

镉胁迫对荻生长、镉富集和土壤酶活性的影响

郑黎明^{1,2,3}, 张杰^{1,2,3}, 杨红飞^{1,2,3}, 李全发^{1,2,3}, 袁静^{1,2,3}

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽重要生物资源保护与利用研究重点实验室, 安徽 芜湖 241000; 3. 安徽省皖江城市带退化生态系统的恢复与重建协同创新中心, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 采用盆栽土培法, 从播种开始培育 132 d 后, 研究 0, 3, 6, 9 mg/kg 镉胁迫对荻的生长、镉富集与分布和土壤酶活性的影响。结果表明: 荻耐性指数随处理浓度的增加先上升后下降, 镉浓度 ≤ 6 mg/kg 时, 促进荻生长, 镉浓度为 9 mg/kg 时, 抑制荻生长。叶绿素、丙二醛和可溶性糖含量均随处理浓度的增加先升高后降低, 在镉浓度为 6 mg/kg 时达到最大值; 类胡萝卜素含量为先降低后升高, 在 6 mg/kg 时达最小值。荻根部铜、锌和铁含量均随处理浓度的增加而升高, 地上部铜和铁含量先降低后升高, 而锌含量持续降低。根部和地上部镉含量随镉处理浓度增加呈线性增加趋势, 且根部镉含量均高于地上部; 不同浓度镉处理荻根部富集系数均大于 1, 但地上部富集系数和转运系数均小于 1; 根部镉积累量随处理浓度的增加先升高后降低, 在镉浓度为 6 mg/kg 时达到最大值, 地上部镉积累量持续升高, 荻体内镉主要分布在根部。镉处理组的土壤脲酶和过氧化氢酶活性与对照相比总体无显著差异 ($P > 0.05$), 镉浓度为 6 mg/kg 和 9 mg/kg 对土壤脲酶活性有一定促进作用, 但会抑制过氧化氢酶活性, 根际土壤酶活性总体高于非根际土壤酶。研究表明, 荻对镉有较强的耐性, 且根部对镉有较强的富集能力, 因此, 荻在土壤镉污染稳定化修复方面具有一定的应用潜力。

关键词: 荻; 镉; 耐性; 积累特性; 土壤修复

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0334-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.052

Effects of Cd Stress on the Growth, Cd Accumulation and Soil Enzyme Activities of *Miscanthus sacchariflorus*

ZHENG Liming^{1,2,3}, ZHANG Jie^{1,2,3}, YANG Hongfei^{1,2,3}, LI Quanfa^{1,2,3}, YUAN Jing^{1,2,3}

(1. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of the Conservation and Exploitation of Biological Resources, Wuhu, Anhui 241000; 3. Center of Cooperative Innovation for Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang City Belt, Anhui Province, Wuhu, Anhui 241000)

Abstract: The effects of Cd stress (0, 3, 6 and 9 mg/kg) on the growth, Cd accumulation and soil enzyme activities of *Miscanthus sacchariflorus* were studied by pot experiments from seed germination and cultivation for 132 d. The results showed that: The tolerance index of *Miscanthus sacchariflorus* increased at first and then decreased with the increase of the concentration of Cd. It was beneficial for plant growth when the concentration of Cd was no more than 6 mg/kg, whereas the growth was suppressed when the concentration of Cd was greater than 9 mg/kg. With the increase of Cd concentration, the content of chlorophyll, MDA and soluble sugar in leaves increased firstly and then decreased, and the peak appeared in 6 mg/kg Cd concentration; while the carotenoid content of leaves showed a contrary tendency with the increase of Cd concentration. Three micronutrients (Cu, Zn and Fe) in root increased gradually with the increase of Cd concentration. Specifically, with increasing Cd concentration, Cu and Fe concentrations in aboveground part decreased at first and then increased, while Zn concentration showed a continued slowdown. Cd concentration of root and aboveground part rose gradually with increasing Cd concentration and the distribution of Cd was higher in root than in aboveground part. The root bioconcentration factors (BCF) of *Miscanthus sacchariflorus* exceeded 1 in various Cd concentrations, but the aboveground part BCF and translocation factors (TF) were less than 1. Cd accumulation of root increased at first and then decreased with the increase of Cd concentra-

收稿日期: 2017-04-13

资助项目: 安徽省自然科学基金项目(1508085QC68); 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2015A127); 安徽师范大学创新基金项目(2012cxjj06)

第一作者: 郑黎明(1991—), 男, 安徽寿县人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染植物修复研究。E-mail: zhenglm168@126.com

通信作者: 张杰(1972—), 男, 安徽巢湖人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植物生理生态学与污染生态学研究。E-mail: zhjie1211@sina.com

tion; while Cd accumulation of aboveground part increased all the time. Furthermore, root was the main part of Cd accumulation. Soil enzyme activities had no significant differences among different Cd concentrations ($P>0.05$). Soil urease activity was promoted by Cd concentrations of 6 and 9 mg/kg, while, soil catalase activity was inhibited. Overall, the enzyme activities of urease and catalase in rhizosphere were high than those in non-rhizosphere. The findings indicate that *Miscanthus sacchariflorus* has high tolerance to Cd and the root presents strong capacity to accumulate Cd, therefore the plant had a certain potential in the stabilizing remediation of Cd contaminated soils.

Keywords: *Miscanthus sacchariflorus*; cadmium; tolerance; accumulation characteristics; soil remediation

由于燃料燃烧、污水灌溉及人工施肥等人类活动,使得重金属大量进入到环境中。我国土壤重金属污染中镉污染最为严重,点位超标率(指土壤超标点位的数量占调查点位总数量的比例)达到7.0%^[1]。随机采购的大米样品中,有10%左右存在镉超标问题^[2]。镉通过食物链进入人体后,主要贮存于肝、肾等组织中,自然排泄十分缓慢,危害极大。因此,治理镉污染土壤刻不容缓。在诸多治理方法中,植物修复技术因具有环保、廉价、易操作、效果较好等优点而受到广泛重视^[3]。在选择修复植物的问题上,研究者倾向于采用超积累植物,但其往往存在生长周期长、生物量小、对环境要求苛刻等缺陷,因而难以在实际修复中有效应用^[4]。故有必要对生长速度快、生物量高的重金属耐性植物进行研究^[5-7]。本课题组发现,荻(*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth.)在安徽铜陵狮子山尾矿库上长势良好,具有耐性植物特征,此外,荻是一种重要的能源植物。因此,利用荻修复重金属污染土壤,可在解决环境问题的同时,提供生物质能。目前,荻对重金属耐性、积累特性及利用荻修复重金属污染土壤方面的报道不多。田如男等^[8]研究了铜、镉单一胁迫下荻种子萌发和幼苗生长情况,结果表明,铜、镉质量浓度为5.1 mg/L时对种子萌发和幼苗生长有显著促进作用($P<0.05$),铜、镉质量浓度为20.81,16.30 mg/L时发芽率仍可达对照的50%。但由于萌发试验周期较短,有必要延长胁迫时间以准确研究荻对重金属的耐性。Tian等^[9]通过液培试验发现,荻根部对铜、镉的富集能力较强,富集系数分别可达37.89~79.08,83.96~300.57。但是,与土壤重金属不同,溶液中重金属几乎都可被植物吸收,因此,研究结果参考价值有限。张杰等^[10]通过盆栽试验,研究了铜胁迫下荻生理、生长及体内铜积累情况,发现荻根部对铜有较强的积累特性。不足的是,张杰等^[10]从荻根状茎开始培养,而朱鸣鹤等^[11]发现植物对重金属的吸收一般发生在幼苗期和果期,故有必要从种子萌发起研究荻对重金属的耐性和积累特性。本研究通过镉浓度梯度盆栽试验,从荻种子开始培养,培育132 d后,对荻的生长、

生理、矿质元素吸收、镉富集与分布和土壤酶活性进行研究,以期了解荻对镉的耐性和积累特性,为利用荻修复镉污染土壤提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物种子于2015年12月16日采自安徽师范大学北体育馆附近土坡上,采集荻穗,经自然风干后,剥离并挑选籽粒饱满的种子,备用。供试土壤于2016年1月9日采自安徽师范大学南体育馆附近树林中,采集表层(0—20 cm)土壤,经风干、压碎、剔除杂质后过2 mm孔径筛,充分混匀并保存备用。参考鲍士旦^[12]的方法测定土壤基本理化性质,供试土壤的基本理化性质为:pH 7.59,电导率76.57 $\mu\text{S}/\text{cm}$,有机质1.18 g/kg,有效氮20.39 mg/kg,速效磷15.45 mg/kg,速效钾16.42 mg/kg,全镉0.83 mg/kg。

1.2 试验设计

用盆口直径10.5 cm、盆底直径7.5 cm、高9.5 cm的塑料花盆进行试验,每盆装土500 g,共设4组,分别为对照(不加镉,记为CK)和3个不同的镉浓度处理,每组3个重复,用分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 提供镉,以水溶液的形式一次加入,处理浓度为3,6,9 mg/kg(以 Cd^{2+} 计,依次记为T1、T2和T3),分别为土壤镉环境质量三级标准的3,6,9倍,镉与土壤作用20 d后,播种(播种前用自来水浸泡种子24 h),每盆15粒,培养期间不定期交换盆与盆之间的位置以减弱边际效应,逐步间苗至每盆4株并根据土壤水分状况,适时浇水。

荻培养阶段于2016年2月23日开始,2016年7月3日结束,试验地点在安徽师范大学生态学实验室。前期(2月23日—4月30日)采用人工气候室培养,培养条件为:温度28 $^{\circ}\text{C}$,湿度80%,14 h光照及10 h黑暗;后期(5月1日—7月3日)采用室内自然方式培养;2016年7月4日收获取样。

1.3 样品采集和指标测定^[13]

植物样品:将收获的植物样品分为地上和地下2部分,用自来水冲洗以去除粘附于植物上的泥土和污物,再用去离子水冲洗3次,用吸水纸吸干表面水分,

取相同部位的新鲜叶片用于测定生理指标;用不锈钢剪刀将剩下的植物样品剪成小段,于 105 ℃ 下杀青 20 min,然后于 70 ℃ 下烘干至恒重,用不锈钢粉碎机磨细并保存。

土壤样品:获根际土壤采用手抖法进行收集,即抖掉与根系粘附度较小的土,紧密附着在根系上的土即为根际土壤,余下的为非根际土壤,土壤样品经剔除杂质、自然风干、过 2 mm 筛、混匀等操作后,保存待用。用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测定株高、茎粗和根长。采用乙醇-丙酮混合液浸提法测定叶片光合色素含量。采用硫代巴比妥酸法测定叶片丙二醛含量。采用比色法测定叶片可溶性糖含量。采用苯酚钠比色法测定土壤脲酶活性(以培养 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的微克数表示)。采用 KMnO₄ 滴定法测定土壤过氧化氢酶活性(以振荡反应 20 min 后 1 g 土壤消耗 0.001 mol/L KMnO₄ 的毫升数表示)。分别用 HNO₃-HCl(体积比为 1:3)和 HNO₃-HClO₄(体积比为 5:1)消煮土壤和植物样品,用 4510 型原子吸收分光光度计测定镉和微量营养元素(Cu、Zn、Fe)的含量。

1.4 数据处理和分析

根冠比=根部干重/地上部干重;耐性指数(TI)=处理组总生物量/CK 总生物量;地上部(根部)富集

系数=地上部(根部)Cd 含量/土壤 Cd 含量;转运系数=地上部 Cd 含量/根部 Cd 含量;地上部(根部)积累量=地上部(根部)干生物量×地上部(根部)Cd 含量;根部对 Cd 滞留率=根部积累量/(地上部积累量+根部积累量)。采用 Excel 2003 及 SPSS 21 软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 Cd 对获生长特征的影响

由表 1 可知,随镉处理浓度的增加,获株高和根长的变化趋势相似,即先减小后增加;T1、T2 处理的株高均显著低于 CK(P<0.05),分别是其 86.11%和 86.45%;镉处理组的根长与 CK 相比无显著差异(P>0.05)。茎粗呈逐渐减小趋势,T2、T3 处理均显著低于 CK(P<0.05),分别是其 82.44%和 81.95%。镉处理组的地上部干重与 CK 相比均无显著差异(P>0.05)。根部干重、总干重及根冠比有相似的变化规律,即先增大后减小,均在 T1 处理时达到峰值;其中,T1 时的根部干重显著高于 T3 时的(P<0.05),是其 2.07 倍;T1 处理时的根冠比显著高于 CK 和 T3 时的(P<0.05),分别高出 59.26%和 79.17%。镉处理组的总干重与 CK 相比均无显著差异(P>0.05)。镉处理组的耐性指数呈逐渐减小趋势,分别为 1.08,1.04,0.77。

表 1 Cd 对获生长特征的影响

处理	株高/ cm	茎粗/ mm	根长/ cm	单株地上部 干重/g	单株根部 干重/g	单株总 干重/g	根冠比	耐性 指数
CK	75.80±4.73b	2.05±0.10b	11.03±0.46a	0.70±0.06a	0.19±0.04ab	0.90±0.06a	0.27±0.07a	1.00
T1	65.27±3.51a	1.97±0.16b	10.95±1.53a	0.68±0.11a	0.29±0.07b	0.97±0.18a	0.43±0.03b	1.08
T2	65.53±3.47a	1.69±0.12a	11.08±0.68a	0.70±0.13a	0.24±0.11ab	0.94±0.23a	0.34±0.10ab	1.04
T3	70.10±1.57ab	1.68±0.14a	12.55±1.80a	0.55±0.11a	0.14±0.04a	0.69±0.15a	0.24±0.03a	0.77

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 Cd 对获生理生化特征的影响

由表 2 可知,获叶片的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量、MDA 含量和可溶性糖含量均随镉处理浓度增加呈先增加后降低的变化趋势,均在 T2 时达到最大值,与 CK 相比分别提高了 9.82%,14.74%,

10.93%,17.60%,26.50%,其中可溶性糖含量显著高于 CK(P<0.05),其他指标与 CK 相比无显著差异(P>0.05)。T1、T2 时的 MDA 含量显著高于 T3 时的(P<0.05),分别是其 1.51 和 1.54 倍。类胡萝卜素含量先减小后增加,处理组与 CK 相比均无显著差异(P>0.05)。

表 2 Cd 对获叶片生理生化特征的影响

处理	叶绿素 a 含量/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b 含量/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素总量/ (mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素含量/ (μg·g ⁻¹)	MDA 含量/ (μmol·kg ⁻¹)	可溶性糖含量/ (μmol·g ⁻¹)
CK	3.26±0.41a	0.95±0.13a	4.21±0.53a	514.53±20.10a	127.47±8.37ab	425.93±3.43a
T1	3.45±0.13a	1.04±0.05a	4.49±0.18a	508.20±45.51a	146.95±16.76b	518.45±34.29b
T2	3.58±0.35a	1.09±0.15a	4.67±0.49a	495.53±61.07a	149.90±34.79b	538.80±48.48b
T3	3.44±0.17a	1.05±0.03a	4.49±0.20a	538.20±7.21a	97.20±17.62a	395.47±19.86a

2.3 Cd 对获体内微量营养元素含量的影响

由表 3 可知,Cd 胁迫下获根部 3 种微量元素含量的变化趋势相似,表现为持续升高,T3 处理时获根部 Cu、Zn 和 Fe 的含量均达峰值,分别是 CK 的 2.14,1.23,1.30 倍;T2 和 T3 处理的根部 Cu 含量显著高于 CK

(P<0.05),分别高出 72.75%和 113.87%。地上部 Cu 和 Fe 的含量随 Cd 胁迫浓度升高呈先减小后增加的变化趋势,均在 T3 时最大,且 T3 时地上部 Cu 含量显著高于 CK(P<0.05),是其 1.31 倍;地上部 Zn 含量逐渐减小且 T3 时的显著低于 CK(P<0.05),是其 49.64%。

表 3 Cd 对荻体内 3 种微量元素含量的影响

处理	Cu 含量/(mg · kg ⁻¹)		Zn 含量/(mg · kg ⁻¹)		Fe 含量/(mg · kg ⁻¹)	
	地上部	根部	地上部	根部	地上部	根部
CK	5.50±0.46a	4.11±0.15a	23.61±2.77b	12.47±2.79a	94.79±12.11ab	1000.69±143.35a
T1	5.50±1.00a	4.20±0.77a	22.46±3.48b	13.19±0.64a	78.54±6.24a	1128.80±62.02a
T2	5.10±0.86a	7.10±1.12b	20.46±2.69b	13.70±0.42a	82.52±8.73ab	1208.95±270.22a
T3	7.22±0.49b	8.79±1.44b	11.72±4.04a	15.39±2.24a	96.36±3.67b	1304.62±229.84a

2.4 荻对 Cd 的富集和转运

由表 4 可知,随着镉处理浓度增加,荻地上部和根部镉含量均持续升高,分别是 CK 的 2.09,2.44,3.30 倍以及 9.19,19.24,25.26 倍,且与 CK 相比均存在显著差异($P<0.05$)。地上部富集系数逐渐减小且镉处理组均显著低于 CK($P<0.05$),分别是 CK 的 44.23%,28.85%,26.92%;根部富集系数先增大后减小且镉处理组均显著高于 CK($P<0.05$),分别是 CK 的 1.99,2.34,2.13 倍。转运系数总体呈现逐

渐减小趋势,镉处理组均显著低于 CK($P<0.05$),分别是 CK 的 24.00%,14.00%,14.00%。荻地上部和根部的单株镉积累量变化趋势不同,地上部逐渐增加且处理组均显著高于 CK($P<0.05$),分别高出 100.00%,143.33%,160.00%;根部则为先增加后减小,在 T2 时达峰值并显著高于 CK($P<0.05$),是其 26.00 倍。根部对 Cd 滞留率先增大后减小且镉处理组均显著高于 CK($P<0.05$),分别高出 119.31%,130.44%,119.84%。

表 4 Cd 在荻体内的富集、转运与分布情况

处理	镉含量/(mg · kg ⁻¹)		富集系数		转运系数	单株镉积累量/ μ g		根部对 镉滞留率/%
	地上部	根部	地上部	根部		地上部	根部	
CK	0.43±0.08a	0.88±0.13a	0.52±0.10b	1.06±0.15a	0.50±0.18b	0.30±0.04a	0.17±0.01a	35.84±2.82a
T1	0.90±0.17b	8.09±2.50b	0.23±0.04a	2.11±0.65b	0.12±0.05a	0.60±0.09b	2.26±0.40ab	78.60±5.72b
T2	1.05±0.05b	16.93±4.29c	0.15±0.01a	2.48±0.63b	0.07±0.02a	0.73±0.14b	4.42±2.64b	82.59±8.97b
T3	1.42±0.11c	22.23±5.14c	0.14±0.01a	2.26±0.52b	0.07±0.02a	0.78±0.11b	3.03±1.05b	78.79±4.23b

2.5 Cd 胁迫下荻生长对土壤酶活性的影响

由表 5 可知,荻根际与非根际土壤脲酶和过氧化氢酶活性总体呈现相似的变化规律,即先增加后降低。根际土壤脲酶活性在 T2 时达峰值,是 CK 的 1.17 倍,但差异无显著性($P>0.05$);镉处理组的非根际土壤脲酶活性均高于 CK,分别高出 0.37%,16.51%,9.37%,均无显著性差异($P>0.05$);此外,根际土壤的脲酶活性均高

于相应非根际土壤的。根际和非根际土壤的过氧化氢酶活性均在 T1 时最高,但与 CK 相比均无显著差异($P>0.05$);T2 和 T3 的根际土壤过氧化氢酶活性均显著低于 T1 时的($P<0.05$);T2 和 T3 的非根际土壤过氧化氢酶活性均显著低于 CK($P<0.05$),分别是其 91.66%和 91.39%;除 CK 外,根际土壤的过氧化氢酶活性均高于相应非根际土壤酶。

表 5 Cd 对荻根际与非根际土壤两种酶活性的影响

处理	脲酶活性/(μ g · g ⁻¹)			过氧化氢酶活性/(mL · g ⁻¹)		
	根际	非根际	根际/非根际	根际	非根际	根际/非根际
CK	359.17±35.06ab	307.87±34.23a	1.17	7.40±0.17ab	7.43±0.11b	1.00
T1	324.33±52.45a	309.00±38.99a	1.05	7.72±0.30b	7.63±0.20b	1.01
T2	418.57±41.97b	358.70±28.58a	1.17	6.88±0.37a	6.81±0.24a	1.01
T3	417.60±8.63b	336.73±39.86a	1.24	6.91±0.19a	6.79±0.10a	1.02

3 讨论

植物在污染土壤上可正常生长是植物修复技术的一个重要前提。我国土壤镉环境质量三级标准值为 1 mg/kg,本研究设置的镉污染水平(3,6,9 mg/kg)达到中、重度且从荻种子萌发至试验结束,胁迫时间达 132 d,但试验过程中荻叶片未出现卷曲失绿等毒害症状且荻生长总体未受明显抑制(表 1),表明荻对镉有一定的耐性。由表 1 可知,镉处理组的地上部干重均低于或等于 CK,而 T1、T2 时的根部干重却不同程度高于 CK,说明适量镉对荻根部生长有促进作用,因此,T1 时的根冠比显著高于 CK($P<0.05$)。耐性指数(TI)是镉处理组干生物量与 CK 的比值,

$TI>1$,表明对植物生长有促进作用; $TI<1$ 则为抑制。本研究中 TI 先升高后降低,以土壤镉含量为自变量(x),TI 为因变量(y)进行模拟,发现二者符合一元二次曲线模型,回归方程为: $y=-0.0097x^2+0.0793x+0.9354,R^2=0.990$ 。可预测:当土壤镉含量(x)为 4.09 mg/kg 时,TI 最大,为 1.10,即此时对荻生长的促进作用最大; x 为 7.26 mg/kg 时, $TI=1.00$,表明 7.26 mg/kg 为临界点,土壤镉含量在 7.26 mg/kg 以下对荻生长有促进作用,超过该值则表现为抑制。

光合色素是植物光合作用的物质基础,其含量高低能够反映植物光合作用水平的强弱^[14]。研究报道,镉胁迫可能会影响植物原叶绿素酸酯还原酶和氮

基- γ -酮戊酸的合成,使叶绿素的合成过程受阻,引起叶片光合功能改变^[15];并且镉可能与叶绿体中蛋白质上的巯基(-SH)结合或取代其中的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} ,致使蛋白质失去活性,造成叶绿素含量下降^[5]。本研究,镉处理组的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量与 CK 相比均无显著差异($P>0.05$),表明镉含量为 9 mg/kg 及以下对荻叶片叶绿素含量无明显影响。其原因可能是荻对镉存在特殊的耐性机制,如选择性亚细胞分布^[16],即通过将镉主要分布在细胞壁、液泡等部位以减少细胞核、细胞器等重要部位的镉含量,从而减弱镉的毒害作用。叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量间存在极显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数为 0.976,说明镉对叶绿素 a、叶绿素 b 的影响相似。可溶性糖是植物碳代谢的物质之一,是一种重要的渗透调节物质,与植物抗逆性密切相关^[17]。重金属胁迫下,由于外界渗透势较低,植物易出现失水状况。本研究表明,随镉胁迫浓度增大,可溶性糖含量呈先升高后降低的变化趋势。荻可能通过增加可溶性糖等有机小分子溶质来降低细胞内水势,从而避免细胞失水;但 T3 处理的可溶性糖含量与 CK 相比有所较低($P>0.05$),可能是因为高浓度镉胁迫会在一定程度上破坏植物的生理机能(如本研究中叶绿素含量降低),导致可溶性糖的合成受到抑制。重金属胁迫会诱发植物体产生活性氧,它们具有较高的毒性,能破坏蛋白质、脂质、核酸等生物大分子^[14]。MDA 是膜脂过氧化产物,其含量高低是检验植物受活性氧伤害程度的重要指标之一,类胡萝卜素是一种非酶抗氧化物质,是植物体内最重要的单线态氧($^1\text{O}_2$)猝灭剂。本研究中,类胡萝卜素含量呈先减小后增加的变化趋势,MDA 含量则为先增加后减小,相关性分析表明,二者存在显著的负相关关系($P<0.05$),相关系数为-0.970。作者认为荻体内可能存在一个活性氧阈值,小于此数值时,植物利用体内已有的抗氧化酶或非酶抗氧化物质清除活性氧,因此荻叶片类胡萝卜素含量先减小,但其清除速度不如生成速度,故活性氧含量增加,膜脂过氧化程度加深,MDA 含量增加;活性氧含量超过阈值后,荻将启动抗氧化酶或非酶抗氧化物质的生成程序,所以类胡萝卜素含量后增加,此时活性氧清除速度高于生成速度,故 MDA 含量后下降;但这种保护程序不是无限进行的,当外界胁迫强度过大时,抗氧化程序将不足以抵抗,植物体内活性氧含量会逐渐升高,植物遭受伤害甚至死亡。

重金属胁迫可能会影响植物对营养元素的吸收和转运,导致体内养分不足或失衡,影响植物生长发育,可能有 2 方面原因,一是重金属离子会与矿质元

素竞争根部的吸收位点;二是重金属会影响植物的生理生化特性从而影响其对矿质元素的吸收^[18]。Cu、Zn 和 Fe 是植物体内 3 种重要的微量营养元素,与诸多植物生理过程密切相关。本研究中,荻体内 3 种微量营养元素含量总体上未出现亏缺,表明本试验 Cd 胁迫水平未对荻吸收 Cu、Zn 和 Fe 产生明显抑制,这可能是荻生物量未出现显著降低的原因之一。荻根部 3 种营养元素含量随 Cd 胁迫浓度增加而升高,其中,根部的 Cu 和 Fe 含量与根部 Cd 含量间存在显著正相关关系,相关系数分别为 0.953($P<0.05$)和 0.991($P<0.01$),表明荻根系对 Cd 和 Cu、Fe 的吸收是协同作用。高浓度 Cd 处理可提高荻地上部分的 Cu 含量,但会降低 Zn 含量,其原因可能是高浓度 Cd 胁迫会诱发荻降低 Cd 转运水平(表 4),由于 Zn 和 Cd 是同族元素,性质和结构较为相似,因此荻对 Zn 的转运也受到抑制,Cu 是植物体内多种抗氧化酶(如 SOD)的重要组成部分,荻地上部分 Cu 含量升高可能与抗氧化程序启动后酶的数量增加有关。综上,不同浓度镉胁迫对荻体内叶绿素、丙二醛、可溶性糖及矿质营养元素含量的影响不大,在镉浓度低于 6 mg/kg 时,总体表现出一定的促进作用,这与反映生长状况的耐性指数的变化相一致,说明荻对重金属镉的耐性较强。

目前采用较多的镉超积累植物的界定标准是植物叶片或地上部(干重)中镉含量达到 100 mg/kg 以上,同时要满足地上部重金属含量高于根部。由表 4 可知,荻不是镉的超积累植物。荻地上部和根部镉含量(y)与镉处理浓度(x)间存在线性关系,线性方程为,地上部: $y=0.104x+0.396$, $R^2=0.967$,($P<0.05$);根部: $y=2.430x-0.916$, $R^2=0.992$,($P<0.01$)。说明荻体内镉含量与土壤镉浓度密切相关,此外,根部线性方程的斜率远大于地上部的,是其 23.37 倍,说明随着土壤镉浓度升高,荻根部镉含量增加更快。本研究中,根部富集系数均值为 1.98,地上部富集系数均值为 0.26,转运系数均值为 0.19,说明荻根部对镉有较强的富集能力,但其转运镉至地上部的能力较弱,且随着镉处理浓度升高,转运能力下降。可能是因为高镉环境下荻启动了耐性机制,即改变体内镉的存在形态,以降低镉的迁移能力,从而减弱镉的毒害作用。Wang 等^[19]发现两种基因型豆瓣菜(*Nasturtium officinale*)的根部和地上部中,乙醇提取态镉含量较低,而醋酸提取态的镉含量较高,豆瓣菜可能通过将镉转变为难溶的磷酸盐沉淀来降低镉在体内的移动性,从而减弱其毒性。荻根部镉积累量均值为 2.47 μg ,荻地上部镉积累量均值为 0.60 μg ,荻根部对镉滞留率均值为 69.0%,说明根系在向地上部输送营

养时对镉产生明显的截留作用,使体内镉主要分布在根部。由于获是多年生植物,留茬收割后,保留在土壤中的根系不会死亡、腐烂,即根系积累的重金属不会重新进入土壤中,故可以利用获根部能大量积累镉的特性来稳定土壤中的镉,降低镉进入地下水的风险,来年春天,根部可长出新苗,无需重复播种,即可实现连续修复。

植物通过根系从土壤中汲取营养物质,土壤微生物的分解作用能够提升土壤肥力。李伟等^[20]研究表明,土壤酶活性与土壤微生物的种类和数量有关,因此可根据土壤酶活性来判断土壤肥力水平和土壤微生物的生存状况。脲酶和过氧化氢酶广泛存在于土壤中,脲酶能催化尿素分解产生氨、二氧化碳和水,其中氨是植物氮源之一;过氧化氢酶能催化过氧化氢分解,避免其对生物体产生毒害。本研究中,处理组根际与非根际土壤酶活性与CK相比总体未出现显著降低,表明本试验镉胁迫水平对土壤微生物的扰动较小。此外,T2、T3的脲酶活性及T1的过氧化氢酶活性均不同程度高于CK,表明适度镉胁迫有助于提高土壤酶活性,可能是因为适量镉能促进土壤微生物新陈代谢。但是,T3处理组的脲酶活性仍高于CK,而该处理过氧化氢酶活性均低于CK,表明这2种土壤酶对镉的耐性存在差异,原因可能是不同种类微生物对镉的耐性存在差异,而微生物和土壤酶之间存在对应关系^[20]。研究显示,获根际土壤酶活性相较于非根际土壤酶有所提高,表明获生长对土壤生物的生命活动有促进作用。可能是因为获生长过程会通过根系不断向土壤中分泌有机酸、氨基酸、糖、生长激素等活性物质,再通过络合、螯合、沉淀等作用降低根际土壤重金属的生物有效性和毒性,从而有助于根际土壤生物生存;此外,获通过根系吸收镉,使根际土壤镉含量下降,也可能是原因之一。从镉胁迫下获体内镉富集与分布和土壤酶活性变化可以看出,获的生长有助于土壤中镉的固定,也有助于改善土壤微生物生存环境,因此,获在镉污染土壤稳定化修复方面具有一定的应用潜力。

4 结论

(1)镉浓度为9 mg/kg时,获干生物量与对照相比有所降低,但差异不显著($P>0.05$);由拟合方程可知,土壤镉含量临界值为7.26 mg/kg,低于该值,对获生长有促进作用,高于该值,表现为抑制,因此,获对镉有一定的耐性。

(2)获根部镉富集系数为1.06~2.48,地上部富集系数为0.14~0.52,转运系数为0.07~0.50,因此,获根部对镉有较强的富集能力;从镉积累量来看,单株根部镉积累量随镉处理浓度增加先增加后减小,6 mg/kg时最大,为4.42 μg ,单株地上部镉积累量随

镉处理浓度增加持续增加,9 mg/kg时最大,为0.78 μg ,此外,获体内镉主要分布在根部,因此,可利用获对镉污染土壤进行稳定化修复。

(3)镉处理组土壤脲酶和过氧化氢酶活性与对照相比总体无显著差异($P>0.05$),说明土壤脲酶和过氧化氢酶对镉有一定的耐性;获根际土壤酶活性总体高于非根际土壤的,因此,获生长有助于提高土壤酶活性。

(4)获虽然不是镉超积累植物,但是获具备干物质产量高、适应性强、再生能力强等优点,此外,获是多年生植物,这使得连续修复易于开展,因此,获在污染土壤的修复上具有较大的潜力。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[N].中国国土资源报,2014-04-18(002).
- [2] 甄燕红,成颜君,潘根兴,等.中国部分市售大米中Cd、Zn、Se的含量及其食品安全评价[J].安全与环境学报,2008,8(1):119-122.
- [3] Suthar V, Memon K S, Mahmood-ul-Hassan M. ED-TA-enhanced phytoremediation of contaminated calcareous soils: Heavy metal bioavailability, extractability, and uptake by maize and sesbania[J]. Environmental Monitoring Assessment, 2014, 186(6):3957-3968.
- [4] Nsanganwimana F, Waterlot C, Louvel B, et al. Metal, nutrient and biomass accumulation during the growing cycle of *Miscanthus* established on metal-contaminated soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2016, 179(2):257-269.
- [5] 朱志国,周守标.铜锌复合胁迫对芦竹生理生化特性、重金属富集和土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):276-280,288.
- [6] Chigbo C, Batty L. Chelate-assisted phytoremediation of Cu-pyrene-contaminated soil using *Z. mays*[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, 226(3):74.
- [7] 孙月美,宁国辉,刘树庆,等.耐受性植物油葵和棉花对镉的富集特征研究[J].水土保持学报,2015,29(6):281-286.
- [8] 田如男,于双,王守攻.铜、镉胁迫下获种子的萌发和幼苗生长[J].生态环境学报,2011,20(8/9):1332-1337.
- [9] Tian R N, Yu S, Wang S G, et al. Heavy metal tolerance and accumulation of *Triarrhena sacchariflora*, a large amphibious ornamental grass[J]. Water Science and Technology, 2013, 68(8):1795-1800.
- [10] 张杰,周守标,黄永杰,等.能源植物获对铜胁迫的耐性和积累特性[J].水土保持学报,2013,27(2):168-172,188.
- [11] 朱鸣鹤,丁永生,丁德文.翅碱蓬体内重金属在不同生长期的分布与迁移[J].中国环境科学,2006,26(增刊):110-113.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000.