

不同作物种苗对水中重金属镉去除的比较研究

王燕燕^{1,2}, 徐镜波^{1,2}, 盛连喜^{1,2*}

(1. 东北师范大学湿地生态与植被恢复重点实验室, 长春 130024; 2. 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024)

摘要:以玉米、向日葵和蓖麻为实验材料, 研究了 3 种作物种苗对镉的去除效果以及种苗生理生化指标的变化情况. 结果表明, ①随着处理时间的延长, 溶液中镉含量逐渐降低, 去除过程主要集中在前 48 h. 在 1 mg·L⁻¹ 和 2 mg·L⁻¹ Cd 溶液中, 向日葵和蓖麻种苗的去除效果要好于玉米种苗的; 而在 5 mg·L⁻¹ 和 10 mg·L⁻¹ Cd 溶液中, 去除效果顺序为: 蓖麻 > 玉米 > 向日葵. ②种苗从溶液中吸收的镉绝大部分集中在根部. 3 种作物种苗对镉的富集能力大小顺序为: 向日葵 > 蓖麻 > 玉米. ③在不同镉处理浓度下, 3 种作物种苗的叶片质膜透性、根系活力、叶绿素含量和游离脯氨酸含量等生理生化指标均有不同程度的变化. 向日葵的根系活力和脯氨酸含量均与镉积累量呈现显著相关性; 蓖麻叶片的质膜透性和脯氨酸含量均与镉含量呈现显著正相关. 3 种作物种苗对镉都有一定的耐受性, 而向日葵和蓖麻种苗的耐受性比玉米种苗的强.

关键词: 镉; 去除; 积累; 生理生化指标

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)05-0987-06

Comparative Research on Cd Removal from Water by Different Kinds of Seedlings

WANG Yan-yan^{1,2}, XU Jing-bo^{1,2}, SHENG Lian-xi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Ecological effects of Cd removal from water and the changes of physiological and biochemical indexes of seedlings of maize, sunflower and castor-oil plant were investigated. The results showed that ① with the trial time lasting, Cd content in solution decreased, and the processes of Cd removal by seedlings of each concentration were almost completed in 48 hours. The removal effects of sunflower and castor-oil plant were better than those of maize at 1 mg·L⁻¹ and 2 mg·L⁻¹ Cd, whereas the best removal effects at 5 mg·L⁻¹ and 10 mg·L⁻¹ Cd were those of castor-oil plant, followed by maize and sunflower. ② Root absorbed the most proportion of Cd by all these three kinds of seedlings at every treatment. The ability of Cd accumulation by the three kinds of seedlings could be drawn as follow sunflower > castor-oil plant > maize. ③ The physiological and biochemical indexes of seedlings exposed to Cd for 72 hours had changed to different degree compared with control. The root activity and the proline content of sunflower both have significant relations with Cd accumulation, and the plasma membrane permeability and the proline content of castor-oil plant both have significant positive relations with Cd accumulation. Maize, sunflower and castor-oil plant could endure certain concentration of Cd, and the tolerance of sunflower and castor-oil plant are both greater than that of maize through general analysis of Cd accumulation and the changes of physiological and biochemical indexes.

Key words: Cd; removal; accumulation; physiological and biochemical indexes

植物修复(phytoremediation)是以植物忍耐和超量积累某种或某些污染物的理论为基础, 利用植物及其共存微生物体系清除环境中污染物的一门环境污染治理技术^[1], 被誉为廉价的“绿色修复技术”, 被美国环境保护署作为污染物原位修复的优先推荐方法之一^[2], 正在全球应用和发展.

目前, 对重金属植物修复的研究多应用于土壤, 已证实的 Cd 超富集植物有十字花科天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)和宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)^[3]. 适合于水体中污染物植物修复的技术主要是根际过滤(rhizofiltration)^[4,5], 此方面的研究多集中在凤眼莲、芦苇和香蒲等高等水生植物. 但陆生植物以其生物量大, 根系生长快, 成为当今根际过滤常选用的对象. Kumar 等^[4]曾研究了印地安芥(*Brassica juncea*)根部对水体中镉的积累效果明显优

于对土壤中的积累效果; Salt 等^[6]注意到利用普通作物对镉的快速过滤作用; 金国贤等^[7]研究了萝卜(*Raphanus sativus*)的块状根系对水中镉的富集作用; 渠荣遯等^[8~11]开展了种苗对水中重金属污染修复效果对比的一系列研究.

本实验选取玉米(*Zea mays*)、向日葵(*Helianthus annuus*)和蓖麻(*Ricinus communis*)3 种常见陆生植物为研究对象, 不仅比较了作物种苗对水中不同浓度镉的去除效果, 而且测定了种苗自身生理生化指标的变化, 探讨了 3 种作物种苗对镉的积累性与耐受

收稿日期: 2006-07-16; 修订日期: 2006-11-06
基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418505); 国家自然科学基金项目(30370262)
作者简介: 王燕燕(1981~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境化学, E-mail: wangyy772@163.com
* 通讯联系人, E-mail: shenglx@nenu.edu.cn

性,旨在为陆生植物在水体污染植物修复中的应用提供一些依据.

1 材料与方法

玉米、向日葵、蓖麻种子由吉林长岭种子公司提供.将种子播入酸洗细纱中,用去离子水浸湿,待种子发芽后每 2~3 d 用 Hoagland 全营养液浇灌 1 次.培养温度为 18~24℃,自然光照 8 h·d⁻¹.发芽后 8~14 d 将种苗取出,用去离子水冲洗干净.

用去离子水将氯化镉(CdCl₂·2.5H₂O,分析纯)配制成镉浓度(以纯镉计)为 1 mg·L⁻¹、2 mg·L⁻¹、5 mg·L⁻¹和 10 mg·L⁻¹的培养液.以不加镉的溶液为对照.各取 100 mL Cd 培养液,将种苗根部浸入其中.玉米种苗每组重 19.0 g±0.2 g,向日葵种苗为 14.5 g±0.2 g,蓖麻种苗为 23.4 g±0.2 g.

实验开始后 8、24、48 和 72h 分别用移液管各取 1 mL 样品溶液,检测其中的 Cd 含量.实验进行 72 h 后将种苗取出,并用去离子水冲洗 3 次,分成 2 份,1 份用于种苗生理生化指标的测定,另 1 份将根、茎、叶分开,剪成 1 cm 长的小段,放入 80℃烘箱中烘干 48 h,经 HCl-HClO₄ 消化法处理后定容,分别测定单位干重的根、茎、叶中 Cd 的含量.Cd 含量的测定均

使用原子吸收光谱仪(SpectrAA220FS,美国 Varian 公司),测定波长为 228.8 nm,灯电流为 6.0 mA,狭缝 0.5 nm,燃料气为乙炔,助燃气为空气,燃助比为 1.60/13.50.

种苗生理生化指标的测定方法^[12]:叶片质膜透性的测定采用电导法,根系活力的测定采用 TTC 还原法,叶绿素和游离脯氨酸含量的测定均采用分光光度法.

2 结果与分析

2.1 种苗去除水中镉的效果对比

3 种作物种苗对镉的去除实验结果表明,随着时间的延长,溶液中 Cd 浓度逐渐降低(图 1),去除效率逐渐降低,在 48 h 后基本趋于稳定.3 种种苗在各个时间段内的去除率均以蓖麻的为最高,除 2 mg·L⁻¹外,其余 3 个浓度 8 h 镉去除率可达到 80%左右.玉米、向日葵、蓖麻对 1 mg·L⁻¹镉溶液 72 h 的去除率分别为 84.20%、94.50%和 95.90%,显示出良好的去除效果.

从 3 种作物种苗 72 h 的去除率来看,对于较低浓度的 Cd 溶液(1 mg·L⁻¹和 2 mg·L⁻¹),向日葵和蓖麻种苗的去除效果要好于玉米种苗的;而对于较高

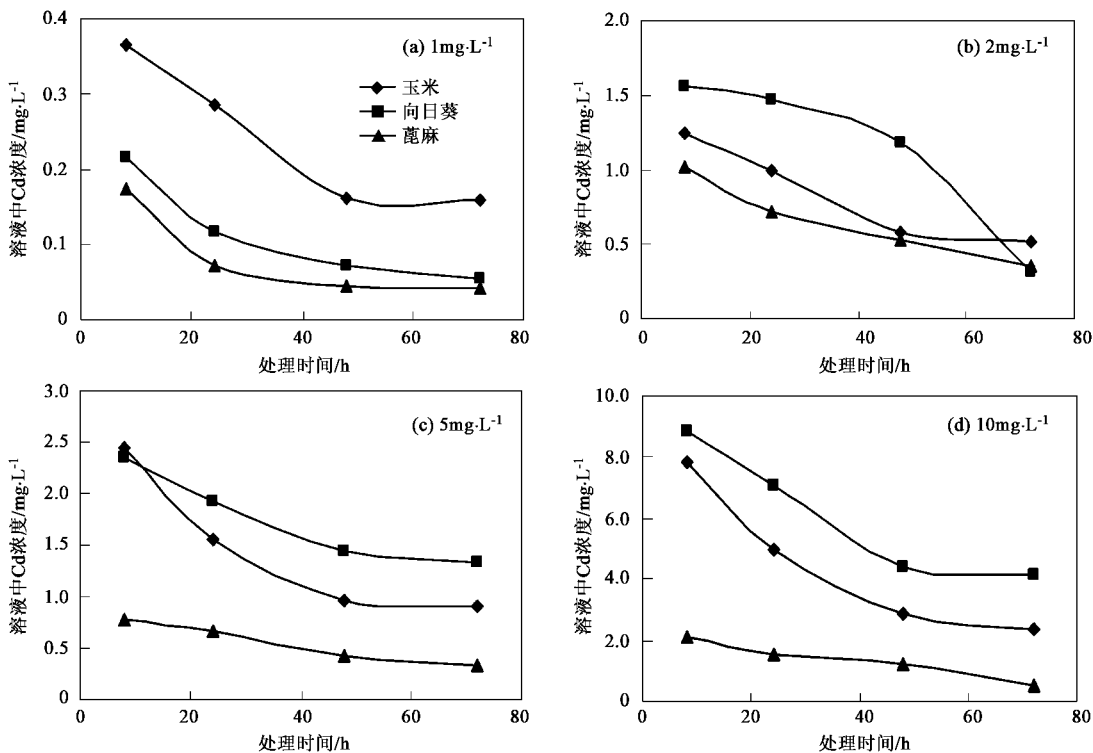


图 1 3 种作物种苗 72 h 内对不同镉浓度溶液的去除效果
Fig.1 Removal of Cd by seedlings at different Cd initial concentrations

浓度的 Cd 溶液(5 mg•L⁻¹和 10 mg•L⁻¹),蓖麻种苗的去除效果最好,其次是玉米,再次是向日葵.这可能是因为蓖麻种苗的总质量较大,而且根部作为吸收镉的主要部位所占比例也大的缘故.此外,也显示出一定质量的向日葵种苗对镉的去除量是有一定限度的.因此,向日葵更适用于水体低浓度镉的去除.

2.2 镉在种苗各器官中的积累

从图 2 的测定数据中可以看出,玉米、蓖麻和向日葵 3 种种苗各器官对镉的吸收以根为最多,占总吸收量的 80% 以上,其次是茎,叶中最少.同一作物根部吸收量所占比例与培养液中镉的浓度呈负相关.在镉浓度较低时,如 1 mg•L⁻¹时,镉的吸收基本都位于根部,叶中镉含量极低,以根滤作用为主,而且此时镉的去除率也很高,均在 80% 以上.

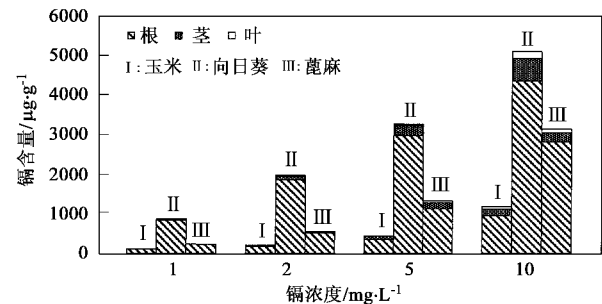


图 2 不同镉浓度处理下 3 种作物种苗各器官中 Cd 的积累
Fig.2 Accumulation of Cd in tissues of seedlings at different Cd initial concentrations

随着培养液中镉浓度的增大,种苗根、茎和叶中单位质量的镉吸收量也增大.3 种作物种苗在各个浓度镉培养液中单位干重的镉含量均以向日葵种苗的为最大,分别可以达到 876.10 μg•g⁻¹ (1 mg•L⁻¹ Cd)、1 949.59 μg•g⁻¹ (2 mg•L⁻¹ Cd)、3 263.25 μg•g⁻¹ (5 mg•L⁻¹ Cd) 和 5 095.98 μg•g⁻¹ (10 mg•L⁻¹ Cd),其次是蓖麻种苗,玉米种苗的最小;向日葵种苗根、茎、叶中的积累量均高于蓖麻和玉米种苗的相应值.

植物对某种元素的富集能力还可以用生物富集系数来比较,即某种元素在生物体内的浓度与水体中浓度之比^[13].不同镉浓度下,玉米、向日葵和蓖麻 3 种作物种苗根部生物富集系数列于表 1 中.可以看出,它们对镉的富集能力为:向日葵>蓖麻>玉米.比较同一作物种苗在不同 Cd 浓度下的生物富集系数发现,玉米和蓖麻在各个浓度下的富集能力相当,而向日葵种苗在 1 mg•L⁻¹和 2 mg•L⁻¹镉溶液中的富集能力明显高于 5 mg•L⁻¹和 10 mg•L⁻¹时的富集能力.这与 2.1 节所得出的结果相一致.

表 1 不同镉浓度下 3 种作物种苗根部生物富集系数 ¹⁾				
种苗名称	镉浓度/mg•L ⁻¹			
	1	2	5	10
玉米	121.39	88.01	70.54	93.89 *
向日葵	834.55	927.38 * *	595.72 *	436.22
蓖麻	228.56	257.68	227.07	281.44 *

1) * 表示 $p < 0.05$, * * 表示 $p < 0.01$

2.3 镉对种苗生理生化指标的影响

2.3.1 镉对叶片质膜透性的影响

3 种作物种苗在不同镉浓度下,处理 72 h 后叶片的相对电导率如图 3 所示.结果表明,玉米种苗叶片的相对电导率随着 Cd 处理浓度的增加而增大.向日葵和蓖麻种苗的相对电导率都比对照值有所增加.玉米在 2、5 和 10 mg•L⁻¹ Cd 溶液中的相对电导率分别比相应对照值增加了 74.42%、113.52% 和 133.93%; 10 mg•L⁻¹ 浓度下的结果与对照呈极显著性差异($n = 3, p < 0.01$).叶片细胞受到严重破坏,而此时玉米种苗的去除率在 3 种种苗中也是最低的.

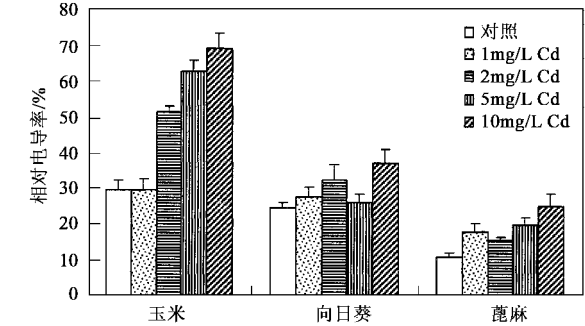


图 3 镉对 3 种作物种苗叶片质膜透性的影响
Fig.3 Effect of Cd on plasma membrane permeability of seedling leaves

2.3.2 镉对根系活力的影响

图 4 为 3 种作物种苗在不同镉浓度下处理 72 h 后根系活力的结果.玉米种苗在 1 mg•L⁻¹和 2 mg•L⁻¹培养液中的根系活力与相应对照值相比变化不大,在 5 mg•L⁻¹和 10 mg•L⁻¹培养液中分别比相应对照值降低了 27.77% 和 16.29%.向日葵根系受重金属镉抑制的情况较为明显,而且随着镉离子胁迫浓度的增加根系活力降低,在 10 mg•L⁻¹培养液中根系活力比对照值降低了 46.04%,与对照呈极显著性差异($n = 3, p < 0.01$),而此时的 Cd 去除率也非常低,仅为 58.56%.蓖麻根系发达,根系活力受镉的影响程度不大,而对 Cd 的去除效果也是最好的.

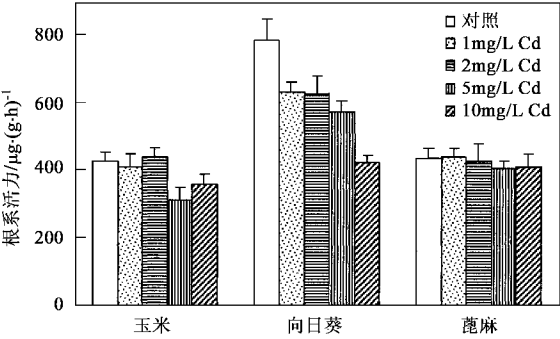


图 4 镉对 3 种作物种苗根系活力的影响

Fig.4 Effect of Cd on root activity of three kinds of seedlings

2.3.3 镉对叶片叶绿素含量的影响

图 5 显示了 3 种种苗在不同镉浓度下,处理 72 h 后叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素的含量的变化,它们均受到 Cd 不同程度的影响,整体呈下降趋势,但叶绿素含量与培养液中镉浓度之间的相关趋势并不明显.玉米和蓖麻在不同浓度下叶绿素 a/b 的值和相应对照相比变化不大(表 2),说明叶绿素 a 和叶绿素 b 对 Cd 的敏感性相近,相比之下,叶绿素 a 比叶绿素 b 稍敏感,这可能是镉对光反应作用中心——叶绿素 a 的光反应过程中铁氧还蛋白的影响很大^[14].向日葵叶绿素 b 含量与对照相比下降很多,使叶绿素 a/b 的值变化很大.在 1、5 和 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理下向日葵叶绿素 a 和叶绿素 b 总量受到抑制,与相应对照值呈显著性差异 ($n = 3$, $p < 0.05$).

表 2 3 种作物种苗叶片叶绿素 a/b 数值的变化

Table 2 Changes of chlorophyll a/b in three kinds of seedlings				
Cd/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	玉米	向日葵	蓖麻	
0	2.93	1.99	2.82	
1	2.74	2.95	2.68	
2	2.66	2.48	3.23	
5	3.25	2.79	3.14	
10	2.77	3.05	3.17	

2.3.4 镉对叶片游离脯氨酸含量的影响

图 6 为 3 种作物种苗在不同镉浓度下,处理 72 h 后叶片游离脯氨酸含量的结果.在 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下,种苗游离脯氨酸含量与相应对照值相比变化不大,而且 3 种种苗的变化趋势并不一致.在 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下,玉米叶片游离脯氨酸含量分别比相应对照值增加了 19.64% 和 23.60%;向日葵分别增加了 43.10% 和 48.54%,均与相应对照值呈显著性差异 ($n = 3$, $p < 0.05$);蓖麻分别增加了 27.29% 和 36.61%.

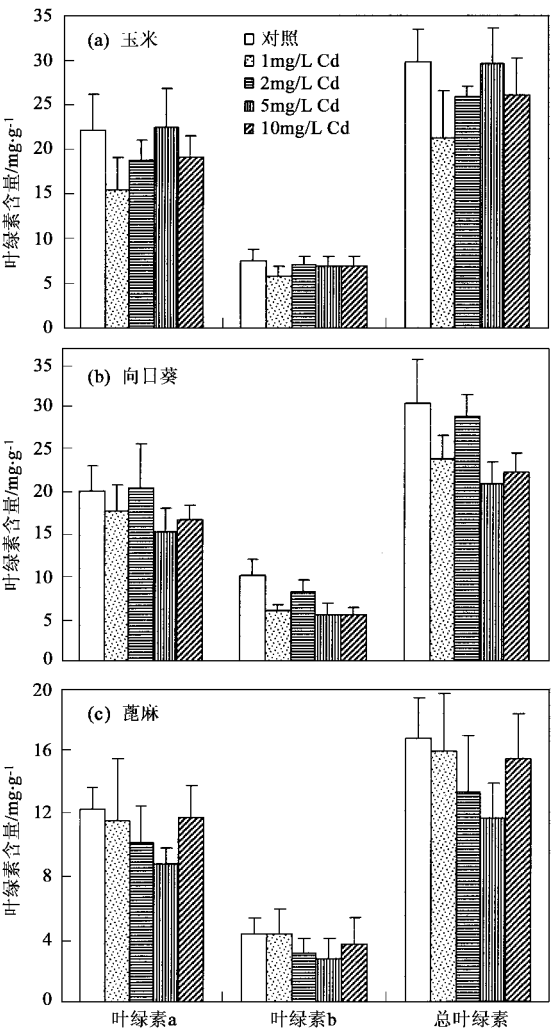


图 5 镉对 3 种作物种苗叶片叶绿素含量的影响

Fig.5 Effect of Cd on chlorophyll content of leaves in three kinds of seedlings

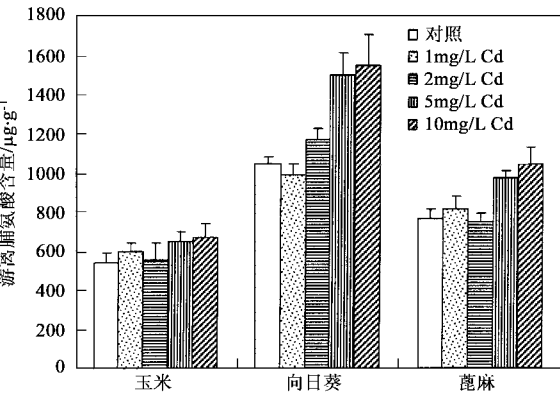


图 6 镉对 3 种作物种苗叶片游离脯氨酸含量的影响

Fig.6 Effect of Cd on free proline content in leaves of three kinds

2.4 种苗对镉的积累性与耐受性的相关分析

表 3 显示了种苗对镉的积累性与生理生化指标

的相关关系.可以看出,叶片质膜透性和脯氨酸含量均与种苗体内的镉积累量呈正相关,根系活力与种苗体内镉积累量呈负相关.其中,向日葵的根系活力和脯氨酸含量均与镉积累量呈现显著相关性($p < 0.05$),相关系数分别为 $-0.956\ 8$ 和 $0.936\ 5$;蓖麻叶片的质膜透性和脯氨酸含量均与镉含量呈现显著正相关($p < 0.05$),相关系数分别为 $0.899\ 1$ 和 $0.907\ 8$.

通过以上相关分析可以推断,脯氨酸含量可以作为镉在植物体内积累以及植物受到镉胁迫的一种监测指标.

表 3 镉积累量与生理生化指标的相关性¹⁾

生理生化指标	单位质量种苗镉的积累量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		
	玉米	向日葵	蓖麻
质膜透性/%	0.830 8	0.738 5	0.899 1*
根系活力/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	-0.560 1	-0.956 8*	-0.805 7
叶绿素 a/b	-0.031 0	0.697 9	0.589 9
脯氨酸含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.836 9	0.936 5*	0.907 8*

1) * 表示 $p < 0.05$

3 讨论

镉胁迫下幼苗保护酶活性的变化是引起膜透性改变的主要原因之一^[15].玉米、向日葵和蓖麻种苗叶片质膜透性的增加显示出叶片细胞受到了伤害.根系活力泛指根系的吸收、合成、氧化和还原能力等^[16],种苗根系活力的降低则反映了镉对整个根系的代谢状况和植物本身生理情况的影响.Cd 的积累也会抑制叶绿素酸酯还原酶和影响氨基 α 戊酮酸的合成^[17],从而影响叶绿素的生物合成,同时使叶绿素膜系统在结构上逐渐受到破坏,光合速率降低.脯氨酸是植物重要的渗透调节物质,它的积累既是细胞结构和功能遭受伤害的反映,又是植物在逆境下的适应表现,即防御保护^[18].玉米、蓖麻和向日葵种苗在较低浓度镉处理时游离脯氨酸含量受影响程度不大,而在较高浓度镉处理时游离脯氨酸含量的升高正是其抵抗镉胁迫的一种生理生化反应,降低水势,维持植株内的水分平衡,保持植物正常生长.

受植物的生态学特性、遗传性特性等因素决定,不同种类植物对金属污染的忍耐性不同^[19].在一般情况下,作物吸收 Cd 量及自根部向地上部的转运比率是决定其耐受性的重要机制^[20].杨居荣等^[21]实验发现,作物的耐性与体内 Cd 的平均吸收量无显著相关,而与地上部吸收量所占比例呈显著负相关.本实

验结果显示,根是玉米、向日葵和蓖麻种苗吸收 Cd 的主要器官,大量的 Cd 分布在根部,向茎和叶的转移量非常小.因此,可以说它们对 Cd 的耐受性都是很强的.这在很多研究中都得到了证实^[8~11,14].而向日葵和蓖麻种苗根部单位干重 Cd 含量占总积累量的比率均比玉米种苗的高,即向茎叶部分的转运比率低;而且向日葵和蓖麻种苗脯氨酸含量明显升高,显示出对镉胁迫有较强的抵抗能力.此外,在实验过程中发现,经过 Cd 处理的玉米种苗在形态上也出现了叶片发黄、萎蔫等轻微受害症状,可能与叶片细胞膜受损严重有关.所以说,向日葵和蓖麻种苗对 Cd 的耐受性较玉米种苗的强.Salt 等^[6]的根过滤实验也证实了向日葵对镉的强耐受性.

玉米、向日葵和蓖麻种苗体内积累的 Cd 含量与培养液中的 Cd 含量呈正相关,对镉的积累主要集中在早期的一段时间内.将种苗在 Cd 培养液中处理一段时间后进行测定,发现不同镉浓度下种苗的生理生化指标有了不同程度的变化.有大量研究证实,Cd 等重金属对机体的毒害是随着其在机体内的积累逐步呈现出来的,受到浓度和时间双重因子的制约^[14,15,18].段昌群等^[22]认为小剂量、短时间的重金属处理,可以提高或加速植物的某些生理生化反应,而大剂量、长时间的重金属作用,则对植物表现出强烈的毒性.本实验中,3 种作物种苗在生长过程中对镉就有这样的效应.种苗在 72 h 时生理生化指标变化体现出的受毒害作用与溶液 Cd 去除量在第 3 d 无明显增加相一致;而在早期的 Cd 胁迫下,种苗对 Cd 的积累并未受到严重影响.从不同处理浓度下种苗的生理生化指标变化来看,Cd 浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,镉对种苗的毒害作用较其它浓度的更为明显.

4 结论

玉米、向日葵和蓖麻种苗能通过根际过滤作用快速、有效地去除水中重金属镉,并通过积累游离脯氨酸等生理生化机制的调节减轻 Cd 的毒害,在短期内对镉有很强的耐受性.本研究可以初步证实,种苗在积累镉的同时产生了相应的防御机制.陆生植物以其发达的根系在水体重金属污染植物修复中具有良好的应用前景.

参考文献:

[1] 唐世荣, Wilke B M. 植物修复技术与农业生物环境工程[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 21~26.
[2] 于晓章. 环境污染治理领域中的植物修复技术[J]. 生态科学, 2004, 23(3): 256~260.
[3] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)——一种

- 新的镉超富集植物[J].科学通报, 2003, **19**(48):2046~2049.
- [4] Raskin I, Kumar P B A N, Dushenkov S, *et al.* Bioconcentration of heavy metals by plants [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1994, **5**(1):285~290.
- [5] Raskin I, Smith D R, Salt E D. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, **8**(2):221~226.
- [6] Salt E D, Blaylock M, Kumar P B A N, *et al.* Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. Biotechnology, 1995, **13**(5):468~474.
- [7] 金国贤,薛锐,潘春龙.植物根过滤作用对重金属的富集研究[J].江苏环境科技, 2000, **13**(2):4~6.
- [8] 奉若涛,渠荣遴,李德森,等.水体重金属污染的植物修复研究(Ⅲ)——种苗过滤去除水中重金属镉[J].农业环境科学学报,2003, **22**(1):28~30.
- [9] 渠荣遴,李德森,杜荣骞.水体重金属污染的植物修复研究(Ⅰ)——种苗过滤去除水中重金属锌[J].农业环境保护, 2002, **21**(4):297~300.
- [10] 渠荣遴,李德森,杜荣骞,等.水体重金属污染的植物修复研究(Ⅱ)——种苗过滤去除水中重金属铅[J].农业环境保护, 2002, **21**(6):499~501.
- [11] 渠荣遴,李德森,杜荣骞,等.水体重金属污染的植物修复研究(Ⅳ)——种苗过滤去除水中重金属铜[J].农业环境科学学报, 2003, **22**(2):167~169.
- [12] 杨持.生态学实验与实习[M].北京:高等教育出版社, 2003. 17~21, 35~37.
- [13] 郭静,阮宜纶.水生植物对地热废水净化作用的研究[J].环境科学学报, 1995, **15**(2):251~255.
- [14] 高建兰,刘玲,张洪林.镉胁迫对玉米生理特性的影响[J].浙江科技学院学报,2004, **16**(2):105~108.
- [15] 孔祥生,郭秀璞,张妙霞.镉胁迫对玉米幼苗生长及生理生化的影响[J].华中农业大学学报, 1999, **18**(2):111~113.
- [16] 王芳,刘鹏,朱靖文.镁对大豆根系活力叶绿素含量和膜透性的影响[J].农业环境科学学报, 2004, **23**(2):235~239.
- [17] 刘玲,杨双春,张洪林. Hg^{2+} 胁迫下玉米生理生态变化的研究[J].生态环境, 2004, **13**(2):161~163.
- [18] 任安芝,高玉葆,刘爽.铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J].应用与环境生物学报, 2000, **6**(2):112~116.
- [19] 杨居荣,黄翌.植物对重金属的耐性机理[J].生态学杂志, 1994, **13**(6):20~26.
- [20] 王焕校.污染生态学[M].(第二版).北京:高等教育出版社, 2002.18.
- [21] 杨居荣,贺建群,黄翌,等.农作物 Cd 耐性的种内和种间差异 I .种间差[J].应用生态学报, 1994, **5**(2):192~196.
- [22] 段昌群,王焕校,曲仲湘.重金属对蚕豆(*Vicia faba*)根尖的核酸含量及核酸酶活性影响的研究[J].环境科学, 1992, **13**(5):31~35.