用于喂养当地凤尾鱼 *Poecilia latipinna* Lesueur 的浮游生物,严重影响了凤尾鱼的产量 (Reeve, 1993)。1999 年 Mackenzie 证实,栉水母已经入侵里海,严重破坏了当地的生态系统,导致里海生态系统彻底崩溃。

我国北方从日本引种的虾夷马粪海胆 *Hemacentrotus pulcherrimus* Agassiz, 从养殖笼中逃逸到自然海域后不断繁殖,不仅与土著种光棘球海胆 *Strongylocentrotus nudus* Brandt 争夺食物与生存空间,对其生存构成潜在威胁,而且经常啃食咬断海底大型海藻的根部,破坏当地海藻床,严重干扰了当地海洋生态平衡 (黄宗国和陈丽淑, 2002; Huang & Tang, 1996)。

4.4 引发有毒藻类赤潮

20 世纪 80 年代末,在澳大利亚东南部的塔斯曼水域出现了 3 种外来的有毒甲藻,分别为链状裸甲藻 *Gymnodinium catenatum* Graham、链状亚历山大藻 *Alexandrium catenella* Whedon & Kofoid 和微小亚历山大藻 *A. minutum* Halim, 均为产麻痹性贝毒素 (paralytic shellfish poisoning, PSP) 的甲藻种 (Hal-

legraeff *et al.*, 1988)。随后在澳大利亚的霍巴特港口、墨尔本港口以及阿德莱德港口暴发了有毒甲藻赤潮,产生的甲藻毒素积累在牡蛎、贻贝和扇贝体内,食用这些贝类会导致人患麻痹性神经中毒症,严重时致人死亡。澳大利亚对船舶压载水进行了广泛的检测,发现船舶压载水中含有大量可以成功培养的硅藻 (包括可以产毒的硅藻拟菱形藻 *Pseudo-nitzschia* sp.) (Forbes & Hallegraeff, 1998)。其中,由日本和韩国进入澳大利亚的船舶一个压载水舱沉积物中,约含有 3 亿个活的塔玛亚历山大藻 *A. tamarense* Lebour 孢囊,由此推断,有毒塔玛亚历山大藻可能通过船舶压载水及其沉积物从日本和韩国入侵澳大利亚水域 (Hallegraeff & Bolch, 1992); 而微小亚历山大藻则是由压载水从地中海传播而来 (Scholin & Anderson, 1991)。这些有毒甲藻的繁殖使澳大利亚水产养殖业遭受了巨大的经济损失。由于水域相连,新西兰很快出现了 PSP 中毒事件。Ruiz *et al.* (1997) 提出,压载水已成为有毒、有害藻华全球传播的一个最重要途径。

5 全球变化与海洋外来生物入侵

全球变化的概念于 20 世纪 80 年代中期被提出,它是指由自然和人为因素引起的、影响地球系统功能的全球性的变化。按照国际地理与生物圈计划的定义,全球变化内容包括大气成分变化、全球气候变化、土地利用和土地覆盖变化、人口增长以及荒漠化与生物多样性变化等 (IGBP, 2001)。全球化进程使得区域和全球性的生物入侵过程及其危害备受关注,在此意义上,生物入侵本身就是全球变化的一部分 (Mooney & Hobbs, 2000; Occhipinti-Ambrogi, 2007)。一方面,生物入侵会加剧土著生物多样性丧失、生态系统崩溃以及生境均质化等进程 (Canadell *et al.*, 2007; Nunez *et al.*, 2010); 另一方面,生物入侵也会受到全球变化其他过程的影响,如大气 CO₂ 浓度升高、生物地球化学循环的改变、全球气候变化、海平面升高等可能导致生物入侵进一步加剧 (Bradley *et al.*, 2010)。全球变化的诸多要素中,CO₂ 浓度增大、温室效应引发的海平面上升、富营养化等对海洋生态系统的影响更为直接 (Wieski *et al.*, 2010)。Gritti *et al.* (2006) 的模拟试验结果表明,在全球变化的大背景下,地中海沿海区域所有生态系统在不远的将来都将被外来种主导。

6 防止我国海洋外来物种入侵的对策

6.1 完善海洋外来生物引进的政策和法规

目前,我国与海洋外来物种有关的法律法规主要是从关注人类健康和农业安全生产的角度出发,未充分包含入侵物种对生物多样性和生态环境破坏的相关内容,与从保护生物多样性角度控制外来物种的目标相差甚远,对预测、监测和早期控制等方面也未充分重视。因此,现有法律体系范围迫切需要延伸至有关生物多样性保护的领域,并将生态系统健康观念引入外来物种控制的法律体系(赵淑江等,2005)。

压载水问题研究的先行国家所制定的相关法律法规都是在广泛调查研究和评估的基础上产生的,如美国的《外来水生有害物种防治与控制法》、《国家入侵物种法》,加拿大的《加拿大环境保护法》,澳大利亚的《检疫法规》(McConnell, 2002)。这些法规和人们的共识促成了国际压载水管理大会于2004年2月公布了一个新的公约,即《国际船舶压载水及沉积物控制和管理公约(草案)》。我国作为国际海事组织(IMO)成员国,以及国际贸易和航运大国,应根据压载水携带外来入侵生物的情况,进一步协调并细化相关法律法规,使船舶压载水的管理和控制真正实现有法可依。

6.2 对海洋外来物种实施风险评估

外来物种是否已成为入侵种,需要通过风险评估才能确认。目前,迫切需要建立一个海洋外来物种入侵风险评估体系,需要就海洋外来物种对环境、生态和经济的影响,特别是对环境的影响,制定一个入侵风险的评估体系,以用于当地管理部门控制当地外来物种、进行早期预警、确定监测重点对象、制定控制决策。

由于外来物种入侵导致的危害发生于生态系统水平、景观水平及区域水平上,其风险评价应是大范围的。但是,物种层次的生态风险评价是生态系统风险评价的基础。因此,应分析引入物种的表型或生理特征及入侵能力、繁殖能力、竞争能力、生态学影响等,测定其合适度、种群增长速度,对本地环境有关方面进行描述,包括栖息地类型、当地生物多样性、主要的作用过程、自然或人为干扰情况以及海洋气候和海水条件等。同时,将生物安全风险评估的模式引入海洋外来物种风险评估,使用归

纳风险评价方法和物种入侵的统计学模型,建立定性、定量评估方法,对海洋入侵种进行预测,较为客观地体现海洋外来物种入侵实际危害与评估值的相互关系(向言词等,2002;朱琳和佟玉洁,2003)。将评估体系和评估模式与软件程序结合,利用环境数据和地理信息系统(GIS),采用层次分析法的模型,对可能的被入侵区域进行预测,从而为管理者提供可视化的海洋外来入侵种的入侵风险区域(朱琳和佟玉洁,2003)。

目前,海洋外来物种入侵风险评估方法主要有综合指数法、层次分析法(AHP)以及分析建模。其中,分析建模可以通过整合分析各类参数,对不同区域的入侵进行针对性的评估,是相对应用最广的一种评估方法。R-D模型(reaction-diffusion models)可能是在生物入侵方面应用最广泛的模型(Levin, 1992)。生物与环境之间的相互作用和随机效应对海洋外来物种入侵的速率和格局影响很大,而该模型的不足之处就是未将生物习性、环境异质性和随机效应等因素考虑在内,因此,影响了R-D模型预测的准确性;此外,这个模型只能预测入侵速率,而不能预测入侵格局。在对R-D模型不足之处进行修改的基础上产生了许多模型,这些模型大多只是对特例进行预测(石红旗等,2005)。Hengeveld (1994)考虑到R-D模型的不足,对其进行修改,把与生活史和传播有关的参数引入模型,并将空间、生态过程和随机效应参数引入SES模型(spatially explicit simulation models),该模型被用于预测植物的入侵,确定外来物种个体的空间位置,这有利于对植物行为的特性进行模拟,其预测结果可作为地理信息参数,与GIS联系起来,进行进一步分析预测。

6.3 重视海洋外来生物的监测及公众宣传教育

对于海洋外来生物需要建立特定的海洋生态监测体系,对各类引进的海洋生物的种类、数量、分布及其对其他生物和环境造成的影响实行有效的跟踪监测。外来物种现代快速检测与监测技术融入了生物化学、分子生物学、生物芯片等新的技术与方法。海洋外来生物的检测及监测对象,主要包括微生物、藻类、浮游生物以及附着生物,针对不同的研究对象可以应用免疫学检测方法和以DNA为基础的检测技术。同时,监测工作应突出重点,特别是对于封闭性海湾、岛屿、泻湖等生态脆弱、敏感

区域,要加大监测力度;对港口船舶压载水的排放与处置,应予以重点监视和控制,确保按规定进行。此外,还要采取多种宣传教育方式,提高沿海地区政府有关部门和社会各界对引进海洋生物造成的危害树立防范意识。

6.4 建立海洋外来生物信息系统和有效的管理机制

对海洋外来生物加强管理是预防其危害的第一要务。我国海洋生态保护涉及海洋渔业、海事、海关等部门,各行业主管部门、研究机构应建立海洋外来物种信息系统,全面掌握海洋外来入侵种的综合信息,编制入侵物种目录,建立与国际研究机构交流合作的渠道(朱泽闻和赵文武,2004)。对我国海洋土著生物和外来生物的分布和数量等基础资料进行共享,并及时互相沟通,为涉海行业管理部门提供决策支持。涉海行业管理部门之间要相互配合,积极采取措施,预防和控制海洋外来生物的危害,使目前我国海洋生态环境不断恶化的趋势得以遏制。

7 研究展望

目前,我国海洋外来物种入侵生态学的相关研究刚刚起步,对于我国海洋入侵生物的现状及其危害还没有一个比较确切、一致的看法。海洋生物入侵生态学的研究应包含入侵机理、入侵途径、进化方向的研究与管理、治理及利用等内容,并与海洋生物保护、生态系统恢复等相结合,将海洋入侵生物的扩散、危害限制到最小程度。

对于海洋入侵种特性的研究仍然是入侵生态学研究的第一热点,应在深度和广度上继续推进。今后除了对海洋外来种的生物特性进行比较研究外,还需要更多的试验研究。比较研究能为理解海洋外来生物入侵提供新的启示,而试验研究则是检验生物入侵假说、揭示生物入侵机制的有效手段。此外,海洋入侵种的生物控制、种间关系、进化生态学、生境的可入侵性以及全球变化与海洋生物入侵的交互作用等,都是在海洋外来物种入侵生态学研究需要重视的问题。

海洋生物入侵的研究带动了海洋生态学几个关键领域的快速发展,如进化生态、群落中种间的协同进化、种间关系、群落的组合理论等;同时,海洋入侵生态学催化了历史上相互隔离的研究领域和亚学科的有机融合(Callaway & Maron,2006),如

入侵成功常被归因于外来种在新地区中某些调节因素的释放或改变(Hieero *et al.*,2005)。因此,未来研究的突破点可能会出现在比较生物地理学方面,以此推动入侵机理的相关研究。目前,对海洋生物入侵的研究已经从一种应用性的研究转变为生态学核心元素的研究,并为相关学科前沿问题的研究提供了前所未有的新机遇。

参考文献

- 白敏冬,张小芳,杨波. 2010. 海洋外来生物入侵性传播及其防治研究进展. 中国基础科学, (5): 3-7.
- 陈菊芳,徐宁,江天久. 1999. 中国赤潮新纪录种——球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*). 暨南大学学报:自然科学版, 20(3): 124-129.
- 樊廷俊,王丽燕,耿晓芬,丛日山,李明玉,于秋涛,杨秀霞. 2006. 大菱鲆红体病虹彩病毒体外增殖条件的研究. 中国海洋大学学报:自然科学版, 36(5): 767-774.
- 赫林华,石红旗,王能飞,陈靠山. 2005. 外来海洋生物的入侵现状及其生态危害. 海洋科学进展, 23(Suppl): 121-126.
- 黄宗国,陈丽淑. 2002. 台湾省两个港湾污损生物初步研究. 海洋学报, 24(6): 92-98.
- 李俊成,聂维忠,李德昕,常征. 2003. 国际航行船舶压舱水生物监测调查报告. 中国国境卫生检疫杂志, 26(S1): 46-48.
- 梁玉波,王斌. 2001. 中国外来海洋生物及其影响. 生物多样性, 9(4): 458-465.
- 林婉玲. 2008. 海洋外来物种入侵法律问题研究. 大连:大连海事大学.
- 罗玮,赵先富,胡征宇. 2001. 迎接入侵种的挑战. 水生生物学报, 25(5): 516-523.
- 沈国英,黄凌风,郭丰,施并章. 2010. 海洋生态学. 北京:科学出版社.
- 石红旗,姜伟,衣丹. 2005. 外来海洋物种入侵风险评价研究进展. 海洋科学进展, 23(Suppl): 127-131.
- 王建军,黄宗国,郑成兴,林娜. 1999. 厦门和东山外来物种沙筛贝的种群动态和结构. 台湾海峡, 18(4): 372-377.
- 汪岷,马广勇. 2006. 鱼淋巴囊肿瘤病毒研究进展. 中国海洋大学学报:自然科学版, 36(5): 693-698.
- 吴敏兰,方志亮. 2005. 大米草与外来生物入侵. 福建水产, (1): 56-59.
- 向言词,彭少麟,任海,周厚诚. 2002. 植物外来种的生态风险评估和管理. 生态学杂志, 21(5): 40-48.
- 徐海根,王健民,强胜,王长永. 2004. 《生物多样性公约》热点研究:外来物种入侵、生物安全、遗传资源. 北京:科学出版社.
- 徐丽美,吴成林,邱名毅,王海贵,李丹萍,杨丰. 2005.

- 对虾桃拉病毒(TSV) RT-PCR 快速诊断技术的研究. 厦门大学学报: 自然科学版, 44(2): 264–267.
- 杨爱国, 王清印, 刘志鸿, 周丽青. 2004. 栉孔扇贝与虾夷扇贝杂交及子一代的遗传性状. 海洋水产研究, 25(5): 1–5.
- 杨圣云, 吴荔生, 陈明茹, 周秋麟. 2001. 海洋动植物引种与海洋生态保护. 台湾海峡, (2): 259–265.
- 赵淑江, 朱爱意, 张晓举. 2005. 我国的海洋外来物种及其管理. 海洋开发与管理, (3): 58–66.
- 郑景明, 马克平. 2010. 入侵生态学. 北京: 高等教育出版社.
- 朱琳, 佟玉洁. 2003. 中国生态风险评估应用探讨. 安全与环境学报, 3(3): 22–24.
- 朱泽闻, 赵文武. 2004. 中国水生外来物种入侵现状和对策. 中国水产, (5): 19–22.
- Barrett-O'Leary M. 1998. *Assessing the Potential for Introduction of Non-Indigenous Species through U. S. Gulf of Mexico Ports*, LSU. Louisiana Sea Grant College Program; Louisiana State University.
- Barry S C, Hayes K R and Hewitt C L. 2000. Ballast water risk assessment: principles, processes and methods. *International Council for the Exploration of the Sea*, 65: 121–131.
- Bradley B, Blumenthal D, Wilcove D and Ziska L. 2010. Predicting plant invasions in an era of global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 25: 310–318.
- Callaway J and Zedler J. 2004. Restoration of urban salt marshes: lessons from southern California. *Urban Ecosystems*, 7: 133–150.
- Callaway R and Maron J. 2006. What have exotic plant invasions taught us over the past 20 years? *Trends in Ecology & Evolution*, 21: 369–374.
- Canadell J, Le C, Raupach M and Field C. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104: 18866–18870.
- Carlton J T. 1985. Transoceanic and interoceanic dispersal of coastal marine organisms: the biology of ballast water. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 23: 313–374.
- Carlton J T. 1993. Ballast water exchange as a means of controlling dispersal of freshwater organisms by ships. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50: 2086–2093.
- Carlton J T. 1999. The scale and ecological consequences of biological invasions in the worlds oceans // Sandulund O T, Schei P J and Viken A. *Invasive Species and Biodiversity Management*. Netherlands: Kluwer Publishers, 195–212.
- Chapman J, Miller T and Coan E. 2003. Live seafood species as recipes for invasion. *Conservation Biology*, 17: 1386–1396.
- Choi K and Park J. 1997. Report on occurrence of *Perkinsus* sp. in the Manila clam *Ruditapes philippinarum* in Korea. *Korean Aquaculture*, 10: 227–237.
- Clare E, Clark R and Sanderson W G. 1997. *Non-native Marine Species in British Waters: A Review and Directory*. Peterborough: JNCC.
- Cohen A. 2006. Species introductions and the Panama Canal. *Monographiae Biologicae*, 83: 127–199.
- Cohen A, Carlton J T and Fountain M C. 1995. Introduction, dispersal and potential impacts of the green crab *Carcinus maenas* in San Francisco Bay, California. *Marine Biology*, 122: 225–237.
- Cohen A and Zabin C. 2009. Oyster shells as vectors for exotic organisms. *Journal of Shellfish Research*, 28: 163–167.
- Daehler C and Strong D. 1996. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific estuaries, USA. *Biological Conservation*, 78: 51–58.
- David M and Perkovic M. 2004. Ballast water vamping as a critical component of biological invasion risk management. *Marine Pollution Bulletin*, 49: 313–318.
- Diversity C O B. 2000. *Invasive Alien Species*. UNEP/CBD/SBSTTA/6/INF/9.
- Endresen L, Lee-Behrens H, Brynstad S and Al E. 2004. Challenges in global ballast water management. *Marine Pollution Bulletin*, 48(7–8): 615–623.
- Forbes E and Hallegraeff G M. 1998. Transport of potentially toxic *Pseudo-nitzschia* diatom species via ballast water // John J. *Proceedings of the 15th International Diatom Symposium*. Gantner: Verlag, 509–520.
- Garton D W, Berg D J, Stoeckmann A M and Hagg W R. 1993. Biology of recent invertebrate invading species in the Great Lakes: the spiny water flea, *Bythotrephes cederstroemi*, and the zebra mussel, *Dreissena polymorpha* // McKnight B N. *Biological Pollution: The Control and Impact of Invasive Exotic Species*. Indianapolis, Indiana: Indiana Academy of Science, 63–84.
- Gollasch S, Galil B and Cohen A. 2006. Bridging divides: maritime canals as invasion corridors. *Monographiae Biologicae*, 83: 1–88.
- Gritti E, Smith B and Sykes M. 2006. Vulnerability of Mediterranean basin ecosystems to climate change and invasion by exotic plant species. *Journal of Biogeography*, 33: 145–157.
- Hallegraeff G M and Bolch C J. 1992. Transport of dinoflagellate cysts in ship's ballast water: implication for plankton biogeography and aquaculture. *Journal of Plankton Research*, 14: 1067–1084.
- Hallegraeff G M, Steffensen D A and Wetherbee R. 1988. Three estuarine dinoflagellates that can produce paralytic shellfish tox-

- ins. *Journal of Plankton Research*, 10: 533 – 541.
- Hengeveld R. 1994. Small-step invasion research. *Trends in Ecology & Evolution*, 9: 339 – 342.
- Hieero J, Maron J and Callaway R. 2005. A biogeographical approach to plant invasions; the importance of studying exotics in their introduced and native range. *Journal of Ecology*, 93: 7198 – 7202.
- Huang Z G and Tang S M. 1996. The exotic species along the coasts of China//Wong Y and Tam N F. *Proceeding of Asia-Pacific Conference on Science and Management of Coastal Environment*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 287 – 293.
- IGBP. 2001. About the global environmental change programme. *IGBP Science Series*, 4: 31 – 32.
- Jousson O, Pawlowski J, Zaninetti L and Zechman F. 2000. Invasive alga reaches California. *Nature*, 408: 157 – 158.
- Levin S A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73: 1943 – 1967.
- Mackenzie D. 1999. Alien invaders. *New Scientist*, 162: 18 – 19.
- McConnell M. 2002. *Globallast Legislative Review. Final Report [Standard]*. London, No G M S.
- Mooney H and Hobbs R. 2000. *Invasive Species in A Changing World*. Washington D. C. : Island Press.
- Naylor R, Hindar K, Fleming I and Goldburg R. 2005. Fugitive salmon: assessing the risks of escaped fish from net-pen aquaculture. *Bioscience*, 55: 427 – 437.
- Nunez M, Bailey J and Schweitzer J. 2010. Population, community and ecosystem effects of exotic herbivores: a growing global concern. *Biological Invasions*, 12: 297 – 301.
- Occhipinti-Ambrogi A. 2007. Global change and marine communities: alien species and climate change. *Marine Pollution Bulletin*, 55: 342 – 352.
- Reeve M R. 1993. *The Impact of Geiatinous Zooplankton Predators on Coastal and Shelf Ecosystems*. ICES Dublin.
- Richardson D M, Pyšek P, Rejmánek M, Barbour M, Panetta F D and West C J. 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 6: 93 – 107.
- Ruiz G M, Carlton J T, Gosholz E D and Al E. 1997. Global invasions of marine and estuarine habitats by non-indigenous species: mechanisms, extent and consequences. *American Zoology*, 37: 621 – 632.
- Ruiz G M, Rawlings T K, Dobbs F C and Al E. 2000. Global spread of microorganisms by ships. *Nature*, 408: 49 – 50.
- Scholin C A and Anderson D M. 1991. Population analysis of toxic and non-toxic Alexandrium species using ribosomal RNA signature sequences//Smayda T and Shimizu Y. *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea*. Amsterdam: Elsevier, 95 – 102.
- Shiganova T A. 2002. Invasion of Black Sea by the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* and recent changes in pelagic community structure. *Fisheries Oceanography*, 7: 305 – 310.
- Vonogradov M E, Shushkina E A, Musaeva E I and Al E. 1989. Ctenophore *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) (Ctenophora: Lobata) —New settler in the Black Sea. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 29: 293 – 298.
- Wieski K, Guo H, Craft C and Pennings S. 2010. Ecosystem functions of tidal fresh, brackish, and marshes on the Georgia coast. *Estuaries and Coasts*, 33: 161 – 169.

(责任编辑:杨郁霞)

