

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2022.03.003

中国互花米草防治措施研究进展及展望

赵燕¹, 王森¹, 杨文清², 李悦¹, 孔范龙^{1*}

¹青岛大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266071; ²莱西市检验检测中心, 山东 莱西 266600

摘要: 互花米草原产于美国大西洋沿岸, 20 世纪 80 年代被引入我国, 由于抗逆性和繁殖能力强, 在我国沿海地区大肆蔓延, 对湿地生态系统生物多样性和社会经济发展产生严重威胁, 如何有效防治互花米草已成为学者研究的热点和社会关注的焦点之一。本文在文献分析的基础上, 阐明了互花米草在国内的分布现状和入侵态势; 总结了物理、化学、生物和综合防治法在互花米草防治中的适用范围及优劣势, 指出现有防治技术仍存在防治难度大、成本高、治理后易复发和预警体系不完善等问题, 为防控互花米草入侵提供理论支持; 并进一步提出了基于遥感的“信息收集+早期预警+分级防控”的防控对策和以防治为主、利用为辅的互花米草“防治+利用”技术体系, 为今后互花米草的防治和利用提供了新的研究思路。

关键词: 生物入侵; 防治措施; 分级防控; 防用结合



开放科学标识码
(OSID 码)

Research progress and prospects for the control of *Spartina alterniflora* in China

ZHAO Yan¹, WANG Sen¹, YANG Wenqing², LI Yue¹, KONG Fanlong^{1*}

¹College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;

²Laixi Inspection and Testing Center, Laixi, Shandong 266600, China

Abstract: *Spartina alterniflora* is a seashore plant native to the Atlantic coast of the United States. It was introduced into China in the 1980s. Owing to its strong adaptability and reproductive ability, *S. alterniflora* rapidly spread and invaded many coastal areas, causing a serious threat to the indigenous biodiversity of wetland ecosystems and also to the economic development. Effective control of *S. alterniflora* has become one of the important issues of research and social concern. In this study, the distribution status and invasion trend of *S. alterniflora* are summarised through literature analysis, summarising the advantages and disadvantages of physical, chemical, biological, and integrated control methods. Identified problems in the control of *S. alterniflora*, include difficult prevention, high cost of control, easy recurrence, and imperfect early warning systems. The use of remote sensing-based "information collection + early warning + hierarchical control" and technical measures of "control + utilization" of *S. alterniflora* provide a promising avenue for improved control of this invasive plant.

Key words: biological invasion; control measures; hierarchical control; combination of prevention and utilization

自 1979 年 12 月,我国先后从美国引进了 3 种在群落高度、密度和生物量等方面有明显差异的不同生态类型的互花米草 *Spartina alterniflora* Loisel (G、N 和 F 型) (左平等, 2009)。由于其耐盐、耐淹、耐酸碱能力强,加上沿海地区环境条件适宜、缺少天敌等因素,3 种互花米草均有较强的竞争力,不断侵占本土植物的生存空间,逐渐形成单优群落 (陈丽芬, 2017),阻碍盐沼排水,影响底栖生物生存

和鸟类觅食 (谢宝华和韩广轩, 2018),威胁当地的养殖业发展 (杨东和万福绪, 2014)。同时,人类活动为互花米草提供了扩散通道和适宜生境。近年来互花米草更是呈暴发式扩张,给我国沿海省市带来了巨大的经济损失和生态危害。为了保护滨海生态系统,我国沿海各省陆续制定政策,开展互花米草防治工作,如目前互花米草入侵面积最大的江苏省多次制定湿地修复规划,通过清米草、塑地形、

收稿日期 (Received): 2021-10-03 接受日期 (Accepted): 2022-06-14

基金项目: 2021 年科技惠民示范引导专项 (21-1-4-ny-1-nsh); 2020 年科技惠民示范引导专项 (20-3-4-6-nsh)

作者简介: 赵燕, 女, 硕士研究生。研究方向: 生物入侵防治。E-mail: 1246112723@qq.com

* 通信作者 (Author for correspondence), 孔范龙, E-mail: kongfanlong@qdu.edu.cn

通水系、种植物等多种举措修复湿地生态系统,截至2021年3月,已在连云港临洪河口滨海湿地清除互花米草 100 hm^2 ;互花米草在滩涂植被中所占比例最高的上海市成立专门工作小组负责实施互花米草防治工作,在崇明东滩自然保护区设置防治示范区,提出了“围、割、淹、晒、种、调”的综合治理方法;入侵面积较大且近年来入侵增速最快的山东省则印发了《山东省互花米草防治实施方案》,将东营市作为治理先行区,制定了到2022年基本完成黄河口互花米草治理工作的目标。但总体来看,目前已应用防治措施还存在着技术体系不完善、治理成本过高等问题;同时,治理完成后部分区域面临的二次入侵更是对防治技术提出了严峻的挑战。因此,本文对目前的防治措施进行总结,并提出后续的发展思路,旨在为今后互花米草的有效防治提供参考。

1 国内互花米草分布现状

由于自然地理环境和气候条件适宜,我国85%的沿海区域适合互花米草生长,其中高度适宜分布区占18%,中度适宜分布区占34%,低度适宜分布区占33%,导致互花米草的分布面积迅速增加(张丹华等,2019)。2010—2015年,山东、广西、河北及天津的互花米草面积年均增长率分别达到91.2%、24.8%、114.7%及50.4%(刘明月,2018)。截至2018年,国内互花米草的分布面积达 65338.6 hm^2 ,形成世界上最大的互花米草分布区,其中江苏、浙江、上海、福建及山东互花米草入侵严重,分别占全国互花米草面积的33.8%、25.8%、18.2%、13.1%、4.5%(刘明月,2018)。从分布区域来看,大致可以分为3部分:一是海岸滩涂地区,如福建省福鼎市;二是河口地区,如长江口的崇明东滩;三是其他受潮汐影响的河滩区域,如天津市汉沽区沿岸(Tang *et al.*, 2014)。从入侵态势来看,互花米草呈现出“东北—东南—西北”的空间迁移规律及向海岸线两侧扩张的特点,其中向海迁移距离更大(刘明月, 2018; 王聪, 2014)。从扩张速度来看,裸滩的互花米草扩张最快,其次为有碱蓬等本地植物定植的滩涂(孙贤斌和刘红玉, 2014; 王聪, 2014)。

2 互花米草防治措施

根据互花米草的繁殖—传播—定居—生长—繁殖的循环过程,阻止其进入下一环节,是控制互

花米草扩散的有效方式。目前采取的方法有物理法、化学法、生物法和综合法,国外以化学法为主,而考虑到对环境的影响,国内以物理法和生物法为主(程彬彬等, 2020; Janine *et al.*, 2016)。

2.1 物理防治

物理方法是根据植物的分布面积和区位差异采用人工拔除、刈割、遮荫、水淹及火烧等措施抑制互花米草,形式多样,主要原理是通过限制植物光合作用、呼吸作用或种子、根茎繁殖来减少互花米草的生物量(陈琳等, 2007; 王智晨等, 2006; Mateos *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2021; Xie *et al.*, 2019),适用于人力资源丰富、互花米草入侵年限短的区域,可以在短时间内达到去除效果,对环境的负面影响较小。由于互花米草主要在5—6月进行地上部分的增长,会消耗大量的能量,在扬花期(7—8月)对互花米草进行物理清除效果最好,残余的根茎缺乏足够的能量再生(陈圆等, 2014)。谭芳林等(2010)、Li & Zhang(2008)的研究表明,6—8月刈割互花米草可以有效控制其蔓延;张炯森(2016)、Zhao *et al.*(2019)的研究表明,5月份刈割互花米草后进行贴地遮荫,3个月可以杀死互花米草;陈曦等(2010)、古志钦和张利权(2009)、谢宝华等(2018)的研究表明,7月初刈割互花米草进行水淹,可以降低互花米草的生物量。但物理清除后仍有根系残留,存在二次入侵的风险,在崇明东滩刈割互花米草3个月后,滩涂的互花米草群落逐渐恢复(平原和张利权, 2010)。使用物理方法存在需要多次清除的缺点,成本相对较高,并且处理效果受刈割的时间、间隔长度和频率的影响较大(谭芳林等, 2010)。

2.2 化学防治

化学防治是通过喷洒除草剂去除互花米草。已有的化学药剂有草甘膦、咪唑烟酸、米草净及高效盖草能等,喷施后对互花米草的株高、生物量和新生苗数量有不同的削减,适用于开阔、平坦的滩涂,使用飞机和两栖车辆喷洒可以进行大面积除草(刘建等, 2005; Patten *et al.*, 2017)。在上海崇明东滩进行的高效盖草能喷施试验,可灭杀样地内92%的互花米草,且1个月内沉积物中无残留(Zhao *et al.*, 2020a)。在黄河三角洲进行的多种除草剂喷施,发现草甘膦、氰氟草酯及高效氟吡甲禾灵对灭杀互花米草的地上部分效果较好,可以完全抑制互

花米草的有性生殖(乔沛阳等,2019)。由于互花米草叶面角质层较厚、叶片密集相互遮挡,加上植物体表的沉积物以及风和潮汐的存在,一定程度上会影响药剂的施用效果,而加大药剂的施用量,则对生态系统有潜在风险(Liang *et al.*, 2020),且对地下根系的防治效果不显著(乔沛阳等,2019)。

2.3 生物防治

生物防治效果持久,对环境的影响较小,目前有引入天敌、生物替代和利用化感作用防治等途径。互花米草的天敌有食草昆虫玉黍螺 *Littoraria irrorata* Say、光蝉 *Prokelisia marginata* (Van Duzee) 以及真菌麦角菌 *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.、镰刀菌 *Fusarium* spp. 等(包衍等,2006; 秦晓静,2013; Fisher *et al.*, 2005; Grevstad *et al.*, 2003), 对互花米草有一定的控制效果,但直接引入可能会危害其他动植物,造成二次入侵,目前在我国暂无这种方法的使用案例。生物替代是指在入侵地人工选育竞争力强的植物替代互花米草,如芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.、海三棱藨草 *Scirpus x mariqueter* Tang et Wang 等本土草本植物和秋茄 *Kandelia candel* (L.) Druce、海桑 *Sonneratia caseolaris* (L.) Engl.、无瓣海桑 *Sonneratia apetala* Buch. - Ham. 等红树植物(陈丽芬,2017; 黄冠阁,2009; 唐国玲等,2007; Li *et al.*, 2021), 能降低互花米草的盖度,阻止互花米草向陆深入,适用于土壤条件优良、本地植物竞争力强的区域。江苏苏北盐沼的实地研究证明,芦苇的存在可以显著抑制互花米草生长,人工去除互花米草后移栽芦苇,可以恢复当地的生态环境(陈正勇等,2012)。缺点是对环境要求较高,植物生长所需时间长,其间需要人为监测和管理,移栽后的第三个生长季,芦苇的植株密度和结穗率显著下降,存活率仅为 25%,互花米草会再次入侵(陈正勇等,2012)。利用化感作用防治互花米草的主要途径是通过化感物质的释放,影响互花米草的光合作用、呼吸作用等生理功能(Rice, 1984),从而抑制互花米草的正常生长,导致其生物量和结实率下降,甚至枯萎死亡,其效果明显、对环境的影响较小且适用于大部分被入侵地区,被认为是防控互花米草的突破点。最有效的施加方式是在新种子库未形成时将植物化感物质提取制成的抑制剂投加到互花米草种群中,可以阻碍其通过种子蔓延。目前,发现的对互花米草有抑制作用的植

物有无瓣海桑、芦苇、桉树 *Bambusa multiplex* (Lour.)、马缨丹 *Lantana camara* L. 和石莼 *Ulva* spp. 等(陈礼玲等,2011; 李玫等,2012; 郑琨等,2009; Rudrappa *et al.*, 2007; Watson *et al.*, 2015), 通过提取其中的有效成分可以抑制互花米草的种子萌发和幼苗生长。互花米草自身也会分泌某些化学物质,阻碍植株发育和种子萌发(齐西同,2015),但仅依靠自毒作用,无法达到抑制互花米草扩散的目的。目前,对于利用化感作用防治互花米草的研究仍处于实验室阶段,对应植物的抑制机理尚不明确,该选哪种植物、选用什么类型的提取介质仍需继续研究。

2.4 综合防治

在实际应用中,仅使用单一的方法很难取得预期效果,综合防治是考虑各方法的优势,因地制宜将各种方法结合起来防治互花米草。如上海崇明东滩采取了带水刈割、喷洒化学药剂、粉碎发酵的综合处理技术:即先采用机械以及人工方法,清除互花米草的地上部分,再淹水使互花米草的地下部分腐烂,无法刈割的地方喷洒高效盖草能进行处理;同时创造性地提出粉碎发酵法,将互花米草地上部分切割粉碎后再混合酵素菌喷洒,使地下部分快速腐烂分解,增加土壤营养成分(顾燕飞,2019)。此方法提高了治理效率,减轻了治理过程中对生态系统的影响,可以长期发挥作用。但由于各地的实际情况不同,需要考虑当地的经济、气候等因素制定合适的防控方案。

3 互花米草防治过程中存在的问题

目前,国内互花米草防治工程普遍运用刈割配合淹水、遮荫或翻耕等物理方法(谢宝华和韩广轩, 2018), 存在的问题主要有 3 方面。(1) 防治难度大,成本高。大量的资金需求是目前防治工作最大的障碍,这是因为互花米草根系发达,群落侵占面积广(林貽卿等,2008),并且涉及海岸带施工,专业作业机械成本高,操作复杂(Patten *et al.*, 2017),导致防治难度和成本过高。并且由于互花米草秸秆含盐量高,为秸秆的大规模利用带来不利影响(Tang *et al.*, 2021),为避免刈割后的秸秆随意堆积产生二次污染,需要对其进行运输和处理,又加重了防治成本。因此,治理互花米草所需大量资金的投入,大大限制了互花米草防治工作的实施。(2) 对于治理后区域的二次入侵问题缺乏相应的防范

措施,治理后易复发。由于互花米草的生命力及竞争力强,根系在土壤中的延伸范围大(陈圆等,2014;邓自发等,2006),清理难度大,且清理过后的区域仍有残留的种子和可分蘖的根茎,会重新萌发成幼苗,加上从远处漂浮来的种子,若不采取有效措施,单株互花米草定植后即可在9个月内扩展到86株以上(林贻卿等,2008),经处理的湿地会遭到互花米草二次入侵(Zhao *et al.*, 2020b)。(3)目前缺乏对潜在入侵区域的防范预警机制。光滩生态环境脆弱(Patten *et al.*, 2017),互花米草一旦通过种子或其他途径入侵后会迅速蔓延(陈圆等,2014),形成大片的互花米草群落,带来一系列的生态问题和后期治理难题。提前预警并加以防范,是避免入侵问题产生的关键。

4 展望

4.1 构建“信息收集+早期预警+分级防控”的防控对策

完善的防控体系应该包括“信息收集+早期预警+分级防控”3部分,从不同的时空尺度上防控互花米草,当前遥感和建立模型等技术的发展为构建这一防控体系提供了可能。目前已有基于遗传算法、元胞自动机和网格的模型(李京等,2021;张静涵等,2020;张思青等,2021;Anderson *et al.*, 2021;Zheng *et al.*, 2016),可以模拟互花米草的入侵过程,分析其种群扩散动态,预测潜在分布区,并划定重点防控区。首先,可以通过遥感、无人机及现场调查等方式,结合气象部门的统计资料,收集各地互花米草的种群规模以及气候、土质、潮汐时间等环境信息。其次,对各地状况进行分析整理,可大体分为2类地区:Ⅰ潜在分布区、Ⅱ已入侵区域,从而采取不同的应对策略。Ⅰ类区需要采取早期预警措施防范互花米草入侵,有效的预防工作是防治生物入侵的关键。3—5月是种子萌发定居的关键时期(苑泽宁和石福臣,2009),待5月末幼苗长到一定高度时,通过人工巡视、无人机低空探查及高分影像数据对该区域进行野外监测,发现幼苗后及时预警,并构建快速反应体系将其铲除(杨俊芳等,2017)。对于Ⅱ类区,则需要进行分级防控。根据各区域互花米草种群的生态风险,划分低、中、高风险等级,对不同区域采取针对性的对策,并通过建模评估方案的效果,对此进行成本-效益分析和环境影响评价,不断调整使成本最低。对不同风险等

级区域的应对策略如下:(1)对于互花米草入侵时间长、面积大且扩散迅速的高风险地区,需要选择适当的物理、化学方法从种群密度较低的区域逐步治理,去除互花米草后再种植芦苇、秋茄等竞争力强的本地物种防范二次入侵;(2)对于入侵初期、种群规模较小的中风险地区,可采用物理方法直接清除互花米草,然后种植本地植物占据生态位;(3)对于已被治理的低风险地区,可以设置一定的观察期,及时铲除残留根系萌生的幼苗,防止互花米草再次入侵。

4.2 构建以防治为主、利用为辅的互花米草“防治+利用”技术体系

虽然互花米草的入侵造成了一系列的生态危害,但其在保滩护岸、促淤造陆等方面发挥的积极作用也不容忽视,加上互花米草生物量丰富、热值高等特点(何志霞等,2016;Li & Zhang, 2008),对互花米草治理不宜采用“一刀切”的方式。可控的情况下,可以在合适的区域保留部分互花米草,构建以防治为主、利用为辅的互花米草“防治+利用”技术体系。近年来,学者们在关注互花米草防控的同时,开始注重互花米草开发利用的研究,以期弥补单纯采取灭杀措施来控制互花米草的不足并从经济上为互花米草的防治提供支持(白盼,2021)。现有的利用方式可分为饲料化、肥料化、燃料化及原料化等低值化利用方式和制造药品、保健品、高效生物电池和生物炭及提取可利用基因等高值化利用方式(钦佩,2019;王涛涛等,2020;谢宝华等,2019;周梦岩等,2019;Cheng *et al.*, 2021;Wang *et al.*, 2021),分别占比69%和31%。在传统低值化利用方面,由于互花米草含盐率高,无法直接饲喂、堆肥或燃烧(王洁等,2017;Tang *et al.*, 2021),需要进一步处理,这增加了处理成本;加上市场需求小、原料收集运输成本高、转化率低、可替代性强等问题,低值化利用一直未能规模化开展。相对而言,由于互花米草富含蛋白质和有机酸、黄酮、香豆素类有机物以及铁、锌等微量元素(刘金珂等,2014;单承莺等,2016),制备药品、保健品等的高值化利用能带来较高的收益和成果,成为有效利用互花米草的可能方向。上海崇明东滩已创造性地开展了收割互花米草后制备生物矿质液、降脂胶囊和生物护岸材料的生态工程,取得了较高的经济收益(辛悦等,2021)。

为了进一步做好互花米草的防治工作,首先应当构建以防治为主、利用为辅的互花米草“防治+利用”技术体系。这一体系的构建,应在完善互花米草防治体系的基础上,加大研发投入,基于市场需求探索互花米草的深层价值,如利用其抗逆基因培育优质作物、开发蛋白粉及功能饮料等保健品、制备天然化妆品和天然食品添加剂等,提高产品品质,使开发互花米草有较高回报。其次应将实验室的研究成果与企业联合起来,促进高值化产品的产业化,如互花米草提取的生物矿质液以及黄酮类药物已被证明对人的健康状况有较好的改善作用,后续应改进此类高值产品的生产工艺,形成完善的产业链,并对产品进行推广。

参考文献

- 白盼, 2021. 互花米草专利技术研究进展及在保健食品中的应用. *食品安全导刊* (9): 143-144.
- 包衍, 罗江兰, 张伟琼, 聂明, 肖明, 2006. 互花米草根际镰刀菌的分离鉴定及致病性测定. *杂草科学* (2): 6-8.
- 陈礼玲, 庞珂佳, 李同臣, 李西柳, 王俊儒, 2011. 角茴香根和地上部水浸液对杂草反枝苋的化感作用. *西北林学院学报*, 26(1): 138-142.
- 陈丽芬, 2017. 小岬镇大港湾互花米草治理和红树林种植技术探讨. *安徽农学通报*, 23(12): 129-131.
- 陈琳, 邓自发, 安树青, 赵聪蛟, 周长芳, 智颖飙, 2007. 淡水咸水轮换浇灌抑制互花米草的克隆生长和繁殖. *植物生态学报*, 31(4): 645-651.
- 陈曦, 张利权, 袁琳, 2010. 持续淹水治理互花米草技术对盐沼土壤的影响. *环境科学学报*, 30(5): 1093-1100.
- 陈圆, 曾兆华, 秦晓静, 杨广, 2014. 互花米草移栽种群无性繁殖的月动态. *生物安全学报*, 23(3): 173-177.
- 陈正勇, 王国祥, 刘金娥, 徐伟伟, 王刚, 2012. 苏北滨海湿地互花米草两种繁殖体与本地种竞争能力分析. *海洋科学进展*, 30(3): 380-389.
- 程彬彬, 刘长娥, 原源, 2020. 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*, 36(3): 90-95.
- 邓自发, 安树青, 智颖飙, 周长芳, 陈琳, 赵聪蛟, 方淑波, 李红丽, 2006. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. *生态学报*, 26(8): 2678-2686.
- 顾燕飞, 2019. 崇明东滩互花米草生态控制的施工技术及效果. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 37(5): 83-88.
- 古志钦, 张利权, 2009. 互花米草对持续淹水胁迫的生理响应. *环境科学学报*, 29(4): 876-881.
- 何志霞, 纪长浩, 徐贵生, 2016. 互花米草在乙醇-水体系中直接液化制备生物油. *农业工程学报*, 32(20): 236-241.
- 黄冠阁, 2009. 漳江口红树林区互花米草的生长特性及其与秋茄的相对竞争力. 硕士学位论文. 厦门: 厦门大学.
- 李京, 刘亚静, 刘明月, 2021. 基于 Sentinel-2A 影像的互花米草信息提取研究. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 43(3): 14-19, 48.
- 李玫, 廖宝文, 陈玉军, 管伟, 2012. 无瓣海桑不同器官水浸液对互花米草幼苗的化感效应. *环境科学与技术*, 35(11): 46-49.
- 林贻卿, 谭芳林, 肖华山, 2008. 互花米草的生态效果及其治理探讨. *防护林科技* (3): 119-123, 142.
- 刘建, 杜文琴, 马丽娜, 黄素芳, 刘波, 2005. 大米草防除剂: 米草净的试验研究. *农业环境科学学报*, 24(2): 410-411.
- 刘金珂, 王天弘, 周长芳, 胡楚琦, 王涵兴, 2014. 互花米草黄酮含量分析及其生态学意义. *生物安全学报*, 23(1): 18-23.
- 刘明月, 2018. 中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析. 博士学位论文. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所.
- 平原, 张利权, 2010. 物理措施控制互花米草的长期效果研究. *海洋环境科学*, 29(1): 32-35.
- 齐西同, 2015. 九段沙湿地入侵植物互花米草自毒作用的初步研究. 硕士学位论文. 上海: 上海大学.
- 秦晓静, 2013. 玉黍螺对割除防治互花米草的巧效作用. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.
- 乔沛阳, 王安东, 谢宝华, 王丽, 韩广轩, 梅宝玲, 张希涛, 2019. 除草剂对黄河三角洲入侵植物互花米草的影响. *生态学报*, 39(15): 5627-5634.
- 钦佩, 2019. 互花米草与人体健康关系研究进展. *中国野生植物资源*, 38(5): 70-73.
- 单承莺, 马世宏, 季俊锋, 沈燕, 张焕仕, 2016. 互花米草在天然化妆品中的应用研究. *中国野生植物资源*, 35(3): 71-73.
- 孙贤斌, 刘红玉, 2014. 基于 Markov-CA 模型互花米草扩张影响因素与强度辨识. *生态与农村环境学报*, 30(1): 38-43.
- 谭芳林, 林贻卿, 肖华山, 潘辉, 崔丽娟, 林捷, 罗美娟, 黄丽, 乐通潮, 罗彩莲, 2010. 不同时期刈割对互花米草生长影响的研究. *湿地科学*, 8(4): 379-385.
- 唐国玲, 沈禄恒, 翁伟花, 章家恩, 廖宝文, 刘金苓, 滕兴顺, 2007. 无瓣海桑对互花米草的生态控制效果. *华南农业大学学报*, 28(1): 10-13.
- 王聪, 2014. 海滨湿地互花米草沼泽景观演变机制研究. 博士学位论文. 南京: 南京师范大学.
- 王洁, 顾燕飞, 尤海平, 2017. 互花米草治理措施及利用现状研究进展. *基因组学与应用生物学*, 36(8):

3152-3156.

- 王涛涛, 杨勇, 魏唯, 曾维科, 郭亚楠, 林辰涛, 马留银, 2020. 互花米草 *SanAC36* 转录因子克隆及表达分析. 福建农林大学学报(自然科学版), 49(5): 695-702.
- 王智晨, 张亦默, 潘晓云, 马志军, 陈家宽, 李博, 2006. 冬季火烧与收割对互花米草地上部分生长与繁殖的影响. 生物多样性, 14(4): 275-283.
- 谢宝华, 韩广轩, 2018. 外来入侵种互花米草防治研究进展. 应用生态学报, 29(10): 3464-3476.
- 谢宝华, 路峰, 韩广轩, 2019. 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, 27(12): 1870-1879.
- 谢宝华, 王安东, 赵亚杰, 朱书玉, 宋建彬, 韩广轩, 管博, 张丽文, 2018. 刈割加淹水对互花米草萌发和幼苗生长的影响. 生态学杂志, 37(2): 417-423.
- 辛悦, 邹彩瑜, 王磊, 刘金娥, 李秀珍, 2021. 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, 37(11): 1394-1403.
- 杨东, 万福绪, 2014. 外来入侵种互花米草的研究进展. 植物保护, 40(2): 5-10.
- 杨俊芳, 马毅, 任广波, 张精英, 樊彦国, 2017. 基于国产高分卫星遥感数据的现代黄河三角洲入侵植物互花米草监测方法. 海洋环境科学, 36(4): 596-602.
- 苑泽宁, 石福臣, 2009. 外来物种互花米草种子萌发的生态适应性. 生态学杂志, 28(12): 2466-2470.
- 张丹华, 胡远满, 刘淼, 2019. 基于 Maxent 生态位模型的互花米草在我国沿海的潜在分布. 应用生态学报, 30(7): 2329-2337.
- 张静涵, 张轩波, 沈美亚, 王怡道, 安树青, 2020. 互花米草在中国的潜在生存区域预测. 湿地科学与管理, 16(3): 42-46.
- 张炯森, 2016. 覆盖对互花米草生理特性和生长的影响. 福建林业科技, 43(3): 72-75.
- 张思青, 刘依, 刘怡然, 邵冬冬, 孙丽敏, 郑劭彦, 2021. 基于元胞自动机的黄河三角洲互花米草种群扩散动态模拟. 北京师范大学学报(自然科学版), 57(1): 121-127.
- 郑琨, 赵福庚, 张茜, 钦佩, 2009. 盐度变化条件下芦苇对互花米草的化感效应. 应用生态学报, 20(8): 1863-1867.
- 周梦岩, 王涛涛, 陈冉红, 金松松, 李明, 马留银, 2019. 互花米草 *NHX2* 基因的克隆与功能鉴定. 西北植物学报, 39(12): 2093-2099.
- 左平, 刘长安, 赵书河, 王春红, 梁玉波, 2009. 米草属植物在中国海岸带的分布现状. 海洋学报, 31(5): 101-111.
- ANDERSON C J, HEINS D, PELLETIER K C, BOHNEN J L, KNIGHT J F, 2021. Mapping invasive *Phragmites australis* using unoccupied aircraft system imagery, canopy height models, and synthetic aperture radar. *Remote Sensing*, 13(16): 3303.
- CHENG H K, TANG Z R, LUO X Z, ZHENG Z, 2021. *Spartina alterniflora*-derived porous carbon using as anode material for sodium-ion battery. *Science of The total Environment*, 777: 146120.
- FISHER A J, DITOMASO J M, GORDON T R, 2005. Intraspecific groups of *Claviceps purpurea* associated with grass species in Willapa Bay, Washington, and the prospects for biological control of invasive *Spartina alterniflora*. *Biological Control*, 34(2): 170-179.
- GREVSTAD F S, STRONG D R, GARCIA-ROSSI D, SWITZER R W, WECKER M S, 2003. Biological control of *Spartina alterniflora* in Willapa Bay, Washington using the planthopper *Prokelisia marginata*: agent specificity and early results. *Biological Control*, 27: 32-42.
- JANINE A, ERNITA V W, TARYN R, 2016. First record of *Spartina alterniflora* in southern Africa indicates adaptive potential of this saline grass. *Biological Invasions*, 18(8): 2153-2158.
- LI H P, ZHANG L Q, 2008. An experimental study on physical controls of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 32(5): 11-21.
- LI S H, GE Z M, TAN L S, ZHOU K, HU Z J, 2021. Coupling *Scirpus* recruitment with *Spartina* control guarantees recolonization of native sedges in coastal wetlands. *Ecological Engineering*, 166: 106246.
- LIANG Q U, YAN Z Z, LI X Z, 2020. Influence of the herbicide haloxyfop-R-methyl on bacterial diversity in rhizosphere soil of *Spartina alterniflora*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194: 110366.
- MATEOS N E, CAMBROLLE J, GARCIA D L J, PARRA R, REDONDO G S, 2012. Mechanical and chemical control of the invasive cordgrass *Spartina densiflora* and native plant community responses in an estuarine salt marsh. *Journal of Aquatic Plant Management*, 50: 106-111.
- PATTEN K, CASEY O C, METZGER C, 2017. Large-scale chemical control of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in Willapa Bay, WA: towards eradication and ecological restoration. *Invasive Plant Science & Management*, 10(3): 284-292.
- RICE E L, 1984. *Allelopathy*. New York: Academic Press.
- RUDRAPPA T, BONSALE J, GALLAGHER J L, SELISKAR D M, BAIS H P, 2007. Root-secreted allelochemical in the noxious weed *Phragmites australis* deploys a reactive oxygen species response and microtubule assembly disruption to

- execute rhizotoxicity. *Journal of Chemical Ecology*, 33 (10): 1898–1918.
- TANG L, GAO Y, LI B, WANG Q, WANG C H, ZHAO B, 2014. *Spartina alterniflora* with high tolerance to salt stress changes vegetation pattern by outcompeting native species. *Ecosphere*, 5(9): 1–18.
- TANG L, ZHOU Q S, GUO W, LI P, GAO Y, 2021. Importance of high severity in a physical removal treatment for controlling invasive *Spartina alterniflora*. *Ecological Engineering*, 171: 106375.
- WANG W, BAI J H, LU Q Q, ZHANG G L, WANG D W, JIA J, GUAN Y N, YU L, 2021. Pyrolysis temperature and feedstock alter the functional groups and carbon sequestration potential of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora*-derived biochars. *GCB Bioenergy*, 13(3): 493–506.
- WATSON E B, WIGAND C, OCZKOWSKI A J, SUNDBERG K, VENDETTUOLI D, JAYARAMAN S, SALIBA K, MORRIS J T, 2015. *Ulva* additions alter soil biogeochemistry and negatively impact *Spartina alterniflora* growth. *Marine Ecology Progress Series*, 532: 59–72.
- XIE B H, HAN G X, QIAO P Y, MEI B L, WANG Q, ZHOU Y F, ZHANG A F, SONG W M, GUAN B, 2019. Effects of mechanical and chemical control on invasive *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta, China. *PeerJ*, 7(8): e7655.
- ZHAO C Y, LI J S, ZHAO X J, 2019. Mowing plus shading as an effective method to control the invasive plant *Spartina alterniflora*. *Flora*, 257(7): 151408.
- ZHAO Z Y, XU Y, YUAN L, LI W, ZHU X J, ZHANG L Q, 2020a. Emergency control of *Spartina alterniflora* re-invasion with a chemical method in Chongming Dongtan, China. *Water Science and Engineering*, 13(1): 24–33.
- ZHAO Z Y, YUAN L, LI W, TIAN B, ZHANG L Q, 2020b. Re-invasion of *Spartina alterniflora* in restored saltmarshes: seed arrival, retention, germination, and establishment. *Journal of Environmental Management*, 266: 110631.
- ZHENG S Y, SHAO D D, ASAEDA T, SUN T, LUO S X, CHENG M, 2016. Modeling the growth dynamics of *Spartina alterniflora* and the effects of its control measures. *Ecological Engineering*, 97: 144–156.

(责任编辑:陈晓雯)