

杜玮, 何池全, 陈玉丽, 等. 2009 入侵植物互花米草水浸液对莴苣的化感效应[J]. 环境科学学报, 29(4): 869– 875
Du W, He C Q, Chen Y L, et al. 2009. A llelopathic effect of aqueous extracts from invasive smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) on lettuce (*Lactuca sativa*) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(4): 869– 875

入侵植物互花米草水浸液对莴苣的化感效应

杜玮, 何池全*, 陈玉丽, 梁霞, 郭寒青, 雷雁茹, 白胜

上海大学环境与化学工程学院, 上海 200072
收稿日期: 2008-06-02 修回日期: 2008-10-06 录用日期: 2009-02-10

摘要: 选用互花米草根、茎、叶 5 个浓度梯度 (0.065, 0.130, 0.195, 0.260, 0.325 g mL⁻¹) 的水浸液为处理液, 研究其对莴苣种子萌发及幼苗生长的影响。结果表明: 互花米草根水浸液在浓度大于 0.260 g mL⁻¹ 时会显著抑制莴苣种子的萌发, 而茎、叶水浸液产生显著抑制作用的起始浓度分别为 0.130 g mL⁻¹ 和 0.195 g mL⁻¹; 互花米草根、茎、叶水浸液对莴苣种子萌发的抑制, 不仅表现为降低种子的最终萌发率, 还表现为延长种子的平均萌发周期; 茎、叶水浸液对幼苗生长的影响比较显著, 而根水浸液浓度低于 0.195 g mL⁻¹ 时对幼苗胚轴的生长产生促进作用 (敏感指数 R > 0)。不同构件水浸液化感效应强度由大到小依次为: 茎 > 叶 > 根, 并且化感效应强度随水浸液浓度的增加而增强。
关键词: 互花米草; 化感效应; 莴苣; 入侵植物

文章编号: 0253-2468(2009)04-869-07 中图分类号: Q945 文献标识码: A

A llelopathic effect of aqueous extracts from invasive smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) on lettuce (*Lactuca sativa*)

DU Wei, HE Chiquan*, CHEN Yuli, LIANG Xia, GUO Hanqing, LEI Yanru, BAI Sheng
School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072

Received 2 June 2008 received in revised form 6 October 2008 accepted 10 February 2009

Abstract Aqueous extracts of the root, stem and leaf of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora* Loisel), at concentrations of 0.065, 0.130, 0.195, 0.260 and 0.325 g mL⁻¹, were used as treatment solutions to study their allelopathic effects on seed germination and early seedling growth of (*Lactuca sativa* L.). Seed germination was significantly inhibited by the root aqueous extract at concentrations ≥ 0.260 g mL⁻¹; or by stem and leaf extracts at concentrations ≥ 0.130 g mL⁻¹ and ≥ 0.195 g mL⁻¹, respectively. All the aqueous extracts of the root, stem and leaf inhibit seed germination of lettuce, which not only reduced the rate of germination but also prolonged the mean period of ultimate germination. The stem and leaf aqueous extracts had more significant inhibitory effects on seedling growth, while the root aqueous extract actually promoted the growth of the seedling hypocotyl at low concentrations (< 0.195 g mL⁻¹, R > 0). The allelopathic effect of the aqueous extracts is in the sequence of stem > leaf > root. This study suggests that the root, stem and leaf of smooth cordgrass contain water-soluble allelochemicals which can inhibit both seed germination and seedling growth of lettuce. The allelopathic effects are intensified at higher extract concentrations.

Keywords smooth cordgrass (*Spartina alterniflora* Loisel); allelopathy; lettuce (*Lactuca sativa* L.); invasive plant

1 引言 (Introduction)

化感效应是一种由植物活体或残体释放化学物质到外部环境, 对周围相关动植物 (异种或同种个体)、微生物发挥重要 (正面或负面) 作用的现象, 该现象普遍存在于自然和人工生态系统中 (Hierro

et al., 2003; Chon et al., 2005; Kong et al., 2007; Belz et al., 2007)。很多研究表明, 植物体分泌的化学物质是生物竞争的优势因子之一 (Callaway et al., 2000; Chon et al., 2002; Jung et al., 2004; Djurdjevic et al., 2004; Hishashi et al., 2004; Han et al., 2008)。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40771203, 40871243); 上海市科委重大科技攻关项目 (No. 06dz12302); 上海市重点学科 (第三期) 资助 (No. S30109)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40771203, 40871243), the Key Science Research Item of Science and Technology Department of Shanghai (No. 06dz12302) and the Shanghai Leading Academic Disciplines China (No. S30109)
作者简介: 杜玮 (1983-), 男, E-mail: duwei0213@shu.edu.cn * 通讯作者 (责任作者), E-mail: cqhe@shu.edu.cn
Biography: DU Wei (1983-), male, E-mail: duwei0213@shu.edu.cn * **Corresponding author:** E-mail: cqhe@shu.edu.cn
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

互花米草 (*Spartina alterniflora* Loisel) 隶属于禾本科虎尾草族的米草属 (*Spartina* Schreb), 作为沿海滩涂生态工程的材料于 1979 年从美国引入我国。互花米草在促淤固滩、消浪护岸中发挥了积极作用, 20 世纪 90 年代后期还在关注其生态-经济价值 (Qin *et al*, 1997)。但是, 互花米草对于海岸带、河口等广阔淤泥质潮滩高度的生态适应性 (Thompson 1991), 使之在很多国家和地区形成了大面积的爆发 (Callaway *et al*, 1992; Ayres *et al*, 2002), 并对当地的生境系统造成了严重的生态后果, 现已被列入《中国第一批外来入侵物种名单》。在上海, 互花米草对滩涂湿地以及国家级湿地自然保护区的生态危害已经凸现。目前, 互花米草的快速扩散仍在继续 (李贺鹏等, 2006)。其中, 崇明东滩互花米草已经在土著植物海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*) 群落中定居和扩散, 随着互花米草斑块的扩大, 海三棱藨草的密度、盖度和地下球茎数量减少, 从而导致鸟类多样性的降低 (Chen *et al*, 2004), 这与自然保护区设立的初衷不符, 与崇明生态岛的发展目标不一致。

互花米草之所以有这么强的生存竞争优势, 主要是它具有高的遗传分化、较强的耐盐生理特性、强耐淹性和高抗低氧胁迫, 有极高的繁殖系数, 较强的利用氮素的能力, 具有比本地种更强的光能利用力和光合生理响应等 (赵广琦等, 2005; 梁霞等, 2006; 王卿等, 2006; 邓自发等, 2006; 鲍芳等, 2007; Basikh *et al*, 2008)。截至 2003 年, 上海滩涂湿地中的互花米草群落面积已达 4553.37 hm², 几乎已占总湿地面积的 1/4。控制互花米草扩散和修复受损的湿地生态系统是当前首先需要解决的问题。在众多的互花米草防治措施中, 物理防治是目前公认的最为有效、对环境影响最小的方法, 但其成本也是最高的。因此, 在大面积的湿地范围内使用物理手段防治互花米草, 其巨大的投资成本将成为应用技术推广的主要障碍。将湿地生态过程与植物演替机制紧密结合, 利用以自然修复为主, 通过适当人为干扰加速自然修复过程的自然强化修复措施, 为解决上述问题开辟了一个新的途径。

目前, 有关互花米草的化感效应研究较少。本研究中根据采样点崇明东滩的实际情况, 为了模拟雨水冲淋、海水冲刷浸泡等自然释放过程中互花米草的化感效应, 采用新鲜植株作为供体, 并以无菌蒸馏水作为溶剂对植物活体进行溶液浸提 (Saxena

et al, 1996; Belz *et al*, 2007)。鉴于莴苣种子及其幼苗在鉴别水浸液化感效应活性及强度方面的敏感性, 选用莴苣种子作为受体 (Jefferson *et al*, 2003; Hao *et al*, 2007), 以互花米草根、茎、叶水浸液作处理组, 探讨互花米草是否含有水溶性的化感物质以及哪一种构件水浸液的化感作用最强, 该研究将有助于解释互花米草较强的生存优势, 旨在利用人工干预的手段削弱其生存优势, 以此控制外来物种互花米草、恢复本地物种及滩涂湿地生态系统多样性, 为上海地区滩涂资源的保护提供科学依据与工程性示范。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验材料

供体植物互花米草 (*Spartina alterniflora* Loisel) 于 2007 年 8 月底采于上海市崇明东滩鸟类国家级自然保护区 (N 31°31'59.5", E 121°58'24.0"); 受体植物莴苣 (*Lactuca sativa* L.) 种子购于上海白玉兰蔬菜种子有限公司。

2.2 试验方法

2.2.1 水浸液的制备 采集长势良好的互花米草完整植株, 自封袋盛装后放入 4℃ 冷藏箱, 12h 内带回实验室。用蒸馏水将互花米草植株冲洗干净, 分成根、茎、叶 3 个部分, 把各构件剪成 3~5mm 小段, 分别称重 97.5g 加入 300mL 的无菌蒸馏水浸泡, 制取母液。每隔 12h 震荡 10min 48h 后, 用 4 层无菌纱布过滤水浸液以去除植物残体, 以 3000 r min⁻¹ 离心 4h (Chon *et al*, 2002), 再用真空抽滤法抽滤 2 次, 得到浓度为 0.325 g mL⁻¹ 的水浸液母液。

用无菌蒸馏水稀释至母液的 80%、60%、40%、20%, 共得 5 个浓度梯度组成的 3 种构件的处理液。对照组为无菌蒸馏水。

2.2.2 种子萌发的测定 将培养皿、滤纸灭菌, 受试种子经 10% H₂O₂ 溶液表面消毒 10min, 无菌蒸馏水冲洗 3 次 (每次 3min) (Hao *et al*, 2007)。各取 50 粒莴苣种子置于培养皿的滤纸上, 分别加入 3 种供体材料 5 个浓度的水浸液 5mL, 对照组加入 5mL 无菌蒸馏水, 3 次重复。培养皿用保鲜膜包好, 防止水分蒸发和污染 (Jefferson *et al*, 2003), 随机放入 25℃ 培养箱黑暗培养。每隔 24h 观察种子萌发状况, 以连续 5d 不再有新种子发芽作为试验结束的标记。种子萌发的标准是胚根突破种皮 1~2mm (Jefferson *et al*, 2003; Belz *et al*, 2007; Han *et al*, 2008)。

2.2.3 幼苗生长的测定 将茛苣种子置于滤纸上 25℃保湿催芽. 取刚刚露白的幼芽 50粒一组放在培养皿内, 加入上述各浓度水浸液 5mL, 3个重复. 培养温度控制在 25℃(昼)/18℃(夜), 湿度为 80%, 光照 6000lx 条件下培养. 每隔 24h 观察幼苗生长状况. 以加拿大生产的 Regent WinRHIZO 根系分析系统及 EPSON Perfection 3200 扫描仪测定胚根长度. 幼苗生长 8d 后 (Jefferson *et al.*, 2003), 将其放入 80℃烘箱, 48h 后取出称干重.

2.3 数据分析

采用 SPSS 16.0 软件对处理组和对照组的数据差异性进行单因子方差分析 (One-way ANOVA). 计算公式参照 Saxena 等 (1996).

GR= G /50 (1)

RG= \sum_i^i (N_i D_i) (2)

MPUG= \sum_i^i N_i D_i /UG (3)

PI(-) /PS(+) = \frac{UG(AE)}{UG(CK)} - 1 (4)

RI=\begin{cases} 1-C/T, T\geq C \\ T/C-1, T<C \end{cases} (5)

式中, GR 表示种子萌发率, G 表示种子萌发数; UG 表示最终萌发率, 即试验过程中, 最大平均种子萌发率; RG 表示种子萌发速率; MPUG 表示平均萌发周期; D_i 表示天数, N_i 表示第 i 天的发芽数; PI 表示种子萌发抑制率, PS 表示种子萌发促进率, UG

(AE) 表示水浸液处理后的最终萌发率, UG (CK) 表示对照组处理后的最终萌发率; RI 表示互花米草水浸液对茛苣幼苗胚轴、胚根长度的化感效应敏感指数; C 代表对照组生长状况, T 代表处理组生长状况; RI> 0 表示促进作用, RI< 0 表示抑制作用; 萌发率及种子萌发抑制 (-) /促进率 (+) 应换算为百分率的形式.

3 试验结果 (Results)

3.1 水浸液对种子 最终萌发率的影响

对照组最终萌发率为 (98.67±2.31)%. 互花米草各构件不同浓度的水浸液均降低茛苣种子最终萌发率 (表 1). 随着互花米草茎、叶水浸液浓度的增加, 茛苣种子最终萌发率显著减少 (p<0.01), 茎水浸液浓度为 0.065 g·mL⁻¹ 以及叶水浸液浓度为 0.130 g·mL⁻¹、0.065 g·mL⁻¹ 时除外. 在茎水浸液浓度大于 0.260 g·mL⁻¹ 时, 基本上完全抑制了茛苣种子的萌发. 叶水浸液最高浓度为 0.325 g·mL⁻¹ 时对种子萌发的抑制率也为 100%. 根水浸液对种子的最终萌发率的影响较小 (最大抑制率为 16.89%), 且仅仅在较高浓度条件下 (≥0.260 g·mL⁻¹) 才显著影响最终萌发率 (p<0.05). 有趣的是, 根水浸液对种子萌发的影响总体上是抑制的, 但抑制率则呈现单峰现象, 即浓度为 0.195 g·mL⁻¹ 而非最高浓度对种子萌发的抑制率最高.

表 1 互花米草各构件水浸液对茛苣种子萌发参数的影响

Table 1 Effects of the aqueous extracts from various nodules of smooth cordgrass on germination parameters					
互花米草构件 Plant tissues	水浸液浓度 Extract concentration /(g·mL ⁻¹)	最终萌发率 Ultimate germination	种子萌发抑制/促进率 Percentage Inhibition (-) or Promotion (+)	萌发速率 Rate of germination /(seeds d ⁻¹)	平均萌发周期 Mean period of ultimate germination /d
根 Root	0.325	92.67% ±1.15% *	-6.08% ±1.17% **	7.78±0.44 *	3.12±0.19 **
	0.260	90.67% ±3.06% *	-8.11% ±3.10% *	8.89±0.83 *	2.74±0.20 **
	0.195	88.67% ±5.77% (ns)	-10.14% ±5.83% *	10.59±0.50 *	2.32±0.09 *
	0.130	92.67% ±8.08% (ns)	-6.08% ±8.19% (ns)	11.56±1.23 *	2.29±0.10 *
	0.065	94.67% ±1.15% (ns)	-4.06% ±1.17% **	13.27±0.36 *	2.05±0.14 (ns)
茎 Stem	0.325	0% ±0% **	-100% ±0% **	0±0 *	N.A.
	0.260	2.00% ±0% **	-97.97% ±0% **	0.11±0 *	4.50±0 *
	0.195	32.67% ±7.57% **	-66.89% ±7.67% **	1.96±0.40 *	4.15±0.15 **
	0.130	70.00% ±5.29% **	-29.06% ±5.36% **	4.92±0.18 *	3.65±0.07 **
	0.065	90.67% ±1.15% (ns)	-8.11% ±7.12% (ns)	10.07±0.44 *	2.51±0.15 **
叶 Leaf	0.325	0% ±0% **	-100.00% ±0% **	0±0 *	N.A.
	0.260	20.00% ±11.14% **	-79.73% ±11.29% **	1.23±0.67 *	4.07±0.19 **
	0.195	64.67% ±8.08% **	-35.81% ±5.83% **	4.18±0.57 *	3.97±0.09 **
	0.130	84.00% ±17.32% (ns)	-14.87% ±17.53% (ns)	6.46±2.09 *	3.47±0.48 **
	0.065	92.00% ±3.46% (ns)	-6.76% ±3.51% *	10.05±0.72 *	2.63±0.23 **
对照 CK	0	98.67% ±2.31%	0% ±0%	20.30±1.85	1.78±0.19

注: * 表示与对照组显著性差异 p<0.05, ** 表示 p<0.01, ns 表示无差异.

3 2 水浸液对种子萌发速率及平均萌发周期的影响

对照组的种子萌发速率为 (20.30 ± 1.85) seeds d⁻¹, 平均萌发周期为 (1.78 ± 0.19) d 互花米草各构件不同浓度的水浸液均显著降低莠苣种子萌发速率 ($p < 0.01$), 延长种子的平均萌发周期, 根水浸液浓度最小值 0.065 g mL⁻¹ 时除外 (表 1). 虽然根水浸液浓度的增加也延长了种子平均萌发周期, 但延长的幅度并不大, 最高浓度 0.325 g mL⁻¹ 时种子平均萌发周期只延长 1.34d 而茎、叶水浸液在最高浓度下, 对种子平均萌发周期分别延长了 2.72d 和 2.29d

3 3 水浸液对莠苣幼苗胚轴长度、胚根长度、幼苗干重的影响

和对照组相比, 互花米草茎、叶水浸液除了最低浓度之外, 均对莠苣幼苗胚轴长度有显著抑制 ($p < 0.01$ 叶水浸液 0.130 g mL⁻¹ 时 $p < 0.05$), 抑制的程度随浓度的增加而增加 (表 2). 茎、叶水浸液最高浓度 (0.325 g mL⁻¹) 可以完全抑制莠苣幼苗胚轴的生长 ($RI = -1$). 互花米草根的各个浓度水浸液对莠苣幼苗胚轴的生长没有显著抑制, 甚至小于 0.195 g mL⁻¹ 的水浸液能促进胚轴的生长 ($RI \geq$

0.08), 胚轴长度相对于对照组分别增加了 7.5%、17.1% 和 18.3%.

互花米草各构件不同浓度水浸液均对莠苣幼苗胚根的生长有显著抑制作用, 但最低浓度 (0.065 g mL⁻¹) 的茎水浸液有轻微的促进作用 ($RI = 0.01$), 这时胚根的长度为最大值 22.2mm. 茎、叶水浸液在最高浓度条件下完全抑制胚根的生长 ($RI = -1$), 即使最低浓度, 胚根长度相对于对照组而言也分别降低了 25.5% 和 45.4%. 各种浓度的根水浸液对幼苗胚根长度的抑制作用的变化较茎、叶水浸液均匀 ($-0.65 \leq RI \leq -0.44$), 在最高浓度 0.325 g mL⁻¹ 时, 胚根长度仅仅减小 64.8%.

互花米草各构件不同浓度的水浸液对莠苣幼苗干重的影响并不显著. 除了较高浓度的叶水浸液处理莠苣的干重显著降低 ($p < 0.05$) 以外, 茎、根水浸液都只是在最高浓度下才有显著影响 ($p < 0.05$) (表 2). 尽管互花米草根水浸液在浓度小于 0.195 g mL⁻¹ 时对胚轴的生长有促进作用, 由于其对胚根生长的抑制, 导致这部分促进作用并没有表现在莠苣幼苗的干重上, 相对于对照组仍旧至少减少了 1.8%.

表 2 互花米草各构件水浸液对莠苣幼苗生长的影响

Table 2 Effects of the aqueous extracts from various nodules of smooth cordgrass on seedling growth of lettuce

互花米草构件 Plant tissues	水浸液浓度 Extract concentration (/g mL ⁻¹)	胚轴长度 Hypocotyl length (/mm)	胚根长度 Radicle length (/mm)	幼苗干重 Dry weight (/mg seedlings ⁻¹)
根 Root	0.325	17.47 ± 2.72 (ns)	8.93 ± 3.32 [*]	0.94 ± 0.02 [*]
	0.260	19.33 ± 2.50 (ns)	11.33 ± 1.94 [*]	0.95 ± 0.05 (ns)
	0.195	24.73 ± 3.52 (ns)	11.27 ± 4.17 [*]	0.96 ± 0.08 (ns)
	0.130	26.93 ± 2.81 (ns)	13.11 ± 3.25 [*]	1.00 ± 0.04 (ns)
	0.065	27.20 ± 0.60 (ns)	14.33 ± 2.10 [*]	1.01 ± 0.03 (ns)
茎 Stem	0.325	0 ± 0 ^{**}	0 ± 0 ^{**}	N.A.
	0.260	1.01 ± 0 ^{**}	0.21 ± 0 ^{**}	0.83 ± 0.04 ^{**}
	0.195	1.53 ± 0.61 [*]	1.57 ± 2.29 ^{**}	0.88 ± 0.16 (ns)
	0.130	7.87 ± 0.31 [*]	7.80 ± 0.87 ^{**}	0.93 ± 0.06 (ns)
	0.065	23.20 ± 1.73 (ns)	18.93 ± 2.66 (ns)	1.01 ± 0.03 (ns)
叶 Leaf	0.325	0 ± 0 ^{**}	0 ± 0 ^{**}	N.A.
	0.260	2.13 ± 0.23 [*]	0.50 ± 0 ^{**}	0.86 ± 0.06 [*]
	0.195	4.47 ± 0.81 [*]	0.57 ± 0.12 ^{**}	0.92 ± 0.03 [*]
	0.130	11.07 ± 5.51 [*]	6.67 ± 4.89 [*]	0.93 ± 0.01 [*]
	0.065	22.27 ± 4.22 (ns)	13.87 ± 2.20 [*]	0.99 ± 0.03 (ns)
对照 CK	0	23.00 ± 2.99	25.40 ± 6.29	1.03 ± 0.03

注: * 表示与对照组显著性差异 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, ns 表示无差异.

4 讨论 (Discussion)

试验结果表明: 互花米草各构件水浸液在各个

不同浓度条件下均对莠苣种子萌发产生抑制作用, 降低了种子的萌发速率, 延长了种子的萌发周期 (表 1), 并对幼苗生长产生了化感效应 (表 2). 化感

效应的强弱根据植物构件以及水浸液浓度的不同而不同,水浸液化感效应强度由大到小依次为:茎>叶>根,并且化感作用强度随水浸液浓度的增加而增强。这个结论和 Han Chun-Mei等(2008)关于生姜(*Zingiber officinale* Rosc.)化感效应的研究结果相符合。以上结果表明,互花米草植株体可以通过雨淋、海水冲刷等作用,将自身含有的水溶性化感物质释放出来,营造利于自身生长的环境,增强生存优势,这是互花米草入侵机理的一个合理解释。

此外,根、茎水浸液在低浓度条件下(根水浸液浓度小于 0.195 g mL^{-1} ,茎水浸液浓度为 0.065 g mL^{-1}),分别对茭苳幼苗胚轴和胚根有促进作用。李贺鹏等(2007)在互花米草始花期前后(6~9月)采用割除处理方法,明显抑制了互花米草的生长。本研究结果从侧面证明了上述学者的研究结论,割除地上部分会对控制互花米草入侵有积极作用,因为这会减小对周边本地种的化感效应,削弱竞争优势,并对本地植物幼苗的生长产生促进作用。

通过对生态系统演替过程以及自我修复能力的长期监测(Stout et al., 2001),研究者们提出了利用强化的自然修复技术实现生境修复的想法。强化的自然修复技术主要针对受外界环境干扰而导致生境破坏的区域,采用已知的、正在进行的自然过程去恢复生态系统某一功能。它与真正的自然修复差别在于,通过适当的人为干扰,强化某种自然过程,使生境向着有利于生境恢复的方向加速发展,从而在预期的时间段内实现生态系统的自我修复。按照群落与生态系统次生演替理论,退化生态系统在足够的时间条件下都有自我愈合创伤的能力,只要消除生态胁迫,它们都能恢复到原来的状态(Mitsch 1995 Mitsch et al., 1998)。本研究中对互花米草入侵地区本地植物的保护以及生态系统的恢复提供了一个新的思路——割除互花米草地上部分的同时,加强本地植物根系生长的培育,创造有利于生态系统恢复的生态条件,以加快生态恢复进程。由于互花米草已经引入我国多年,且根系异常发达,通常密布于30cm以下的土层内,有时甚至可深至150cm,因此,将互花米草完全根除是不可能的,唯一可行的办法是采取生态工程的方法控制互花米草,使其群落规模处于一个较低的水平(Wang et al., 2008)。割除其地上部分可以显著降低其化感效应,有效减轻对本地植物的竞争,然后再将根系生长状况良好的本地植物幼苗引种到入侵地区,也

可提高幼苗的存活率。这项技术所体现出的易于操作和无需长期维护的优势,更加有利于滩涂湿地互花米草防治措施的大面积推广与应用,从而为上海市湿地保护与经济建设的协调发展做出贡献。

但由于本研究选择的受体为茭苳种子及其幼苗,相对于崇明东滩本地种植物海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)和芦苇(*Phragmites australis*)来说,它们的有性繁殖器官(种子)和无性克隆植株幼苗能否对互花米草各构件水浸液产生响应还有待于进一步的研究。Rudrappa等(2007)的研究表明,芦苇在北美作为入侵物种已经成为沼泽湿地的优势物种,其根系分泌物中的有效成分没食子酸(Gallic acid)对互花米草有抑制作用。张茜等(2007)的研究也表明,芦苇释放的化感物质可以抑制互花米草种子的萌发、幼苗生长以及共生菌的生长。但是,通过我们的观察,在崇明东滩芦苇对于互花米草并没有表现出抑制作用,而Wang等(2008)通过改变地质、水文条件才使得芦苇成功取代互花米草,这其中的原因也值得探讨。

对于互花米草水浸液中的化感效应活性物质的鉴别与提取也需要更深入的工作去完成。黄益宗等(1999)的研究表明,化感物质对土壤 N_2O 释放有明显的抑制,并能缓解土壤中 NH_4^+ 向 NO_3^- 氧化。因此,互花米草化感物质对入侵地区土壤营养元素的影响也可以作为其竞争优势进行探讨。

5 结论 (Conclusions)

1) 互花米草根水浸液的浓度大于 0.260 g mL^{-1} 时可显著抑制茭苳种子的萌发,而茎、叶水浸液产生显著抑制作用的起始浓度分别为 0.130 g mL^{-1} 和 0.195 g mL^{-1} 。

2) 互花米草茎、叶水浸液在对茭苳幼苗生长的化感效应方面表现更强。茎、叶水浸液在浓度大于 0.130 g mL^{-1} 时对幼苗生长的抑制作用显著。而根水浸液的抑制作用相对较弱,在低浓度条件下($<0.195\text{ g mL}^{-1}$)甚至对幼苗胚轴的生长有促进作用。

3) 互花米草根、茎、叶水浸液对幼苗生长的影响主要表现为对胚根生长的显著抑制,但这种抑制作用并没有反映在茭苳幼苗的干重上。

4) 互花米草各构件(主要是茎和叶)水浸液中均含有水溶性化感物质,化感效应强度由大到小依次为:茎>叶>根,各构件水浸液的化感效应强度

随着水浸液浓度的增加而增强。

责任作者简介: 何池全 (1968—), 男, 上海大学环境与化学工程学院教授, 主要从事污染环境生物修复、湿地生态过程、外来种的化感效应、水体的生态修复以及人工湿地等方面的研究工作。E-mail: cqhe@shu.edu.cn

参考文献 (References):

- Ayres D R, Strong D R. 2002. The *Spartina* invasion of San Francisco Bay [J]. *Aquatic Nuisance Species Digest* 4: 38—40
- Baisakh N, Subudhi P K, Varadwaj P. 2008. Primary responses to salt stress in a halophyte smooth cordgrass (*Spartina alterniflora* Loisel.) [J]. *Functional Integrative Genomics* 8(3): 287—300
- 鲍芳, 石福臣. 2007. 互花米草与芦苇耐盐生理特征的比较分析 [J]. *植物研究*, 27(4): 421—427
- Bao F, Shi F C. 2007. Comparative study on physiological characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and indigenous plant *Phragmites communis* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 27(4): 421—427 (in Chinese)
- Belz R G, Reinhardt C F, Foxcroft L C, et al. 2007. Residue allelopathy in *Parthenium hysterophorus* L. — Does parthenin play a leading role? [J]. *Crop Protection*, 26(3): 237—245
- Callaway J C, Josselyn M N. 1992. The introduction and spread of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in south San Francisco Bay [J]. *Estuaries* 15: 218—226
- Callaway R M, Aschehoug E T. 2000. Invasive plants versus their new and old neighbors: A mechanism for exotic invasion [J]. *Science*, 290(5491): 521—523
- Chen Z Y, Li B, Zhong Y, et al. 2004. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus mariqueter* at Dongtan of Chongming Island, the Yangtze River estuary and their potential ecological consequences [J]. *Hydrobiologia* 528(1-3): 99—106
- Chon S U, Choi S K, Jung S, et al. 2002. Effects of alfalfa leaf extracts and phenolic allelochemicals on early seedling growth and root morphology of alfalfa and banyard grass [J]. *Crop Protection*, 21(10): 1077—1082
- Chon S U, Jang H G, Kim D K, et al. 2005. Allelopathic potential in lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants [J]. *Scientia Horticulturae* 106(3): 309—317
- 邓自发, 安树青, 智颖颀, 等. 2006. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制 [J]. *生态学报*, 26(8): 2678—2686
- Deng Z F, An S Q, Zhi Y B, et al. 2006. Preliminary studies on invasive model and outbreak mechanism of exotic species *Spartina alterniflora* Loisel. [J]. *Acta Ecologica Sinica* 26(8): 2678—2686 (in Chinese)
- Djordjevic L, Dinic A, Pavlovic P, et al. 2004. Allelopathic potential of *Allium ursinum* L. [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 32(6): 533—544
- Han C M, Pan K W, Wu N, et al. 2008. Allelopathic effect of ginger on seed germination and seedling growth of soybean and chive [J]. *Scientia Horticulturae*, 116(3): 330—336
- Hao Z P, Wang Q, Christie P, et al. 2007. Allelopathic potential of watermelon tissues and root exudates [J]. *Scientia Horticulturae* 112(3): 315—320
- Hierro J L, Callaway R M. 2003. Allelopathy and exotic plant invasion [J]. *Plant and Soil* 256(1): 29—39
- Hisashi K N, Yukioshi T. 2004. Allelopathic potential of *Citrus junos* fruit waste from food processing industry [J]. *Bioresour. Technology*, 94(2): 211—214
- 黄益宗, 张福珠, 刘淑琴, 等. 1999. 化感物质对土壤 N_2O 释放影响的研究 [J]. *环境科学学报*, 19(5): 478—482
- Huang Y Z, Zhang F Z, Liu S Q, et al. 1999. Effect of allelochemicals on N_2O emission from soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 19(5): 478—482 (in Chinese)
- Jefferson L V, Pennacchio M. 2003. Allelopathic effects of foliage extracts from four *Chenopodiaceae* species on seed germination [J]. *Journal of Arid Environments* 55(2): 275—285
- Jung W S, Kim K H, Ahn J K, et al. 2004. Allelopathic potential of rice (*Oryza sativa* L.) residues against *Echinochloa crus-galli* [J]. *Crop Protection*, 23(3): 211—218
- Kong C H, Wang P, Xu X H. 2007. Allelopathic interference of *Ambrosia trifida* with wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment* 119(3-4): 416—420
- 李贺鹏, 张利权, 王东辉. 2006. 上海地区外来种互花米草分布现状研究 [J]. *生物多样性*, 14(2): 114—120
- Li H P, Zhang L Q, Wang D H. 2006. Distribution of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai [J]. *Biodiversity Science*, 14(2): 114—120 (in Chinese)
- 李贺鹏, 张利权. 2007. 外来植物互花米草的物理控制实验研究 [J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, (6): 44—55
- Li H P, Zhang L Q. 2007. Experimental Study on Physical Controls of an Exotic Plant *Spartina alterniflora* in Shanghai [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (6): 44—55 (in Chinese)
- 梁霞, 张利权, 赵广琦. 2006. 芦苇与外来植物互花米草在不同 CO_2 浓度下的光合特性比较 [J]. *生态学报*, 26(3): 842—848
- Liang X, Zhang L Q, Zhao G Q. 2006. A comparison of photosynthetic characteristics between *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* under different CO_2 concentrations [J]. *Acta Ecologica Sinica* 26(3): 842—848 (in Chinese)
- Mitch W J, Wu X Y, Naim R W. 1998. Creating and restoring wetlands [J]. *Bio Science*, 48(12): 1019—1030
- Mitch W J. 1995. Restoration of our lake and rivers with wetlands — an important application of ecological engineering [J]. *Water Science and Technology* 31: 167—177
- Qin P, Xie M, Jiang Y S, et al. 1997. Estimation of the ecological-economic benefits of two *Spartina alterniflora* plantations in North Jiangsu, China [J]. *Ecological Engineering* 8(1): 5—17
- Rudrappa T, Bonsall J, Gallagher J L, et al. 2007. Root-secreted allelochemical in the noxious weed *Phragmites Australis* deploys a reactive oxygen species response and microtubule assembly disruption to execute rhizotoxicity [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 33: 1898—1918

Saxena A, Singh D V, Joshi N L. 1996 Autotoxic effects of pearl millet aqueous extracts on seed germination and seedling growth [J]. Journal of Arid Environments 33 (2): 255—260

Stout S A, Magar V S, Uhler R M, *et al*. 2001. Characterization of Naturally-occurring and Anthropogenic PAH s in Urban Sediments-Wycoff/Eagle Harbor Superfund Site[J]. Environmental Forensics 2 (4): 287—300

Thompson J D. 1991 The biology of an invasive plant what makes *Spartina anglica* so successful [J]. Bioscience 41 393—400

Wang G, Qin P, Wan S W, *et al*. 2008 Ecological control and integral utilization of *Spartina alterniflora* [J]. Ecological Engineering 32 (3): 249—255

王卿, 安树青, 马志军, 等. 2006 入侵植物互花米草——生物学、生态学及管理 [J]. 植物分类学报, 44 (5): 559—588

Wang Q, An S Q, Ma Z J *et al*. 2006 Invasive *Spartina alterniflora* biology, ecology and management [J]. Acta Phytotaxonomica Sinica 44 (5): 559—588 (in Chinese)

张茜, 赵福庚, 钦佩. 2007 苏北盐沼芦苇替代互花米草的化感效应初步研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 43 (2): 119—126

Zhang Q, Zhao F G, Qin P. 2007 Allelopathy in the progress of *Phragmites* substituting *Spartina* from saltmarsh in Northern Jiangsu [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 43 (2): 119—126 (in Chinese)

赵广琦, 张利权, 梁霞. 2005 芦苇与入侵植物互花米草的光合特性比较 [J]. 生态学报, 25 (7): 1604—1611

Zhao G Q, Zhang L Q, Liang X. 2005 A comparison of photosynthetic characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and an indigenous plant *Phragmites australis* [J]. Acta Ecologica Sinica 25 (7): 1604—1611 (in Chinese)