

外源乙酸和 EDTA 对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗生长及部分金属元素积累的影响

吴雪^a, 杨晓婷^a, 王冰^a, 王林^a, 疏伟慧^a, 张丽丽^a, 韩玉林^{a,b,①}

(江西财经大学: a. 艺术学院园林系, b. 风景园林与园林植物种质资源研究所, 江西 南昌 330032)

摘要: 采用容器栽培方法研究了添加外源乙酸和 EDTA 对铜尾矿矿砂中芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.] 幼苗地上部分及地下部分生长及部分金属元素积累的影响。结果表明: 添加 0.5 mmol · L⁻¹ 乙酸, 幼苗各部分的干质量以及耐性指数与对照差异较小; Cu、Cd、Pb、K 和 Na 含量或显著低于对照, 或与对照差异不显著。添加 2.0 mmol · L⁻¹ 乙酸, 地下部分和地上部分的干质量最大, 分别较对照提高 33.7% 和 58.5%, 耐性指数也最大, 达到 1.07; 幼苗各部分的 Cu、Cd 和 K 含量均显著低于对照, Pb 含量高于或显著高于对照, Na 含量与对照差异不显著。添加 0.5 mmol · L⁻¹ EDTA, 幼苗各部分的干质量显著高于对照, 耐性指数较对照减小 19%; 各部分的 Cd、K 和 Na 含量及地下部分的 Cu 含量低于或显著低于对照, 地上部分的 Cu 含量以及各部分的 Pb 含量高于或显著高于对照。添加 2.0 mmol · L⁻¹ EDTA, 幼苗各部分的干质量与对照无显著差异, 耐性指数较对照减小 21%; 各部分的 Pb、K、Na 含量和地上部分 Cu 含量以及地下部分 Cd 含量显著高于对照, 地上部分 Cd 含量显著低于对照, 而地下部分 Cu 含量与对照差异不显著。研究结果表明: 添加高浓度乙酸能促进铜尾矿矿砂中芦苇生长和 Pb 积累; 添加高浓度 EDTA 能显著抑制芦苇根系生长, 对金属元素的积累有明显的促进作用, 尤其是能够促进 Cu 向地上部分的运输以及地下部分对 Cd 和 Pb 的积累。

关键词: 芦苇; 乙酸; 乙二胺四乙酸; 铜尾矿矿砂; 生长; 金属元素积累

中图分类号: Q945.78; S564⁺.2; X171.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2011)04-0029-06

Effects of exogenous acetic acid and EDTA on growth and accumulation of some metal elements of *Phragmites australis* seedling in copper tailing ore WU Xue^a, YANG Xiao-ting^a, WANG Bing^a, WANG Lin^a, SHU Wei-hui^a, ZHANG Li-li^a, HAN Yu-lin^{a,b,①} (Jiangxi University of Finance and Economics; a. Department of Landscape Architecture, College of Art, b. Institute of Landscape Architecture and Ornamental Plant Resources, Nanchang 330032, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2011, 20(4): 29-34

Abstract: Effects of exogenous acetic acid and EDTA on growth and accumulation of some metal elements in above- and under-ground parts of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. in copper tailing ore were studied by pot cultivation method. The results show that after adding 0.5 mmol · L⁻¹ acetic acid, dry weights of two parts of seedlings and their tolerance indexes have a little difference with the control. And contents of Cu, Cd, Pb, K and Na in two parts are significantly lower than those of the control, or have no significant difference with those of the control. After adding 2.0 mmol · L⁻¹ acetic acid, dry weights of under- and above-ground parts of seedlings are the biggest with increments of 33.7% and 58.5% as compared with the control, respectively, and tolerance index of seedling is also the biggest with a value of 1.07. And contents of Cu, Cd and K in two parts are significantly lower and Pb content is higher or significantly higher than those of the control, and Na content has no significant difference with that of the control. After adding 0.5 mmol · L⁻¹ EDTA, dry weights of two parts are significantly higher

收稿日期: 2011-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771520); 江西省自然科学基金资助项目(2008GZN0064); 国家大学生创新项目(101042136; 101042137)

作者简介: 吴雪(1988—), 女, 安徽寿县人, 硕士研究生, 主要从事园林植物的抗逆生理研究。

①通信作者 E-mail: hyl1957@163.com

than those of the control, and tolerance index of seedlings reduces by 19% as compared with the control. And contents of Cd, K and Na in two parts and Cu content in under-ground part are lower or significantly lower and Cu content in above-ground part and Pb content in two parts are higher or significantly higher than those of the control. After adding $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA, dry weights of two parts have no significant difference and tolerance index of seedlings reduces by 21% as compared with the control. And contents of Pb, K and Na in two parts, Cu content in above-ground part and Cd content in under-ground part are significantly higher and Cd content in above-ground part is significantly lower than those of the control, but Cu content in under-ground part has no significant difference with that of the control. It is suggested that adding high concentration acetic acid can promote growth and Pb accumulation of *P. australis* in copper tailing ore. While adding high concentration EDTA has an obvious inhibition effect on root growth of *P. australis*, but has an obvious promotion effect on metal element accumulation, especially can promote Cu transportation to above-ground part and Cd and Pb accumulation in under-ground part.

Key words: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; acetic acid; EDTA; copper tailing ore; growth; metal element accumulation

全球工业化进程的加快使铜的需求量大增,在铜矿的采矿和冶炼过程中形成了大量的尾矿,这些尾矿中的Cu、Cd、Zn和Cr等重金属元素的含量较高,特别是铜尾矿及其渗出液中过量的Cu,不仅对植物生长有毒害作用,还可通过在植物根、茎、叶及果实中的过量积累进入食物链,严重威胁人类的健康。

植物修复技术(phytoremediation technology)利用某些对重金属耐性较强的植物,通过植物体内的吸收和根系的吸附作用,将水体和土壤中的重金属固定在植物体内,从而使水体和土壤中的重金属含量明显下降。植物修复技术以其生态、环保、经济、安全等特点引起了人们的广泛关注^[1-3]。但由于大部分重金属在土壤中的生物活性较低,能够直接被植物吸收的很少,大大限制了植物修复技术的可应用性^[4]。

广泛存在于植物体内和根际环境中的有机酸不仅可以增加重金属离子的活性,还可以提高植物各器官对重金属离子的吸收能力^[5],其吸收效率与植物种类、重金属含量和有机酸浓度有关^[6]。因而,在利用植物修复治理重金属污染环境的过程中,通过添加有机酸可增加植物对重金属的吸收,相关的研究也日益增多。

作者将广泛分布的挺水植物芦苇[*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]栽培于铜尾矿矿砂中,并在其生长过程中分别添加乙酸和乙二胺四乙酸(EDTA)溶液,对乙酸和EDTA存在条件下芦苇的生长状况及其对金属元素的积累状况进行了分析和比较,以为铜尾矿矿砂的植物修复与固定提供理论基础,也为重金属污染环境的植物修复过程中有机酸的应用提供实验数据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试芦苇种子采自江苏省镇江市金山长江南岸。供试的铜尾矿矿砂来源于江西省德兴铜矿尾矿坝,其中,有机质、总氮和总磷含量分别为12.17、0.25和 $0.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效氮、有效磷和有效钾含量分别为5.09、3.21和 $8.75 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,总铜、总锌、总铅和总镉含量分别为1683.43、495.99、76.93和 $106.69 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,pH 6.24。

1.2 方法

1.2.1 培养及处理方法 按照Han等^[7]的方法培养芦苇幼苗。将芦苇种子用清水浸泡30 min,用质量体积分数0.15% HgCl_2 溶液消毒5 min,清水清洗后,将种子播种于装有已消毒河沙(消毒方法同上)的托盘中。培养过程中保持河沙湿润,并维持3000~5000 lx的光照度。种子萌发后,用1/2Hoagland营养液进行培养。

选择生长健壮且长势基本一致的芦苇幼苗(株高约10 cm),洗净后栽植于装有300 g铜尾矿矿砂的培养瓶中,每瓶栽6株幼苗,每天补充蒸馏水,使水面高于矿砂表面1 cm,置于室内自然光照条件下预培养,光照度3000~5000 lx、温度 $20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。预培养10 d后,分别用 0.5 和 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸、 0.5 和 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA溶液进行单一处理,对照则不添加乙酸和EDTA。每处理3瓶,每瓶视为1次重复。

1.2.2 生长指标的测定方法 处理18 d后将幼苗取出,冲洗干净,用直尺测量并计算根系的平均长度,

按照公式计算耐性指数:耐性指数=(处理组根平均长度/对照组根平均长度) $\times 100\%$ ^[7]。然后,将幼苗地上部分与地下部分分开,分别于80℃干燥箱内干燥至恒质量,用千分之一电子天平分别称取地上部分和地下部分的干质量。

1.2.3 金属元素含量的测定方法 称取干燥至恒质量的地上部分和地下部分各约0.1g,剪碎后加入 $V(\text{HNO}_3):V(\text{HClO}_4)=87:13$ 混合液6mL,浸泡12h后,消煮至近干;分别加入10mL体积分数5% HNO_3 ,置于沸水浴中振荡使之充分溶解;用体积分数5% HNO_3 定容至25mL,混匀后用TAS-990火焰原子分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司生产)测定Cu、Pb、Cd、K和Na的含量^[8]。

1.3 数据统计和分析

应用Excel 2003和SPSS 13.0统计软件对实验数据进行方差分析(ANOVA)。

2 结果和分析

2.1 外源乙酸和EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗干质量和耐性指数的影响

添加外源乙酸和EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗地上部分和地下部分干质量及耐性指数的影响见表1。由表1可见:添加 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸,芦苇幼苗地上部分和地下部分的干质量均显著高于对照;且地下部分与地上部分干质量的增幅在4个处理组中最大,分别较对照提高33.7%和58.5%;幼苗的耐性指数也高于对照,达到1.07。添加 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸,地下部分干质量较对照显著增加,而地上部分干质量略高于对照,但差异不显著;幼苗的耐性指数略低于对照。

添加外源EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗地上部分和地下部分的干质量及耐性指数的影响与外源乙酸有一定的差异。添加 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA,芦苇幼苗地上部分和地下部分的干质量均显著高于对照($P<0.05$),但耐性指数有所下降,降幅为19%;添加 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA,芦苇幼苗地上部分和地下部分的干质量与对照差异不显著,但耐性指数明显小于对照,降幅达到21%,也略小于 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA处理组。

上述实验结果说明:添加 0.5 和 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸,对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗的生长均有促进作

用,但对根生长的作用有一定差异;其中,添加 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸对芦苇幼苗生长有显著的促进作用,且对根生长也有明显的促进作用。而添加低浓度($0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗生长有一定的促进作用,添加高浓度($2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)EDTA对芦苇幼苗生长的抑制作用不明显,但添加 0.5 和 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA对芦苇幼苗的根生长均有明显的抑制作用。

表1 外源乙酸和EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗地下部分和地上部分干质量及耐性指数的影响($\bar{X}\pm\text{SD}$)¹⁾
Table 1 Effects of exogenous acetic acid (HAc) and EDTA on dry weights of under- and above-ground parts and tolerance index of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. seedlings in copper tailing ore ($\bar{X}\pm\text{SD}$)¹⁾

处理 Treatment	单株干质量/g Dry weight per plant		耐性 指数 ²⁾ Tolerance index ²⁾
	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	
对照 CK	0.089 \pm 0.015c	0.041 \pm 0.011c	1.00
0.5 mmol·L ⁻¹ HAc	0.094 \pm 0.029b	0.042 \pm 0.012c	0.97
2.0 mmol·L ⁻¹ HAc	0.119 \pm 0.030a	0.065 \pm 0.008a	1.07
0.5 mmol·L ⁻¹ EDTA	0.092 \pm 0.007b	0.052 \pm 0.013b	0.81
2.0 mmol·L ⁻¹ EDTA	0.085 \pm 0.030c	0.041 \pm 0.013c	0.79

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差测验在0.05水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level by Duncan's new multiple range test.

²⁾ 数据为3次重复的平均值 The datums are the average of three replications.

2.2 外源乙酸和EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗体内金属元素积累的影响

2.2.1 对Cu、Cd和Pb积累的影响 添加外源乙酸和EDTA,铜尾矿矿砂中芦苇幼苗体内Cu、Cd和Pb的含量见表2。

由表2可知:添加外源乙酸和EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗体内Cu积累的影响效应差异较大。添加 0.5 和 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸,芦苇幼苗地上部分与地下部分的Cu含量均明显低于对照,其中, $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸处理组幼苗地上部分与地下部分Cu含量与对照的差异最大,分别比对照降低49.5%和31.3%。添加 0.5 和 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA,幼苗地上部分的Cu含量分别为217.4和231.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,显著高于对照,分别为对照的1.45和1.54倍;添加 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA,地下部分的Cu含量比对照降低47.9%,差异显著;而添加 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA,地下部分的Cu含量略高于对照,但差异不显著。实验

结果表明:加入外源乙酸可以显著抑制芦苇幼苗对铜尾矿矿砂中 Cu 离子的吸收,且乙酸浓度越高,抑制作用越显著;添加外源 EDTA 则能有效促进铜尾矿矿砂中芦苇幼苗地下部分 Cu 离子向地上部分的转运,而高浓度 EDTA 则能在一定程度上提高芦苇幼苗对 Cu 的吸收能力。

由表 2 可见:添加外源乙酸,铜尾矿矿砂中芦苇幼苗体内 Cd 的含量低于对照,且随着乙酸浓度的提高,芦苇对 Cd 的吸收能力降低,Cd 含量显著下降;添加 0.5 mmol · L⁻¹ 乙酸,地上部分 Cd 含量显著低于对照,地下部分 Cd 含量也略低于对照但差异不显著;而添加 2.0 mmol · L⁻¹ 乙酸,地上部分与地下部分的 Cd 含量均显著低于对照,分别较对照降低 51.8% 和

28.1%。添加 0.5 mmol · L⁻¹ EDTA,芦苇幼苗地上部分 Cd 含量显著低于对照,地下部分 Cd 含量也低于对照,但差异不显著;添加 2.0 mmol · L⁻¹ EDTA,幼苗地上部分的 Cd 含量显著低于对照但高于 0.5 mmol · L⁻¹ EDTA 处理组,而地下部分的 Cd 含量显著高于对照,较对照增加 58.9%。结果表明:加入外源乙酸可以显著抑制芦苇幼苗对铜尾矿矿砂中 Cu 离子的吸收,且乙酸浓度越高,抑制作用越显著;添加低浓度(0.5 mmol · L⁻¹) EDTA 能够显著抑制铜尾矿矿砂中芦苇幼苗对 Cd 的吸收,而添加高浓度(2.0 mmol · L⁻¹) EDTA 对芦苇地下部分 Cd 离子的吸收有一定的促进作用。

表 2 外源乙酸和 EDTA 对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗体内 Cu、Cd 和 Pb 积累的影响¹⁾

Table 2 Effects of exogenous acetic acid (HAc) and EDTA on accumulation of Cu, Cd and Pb in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. seedlings in copper tailing ore¹⁾

处理 Treatment	Cu 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cu content		Cd 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cd content		Pb 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Pb content	
	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part
	对照 CK	150.4b	319.0a	53.5a	18.5b	2.3b
0.5 mmol · L ⁻¹ HAc	101.1bc	262.2b	42.5b	17.9b	3.6b	10.3c
2.0 mmol · L ⁻¹ HAc	75.9c	219.2c	25.8c	13.3c	4.1b	17.6b
0.5 mmol · L ⁻¹ EDTA	217.4a	166.1d	30.0c	16.0bc	5.1ab	12.2c
2.0 mmol · L ⁻¹ EDTA	231.8a	320.7a	44.6b	29.4a	5.6a	32.6a

¹⁾表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in this table are the average of three replications; 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差测验在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level by Duncan's new multiple range test.

由表 2 还可以看出:添加 0.5 mmol · L⁻¹ 乙酸,芦苇幼苗体内的 Pb 积累量与对照接近,但地上部分 Pb 含量高于对照,地下部分 Pb 含量低于对照,差异均不显著;而添加 2.0 mmol · L⁻¹ 乙酸,芦苇幼苗地上部分 Pb 含量高于对照但差异不显著,而地下部分的 Pb 含量则显著高于对照。添加 0.5 mmol · L⁻¹ EDTA,芦苇幼苗地上部分和地下部分的 Pb 含量均高于对照但差异不显著;添加 2.0 mmol · L⁻¹ EDTA,芦苇幼苗地上部分及地下部分 Pb 含量均显著高于对照且在 4 个处理组中最高,分别是对照的 2.8 和 2.4 倍。另外,添加 2.0 mmol · L⁻¹ 乙酸和 EDTA,尽管幼苗地下部分的 Pb 含量均显著高于对照,但向地上部分的转运比例却明显小于对照。结果表明:添加高浓度乙酸和 EDTA 均可显著促进芦苇幼苗根系对 Pb 的吸收,但对 Pb 向地上部分的转运有抑制作用,其中添加 2.0 mmol · L⁻¹ EDTA 对芦苇植株中 Pb 积累的促进作用最

明显;而添加低浓度乙酸和 EDTA 对芦苇植株中 Pb 吸收和积累的促进作用不明显。

此外,总体上看,对照组及各处理组芦苇地上部分的 Cu 和 Pb 含量低于地下部分,Cd 含量高于地下部分,表明在铜尾矿矿砂中芦苇根系吸收的 Cu 和 Pb 主要积累于根系中,而根系吸收的 Cd 大部分被转运至地上部分。

2.2.2 对 K 和 Na 积累的影响 添加外源乙酸和 EDTA,铜尾矿矿砂中芦苇幼苗体内 K 和 Na 的含量见表 3。

由表 3 可知:添加 0.5 mmol · L⁻¹ 乙酸,芦苇幼苗地上部分及地下部分的 K 含量与对照无显著差异;而添加 2.0 mmol · L⁻¹ 乙酸,幼苗地上部分及地下部分的 K 含量均显著低于对照,分别比对照降低 31.7% 和 24.6%。添加 0.5 mmol · L⁻¹ EDTA,地上部分与地下部分的 K 含量均显著低于对照,分别比对照降低

表3 外源乙酸和EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗体内K和Na积累的影响¹⁾Table 3 Effects of exogenous acetic acid (HAc) and EDTA on accumulations of K and Na in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. seedlings in copper tailing ore¹⁾

处理 Treatment	K 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ K content		Na 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Na content	
	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part
对照 CK	8 209.9b	4 324.8ab	2 825.5b	402.0b
0.5 mmol · L ⁻¹ HAc	8 244.8b	4 096.0b	1 973.2c	216.1c
2.0 mmol · L ⁻¹ HAc	5 604.1d	3 261.8c	3 103.1b	331.9bc
0.5 mmol · L ⁻¹ EDTA	6 660.9c	2 698.1d	2 099.2c	152.0d
2.0 mmol · L ⁻¹ EDTA	9 264.9a	4 588.3a	3 584.4a	573.7a

¹⁾表中数据为3次重复的平均值 The datums in this table are the average of three replications; 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差测验在0.05水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level by Duncan's new multiple range test.

18.9%和37.6%;但添加2.0 mmol · L⁻¹ EDTA,地上部分K含量较对照提高12.9%且差异显著,而地下部分的K含量比对照提高6.1%但差异不显著。结果表明:高浓度乙酸和低浓度EDTA均能明显抑制芦苇对K的吸收,而高浓度EDTA则能显著促进芦苇对K的吸收。

由表3还可见:添加0.5 mmol · L⁻¹乙酸,芦苇幼苗地上部分与地下部分Na含量显著低于对照,分别比对照降低30.2%和46.1%;添加2.0 mmol · L⁻¹乙酸,地上部分Na含量高于对照,而地下部分Na含量则低于对照,但差异均不显著。添加0.5 mmol · L⁻¹ EDTA,芦苇幼苗地上部分与地下部分的Na含量均显著低于对照,分别为对照的74.3%和37.8%;而添加2.0 mmol · L⁻¹ EDTA,幼苗地上部分和地下部分的Na含量均显著高于对照,分别比对照提高26.9%和42.7%。结果表明:芦苇幼苗对Na的吸收能力与外源有机酸的种类和浓度有很大关系;低浓度(0.5 mmol · L⁻¹)的乙酸和EDTA均对铜尾矿矿砂中芦苇体内的Na积累有显著的抑制作用,但高浓度(2.0 mmol · L⁻¹) EDTA能促进芦苇幼苗对Na的吸收;而高浓度(2.0 mmol · L⁻¹)乙酸对芦苇体内Na积累的影响效应不明显。

此外,对照组及各处理组芦苇地上部分的K和Na含量均高于地下部分,说明芦苇根系吸收的K和Na大部分被转运至地上部分。

3 讨 论

有机酸广泛存在于植物体内及其根际环境中,在一定条件下可作为重金属元素的配基参与重金属的

吸收、运输、积累及解毒等过程,从而促进植物对重金属元素的超积累作用,最终达到解除植物体内重金属毒害的目的^[9]。在浓度相对较低的有机酸作用下,植物的生长受到刺激,产量可以提高。黄苏珍等^[10]用0.5 mmol · L⁻¹有机酸处理黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.),植株的干质量显著提高,与本研究结果基本一致。这一现象可能与酸性环境有利于植物吸收土壤中的矿质元素、促进植物生长有关^[9]。但若施用的有机酸浓度超过一定的阈值,也可能干扰植物对一些微量元素(如Zn²⁺、Cu²⁺等)的吸收和代谢,从而影响植物的正常生长^[11]。

Inskeep等^[12]的研究结果表明:通过与有机酸的结合,土壤溶液中的重金属离子浓度降低,打破了重金属离子在土壤液相与固相中的平衡,促使重金属离子从土壤颗粒表面解吸出来,由不溶态转变为可溶态,提高了重金属离子在土壤溶液中的移动性与可被吸收性。Blaylock等^[13]证实了柠檬酸可以增加印度芥菜(*Brassica juncea* L.)中的重金属含量,促进Pb从根系向地上部分的运输。本实验也得出类似的结果。添加一定浓度的EDTA可促进铜尾矿矿砂中芦苇对Cu、Cd、Pb、K和Na的吸收,尤其是对地下部分吸收金属离子的效果更为显著。EDTA的添加形成了特定的根际环境,提高了金属离子的活性和移动性,从而易于被植物根系所吸收;而被吸收的金属离子大部分以络合物的形式被固定在芦苇的根系中,且这种络合物不易降解,使得植株地下部分的金属离子含量明显增高,进而影响植物根系的生长,最终致使芦苇的耐性指数受到影响。

外源有机酸对植物吸收土壤中重金属效率的影响因有机酸的种类和重金属元素的类型而有所不同。

乙酸和乳酸为弱吸收型有机酸,促进金属离子进入植物的能力较弱,且形成的络合物不稳定,容易被降解,若土壤中这类有机酸的含量提高,反而增加了土壤对金属的吸附能力^[14],这可能是添加外源乙酸后芦苇体内 Cu、Cd 和 K 等离子含量降低的主要原因,且乙酸浓度越高,土壤中的酸根离子越高,植物体内的离子浓度越低。但添加 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸,芦苇体内的 Pb 和 Na 含量有上升的趋势,其原因可能是乙酸较易与 Pb 或 Na 络合或者铜尾矿矿砂溶液 pH 值的变化有利于这 2 种离子的吸收,可能还与 Pb 和 Na 的离子属性有关。

芦苇对 Cu 和 Cd 有一定的富集作用,可用于 Cu 和 Cd 污染环境的修复。研究结果表明:芦苇能够在铜尾矿矿砂中生长,在添加 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA 的条件下可提高其积累和吸收 Cu、Cd、Pb、K 和 Na 的能力,可将芦苇用于修复和固定铜尾矿矿坝。另外,通过改善铜尾矿的植物生长环境条件(如施肥的种类及施肥量、调节铜尾矿的酸碱度)和对外源有机酸种类和浓度加以筛选,能够提高芦苇的生长速率及其对金属离子的富集作用。由于芦苇属于沼生植物,因此,还可用于修复被铜尾矿渗出液污染的小溪、河流水体及周边土壤。

参考文献:

- [1] Zhou Y Q, Huang S Z, Yu S L, et al. The physiological response and sub-cellular localization of lead and cadmium in *Iris pseudacorus* L.[J]. *Ecotoxicology*, 2010, 19(1): 69-76.
- [2] Han Y L, Huang S Z, Gu J G, et al. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L.[J]. *Ecotoxicology*, 2008, 17(8): 853-859.
- [3] 付佳佳,韩玉林,李亚亚,等. Pb、Cd 单一及复合胁迫对花菖蒲幼苗生长及部分生理指标的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2010, 19(3): 23-27.
- [4] 孙延东,原海燕,黄苏珍. Cd-Cu 复合胁迫对黄菖蒲叶片及根系中 Cd 和 Cu 的积累及其迁移率的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(1): 22-27.
- [5] Lindsay W L. *Chemical Equilibria in Soils*[M]. New York: Wiley, 1979.
- [6] Kayser A, Wenger K, Keller A, et al. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: the use of NTA and sulfur amendments[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(9): 1778-1783.
- [7] Han Y L, Yuan H Y, Huang S Z, et al. Cadmium tolerance and accumulation by two species of *Iris*[J]. *Ecotoxicology*, 2007, 16(8): 557-563.
- [8] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [9] 李玉红,宗良纲,黄耀. 螯合剂在污染土壤植物修复中的应用[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3): 303-306.
- [10] 黄苏珍,原海燕,孙延东,等. 有机酸对黄菖蒲镉、铜积累及生理特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1181-1186.
- [11] Vassil A D, Kapulnik Y, Raskin I, et al. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1998, 117(2): 447-453.
- [12] Inskeep W P, Comfort S D. Thermodynamic predictions for the effects of root exudates on metal speciation in the rhizosphere[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1986, 9: 567-586.
- [13] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et al. Enhanced accumulation of Pb in India mustard by soil-applied chelating agents[J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(3): 860-865.
- [14] 李玉红,卫冬燕,孙方民,等. 有机酸施用对印度芥菜吸收 Pb、Cd 的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2004, 38(3): 275-278.

(责任编辑:佟金凤)