

刈割加淹水对互花米草萌发和幼苗生长的影响

谢宝华¹ 王安东² 赵亚杰² 朱书玉² 宋建彬² 韩广轩^{1*} 管博¹ 张俪文¹

(¹中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; ²黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257091)

摘要 互花米草(*Spartina alterniflora*)是我国危害最严重的外来入侵植物之一,探索环保、经济、有效地防治互花米草的技术对保护我国海滩生态环境具有重要意义。本研究通过人工气候室(20~25℃)的盆栽实验,研究刈割与淹水对互花米草萌发和幼苗生长的影响。实验持续4个月,对互花米草地上部分进行了2次刈割,首次刈割是在互花米草生长季结束时3个月后进行第二次刈割。首次刈割后持续淹水至实验结束,淹水处理设计0、5、10、20 cm四个淹水深度。首次刈割后各淹水处理互花米草根茎上迅速萌发克隆苗,种子的萌发比克隆苗晚约3个月。不同淹水深度对克隆苗的萌发和生长均有抑制作用,克隆苗株数、株高和地上生物量均随淹水深度增加而减少。第二次刈割后各淹水处理均没有再萌发克隆苗,但有少量种子实生苗,其中20 cm水深处理的实生苗数量最少。刈割加淹水可以很好地抑制互花米草的萌发和幼苗生长,据此建议互花米草防治方案为:在春季萌芽前,修筑堤坝,保持淹水20 cm,在营养生长期后期贴地刈割互花米草,继续淹水,第二年重复同样的刈割和淹水。为防止二次入侵,需要在邻近的互花米草分布区同时进行治理。

关键词 入侵; 刈割; 淹水; 黄河三角洲; 克隆苗; 实生苗

Effects of mowing plus waterlogging on germination and seedling growth of *Spartina alterniflora*. XIE Bao-hua¹, WANG An-dong², ZHAO Ya-jie², ZHU Shu-yu², SONG Jian-bin², HAN Guang-xuan^{1*}, GUAN bo¹, ZHANG Li-wen¹ (¹Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; ²Administration Bureau of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, Shandong, China).

Abstract: *Spartina alterniflora* is one of the most noxious invasive plant species in China. Exploring environment-friendly, economic and effective technique of controlling *S. alterniflora* is of great significance for the protection of the coastal environment. In the present study, the effects of mowing and waterlogging on germination and seedling growth of *S. alterniflora* were studied by a pot experiment in an artificial climate chamber (20–25 °C). The experiment lasted for four months and *S. alterniflora* was mown twice. The first mowing was carried out at the end of the growing season of *S. alterniflora* and the second mowing occurred three months later. After the first mowing, the soils were continuously waterlogged. Four waterlogging depths were set up: 0, 5, 10, and 20 cm. The seedlings sprouted rapidly on the rhizome of *S. alterniflora* after the first mowing. The germination of seeds was about three months later than that of clonal seedlings. Waterlogging inhibited the germination and growth of clonal seedlings. The number of clonal seedlings, plant height and aboveground biomass decreased with the increases of waterlogging depth. After the second mowing, no clonal seedlings reappeared; however, a small amount of seeds germinated in waterlogging treatments. The number of seedlings in the 20 cm waterlogging treatment was the least. According to our results, mowing plus waterlogging can inhibit the

国家级自然保护区专项资金项目(Y639071021)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-127)资助。

收稿日期: 2017-05-18 接受日期: 2017-11-14

* 通讯作者 E-mail: gxhan@yic.ac.cn

germination and seedling growth of *S. alterniflora*. Furthermore, mowing and waterlogging is not harmful to the environment. The recommended control technique of *S. alterniflora* is: (1) building a dam before the spring germination and waterlogging the soil at 20 cm depth, (2) mowing the aboveground part of *S. alterniflora* in the later stages of vegetative growth and continued waterlogging, and (3) repeating mowing and waterlogging in the second year. In order to prevent secondary invasion, it is necessary to simultaneously implement the same technique in the adjacent *S. alterniflora* growth area.

Key words: invasion; mowing; waterlogging; Yellow River Delta; clonal seedling; seedling.

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是公认的危害最严重的全球性入侵植物之一,原产于美洲大西洋沿岸,属多年生草本植物,具有耐盐耐淹、繁殖力强、光合效率高等特点,在海岸、河口等广阔滩涂具有高度的生态适应性,是海岸带低位盐沼的优势植物 (An *et al.* 2007)。为了改善海滩生态环境、改良土壤和保护海滩,我国学者于 1979 年把互花米草从美国引入我国沿海地区 (徐国万等, 1989)。由于极强的环境适应性、竞争力和繁殖能力,互花米草种群在我国沿海呈现爆发式增长,已成为我国沿海滩涂分布面积最广的盐沼植物,截至 2007 年,其分布面积达 34451 hm^2 (左平等, 2009)。互花米草的大面积暴发,对我国大部分沿海滩涂湿地的生物多样性维持及生态安全构成严重威胁 (陈中义等, 2004; 邓自发等, 2006; Li *et al.* 2009), 环境保护部于 2003 年将其列入中国首批 16 个外来入侵种“黑名单”。

控制互花米草种群的疯狂扩张已经是大势所趋,针对其强入侵性和危害性,前人采取了多种方法进行管理和防控,主要包括物理、化学和生物防治三大类方法 (Hedge *et al.* 2003; 刘建等, 2005; Li *et al.* 2008; Wang *et al.* 2008; Gao *et al.* 2009; Tang *et al.* 2009; Yuan *et al.* 2011; 陈正勇等, 2011; Zhou *et al.* 2015)。化学防治方法 (主要是使用除草剂) 简单易行,但很可能带来环境污染,损害动植物和人类健康;生物防治方法和生物演替方面的技术还不够成熟,而且也存在着新的外来种生态入侵的风险;简单易行且成本较低的物理防治方法应是中国互花米草治理的主要方法和途径。我国在上海、福建等地开展了火烧、刈割、翻耕、碎根和水淹等物理方法控制互花米草的研究,这些研究持续 1~3 年,一般在第一年实施控制措施并观察控制效果,部分研究在第二年跟踪观察控制效果,极少数在第三年继续跟踪观察控制效果。火烧处理一般在秋冬季,只去除了地上植株,根系仍留在原地,火烧会使互花米草生长出现补偿现象,对第二年互花米草的生长和繁殖

有一定的促进作用 (王智晨等, 2006)。刈割、翻耕和碎根处理在第一年可以有效控制互花米草的生长,但在第二年生长季末互花米草便能得到一定程度甚至完全的恢复 (李贺鹏等, 2007; Gao *et al.*, 2009)。单一物理控制方法一般难以达到长期有效的控制效果,学者们转而探寻 2 种或多种综合物理方法治理互花米草并取得了一定的治理效果。谭芳林 (2008) 采用刈割加翻耕的方法控制互花米草,取得了很好的效果,第二年没有新萌生互花米草,然而,翻耕很可能会对底栖动物带来严重干扰。赵相健等 (2014) 认为,刈割与遮荫综合控制的方法适用于去除入侵早期、小面积分布的单一互花米草种群并恢复为沙滩。袁琳等 (2008) 研究发现,扬花期刈割可以终止互花米草的光合作用,并避免结实,刈割后淹水可以有效切断根系的氧气供应,使根系逐渐死亡、腐烂,因此,扬花期刈割+持续淹水 30~50 cm 可以有效控制互花米草。刈割+淹水对环境的影响小,维持淹水的方法是建设临时堤坝,高水位的淹水会增加堤坝建设的成本和难度,如果低水位淹水也能有效控制互花米草,将大大降低治理成本,探讨刈割和淹水的经济有效的组合方案对于推广该方法有重要意义。

黄河三角洲孤东采油区于 1990 年前后在黄河北侧五号桩附近引种互花米草,随后互花米草迅速生长蔓延,2013 年黄河三角洲互花米草面积接近 900 hm^2 , 2015 年则骤增至 3278 hm^2 ,遍布黄河三角洲国家级自然保护区潮间带区域 (任广波等, 2014; 杨俊芳等, 2017)。由于互花米草在黄河三角洲泛滥成灾,山东省早在 2004 年便开始立项研究互花米草的入侵和影响 (于祥等, 2009)。黄河三角洲互花米草入侵区域的海涂浮游动物生物量减少、多样性指数降低,底栖动物种类减少,经济贝类消失不见 (田家怡等, 2008b, 2009; 申保忠等, 2009)。另外,互花米草入侵使鸟类觅食、栖息生境减少或丧失,已导致黄河三角洲互花米草分布区鸟类种数减少、多

样性降低、群落组成和结构发生变化(田家怡等, 2008a)。寻求适合黄河三角洲的互花米草防治方法势在必行。本研究在黄河三角洲保护区大汶流管理站互花米草新入侵区域取样,在人工气候室开展盆栽实验,研究刈割加淹水对黄河三角洲互花米草萌发和幼苗生长的影响,旨在寻求刈割加淹水综合治理互花米草的经济、可行的最优组合方案,为治理互花米草提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究涉及的区域是位于山东东营市的黄河三角洲国家级自然保护区(37°40′N—38°10′N, 118°41′E—119°16′E),2016年12月7日在黄河入海口南侧的121油井附近采集互花米草根系。选取密度和株高相近的区域,齐地剪去互花米草的地上部分,采集20组带土壤的根系样品(土方的长×宽×高=20 cm×20 cm×15 cm),第二天将根系带回实验室。12月9日,开始根系萌发的淹水控制培养试验,将20组原土根茬分别放在20个装有海水的桶中。实验设4个深度的淹水处理,淹水深度分别为0、5、10和20 cm,各处理均设5个重复,0 cm水深为对照处理,有少许淹水以保持土壤水分饱和状态。最后将水桶放置于中国科学院烟台海岸带所的人工气候室(浙江求是人工环境有限公司),人工气候室的温度设为梯度变化(20~25 °C),00:00温度最低,12:00温度最高,光照周期:08:00—22:00为明期(光强约5400 lx)、22:00—08:00时为暗期。定期观察记录根系萌发情况,根据需要适时补水至设定水位,每周更换桶内海水,海水取自于烟台并经过过滤,东营互花米草分布区海水和实验用烟台海水盐度分别为30‰和32‰。持续淹水95 d后,第二次刈割地上植株,然后继续淹水32 d。

1.2 指标测定

更换海水时测定各桶内萌发的幼苗株数和株高,测株高时,由于不断有新的幼苗萌发,本来株高很高的处理,可能由于某段时期新苗数量激增而导致平均株高值突然降低,因此,为了避免新苗数量和株高的影响,在实验初期于每个桶中选择3株较高的互花米草,跟踪监测这3株米草的高度。第二次刈割后,称量所有植株的地上生物量,实验结束后,清洗根系,测量须根重量、根状茎的重量、数量、长度和节数等指标。

1.3 数据处理

为检验刈割条件下不同淹水处理间互花米草各指标的差异,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对样本数据进行分析,经过方差齐性(Levene's test)检验后,采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同淹水处理对互花米草幼苗萌发的影响

互花米草的繁殖方式包括有性繁殖与无性繁殖,其繁殖体包括种子、根状茎与断落的植株。实验进行2 d后各淹水处理便有幼苗萌发,实验开始60 d内,互花米草幼苗源自于无性繁殖,均为从根状茎萌发的克隆苗。克隆苗的萌发位置分为2种,一是从土壤中的根茎上萌发,二是从根茬的芯中萌发,以前者为主。根茬芯中萌发的新芽,在实验进行第40天时,几乎全部死亡。没有发芽的根茬,逐渐枯死腐烂。

不同深度的淹水处理均显著减少了根系萌发的克隆苗数量(图1)。实验开始的前18天内,对照处理的幼苗数量增加最快,31 d后各处理的幼苗株数趋于稳定,0、5、10和20 cm淹水处理的互花米草株数分别为54±4、31±5、21±3和22±5(平均值±标准误差)。第53天起各淹水处理的米草出现死亡,株数开始减少,以20 cm水深处理减少最快。与第31天相比,第81天时对照、5、10和20 cm淹水处理的米草株数分别减少了13%、46%、45%和77%,20 cm淹水处理的米草平均株数仅为5株。对照处理中死亡的互花米草均是非常矮小的,可能是因为密度大而导致矮小植株的光照不足同时摄取养分的能力差,从而导致死亡。

第81天,对照、5和10 cm淹水处理中出现种子萌发的实生苗,第90天,20 cm淹水处理中出现实生苗。第95天,第二次刈割互花米草克隆苗地上植株,此时克隆苗处于营养生长期,尚未孕穗扬花,刈割同时拔除了实生苗。第二次刈割后无克隆苗出现,但第5天时各处理均出现新的实生苗,但对照处理的2个桶和20 cm处理的1个桶在刈割后15天内一直没有萌发实生苗。第二次刈割32 d后,0、5、10和20 cm淹水处理的互花米草实生苗株数分别为5±3、13±3、3±1和1±1,20 cm淹水处理的实生苗数量显著低于其他处理($P<0.01$),较高的淹水可能抑制了互花米草种子萌发,也可能是由于不同处理土壤中的种子数量存在差异。

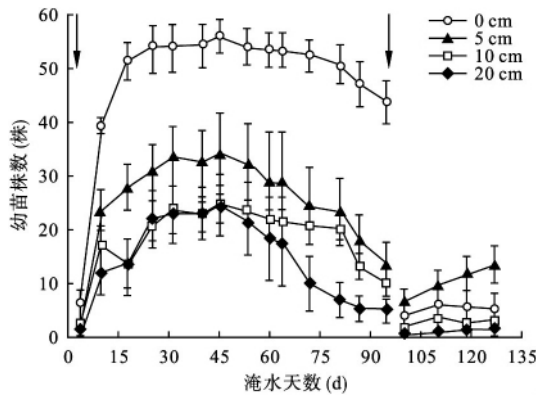


图 1 刈割后不同淹水处理中萌发的互花米草幼苗株数
Fig.1 Number of *Spartina alterniflora* seedlings at different depths of waterlogging after mowing
箭头表示互花米草地上部分刈割的时间。

2.2 不同淹水处理对互花米草新萌发幼苗生长的影响

图 2 显示,不同深度的淹水均会抑制互花米草幼苗的生长,实验第 40~72 天期间,各淹水处理的互花米草株高均低于对照处理,但此后对照处理的植株生长相对缓慢,可能是由于植株密度大、营养不足所致。互花米草幼苗高度超出水面后,生长速度加快,第 95 天再次刈割时,10 cm 处理的克隆苗株高比对照处理和 20 cm 处理高 35% ($P < 0.01$) 和 48% ($P < 0.01$),5 和 20 cm 处理的克隆苗株高接近,均有低于对照处理的趋势。

第二次刈割地上植株第 4 天,各处理均出现了互花米草种子萌发的实生苗,到第 32 天结束实验时,各处理的实生苗株高均没有明显增加,多数在 3~4 cm。

2.3 互花米草克隆苗地上生物量

第 95 天,贴地割除了互花米草克隆苗地上部分,并称量其干重,根据样方面积换算成单位面积的干重。0、5、10 和 20 cm 淹水处理的克隆苗地上生物量分别为 (95.0 ± 7.5) 、 (57.5 ± 22.5) 、 (42.5 ± 7.5) 和 (25.0 ± 12.5) $g \cdot m^{-2}$ 。克隆苗地上生物量与淹水

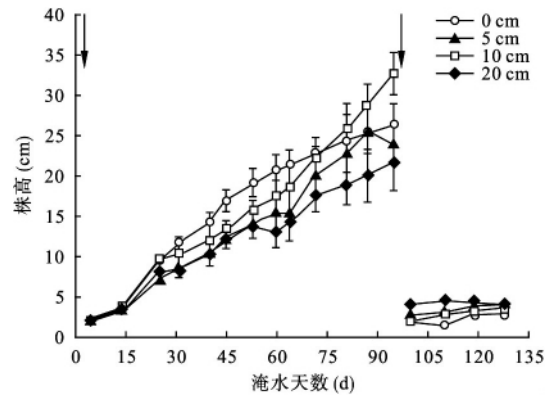


图 2 刈割后不同淹水处理的幼苗株高
Fig.2 Height of *Spartina alterniflora* seedlings at different depths of waterlogging after the mowing

深度有显著的负相关关系,淹水越深,对克隆苗地上生物量的抑制作用越强。

2.4 互花米草根系性状

从表 1 可以看出,除 10 cm 淹水处理外,其他 3 个处理根状茎的重量有大于须根的趋势,综合对照、5 cm 和 20 cm 的所有根重数据,可以发现根状茎重量比须根重量大 52.3% ($P < 0.01$)。5 cm 淹水处理的须根重量显著高于 10 cm ($P < 0.05$)。不同淹水处理之间的其他根系指标虽有差异,但均未通过统计学的显著性检验。这可能是由于同一淹水处理内部的变异较大(标准误差大)。根状茎的节是克隆苗萌发的位置,然而并未发现克隆苗数量与根状茎节数之间有显著相关性,地上生物量和地下生物量也没有相关性。

刈割地上植株后,持续淹水会影响互花米草根系的活性,甚至导致根系死亡。图 3 为实验结束后(持续淹水 125 d)不同淹水处理互花米草根系的照片,左边 4 张照片为根状茎,右边 4 张照片为须根。可以看出,5 和 10 cm 淹水处理根系的颜色与对照处理差别较小,但 20 cm 淹水处理根状茎和须根均已变黑,很可能已经死亡并开始腐烂。

表 1 互花米草根系重量、数量、长度和节数等参数

Table 1 Weight, quantity, length and number of roots of *Spartina alterniflora*

水深 (cm)	须根重量 ($g \cdot \text{桶}^{-1}$)	根状茎重量 ($g \cdot \text{桶}^{-1}$)	根系总重量 ($g \cdot \text{桶}^{-1}$)	根状茎数量 (条 $\cdot \text{桶}^{-1}$)	根状茎总长度 ($cm \cdot \text{桶}^{-1}$)	根状茎总节数 (个 $\cdot \text{桶}^{-1}$)
0	10.2 ± 0.6	16.0 ± 5.5	26.3 ± 6.1	60.0 ± 12.0	799.7 ± 139.4	284.0 ± 60.6
5	12.1 ± 2.6	19.8 ± 3.9	31.9 ± 6.4	78.2 ± 11.6	832.4 ± 108.1	350.0 ± 50.1
10	8.8 ± 1.1	6.5 ± 1.2	15.3 ± 1.5	56.6 ± 9.9	629.8 ± 56.7	230.4 ± 29.6
20	12.3 ± 2.4	16.8 ± 2.8	29.2 ± 5.1	70.2 ± 5.7	835.2 ± 69.9	306.2 ± 21.0

平均值 \pm 标准误差。

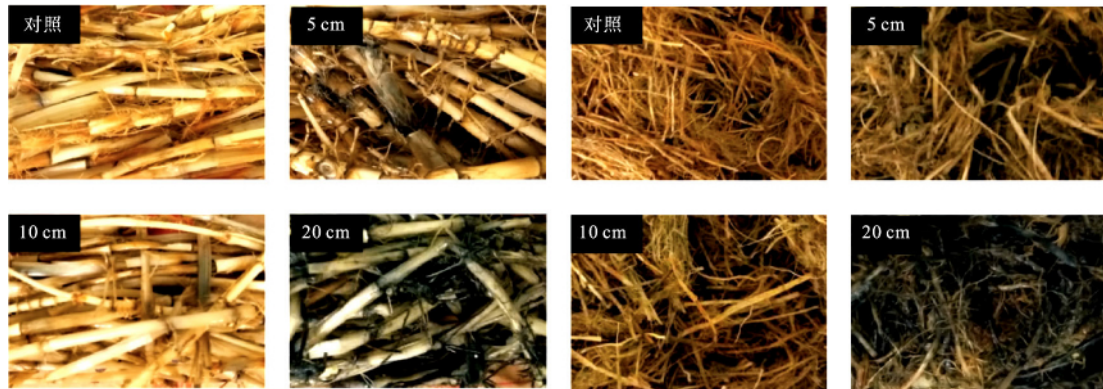


图3 持续淹水 125 d 后的互花米草根系

Fig.3 Roots of *Spartina alterniflora* after waterlogging for 125 days

3 讨论

3.1 刈割治理互花米草的效果

刈割可以快速去除地上植株,有效限制地上部分的光合作用,减少根部能量的储存,使植物的再生潜力锐减,从而抑制其生长和繁殖,因此,刈割经常被用来防治互花米草等入侵植物(李富荣等, 2007; Tang *et al.*, 2009; Mateos-Naranjo *et al.*, 2012; 赵相健等, 2014)。作为一种物理控制方法,刈割对环境无害,避免了化学控制方法的环境污染风险和生物替代控制方法的复杂性及潜在入侵风险。

刈割防治互花米草的效果与刈割时间、刈割次数和留茬高度息息相关。刈割时间的选择至关重要,谭芳林等(2010)在福建泉州市的研究发现,有效控制互花米草种群扩张的刈割时期是6—7月互花米草的穗分化期、孕穗期至抽穗期。和春雷(2010)在福建宁德市的研究发现,在5月中旬营养生长期刈割,无论留茬高低,均造成了互花米草零再生,其他时期的地上刈割则无法完全控制互花米草的再生。互花米草具有发达的根状茎和极强的萌蘖能力,单纯一次刈割只是去除了地上部分,互花米草的留茬可能重新生长,根状茎也可能还有萌发能力,甚至发生补偿效应,萌发大量的新生分株(赵相健等, 2014)。因此,单次刈割很难控制住互花米草的再生,往往需要两次乃至多次刈割,才能有效控制互花米草的生长和扩散。Tang等(2009)在上海崇明东滩的研究发现,时机恰当的两次刈割才能有效控制互花米草,为了完全清除潮间带互花米草,可能需要连续2~4年的刈割。刈割的留茬高度也对其控制效果有很大影响,笔者于2016年8月下旬在黄河三角洲进行了原位刈割和淹水的综合治理试验,刈

割时留茬的高度越低,后期萌发的新苗越少。和春雷(2010)研究发现,不同生长时期(营养生长期、扬花期或成熟期)的地下10 cm刈割均造成了互花米草的零再生。然而,大面积的地下10 cm刈割很困难,基本没有推广价值。

3.2 淹水治理互花米草的效果

互花米草虽是耐淹植物,但其生境一般是受潮汐影响的间歇性淹水区域,持续淹水胁迫会抑制互花米草的生长。陈正勇等(2011)研究发现,持续淹水20 cm可以抑制互花米草种子实生苗(高度7~10 cm)的生长和繁殖,3个月后互花米草全部死亡。本研究发现,持续淹水20 cm虽然能显著抑制互花米草的无性繁殖和克隆苗的生长,却不能将克隆苗完全杀死。淹水胁迫的防治效果与植被高度和淹水水位息息相关,水位低于植株时,植被株高和叶片中叶绿素含量都会显著增高,淹水胁迫反而促进互花米草的营养生长,水位高于植株的淹水胁迫,会导致互花米草叶片中叶绿素含量明显降低,抑制其光能的吸收、传递和转换效率,进而影响互花米草的光合作用,最终对其生长和繁殖产生显著的影响,高水位淹水胁迫还会导致互花米草植株死亡并抑制其无性繁殖,从而有效控制互花米草扩散(袁连奇等, 2010)。

3.3 刈割加淹水综合治理互花米草

单次刈割对互花米草的防治效果较差,多次刈割的控制效果好,但工作量大,另外还要把握好刈割时机和间隔时间,淹水胁迫要求水位足够高,若将刈割与淹水结合起来,很可能取得更好的防治效果和效益。Yuan等(2011)在上海崇明东滩的研究表明,7月份在互花米草扬花期刈割地上植株后,持续淹水(水深30~50 cm)3个月至生长期末期,互花米草地上部分无再生现象,植被地上部分和地下部分已

完全死亡并开始腐烂。本研究虽然对互花米草进行了2次刈割,但第一次刈割是在2016年12月初,割除的是前一季植物,当时地上植被已经开始枯死,第二次刈割才是割除当季的互花米草克隆苗。第二次刈割时,克隆苗处于营养生长期,尚未孕穗扬花,刈割后继续淹水1个月,对照处理和淹水处理均未见新的克隆苗,很可能是因为根茎的无性繁殖能力已经耗尽。由于20 cm水深处理的互花米草根茎已经死亡腐烂,保持20 cm淹水的控制效果更好。

本研究表明,在互花米草分布区保持淹水20 cm,在互花米草扬花结实前刈割,继续保持淹水,可有效控制互花米草的再生,另外,保持20 cm淹水3个月,同时可以杀死实生苗(陈正勇等,2011)。在推广应用时,20 cm水位显然比Yuan等(2011)研究中的30~50 cm水位更容易实现,且成本更低。

建议刈割+淹水综合治理互花米草的措施如下:(1)在春季萌芽前,原地挖土修筑简易堤坝,使互花米草分布区保持淹水20 cm,可以抑制克隆苗和实生苗的萌发和生长。(2)在互花米草结实前,贴地刈割互花米草,清除互花米草克隆苗,然后继续维持淹水20 cm。(3)第二年重复同样的刈割和淹水。连续两年的刈割与淹水综合治理,有望彻底清除治理区域的互花米草。

本研究作为盆栽实验,无法回答刈割+淹水综合治理的可行性和生态风险等问题,还需要在野外开展原位实验,评估该技术的可行性(技术细节和成本等)和生态影响。在大区域防治互花米草时,需要进行黄河三角洲互花米草生态风险防控分区,确定分区防控目标和防控对策,在高风险区域需对互花米草进行全面清除。

致谢 本研究得到中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站的大力支持。

参考文献

陈正勇,王国祥,刘金娥,等. 2011. 淹水调控对互花米草生长的影响. 环境科学研究, 24(9): 1003-1007.
 陈中义,李博,陈家宽. 2004. 米草属植物入侵的生态后果及管理对策. 生物多样性, 12(2): 280-289.
 邓自发,安树青,智颖飙,等. 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.
 和春雷. 2010. 刈割防治对互花米草的影响(硕士学位论文). 福州: 福建农林大学.
 李富荣,陈俊勤,陈沐荣,等. 2007. 互花米草防治研究进展. 生态环境, 16(6): 1795-1800.
 李贺鹏,张利权. 2007. 外来植物互花米草的物理控制实验

研究. 华东师范大学学报: 自然科学版, (6): 44-55.
 刘建,杜文琴,马丽娜,等. 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.
 任广波,刘艳芬,马毅,等. 2014. 现代黄河三角洲互花米草遥感监测与变迁分析. 激光生物学报, 22(6): 596-603.
 申保忠,田家怡,于祥,等. 2009. 黄河三角洲米草入侵对滩涂底栖动物多样性的影响. 海洋科学进展, 27(3): 384-392.
 谭芳林,林贻卿,肖华山,等. 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.
 谭芳林. 2008. 机械法治理互花米草效果及其对滩涂土壤性状影响研究. 湿地科学, 6(4): 526-530.
 田家怡,申保忠,李建庆,等. 2009. 黄河三角洲外来入侵物种米草对滩涂底栖动物的影响. 海洋环境科学, 27(6): 687-690.
 田家怡,于祥,申保忠,等. 2008a. 黄河三角洲外来入侵物种米草对滩涂鸟类的影响. 中国环境管理干部学院学报, 18(3): 87-90.
 田家怡,于祥,申保忠,等. 2008b. 黄河三角洲外来入侵物种米草对海涂浮游动物的影响. 山东科学, 21(5): 15-20.
 王智晨,张亦默,潘晓云,等. 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.
 徐国万,卓荣宗,曹豪,等. 1989. 互花米草生物量年动态及其与滩涂生境的关系. 植物生态学与地植物学学报, 13(3): 230-235.
 杨俊芳,马毅,任广波,等. 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.
 于祥,田家怡,李建庆,等. 2009. 黄河三角洲外来入侵物种米草的分布面积与扩展速度. 海洋环境科学, 28(6): 684-686.
 袁琳,张利权,肖德荣,等. 2008. 刈割与水位调节集成技术控制互花米草(*Spartina alterniflora*). 生态学报, 28(11): 5723-5730.
 袁连奇,张利权. 2010. 调控淹水对互花米草生理影响的研究. 海洋与湖沼, 41(2): 175-179.
 赵相健,柳晓燕,宫璐,等. 2014. 刈割加遮荫综合治理互花米草(*Spartina alterniflora*). 生态学杂志, 33(10): 2714-2719.
 左平,刘长安,赵书河,等. 2009. 米草属植物在中国海岸带的分布现状. 海洋学报: 中文版, 31(5): 101-111.
 An SQ, Gu BH, Zhou CF, et al. 2007. *Spartina* invasion in China: Implications for invasive species management and future research. *Weed Research*, 47: 183-191.
 Gao Y, Tang L, Wang J, et al. 2009. Clipping at early florescence is more efficient for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora*. *Ecological Research*, 24: 1033-1041.
 Hedge P, Kriwoken LK, Patten K. 2003. A review of *Spartina* management in Washington State, US. *Journal of Aquatic Plant Management*, 41: 82-90.
 Li B, Liao CH, Zhang XD, et al. 2009. *Spartina alterniflora*

- invasions in the Yangtze River estuary , China: An overview of current status and ecosystem effects. *Ecological Engineering* , **35**: 511-520.
- Li H , Zhang L. 2008. An experimental study on physical controls of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai , China. *Ecological Engineering* , **32**: 11-21.
- Mateos-Naranjo E , Cambrolle J , Garcia De Lomas J , *et al.* 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.
- Tang L , Gao Y , Wang J , *et al.* 2009. Designing an effective clipping regime for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora* in an estuarine salt marsh. *Ecological Engineering* , **35**: 874-881.
- Wang G , Qin P , Wan S , *et al.* 2008. Ecological control and integral utilization of *Spartina alterniflora*. *Ecological Engineering* , **32**: 249-255.
- Yuan L , Zhang L , Xiao D , *et al.* 2011. The application of cutting plus waterlogging to control *Spartina alterniflora* on saltmarshes in the Yangtze Estuary , China. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* , **92**: 103-110.
- Zhou T , Liu S , Feng Z , *et al.* 2015. Use of exotic plants to control *Spartina alterniflora* invasion and promote mangrove restoration. *Scientific Reports* , **5**: 12980.
-
- 作者简介 谢宝华 ,男 ,1978 年生 ,博士 ,助理研究员 ,主要从事湿地生态学与环境科学研究。E-mail: bhxie@yic.ac.cn
责任编辑 魏中青
-