

DOI: 10.20103/j.stxb.202312312882

江灿, 贾俊鹤, 杨颖, 盛蓉, 任璘婧, 纪焕红, 叶属峰. 互花米草在中国的 40 年: 认知演变与治理对策. 生态学报, 2024, 44(20): 8944-8956.

Jiang C, Jia J H, Yang Y, Sheng R, Ren L J, Ji H H, Ye S F. Forty years of *Spartina alterniflora* in China: cognitive evolution and governance strategies. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 8944-8956.

互花米草在中国的 40 年: 认知演变与治理对策

江 灿^{1,2}, 贾俊鹤^{1,2}, 杨 颖^{1,2}, 盛 蓉⁴, 任璘婧⁴, 纪焕红^{1,2}, 叶属峰^{3,*}

1 自然资源部东海生态中心, 上海 201206

2 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206

3 自然资源部东海发展研究院, 上海 201306

4 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

摘要: 外来物种互花米草 (*Spartina alterniflora*) 自 1979 年引进我国已有 40 余年的历史, 对我国滨海湿地生态系统产生了深远影响。鉴于互花米草极强的适应性和生态效应的双重性, 人们对其认知也存在历史演变性。概述了互花米草在滨海湿地系统中的正负生态效应及对互花米草近 40 年入侵历史认知的演变, 总结了目前互花米草的治理现状与困境, 并从政策、管理、工程等角度提出了互花米草的治理对策与建议。结果表明: (1) 互花米草引入对我国滨海湿地具有保滩促淤、抗风消浪、固碳等正生态效应, 也对生物多样性、生态安全等造成负生态效应; (2) 结合互花米草引入历史和各时期的研究, 人们对互花米草认知经历了全面挖掘生态经济价值阶段 (1979—2003 年)、正负生态效应的认知分化阶段 (2003—2018 年) 及在滨海湿地保护、生物安全等视角下认知的更新阶段 (2018 年—至今) 的转换; (3) 鉴于互花米草的正负生态效应和总体体量, 目前其防控工作尚存在重大困难, 建议应以自然规律和生态文明为指导, 多学科、多角度的进行因地制宜、分区管理。研究结果旨在为我国互花米草的研究、防治与管理提供借鉴, 达到生态环境效益、社会效益和经济效益相统一的发展目标, 形成海陆统筹的生态关系。

关键词: 外来物种; 认知演变; 正负生态效应; 治理对策; 互花米草

Forty years of *Spartina alterniflora* in China: cognitive evolution and governance strategies

JIANG Can^{1,2}, JIA Junhe^{1,2}, YANG Ying^{1,2}, SHENG Rong⁴, REN Linjing⁴, JI Huanhong^{1,2}, YE Shufeng^{3,*}

1 East China Sea Ecological Center, MNR, Shanghai 201206, China

2 Key Laboratory of Marine ecological monitoring and restoration technologies, The Ministry of Nature Resources, Shanghai 201206, China

3 East China Sea Institute for Development Research, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201306, China

4 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: The non-native species *S. alterniflora* was introduced to China in 1979, profoundly impacting coastal wetland ecosystems. Owing to its strong adaptability and dual ecological effects, perceptions of *S. alterniflora* have undergone historical evolution. Our research provided an in-depth review of its ecological effects of *S. alterniflora* in coastal wetland system, and delineated the cognitive evolution about its invasive history over the past 40 years. Additionally, it synthesized the current state and dilemmas of *S. alterniflora* management, and proposed governance strategies and recommendations from policy, management, and engineering perspectives. The results showed that: (1) The ecological effects of *S. alterniflora* delineated both its beneficial roles—such as shoreline protection, accretion promotion, wind/wave attenuation, carbon sequestration—and its adverse effects on biodiversity and ecological security. (2) Reflecting its introduction history and

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC3101702)

收稿日期: 2023-12-31; 网络出版日期: 2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ysf6@vip.sina.com

research conducted across different periods, the cognition towards *S. alterniflora* has undergone three distinct evolutionary phases: an initial comprehensive exploration of its ecological and economic value (1979—2003), a phase of cognitive differentiation regarding its positive and negative ecological effects (2003—2018), and a recent phase of cognitive realignment under the paradigms of coastal wetland conservation and biosecurity (2018—present). (3) Considering the dual ecological effects, overall volume and the inherent challenges in managing *S. alterniflora*, it is recommended that a multidisciplinary, multifaceted approach guided by natural laws and the philosophy of ecological civilization was adopted, emphasizing site-specific and zonal management strategies. The results aim to inform research, prevention, and management strategies for *S. alterniflora* in China, with the objective of achieving an integrative development goal that harmonizes environmental, societal, and economic benefits, thereby fostering a harmoniously ecological relationship of land-sea coordination.

Key Words: non-native species; cognitive evolution; positive/negative ecological effects; governance countermeasures; *S. alterniflora*

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是美国大西洋沿岸的本土植物, 已成为全球滨海盐沼生态系统中最成功的入侵种之一^[1]。2019 年, 我国沿海互花米草面积达到了 61565 km², 约占全国盐沼面积的 48.3%^[2], 对我国滨海湿地生态系统产生了深远影响, 也引起了各级政府、社会公众与科学家们的极大关注^[3-5]。互花米草具有高繁殖率、高抗性及高生物量等生物学特征, 在我国沿海地区发挥着保岸护滩^[6]、促淤造陆^[7]、抗风消浪^[8]、修复湿地和固碳^[9]等重要生态功能, 也给本土植物的生存空间、底栖动物和珍稀鸟类的食物来源、生物多样性的稳定和滨海湿地的生态安全构成威胁^[10-12]。随着对互花米草的持续深入研究, 人们在不同时期对其属性及生态效应的认知也有所差异。因此, 梳理对互花米草认知的历史演变, 理解其在不同生态系统和不同时期的生态作用, 对未来指导互花米草生态管理策略具有重要意义。

近年来, 互花米草的综合防治已经成为全球性的热点问题之一^[13]。为全面提升我国海岸带生态系统质量, 加强海岸带生态屏障保护, 根据《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》以及《进一步加强外来物种入侵防控工作方案》等相关文件要求, 需要对我国海岸带互花米草开展全面综合整治行动。目前, 国内已探索出多种互花米草防控技术, 并开展了一定规模的互花米草整治工程和示范项目, 取得了良好的整治效果, 但面临着互花米草治理技术尚不完善、治理成本高、周期长、资源化利用不成规模、无全国统一性规划等困境。因此, 亟需加强互花米草基础研究和综合利用研究, 将治理工作纳入法制规划, 提出切实可行、科学治理的方法, 极大化寻求互花米草对我国滨海生态系统的正面生态效应。

本文分析了互花米草在我国滨海湿地系统中的分布现状及其生态效益两面性研究, 综述了自引入我国 40 年以来, 各界对互花米草认知的演变, 总结了目前互花米草的治理现状与困境, 并从理念、技术、政策、工程、财政、教育等角度提出了外来物种互花米草的防治对策和建议。旨在为我国互花米草的研究、防治与管理研究提供借鉴, 达到生态环境效益、社会效益和经济效益相统一的发展目标, 形成海陆统筹、人海和谐的生态关系。

1 互花米草及其正负生态效应

互花米草作为生态工程于 1979 年由南京大学成功引入, 先是进行了小面积种植^[14], 随后在福建罗源湾试种成功并推广至全国沿海地区, 分布区域已遍及广西至辽宁沿海的大部分滨海湿地。1990—2022 年中国互花米草面积从 43.76 km²增加到 680 km²^[15-16]。本文对 2021 年高分卫星影像(2 m)进行解译, 2021 年全国海岸带互花米草分布面积约 660 km²(图 1)。近 40 年来, 互花米草在中国滨海湿地中迅速扩张, 占据了高潮带的大部分面积^[17-18], 其中东海区三省一市(江苏省、上海市、浙江省、福建省)占据了 92%(约 500.2 km²)^[9]。

互花米草在我国的引种对海岸防护工程是有益的^[7], 主要体现在保滩护堤、促淤造陆, 为我国沿海的诸

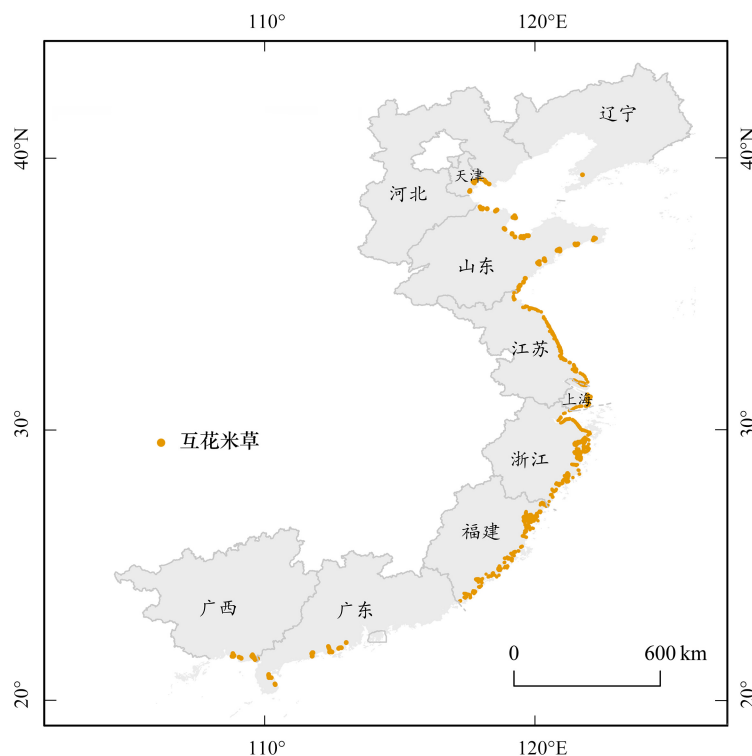


图1 2021年我国滨海湿地互花米草分布

Fig.1 Distribution of *S. alterniflora* in coastal wetlands in China, 2021

多淤泥质沙滩从光滩变成海滩绿地,提供了巨大的生产力^[19-20]。如在江苏中部海岸的互花米草盐沼带,滩面沉积速率明显提高^[21]。此外,互花米草盐沼还具有良好的生态功能,如稳定生态系统结构、降解污染物、净化环境等具有重要正面作用^[6, 22]。但随着互花米草入侵范围的扩大,被入侵区的滨海湿地生态系统也产生了诸多负面效应^[4, 23-24]。主要体现在由于其根系发达、耐盐耐淹、繁殖能力强及种群扩散快等特性使得互花米草快速入侵本土生态系统,不仅抑制了本土物种的生长繁殖,影响盐沼湿地生态系统结构、功能和生物多样性^[4, 25-26],而且会造成河口航道淤积,影响海水交换能力和滩涂养殖遭受破坏^[27-28]。如环渤海滨海湿地的互花米草已严重威胁到该区域的生态安全,导致黄河三角洲珍稀濒危鸟类多样性和数量严重下降,影响了原生海草床和盐沼生态系统^[29]。目前,互花米草已经严重威胁到滨海湿地生态安全,入侵风险大、防控治理难等问题凸显^[30]。

鉴于互花米草在保岸护滩、促淤造陆等方面重要作用以及其入侵性的影响,各界对互花米草存在肯定和否定两种不同的态度。总体来看,过去对其正生态效应的研究较多,关注其负生态效应则相对较少,但经过多年的批判和争论,目前对互花米草的认知和定位更趋理性,我国学界比较认同该物种具有多重生态效应^[26, 31]。因此,在当前形势下如何科学评价互花米草的生态效应对于互花米草的防治具有重要意义。

2 对互花米草 40 年引入历史认知的演变

互花米草生态效应的“两面性”讨论仍在继续,但在各个时期会有强弱不同的表达。结合互花米草引入历史与各时期主要研究内容,从互花米草的治理及政策角度,则可以看到比较显著的认知视角转换,主要分以下三个阶段(图 2):

(1) 1979—2003 年:全面挖掘互花米草生态及经济价值

互花米草植株高大,繁殖能力和适应能力强,因而最初被引入用于促淤保滩,开发潮间带光滩。我国最早

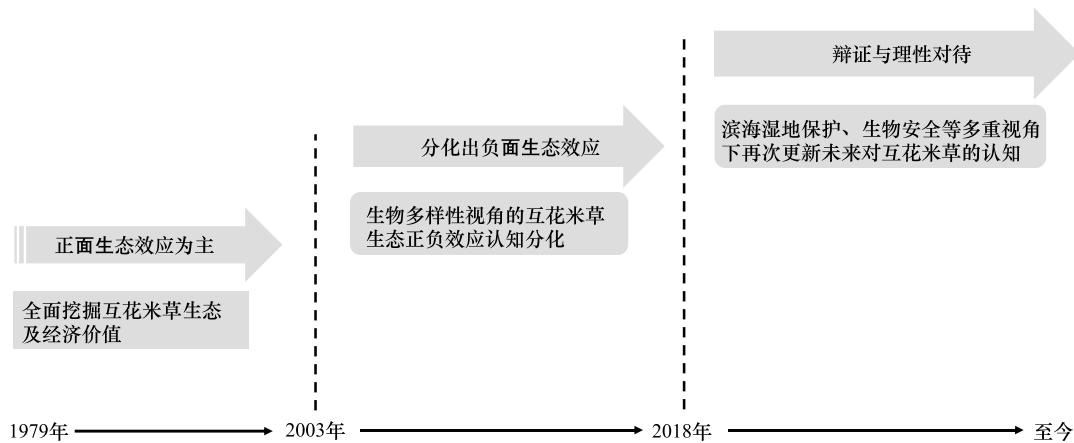


图2 互花米草 40 年引入历史的认知演变

Fig.2 Cognitive Evolution of *S. alterniflora* for 40 years

关于互花米草的文章发表于 1985 年,该文全面肯定了互花米草在保滩护岸、增加湿地面积以及作为肥料、饲料、造纸等方面的生态及经济价值^[31]。互花米草最适生态位位于高潮滩下部至中潮滩,植株茂密,根系发达,具有一年成丛,两年成片,三年成滩的特点。每年 7—10 月台风大潮最为频繁的季节,其强固的草滩可以有效地消减波浪,保护海堤与促进泥沙淤积,每年可为政府节约大量的保滩护岸的工程费用。在当时互花米草还被认为可以改善海岸带生态环境的优良先锋植物。互花米草生产力强,有利于滨海湿地生物多样性保育,大量腐烂的植株为沙蚕、螃蟹、牡蛎、泥螺的动物和微生物提供适宜生境,吸引鱼类和海鸟觅食栖息,进而提高土壤肥力,也为邻近海域提供营养物质和能量^[32—35]。此外,互花米草在当时还被认为综合利用的效益高,在海岸带经济发展中起着重要的作用,鼓励综合利用米草湿地发展以养羊、鹅、鸭为主的畜牧业;利用富含的微量元素的互花米草叶片开发啤酒添加剂、生物矿质水;并发现从互花米草中提取的生物矿质液中提取的总黄酮在抗菌消炎、抗氧化、降低血糖、提高机体免疫力等方面的药用价值^[36—38]。

在该阶段,对互花米草负面影响的探讨则主要是从公共卫生和安全的视角出发,在 20 世纪八、九十年代,我国制定了多部动植物检疫法及实施条例,如《中华人民共和国植物检疫条例》等,都涉及到外来入侵物种的防控,特别是针对各类动植物传染病进行了严格的防疫规定。2000 年,《全国生态环境保护纲要》的发布进一步强调了进出口检疫对于外来物种防控的重要性,同时指出对外来入侵物种的控制重在预防,应在引进前进行风险评估,防止国外有害物种进入国内。在此期间对其生态负效应的关注并不是重点。

(2) 2003—2018 年:生物多样性视角的互花米草生态正负效应认知分化

2003 年是互花米草治理进程的一个重要转折点。我国自 1992 年加入国际《生物多样性公约》后,于 1994 年 6 月发布《中国生物多样性保护行动计划》,提出强化对中国生物多样性的基础研究、协调生物多样性保护和持续发展等目标。随着生物多样性的理念逐渐被整合进入生态环境政策的议题,互花米草作为入侵物种对生物多样性可能带来的负面生态效应日益受到关注。2003 年,我国发布《加强外来入侵物种防治工作的通知》,提出建立外来物种的环境评价制度,预防为主、防治结合,并确定外来物种的重点防治区域等,为后续防治外来入侵物种提供了基本的思路,同年,原国家环保总局和中科院联合发布《中国第一批外来入侵物种名单》,确定了互花米草作为首批 16 种外来入侵物种之一。原环境保护部于 2010 年发布《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011—2030 年)》,分别在优先领域七和优先项目 34 提出“提高对外来入侵物种的早期预警、应急与监测能力”以及“关于外来入侵物种监测预警及应急系统建设”。全面提出了我国面向未来的生物多样性总体战略以及优先行动计划。

尽管从理念和实践上都意识到了互花米草对生物多样性的威胁,但这期间互花米草的面积仍然迅速扩张,其研究也逐渐分化出正面和负面效应两个方向。2002 年开始有文献通过遥感手段报道互花米草在江苏

沿岸快速扩张的趋势,并开始认识到其快速扩张对生态环境的影响^[39]。王蔚等总结了互花米草的功与过,认为互花米草已造成生态灾害,阻塞航道,威胁本土生物多样性,破坏鸟类栖息地等,应采用适当手段综合防治其进一步蔓延^[40]。同年,唐挺贵和张万钧则认为互花米草对环境无害,与其他物种表现出互利共生的关系,属于成功引种的“归化种”,而非“入侵种”;认为其快速繁殖是源于富营养化^[41]。李加林和张忍顺肯定了互花米草的正面生态效应和经济价值,认为它不是所谓的“毒草”^[42]。朱晓佳和钦佩认为互花米草并非典型的入侵种,减少生物多样性的入侵之说不成立,其发挥的正面生态效应远大于负面影响^[20]。

虽然互花米草被列为外来入侵物种名单,但实际上当时对入侵物种的防范意识在国内才刚刚萌生。互花米草的正负生态效应在这一阶段逐渐被认识,大多数学者认为互花米草还不属于入侵种,认为只要采取合理的“引种”管控措施,互花米草仍可以作为一个归化种^[43]。研究主要聚焦于评估不同分布区互花米草入侵的正负生态效应^[44-47],提出对互花米草的管控首先应禁止盲目引种,及时预测预警,采取因地制宜,综合管控的策略,妥善解决互花米草入侵的负面生态效应。

(3) 2018 年至今:滨海湿地保护、生物安全等多重视角下再次更新未来对互花米草的认知

2018 年 7 月,国务院印发了《关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》,提出大规模围填海活动引发了滨海湿地面积与自然岸线减少等生态问题,需要严格管控围填海活动,切实提高滨海湿地保护水平,加强近海生物以及珍稀鸟类重要栖息地的保护^[48]。这一政策虽然并未直接提及互花米草,但是由于互花米草在我国滨海湿地分布广泛且不断扩张,对湿地生态系统产生了复杂的影响,这一政策信号对互花米草的治理导向产生了深远的影响,在互花米草正负生态效应的学术研究及争论中,强调其负面生态效应的声音加强,主要涉及到互花米草入侵在某些滨海湿地可能减少土壤有机碳库存量^[49]、引起滨海湿地生境退化^[50]、引发生态风险^[51],以及可能导致鸟类栖息地损害等方面。同时,在其正面效应的探讨中,互花米草的资源化利用及其价值也逐渐成为新的热点议题。

2020 年初,受新冠肺炎疫情的影响,各界对生物安全产生极大关注,使得对互花米草等外来入侵物种的认知进一步升级到生物安全的阶段。2020 年 2 月,习近平总书记在中央全面深化改革委员会第十二次会议上提出,把生物安全纳入国家安全体系,全面提高国家生物安全治理能力,尽快推动出台生物安全法,加快构建国家生物安全法律法规体系、制度保障体系。2020 年 6 月,《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》中提出“加强互花米草等外来入侵物种灾害防治”。2020 年 10 月,《中华人民共和国生物安全法》通过,提出“国家建立生物安全名录和清单制度”和“国家加强对外来物种入侵的防范和应对,保护生物多样性”,从国家安全法律体系角度进一步提出了外来入侵物种的名录和清单制度,并特别提出由相关部门共同制定针对外来入侵物种的管理办法。2022 年 12 月,《互花米草防治专项行动计划(2022—2025 年)》中提出“有效遏制互花米草扩散态势,全面防控互花米草危害,确保滨海湿地生态安全”。随后,全国各省市陆续开展一系列科学防治互花米草措施,如上海市依据“生态优先,科学治理”“因地制宜,分区施策”等原则,开展了上海市互花米草进行综合防治工程,以恢复滨海湿地生物多样性,维护长江口区域生态安全。至今,互花米草对海岸带湿地生态系统影响的探讨仍在继续。

综上所述,互花米草在我国已有 40 余年的引入历史,对其引入及作用的认知也几经演变,相关的研究和政策不断丰富,对其正负效应的研究几乎交织在一起并贯穿于这一时期,总体来看,早期主要关注其保滩护岸及抗风消浪等积极作用,后期则主要聚焦其对引入地生物多样性的负面影响及积极的资源化利用功能,难以进一步划分出更加详细的时间段及侧重点。

3 互花米草综合治理现状与治理困境

3.1 互花米草的防治利用

根据互花米草的生物学特性,目前所采用的防治方式主要以清除为主,辅之以资源化综合利用(图 3)。防治方法包括化学方法、物理(机械)方法、生物防治方法和生物替代。近 10 年来,沿海各省市开展了 10 余

个互花米草治理工程,并取得了显著的成效,累计治理面积约 40 km²,其中以上海崇明东滩互花米草治理项目最具代表性,共完成 24.2 km²互花米草治理工作,是全球最大的互花米草治理工程,并以此为案例发布了《互花米草生态控制技术规范》(DB 31/T1243—2020),提出了互花米草生态治理分级方案(表 1)。

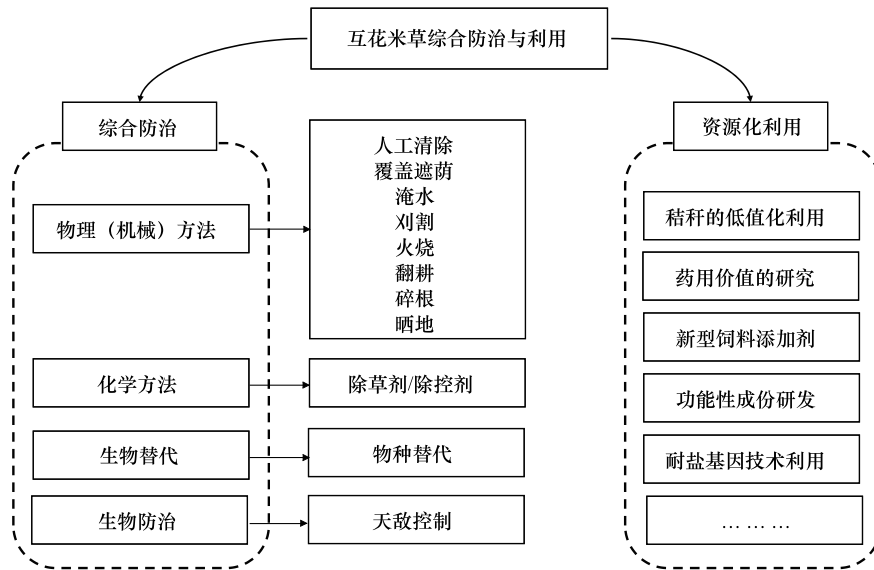


图 3 互花米草的主要防治与利用方式

Fig.3 Main governance strategies of *S. alterniflora*

表 1 上海市互花米草治理模式、分类标准及治理措施(DB 31/T 1243—2020,2020)

Table 1 Governance models, classification criteria and governance measures of *S. alterniflora* in Shanghai

治理模式 Governance model	分类标准 Classification criteria	治理措施 Governance measures
零星治理 Fragmented governance	未呈斑块零散发生的新定殖苗	人工拔除、挖掘
中等规模治理 Moderate-scale governance	斑块状种群面积比例小于 30%或成片发生面积 100 hm ² 以下	刈割、药剂治理、种植替代植物
大规模治理 Large-scale governance	成片发生面积 100 hm ² 及以上	围堰和布置水系、带水刈割、放水淹地、晒地灭活、种植替代植物、水文调控

我国对互花米草等生物质能源的利用形式多样,但尚处于研究阶段,存在成本高、技术不成熟等瓶颈问题。目前对互花米草的资源化利用方式有秸秆的低值化利用(饲料化、肥料化、原料化等)、耐盐基因的高新技术利用、药用价值的研究(如“复合米草口服液”)^[52]、功能性成份(黄酮和多糖类)的研发(如化妆品中的洗发水和护肤霜等)^[53]以及作为新型饲料添加剂^[54]等。

3.2 互花米草的治理困境

近年来,我国开展了大量的互花米草防控方面工作,但由于互花米草的正负生态效应和总体体量,在互花米草治理与防控方面仍存在重大困难。主要表现在:

(1)互花米草的治理技术尚不完善。目前针对互花米草治理常用的方法(物理防治、化学治理、生物防治及综合防治等)均存在一定缺陷,而且后期还可能存在其它负面影响,如影响底栖生物多样性,采用化学方法治理还会造成环境污染,进而破坏本地土壤和生态系统^[54-56]。当前互花米草整治修复还处在初期发展阶段,很多项目属于探索或试验性治理,并没有形成规模化整治。

(2)互花米草“彻底根除”成本高、周期长。部分省市投入了较大精力开展互花米草治理,但所有治理工作对于互花米草的总体量来讲依然是杯水车薪。以全国海岸带超过 700 km²互花米草的总体量,按照上海崇

明东滩互花米草治理投入,全国彻底清除将超过 300 亿。据统计,闽东地区的互花米草面积约为 1.03×10^4 hm^2 ,造成直接经济损失约 1.5 亿/a^[57]。此外,互花米草治理后管护措施至少要 3 年以上,互花米草治理后还要防范二次入侵的风险,两年即可使米草治理区恢复如初^[58],许多地区需要反复整治。因此要彻底清理互花米草,后期管护也需要开展大量的工作。

(3) 互花米草资源化利用不成规模。互花米草的资源化利用已经探索出一些具有前景的途径^[26,59-60],但缺乏相应的资源供应、产品需求和投入/产出分析,存在互花米草资源化利用不可持续的风险,这既需要国家和地方加大其资源化利用技术研发的资金投入和政策的支持,拓宽融资渠道和形成完整产业链^[61];更需要从市场经济规律的角度寻求产业化解决途径,建立以市场为导向、以高校和科研院所技术力量为依托,以企业为主体的产业联盟,促进互花米草利用的研究成果走出实验室,市场化推广。

(4) 互花米草治理没有全国性的统一规划。考虑到各地对互花米草认识及治理需求不同,我国各省市对互花米草治理行动存在较大差异。目前的修复区域有限并呈零星分布特征,没有形成规模化。山东省为治理互花米草,2020 年编制了《山东省互花米草防治实施方案》,拟到 2022 年“全省存量互花米草基本消除、互花米草扩散态势得到基本遏制、综合防治能力得到全面提升”^[62]。全国尚未形成针对互花米草治理的统一规划,以及兼顾互花米草保滩护岸和生态系统维护等生态功能的个性化治理方案。

4 互花米草治理的对策与建议

4.1 互花米草治理的指导思想 and 原则

4.1.1 指导思想

全面贯彻落实习近平生态文明思想,以及落实《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》,牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享发展理念,围绕我国滨海湿地生态保护和岸线防灾减灾需求,着眼海岸带区域(即包含滨海城市向内陆 10 km 区域、潮间带湿地及近岸浅海海域)整体规划,开展针对互花米草的综合治理,包括开展长期动态观测与科学研究,建立和完善外来物种互花米草管控的法规政策体系,实行对我国沿海互花米草治理的分类管控,有效控制互花米草无序扩散,指导滨海湿地生态修复,兼顾保滩护岸生态功能并维护湿地生态系统健康,实现防控治理和开发利用有效结合,达到生态环境效益和社会经济效益相统一的发展目标。

4.1.2 管理原则

以生态文明理念客观对待互花米草这个入侵的“庞然大物”,从引种的初衷出发,不搞“一刀切”式的完全清除,科学治理、兴利避害,互花米草治理遵从以下指导原则:

因地制宜,分类管控。在处理人与自然的关系中,既要关注人类与自然的生态关系,防止人类对自然的损害,又要关注建立一个符合人类目的和需要的人类世界。互花米草是朋友还是敌人也需相时、相地而定。当前,互花米草治理至少可分成三类,一是当作朋友看待,可适当保护,如江苏部分受侵蚀岸段及麋鹿(*Elaphurus davidinus*)保护区^[63];二是当作敌人看待,需坚决清除;三是当作常态来看待,维持现状,动态监控。

综合利用,生态优先。互花米草是兼有正负生态效应的外来物种,综合利用不仅是每年大面积消化高产互花米草的行之有效的方法,也是对其生态控制的重要补充,还是兴利除弊、促进海滨地区经济发展的特有技术体系。对于生态系统保护类型的自然保护地,互花米草的扩散体现了其“入侵物种”的负生态效应,破坏了原有生态系统,应控制其扩散发展,视情清除。

科学治理,和谐共处。目前互花米草在我国沿海已造成大面积扩散,且有愈演愈烈之势。对于互花米草的态度,我们经历了从扩张到严控的过程,随着对互花米草的深入研究,对其生态定位的认识也不断加深,未来对待互花米草应该加强管控,阻止无序扩张,特别注重对重要生态系统的保护维护;对现存的互花米草则根据其生态功能确定对其治理方案,争取做到和谐共处。

4.2 对策与建议

为防止互花米草在全国范围内呈严重扩散态势,提高互花米草防治成效,未来建议应从源头上严控输入,

早发现、早管制。同时,加强互花米草的基础性研究和资源化综合利用研究,将治理工作纳入法制规划,科学治理、精准施策,早日解决滨海湿地互花米草入侵危害。

4.2.1 践行人与自然和谐共生的理念

互花米草综合治理应秉持人与自然是和谐共生的理念。树立尊重自然、顺应自然和保护自然的理念,优先保护滨海湿地;以建设美丽中国为目标,辩证考虑滨海湿地护岸功能和入侵危害的双重影响,对互花米草进行因地制宜的管理,努力促进人与滨海湿地、滨海湿地生物之间、滨海湿地与社会和谐共生、良性循环、可持续发展。

互花米草综合治理应坚持绿色发展、持续利用原则。践行“绿水青山就是金山银山”理念,将滨海湿地稳定健康发展作为持续利用基础;推动生产和生活方式的绿色转型与升级,实现滨海湿地生态系统服务功能提高和经济高质量发展的“双赢”目标。

互花米草综合治理坚持在利用中管理、在管理中利用,实施互花米草管控预警机制和生物入侵红线划定等重要举措,不断强化互花米草的因地制宜利用和管理,加强生物安全管控,持续提高滨海湿地生态系统服务功能,协同推进生物多样性保护与绿色发展。

4.2.2 长期动态观测,综合分析研究

对互花米草扩散格局和入侵趋势长期动态预测是管控互花米草爆发、及时预测预警的基础。通过卫星遥感、无人机、野外观测站及现场调查等建立互花米草立体观测网,长期动态监测互花米草分布、扩散和演变,及时掌握互花米草的分布格局,为其后续预警和防治奠定基础。此外,需建立互花米草盐沼生态系统动力学模型,实现其潮滩环境-生态过程的耦合。

滩涂水文动力学过程、冲淤动态、潮沟体系格局和生态系统群落结构直接影响互花米草繁殖体的扩散与种群建立^[51]。因此,互花米草的监测应不仅局限于分布面积,其他生物(包括本土植被、水鸟、底栖动物、土壤动物、微生物等)及非生物(包括潮汐、高程、氮磷营养物质、土壤理化性质等)也应被长期监测。在对互花米草入侵过程和机制研究基础上,因地制宜地结合当地滨海湿地保护、管理目标,建立互花米草正负生态效应及生态系统服务功能评价体系(包括促淤消浪、蓝碳功能、生物多样性保育、净化环境等),筛选关键评估指标并确定权重,长期动态评估互花米草入侵的生态效应,为互花米草的科学防治和有效管理提供科学依据。

4.2.3 纳入法制规划,明确职责分工

完善外来物种管理的法规政策体系。防控外来入侵物种对我国生物多样性保护和生物安全具有重大价值。目前其法规政策体系尚不健全,已有政策执行也缺乏有效的监督、反馈和评估机制。需要进一步完善外来入侵物种管理的法规政策体系,在《环境保护法》《生物安全法》的框架下,全面梳理、评估和整合生物多样性及入侵物种防控的现有政策,加速外来物种管理专门法律法规的制定,细化外来物种特别是互花米草治理的各类标准体系、实施方案。推动外来入侵物种管理的制度化建设,强调严格管控措施,逐步建立包括检疫防控、风险评估、监测预警、责任落实、协调合作、问责追责、监管督察、反馈评估等政策机制。

建立跨部门协调联动机制。对外来入侵物种的管理目前缺少专门法律,现有各法规政策散见于不同部门及不同类型的发文,而这些法规政策的实施则需要多个不同的部门共同完成,需要建立跨部门合作协调机制,从法规政策的制定到实施环节要协调统一并形成合力。应在生物多样性保护国家委员会、生物物种资源保护部际联席会议等的统筹下,进一步发挥其协调功能,明确各相关部门的职责分工,建立跨部门的标准制定、信息共享、监测预警、协调联动和联合执法机制。

制定并推广基于科学研判的外来物种防控与利用行动方案。早在 2003 年,原国家环保总局发布《加强外来入侵物种防治工作的通知》,提出“对于已建立稳定种群的外来入侵物种,应当制定切实可行的除治方案,采取生物防治、低污染化学防治、物理防治、生态替代、合理利用等综合防除措施予以清除;对于暂时无法清除的外来入侵物种,应当采取措施,将其控制在一定的范围内,防止其传播和蔓延”^[64]。但就目前的情况来看,外来物种扩散情况并未得到有效的控制,应尽快形成基于科学研判的外来物种防控与利用行动方案,并对互

花米草等扩散范围较大的物种制定具体行动计划,推广科学的治理模式,提供一系列技术指标的合理范畴,进一步加强地方对外来物种防控与利用方案的制定与实施。

形成风险共担、利益共享的外来物种治理机制。多渠道筹集外来物种的治理资金,健全外来物种防治的资金投入机制,用于互花米草等的防控。通过设立外来物种风险基金,形成风险共担、利益共享的外来物种治理机制。建立外来物种防控的奖惩制度,对根据要求完成外来物种防控的单位与个人进行奖励,对高效、创新治理方案进行奖励,对没有落实相关防控措施并造成重大损失的,要按规定追责。探索利用环保税对其他替代性的资源及应用予以税收优惠,逐步建立激励与约束的税收机制,从而减少外来物种资源的利用。

4.2.4 实施预警监测,分区分级管理

开展全国海岸线互花米草的全覆盖预警监测。目前我国海岸带互花米草监测尚处于试点阶段,建议开展长期动态、全覆盖监测,纳入业务化监测体系。由于互花米草入侵早期的 Allee 效应,对于已经被其入侵的生境应当尽早采取措施进行管理^[65]。因此,应基于互花米草的入侵机制对其可能入侵地点进行预警及监测^[66],进而明确互花米草在不同生态环境中的确切分布、生存环境、危害特性与特征、扩散传播途径与方式、经济与生态影响效应与特征。此外,通过高精度、高准确率的互花米草入侵种、土著种与潮滩环境信息的提取与解译,探明互花米草入侵的微观过程,并进行精准防控措施研究,阻断互花米草的蔓延渠道与繁殖能力,进而逐步控制互花米草的扩散^[28]。

开展分区分级预警,加强米草扩散预测。根据互花米草的监测结果,开展分区分级预警,制定互花米草生态危害风险区划,加强互花米草扩散的预测。依据互花米草在不同区域的生态位,分别、分类制定治理方针:(1)对于保滩护岸需求强烈的区域,可以维持区域内互花米草的分布格局,但要长期监控和掌握互花米草的动态扩散;(2)对于具有显著负生态效应的区域,通过一定的物理、化学等综合防治手段予以清除或物种替换;(3)对于一般入侵区,谋划开展综合利用,控制扩散和生态修复;(4)对于潜在入侵区,加强监测预警,严防米草入侵。最后,建立互花米草的动态扩散耦合模型,研究互花米草盐沼的生物过程及预测其近期和未来可能扩散的趋势。模拟全球变暖、海平面上升等自然因素,以及堤坝建设、海水养殖等人为因素对互花米草的扰动及响应,为互花米草长期有效地管理提供科学依据。

开展互花米草生态效应诊断,分类制定管控对策。在长期动态观测和全国海岸带互花米草预警监测基础上,对各滨海岸段互花米草实行分区域的生态效应诊断,统筹梳理互花米草分布岸段的防浪减灾需求、岸滩防护需求、生物多样性维护需求等,制定互花米草分布与生态功能诊断动态“一张图”,用于指导互花米草治理。在互花米草防治过程中,按照所在区域互花米草发挥的生态效应制定科学合理的治理措施,不搞“一刀切”式的完全清除互花米草,补种本土植被、红树林等,避免耗费大量人力财力进行生态修复却没有显著提升生态系统功能的修复工程入库。开展全国互花米草生态地理制图应用,服务于我国海岸带区域国土空间规划、开发利用和空间用途管制。

4.2.5 研制治理策略,综合控制利用

互花米草具有强适应性,不同区域的互花米草生境也存在一定的差异,在对互花米草的入侵动态和生态效应长期动态评估基础上,应基于自然的解决方案因地制宜地制定互花米草科学治理行动计划,采取综合防治技术措施,抑制互花米草的无序扩散,指导互花米草综合利用研究。在已开展或待开展的海岸带海域海岛生态修复区、蓝色港湾等重大工程项目区,以分区分级治理为原则,构建全国性互花米草生态治理体系,建立15—20个综合治理实践区,推进全国互花米草生态治理体系和治理能力现代化实践。

目前,针对互花米草的治理方法均存在一定缺陷,因此,在寻求更好地治理方式的同时,也需要加大对其开发利用的研究力度,变废为宝。根据互花米草的治理采取“非必要不清除”的原则,正视互花米草在海岸带生态适应及快速扩张的现实,探索综合利用途径,对互花米草的生物质能进行资源化利用,转化负面生态效应变为正面效应,化害为利^[24, 53]。目前国内对互花米草利用尚处于实验室研究阶段,不足以形成规模化、市场化与产业化,未来应该重视互花米草资源化利用产业链的各个环节,实现产-学-研同步配套发展,鼓励各类企

业积极参与,深度开发互花米草系列的生态产品,提高生态产品的高值化,延长其产业链,保证其产业链的可持续性^[24],如 Lu 等设计并实践了互花米草收获-产品运输-生物矿质液提取-降脂胶囊制备-食用菌栽培基质-蚯蚓饲养-生物有机肥的增值产业链,对互花米草进行逐级利用,年收入为 3.66×10^6 美元/hm²^[67]。

4.2.6 加大财政投入,加强风险控制

对于互花米草的治理政策主要涉及到检疫防控、风险评估、划定保护区、监测预警等措施,而推进这些政策措施执行的财政投入仍面临相当大的压力。目前针对入侵物种及互花米草的资金投入问题上,已出台一些政策,如《加强外来入侵物种防治工作的通知》年提出“各地要增加对外来入侵物种防治工作的资金投入”“外来入侵物种危害严重的区域,要积极争取政府设立专项资金”。《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011—2030年)》、《关于做好生物多样性保护优先区域有关工作的通知》、《重点流域水生生物多样性保护方案》也提出了生物多样性保护需要加大资金投入、健全资金投入机制等。各省相关的政策规划中,尽管对生物多样性及外来入侵物种提出了治理措施,但对资金投入短缺的问题也缺乏有效的应对方案。据此提出如下建议:

一是将互花米草的防控和治理资金投入列支国家重大专项资金,为互花米草治理及相关的滨海湿地保护、生态多样性及生物安全目标的实现提供稳定的资金来源,同时强化资金管理的流程,保证专款专用,加强治理过程的评估,提高财政资金的利用效率;二是适时释放自然资源管理的红利,吸引社会力量和资金共同参与互花米草的治理。由于互花米草目前的存在面积较大,且仍处在扩张之中,对其的治理必然是一个需要持续推进的过程,因此需要积极地探讨市场化模式,尝试给予一定的产权及资源利用的激励措施,拓宽治理资金投入的渠道,创新互花米草治理的市场化模式。

4.2.7 深化国际合作,提高管控能力

作为全球广布种盐沼植被的互花米草及其他米草属植被,已入侵到美国、欧洲、中国等地滨海湿地。世界各国科研人员都对其生长、生理、种间关系、入侵潜力、生态后果等方面进行了大量的研究,并因地制宜地提出互花米草管控方案。通过对不同地区研究成果的交流合作,分享和吸取各国先进管控经验,有助于我们了解不同环境条件下互花米草的适应能力,提高对互花米草入侵的认知与管控能力。此外,还可通过国际合作的方式,共同建立海岸带互花米草的观测网络和多源数据共享平台,以实时监控和评估互花米草现状,并构建同质种植园等方式进行科研合作,探讨互花米草进化历史、入侵潜力以及对全球变化的响应能力,这些结果都将有助于我们对互花米草入侵机理的理解、对未来互花米草入侵趋势的建模与预测,最终提高对互花米草入侵的管控能力。

目前,已有不少单位相继组织了关于互花米草扩散、管控与利用的国际研讨会,如 2019 年 10 月 29—31 日,华东师范大学河口海岸国家重点实验室邀请中美法等 20 多所机构 60 多名专家于上海,开展以“互花米草扩散、控制与利用”为主题的国际研讨会,共同探讨互花米草的治理与利用的难题,取得了不错的成效。因此,类似的关于互花米草治理的研讨会应定期开展,汇集多个部门和机构已有的治理方案,交流学习,因地制宜的对互花米草进行利用和管控。

4.2.8 加大科普教育,引导社会参与

加强全民科普教育,依靠公众参与有效管理互花米草。针对不同的群体开展互花米草利弊分析的相关科普,并制定相应的宣传手册或视频短片,让公众全面了解互花米草的生长特征、传播方式、扩散通道、功能及危害,正确指导公众在生产生活中有效防控互花米草的扩散。

构建向公众免费开放的综合性科普教育展示平台。通过开放平台承担自然湿地科普教育、环境教育研究和向公众普及湿地保护、迁徙鸟类及其栖息地保护相关科学知识的重要任务。野外互花米草生态治理效果展示区是重要的室外教育资源,将自然湿地结合趣味性和科技性的展示手段,创造出即生态又具知识性的展示平台,使参观者能科学、完整地获取科普知识。同时为志愿者活动和中小学生的素质教育活动提供公共服务平台。还可以与高校和科研单位合作,建立野外监测基地,为互花米草课题相关的科学研究提供观测平台。

创新教育宣传方式,提高科普教育效果。相关单位应不断创新科普教育的宣传方式和活动载体,努力吸引不同受众参与形式多样、内涵丰富的科普教育活动。在湿地日、生物多样性日、爱鸟周等活动期间设计宣传活动、宣传展板、宣传册、海报等增强人们保护自然的意识。同时,充分发挥“自媒体”宣传报道作用,在相关部门网站、微博、刊物等载体上对社会公众广泛宣传互花米草的生态效应和生物入侵危害相关的科普知识,扩大外界对互花米草的了解和正确认识。

加强相关单位对互花米草的防控与管理意识。了解不同部门对互花米草生物入侵的具体认识和态度,针对不同部门制定对应的宣传策略,从而降低互花米草入侵和迅速扩张所带来的生态风险。建立生物安全道德规范,使不同部门都明确各自所承担的责任,避免盲目引种互花米草而带来的风险。

5 结论

互花米草自 1979 年引入我国以来,已有 40 余年历史。由于其强大的繁殖力和适应性,已成为我国大部分滨海湿地的优势植被,具有两面性的生态效应。随着各界对互花米草生态效应的深入研究,人们对互花米草属性的认知也逐步更新演变,并趋于理性与辩证,主要历经了三个阶段:(1)全面挖掘互花米草生态及经济价值阶段(以正面生态效应为主);(2)生物多样性视角的互花米草生态正负效应认知分化(以负面生态效应为主);(3)滨海湿地保护、生物安全等多重视角下再次更新未来对互花米草的认知(辩证与理性认知的过程)。

由于互花米草的两面性和总体体量,目前我国互花米草的防治仍存在重大困难与挑战。来来应以生态文明理念客观对待互花米草这个“庞然大物”,辩证地看待互花米草的社会属性(“入侵性”)与自然属性(“适应性”)之间的对立统一、相互依存关系,从治理理念、研究技术、法制规划、监测管理、治理策略、财政投入、国际合作和科普教育等角度出发,实行对我国沿海互花米草治理分类分级分区管控,一区一策,以有效控制互花米草无序扩散,达到社会效益和、经济效益和生态环境效益相统一的发展。

参考文献(References):

- [1] Marsh A, Blum L K, Christian R R, Ramsey E III, Ragoonwala A. Response and resilience of *Spartina alterniflora* to sudden dieback. *Journal of Coastal Conservation*, 2016, 20(4): 335-350.
- [2] Hu Y K, Tian B, Yuan L, Li X Z, Huang Y, Shi R H, Jiang X Y, Wang L H, Sun C. Mapping coastal salt marshes in China using time series of Sentinel-1 SAR. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 173: 122-134.
- [3] Wang Q, An S Q, Ma Z J, Zhao B, Chen J K, Li B. Invasive *Spartina alterniflora*: biology, ecology and management. *Journal of Systematics and Evolution*, 2006, 44(5): 559-588.
- [4] Li B, Liao C, Zhang X D, Chen H L, Wang Q, Chen Z Y, Gan X J, Wu J H, Zhao B, Ma Z J, Cheng X L, Jiang L F, Chen J K. *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River Estuary, China: an overview of current status and ecosystem effects. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 511-520.
- [5] 黎静, 鞠瑞亭, 吴纪华, 李博. 海岸带生物入侵的生态后果及管理对策建议. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1204-1210.
- [6] Xiao Y, Tang J B, Qing H, Zhou C F, Kong W J, An S Q. Trade-offs among growth, clonal, and sexual reproduction in an invasive plant *Spartina alterniflora* responding to inundation and clonal integration. *Hydrobiologia*, 2011, 658(1): 353-363.
- [7] 高抒, 杜永芬, 谢文静, 高文华, 王丹丹, 吴晓东. 苏沪浙闽海岸互花米草盐沼的环境-生态动力过程研究进展. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(11): 2339-2357.
- [8] 钦佩, 李思宇. 互花米草的两面性及其生态控制. *生物安全学报*, 2012, 21(3): 167-176.
- [9] 杨斌. 高氮背景下长江口南汇边滩互花米草盐沼 N_2O 和 CH_4 通量及影响因素[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [10] 陈潘, 张燕, 朱晓静, 鲁长虎. 互花米草入侵对鸟类的生态影响. *生态学报*, 2019, 39(7): 2282-2290.
- [11] 黄雅琴, 王建军, 何雪宝, 林和山, 林俊辉, 牟剑锋, 刘坤, 张舒怡, 黎中宝. 三沙湾互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵对大型底栖动物群落结构的影响. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 506-519.
- [12] 陈思明. 互花米草(*Spartina alterniflora*)潜在分布格局的空间尺度效应. *生态学报*, 2023, 43(14): 6058-6068.
- [13] 李丽凤, 刘文爱, 陶艳成, 许晓玲, 傅伟聪, 董建文. 广西山口红树林保护区互花米草扩散动态及其驱动力. *生态学报*, 2021, 41(17): 6814-6824.

- [14] Chung C H. Thirty years of ecological engineering with *Spartina* plantations in China. *Ecological Engineering*, 1993, 2(3): 261-289.
- [15] 刘明月. 中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学, 2018.
- [16] 耿国彪. 互花米草防治一场不得不打的植物入侵之战. *绿色中国*, 2023(4): 8-13.
- [17] Zhang R S, Shen Y M, Lu L Y, Yan S G, Wang Y H, Li J L, Zhang Z L. Formation of *Spartina alterniflora* salt marshes on the coast of Jiangsu Province, China. *Ecological Engineering*, 2004, 23(2): 95-105.
- [18] Xie W J, Gao S. The macrobenthos in *Spartina alterniflora* salt marshes of the Wanggang tidal-flat, Jiangsu coast, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(8): 1158-1166.
- [19] 陈才俊. 从近期几例海堤垮塌分析江苏的海堤工程. *海洋通报*, 1997, 16(2): 37-43.
- [20] 朱晓佳, 钦佩. 外来种互花米草及米草生态工程. *海洋科学*, 2003, 27(12): 14-19.
- [21] 王爱军, 高抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响. *海洋学报*, 2006, 28(1): 92-99.
- [22] Nalla S, Hardaway C J, Sneddon J. Phytoextraction of selected metals by the first and second growth seasons of *spartina alterniflora*. *Instrumentation Science & Technology*, 2012, 40(1): 17-28.
- [23] Yin S L, An S Q, Deng Q, Zhang J H, Ji H T, Cheng X L. *Spartina alterniflora* invasions impact CH₄ and N₂O fluxes from a salt marsh in Eastern China. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 192-199.
- [24] 辛悦, 邹彩瑜, 王磊, 刘金娥, 李秀珍. 崇明东滩互花米草资源化利用生态工程系统生态经济评价. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(11): 1394-1403.
- [25] 陈中义, 付萃长, 王海毅, 李博, 吴纪华, 陈家宽. 互花米草入侵东滩盐沼对大型底栖无脊椎动物群落的影响. *湿地科学*, 2005, 3(1): 1-7.
- [26] 钦佩. 互花米草与人体健康关系研究进展. *中国野生植物资源*, 2019, 38(5): 70-73.
- [27] 沈永明, 杨劲松, 曾华, 周勤. 我国对外来物种互花米草的研究进展与展望. *海洋环境科学*, 2008, 27(4): 391-396.
- [28] 程彬彬, 刘长娥, 原源. 基于文献信息分析的互花米草危害与防控措施研究. *上海农业学报*, 2020, 36(3): 90-95.
- [29] 于彩芬, 许道艳, 邢庆会, 上官魁星, 刘长安, 廖国祥, 张悦. 浅谈环渤海地区互花米草(*Spartina alterniflora*)防治建议. *海洋环境科学*, 2021, 40(6): 903-907.
- [30] 农业农村部, 自然资源部, 生态环境部. 关于印发进一步加强外来物种入侵防控工作方案的通知. 2021-02-25.
- [31] 仲崇信, 卓荣宗. 大米草在我国的二十二年//米草研究的进展-22 年来的研究成果论文集, 南京: 南京大学学报编委会, 1985: 31-35.
- [32] 孙炳寅, 朱长生. 互花米草(*Spartina alterniflora*)草场土壤微生物生态分布及某些酶活性的研究. *生态学报*, 1989, 9(3): 240-244.
- [33] 陈宏友. 苏北潮间带米草资源及其利用. *自然资源*, 1990, 12(6): 56-63.
- [34] 宋连清. 互花米草及其对海岸的防护作用. *东海海洋*, 1997, 15(1): 12-20.
- [35] 沈永明. 江苏沿海互花米草盐沼湿地的经济、生态功能. *生态经济*, 2001, 17(9): 72-73, 86.
- [36] 钦佩, 谢民, 周爱堂. 互花米草的初级生产与类黄酮的生成. *生态学报*, 1991, 11(4): 293-298.
- [37] 蔡鸣, 钦佩, 张康宣, 谢民. 互花米草总黄酮(TFS)与生物矿质液(BML)对小鼠血糖的影响. *海洋科学*, 1996, 20(4): 12-13.
- [38] 胡芝华, 钦佩, 蔡鸣, 谢民, 张康宣. 互花米草总黄酮局部用药的抗炎作用. *植物资源与环境*, 1998, 7(2): 7-12.
- [39] 沈永明, 刘咏梅, 陈全站. 江苏沿海互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)盐沼扩展过程的遥感分析. *植物资源与环境学报*, 2002, 11(2): 33-38.
- [40] 王蔚, 张凯, 汝少国. 米草生物入侵现状及防治技术研究进展. *海洋科学*, 2003, 27(7): 38-42.
- [41] 唐廷贵, 张万钧. 论中国海岸带大米草生态工程效益与“生态入侵”. *中国工程科学*, 2003, 5(3): 15-20.
- [42] 李加林, 张忍顺. 互花米草海滩生态系统服务功能及其生态经济价值的评估——以江苏为例. *海洋科学*, 2003, 27(10): 68-72.
- [43] 张征云, 李小宁, 孙贻超, 罗辅燕. 我国海岸滩涂引入大米草的利弊分析. *农业环境与发展*, 2004, 21(1): 22-25.
- [44] 陈慧丽. 互花米草入侵对长江口盐沼湿地线虫群落的影响及其机制[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- [45] 肖德荣, 赵一鹤. 外来物种互花米草生态效应及其控制研究动态. *西部林业科学*, 2012, 41(3): 114-118.
- [46] 侯栋梁, 何东进, 洪伟, 游巍斌, 巫丽芸, 纪志荣, 肖石红. 入侵种互花米草影响我国滨海湿地土壤生态系统的研究进展. *湿地科学与管理*, 2015, 11(4): 67-72.
- [47] 王丹, 张荣, 熊俊, 郭海强, 赵斌. 互花米草入侵对滨海湿地土壤碳库的贡献——基于稳定同位素的研究. *植物生态学报*, 2015, 39(10): 941-949.
- [48] 国务院. 关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知. https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5313946.htm, 2018-7-14.
- [49] 刘金娥, 苏海蓉, 徐杰, 黄黄, 王国祥, 陈建琴. 互花米草对中国海滨湿地土壤有机碳库的影响. *生态环境学报*, 2017, 26(6): 1085-1092.
- [50] 张华兵, 高卓, 王娟, 刘玉卿, 韩爽, 张亚楠, 李玉凤. 基于“格局-过程-质量”的盐城滨海湿地生境变化分析. *生态学报*, 2020, 40(14): 4749-4759.

- [51] 王方怡, 张嘉诚, 曹彦, 游巍斌, 何东进. 闽东滨海湿地互花米草入侵生态风险评价. 森林与环境学报, 2020, 40(6): 579-587.
- [52] 罗彩林, 温杨敏, 郑晨娜. 大米草和互花米草药用价值研究进展. 亚太传统医药, 2010, 6(7): 180-181.
- [53] 谢宝华, 路峰, 韩广轩. 入侵植物互花米草的资源化利用研究进展. 中国生态农业学报: 中英文, 2019, 27(12): 1870-1879.
- [54] 周文宗, 宋祥甫, 王金庆. 互花米草生物矿质液对黄鳝生长和营养成分的影响. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 233-235.
- [55] Killbride K M, Paveglio F L. Long-term fate of glyphosate associated with repeated roдео applications to control smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in Willapa Bay, Washington. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, 40(2): 179-183.
- [56] 谢宝华, 韩广轩. 外来入侵种互花米草防治研究进展. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3464-3476.
- [57] 洪荣标. 滨海湿地入侵植物的生态经济和生态安全管理——以福建滨海湿地的互花米草为例[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
- [58] 肖德荣, 祝振昌, 袁琳, 田昆. 上海崇明东滩外来物种互花米草二次入侵过程. 应用生态学报, 2012, 23(11): 2997-3002.
- [59] Qin F F, Tang B P, Zhang H S, Shi C Y, Zhou W Z, Ding L R, Qin P. Potential use of *Spartina alterniflora* as forage for dairy cattle. Ecological Engineering, 2016, 92: 173-180.
- [60] Xia H J, Kong W J, Liu L S, Li H L, Lin K X. Resource utilization conditions as biochar of an invasive plant *Spartina alterniflora* in coastal wetlands of China. GCB Bioenergy, 2020, 12(8): 636-647.
- [61] 侯利萍, 夏会娟, 孔维静, 林岩璇, 刘录三. 河口湿地优势植物资源化利用研究进展. 湿地科学, 2019, 17(5): 593-599.
- [62] 国家林业和草原局, 国家公园管理局. 山东省互花米草防治实施方案印发. 2020-08-19.
- [63] Wu B L, Ji Y F, Wang J L, Qin P. The annual habitat selection of released Père David's Deer in Dafeng Milu National Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(4): 225-232.
- [64] 中华人民共和国生态环境部. 加强外来入侵物种防治工作的通知. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172156.htm. 2003-01-13.
- [65] Davis M A. Invasion biology 1958-2005: the pursuit of science and conservation. Cadotte M W, McMahon S M, Fukami T. (eds) Conceptual Ecology and Invasion Biology: Reciprocal Approaches to Nature. Springer, Dordrecht, 2006: 35-64.
- [66] 王卿, 安树青, 马志军, 赵斌, 陈家宽, 李博. 入侵植物互花米草——生物学、生态学及管理. 植物分类学报, 2006, 44(5): 559-588.
- [67] Lu H F, Zhang H S, Qin P, Li X Z, Campbell D. Integrated emergy and economic evaluation of an ecological engineering system for the utilization of *Spartina alterniflora*. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119592.