应用生态学报 2018年10月 第29卷 第10期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Oct. 2018, 29(10): 3464-3476 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201810.006

外来入侵种互花米草防治研究进展

谢宝华 韩广轩*
(中国科学院烟台海岸带研究所，中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室，山东烟台 264003)

摘 要 互花米草在其原产地具有保滩护堤、促淤造陆等生态功能，但在被引入其他地区后，常给当地生态系统带来诸多负面影响，因此，互花米草常被视为入侵种，对互花米草的入侵性以及防控方面的研究成为一大热点.本研究从物理防治、化学防治、生物防治、生物替代防治、综合防治和防控策略6个方面综述了互花米草防治的最新研究进展，对各类措施的理论基础、技术方案、防治效果和环境影响等方面进行了分析，指出了现有防治技术的不足，并提出生态风险分区防控等建议.

关键词 入侵; 刈割; 淹水; 翻耕; 除草剂; 克隆苗; 实生苗

Control of invasive *Spartina alterniflora*: A review. XIE Bao-hua, HAN Guang-xuan* (*Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *Shandong, China*).

Abstract: *Spartina alterniflora* has important ecological functions in its original place, such as bank protection and land reclamation, but often has negative impacts on the local ecosystem after it is introduced into new areas. This species is often considered as an invasive one. The invasion and control of *S. alterniflora* have caused a great concern. We reviewed the latest research progresses in the prevention and control of *S. alterniflora* from six different perspectives, including physical control, chemical control, biological control, biological substitution control, integrated control, and control strategies. The theoretical basis, technical details, control effect and environmental impact of the six kinds of control technologies were analyzed. We pointed out the shortcomings of existing control technologies and proposed some suggestions such as targeted control of different ecological risk zones.

Key words: invasion; mowing; waterlogging; plowing; herbicide; clonal seedling; seedling.

米草属(*Spartina*)隶属于禾本科虎尾草族，全球共有17个种，均为多年生盐沼植物，原产于美国沿岸、欧洲和非洲北部，多数生长于滨海盐沼和河口区域[1].米草属植物在其原产地盐沼中是常见的优势种，在被无意或有意引入其他地区后，7种米草具有很强的入侵性[2].基于保滩护岸、促淤造陆及改良土壤等目的，我国共引入了4种米草，分别是大米草(*S. anglica*)、互花米草(*S. alterniflora*)、狐米草(*S. patens*)、大绳草(*S. cynosuriodes*)[3].大绳草和狐米草的生态位一般在潮上带，没有入侵性，其地上部分含盐量小，被作为牧草推广，分布区域和范围全部受人工控制; 大米草主要生长在潮间带上部，植株矮小，分布稀疏，在我国海岸带区域退化严重，面积不足16 hm^2[4].互花米草于1979年被引入我国[5]，具有极强的耐盐、耐淹和繁殖能力，在我国海岸带快速蔓延[6-7]，对大部分沿海滩涂湿地的生物多样性维持等生态安全构成严重威胁[8]，成为我国沿海滩涂危害性最强的入侵植物.2003年初，国家环保总局和中国科学院联合发布了首批入侵我国的16种外来入侵种名单，互花米草作为唯一的盐沼植物名列其中[9].

互花米草原产于北美东部，在世界上很多地区的海岸带生态系统是一个臭名昭著的入侵者，例如中国、新西兰、非洲南部和美国的太平洋海岸

本文由中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STS-ZDTP-023, KFJ-EW-STS-127)和国家级自然保护区专项资金项目(Y639071021)资助 This work was supported by the Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-STS-ZDTP-023, KFJ-EW-STS-127) and the Special Fund of National Nature Reserve (Y639071021).
2018-02-06 Received, 2018-04-19 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gxhan@yic.ac.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等[3,10-11].互花米草在沿海沼泽中占据优势，威胁甚至取代了当地的动植物[8].快速有效地控制互花米草、限制其扩散速度和规模，尽可能减少或规避其生态危害，成为滨海湿地管理中迫切需要解决的重要问题.目前已经探索了多种控制互花米草的方法，如物理方法、化学方法和生物防治方法等[10,12-16]，但由于互花米草极强的入侵性和竞争力，依然缺乏控制其扩散的经济有效的途径.本文综述了国内外关于互花米草防控的研究报道，以期为我国互花米草控制提供借鉴.

1　互花米草防治研究概况

互花米草为多年生草本植物，其繁殖方式包括种子的有性繁殖和根茎或营养片段的无性繁殖[17]，地上植株进行光合作用，合成有机物质，开花结实，进行有性繁殖，地下部分（根茎和须根）可吸收养分，促进生长，并进行无性繁殖.各种方法防治互花米草的原理是单一或同时限制互花米草的生长、有性繁殖和无性繁殖（图 1），从而达到控制扩散或完全清除的目标.

目前，亚洲、北美洲、欧洲和非洲均有互花米草防治研究的报道，其中，以中国和美国最多[2,7-16]（表 1）.中国的研究以福建省和上海市最多，均尝试了至少 7 种防治方法，其次是广东省珠海市，其防治方法主要是以红树林替代互花米草.美国的研究集中在路易斯安那州和华盛顿州，欧洲的研究主要在西班牙.不同地区研究的侧重点不同，这可能与各地区互花米草生境以及人力和物力成本不同有关，国外以化学防治为主，国内以物理防治为主，国外无生物替代的研究，国内则无生物天敌防治的研究.

2　互花米草防治方法

2.1　物理防治

物理防治方法一般不会造成环境污染，对生物种类的影响也较小，主要包括人工去除、覆盖遮荫、刈割、火烧、水淹等措施，可限制互花米草呼吸或光合作用，最终杀死植株（表 2），物理措施也常被作为生物替代方法的前期处理.利用物理控制技术治理互花米草，必须充分考虑米草生育期、控制技术的频度和强度等因素，才能有效发挥其防治效果[18-19].

2.1.1 人工去除　人工去除是通过人力或简单设备去除互花米草地上和地下植株，此法虽然有效，但却难以大面积推广.人工去除的主要优点是最少的工人培训和简单的设备（如铁锹），最大缺点是去除根系耗时太久.对于入侵不足 1 年的互花米草，人工去除是个有效的方法，然而，只要附近还有成熟的互花米草，这种控制措施就需要持续的、无限期的实施[19].另外，互花米草的去除会对河口系统造成较大的环境影响[20].

2.1.2 翻耕　先将互花米草地上部分割除，然后用铁锹或合适的机械进行一定深度的翻耕.翻耕措施在当年有很好的控制效果，但到第二年生长季末期

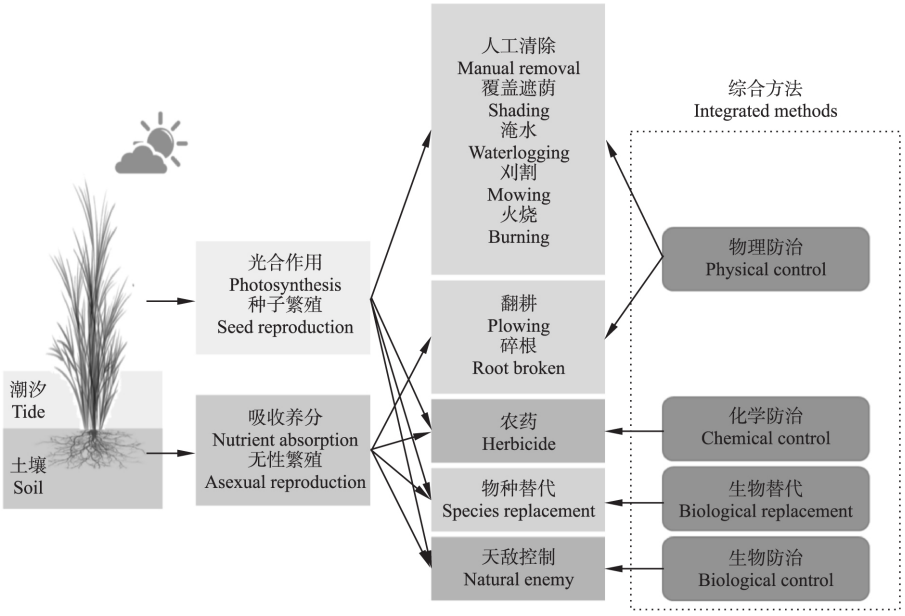

图 1　互花米草防治方法

Fig.1　Methods of controlling *Spartina alterniflora*.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 全球互花米草防治研究概况

Table 1 An overview of the studies on the control of *Spartina alterniflora*

防治方法类型 Kind of controlling method	具体方法 Method in detail	福建 Fujian	广西 Guangxi	上海 Shanghai	江苏 Jiangsu	广东 Guangdong	山东 Shandong	美国弗吉尼亚 Virginia, USA	美国华盛顿州 Washington, USA	美国路易斯安那 Louisiana, USA	南非 South Africa	西班牙 Spain
化学防治 Chemical control	滩涂互花米草除控剂 Control agents for *S. alterniflora*	√										
	米草净 Micaojing	√										
	米草星 Micaoxing	√										
	咪唑烟酸 Imazapyr								√	√		
	草铵膦 Glufosinate ammonium									√		
	草甘膦 Glyphosate									√		√
	咪唑乙烟酸 Imazethapyr									√		
	草甘膦+咪唑烟酸 Glyphosate+ Imazapyr										√	
生物防治 Biological control	玉黍螺 *Littoraria irrorata*							√				
	麦角菌 *Ciavieps purpurea*								√			
	稻飞虱 *Prokelisia marginata*								√			
生物替代 Biological substitution	芦苇 *Phragmites australis*			√								
	海桑 *Sonneratia caseolaris*					√						
	无瓣海桑 *Sonneratia apetala*					√						
	海桑和无瓣海桑 *Sonneratia caseolaris* +*S. apetala*					√						
物理防治 Physical control	刈割 Mowing	√		√								√
	覆盖遮荫 Shading	√				√						
	人工去除 Manual removal								√			
	翻耕 Plowing			√						√		
	火烧 Burning			√						√		
	碎根 Rhizome broken			√								√
	淹水 Waterlogging			√	√							
综合防治 Integrated control	刈割+翻耕 Mowing+plowing	√										
	刈割+深翻+生物替代 Mowing+plowing+biological substitution	√										
	刈割+遮荫 Mowing+shading		√									
	刈割+淹水 Mowing+waterlogging			√			√					
	刈割+草甘膦 Mowing+glyphosate											√
防治方法数量 Number of controlling methods		7	1	7	1	4	1	1	4	6	1	4

互花米草基本恢复如初，另外，不同翻耕深度之间没有显著性差异[18]. 笔者在山东东营黄河三角洲的研究发现，生长季末期（10 月）进行 20 cm 深度的翻耕，第二年无克隆苗萌发，但有少量种子萌发的实生苗，这些种子很可能来自于附近的互花米草（未发表数据）.

2.1.3 碎根 碎根一般是在翻耕的基础上，进一步切碎植物根茎，破坏根茎的结构，从而抑制米草生长. 碎根处理显著抑制互花米草生长，其抑制作用随处理深度增加而增强，碎根处理 1 年后米草分蘖密度和地上生物量分别减少 30%～85%和 57%～86%，但经过 2 个生长季后，互花米草基本恢复如初[18,21]. 从控制效率和成本角度考虑，与人工去除类似，碎根措施仅适用于清除新入侵的互花米草小斑块.

2.1.4 覆盖遮荫 覆盖遮荫不仅减少了光强度，还改变了光质，这是植物在竞争中所经历的最重要的胁迫之一. 不同遮荫强度下互花米草的叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白质含量，以及光合能力和生物量等均存在显著差异. 无瓣海桑（*Sonneratia apetala*）成功控制互花米草的主要机制可能是林冠的遮荫作用，0.6～0.7 的林分郁闭度是红树林抑制和替代互花米草的临界点，遮荫透光率越低，互花米草越容易死亡[22-24]. 覆盖遮荫法只适用于小块互花米草，还需要考虑海风的影响.

2.1.5 刈割 刈割措施直接割除地上植株，对米草种群的密度、株高、生物量等产生不同程度的影响.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　防治互花米草的物理措施

Table 2　Physical methods of controlling *Spartina alterniflora*

措施 Method	技术细节 Technical detail	控制效果 Effect of control	研究地点 Experimental site	文献 Reference
翻耕 Plowing	2—3 月翻耕,深度为 20、40 和 60 cm	生长季末期,互花米草密度和地上生物量分别比对照低约 30%和 70%,不同深度无差异; 第二年生长季末期各处理与对照无显著性差异	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[18]
	冬季翻耕	控制效率约为 73%	美国路易斯安那州 Louisiana, USA	[36]
覆盖遮荫 Shading	5 月开始遮荫,3 个透光率处理分别为 0、30%和 70%	不同的遮光度对米草的各项光合特性指标以及叶绿素含量、可溶性糖含量等有显著的抑制作用,全暗覆盖处理的防治效果显著,75 d 后米草全亡,透光率为 30%和 70%的遮荫处理的控制效果分别为 68%和 7%	福建漳江口红树林国家级自然保护区 Fujian Zhangjiangkou Mangrove National Nature Reserve, China	[23]
	4—7 月盆栽,3 个透光率处理: 65.8%、32.5%和 15.2%	不同遮荫强度下互花米草的生长状况、光合能力及生物量等均存在显著差异,透光率为 15%时,遮荫 1 个月后互花米草全部死亡	广东广州 Guangzhou, Guangdong, China	[22]
火烧 Burning	8 月火烧,此时米草株高约 80 cm	火烧后 2~3 个月内有短期的控制效果,但 4 个月后互花米草的株高、密度、生物量和固碳能力与对照无异.	美国路易斯安那州 Louisiana, USA	[32]
	冬季(1 月) 火烧	火烧对米草的株高、地上生物量和种子产量无显著影响,因此对控制米草无明显效果	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[28]
人工去除 Manual removal	-	对于入侵不足一年的互花米草,人工去除是个有效的方法,然而,只要附近还有成熟的互花米草,这种控制措施就需要持续的和无限期的实施	美国华盛顿州 Washington, USA	[19]
碎根 Rhizomebroken	2—3 月先翻耕再碎根,深度为 20、40、60 cm	控制效果与碎根深度正相关,生长季末米草密度和地上生物量分别为对照处理的 30%~70%和 57%~86%; 但 2 个生长季后,米草基本恢复如对照	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[18]
	12 月先去除地上植株,再人工碎根至 20 cm 长	碎根处理 1 年后和 2 年后米草分蘖密度分别减少 85%和 66%	西班牙大西洋沿岸 The Atlantic coast of Spain	[21]
淹水 Waterlogging	5 月对 7~10 cm 高的实生苗淹水,淹水深度为 10 和 20 cm,淹水时长处理为 2、4、6、12 和 24 h·d^{-1}	随着淹水深度和淹水时间的增加,互花米草幼苗的分蘖数量、地上生物量显著减少,全天淹水 20 cm 可以有效抑制互花米草幼苗的生长和繁殖,3 个月后互花米草全部死亡	江苏盐城 Yancheng, Jiangsu, China	[33]
	6 月野外取米草(高 42 cm) 进行盆栽试验,淹水盐度为 8,淹水深度分别为 25、50、75 和 100 cm	低水位(25 cm) 淹水胁迫促进了互花米草的营养生长,其株高、叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均显著高于同期对照组,其结实率仅为对照的 57.3% (P>0.05),而高水位(≥50 cm) 淹水胁迫能有效地抑制互花米草营养和生殖生长,生长季末结实率为 0	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[34]
刈割 Mowing	7 个刈割时间的处理,4—9 月每个月各刈割一次并移走地上植株	最佳刈割时期是米草穗期,5—7 月的单次刈割均使米草活根显著减少,从而抑制萌发,10 月下旬米草密度比对照处理分别减少了 35.4%~53.6%.4 月和 8-9 月的刈割反而增加了活根生物量,促进米草再生	福建泉州 Quanzhou, Fujian, China	[26]
	3—10 月,每月各刈割一次	刈割时机非常重要,宜选在 7—9 月,以 8 月扬花期最佳.8 月刈割处理的互花米草密度在第 1、2、3 个生长季末期分别比对照处理减少了 99.8%、47%和 35%	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[18,29]
	12 月人工刈割,留茬<10 cm	刈割处理 1 年后和 2 年后米草分蘖密度分别减少 56%和 52%	西班牙大西洋沿岸 The Atlantic coast of Spain	[21]
	刈割 2 次,初割时间分别为 5 月 26 日、6 月 17 日和 7 月 7 日,再割时间分别为初割后 3、6、9 和 12 周	在 7 月上旬(扬花初期) 和 9 周之后进行两次刈割,具有最好的控制效果,不仅消除了互花米草的有性繁殖,也抑制了在当年和未来几年的营养生长,为了有效地减少入侵植物的扩散,建议在低潮滩和高潮滩进行至少 2~3 年和 3~4 年的刈割管理	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[31]
	刈割频率分别为 1、2、3、4 和 5 次,相邻间隔 22 d,初割时间为 5 月 26 日、6 月 17 日和 7 月 8 日	从 7 月上旬(扬花初期) 开始,在高潮滩刈割 4 次,在低潮滩刈割 3 次,生长季末地上植株几乎全部死亡,无结实,可有效控制互花米草	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[37]
	1 月中旬刈割并移走所有米草	冬季刈割虽然显著提高互花米草的植株密度和结穗率,但对互花米草的株高、地上生物量和种子产量无显著影响,因此对控制互花米草无明显效果	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[28]

- 无相关信息 No available information. 下同 The same below.

单纯刈割或与除草剂一起使用,是美国华盛顿州使用最广泛的米草管理方法之一,该技术能够降低种子产量,消耗根及根茎的能量储备从而削弱植物生长[19].刈割的控制效果取决于米草生育期、刈割频率和潮滩基质特征等因素[19,25].

不同生育期刈割对互花米草的控制效果有很大差异,孕穗期至扬花期的互花米草由营养生长转向生殖生长,生长季前期积累的能量由地下部分转移

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

到地上部分,地下部分能量储备较少,植物抗逆性较弱,此时割除地上植株对互花米草的生长恢复影响最大,因而可取得最好的控制效果,其他时期刈割对控制互花米草没有显著效果,甚至促进互花米草的再生[26-29].

时机合适的单次刈割,可有效降低米草种子产量,从而影响其有性繁殖,但单次刈割无法清除互花米草[19].对于较大面积的米草草甸,可使用机械从初春返青到秋季死亡期间对米草进行反复刈割,阻止其通过光合作用产生的能量分配到茎球和根部,进而影响植被生长[30].然而,增加刈割次数必然带来治理成本的增加,选择合适的时机可以减少刈割次数和成本,在扬花期和 9 周之后进行两次刈割,具有最好的控制效果,不仅完全清除了互花米草的有性繁殖,也抑制了当年和未来几年的营养生长[31].

2.1.6 火烧 关于火烧控制互花米草的研究极少,火烧可去除地上植株,短期内会影响互花米草生长,但无论夏季还是冬季火烧,对控制互花米草均无明显效果[28,32].火烧常需要助燃剂如汽油或柴油[28],可能会带来一定的环境污染,火烧时的高温也可能对土壤生物带来负面影响.

2.1.7 淹水 淹水胁迫使互花米草缺氧,光合作用效率下降,植株需要消耗更多的光合产物来获取生存必需的能量,致使植株体内贮藏的物质不断消耗而导致生物量下降,无法正常进行营养生长和生殖生长.对于 7~10 cm 高的实生苗,持续淹水 20 cm 3 个月可杀死所有实生苗,因此持续淹水可作为控制互花米草有性繁殖的有效措施[33].对于较高的植株(株高 42 cm),>50 cm 是控制互花米草扩散的有效淹水水位[34].持续淹水胁迫对互花米草的生理指标产生影响,但互花米草是一种适应性很强的外来物种,可以通过生理和形态学的改变来适应这种胁迫,因此,必须进一步结合其他物理措施进行综合治理[35].

关于物理防治措施的环境影响的研究较少,主要涉及了人工拔除、刈割、翻耕和淹水这几种措施.控制互花米草扩散的刈割、翻耕和淹水等物理措施均普遍提高了土壤微生物的活动,从而提高了有机碳输出,降低盐沼土壤有机质含量[38-39].人工拔除互花米草 2 年后,红树林湿地大型底栖动物物种栖息密度和生物量均显著降低,但不同地点的物种丰富度有增有减[20].水位调控措施改变了高潮带生境的自然水文状况,对盐沼中大型底栖动物的密度、生物量和多样性产生负面影响,但这种影响在水位调控措施结束后可逐渐自然恢复[40].

总体而言,物理防治措施比较费时费力,但对环境影响小,一般在短期内可取得较好的控制效果,但需要在足够大的区域内同步进行,才能达成彻底清除互花米草的目标.

2.2 化学防治

化学治理一般是通过施用除草剂对互花米草进行灭除,目前证实有效的除草剂包括草甘膦、草铵膦、咪唑烟酸以及互花米草除控剂等(表 3).除草剂的应用和控制效果受风力、潮汐周期和茎叶上覆盖的沉积物等因素影响[19],美国环保署只允许草甘膦和咪唑烟酸在河口环境中使用[12].

草甘膦于 1971 年由 Monsanto 公司推出,是有机磷类灭生性的的广谱除草剂,可控制世界上危害最大的 78 种杂草中的 76 种,目前已成为世界上应用最广、使用量最大的农药品种,美国环保署(EPA)将其列为第三类有毒物质(低毒性)[41].草甘膦能在植物体内的木质部和韧皮部中传导,进入植物体内后,被植物迅速吸收,破坏细胞分裂、叶绿素合成、蒸腾、呼吸以及蛋白质等代谢过程,从而导致植株死亡[42].文献中草甘膦对米草的灭除力差别很大,对实生苗和克隆苗的灭除效果也不同,这可能是由于使用的表面活性剂不同所致;另外,米草叶片分泌大量盐份,可能会阻碍对草甘磷的吸收[10,12,43].

草铵膦是德国 Hoechs 公司于 20 世纪 80 年代开发的有机磷类广谱触杀型除草剂[44].草铵膦抑制植物谷氨酰胺合成酶(GS)的活性,造成植物氮代谢失调,必需氨基酸缺乏,最终导致细胞内氨过量而中毒,随之叶绿素解体,喷施草铵膦 3~5 d 后,植株固定 CO_2 的速率迅速下降,植物叶片出现枯黄和坏死的症状[45-47].喷施草胺膦 2 个月后,杀死了几乎全部的互花米草实生苗,但对成熟互花米草的灭除率不足三分之一[12],草铵膦对小球藻、斑马鱼等水生生物的毒性均为低毒[44],在表层土壤中的半衰期较短,为 3~10 d[48],但它属于难水解型,在弱酸至弱碱溶液中半衰期长达 433~693 d.

咪唑烟酸是 20 世纪 80 年代由美国氰胺公司开发的咪唑啉酮类(Imidazolinones)广谱性除草剂,高效低毒[49].咪唑烟酸对一年生和多年生禾本科杂草、阔叶杂草、莎草科杂草及多种灌木和落叶乔木具有优异的除草活性,已用于多种类型的非耕地除草[50].咪唑烟酸通过阻止支链氨基酸的合成从而抑制互花米草的生长,其用量仅为草甘膦的 1/10 时,便可取得同等的控制效果[51].咪唑烟酸在水体和沉

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　化学方法防治互花米草
Table 3　Chemical methods of controlling *Spartina alterniflora*

药剂名称 Name of herbicide	药剂用量 Amount of herbicide	用药季节 Herbicide spraying time	防治效果 Effect of control	环境影响 Environmental effect	研究地点 Experimental site	文献 Reference
草铵膦 Glufosinate	0.82 和 1.64 kg·hm^{-2}	幼苗，高约 13 cm；成熟米草，高约 60 cm	63 d 后，幼苗死亡率为 99.5%，低剂量的效果更好，成熟米草无死亡，受损率为 19.7%和 25.4%	–	美国路易斯安那州 Louisiana，USA	[12]
草甘膦 Glyphosate	1.06 和 2.13 kg·hm^{-2}	幼苗，高约 13 cm；成熟米草，高约 60 cm	63 d 后，幼苗死亡率为 95.4%，高剂量的效果更好，成熟米草无死亡，受损率为 16.4%和 25.0%	–	美国路易斯安那州 Louisiana，USA	[12]
咪唑烟酸 Imazapyr	1.05 和 2.11 kg·hm^{-2}	幼苗，高约 13cm；成熟米草，高约 60 cm	63 d 后，幼苗死亡率为 92.8%，高剂量的效果更好，成熟米草无死亡，受损率为 32.8%和 31.8%	–	美国路易斯安那州 Louisiana，USA	[12]
咪唑乙烟酸 Imazethapyr	0.11 和 0.21 kg·hm^{-2}	幼苗，高约 13 cm；成熟米草，高约 60 cm	63 d 后，幼苗死亡率为 88%，低剂量的效果更好，成熟米草无死亡，受损率为 18.1% 和 16.2%	–	美国路易斯安那州 Louisiana，USA	[12]
草甘膦+咪唑烟酸 Glyphosate+Imazapyr	草甘膦（10 kg·hm^{-2}，有效成分 700 g·kg^{-1}）+0.5% 的咪唑烟酸（100 g·L^{-1}）	在米草生长季用药 2~3 次	用药一年后米草死亡率超过 95%，两年后米草地上和地下生物量分别减少了 74% 和 90%	用药两年后本土盐沼植被迅速恢复到 95%以上	南非大布拉克河口 the Great Brak Estuary，South Africa	[10,43]
草甘膦 Glyphosate	有效成分用量为 7.2 kg·hm^{-2}	2006 年 12 月	1 年后和 2 年后米草分蘖密度分别减少 38%和 52%	不影响本土物种丰富度，本土植被多样性有增加趋势	西班牙大西洋沿岸 The Atlantic coast of Spain	[21]
咪唑烟酸 Imazapyr	有效成分 1.68 kg·hm^{-2}	8 月，米草株高 1.7 m 时	治理区在 12~20 个月后被海蓬子（*Salicornia virginica*）和日本大叶藻（Japanese eelgrasss）占领	咪唑烟酸在水体和沉积物中的半衰期为<0.5 和 1.6 d，对非目标河口生物无毒害	Willapa 湾，美国华盛顿 Willapa Bay，Whashington，USA	[52]
滩涂互花米草除控剂 Control agents for *S. alterniflora*	0.7~3 g·m^{-2}	4—6 月米草生长旺盛期	180 d 叶枯根烂，米草彻底死亡	药剂降解迅速，在海水、沉积物和贝类体内无残留物	福建宁德 Ningde，Fujian，China	[55-56]
米草净 Micaojing	–	–	用药 10 d 后叶片变黄，60 d 后根系全亡，90 d 后未见新芽	对水生动物无毒害，30 d 后土壤无残留	福建宁德 Ningde，Fujian，China	[53]
米草星 Micaoxing	–	–	60 d 内连根杀死全部互花米草	不影响红树林，对水生生物无害，30 d 后土壤无残留	福建宁德 Ningde，Fujian，China	[54]

积物中的残留遵循指数衰减，半衰期分别为<0.5 和 1.6 d，在水体和沉积物中的残留量远低于对水生动物致毒的剂量，可用其控制互花米草，对非目标河口生物没有威胁[52].

我国科研人员研发了米草净、米草星和“滩涂互花米草除控剂”等除草剂用于米草治理，但只有互花米草除控剂的研究报道较多[53-54].“滩涂互花米草除控剂”由抑制光合作用极佳的有机磷类除草剂与抑制植物细胞分裂极强的磺酰脲类除草剂复合而成，该药剂传导性极强，茎叶吸收后传导到全株，然后下传到根系抑制其生长萌芽，植被无法光合作用而逐渐死亡[55].在退潮后喷施滩涂互花米草除控剂，60 d 后米草叶枯根烂，180 d 后米草被彻底灭除[55-56].

用化学方法治理互花米草，很可能带来一定的负面影响，一方面化学药剂通常会造成一定的残毒，另一方面则容易对其他动植物造成危害，进而破坏本地土壤和生态系统[57-58].然而，很多研究发现，施用除草剂对滩涂和河口生物没有危害[52-53,59].这种无危害可能是由于农药低剂量暴露的原因，因为除草剂主要被植物叶片摄取，只有少量达到沉积物并迅速水解.农药影响的监测结果也可能和用药环境和监测时间有关，有些研究在喷药 30 d 后才检测土壤残留[53-54]，此时农药很可能已被潮水冲刷殆尽，因此其无农药残留的结论值得商榷.

有研究用根际缓释农药的方式灭除互花米草，发现在同样的灭除效果下可以减少一半的农药用量[60].然而，根际缓释增加了农药在土壤中的滞留时间，土壤中农药含量也可能增加，从而对土壤动物造成更大的威胁.目前缓释技术还很不成熟，比如，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

研究中用 PVC 管制作缓释装置，这很难推广，缓释所用材料如果不能快速降解且对环境无害，那么根际缓释农药在入侵植物防治中只能是空谈.

综上分析，草甘膦、咪唑烟酸等除草剂对互花米草有很好的灭杀效果，虽然文献报道“互花米草除控剂”、米草星等国内开发的药剂也有很好的灭除米草的效果，但未见上市销售、推广应用.另外，施用除草剂对海岸带生态系统(本土植被、底栖动物、鱼类等)的影响还需要深入研究.

2.3 生物防治

杂草的生物防治，就是利用寄主范围较为专一的植食性动物或病原微生物，通过直接取食、形成虫瘿、穴居植物组织或造成植物病害等方式，将有害杂草控制在经济、生态或环境美化容许水平下的防治方法，主要风险是对非目标本土物种的影响[61].生物防治方法由来已久，但应用于互花米草的研究很少，可用于控制互花米草的潜在生物主要有：玉黍螺(*Littoraria irrorata*)、麦角菌(*Ciavieps purpurea*)和稻飞虱(*Prokelisia marginata*)(表 4).生物防治方法虽可降低互花米草密度，有利于滩涂生态系统的恢复，但却难以完全清除互花米草，存活的互花米草仍可以通过种子传播入侵新的区域.而且，从长远来看，植物对天敌的抗性和耐受性改变可能导致防治失败[62].

2.4 生物替代

生物替代技术是根据植物群落演替的规律，由竞争力强的本地植物取代外来入侵植物的一种生态学防治技术[18,24,29,42]；但在特定地区找出快速、有效、安全的替代种以及防除方法仍是个难题，目前研究较多的是利用芦苇、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)和海桑(*Sonneratia caseolaris*)等物种对互花米草进行生物替代[18,22].

芦苇比互花米草更能适应同等程度的持续淹水胁迫[67]，低盐环境下芦苇的化感作用可抑制互花米草生长发育[68]，但芦苇只能生长于低盐环境(<10.5‰)，不适于高盐环境[69]，因此，用芦苇替代互花米草的应用很有限，此法也被证实行不通，替代后第三个生长季，所有小区的芦苇几乎全部死亡[29].

无瓣海桑和海桑的生长速率和株高高于互花米草，在短期内便可超过互花米草的高度并较快郁闭，从而抑制互花米草的生长，使其盖度、密度、高度、生物量和光合速率等指标都有所下降[70]，当林分郁闭度超过 0.7 时，林下互花米草缺乏光照强度而停止生长，逐渐消亡[71].无瓣海桑和海桑的化感作用也会影响互花米草的生长，海桑对互花米草再生的控制作用比无瓣海桑更为明显.另外，控制效果与替代种的密度密切相关，替代种密度越高，控制效果越好[72-73](表 5).

海桑是天然分布于我国海南岛的红树植物[74]，无瓣海桑是从孟加拉国引入我国的外来种[75]，有较丰富的遗传多样性和较强的环境适应能力[76]，可对本土红树植物产生抑制生长的化感作用[77].虽然在珠海市淇澳岛的监测表明，引种 12 年后无瓣海桑并没有入侵本土红树林[78]，但淇澳岛是个面积很小的孤岛，代表性不足，仍需加强对无瓣海桑生态风险的评估研究，使其对恢复红树林生态系统起到积极的作用[79-80].

2.5 综合防治

物理、化学及生物替代法各有优缺点，单独采用一种方法难以彻底有效地治理互花米草，将几种方法结合使用，可获得更好的控制效果.目前证明有效的综合防治方法包括刈割+翻耕、刈割+遮荫、刈割+农药、刈割+淹水和刈割+翻耕+生物替代等(表 6).

刈割+遮荫的综合控制方法适用于去除入侵早期、面积较小的单一互花米草种群，刈割后贴地遮

表 4 生物方法控制互花米草
Table 4 Biological methods of controlling *Spartina alterniflora*

天敌 Natural enemy	作用机理 Mechanism of control	控制效果 Effect of control	其他信息 Other information	研究地点 Experimental site	文献 Reference
玉黍螺 *Littoraria irrorata*	直接取食叶片；玉黍螺的活动导致米草茎叶损伤，改善米草上微生物的生长条件，微生物取食导致米草死亡	使互花米草产量降低 38%	从马里兰州到格鲁吉亚，玉黍螺取食互花米草的现象普遍	美国弗吉尼亚海岸 Virginia coast, USA	[63]
麦角菌 *Ciavieps purpurea*	麦角菌能够使互花米草感染麦角病，在种子内形成菌核，降低其种子生产量，从而限制扩散	野外感染麦角病的互花米草非常罕见	气候条件和传播媒介对麦角病的发生有很大影响	美国华盛顿威拉帕湾 Willapa Bay, Washington, USA	[64]
稻飞虱 *Prokelisia marginata*	在互花米草叶片中产卵，破坏叶片维管系统的结构，取食互花米草维管液	米草生物量减少 50%，株高降低 15%	需先研究稻飞虱对其他植被的影响，排除威胁	美国华盛顿威拉帕湾 Willapa Bay, Washington, USA	[65-66]

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　生物替代方法控制互花米草
Table 5　Biological substitution methods of controlling *Spartina alterniflora*

替代物种 Substitute species	引种密度 Planting density	控制效果 Effect of control	研究地点 Experimental site	文献 Reference
海桑 *Sonneratia caseolaris*	2 m×2 m 网格	3 年后互花米草生物量和密度减至对照区的 10%以下,株高和地茎也减小	广东珠海 Zhuhai, Guangdong, China	[72]
无瓣海桑 *Sonneratia apetala*	1 m×1 m 和 1 m×2 m 网格	3 年后互花米草生物量和密度减至对照区的 10%以下,株高和地茎也减小	广东珠海 Zhuhai, Guangdong, China	[72]
海桑和无瓣海桑 *Sonneratia caseolaris* + *S. apetala*	约 35 株・100 m^{-2}	海桑和无瓣海桑先淘汰互花米草,此后海桑和无瓣海桑逐渐死亡,本土红树林恢复	广东珠海 Zhuhai, Guangdong, China	[81]
无瓣海桑 *Sonneratia apetala*	1 m×1 m 网格	12 年的跟踪发现,无瓣海桑没有入侵本土红树林	广东珠海 Zhuhai, Guangdong, China	[78]
芦苇 *Phragmites australis*	3~5 株・m^{-2}	在移栽芦苇后,前两年芦苇存活率分别为 57.4%和 54.2%,第 3 年芦苇的存活率、密度和结穗率显著下降,甚至全部死亡	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[18, 29]

表 6　综合方法控制互花米草
Table 6　Integrated methods of controlling *Spartina alterniflora*

措施 Method	技术细节 Technical detail	控制效果 Effect of control	其他信息 Other information	研究地点 Experimental site	文献 Reference
刈割+草甘膦 Mowing+ glyphosate	12 月手工刈割,留茬 < 10 cm,在最低潮位后刈割 24 h 后立即施用草甘膦	处理 1 年后和 2 年后米草分蘖密度分别减少 65%和 70%,控制效果优于单纯刈割或喷施草甘膦	–	西班牙大西洋沿岸 The Atlantic coast of Spain	[21]
刈割+淹水 Mowing+ waterlogging	6 月下旬至 7 月上旬刈割后保持淹水 50~70 cm 深	完全清除了互花米草,三年内再无萌发	治理完 1 年、3.5 年和 4 年后底栖动物密度分别为对照的 30. 8%、25. 8% 和 13.4%,多样性指数也显著下降	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[83]
	野外取 20 cm 高的无性分蘖株用于盆栽试验,缓苗 4 周后刈割,持续淹水,水深 29 cm,盐度处理为 0、10‰ 和 20‰	刈割+持续淹水 12 d 后互花米草死亡,再无萌发; 淹水的盐度对刈割后米草恢复没有影响	–	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[13]
	气候室 25 ℃ 盆栽,12 月初从东营黄河三角洲取带土互花米草,刈割后淹水,淹水设深度处理: 0、5、10 和 20 cm,3 个月后再次刈割	刈割+淹水 20 cm 可完全抑制根茎的无性繁殖,淹水 4. 5 个月后根系死亡腐烂; 种子在 20 cm 淹水条件下仍可萌发,但实生苗密度低于对照	–	山东东营 Dongying, Shandong, China	[16]
	3 月开始淹水水深 30~50 cm,在 7 月扬花期刈割互花米草地上植株	3 个月后,米草全部死亡,第二年没有新苗萌发.一旦停止治理区的淹水,互花米草很快二次入侵	治理成本 500 美元・hm^{-2},主要包括筑堤和抽水的费用	上海崇明东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	[85-86]
刈割+遮荫 Mowing+ shading	5 月刈割(留茬<5 cm) 加贴地遮荫(透光率为 8% ~ 17%)	显著抑制米草生长,米草地上部分最终全部死亡,完全抑制有性繁殖,显著降低种群密度	–	广西北海 Beihai, Guangxi, China	[82]
	5 月刈割后加 1 层遮荫、2 层遮荫和 3 层遮荫处理,其平均透光率分别为15.3%、2.3%和 0.3%	分别于 11 月、7 月和 7 月导致米草地上部分全部死亡,至 11 月时根茎存活率分别为 3.68%、2.09%和 1.70%,近全亡	–	广西北海 Beihai, Guangxi, China	[14]
刈割+翻耕 Mowing+ plowing	7 月初刈割米草,待新生幼苗长至 10~15 cm,用机耕船进行高强度耕作,若仍有零星新苗,则人工踩踏入泥	第二年没有发现新萌生植株	2006—2007 年的治理成本为 7500 ~ 9000 元・hm^{-2}	福建泉州 Quanzhou, Fujian, China	[84]
刈割+深翻+红树林替代 Mowing + plowing + mongrove substitution	采用先割草、深翻处理互花米草滩涂,然后按 1 m×1 m 株行距的大密度种植无瓣海桑、拉贡木等速生红树植物,及时割草抚育	18 个月后,互花米草生长衰退,逐渐死亡	–	福建漳浦 Zhangpu, Fujian, China	[24]

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

荫,可显著抑制互花米草生长和幼苗形成,完全抑制有性繁殖,显著降低种群密度,最后导致地上植株全部死亡,15%左右的透光率可能是刈割+遮荫综合控制方法的关键技术指标[14,82].

刈割+翻耕和刈割+淹水的综合方法可完全清除互花米草[13,83-84],但刈割必须选择关键生育期——扬花期[85].刈割+淹水可用于大面积治理互花米草,但还需要细化技术细节,例如确定有效的最低淹水水位,以降低治理成本[16].另外,如果把控制区的水放掉,将很快出现互花米草二次入侵[86],因此需要在足够大的区域进行治理.

采用刈割+翻耕+生物替代的综合方法可清除红树林地区的互花米草.先割草、再深翻,然后引种无瓣海桑、拉贡木(*Laguncularia racemosa*)等速生红树,当林分郁闭度超过0.6,无瓣海桑通过化感和遮阴作用致使米草死亡,并取而代之,最终达到生物替代的生态效果[24].

综合集成的方法可比单一方法取得更好的控制效果,并且有可能降低治理成本,应该是未来研究和推广应用的重点.

3 防控策略

绝大多数互花米草防治研究是基于小区试验的点位研究,专注于防治技术和防治效果,但在大区域防治互花米草时,需要有轻重缓急的控制策略.长期以来,数学模型被用来描述生物入侵的动态,并评估有害入侵种的控制策略,应用数学模型的模拟结果可以大大降低控制成本,提高局部或完全根除入侵种的可能性.数学模型为入侵物种管理提供了有力的工具,但是在这一领域尚未得到广泛应用[87],部分原因是它们很少包括对不确定性的正式评估,决策者难以权衡推荐行动的风险和收益[88].

可用于改进外来入侵物种根除进程的通用性指导方针非常少,Buhle 等[87]利用最优支持模型比较不同控制策略,发现互花米草年均去除效率和成功根除概率之间的关系是高度非线性的,在米草入侵早期进行控制的成功根除概率远高于入侵晚期开始控制.抑制种子不是有效的控制策略,控制米草最有效的方案是首先清除外围最小的克隆株斑块,因为它们的面积增长率高于大斑块,但若有充足的年度财政预算,最佳策略是优先清除高密度亚群的米草[11,87,89].控制措施的平均去除率应大于75%,否则该方法的实用价值非常小,因为在没有二次入侵的情况下需要至少4年的连续治理才能完全根除互花米草,即使控制效率达到75%,只要有明显的种子或幼苗源输入,就不能实现根除互花米草.因此控制工作应该在足够大的范围内进行,以最大限度地减少来自新幼苗的威胁[36].

在实际防治中,需要因地制宜地选择合适的方法.物理防治方法适宜人力容易到达且分布面积较小的新入侵区域,如人工去除、翻耕、碎根、覆盖遮荫等技术[18-19,22].借助于合适的机械,刈割方法可以应用于大面积防治,但需要选择合适的时机,在营养生长期刈割可获得最好的防治效果,但单次刈割很难完全清楚互花米草[19,25].在潮汐频繁浸淹的区域,淹水也适宜大面积治理,但淹水深度应超过米草株高[34].如果采取刈割加淹水的综合方法,会取得更好的防治效果,也可能降低防治成本[16].喷施草甘膦、咪唑烟酸、滩涂米草除控剂等化学防治方法一般有较好的清除效果[51-54],在新入侵的小区域,简单易行,利用飞机喷药可以实现大面积的防治,但由于可能产生环境污染,应该慎重使用.生物防治方法在国内未见报道,有新物种入侵的风险,不建议使用.生物替代方法一般是在刈割、翻耕等物理措施的基础上移栽竞争物种,因此也属于综合防治方法.在盐沼湿地以芦苇替代互花米草被证实行不通[29],但我国红树林湿地很多研究证实可以用无瓣海桑或海桑成功替代互花米草[72-73,78],可作为红树林湿地互花米草防治的首选方法,但无瓣海桑也是外来物种,未来研究和应用中应多关注本土物种海桑.综合防治方法在最近几年引起更多的关注,由于可以多角度地抑制互花米草的生长与繁殖,可以取得更好的防治效果.在盐沼湿地推荐使用综合方法,刈割+翻耕和刈割+遮荫这两种方法一般适宜入侵早期、面积较小的米草种群[82,84],刈割+淹水可以用于大面积治理[13,16].

无论采取何种控制措施,都必须防止互花米草二次入侵,在评价控制效果时,也需要考虑二次入侵的影响,很多文献中的防治效果不好,其实是由于二次入侵造成的.二次入侵的主要途径是种子和实生苗的入侵定植,两年即可使米草治理区恢复如初[90].种子传播主要依靠于水流输送,物理隔离措施必然改变潮滩的间歇性淹水环境,因此,彻底消除治理区周边的互花米草扩散源才是杜绝二次入侵的有效手段,这意味着需要在足够大的范围内同时治理互花米草.然而,大面积治理的成本非常高,首要工作应该是控制米草群落边缘的生长和繁殖,防止继续扩散.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　研究展望

互花米草的快速扩张和超强竞争力给入侵地的海岸带系统生态安全带来了严重威胁,但至今仍缺少经济、环保、高效的办法来解决这一国际性的难题,因此仍需加强互花米草防治的研究,未来应着重从以下几方面入手:

(1) 定量化评估互花米草入侵风险,提出分区防控对策与防控工程建议.互花米草入侵造成的生态后果已被逐步认识,但从生态系统角度进行全面评价的研究还很少,未来还需要结合海平面上升、近海富营养化等全球变化因素,从时间和空间尺度上认识互花米草对区域生态系统结构和功能的影响,定量化评估互花米草入侵风险,对其进行生态风险防控分区,提出分步骤、有侧重的分区防控对策和防控工程建议.

(2) 加强综合治理技术研究,核算治理成本.互花米草有着极强的环境适应性和抗物理干扰能力,不同区域的互花米草生境不尽相同,单一防治方法的效果难如人意,应因地制宜地加强综合防治研究,细化技术方案,包括防治时间、频率、面积和效果等.同时,需要加强成本核算和环境影响评价,根据不同生境筛选出防治效果好、可行性高、经济成本较低、环境影响较小的技术方案.

(3) 加强适宜在滩涂作业的机械研发.无论是规模化控制还是利用互花米草,都离不开机械设备,应该尽快研制出适于滩涂环境的收割或翻耕设备,这是大规模清除或利用互花米草资源的前提.

(4) 加快互花米草利用的研发,变害为宝.在互花米草大面积入侵区域,全部清除互花米草几乎是不可能的,在控制其扩张速度和规模的同时,应加强对互花米草的开发利用,尤其是高值化利用,比如挖掘其药用价值,或利用其抗盐基因培育耐盐作物.国内已开展了一些互花米草应用的研究,如利用互花米草厌氧发酵生产沼气、在互花米草中提取功能性成分作为天然添加剂或用以制药等,但目前这些技术还有待完善,尚未见成功商业化的产品或技术.

参考文献

[1] Mabberley DJ. The Plant Book. 2nd Ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997

[2] Daehler CC, Strong DR. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific estuaries, USA. *Biological Conservation*, 1996, **78**: 51-58

[3] Chung CH. Forty years of ecological engineering with *Spartina* plantations in China. *Ecological Engineering*, 2006, **27**: 49-57

[4] Zuo P (左　平), Liu C-A (刘长安), Zhao S-H (赵书河), *et al*. Distribution of *Spartina* plantations along the China's coast. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2009, **31**(5): 101-111 (in Chinese)

[5] Xu G-W (徐国万), Zhuo R-Z (卓荣宗), Cao H (曹豪), *et al*. Annual changes of biomass of *Spartina alterniflora* and the relationships between biomass and tidal land habits. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), 1989, **13**(3): 230-235 (in Chinese)

[6] Gong L (宫　璐), Li J-S (李俊生), Liu X-Y (柳晓燕), *et al*. Genetic diversity of *Spartina alterniflora* in coastal area of China. *Prataculturel Science* (草业科学), 2014, **31**(7): 1290-1297 (in Chinese)

[7] An SQ, Gu BH, Zhou CF, *et al*. *Spartina invasion* in China: Implications for invasive species management and future research. *Weed Research*, 2007, **47**: 183-191

[8] Li B, Liao CH, Zhang XD, *et al*. *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River estuary, China: An overview of current status and ecosystem effects. *Ecological Engineering*, 2009, **35**: 511-520

[9] Wang Q (王　卿), An S-Q (安树青), Ma Z-J (马志军), *et al*. Invasive *Spartina alterniflora*: Biology, ecology and management. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报), 2006, **44**(5): 559-588 (in Chinese)

[10] Adams J, van Wyk E, Riddin T. First record of *Spartina alterniflora* in southern Africa indicates adaptive potential of this saline grass. *Biological Invasions*, 2016, **18**: 2153-2158

[11] Taylor CM, Hastings A. Finding optimal control strategies for invasive species: A density-structured model for *Spartina alterniflora*. *Journal of Applied Ecology*, 2004, **41**: 1049-1057

[12] Knott CA, Webster EP, Nabukalu P. Control of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) seedlings with four herbicides. *Journal of Aquatic Plant Management*, 2013, **51**: 132-135

[13] Gao Y, Yan WL, Li B, *et al*. The substantial influences of non-resource conditions on recovery of plants: A case study of clipped *Spartina alterniflora* asphyxiated by submergence. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 345-352

[14] Zhao X-J (赵相健), Li J-S (李俊生), Liu X-Y (柳晓燕), *et al*. Combined effects of mowing and shading on growth and survival of *Spartina alterniflora*. *Guihaia* (广西植物), 2017, **37**(3): 303-307 (in Chinese)

[15] Tang C-D (汤臣栋). Ecological control of *Spartina alterniflora* and improvement of birds habitats in Chongming Dongtan wetland, Shanghai. *Wetland Science & Management* (湿地科学与管理), 2016, **12**(3): 4-8 (in Chinese)

[16] Xie B-H (谢宝华), Wang A-D (王安东), Zhao Y-J (赵亚杰), *et al*. Effects of mowing plus waterlogging on germination and seedling growth of *Spartina alterniflora*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2018, **37**

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2): 417-423 (in Chinese)

[17] Deng Z-F (邓自发), An S-Q (安树青), Zhi Y-B (智颖飙), *et al*. Preliminary studies on invasive model and outbreak mechanism of exotic species, *Spartina alterniflora* Loisel. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(8): 2678-2686 (in Chinese)

[18] Li H-P (李贺鹏), Zhang L-Q (张利权). Experimental study on physical controls of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai. *Journal of East China Normal University* (Natural Science) (华东师范大学学报: 自然科学版), 2007, **2007**(6): 44-55 (in Chinese)

[19] Hedge P, Kriwoken LK, Patten K. A review of *Spartina* management in Washington State, US. *Journal of Aquatic Plant Management*, 2003, **41**: 82-90

[20] Ni P (倪 平), Dong Y-H (董燕红), Zhu A-J (朱艾嘉), *et al*. Influence of the artificial removal of invasive smooth cordgrass *Spartina alterniflora* from invaded mangrove forests on the macrobenthic community. *Journal of Biosafety* (生物安全学报), 2014, **23**(3): 165-172 (in Chinese)

[21] Mateos-Naranjo E, Cambrolle J, Garcia De Lomas J, *et al*. 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*, 2012, **50**: 106-111

[22] Gu X-H (谷兴华), Liao B-W (廖宝文), Zhu N-H (朱宁华), *et al*. Effect of sun-shade on the growth of *Spartina alterniflora*. *Forest Pest and Disease* (中国森林病虫), 2010, **29**(3): 34-36 (in Chinese)

[23] Zhang J-S (张炯森). Effect of different coverage measures on physiological characteristics and growth of *Spartina alterniflora*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (福建林业科技), 2016, **43**(3): 72-75 (in Chinese)

[24] Chen Z-Z (陈振忠). Study on biological replacement technology of *Spartina alterniflora* in coastal beach of South Fujian. *Anhui Agricultural Science Bulletin* (安徽农学通报), 2016, **22**(14): 117-119 (in Chinese)

[25] Gao Y, Tang L, Wang J, *et al*. Clipping at early florescence is more efficient for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora*. *Ecological Research*, 2009, **24**: 1033-1041

[26] Tan F-L (谭芳林), Lin Y-Q (林贻卿), Xiao H-S (肖华山), *et al*. The effect of mowing on growth of *Spartina alterniflora*. *Wetland Science* (湿地科学), 2010, **8**(4): 379-385 (in Chinese)

[27] Lin Y-Q (林贻卿), Tan F-L (谭芳林), Xiao H-S (肖华山), *et al*. Effects of different mowing periods on physiology of *Spartina alterniflora* root system. *Wetland Science* (湿地科学), 2010, **8**(4): 371-378 (in Chinese)

[28] Wang Z-C (王智晨), Zhang Y-M (张亦默), Pan X-Y (潘晓云), *et al*. Effects of winter burning and cutting on aboveground growth and reproduction of *Spartina alterniflora*: A field experiment at Chongming Dongtan, Shanghai. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2006, **14**(4): 275-283 (in Chinese)

[29] Ping Y (平 原), Zhang L-Q (张利权). Study on long-term effects of physical control measures on *Spartina alterniflora*. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2010, **29**(1): 32-35 (in Chinese)

[30] Reeder TG, Hacker SD. Factors contributing to the removal of a marine grass invader (*Spartina anglica*) and subsequent potential for habitat restoration. *Estuaries*, 2004, **27**: 244-252

[31] Tang L, Gao Y, Wang J, *et al*. Designing an effective clipping regime for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora* in an estuarine salt marsh. *Ecological Engineering*, 2009, **35**: 874-881

[32] Lindau CW, Delaune RD, Jugsujinda A, *et al*. Response of *Spartina alterniflora* vegetation to oiling and burning of applied oil. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **38**: 1216-1220

[33] Chen Z-Y (陈正勇), Wang G-X (王国祥), Liu J-E (刘金娥), *et al*. Effects of waterlogging regulation on growth of *Spartina alterniflora*. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2011, **24**(9): 1003-1007 (in Chinese)

[34] Yuan L-Q (袁连奇), Zhang L-Q (张利权). Effects of waterlogging on the physiology of *Spartina alterniflora*. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), 2010, **41**(2): 175-179 (in Chinese)

[35] Gu Z-Q (古志钦), Zhang L-Q (张利权). Physiological responses of *Spartina alterniflora* to long-term waterlogging stress. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2009, **29**(4): 876-881 (in Chinese)

[36] Patten K. Comparison of chemical and mechanical control efforts for invasive *Spartina* in Willapa Bay, Washington. Proceedings of the Third International Conference on Invasive *Spartina*, San Francisco, CA, USA, 2004: 249-254

[37] Tang L, Gao Y, Wang C, *et al*. How tidal regime and treatment timing influence the clipping frequency for controlling invasive *Spartina alterniflora*: Implications for reducing management costs. *Biological Invasions*, 2010, **12**: 593-601

[38] Chen J, Wang L, Li Y, *et al*. Effect of *Spartina alterniflora* invasion and its controlling technologies on soil microbial respiration of a tidal wetland in Chongming Dongtan, China. *Ecological Engineering*, 2012, **41**: 52-59

[39] Chen X (陈 曦), Zhang L-Q (张利权), Yuan L (袁 琳). Effect of durative waterlogging for control of *Spartina alterniflora* on salt marsh soil. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2010, **30**(5): 1093-1100 (in Chinese)

[40] Wang R-Z (王睿照), Zhang L-Q (张利权). Effect of managed waterlogging to control *Spartina alterniflora* on macro benthic communities. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(5): 2639-2645 (in Chinese)

[41] Zhou C-F (周垂帆), Li Y (李 莹), Zhang X-Y (张晓勇), *et al*. Research advance in ecotoxicity of glyphosate. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2013, **22**(10): 1737-1743 (in Chinese)

[42] Wang W (王 蔚), Zhang K (张 凯), Ru S-G (汝少国). The status of *Spartina* spp. Invasions in the world and the advances controlling over therm. *Marine Sciences* (海洋科学), 2003, **27**(7): 38-42 (in Chinese)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[43] Riddin T, van Wyk E, Adams J. The rise and fall of an invasive estuarine grass. *South African Journal of Botany*, 2016, **107**: 74-79

[44] Niu L-Z (牛立志), Gui W-J (桂文君), Zhu G-N (朱国念). The degradation of glufosinate in water and toxicity to aquatic organism. *Acta Agriculturae Zhejiangensis* (浙江农业学报), 2010, **22**(4): 485-490 (in Chinese)

[45] Tachibana K, Watanabe T, Sekizawa Y, *et al*. Action mechanism of bialaphos. II. Accumulation of ammonia in plants treated with bialaphos. *Journal of Pesticide Science*, 1986, **11**: 33-37

[46] Bellinder RR, Lyons RE, Scheckler SE, *et al*. Cellular alterations resulting from foliar applications of hoe-39866. *Weed Science*, 1987, **35**: 27-35

[47] Miliszkiewicz D, Wieczorek P, Lejczak B, *et al*. Herbicidal activity of phosphonic and phosphinic acid analogs of glutamic and aspartic acids. *Pesticide Science*, 1992, **34**: 349-354

[48] Behrendt H, Matthies M, Gildemeister H, *et al*. Leaching and transformation of glufosinate-ammonium and its main metabolite in a layered soil column. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1990, **9**: 541-549

[49] Sha J-J (沙家骏), Zhang H-M (张恒民), Jiang Y-J (姜雅君). New Foreign Pesticide Variety Handbook. Beijing: Chemical Industry Press, 1992 (in Chinese)

[50] Cui H-J (崔海军), Wu X-L (吴晓丽), Zhang Z-J (章忠军), *et al*. Distribution and degradation of imazapyr residue in soil. *Journal of Ecology and Rural Environment* (生态与农村环境学报), 2012, **28**(3): 333-336 (in Chinese)

[51] Patten K. Smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) control with imazapyr. *Weed Technology*, 2002, **16**: 826-832

[52] Patten K. Persistence and non-target impact of imazapyr associated with smooth cordgrass control in an estuary. *Journal of Aquatic Plant Management*, 2003, **41**: 1-6

[53] Liu J (刘 建), Du W-Q (杜文琴), Ma L-N (马丽娜), *et al*. An effective weed-killer for control of *Spartina angli* C. E. Habb. *Journal of Agro-environment Science* (农业环境科学学报), 2005, **24**(2): 410-411 (in Chinese)

[54] Du W-Q (杜文琴), Ma L-N (马丽娜), Liu J (刘建), *et al*. Controlling technique of *Spartina alterniflora* Loisel in mangrove-*Spartina* ecotones. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2006, **14**(3): 154-156 (in Chinese)

[55] Xu Z-H (许珠华). Experimental study on treatment of *Spartina alterniflora* in Fujian. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2010, **29**(5): 767-769 (in Chinese)

[56] Guo Q-Y (郭乾友). Control for *Spartina alterniflora* in beach. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 2011(2): 3-5 (in Chinese)

[57] Paveglio FL, Kilbride KM, Grue CE, *et al*. 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*, 1996, **15**: 961-968

[58] Kilbride KM, Paveglio FL. Long-term fate of glyphosate associated with repeated rodeo applications to control smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in Willapa Bay, Washington. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **40**: 179-183

[59] Shimeta J, Saint L, Verspaandonk ER, *et al*. Long-term ecological consequences of herbicide treatment to control the invasive grass, *Spartina anglica*, in an Australian salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, **176**: 58-66

[60] Hu H-Y (胡宏友), Dong K-Z (董克钻), Lin G-H (林光辉), *et al*. Controlled release method for herbicides in rhizosphere to prevent aggression of *Spartina alterniflora* in intertidal zone. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(7): 283-287 (in Chinese)

[61] Goeden RD. A capsule history of biological control of weeds. *Biocontrol News and Information*, 1988, **9**: 55-61

[62] Daehler CC, Strong DR. Reduced herbivore resistance in introduced smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) after a century of herbivore-free growth. *Oecologia*, 1997, **110**: 99

[63] Silliman BR, Zieman JC. Top-down control of *Spartina alterniflora* production by periwinkle grazing in a Virginia salt marsh. *Ecology*, 2001, **82**: 2830-2845

[64] Fisher AJ, DiTomaso JM, Gordon TR. 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*, 2005, **34**: 170-179

[65] Wu MY, Hacker S, Ayres D, *et al*. Potential of *Prokelisia* spp. as biological control agents of English cordgrass, *Spartina anglica*. *Biological Control*, 1999, **16**: 267-273

[66] Grevstad FS, Strong DR, Garcia-Rossi D, *et al*. Biological control of *Spartina alterniflora* in Willapa Bay, Washington using the planthopper *Prokelisia marginata*: Agent specificity and early results. *Biological Control*, 2003, **27**: 32-42

[67] Gu Z-Q (古志钦), Zhang L-Q (张利权), Yuan L (袁 琳). Responses of photosynthetic pigments of *Spartina alterniflora* and *Phragmite australis* to durative waterlogging. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(10): 2365-2369 (in Chinese)

[68] Zheng K (郑 琨), Zhao F-G (赵福庚), Zhang Q (张 茜), *et al*. Allelopathy of *Phragmites australis* on *Spartina alterniflora* under different salinity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **20**(8): 1863-1867 (in Chinese)

[69] Tang L, Gao Y, Wang CH, *et al*. Habitat heterogeneity influences restoration efficacy: Implications of a habitat-specific management regime for an invaded marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, **125**: 20-26

[70] Guan W (管 伟), Liao B-W (廖宝文), Qiu F-Y (邱凤英), *et al*. A preliminary study on controlling the invasive species *Spartina alterniflora* using *Sonneratia apetala*. *Forest Research* (林业科学研究), 2009, **22**(4): 603-607 (in Chinese)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[71] Yang X-B (杨雄邦), Tian G-H (田广红), Liao B-W (廖宝文), *et al*. *Sonneratia apetala* war: The use of plant succession practices of *Spartina alterniflora* control. *Wetland Science & Management* (湿地科学与管理), 2010, **6**(4): 33 (in Chinese)

[72] Chen Y-J (陈玉军), Zheng S-F (郑松发), Liao B-W (廖宝文), *et al*. Control of *Spartina alterniflora* via mangrove plants. *Practical Forestry Technology* (林业实用技术), 2009(12): 35-36 (in Chinese)

[73] Li J, Peng S, Chen L, *et al*. Use of *Sonneratia apetala* allelopathy to control *Spartina alterniflora* weed. *Allelopathy Journal*, 2010, **25**: 123-131

[74] Li H-S (李海生), Chen G-Z (陈桂珠). Genetic diversity of mangrove plant *Sonneratia caseolaris* in Hainan Island based on ISSR analysis. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(8): 1657-1663 (in Chinese)

[75] Li Y (李 云), Zheng D-Z (郑德璋), Chen H-X (陈焕雄), *et al*. Preliminary study on introduction of mangrove *Sonneratia apetala* Buch-Ham. *Forest Research* (林业科学研究), 1998, **11**(1): 42-47 (in Chinese)

[76] Li H-S (李海生), Chen G-Z (陈桂珠). Genetic diversity of introduced populations of *Sonneratia apetala* based on inter-simple sequence repeat analysis. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), 2005, **24**(4): 7-13 (in Chinese)

[77] Li M (李 玫), Liao B-W (廖宝文), Zheng S-F (郑松发), *et al*. Allelopathic effects of *Sonneratia apetala* aqueous extracts on growth performance of some indigenous mangroves. *Forest Research* (林业科学研究), 2004, **17**(5): 641-645 (in Chinese)

[78] Chen H, Liao B, Liu B, *et al*. Eradicating invasive *Spartina alterniflora* with alien *Sonneratia apetala* and its implications for invasion controls. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 367-372

[79] Tang G-L (唐国玲), Shen L-H (沈禄恒), Weng W-H (翁伟花), *et al*. Effects of using *Sonneratia apetala* to control the growth of *Spartina alterniflora* Loisel. *Journal of South China Agricultural University* (华南农业大学学报), 2007, **28**(1): 10-13 (in Chinese)

[80] Liao B-W (廖宝文), Zheng S-F (郑松发), Chen Y-J (陈玉军), *et al*. Biological characteristics and ecological adaptability for non-indigenous mangrove species *Sonneratia apetala*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(1): 10-15 (in Chinese)

[81] Zhou T, Liu S, Feng Z, *et al*. Use of exotic plants to control *Spartina alterniflora* invasion and promote mangrove restoration. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 12980

[82] Zhao X-J (赵相健), Liu X-Y (柳晓燕), Gong L (宫璐), *et al*. Control of *Spartina alterniflora* by integrated technique of mowing plus shading. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33**(10): 2714-2719 (in Chinese)

[83] Sheng Q (盛 强), Huang M-Y (黄铭垚), Tang C-D (汤臣栋), *et al*. Effects of different eradication measures for controlling *Spartina alterniflora* on plants and macrobenthic invertebrates. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), 2014, **38**(2): 279-290 (in Chinese)

[84] Tan F-L (谭芳林). Effect of the method combining cutting with machine boat on controlling *Spartina alterniflora* and its impaction wetland soil characteristics. *Wetland Science* (湿地科学), 2008, **6**(4): 526-530 (in Chinese)

[85] Yuan L (袁 琳), Zhang L-Q (张利权), Xiao D-R (肖德荣), *et al*. A demonstration study using the integrated technique of cutting plus waterlogging for the control of *Spartina alterniflora*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(11): 5723-5730 (in Chinese)

[86] Yuan L, Zhang L, Xiao D, *et al*. The application of cutting plus waterlogging to control *Spartina alterniflora* on salt marshes in the Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, **92**: 103-110

[87] Buhle ER, Feist BE, Hilborn R. Population dynamics and control of invasive *Spartina alterniflora*: Inference and forecasting under uncertainty. *Ecological Applications*, 2012, **22**: 880-893

[88] Epanchin-Niell RS, Hastings A. Controlling established invaders: Integrating economics and spread dynamics to determine optimal management. *Ecology Letters*, 2010, **13**: 528-541

[89] Grevstad FS. Simulating control strategies for a spatially structured weed invasion: *Spartina alterniflora* (Loisel) in Pacific Coast estuaries. *Biological Invasions*, 2005, **7**: 665-677

[90] Xiao D-R (肖德荣), Zhu Z-C (祝振昌), Yuan L (袁琳), *et al*. Reinvasion of exotic plant species *Spartina alterniflora* in Chongming Dongtan Nature Reserve of Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(11): 2997-3002 (in Chinese)

作者简介 谢宝华, 男, 1978 年生, 博士. 主要从事湿地生态学与全球变化研究. E-mail: bhxie@yic.ac.cn

责任编辑 孙 菊

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
Xie B-H, Han G-X. Control of invasive *Spartina alterniflora*: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(10): 3464-3476 (in Chinese)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net