DOI: 10.5846/stxb201807291611

乔沛阳,王安东,谢宝华,王丽,韩广轩,梅宝玲,张希涛.除草剂对黄河三角洲入侵植物互花米草的影响.生态学报,2019,39(15):5627-5634.
Qiao P Y,Wang A D,Xie B H,Wang L,Han G X,Mei B L,Zhang X T.Effects of herbicides on invasive *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta.Acta Ecologica Sinica,2019,39(15):5627-5634.

除草剂对黄河三角洲入侵植物互花米草的影响

乔沛阳[1,2],王安东[3],谢宝华[1,*],王 丽[4],韩广轩[1],梅宝玲[2],张希涛[3]

1 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, 烟台 264003

2 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021

3 山东省黄河三角洲国家级自然保护区, 东营 257500

4 山东省林业监测规划院, 济南 250014

摘要: 互花米草(*Spartina alterniflora*)作为我国危害最严重的外来入侵植物之一,严重威胁滨海湿地生态系统安全。筛选可高效灭除互花米草的除草剂,为互花米草防治提供技术支持。2017 年 7 月在黄河三角洲潮间带对互花米草茎叶喷施不同除草剂,在施药当年和次年对互花米草生长状况和大型底栖动物密度进行跟踪调查。研究结果表明: 1) 高效氟吡甲禾灵对互花米草的灭除效果最好,既能杀死互花米草地上部分从而完全抑制有性繁殖,又可完全抑制次年的无性繁殖; 2) 氰氟草酯对互花米草的灭除效果也比较好,可以完全抑制互花米草的生长和结穗,但抑制根状茎无性繁殖能力的效果稍差,草甘膦可以完全抑制互花米草的有性繁殖,但无法抑制次年互花米草的无性繁殖; 3) 施用除草剂在短期内会毒害某些底栖动物,但在 1 年后底栖动物种群数量与对照处理无显著差异。除草剂对环境的影响程度与除草剂用量和施用时间息息相关,未来研究中,应在保证灭草效果的前提下,探索最佳用药时间和最低用量以最大限度地降低环境影响。

关键词: 互花米草; 化学防治; 除草剂; 高效氟吡甲禾灵; 草甘膦; 氰氟草酯; 黄河三角洲

Effects of herbicides on invasive *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta

QIAO Peiyang[1,2],WANG Andong[3],XIE Baohua[1,*],WANG Li[4],HAN Guangxuan[1],MEI Baoling[2],ZHANG Xitao[3]

1 *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *China*

2 *School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot* 010021, *China*

3 *Administration Bureau of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying* 257500, *China*

4 *Forestry Survey and Planning Institute of Shandong Province, Jinan* 250014, *China*

Abstract: *Spartina alterniflora* is one of the most noxious invasive plants in China, and it seriously threatens the safety of coastal wetland ecosystem. The aim of this study was to screen for herbicides that could efficiently eliminate *S. alterniflora*, providing a method for the control of *S. alterniflora*. In July 2017, different herbicides were sprayed on the stems and leaves of *S. alterniflora* in the intertidal zone of the Yellow River Delta. The growth status of *S. alterniflora* and density of macrobenthos were investigated in 2017 and the following year. The results of this study indicated that (1) haloxyfop-P-methyl could completely eradicate *S. alterniflora*. It not only completely inhibited sexual reproduction by killing the aboveground part of *S. alterniflora* but also inhibited asexual reproduction of the rhizomes in the following year. (2) Cyhalofop-butyl could also completely inhibit the growth and spiking of *S. alterniflora*, but its ability of controlling asexual

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STS-ZDTP-023); 国家级自然保护区专项资金项目(Y639071021,Y891061021); 山东省林业科技创新项目(LYCX07-2018-39)

收稿日期: 2018-07-29; **网络出版日期**: 2019-05-16

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: bhxie@yic.ac.cn

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

reproduction was slightly weaker than that of haloxyfop-P-methyl. Glyphosate could completely suppress the sexual reproduction of *S. alterniflora*, but it could not effectively inhibit asexual reproduction in the following year. (3) Application of herbicides could poison some macrobenthos in a short period, but the macrobenthos could be restored in a year. The influence on the environment is closely connected with the amount and period of herbicide application. In the future, the best time and minimum dosage of herbicides should be evaluated to minimize the negative effects on the environment.

Key Words: *Spartina alterniflora*; chemical control; herbicide; haloxyfop-P-methyl; glyphosate; cyhalofop-butyl; Yellow River Delta

互花米草(*Spartina alterniflora*)隶属于禾本科米草属,是多年生草本植物,原产地位于美洲大西洋沿岸,具有很强的生长繁殖能力、耐盐和耐淹能力[1],1979 年引入我国,已成为滨海滩涂地区的优势物种,遍布于我国各沿海省份[2]。2003 年,互花米草被列入国家环保总局和中国科学院联合发布的中国第一批外来入侵物种名单中[3]。

在我国互花米草入侵后疯狂繁殖扩张,严重威胁沿海湿地生物多样性及生态系统健康等,防治互花米草,对恢复潮间带生态环境及生物多样性具有重大意义[2,4]。目前,控制互花米草繁殖扩张的方法主要有物理防治、生物防治、化学防治和综合防治等[5-10]。物理防治主要是通过人工或机械装置,采用刈割、淹水、火烧、翻耕和碎根等物理手段控制互花米草的生长繁殖,但单一的物理防治手段很难有效控制互花米草的扩张[9,11];生物防治和生物替代技术尚不成熟,而且生物防治可能需要引入新物种,有带来新的生物入侵的风险[12-13];化学防治是使用除草剂灭除互花米草植株,存在污染环境、威胁底栖动物等风险,其优点是见效快,经济成本低,适宜人力难以达到的泥泞滩涂,喷施除草剂在国外是常用的互花米草防治方法,但在国内这方面的研究还很少[14]。目前,美国环保署只允许在河口生境使用草甘膦和咪唑烟酸控制互花米草。国外学者研究发现在互花米草苗期施用草铵膦、草甘膦和咪唑烟酸均得到了 90%以上的灭草效果,但对于成熟米草,除草剂的灭草效果差很多[15]。草甘膦的灭草效果并不稳定,不同的表面活性剂和不同的喷药时期灭草效果差异很大,咪唑烟酸的灭草效果受冠层喷施条件及潮汐侵淹时长的影响较大[16-17]。综合防治是将几种方法结合使用,以求达到更好的互花米草控制效果[18]。

互花米草于 1990 年被引入黄河三角洲在五号桩附近,至 2015 年整个黄河三角洲互花米草总面积达 3278 hm^2[19],对本土植物、鸟类和部分底栖动物等生存造成了严重威胁,如破坏鸟类觅食及栖息环境[20]、改变底栖动物群落组成、大型经济贝类消失、优势种群改变等[21]。本研究在黄河三角洲潮间带对互花米草喷施不同除草剂,监测除草剂对互花米草的灭除效果,同时调查除草剂对大型底栖动物的影响,旨在筛选出可以有效灭除互花米草且对环境影响较小的除草剂,为我国互花米草防治提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄河三角洲(37°16′—38°16′ N,118°20′—119°20′ E)属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 11.0—14.0°C,多年平均年降水量 609.5 mm,降水量季节变化和年际变化较大[22]。本研究的试验点位于黄河入海口北侧潮间带(37°50′26.74″ N,119°5′18.56″ E),该区域地势平坦,潮汐为不规则半日潮,潮流是近似平行于海岸的往复流[23]。研究期间试验区域平均高潮位 42.7 cm,平均低潮位 24.4 cm。平均涨潮历时 512 min,平均落潮历时 715 min,完全落潮后地表有 1—3 cm 积水。由海到陆依次分布着大叶藻(*Zostera marina*)、互花米草(*S. alterniflora*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇(*Phragmites australias* Trin)和柽柳(*Tamarix chinensis* Lour)等植物,互花米草在浅水区与大叶藻存在较窄的生态位重叠,在向陆方向上与盐地碱蓬相邻。试验区域为互花米草单一群落,成体株高 1.3—1.6 m,4—7 月为营养生长期,8—10 月为生殖生长期,11 月开始枯萎

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

死亡。

1.2　试验设计

2017 年 7 月,互花米草冠层高度约 1.0—1.1 m,在互花米草分布区选取 9 个试验小区和 1 个对照区(CK),10 个小区在平行于附近潮沟的方向上依次排列,小区四周未设置 PVC 围栏,相邻小区之间留有 1 m 间隔,每个小区面积为 50 m^2。退潮后用喷雾器将除草剂均匀喷施于互花米草茎叶部分,每个小区各喷施一种除草剂。为保证喷施均匀,每个小区喷洒 2 遍刚好把药剂溶液用完,9 个小区全部完成喷药只需 45 min,因此每个小区除草剂的有效停留时间视为一致。喷完药 4 h 后开始涨潮,一周内最高潮位不超过 40 cm,低于互花米草冠层高度的一半。由于化学防治互花米草的研究很少,本研究选择了较常用的 8 种除草剂,除草剂名称和用量等信息详见表 1,选择除草剂的原则遵循: ①文献已有的,②适用于水田的,③灭除禾本科植物的(如芦苇)。

表 1　供试除草剂种类及用量

Table 1　The type and dosage of tested herbicides

编号 Code	供试试剂 Test reagent	主要成分 Principal component	除草剂施用量 Herbicide application rate/(kg/hm^2) *	推荐用量 Recommended dosage/(kg/hm^2) *	文献中用量 Dosage inliterature/(kg/hm^2) *	推荐用地 Recommended lands	生产厂家 Manufacturer
1 区 Plot 1	陶氏益农稻杰五氟磺草胺	五氟磺草胺	0.100	0.03		稗草; 水稻田	美国陶氏益农公司
2 区 Plot 2	陶氏益农盖草能高效氟吡甲禾灵	高效氟吡甲禾灵	0.432	0.145		芦苇; 春大豆田	美国陶氏益农公司
3 区 Plot 3	芦飞高效氟吡甲禾灵	高效氟吡甲禾灵	0.632	0.213		芦苇; 春大豆田	北京中农科美化工有限公司
4 区 Plot 4	巴斯夫百垄通	甲咪唑烟酸	0.384	0.108	0.21; 2.11; 1.68 **	花生田; 一年生杂草	德国巴斯夫
5 区 Plot 5	谷草净(原谷草灵)	单嘧磺隆	0.900	2.1		谷田; 一年生杂草	天津市绿保农用化学科技开发有限公司
6 区 Plot 6	芦田农资草铵膦	草铵膦	4.000	1.5	0.82; 1.64	非耕地; 杂草	山东圣鹏科技股份有限公司
7 区 Plot 7	锄洁二氯喹啉酸	二氯喹啉酸	2.500	0.375		水稻田; 稗草	江苏瑞东农药有限公司
8 区 Plot 8	草甘膦异丙胺盐	草甘膦	12.000	0.9	1.06; 2.13; 10; 7.2	水稻田; 一年生普通杂草	河南迪美施化肥有限公司
9 区 Plot 9	20% 氰氟草酯水乳剂—芭乐	氰氟草酯	4.000	0.105		水稻田; 稗草等一年生禾本科杂草	安徽陆野农化有限责任公司

* 按有效成分计算; ** 文献中为咪唑烟酸; CK 为未经处理的对照小区; 1 区为五氟磺草胺小区; 2 区为高效氟吡甲禾灵(0.432 kg/hm^2) 小区; 3 区为高效氟吡甲禾灵(0.632 kg/hm^2) 小区; 4 区为甲咪唑烟酸小区; 8 区为草甘膦小区; 9 区为氰氟草酯小区

1.3　防治效果监测

2017 年 9 月,在各小区随机选取 4 个 50 cm×50 cm 的样方,调查互花米草株高和密度,11 月(生长季结束后),调查互花米草株高、穗密度、结穗率和生物量等指标。每个样方随机测量 20 株互花米草高度,取其平均值。密度由样方内个体数除以样方面积得到。结穗率为样方内结穗株数除以总株数。齐地刈割样方内互花米草地上部分,挑出枯黄死亡个体,将存活植物洗净,带回试验室烘干测定地上生物量。地下生物量用收获法测定,在互花米草调查样方内挖根,深度为 40 cm,将根系洗净,根据互花米草的根表面和根断面颜色来区分活根和死根,80℃烘干至恒重,称取根系生物量。

根据 9 月的调查结果,初步筛选出灭除互花米草效果较好的小区(两个高效氟吡甲禾灵小区、甲咪唑烟酸小区、草甘膦小区、氰氟草酯小区),11 月对这些小区再次调查,进一步筛选出灭草效果更优秀的小区(剔除甲咪唑烟酸小区),并在这些小区内随机挖取 3 个 25 cm×25 cm×40 cm 的沉积物样方,调查大型底栖动物种类与密度。2018 年 4 月、5 月,调查 CK、两个高效氟吡甲禾灵小区、草甘膦小区和氰氟草酯小区中互花米草萌

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

发情况。2018 年 6 月,在施用除草剂 11 个月后,再次调查 CK、两个高效氟吡甲禾灵小区、草甘膦小区和氰氟草酯小区中大型底栖动物种类与密度。

1.4 数据分析与处理

为检验不同除草剂处理中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,对于不满足方差齐性检验的数据,采用 Games-Howell(A) 进行多重比较分析。所有图形运用 Sigmaplot 12.5 绘制。

2 结果与分析

2.1 除草剂对互花米草株高的影响

喷施除草剂 2 个月后,高效氟吡甲禾灵小区和氰氟草酯小区互花米草地上部分已经全部死亡。CK 株高为(128.7±6.1) cm(平均值±标准误差,图 1) ,五氟磺草胺、草铵膦和二氯喹啉酸处理的互花米草株高与 CK 无显著差异($P>0.05$) ,单嘧磺隆小区株高比 CK 低 8.9%($P<0.05$) ,低浓度高效氟吡甲禾灵、高浓度高效氟吡甲禾灵、甲咪唑烟酸、草甘膦和氰氟草酯处理的互花米草株高分别比 CK 低 34.0%、36.5%、24.4%、22.8%和 43.0%,且差异显著($P<0.01$) 。后期对显著抑制互花米草生长的小区继续跟踪调查。

喷施除草剂 4 个月后(11 月下旬) ,CK 株高(133.4±1.3) cm(图 1) ,低浓度高效氟吡甲禾灵、高浓度高效氟吡甲禾灵、甲咪唑烟酸、草甘膦和氰氟草酯处理的互花米草株高分别比 CK 低 39.9%、44.0%、42.8%、48.1%和 47.7%,且差异极显著($P<0.01$) 。这说明这些除草剂对互花米草植株地上部分有明显的毒害作用。

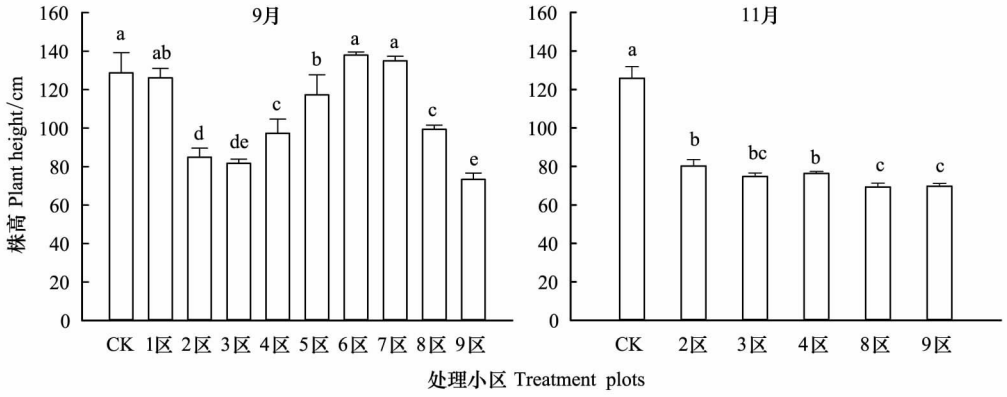

图 1 2017 年 9 月和 11 月互花米草株高

Fig.1 Height of *S. alterniflora* in September and November 2017

不同字母表示差异显著($P<0.05$) ; CK 为未经处理的对照小区; 1 区为五氟磺草胺小区; 2 区为高效氟吡甲禾灵(0.432 kg/hm^2) 小区; 3 区为高效氟吡甲禾灵(0.632 kg/hm^2) 小区; 4 区为甲咪唑烟酸小区; 5 区为单嘧磺隆小区; 6 区为草铵膦小区; 7 区为二氯喹啉酸小区; 8 区为草甘膦小区; 9 区为氰氟草酯小区

2.2 除草剂对互花米草抽穗的影响

11 月 21 日调查 CK、低浓度及高浓度高效氟吡甲禾灵、甲咪唑烟酸、草甘膦和氰氟草酯处理中互花米草穗长、穗密度以及结穗率(表 2) 。CK 互花米草穗长为(20.0±0.2) cm,穗密度为(132.0±8.0) 穗/m^2,结穗率为(56.7±10.8) %,甲咪唑烟酸小区穗长为(18.0±0.5) cm,穗密度为(84.0±28) 穗/m^2,结穗率为(31.5±4.6) %,穗长、穗密度和结穗率虽然低于 CK,但差异不显著($P>0.05$) 。由于高效氟吡甲禾灵和氰氟草酯在互花米草结穗前完全杀死了其地上部分,因此穗密度为 0,草甘膦小区的互花米草地上部分虽然存活,但其生长受到显著抑制,未见抽穗。以上结果表明,高效氟吡甲禾灵、草甘膦和氰氟草酯均可完全限制互花米草的抽穗结实,从而完全抑制其有性繁殖能力。

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

表 2　互花米草的穗长、穗密度与结穗率

Table 2　The spike length, spike density and heading rate of *S. alterniflora*

编号 Code	穗长/cm Spike length	穗密度/(穗/m^2) Spike density	结穗率/% Heading rate
CK　Control check	20.0±0.2	132.0±8.0	56.7±10.8
2 区　Plot 2	0.0**	0.0**	0.0**
3 区　Plot 3	0.0**	0.0**	0.0**
4 区　Plot 4	18.0±0.5	84.0±28.0	31.5±4.6
8 区　Plot 8	0.0**	0.0**	0.0**
9 区　Plot 9	0.0**	0.0**	0.0**

**表示显著性差异(P<0.05)

2.3　除草剂对互花米草生物量的影响

生物量可以有效地反应除草剂对互花米草植株及根系毒害作用的强弱程度。各除草剂小区的互花米草总生物量均显著低于 CK(P<0.01),仅为 CK 的 54.5%—74.0%。施用除草剂后互花米草地上生物量也显著低于对照处理(P<0.01,表 3),低浓度高效氟吡甲禾灵、高浓度高效氟吡甲禾灵、草甘膦和氰氟草酯处理的互花米草地上生物量分别为 CK 的 70.9%、49.7%、63.1%和 60.3%。高浓度高效氟吡甲禾灵和氰氟草酯处理的须根量和总根量相比 CK 均明显减少(P<0.05),其他处理与 CK 没有显著差异(P>0.05)。氰氟草酯小区互花米草茎叶在喷药 15 d 后全部枯黄,植株光合作用能力丧失,根系生长受到很大影响,根系生物量仅为 CK 的 52.2%(P<0.05),高浓度高效氟吡甲禾灵小区互花米草在施药 30 d 后全部枯黄,其根系生物量为 CK 的63.7%(P<0.05),而其余小区互花米草地上部分死亡较晚或未全部死亡,根系生长受影响小,根系生物量与 CK 均无明显差异(P>0.05)。各种处理间死根茎量差异不明显(P>0.05),但除草剂小区的活根茎量显著低于 CK(P<0.05),低浓度与高浓度高效氟吡甲禾灵、草甘膦和氰氟草酯处理的互花米草活根茎量分别为 CK 的 64.4%、53.7%、57.3%和 40.0%。

表 3　互花米草地上生物量、根系生物量和总生物量

Table 3　The aboveground biomass, root biomass and total biomass of *S. alterniflora*

编号 Code	地上生物量 Abovegroundbiomass/(g/m^2)	活根茎 Live rhizome/(g/m^2)	死根茎 Dead rhizome/(g/m^2)	须根 Fibrousroot/(g/m^2)	总根 Total root/(g/m^2)	总生物量 Total biomass/(g/m^2)
CK Control check	1108.0±37.9	185.6±2.9	158.3±29.7	228.5±11.9	567.9±43.5	1675.9±17.4
2 区 Plot 2	785.9±32.8**	119.6±23.8*	154.8±7.4	180.5±28.9	454.9±53.9	1240.8±25.5**
3 区 Plot 3	551.0±40.2**	99.6±7.9*	121.7±8.8	140.5±27.5*	361.8±43.7*	912.8±70.3**
4 区 Plot 4	698.8±36.0**	106.3±35.1*	179.5±21.1	174.8±30.6	460.6±78.8	1159.4±106.8**
8 区 Plot 8	668.3±28.2**	72.3±22.9**	115.1±10.2	109.3±16.4*	296.7±41.2*	965.0±67.0**

2.4　除草剂对次年克隆苗的影响

克隆苗密度可以指示根状茎分蘖能力的强弱,是判断除草剂抑制互花米草无性繁殖能力的有力指标。茎叶喷洒 0.632 kg/hm^2的高效氟吡甲禾灵有效抑制了互花米草根状茎分蘖,第二年没有克隆苗萌发(图 2,P<0.01)。低浓度高效氟吡甲禾灵小区和氰氟草酯小区有零星克隆苗萌生,克隆苗密度仅为 CK 的 1.2%和 12.1%(P<0.01),株高与 CK 无明显差异(图 2,P>0.05)。喷施草甘膦对次年克隆苗的密度和株高都没有明显影响(P>0.05)。

2.5　除草剂对大型底栖动物的影响

2017 年 11 月 21 日(喷施除草剂 4 个月后),调查大型底栖动物种类及密度(图 3)。大型底栖动物主要有日本刺沙蚕(*Neanthes japonica* Izuka)、天津厚蟹(*Helice tridens tientsinensis*)及薄壳绿螂(*Glauconome primeana* Crosse & Debeaux),为方便描述,下文简称沙蚕、螃蟹及贝类。2018 年 6 月(喷施除草剂 11 个月后)再次调查

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

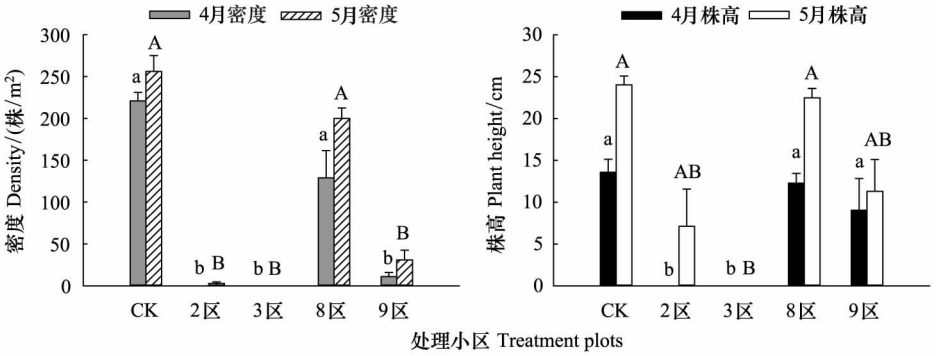

图 2 互花米草克隆苗密度与株高

Fig.2 Density and height of *S. alterniflora* clone seedlings

各处理小区内大型底栖动物情况(图 3) 。结果表明,施药 4 个月后,各小区内沙蚕和贝类的密度与 CK 相比没有明显差异($P>0.05$) ,但螃蟹的密度显著低于 CK($P<0.05$) ,仅在氰氟草酯小区内发现螃蟹,密度为 CK 的 12.4%($P<0.05$) ,其余小区内均未发现螃蟹。施药 11 个月后,高浓度高效氟吡甲禾灵小区中沙蚕的密度为 CK 的 2 倍($P<0.05$) ,其余小区内沙蚕密度与 CK 无显著差异($P>0.05$) ,各除草剂处理小区中贝类的密度与 CK 相比没有明显差异($P>0.05$) ,并且螃蟹的密度得到了较好的恢复,各施药小区内螃蟹的密度与 CK 没有明显差异($P>0.05$) 。

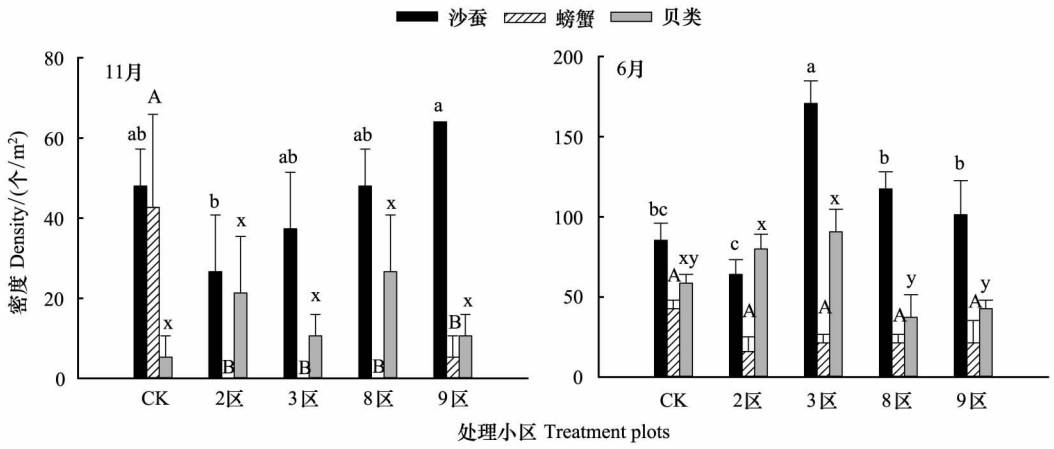

图 3 2017 年 11 月和 2018 年 6 月的大型底栖动物种类及密度

Fig.3 Species and density of macrobenthos in November 2017 and June 2018

3 讨论与结论

3.1 不同除草剂治理互花米草效果的差异

作用机理的差异可能是不同除草剂具有不同灭草效果的重要原因。高效氟吡甲禾灵和氰氟草酯都是通过抑制植株体内乙酰辅酶 A 羧化酶的活性来抑制根、茎分生组织的生长,从而杀死植株[24-25]。草甘膦是抑制植物体内 5-烯醇丙酮莽草酸-3-磷酸合酶,使其不能合成生存所必需的某些芳香氨基酸,导致互花米草植株死亡[12]。用药环境会影响灭草效果,施药后 24 h 内的降水会降低草甘膦和氰氟草酯的药效[26-27],但高效氟吡甲禾灵受低温、降水等不利条件影响小[28],潮汐对除草剂的冲刷作用也可能影响灭草效果。有些除草剂如草甘膦可因被土壤中微生物吸附、金属离子络合而降低其对植物根系的毒性[29-30],导致对互花米草无性繁殖能力的控制效果发生变化。药剂用量不同也会影响灭草效果,本研究中,两种用量的高效氟吡甲禾灵均可杀死互花米草地上部分,但较高用量的药剂对互花米草无性繁殖能力有更好的抑制效果。然而,除草剂的用量可

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

能并非越高越好,Knott 等[17]研究发现,草甘膦和咪唑烟酸对互花米草的控制效果随药剂用量增加而增强,但是较高用量的草铵膦或咪唑乙烟酸的灭草效果反倒有所下降,这也许是喷药不均匀所致。

喷施除草剂是简单易行的治理互花米草的方法,其中施用草甘膦的报道最多[31-33],但不同研究中草甘膦的灭草效果有较大差异。Knott 等[17]研究表明,对株高约 13 cm 的互花米草幼苗和株高约 60 cm 的成熟株体喷施草甘膦,幼苗死亡率为 95.4%,但成熟植株只有不到 25.0%受损,且无死亡现象。Mateos-Naranjo 等[31]于西班牙南部喷洒草甘膦,在施药 1 年后互花米草分蘖密度减少了 38%。Riddin 等[32]喷施草甘膦和咪唑烟酸的混合液,施药一年后互花米草死亡率超过 95%。本研究在互花米草拔节期后期喷施草甘膦,显著抑制了互花米草生长,地上植株虽未死亡,但无抽穗结实,地下根茎受到的影响则很小,次年萌发了大量克隆苗。这些研究结果不同的原因可能是: (1) 草甘膦施用量不同; (2) 喷药时期不同,不同生育期互花米草对农药的吸收能力和抗药性不同; (3) 草甘膦的表面活性剂不同[33]; (4) 试验区域的潮汐情况不同; (5) 草甘膦和咪唑烟酸对互花米草致死存在协同作用,可以提高灭草效果。这些研究也说明,在使用除草剂治理互花米草时,需要提前进行因地制宜的技术探索。

3.2　施用除草剂治理互花米草的环境影响

化学防治方法主要是施用除草剂治理互花米草,可能对环境带来一定的负面影响,如对其他动植物造成危害,进而破坏本地土壤和生态系统[34-35]。然而,也有不少研究发现施用除草剂对滩涂和河口生物没有危害[36-38],这种无危害可能是因为低剂量的除草剂主要被植物叶片摄取,只有少量落至沉积物并迅速水解[36]。

底栖动物种群和数量的变化可作为评价除草剂环境影响的重要指标,目前虽有一些这方面的报道[38],但是除草剂对底栖动物毒害机制的研究还很匮乏。高效氟吡甲禾灵和氰氟草酯对螃蟹正常生命活动的影响尚不清楚,草甘膦小区中螃蟹消失可能是由于落入土壤中的草甘膦未能完全被互花米草根部吸收,部分残留在土壤中从而进入螃蟹体内,对螃蟹的肝胰腺造成不可逆损伤进而造成其死亡[39]。本研究发现,施药小区的螃蟹数量显著低于未施药小区,但在施药 11 个月后螃蟹数量基本恢复。另外,施药 11 个月后高浓度高效氟吡甲禾灵小区中沙蚕密度显著高于对照处理,Shimeta 等的研究发现了类似的结果,这可能是因为死亡的互花米草为沙蚕等环节动物带来了丰富的食物[38]。由于潮间带是开放的环境,施药后短期内沉积物和水体中的药剂残留可能对某些底栖动物产生毒害,但当除草剂被潮水冲刷殆尽后,底栖动物种类和密度可很快恢复,某些底栖动物的数量还可能显著增加。因此,从长期来看,喷施除草剂治理互花米草,其负面环境影响可能没有预想的那么大,可以把化学防治作为互花米草防控的一种方法。

3.3　结论

本研究表明: (1) 可有效灭除互花米草的除草剂有高效氟吡甲禾灵、氰氟草酯和草甘膦,且灭草效果依次减弱,就灭草效果而言推荐使用高效氟吡甲禾灵,但必须全面评估除草剂对环境的影响,这需长期跟踪监测施用除草剂对邻近海海域环境和生物的影响。化学方法防治互花米草适宜于小面积或难以抵达的泥泞区域,在治理大面积的互花米草时,应首先考虑对环境影响更小的物理方法。另外除草剂用量的不同会影响灭草效果; (2) 喷施除草剂在短期内对某些大型底栖动物会产生不利影响,但更长时期后底栖动物种群和密度可以有效恢复。因此,在新入侵的或人力难以到达的小面积互花米草分布区,可以使用除草剂控制互花米草,但若使用除草剂进行大面积治理,还需要提前进行更全面的环境影响评估,如监测除草剂在水体和土壤中的降解周期以及除草剂对近海水体中动植物的影响。在未来研究中,针对灭草效果好的除草剂还需要进行深入的研究,探索最佳的用量、用药时间和用药频率,从而在保证良好灭草效果的前提下进一步降低农药用量,在最大程度上减小除草剂对生态环境的不利影响,使化学防治方法在互花米草防治中充分发挥其作用。

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(References):

[1] An S Q, Gu B H, Zhou C F, Wang Z S, Deng Z F, Zhi Y B, Li H L, Chen L, Yu D H, Liu Y H. *Spartina* invasion in China: Implications for

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

invasive species management and future research. Weed Research, 2007, 47(3): 183–191.
[2] 王洁, 顾燕飞, 尤海平. 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, 2017, 36(8): 3152–3156.
[3] 邓自发, 安树青, 智颖飙, 周长芳, 陈琳, 赵聪蛟, 方淑波, 李红丽. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. 生态学报, 2006, 26(8): 2678–2686.
[4] 左平, 刘长安, 赵书河, 王春红, 梁玉波. 米草属植物在中国海岸带的分布现状. 海洋学报, 2009, 31(5): 101–111.
[5] Grevstad F S, Strong D R, Garcia-Rossi D, Switzer R W, Wecker M S. Biological control of *Spartina alterniflora* in Willapa Bay, Washington using the planthopper *Prokelisia marginata*: agent specificity and early results. Biological Control, 2003, 27(1): 32–42.
[6] 李贺鹏, 张利权. 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, 2007, (6): 44–55.
[7] Li B, Liao C H, 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.
[8] 覃盈盈, 梁士楚. 外来种互花米草在广西海岸的入侵现状及防治对策. 湿地科学与管理, 2008, 4(2): 47–50.
[9] 平原, 张利权. 物理措施控制互花米草的长期效果研究. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 32–35.
[10] Chen H, Liao B W, Liu B E, Peng C H, Zhang Y, Guan W, Zhu Q A, Yang G. Eradicating invasive *Spartina alterniflora* with alien *Sonneratia apetala* and its implications for invasion controls. Ecological Engineering, 2014, 73: 367–372.
[11] 谢宝华, 王安东, 赵亚杰, 朱书玉, 宋建彬, 韩广轩, 管博, 张俪文. 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, 2018, 37(2): 417–423.
[12] 林嵩. 外来入侵植物——互花米草的控制措施. 福建农业科技, 2012, (5): 72–76.
[13] 杨东, 万福绪. 外来入侵种互花米草的研究进展. 植物保护, 2014, 40(2): 5–10.
[14] 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.
[15] Patten K. Smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) control with imazapyr. Weed Technology, 2002, 16(4): 826–832.
[16] Major III W W, Grue C E, Grassley J M, Conquest L L. Mechanical and chemical control of smooth cordgrass in Waillapa Bay, Washington. Journal of Aquatic Plant Management, 2003, 41: 6–12.
[17] Knott C A, Webster E P, Nabukalu P. Control of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) seedlings with four herbicides. Journal of Aquatic Plant Management, 2013, 51: 132–135.
[18] 覃盈盈, 蒋潇潇, 李峰, 梁士楚. 互花米草在不同生境中的形态可塑性与生物量分配. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 657–659, 667–667.
[19] 杨俊芳, 马毅, 任广波, 张精英, 樊彦国. 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, 2017, 36(4): 596–602.
[20] 田家怡, 于祥, 申保忠, 李建庆. 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, 2008, 18(3): 87–90.
[21] 田家怡, 申保忠, 李建庆, 于祥, 石东里. 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, 2009, 28(6): 687–690.
[22] 宋德彬, 于君宝, 王光美, 韩广轩, 管博, 栗云召. 1961—2010 年黄河三角洲湿地区年平均气温和年降水量变化特征. 湿地科学, 2016, 14(2): 248–253.
[23] 高佳, 陈学恩, 于华明. 黄河口海域潮汐、潮流、余流、切变锋数值模拟. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(S1): 41–48.
[24] 贾增坡, 王毅, 许良文. 高效氟吡甲禾灵 108 克/升乳油花生田间药效试验. 农药科学与管理, 2010, 31(9): 52–54.
[25] 周国振, 熊忠华, 李娟, 石绪根. 氰氟草酯与双草醚混剂防治稻田禾本科杂草田间药效试验. 生物灾害科学, 2017, 40(1): 1–7.
[26] 朱金文, 李洁, 吴志毅, 王国迪, 周国军, 刘亚光, 朱国念, 陈学新. 有机硅喷雾助剂对草甘膦在空心莲子草上的沉积和生物活性的影响. 农药学学报, 2011, 13(2): 192–196.
[27] 刘庆虎. 长江中下游地区直播稻田杂草种子库及千金子(*Leptochloa chinensis*) 防控技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
[28] 谢勇波, 周清明, 龚道新, 徐兵. 高效液相色谱法测定土壤、烟草和油菜中高效氟吡甲禾灵残留. 农药, 2011, 50(3): 209–212.
[29] Reddy K N. Factors affecting toxicity, absorption, and translocation of glyphosate in redvine (*Brunnichia ovata*). Weed Technology, 2000, 14(3): 457–462.
[30] Tsui M T K, Wang W X, Chu L M. Influence of glyphosate and its formulation (Roundup®) on the toxicity and bioavailability of metals to *Ceriodaphnia dubia*. Environmental Pollution, 2005, 138(1): 59–68.
[31] Mateos-Naranjo E, Cambrollé J, De Lomas J G, Parra R, Redondo-Gómez S. 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.
[32] 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.
[33] 周垂帆, 李莹, 张晓勇, 俞元春. 草甘膦毒性研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1737–1743.
[34] Paveglio F L, Kilbride K M, Grue C E, Simenstad C A, Fresh K L. Use of Rodeo® and X-77® spreader to control smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in a southwestern Washington estuary: 1. Environmental fate. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, 15(6): 961–968.
[35] Kilbride K M, Paveglio F L. 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(2): 179–183.
[36] 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.
[37] 刘建, 杜文琴, 马丽娜, 黄素芳, 刘波. 大米草防除剂——米草净的试验研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 410–411.
[38] Shimeta J, Saint L, Verspaandonk E R, Nugegoda D, Howe S. Long-term ecological consequences of herbicide treatment to control the invasive grass, *Spartina anglica*, in an Australian saltmarsh. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 176: 58–66.
[39] 史建华, 刘智俊, 陆锦天, 李住, 杨茜. 草甘膦对中华绒螯蟹幼蟹的毒性影响. 水产科技情报, 2015, 42(5): 239–242.

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