

文章编号:1672-3317(2017)04-0009-06

油葵种植条件下镉生物可利用性对 柠檬酸诱导的响应研究

马欢欢¹, 乔冬梅^{1,2}, 齐学斌^{1,2}, 胡超^{1,2}

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院 河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002)

摘要:采用盆栽试验的方法,以油葵为试验材料,分别在油葵生长20、30、40和50 d加入不同质量摩尔浓度(1、2、3、4、5和6 mmol/kg)的柠檬酸,研究柠檬酸对镉生物可利用性的影响。结果表明,柠檬酸的加入提高了镉的生物可利用性,在油葵生长20 d和30 d时加入1、2、3、4、6 mmol/kg的柠檬酸最有利于非活性的镉转化为易被生物利用的活性镉;在柠檬酸的诱导下,镉的富集系数均高于对照,在油葵生长40 d和50 d时加入1 mmol/kg的柠檬酸后镉的富集效果达到最优;在油葵生长50 d加入4~6 mmol/kg的柠檬酸能使镉的转运系数达到最大,最有利于镉由植物地下部分向地上部分转移。可见,在油葵生长20 d和30 d时加入1、2、3、4、6 mmol/kg的柠檬酸、油葵生长40 d时加入1 mmol/kg的柠檬酸、油葵生长50 d时加入4~6 mmol/kg的柠檬酸最有利于油葵对镉的吸收和富集。

关键词:有机酸;镉;油葵;富集

中图分类号:S562

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.04.002

马欢欢,乔冬梅,齐学斌,等. 油葵种植条件下镉生物可利用性对有机酸诱导的响应研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(4):9-14.

0 引言

随着人们对食品安全的关注,土壤重金属污染越来越受到重视。其中镉(Cd)是广泛存在于土壤环境中毒性最强的重金属元素之一,与其他植物非必需元素相比,具有很强的从土壤向植物迁移的能力^[1],可通过食物链进入人体,危害人们的身心健康,已被公认为是对人类最具威胁的主要有毒重金属之一^[2]。重金属镉污染不易被微生物降解,只能在固有的环境中发生形态转化、运移、富集以及沉淀。目前,植物修复重金属污染的技术得到广泛应用,其中如何提高植物对镉的吸收是修复镉污染土壤研究的热点和难点^[3]。植物修复是20世纪80年代初期发展起来的环境污染治理技术,广泛利用绿色植物的新陈代谢活动来固定、降解、提取和挥发环境中的污染物质,从而对污染环境进行彻底的治理。植物修复因其安全、环保、经济、操作简单、能够大面积实施而得到广泛应用^[4],被认为是一种经济有效的土壤重金属去除方法^[5-6]。而有机酸在植物修复过程中起着生物诱导的作用,已有很多学者针对有机酸的诱导作用进行了研究。已有研究^[7-10]表明,随着柠檬酸等有机酸质量浓度的增加,土壤中可溶态Cd量占总重金属量的比例呈线性增加。柠檬酸等化合物使根际微环境发生变化,影响根际土壤中重金属Cd的生物有效性^[11]。植物根系分泌的混合酸类物质,包括柠檬酸等有机酸^[12-13]可以通过酸化土壤环境来提高对Cd的吸收量^[14]。研究^[15]发现,柠檬酸可显著降低土壤pH值,提高镉的有效量,柠檬酸在酸性土壤中促进镉在烟草中转运,在中性土壤中则起抑制作用。并且柠檬酸具有强化烟草地上部对镉的吸收。柠檬酸作为一种螯合剂,通过促进难溶的重金属形态转化为易溶解的形态,或者通过与土壤中的重金属离子形成络合物,而提高土壤重金属的生物有效性^[6],提高重金属的转运系数,进而提高植物修复效果^[17]。为此,在总结前人经验的基础上,以作物生长进程为切入点,

收稿日期:2016-09-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800704);公益性行业(农业)科研专项(201203077)

作者简介:马欢欢(1987-),女,河南新乡人。硕士,主要从事水资源与水环境研究。E-mail: huanhuanma6@163.com

通信作者:乔冬梅(1978-),女,内蒙古包头人。副研究员,硕士生导师,博士,主要从事农业水土环境研究。E-mail: qiaodongmei78@163.com

研究 20 mg/kg 的 Cd 胁迫下,在油葵不同生长阶段加入不同质量摩尔浓度的柠檬酸,分析土壤中镉不同赋存形态、生物可利用系数、富集系数以及转运系数,旨在探索柠檬酸在油葵不同生长阶段对重金属镉的诱导机理,揭示柠檬酸诱导敏感阶段,为重金属污染土壤的植物修复研究提供一定理论指导。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试材料为油葵(先瑞2号),供试土壤为砂壤土,取自中国农业科学院农田灌溉研究所洪门试验田表层(0~20 cm),室内风干后过2 mm 尼龙筛,施入尿素、磷酸二氢钾,硝酸钾作为底肥,除底肥外,不添加其他肥料。混合均匀后,放置平衡1周,通风处晾干,备用。经颗粒分析,土壤粒径小于0.002 mm 的占11.53%,粒径在0.002~0.05 mm 之间的占75.37%,粒径大于0.05 mm 的占13.10%。土壤体积质量为1.39 g/cm³,田间持水率(质量)为24%,土壤全Cd量为0.838 mg/kg, TN量为1.14 g/kg, TP量为0.63 g/kg,含K量为0.086 g/kg。

1.2 试验设计

加入有机酸类型柠檬酸,柠檬酸质量摩尔浓度为1、2、3、4、5、6 mmol/kg,分别在油葵生长20、30、40、50 d 时加入柠檬酸;设1个空白对照(不添加柠檬酸),每个处理重复3次。

试验设计重金属Cd质量分数为20 mg/kg,所有供试土壤中重金属镉以水溶液的形式喷洒入土壤中,并进行充分搅拌混合,熟化6个月。选取完整、健康、饱满的油葵种子,用0.1%的HgCl₂消毒5 min,去离子水反复冲洗,之后播种于塑料花盆,室温条件下培养。于2014年10月2日播种,10月6日出苗,除对照不加柠檬酸外,其他处理分别于10月26日、11月6日、11月16日、11月26日加入不同质量摩尔浓度的柠檬酸。于2015年1月9日收获。

1.3 测定指标及方法

收获后,将油葵根、茎和叶分别用自来水充分冲洗后,再用去离子水洗净,105 °C下杀青30 min,然后在75 °C下烘至恒质量,测定其干物质质量,将烘干的样品磨碎过60 目筛后,采用HNO₃-HClO₄(体积比为5:1)法消化测定植株含Cd量。采用AA-6300FG型原子吸收光谱仪测定土壤含Cd量,其中重金属形态采用 Tessier 同步提取法(Tessier 1979)^[18]。

采用统计分析软件DPS分析试验数据。

2 结果与分析

2.1 根际重金属镉赋存形态分析

对不同生长时间、不同质量摩尔浓度有机酸2个影响因素进行方差分析,结果见表1。从表1可以看出:

1)在油葵生长20 d加入6 mmol/kg 柠檬酸时,可交换态镉量显著低于对照,较对照组低43.95%;在油葵生长30 d加入1、3、4、5 mmol/kg 柠檬酸后可交换态镉量显著低于对照组,且分别低于对照组36.67%、54.19%、42.33%、51.63%;在油葵生长40、50 d加入不同质量摩尔浓度的柠檬酸,可交换态镉量与对照组没有显著性差异。在油葵生长50 d加入1 mmol/kg 柠檬酸后根际可交换态镉量显著高于在油葵生长20、30 d加入;在油葵生长40 d加入2、3、4、5 mmol/kg 柠檬酸后根际可交换态镉量均显著高于在油葵生长20、30 d加入;在油葵生长不同阶段加入6 mmol/kg 的柠檬酸,各处理间没有显著性差异,但仍表现出一定的规律性,即越早加入柠檬酸,根际可交换态镉量越低。可见,在油葵生长的早期加入柠檬酸有利于镉向交换态转化。

2)在油葵生长30 d加入4、6 mmol/kg 柠檬酸后碳酸盐结合态镉量显著高于对照组,且分别高于对照组131.94%、118.67%;在油葵生长20、40、50 d加入不同质量摩尔浓度的柠檬酸后碳酸盐结合态镉量与对照组没有显著性差异,但仍表现出一定的趋势,即,加柠檬酸处理后,碳酸盐结合态镉量均高于对照组,且早期(油葵生长20、30 d)加入柠檬酸处理碳酸盐结合态镉量明显高于后期(油葵生长40、50 d)加入柠檬酸的处理。在油葵生长30 d加入4、6 mmol/kg 柠檬酸后碳酸盐结合态镉量显著高于在油葵生长40、50 d加入;在油葵生长不同阶段加入1、2、3、5 mmol/kg 的柠檬酸后,各处理间没有显著性差异。可见,在油葵生长30 d加入4、6 mmol/kg 的柠檬酸最有利于镉转化为活性的碳酸盐结合态镉。

3)在油葵生长20、30 d加入1~6 mmol/kg 柠檬酸后,铁锰氧化物结合态镉量显著低于对照组;在油葵生长40、50 d加入不同质量摩尔浓度柠檬酸后,铁锰氧化物结合态镉量与对照组间没有显著性差异。对于

1~6 mmol/kg 的柠檬酸,均表现为:在油葵生长 20、30 d 加入的铁锰氧化物结合态镉量显著低于在油葵生长 40、50 d 加入。

4)油葵生长 30 d 加入 2 mmol/kg 柠檬酸处理后,有机物结合态镉量明显低于对照组,且低于对照组 42.86%;其他处理与对照组间无显著性差异。在油葵生长 20 d 加入 1 mmol/kg 柠檬酸后有机物结合态镉量显著低于在油葵生长 30、40 d 加入;在油葵生长 30 d 加入 2 mmol/kg 柠檬酸后有机物结合态镉量显著低于在油葵生长 40、50 d 加入;3、4、5、6 mmol/kg 的柠檬酸,在油葵生长 20、30 d 加入后有机物结合态镉量显著低于在油葵生长 40、50 d 加入。可见,在油葵生长早期加入低质量摩尔浓度的柠檬酸有利于有机物结合态镉转化为易于被植物吸收的活性镉。

5)加入柠檬酸后,残渣态镉量均低于对照组。油葵生长 20 d 加入 3、4 mmol/kg 柠檬酸,油葵生长 30 d 加入 1、3、4 mmol/kg 柠檬酸,油葵生长 40 d 加入 4、5 mmol/kg 柠檬酸,油葵生长 50 d 加入 1 mmol/kg 柠檬酸显著性低于对照组,且分别低于对照组 93.39%、100%、96.69%、100%、100%、95.87%、100%、97.52%。

6)油葵生长 30 d 加入 3 mmol/kg 柠檬酸处理后,总镉量显著低于其他处理。可见,油葵生长早期加入低质量摩尔浓度的柠檬酸更有利于植物对镉的吸收。

综上,柠檬酸的加入促进了非活性有机物结合态镉和残渣态镉向易于被植物体吸收富集的可交换态镉和铁锰氧化物结合态形态转化,促进了植物对镉的吸收富集,最优组合为在油葵生长的 20 d 和 30 d 加入 4 mmol/kg 的柠檬酸。

表 1 不同生长时间加入不同质量摩尔浓度柠檬酸处理后各种形态镉量的双因素方差分析结果 mg/kg

镉形态	生长时间/d	柠檬酸质量摩尔浓度/(mmol·kg ⁻¹)						
		0(对照)	1	2	3	4	5	6
可交换态镉量	20	4.30aA	3.60abBC	2.95abB	2.94abBC	2.73abB	3.13abAB	2.41bA
	30	4.30aA	2.68bC	3.15abB	1.97bC	2.48bB	2.08bB	3.16abA
	40	4.30abA	4.75abAB	5.40aA	5.10abA	4.63abA	4.30abA	3.60bA
	50	4.30abA	5.53aA	3.95bB	4.19abAB	3.92bAB	3.44bAB	3.77bA
碳酸盐结合态镉量	20	4.07aA	6.39aA	8.10aA	7.89aA	8.03aAB	6.21aA	8.18aAB
	30	4.07bA	7.47abA	6.09abA	6.60abA	9.44aA	6.91abA	8.90aA
	40	4.07aA	5.18aA	6.27aA	5.97aA	5.25aB	6.13aA	4.57aBC
	50	4.07aA	5.01aA	5.06aA	4.45aA	5.37aB	4.15aA	3.84aC
铁锰氧化物结合态镉量	20	3.53aA	1.89bB	2.16bB	2.15bB	2.34bC	2.39bB	1.75bC
	30	3.53aA	2.12bcB	2.23bcB	1.50cB	2.93abBC	1.95bcB	2.24bcBC
	40	3.53abA	3.39abA	4.16aA	4.02abA	3.76abAB	4.05abA	2.89bAB
	50	3.53abA	4.00abA	4.49abA	4.36abA	4.56aA	3.72abA	3.35bA
有机物结合态镉量	20	0.14aA	0.10aC	0.12aAB	0.12aC	0.11aB	0.11aB	0.11aB
	30	0.14abA	0.15aAB	0.08cB	0.12abC	0.10bcB	0.13abB	0.14abAB
	40	0.14bA	0.18abA	0.17abA	0.19aA	0.15abA	0.16abA	0.18abA
	50	0.14bA	0.14abBC	0.14abA	0.15abB	0.17abA	0.14abB	0.15abAB
残渣态镉量	20	1.21aA	0.67abA	0.43abA	0.08bA	0.00bA	0.27abAB	0.48abA
	30	1.21aA	0.04bA	0.13bA	0.00bA	0.00bA	1.18aA	0.95abA
	40	1.21aA	0.47abA	0.18bA	0.49abA	0.05bA	0.00bB	1.34aA
	50	1.21aA	0.03bA	0.67abA	0.92abA	0.54abA	1.13aA	0.91abA
总镉量	20	13.25aA	12.50aA	13.13aA	12.34aAB	11.51aA	10.63aA	12.24aA
	30	13.25abA	11.41abA	11.29abA	8.44bB	13.13abA	11.67abA	15.06aA
	40	13.25aA	13.86aA	15.84aA	15.71aA	12.90aA	13.30aA	12.54aA
	50	13.25aA	13.76aA	14.35aA	13.51aA	14.56aA	12.59aA	11.91aA

注 同行不同小写字母表示不同质量摩尔浓度间差异显著($P < 0.05$);同列不同大写字母表示不同生长阶段间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 生物可利用系数分析

对不同生长时间、有机酸质量摩尔浓度 2 个影响因素进行方差分析,结果见表 2。

表2 不同时间加入不同质量摩尔浓度柠檬酸处理下镉生物可利用系数双因素方差分析结果

生长时间/d	柠檬酸质量摩尔浓度/(mmol·kg ⁻¹)						
	0(对照)	1	2	3	4	5	6
20	0.63bA	0.80aAB	0.84aA	0.86aA	0.88aA	0.75abA	0.86aA
30	0.63cA	0.88aA	0.80abA	0.92aA	0.82abA	0.73bcA	0.79abA
40	0.63bA	0.71abB	0.74abAB	0.71abB	0.77abA	0.79aA	0.65bB
50	0.63abA	0.76aAB	0.63abB	0.65abB	0.64abB	0.61bB	0.66abB

从表2可以看出,在油葵生长20、30、40、50 d加入柠檬酸后镉的生物可利用系数均高于对照组,可见,柠檬酸提高了镉的生物可利用性。油葵生长20 d和30 d加入1、2、3、4、6 mmol/kg的柠檬酸处理后,镉的生物可利用性显著高于对照组,且分别高于对照组26.98%、33.33%、36.51%、39.68%、36.51%、39.68%、26.98%、46.03%、30.16%、25.40%;油葵生长40 d和50 d加入不同质量摩尔浓度的柠檬酸处理后,与对照组间没有显著性差异,但生物可利用系数均高于对照组。可见,在油葵生长早期(20~30 d)加入柠檬酸有利于镉的生物可利用性的提高。

2.3 富集系数

富集系数反映了植物对重金属的富集能力,富集系数越大,植物的富集能力越强,越有利于植物对重金属的提取和修复。不同条件下富集系数的方差分析结果见表3。

表3 不同生长时间加入不同质量摩尔浓度柠檬酸处理后富集系数双因素方差分析结果

生长时间/d	柠檬酸质量摩尔浓度/(mmol·kg ⁻¹)						
	对照	1	2	3	4	5	6
20	0.41bA	0.53abB	0.56abB	0.57aA	0.57aA	0.55abA	0.59aA
30	0.41aA	0.52aB	0.56aB	0.54aA	0.54aA	0.54aA	0.56aA
40	0.41cA	0.74aA	0.57bB	0.56bA	0.58bA	0.57bA	0.57bA
50	0.41bA	0.68aA	0.69aA	0.61aA	0.58aA	0.61aA	0.63aA

从表3可以看出,在油葵生长不同阶段加入柠檬酸处理后,富集系数均大于对照组。而且在油葵生长40、50 d加入有机酸后的富集系数明显高于油葵生长20、30 d加入柠檬酸的处理;在油葵生长40、50 d加入1 mmol/kg的柠檬酸处理后,富集系数均显对照组,且分别高于对照组80.49%、65.85%、68.29%。对于1~6 mmol/kg的柠檬酸,均表现出在油葵生长40、50 d加入后富集系数显著高于在油葵生长20、30 d加入。可见,在油葵生长后期(40、50 d)加入低质量摩尔浓度的柠檬酸更有利于植物对镉的吸收,有利于富集系数的提高。

2.4 转运系数

转运系数代表植物对重金属由地下部分转移到地上部分的能力。不同条件下转运系数方差分析结果见表4。

表4 不同生长时间加入不同质量摩尔浓度柠檬酸处理后转运系数双因素方差分析结果

生长时间/d	有机酸质量摩尔浓度/(mmol·kg ⁻¹)						
	对照	1	2	3	4	5	6
20	0.98aA	0.86aA	0.74aA	0.95aAB	0.81aB	1.03aAB	0.78aB
30	0.98aA	0.86aA	0.76aA	0.71aB	1.16aAB	0.81aB	0.84aB
40	0.98abA	0.77bA	1.11abA	0.94abAB	1.25aA	1.17abAB	1.14abB
50	0.98bA	1.18abA	0.97bA	1.30abA	1.40abA	1.40abA	1.63aA

从表4可以看出,油葵生长50 d时加入6 mmol/kg的柠檬酸与对照组间存在显著性差异。其他各处理转运系数与对照组间不存在显著性差异,但在油葵生长后期(40~50 d)加入不同质量摩尔浓度柠檬酸处理后,转运系数明显大于在油葵生长前期(20~30 d)加入柠檬酸的处理。尤其是油葵生长50 d时加入不同质量摩尔浓度柠檬酸处理后转运系数均大于1,而且随着柠檬酸质量摩尔浓度的增大,转运系数也不断增大。综上所述,在油葵生长50 d加入高质量摩尔浓度(4~6 mmol/kg)的柠檬酸对转运系数的提高有一定促进作用。

3 讨论

有机酸对重金属镉的吸收是促进还是抑制,至今尚无明确报道。陈英旭等^[19]认为有机酸可能抑制植物对重金属的吸收。也有学者认为有机酸能促进植物对重金属镉的吸收^[20]。

在油葵生长20、30 d加入柠檬酸后生物可利用系数明显高于在油葵生长40、50 d加入柠檬酸,说明在油葵生长阶段中,早加入柠檬酸可能比晚加入柠檬酸更有利于镉生物可利用性的提高。在试验范围内,几乎所有质量摩尔浓度的柠檬酸均表现出比较好的效果。这可能是因为柠檬酸是三元酸,能更好地和镉形成被植物吸收的络合物。

在油葵不同生长时间加入不同质量摩尔浓度的柠檬酸后,虽然油葵没有达到超富集植物的阈值要求,但镉的富集系数均明显高于对照,说明柠檬酸的加入在一定程度上促进了油葵对镉的吸收。在油葵生长40、50 d加入1 mmol/kg的柠檬酸能显著促进植物对镉的富集,可能因为在油葵生长后期的根际环境中存在更多的是难溶性的镉,使低质量摩尔浓度的柠檬酸更能发挥自身优势,促进难溶的镉转化为易溶于水的镉而被植物吸收利用。

在油葵生长后期加入高质量摩尔浓度的柠檬酸后重金属镉的转运系数均高于对照,而郑淑云^[21]研究报道,有机酸降低了镉的生物可利用性,柠檬酸降低了镉向芥菜地上部分的迁移,这可能是由于选择的作物不同而造成的。在油葵生长50 d加入4~6 mmol/kg的柠檬酸能显著促进镉由地下部分向地上部分的转移,这与梁彦秋等^[20]的研究结果一致。这可能是因为油葵生长50 d根部富集镉达到一定程度,柠檬酸又是三元酸,减弱了根部重金属离子的专性吸附以及电性吸附,促使重金属离子由根部向地上部分转移。

4 结论

- 1)在油葵生长的早期(20、30 d)加入柠檬酸能显著提高镉的生物可利用性。
- 2)在油葵生长的40、50 d时加入1 mmol/kg的柠檬酸可使油葵的富集效果达到最优。
- 3)在油葵生长的50 d时加入4~6 mmol/kg的柠檬酸更有利于镉由地下部分转移到地上部分。

参考文献:

- [1] SATARUG S, BAKER J R, URBENJAPOL S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in nonoccupationally exposed population[J]. *Toxicology Letters*, 2003, 137: 65-83.
- [2] WANG Z X, HU X B, XU Z C, et al. Cadmium in agricultural soils, vegetables and rice and potential health risk in vicinity of Dabaoshan Mine in Shaoguan[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2014, 21:2 004-2 010.
- [3] 黄长干, 邱业先. 植物对环境重金属污染的修复技术研究进展[J]. *江西农业大学学报*, 2003, 25(5):676-680.
- [4] 魏树和, 周启星, 王新. 18种杂草对重金属的超积累特性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2):152-159.
- [5] SALT D E, SMITH R D, RASKIN I. Phytoremediation[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49(1): 643-648.
- [6] MACNAIR M R. Plants that hyperaccumulate heavy metals: Their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining[M]. New York: CAB International, 1998.
- [7] STANHOPE K G, YOUNG S D, HUTCHINSON J J. Use of isotopic dilution techniques to assess the mobilization of nonlabile Cd by chelating agents in phytoremediation[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(19): 4123-4127.
- [8] 吴龙华, 骆永明. 铜污染旱地红壤的络合诱导植物修复作用[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(3): 435-438.
- [9] 杨仁斌, 曾清如, 周细红, 等. 植物根系分泌物对铅锌尾矿污染土壤中重金属的活化效应[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(3): 152-155.
- [10] HUANG J W, BLAYLOCK M J, KAPULNIK Y, et al. Phytoremediation of uranium contaminated soils: role of organic acids in triggering uranium hyper-accumulation in plants [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32 (13): 2 004-2 008.
- [11] 常学秀, 段昌群, 王焕校. 根分泌作用与植物对金属毒害的抗性[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2):315-320.
- [12] MCGRATH S P, LOMBI E, GRAY C W, et al. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1): 115-125.
- [13] CIESLINSKI G, VAN REES K C J, SZMIGIELSKA A M, et al. Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation[J]. *Plant Soil*, 1998, 203(1): 109-117.
- [14] YANAI J, ZHAO F J, MCGRATH S P, et al. Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(1): 167-175.
- [15] 包姣, 韦惠琴, 赵秀兰. 低分子量有机酸强化烟草修复镉污染土壤的试用性研究[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 265-270.

- [16] PEDRON F, PETRUZZELLIG, BARBAFIERI M, et al. Strategies to use phytoextraction in very acidic soil contaminated by heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2009, 75: 808-814.
- [17] MCGRATH S P, ZHAO F J, LOMBI E. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 2001, 232: 207-214.
- [18] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-850.
- [19] 陈英旭, 林琦, 陆芳, 等. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(4): 467-472.
- [20] 梁彦秋, 潘伟, 刘婷婷, 等. 有机酸在修复Cd污染土壤中的作用研究[J]. *环境科学与管理*, 2006, 31(8):76-78.
- [21] 郑淑云. 有机酸对土壤-植物系统中外源铅镉的化学行为及植物效应[D]. 天津: 天津理工大学, 2007.

Bioavailability of Cadmium to Oil Sunflower after Addition of Organic Acids

MA Huanhuan¹, QIAO Dongmei^{1,2}, QI Xuebin^{1,2}, HU Chao^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City Henan Province, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Pot experiments grown with oil sunflower were conducted to investigate the impact of citric acid on bioavailability of cadmium. Citric acid at concentrations of 1, 2, 3, 4, 5 and 6 mmol/kg was added to the pots 20, 30, 40, 50 d after the sunflowers were planted. The results showed that citric acid enhanced the bioavailability of cadmium. Adding citric acid 20 d and 30 d after the planting was most efficient to increase the bioavailability of cadmium. The accumulation coefficient of cadmium in the plant under all citric acid treatments was higher than that in the control, peaking by adding 1 mmol/kg citric acid after the plant grew 40 d or 50 d. The transfer coefficient was maximum by adding 4, 5 and 6 mmol/kg citric acid after the plant grew 50 d. Organic acids can enhance the movement of cadmium from the below-ground to the above-ground. In conclusion, our results indicated that adding citric acid at concentration of 1, 2, 3, 4, 5 and 6 mmol/kg after plant grew 20 d and 30 d, then adding another 1 mmol/kg citric acid when plant was 40 d, and finally adding a further 4~6 mmol/kg citric acid at 50 d considerably improved the uptake of cadmium by oil sunflower.

Key words: organic acid; cadmium; canopy; accumulation

责任编辑: 刘春成