米草属植物入侵的生态后果及管理对策

陈中义 李 博 陈家宽*

(生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 复旦大学生物多样性科学研究所, 上海 200433)

摘要: 生物入侵是全球变化的重要组成部分, 可能对入侵地造成严重的经济和生态后果, 所以评价外来种入侵的生态后果是入侵生态学研究的核心问题之一。本文以米草属(*Spartina*)植物为例, 综述了其对入侵地区自然环境、生物种群、群落和生态系统的影响, 结合国际上对米草属入侵种的管理策略, 讨论了我国米草属植物管理中的一些重要问题。

关键词: 米草属, 生物入侵, 生物多样性, 潮间带生态系统, 生态后果, 管理

中图分类号: S45 文献标识码: A 文章编号: 1005-0094(2004)02-0280-10

Ecological consequences and management of *Spartina* spp. invasions in coastal ecosystems

CHEN Zhong-Yi, LI Bo, CHEN Jia-Kuan*

Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433

Abstract: Biological invasions, a significant component of global environmental change, can result in serious economic and ecological consequences. Assessing the ecological impacts of invasive plants is one of the most important issues in the study of biological invasion ecology. This paper reviews the ecological consequences of *Spartina* spp. invasions in the coastal ecosystems of the world, and discusses strategies for controlling their further range expansion. The genus *Spartina* consists of 14 species, most of which grow in coastal areas. Half of the species of the genus have successfully invaded intertidal ecosystems in coastal areas or estuaries of the world. Because these species often form dense shoot populations under favourable conditions, they can potentially alter the physical conditions of the ecosystems they invade, and have the potential to exclude native plants by competition, which in turn influences benthic fauna, and eventually results in elimination of critical foraging habitat for migratory shorebirds. Unfortunately, arresting and reversing the invasion of *Spartina* spp. may become infeasible once these species have spread and become established. Therefore, immediate and aggressive actions need to be taken to prevent further degradation and loss of the natural ecological structures and functions of coastal ecosystems, caused by *Spartina* spp. invasions. The most effective actions are to prevent *Spartina* spp. from invading new habitats or eradicate populations that have been recently established.

Key words: *Spartina*, invasion, ecological impact, ecosystem, management

生物入侵是当今全球变化的重要组成部分(Vitousek *et al.*, 1997), 不仅可能造成巨大的经济损失(Primentel *et al.*, 2000), 而且还会产生严重的生态和进化后果(Walker & Smith, 1997; Mooney & Cleland, 2001)。入侵种可以直接或间接的方式降低被入侵地区的生物多样性, 其后果是导致生态系统

结构和功能的改变, 并最终导致生态系统退化从而降低其生态功能(McKinney & Lockwood, 1999)。随着全球经济一体化, 国际间人流和物流日益增加, 生物入侵问题已成为人们所共同关心的问题, 入侵生态学已发展成为当代生态学的一个重要分支(李博, 陈家宽, 2002)。

基金项目: 国家自然科学基金(30370235)和教育部重点项目(104074)资助

收稿日期: 2003-05-20; 接受日期: 2004-01-09

作者简介: 陈中义, 男, 1965年出生, 副教授, 在读博士研究生, 主要研究入侵生态学。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jkchen@fudan.edu.cn

自 1958 年 Elton 的专著《动植物入侵的生态学》(Elton, 1958)出版以来,特别是近二十年来,生物入侵生态学领域发展迅速。概括起来,生物入侵的研究主要是围绕生物入侵的基本过程来进行,即研究外来种的入侵性(invasiveness,即成为入侵种的能力)、生境的可入侵性(invisability,生境对入侵的敏感性)、入侵的影响(入侵所造成的生态和经济后果)、入侵的预测和入侵的控制。其中入侵种的入侵性、生境的可入侵性和入侵的影响是生物入侵研究的核心问题(Alpert *et al.*, 2000)。研究外来种入侵造成的生态后果,有助于优化入侵种的管理,确定优先控制对象。

根据生物入侵的十数规律,大多数外来种对环境的影响是中性的,只有少数会造成负面影响。然而,目前还没有现成的理论框架与普遍被接受的方法来对入侵种造成的生态后果进行定量测定,因而也无法对资源管理实践进行科学的指导(D'Antonio & Kark, 2002)。Paker *et al.* (1999)认为,在地理学尺度上,有三个因素决定一个外来入侵种的总体影响,即分布的总面积、密度和单位个体的影响,同时这些因子之间以及各因子与总体影响之间存在非线性的相互作用,所以评价外来入侵种的生态影响是一项非常复杂的工作。当前,入侵生态影响的测定主要从个体、种群、群落和生态系统几个水平上进行(Walker & Smith, 1997; Paker *et al.*, 1999)。

Walker & Smith (1997)曾综合分析过植物入侵对陆地生态系统中初级生产力、营养循环、土壤水分和盐度、干扰体系(disturbance regimes)、群落结构和动态等方面产生的影响及其机制。Levine *et al.* (2003)进一步阐明了产生这些影响的机制。Groscholz (2002)从物种、群落和生态系统水平上对海岸带生物入侵的生态和进化后果进行了总结。然而,就我们所知,有关植物入侵对河口湾和海岸潮间带生态系统的影响尚未进行过全面的总结。这里我们以米草属植物为例,分析其入侵的生态后果,并讨论有关其管理中的一些问题。

米草属(*Spartina*)下文统一简称米草)隶属于禾本科虎尾草族,起源于北美东海岸和墨西哥湾。该属于 1879 年由 Schreber 命名,全球共有 14 个种,均为多年生耐盐植物,大多数生长在海岸带或河岸带(Mobberley, 1956),其最适的生境为河口湾。米草在其原产地是盐沼中的常见优势种,在生态系统

中具有重要的生态功能(Landin, 1991; Simenstad & Thom, 1995)。由于无意带入或有意引种,米草的一些物种已被传到世界许多地区和国家。从扩散情况来看,7 种米草被认为具有很强的入侵性(Daehler & Strong, 1996),其中大米草(*S. anglica*)和互花米草(*S. alterniflora*)是全球性的入侵种,在国际上已得到了广泛的关注和研究。

自 20 世纪 60 年代以来,我国先后从英国和北美引进了大米草、互花米草、狐米草(*S. patens*)和大绳草(*S. cynosuroides*)4 个种,其中大米草、互花米草和狐米草在国外的一些地区均表现出很强的入侵性。我国引种米草的目的是为了在沿海滩涂进行生态建设,例如,利用大米草和互花米草的良好促泥沙沉降功能和高生产力特性,人们在沿海滩涂大量栽种,用以固堤护岸、防浪促淤、围垦造陆和发展牧草等(Chung, 1993)。当初,人们主要注重于米草带来的经济效益(Qin *et al.*, 1997; 1998),而对于米草的入侵性及其危害性还没有足够的认识,有关米草的入侵生态学研究并未受到重视。迄今为止,人工引种米草的工作仍在一些地区进行,直到 2003 年初国家环保总局才将互花米草列入我国入侵种的黑名单。本文侧重于总结国际上有关米草入侵的生态后果,并结合我国的实际情况,对如何管理米草提出一些初步的建议。

1 米草对入侵地区自然环境的影响

由于米草秆密集粗壮、地下根系发达,能够促进泥沙的快速沉降和淤积。在新西兰、英国、荷兰和中国所做的一系列实验表明,米草草从年均积累底泥的厚度达 1.6 – 23.3 cm(Ranwell, 1967; Bascand, 1970; Chung, 1989)。米草的生长和泥沙的快速淤积显著改变了潮间带的地形,妨碍潮沟和水道的畅通(Hubbard, 1965; Asher, 1991),从而影响了潮间带水的正常流动,甚至导致洪水泛滥(Partridge, 1987)。例如,在米草定居以前,太平洋西北部河口湾的潮间带高程变化幅度小,潮沟较浅,快速生长的米草使泥沙大量积累,导致潮间带高程的抬升,致使盐沼排水不畅(Gray *et al.*, 1991),并且在近海边缘,使地势变陡,潮沟变深(Gleason *et al.*, 1979)。另外,入侵的互花米草阻塞了旧金山海湾的防洪潮沟,从而引发了一个根除互花米草的计划(Daehler, 1996)。

成功入侵的米草还会改变土壤的理化性质。例如,光滩上栽种大米草后,土壤剖面变成黑色,土壤有机质含量明显提高(吴浩,张登辉,1985),土壤粘粒含量显著增加,表层土壤粒径显著小于相邻地点的光滩(曹豪,卓荣宗,1985)。互花米草的入侵还会影响盐沼土壤孔隙中水分的氧化还原电位。Lee *et al.* (1999)发现氧气能够通过互花米草的根系输送到底泥中,从而提高了底泥中硫化物的氧化程度。Koretsky *et al.* (2000)发现,与光滩相比,互花米草群落下土壤孔隙中水分的碱度、溶解性锰、二价铁和硫化物的浓度均较高,即互花米草提高了底泥中厌氧微生物的活性。显然,这一结果对过去仅强调互花米草根系向土壤输氧的作用提出了质疑。总之,米草的入侵改变了入侵地区的地形及土壤理化性质等自然条件,进而可能会对土著生物群落产生深刻的影响(Daehler & Strong, 1994a)。

2 米草对入侵地生物多样性的影响

2.1 竞争取代土著植物

野外观察表明,在潮间带,入侵的米草竞争能力显著大于土著盐沼植物(Scholten & Rozma, 1990; Frenkel, 1991; Callaway & Josselyn, 1992),这种非对称性竞争导致了土著植物种群分布面积的减少和种群数量明显降低。例如,实验研究表明,大米草、互花米草和 *S. densiflora* 在英国、荷兰和北美西海岸强烈排斥大叶藻(*Zostera marina*)、碱茅(*Puccinellia* sp.)、盐角草(*Salicornia virginica*)、海韭菜(*Triglochin maritimum*)、*Jaumea carnosa*、*Fucus distichus* 和加利福尼亚米草(*Spartina foliosa*)等土著植物(Corkhill, 1984; Scholten & Rozema, 1990; Callaway & Josselyn, 1992; Simenstad & Thom, 1995; Daehler & Strong, 1996)。在我国长江河口湾的启东、崇明岛、南汇和九段沙等地的潮间带,互花米草已经在土著植物海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)群落中定居和扩散。随着互花米草斑块的扩大,海三棱藨草的密度、盖度和地下球茎数量减少(Chen *et al.*, 2004),直至消失,最后形成大片单一物种组成的互花米草群落。这些处于食物网底层的土著植物被米草替代后可能会对当地生态系统的物种多样性造成显著的影响。

由此可见,入侵的米草对一些土著的植物种具有明显的负面影响。然而,由于植物竞争的复杂性,

仅有表面观察是不够的,还必须深入研究竞争的具体机制、不同环境对竞争结果的影响以及竞争的长期后果等问题,才能了解是否米草能长期保持对土著植物的竞争优势。因此有必要长期地监测,并建立模型预测米草和土著植物种群数量的时空变化。

2.2 与土著植物杂交

入侵种通过杂交和基因渗入把基因侵入到土著植物基因库中,能造成土著植物基因型的丧失,甚至造成濒危植物的灭绝,或者产生比亲本具有更强入侵性的杂种,从而导致严重的生态和进化后果(Mooney & Cleland, 2001)。

约在19世纪30年代,互花米草偶然地随压舱物从波士顿和纽芬兰之间的海港被传播到英国的南安普敦附近的Itchen河(Marchant, 1967)。在1870年左右,互花米草与土著种欧洲米草(*S. maritima*)间发生了自然杂交,产生不育种唐氏米草(*S. townsendii*)。1890年前后,不育种经过染色体加倍,产生可育的大米草。大米草的入侵能力非常强,能占领亲本不能生长的光滩(Thompson, 1991),很快占领了英国大面积的海岸线,同时土著种欧洲米草和传入种互花米草的分布区日益缩小。

20世纪70年代中期,互花米草被引入旧金山海湾,在那里除了竞争排斥外,基因渗入是它对土著种加利福尼亚米草造成威胁的另一个重要原因。在温室中进行的种间杂交实验和RAPD研究表明,在自然状况下,两个种之间能发生一定程度的杂交(Daehler & Strong, 1997)。Anttila *et al.* (1998)认为互花米草具有较大的雄性适合度,种间杂交导致加利福尼亚米草种群的基因同质化,降低了其遗传多样性。种间杂交的后代在潮间带的分布范围类似于其亲本互花米草,能分布在低潮带,这进一步加剧了互花米草对土著种加利福尼亚米草的竞争排斥作用(Ayres *et al.*, 1999)。

2.3 对无脊椎动物群落的影响

海岸潮间带底栖无脊椎动物是鸟类食物的重要组成部分,是滩涂或盐沼生态系统中食物网的重要环节。由于米草形成密集的地上和地下结构,入侵后造成潮间带环境的变化。这种变化是否会对底栖无脊椎动物群落产生负面影响一直是人们所关心的问题,这方面的研究较少,目前还没有一致的结论(Daehler & Strong, 1996)。

米草既能入侵光滩又能入侵盐沼,因此人们关

心这两种生境在被入侵前后底栖无脊椎动物群落的变化情况。一些研究表明,光滩被入侵后,米草底泥中的无脊椎动物总密度和丰富度要高于邻近的光滩(Lana & Guiss, 1991; Dumbauld *et al.*, 1997; Hedge & Kriwoken, 2000)。当然有些类群的密度并不会发生明显的改变,例如在华盛顿州 Willapa 海湾的软壳蛤(*Mya arenaria*) (Dumbauld *et al.*, 1997)。我国学者的研究也发现,在光滩上种植大米草 10 年后,底泥中大型底栖无脊椎动物的种类和数量也显著增加,其中双齿围沙蚕(*Perinercis aibuhitensis*)的密度增加极为显著(童远瑞等, 1985; 蒋福兴等, 1992)。米草盐沼已知是具有最高净初级生产力的群落之一(Gallagher *et al.*, 1980),衰老的秆被分解后,能够支持大量和多样的线虫(Alkemdæ *et al.*, 1993)以及无脊椎动物的幼体(Daehler & Strong, 1996)。对于这些研究结果, Daehler & Strong (1996)认为,与光滩相比,入侵的米草增加了生境的复杂性,从而增加了底栖无脊椎动物的数目和多样性;而且栖息在米草底泥中的无脊椎动物也较少受到涉禽的捕食。

然而,并不是所有的研究结果均表现出一致的趋势。例如, Jackson 研究了英国 Sour 河大型底栖无脊椎动物群落,发现大米草盐沼上的物种丰富度比邻近光滩中的要低(Long, 1983)。Luiting *et al.* (1997)在研究 Willapa 海湾大型底栖无脊椎动物群落时,也发现互花米草斑块的底泥中无脊椎动物种群数量要小于潮间带光滩,同时其物种的丰富度也显著降低。在巴西的研究也发现,取食悬浮物的无脊椎动物(suspension feeders)的密度与米草的出现呈负相关(Lana & Guiss, 1991)。

盐沼被米草入侵后,底栖无脊椎动物群落的变化很少受到重视。在澳大利亚塔斯马尼亚岛 Little Swanport 河口的研究表明,无脊椎动物的丰富度和总的多度在土著种和米草占优势的盐沼之间没有显著的差异(Hedge & Kriwoken, 2000)。吴纪华^① (2001)在比较崇明东滩潮间带中部的互花米草和海三棱藨草底泥中的线虫群落时,发现线虫的种类数、数量、生物量、多样性、均匀度和优势度等均没有显著差异,从而认为互花米草代替海三棱藨草群落不会对线虫群落产生影响。

由此可见,米草入侵潮间带不同的生境后对底栖无脊椎动物群落有不同的影响:入侵光滩后,可能造成底栖无脊椎动物群落多样性的增加或降低;入

侵盐沼后,可能不会影响底栖无脊椎动物群落多样性。由于底栖无脊椎动物群落具有季节性变化,加之生境被米草入侵的历史不同也可能影响研究结果,因此需要从不同的时间和空间尺度上进一步研究米草入侵对底栖无脊椎动物多样性,尤其是对小型底栖无脊椎动物多样性的影响。

2.4 降低涉禽种群的数量

河口湾的潮间带是涉禽的重要栖息地和觅食地,盐沼中的土著植物不仅为涉禽提供栖息地,而且其果实和地下茎等也是涉禽的食物来源,特别是开阔的光滩具有丰富的底栖动物和鱼类等,是涉禽主要的觅食场所。米草入侵后可能竞争取代土著植物,占领光滩,形成密集的单一的米草群落,从而使涉禽栖息和觅食的生境丧失,导致涉禽种群数量明显减少,这是米草入侵世界各地所造成的主要生态后果(Hubbard & Partridge, 1981; Callaway & Josse-lyn, 1992; Daehler & Strong, 1996)。

据估计,在英国的一些地区,大米草在光滩的扩散使一些鸟类种群下降了 50%。对黑腹滨鹬(*Calidris alpina*)的研究发现,大米草的蔓延会减少黑腹滨鹬的取食面积和时间,从而导致其死亡率和迁出率的上升。在大米草扩散最快的河口湾,黑腹滨鹬种群数量下降最大,在大米草数量稳定的地方,其种群数量维持不变,控制和清除大米草,会引起黑腹滨鹬迁入和种群数量上升(Gray *et al.*, 1991)。在 Willapa 国家野生生物保护区,互花米草的入侵已使水鸟越冬和繁殖的关键生境减少了 16% - 20%(Foss, 1992)。在旧金山海湾,互花米草入侵加利福尼亚米草群落,没有影响涉禽的取食,而它入侵潮间带开阔的泥滩时则会使涉禽的觅食面积大为减少(Daehler & Strong, 1996)。这些研究表明,涉禽通常不会在密集的米草群落中觅食,因此当一个地方遭受米草入侵后,也就意味着涉禽的觅食地面积减少甚至丧失,从而直接降低涉禽种群的数量(Goss-Custard *et al.*, 1995)。而米草入侵造成底栖动物群落结构的改变也会间接地影响涉禽种群的数量。

水鸟是潮间带生态系统食物网中的重要组成部分,水鸟种群数量的维持对生态系统的稳定具有重要作用。例如,水鸟可以捕食底栖动物和小型鱼类,

^①吴纪华. 2001. 崇明岛湿地围垦对线虫群落结构的影响. 复旦大学博士后研究报告

控制它们的种群数量 ;水鸟也可以取食土著植物的种子和根状茎等 ,有利于土著植物种群的扩散。因此当米草入侵造成涉禽等水鸟栖息地和觅食地减少甚至丧失后 ,水鸟种群数量下降 ,将对生态系统造成深刻影响。

3 米草入侵对生态系统的影响

如上所述 ,米草入侵造成的多方面生态后果已被逐步认识到 ,但从生态系统的角度进行全面评价的工作还不多 ,其中以在北美西海岸的 Willapa 海湾和旧金山海湾的研究较有代表性。例如 ,在 1994 – 1996 年 ,Cordell *et al.* (1998)在华盛顿海洋基金的支持下 ,系统地评估了滨海泥滩生态系统在互花米草入侵前后的功能差异。评价的内容包括五个方面 :互花米草对入侵地环境的适应和入侵后所引起的泥滩自然环境的变化 ;小型底栖动物(*meiofauna*)和底内动物(*infauna*)群落结构的变化 ;大型无脊椎动物和鱼类觅食地和栖息地的变化 ;鱼类的食物网变化 ;消费者获取有机物资源的变化。这项研究产生了一些有价值的结果 ,为互花米草的管理提供了科学依据 ;不足之处是没有直接评价互花米草入侵对水禽、涉禽和土著植物(大叶藻)的影响。

这项研究的主要结果有以下几点 :互花米草入侵泥滩后 ,没有造成底栖微藻生物量(叶绿素 *a*)、净初级生产力以及群落的呼吸作用的显著变化。底栖无脊椎动物群落中 ,分类群、总密度和营养结构也没有显著变化 ,但是在底栖无脊椎动物群落组成方面存在差异。例如 :甲壳动物(片脚类动物)在泥滩中更多 ,而昆虫和蛛形纲动物在互花米草群落中更丰富 ;在泥滩中表面沉积物的取食者密度更大 ,而在互花米草中埋藏沉积物的取食者和食肉动物更多。互花米草入侵后 ,对鱼类利用资源具有显著的影响。鱼类不在连片的米草丛中和大斑块内部活动 ,趋向于利用斑块之间的泥滩以及在互花米草上方的水体中活动。用稳定性同位素($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{N}$, $\delta^{34}\text{S}$)分析主要的初级生产者和消费者 ,结果表明 ,互花米草为滨海泥滩生物群落中的消费者提供了 2% – 50% 的有机物。根据这些结果 ,Cordell *et al.* (1998)认为 ,应全面评价互花米草入侵 Willapa 海湾的总的生态后果 ,关键是要认识到它所引起的生态系统组成和过程的变化。

根据以上的一些研究结果 ,米草入侵对生态系统造成的生态后果可以总结如图 1。

当米草入侵新的生态系统后 ,由于其抗逆性强、

图 1 米草入侵的生态后果
Fig. 1 The potential ecological impacts of *Spartina* spp. invasions on native ecosystems

生物量大、繁殖扩散能力强和竞争力强,其种群很快爆发(Thompson, 1991),从而对被入侵生态系统造成深刻的影响(图1)。当前,还没有系统评价米草入侵盐沼后,对当地盐沼生态系统的影响。因此,迫切需要选择一些河口湾地区,运用比较的方法,系统地评价盐沼被米草入侵后所引起的生态系统结构和功能的变化。

4 管理米草入侵的对策

米草入侵后,除了带来上述的一些生态后果以外,还可能产生其他方面的危害。例如,广泛蔓延的米草影响了海岸带的旅游观光、垂钓等活动,还减少了潮间带的贝类等水产养殖的面积(Kriwoken & Hedge, 2000),因而造成经济上的巨大损失。

然而,米草被引入世界各地后,也产生了许多正面的效应,包括增加潮间带土地面积、减轻海岸侵蚀、防浪护堤、增加河口湾的生产力、提供牲畜饲料(Chung, 1993; Craft *et al.*, 1999; Kriwoken & Hedge, 2000)。甚至有些鸟类能从米草的入侵中受益,例如濒危的加利福尼亚秧鸡(*Rallus longirostris*)偏好在互花米草中筑巢(Foin & Breuchley-Jackson, 1991)。

另外,与泥滩相比,米草草丛的底泥中一些底栖无脊椎动物数量明显增多(Lana & Guiss, 1991)。大米草根际土壤中有益微生物例如固氮菌、纤维素分解菌和硝化细菌等的数量明显地多于对照土壤(李爱民等, 1994)。

因此,对米草入侵的管理就存在一个权衡:是需要利用米草的正面效应,还是要控制或根除米草以降低米草入侵所带来的一系列负面效应。不同的价值取向是决定这一问题的关键。纵观国际上的研究,在20世纪60-70年代,人们主要是利用米草的一些正面效应,因而广泛引种,实施生态工程。但是由于植物入侵有时滞现象,直至现在人们才发现引入的米草种群爆发正在或将会对原有生态系统造成严重危害。

湿地具有重要的生态服务功能,世界上许多地方的河口湾具有生态上的独特性,例如,太平洋河口盐沼植物群落与同纬度的其他地方极不相同,但是这种盐沼物种之间的生态关系还很少被研究(Daehler & Strong, 1996)。

长江河口湾的崇明岛东滩、江苏盐城自然保护

区是我国生物多样性的关键地区之一,属于国际重要湿地,然而这些重要湿地目前都遭到互花米草的大肆入侵。为了发挥河口湾和海岸潮间带湿地的生态服务功能,维持生态系统的独特性和稳定性,目前,国际上更倾向于采取措施来控制或者根除米草的入侵(Daehler & Strong, 1996; Wu *et al.*, 1999)。

根据入侵米草的生物学和生态学特性,通常采用三种方法来根除或控制米草种群的进一步扩散,即机械法、化学法和生物防治法(Wu *et al.*, 1999)。机械法包括直接拔除米草幼苗、用稠密的织物覆盖小的米草斑块、连续刈割以及筑堤坝进行围堵;化学法是采用合适的除草剂来进行防除,例如,美国使用Rodeo™(草甘膦)来控制大米草、互花米草和狐米草等,可以部分地控制入侵的米草;生物防治法是寻找合适的昆虫、寄生虫以及病原菌等米草的天敌来控制米草种群爆发。例如,在英国已经发现一种专一性的麦角菌(*Claviceps purpurea*)可以大量感染大米草的花,从而减少其种子产量,因此可以作为潜在的生物控制媒体(Gray *et al.*, 1991)。此外,一种叶蝉(*Prokelisia marginata*)和玉黍螺(*Littoraiia* sp.)能啃食互花米草,但它们能否作为潜在的生物控制媒体还有待进一步的研究(Daehler & Strong, 1994b; Silliman & Zieman, 2001)。

然而,迄今为止还没有很好的方法来控制米草的扩散,主要原因是控制方法本身的效果有限而且控制的成本较高。机械移除和光饥饿致死(织物覆盖)的方法虽然相对有效,但费时费力;化学除草剂的使用也可能对生态系统中动植物的区系以及人类健康、娱乐、农业和渔业造成影响(Paveglio *et al.*, 1996; Lytle & Lytle, 1998);引进的天敌如果是外来种,可能导致潜在的生物入侵风险。在控制过程中,还必须考虑所花费的成本,因此需要运用成本-效益分析的方法。鉴于目前对米草入侵的生态后果有不同认识,同时控制成本高昂,要根除北美太平洋海岸所有的入侵米草是不现实的(Daehler & Strong, 1996; Cordell *et al.*, 1998)。Daehler & Strong(1996)指出,控制米草的入侵,一种简单有效的方法是先调查容易被入侵的地点,然后确定那里是否已经出现了入侵种的繁殖体,这样就能够在它们扩散之前,用较低的成本除去。这个策略已经成功地用于根除入侵洪堡海湾的互花米草,以及入侵Puget Sound的狐米草。

5 进一步研究的方向和我国的对策

河口和海岸潮间带是地球上特殊的生态系统，具有很强适应性的米草入侵后，到底会造成怎样的生态后果，目前还没有令人信服的结论。将来的研究首先需要研究米草在我国成功入侵的机制，确定对米草入侵敏感的区域，进一步寻找米草入侵对种群、物种、群落和生态系统造成危害的客观、可信的证据，把群落水平和生态系统水平上的影响联系起来，确定米草入侵是直接改变生态系统过程，还是首先影响群落的组成，然后才对生态系统产生危害；其次，需要研究米草入侵对生态系统功能的影响，例如，米草高生产力的输入对生态系统物质循环和能量流动的影响，环境变化和土著物种多样性的降低对生态系统功能的影响；再次，全球变化和生物入侵具有内在的关系，例如大气 CO₂ 浓度的升高、海平面上升等都可能加剧或者减缓米草对滨海生态系统的入侵，这也是未来米草入侵生态后果评价的重要问题。最后，需要整合全球的研究数据，综合分析，从而为管理米草的入侵提供科学依据和指导。

我国于 1963 年成功引入大米草，1979 年成功引入互花米草，随后又相继引入狐米草和大绳草。其中大米草和互花米草经过人工栽种和自然扩散，现在已经广泛分布在我国从南到北的海岸潮间带，两种米草总面积约为 80 万亩（钦佩等，2002）。这两种米草在我国有很好的适应性（徐国万，卓荣宗，1985；Chung，1993），种群扩散迅速（沈永明等，2002），在福建和浙江一带已经对潮间带生态系统造成了严重危害（万方浩等，2002；黄传忠等，2003）。尽管近 40 年来，米草生态工程在我国沿海地区发挥了很大的作用，取得了巨大的经济效益（Chung，1993；孙卫东，彭子成，1996；Qin *et al.*，1997；Qin *et al.*，1998；唐廷贵，张万钧，2003）；初步的观察也表明，在我国北方的辽宁、天津、河北和山东等地区，米草对环境、生物种群和人、畜没有产生侵害行为，没有发生米草生态入侵（唐廷贵，张万钧，2003）。然而考虑到米草在我国南方海岸带已经造成危害，我国滨海生态系统的多样性以及不同的利用价值，我国还没有系统地评价米草入侵产生的生态和经济后果等，再结合国际上对米草入侵的认识，在我国组织力量开展米草入侵的生态研究刻不容缓。

根据入侵生态学的基本规律，依据外来种在原产地的分布范围和过去的入侵历史，可以很好地预测它们在其他地方的入侵趋势。大米草在较高纬度的凉爽气候条件下，如在英国、法国、荷兰（Ranwell，1967）和我国北方等地快速扩散，而在如巴西、南非、新西兰北方岛屿和美国的路易斯安那州等较低纬度的地方，却入侵失败（Ranwell，1967；Bascand，1970；Aberle，1990）。互花米草和狐米草在原产地的分布都是沿大西洋海岸从佛罗里达到加拿大，分布范围广，但是互花米草耐盐范围广，而狐米草只生长在微咸水的地方。在北美太平洋海岸，互花米草和狐米草入侵的范围可以从加利福尼亚州一直到华盛顿州（Daehler & Strong，1996）。我国有辽阔的海岸带，纬度范围和北美类似，因而可以预测，在我国大米草可能会入侵北方地区，狐米草可能入侵一些河口湾，而互花米草则有可能大范围地入侵沿海地区。

当前，米草的入侵必须引起我们足够的重视。首要的问题是要研究米草入侵对我国可能造成的危害，摸清米草的分布范围以及所处的入侵阶段，根据入侵生态学的基本规律，借鉴国际上的研究成果，预测我国还有哪些潜在的对米草入侵敏感的区域，从而有效地保护好这些地方，防止米草进一步的入侵；在“种青促淤”生态工程中优先采用土著种。最后，提高公众意识和建立相关法规也是管理米草入侵的重要保证。

6 小结

米草作为实施滨海生态工程的材料，曾经在世界许多地方引种。然而，一些米草属物种具有很强的入侵性，对河口湾和海岸潮间带生态系统会造成直接或间接的负面影响。一旦米草成功入侵，要对其进行控制是极为困难的。因此，在米草入侵的早期阶段实施控制或根除计划以及保护好敏感生境，是控制米草入侵的最有效途径。

参考文献

Alkemdae, R., Wielemaker, A. and Hemminga, M. A. 1993. Correlation between nematode abundance and decomposition rate of *Spartina anglica* leaves. *Marine Ecology Progress Series*, **99**: 293 – 300.

Alpert, P., Bone, E. and Holzapfel, C. 2000. Invasiveness, invisibility and the role of environmental stress in the

- spread of non-native plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **3**(1): 52 – 56.
- Anttila, C. K., Daehler, C. C., Rank, N. E. and Strong, D. R. 1998. Greater male fitness of a rare invader (*Spartina alterniflora*, Poaceae) threatens a common native (*Spartina foliosa*) with hybridization. *American Journal of Botany*, **85**(11): 1597 – 1601.
- Asher, R. 1991. *Spartina* introduction in New Zealand. In: Mumford, T. F. Jr., Peyton, P., Sayce, J. R. and Harbell, S. (eds.), *Spartina Workshop Record*. Washington Sea Grant Program, University of Washington, Seattle, 23 – 24.
- Ayres, D. R., Garcia-Rossi, D., Davis, H. G. and Strong, D. R. 1999. Extent and degree of hybridization between exotic (*Spartina alterniflora*) and native (*S. foliosa*) cordgrass (Poaceae) in California, USA determined by random amplified polymorphic DNA (RAPDs). *Molecular Ecology*, **8**: 1179 – 1186.
- Bascand, L. D. 1970. The roles of *Spartina* species in New Zealand. *Proceedings of the New Zealand Ecological Society*, **17**: 33 – 40.
- Callaway, J. C. and Josselyn, M. N. 1992. The introduction and spread of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in south San Francisco Bay. *Estuaries*, **15**: 218 – 226.
- Cao, H. (曹豪) and Zhuo, R. Z. (卓荣宗). 1985. A study of synecology and productivity of *Spartina anglica* plantation in Qidong County, Jiangsu. *Journal of Nanjing University (Natural Science)* [南京大学学报(专刊)], 83 – 115. (in Chinese)
- Chen, Z. Y., Li, B., Zhong, Y. and Chen, J. K. 2004. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus mariqueter* at Dongtan of Chongming Island, Yangtze River estuary and their potential ecological consequences. *Hydrobiologia*. (in press)
- Chung, C. H. 1989. Ecological engineering of coastlines with salt-marsh plantations in China. In: Mitsch, W. J. and Jørgensen, S. E. (eds.), *Ecological Engineering: an Introduction to Ecotechnology*. Wiley & Sons, New York, 255 – 290.
- Chung, C. H. 1993. Thirty years of ecological engineering with *Spartina* plantations in China. *Ecological Engineering*, **2**: 261 – 289.
- Cordell, J. R., Simenstad, C. A., Feist, B., Fresh, K. L., Thom, K. M. and Stouder, D. J. 1998. Ecological effects of *Spartina alterniflora* invasion of the Littoral flat community in Willapa Bay, Washington. *Abstracts from the 8th International Zebra Mussel and Other Nuisance Species Conference*, Sacramento California.
- Corkhill, P. 1984. *Spartina* at Lindisfarne NNR and details of recent attempts to control its spread. In: Doody, J. P. (ed.), *Spartina anglica in Great Britain*. Nature Conservancy Council, Attingham, 60 – 63.
- Craft, C. B., Reader, J. M., Sacco, J. N. and Broome, S. W. 1999. Twenty-five years of ecosystem development of constructed *Spartina alterniflora* (Loisel) marshes. *Ecological Applications*, **9**(4): 1405 – 1419.
- D'Antonio, C. M. and Kark, S. 2002. Impacts and extent of biotic invasions in terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, **17**(5): 202 – 204.
- Daehler, C. C. 1996. *Spartina* invasions in Pacific estuaries: biology, impact and management. In: Sytsma, M. D. (ed.), *Proceedings of the Symposium on Non-indigenous Species in Western Aquatic Ecosystems*. Portland State University Lakes and Reservoirs Program Publication, 96 – 98.
- Daehler, C. C. and Strong, D. R. 1994a. Native plant biodiversity vs the introduced invaders: status of the conflict and future management options. In: Majumdar, S. K., Brenner, F. J., Lovich, J. E., Miller, E. W. and Schalles, J. F. (eds.), *Biological Diversity: Problems and Challenges*. Pennsylvania Academy of Science, Easton, PA, 92 – 113.
- Daehler, C. C. and Strong, D. R. 1994b. Variable reproductive output among clones of *Spartina alterniflora* (Poaceae) invading San Francisco Bay, California: the influence of herbivory, pollination, and establishment site. *American Journal of Botany*, **81**: 307 – 313.
- Daehler, C. C. and Strong, D. R. 1996. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific estuaries, USA. *Biological Conservation*, **78**: 51 – 58.
- Daehler, C. C. and Strong, D. R. 1997. Hybridization between introduced smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) and native California cordgrass (*Spartina foliosa*) in San Francisco Bay, California, USA. *American Journal of Botany*, **85**: 607 – 611.
- Dumbauld, B. R., Peoples, M., Holcomb, L. and Ratchford, S. 1997. The potential influence of the aquatic weed *Spartina alterniflora* and control practices on clam resources in Willapa Bay, Washington. In: Pattern, K. (ed.), *Proceedings of the Second International Spartina Conference*. Washington State University, Olympia, 51 – 57.
- Elton, C. S. 1958. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. Methuen, London.
- Foin, T. C. and Brenchley-Jackson, J. L. 1991. Simulation model evaluation of potential recovery of endangered light-footed *Clapper rail* populations. *Biological Conservation*, **58**: 123 – 148.
- Foss, S. 1992. *Spartina*: threat to Washington's saltwater habitat. *Washington State Department of Agriculture Bulletin*, Olympia.
- Frenkel, R. E. 1991. *Spartina* in Oregon. In: Mumford, T. F. Jr., Peyton, P., Sayce, J. R. and Harbell, S. (eds.), *Spartina Workshop Record*. Washington Sea Grant Program, University of Washington, Seattle, 26.
- Gallagher, J. L., Reimold, R. J., Linthurst, R. A. and Pfeiffer, W. J. 1980. Aerial production, mortality, and mineral accumulation—export dynamics in *Spartina alterniflora* and *Juncus roemerianus* plant stands in a Georgia salt marsh. *Ecology*, **61**: 303 – 312.
- Gleason, M. L., Elmer, D. A., Pien, N. C. and Fisher, J.

- S. 1979. Effect of stem density upon sediment retention by salt marsh cordgrass, *Spartina alterniflora* Loisel. *Estuaries*, **2**: 271 – 273.
- Goss-Custard, J. D., Clarke, R. T., Dit, Durell, S. E. A. le V. dit. Cakdow, R. W. G. and Ens, B. J. 1995. Population consequences of winter habitat loss in a migratory shorebird. II. Model predictions. *Journal of Applied Ecology*, **32**: 337 – 351.
- Gray, A. J., Marshall, D. F. and Raybould, A. F. 1991. A century of evolution in *Spartina anglica*. *Advances in Ecological Research*, **21**: 1 – 62.
- Grosholz, E. 2002. Ecological and evolutionary consequences of coastal invasions. *Trends in Ecology and Evolution*, **17** (1): 22 – 27.
- Hedge, P. and Kriwoken, L. K. 2000. Evidence for effects of *Spartina anglica* invasion on benthic macrofauna in Little Swanport estuary, Tasmania. *Austral Ecology*, **25**: 150 – 159.
- Huang, C. Z. (黄传忠), Fang, Z. H. (方正贺) and Chi, X. Q. (池新钦). 2003. Ecological issues and countermeasures of the Quanzhouwan Wetland Nature Reserve in Fujian Province. *Forest Resources Management (林业资源管理)*, (1): 45 – 47. (in Chinese)
- Hubbard, J. C. E. 1965. *Spartina* marshes in southern England. VI. Pattern of invasion in Poole Harbour. *Journal of Ecology*, **53**: 799 – 813.
- Hubbard, J. C. E. and Partridge, T. R. 1981. Tidal immersion and the growth of *Spartina anglica* marshes in the Waihopai River estuary, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, **19**: 115 – 121.
- Jiang, F. X. (蒋福兴), Wang, W. Z. (王维中), Huang, Y. S. (黄耀生), Zhao, Q. L. (赵清良) and Xu, J. Z. (徐家铸). 1992. Preliminary study on interactions between *Spartina anglica* C. E. Hubbard and *Perinereis albutensis* Grube. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, **12** (1): 84 – 88. (in Chinese)
- Koretsky, C., Meile, C., Curry, B., Haas, J., Hunter, K. and Van Cappellen, P. 2000. The effect of colonization by *Spartina alterniflora* on pore water redox geochemistry at a saltmarsh on Sapelo Island, GA. *Journal of Conference Abstracts*, **5**(2): 599.
- Kriwoken, C. K. and Hedge, P. 2000. Exotic species and estuaries: managing *Spartina anglica* in Tasmania, Australia. *Ocean and Coastal Management*, **43**: 577 – 584.
- Lana, P. and Guiss, C. 1991. Influence of *Spartina alterniflora* on structure and temporal variability of macrobenthic associations in a tidal flat of Paranagua Bay, Brazil. *Marine Ecology Progress Series*, **73**: 231 – 234.
- Landin, M. C. 1991. Growth habits and other considerations of smooth cordgrass *Spartina alterniflora* Loisel. In: Mumford, T. F. Jr., Peyton, P., Sayce, J. R. and Harbell, S. (eds.), *Spartina Workshop Record*. Washington Sea Grant Program, University of Washington, Seattle, 15 – 20.
- Lee, R. W., Kraus, D. W. and Doeller, J. E. 1999. Oxidation of sulfide by *Spartina alterniflora* roots. *Limnology and Oceanography*, **44**: 1155 – 1159.
- Levine, J. M., Vila, M., D'Antonio, C. M., Dukes, J. S., Grigulis, K. and Lavelle, S. 2003. Mechanisms underlying the impacts of exotic plant invasions. *Proceedings of the Royal Society of London Series B—Biological Sciences*, **270**: 775 – 781.
- Li, A. M. (李爱民), Liu, X. C. (刘新成) and Tian, S. Y. (田淑媛). 1994. An investigation on the rhizosphere micro-organisms of *Spartina anglica*. *Tianjin Agricultural Sciences (天津农业科学)*, (1): 27 – 28. (in Chinese)
- Li, B. (李博) and Chen, J. K. (陈家宽). 2002. Ecology of biological invasions: achievements and challenges. *World Science-Technology Research & Development (世界科学技术研究与发展)*, **24**(2): 26 – 36. (in Chinese)
- Long, S. P. and Mason, C. F. 1983. *Saltmarsh Ecology*. Blackie and Sons, New York.
- Luiting, V. T., Cordell, J. R., Olson, A. M. and Charles, A. S. 1997. Does exotic *Spartina alterniflora* change benthic invertebrate assemblages? In: Pattern, K. (ed.), *Proceedings of the Second International Spartina Conference*. Washington State University, Olympia, 48 – 50.
- Lytle, J. S. and Lytle, T. F. 1998. Atrazine effects on estuarine macrophytes *Spartina alterniflora* and *Juncus roemerianus*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **17** (10): 1972 – 1978.
- Marchant, C. J. 1967. Evolution in *Spartina* (Gramineae). I. The history and morphology of the genus in Britain. *Botanical Journal of the Linnean Society*, **60**: 1 – 24.
- McKinney, M. L. and Lockwood, J. L. 1999. Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction. *Trends in Ecology and Evolution*, **14**: 451 – 453.
- Mobberley, D. G. 1956. Taxonomy and distribution of the genus *Spartina*. *Iowa State College Journal of Science*, **30**: 471 – 574.
- Mooney, H. A. and Cleland, E. E. 2001. The evolutionary impacts of invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **98**: 5446 – 5451.
- Parker, I. M., Simberloff, D., Lonsdale, W. M., Williamson, M. H., Von Holle, B., Moyle, P. B., Byers, J. E. and Goldwasser, L. 1999. Impact: toward a framework for understanding the ecological effects of invaders. *Biological Invasions*, **1**: 3 – 19.
- Partridge, T. R. 1987. *Spartina* in New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, **25**: 567 – 575.
- Paveglione, F. L., Kilbride, K. M., Grue, C. E., Simenstad, C. A. and Fresh, K. L. 1996. Use of Rodeo (R) and x-77 (R) spreader to control smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in a southwestern Washington estuary. I. Environmental fate. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **15**(6): 961 – 968.
- Primentel, D. L., Lach, L., Zuniga, R. and Morrison, D. 2000. Environmental and economic costs of non-indigenous species in the United States. *BioScience*, **50**: 53 – 65.

- Qin, P., Xie, M. and Jiang, Y. S. 1998. *Spartina* green food ecological engineering. *Ecological Engineering*, **11**: 147 – 156.
- Qin, P., Xie, M., Jiang, Y. S. and Chung, C. H. 1997. Estimation of the ecological-economic benefits of two *Spartina alterniflora* plantations in northern Jiangsu, China. *Ecological Engineering*, **8**(1): 5 – 17.
- Qin, P. (钦佩), Zhou, C. L. (周春霖), An, S. Q. (安树青) and Yin, J. L. (尹金来)(eds.). 2002. *The Ecological Engineering of Agriculture in Coastal Saline Soil*. Chemical Industry Press, Beijing.
- Ranwell, D. S. 1967. World resources of *Spartina townsendii* and economic use of *Spartina* marshland. *Journal of Applied Ecology*, **4**: 239 – 256.
- Scholten, M. and Rozema, J. 1990. The competitive ability of *Spartina anglica* on Dutch salt marshes. In: Gray, A. J. and Benham, P. (eds.), *Spartina – A Research Review*. NERC Institute for Terrestrial Ecology, London, 39 – 47.
- Shen, Y. M. (沈永明), Liu, Y. M. (刘咏梅) and Chen, Q. Z. (陈全站). 2002. Analysis of the expanding process of the *Spartina alterniflora* Loisel salt marsh on Jiangsu Province coast by remote sensing. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境学报), **11**(2): 33 – 38. (in Chinese)
- Silliman, B. R. and Zieman, J. C. 2001. Top-down control of *Spartina alterniflora* production by periwinkle grazing in a Virginia salt marsh. *Ecology*, **82** (10): 2830 – 2845.
- Simenstad, C. A. and Thom, R. M. 1995. *Spartina alterniflora* (smooth cordgrass) as an invasive halophyte in Pacific Northwest estuaries. *Hortus Northwest*, **6**: 9 – 12, 38 – 40.
- Sun, W. D. (孙卫东) and Peng, Z. C. (彭子成). 1996. A useful biological management on coastal protection in Yellow River Delta: ecological engineering with *Spartina*. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control* (中国地质灾害与防治学报), **7**(3): 45 – 48. (in Chinese)
- Tang, T. G. (唐廷贵) and Zhang, W. J. (张万钧). 2003. A discussion of ecological engineering benefits of *Spartina* spp. and its ecological invasion. *Engineering Science* (中国工程科学), **5**(3): 15 – 20. (in Chinese)
- Thompson, J. D. 1991. The biology of an invasive plant—what makes *Spartina anglica* so successful? *BioScience*, **41**(6): 393 – 401.
- Tong, Y. R. (童远瑞), Meng, W. X. (孟文新) and Xu, Q. (徐琴). 1985. A preliminary survey of animals in *Spartina anglica* marsh. *Journal of Nanjing University* (Natural Science) (南京大学学报(专刊)), 133 – 140. (in Chinese)
- Vitousek, P. M., D'Antonio, C. M., Loope, L. L., Rejmanek, M. and Westbrooks, R. 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zealand Journal of Ecology*, **21**: 1 – 16.
- Walker, L. R. and Smith, S. D. 1997. Impacts of invasive plants on community and ecosystem properties. In: Luken, J. O. and Thieret, J. W. (eds.), *Assessment and Management of Plant Invasions*. Springer-Verlag, New York, 69 – 94.
- Wan, F. H. (万方浩), Guo, J. Y. (郭建英) and Wang, D. H. (王德辉). 2002. Alien invasive species in China: their damages and management strategies. *Biodiversity Science* (生物多样性), **10**(1): 119 – 125. (in Chinese)
- Wu, H. (吴浩) and Zhang, D. H. (张登辉). 1985. Effects of *Spartina anglica* on saline soil amelioration. *Journal of Nanjing University* (Natural Science) [南京大学学报(专刊)], 322 – 323. (in Chinese)
- Wu, M. Y., Hacker, S., Ayres, D. and Strong, D. R. 1999. Potential of *Prokelisia* spp. as biological control agents of English cordgrass, *Spartina anglica*. *Biological Control*, **16**: 267 – 273.
- Xu, G. W. (徐国万) and Zhuo, R. Z. (卓荣宗). 1985. Preliminary studies of introduced *Spartina alterniflora* Loisel in China. *Journal of Nanjing University* (Natural Science) (南京大学学报(专刊)), 212 – 225. (in Chinese)

(责任编辑: 时意专)