

# 土壤添加剂对蜈蚣草吸收转运铅、镉的影响

杨树深<sup>1,2</sup> 杨军<sup>2\*</sup> 杨俊兴<sup>2</sup> 万小铭<sup>2</sup> 雷梅<sup>2</sup> 陈同斌<sup>2</sup> 刘树庆<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; <sup>2</sup>中国科学院地理科学与资源研究所环境修复与资源工程研究室, 北京 100101)

**摘要** 通过盆栽试验研究了磷酸二氢铵、柠檬酸与乙二胺四乙酸(EDTA)对蜈蚣草在 Pb-Cd 复合污染的 2 种北方典型土壤(潮土和潮褐土)中吸收转运 Pb、Cd 的影响。结果表明, EDTA 显著提高了蜈蚣草体内 Pb 的浓度与积累量, 其中羽叶的 Pb 浓度在潮土与潮褐土中分别为对照的 33.9 和 5.97 倍, 积累量分别为对照的 9.22 与 1.18 倍。EDTA 也显著提高了蜈蚣草体内 Cd 的浓度, 其中羽叶 Cd 的浓度分别为对照的 9.16 和 2.40 倍; 而对 Cd 的积累无促进作用。磷酸二氢铵与柠檬酸在 2 种土壤中对蜈蚣草吸收富集 Pb、Cd 均无促进作用。此外, 磷酸二氢铵显著促进了蜈蚣草的生长; 而 EDTA 显著降低了蜈蚣草的生物量。本研究可为蜈蚣草应用于北方 Pb-Cd 复合污染土壤修复和应用土壤添加剂来提高其修复效率提供理论依据。

**关键词** 蜈蚣草; 铅; EDTA; 柠檬酸; 镉

**Effects of soil additives on the uptake and translocation of lead and cadmium by *Pteris vittata* L.** YANG Shu-shen<sup>1,2</sup>, YANG Jun<sup>2\*</sup>, YANG Jun-xing<sup>2</sup>, WAN Xiao-ming<sup>2</sup>, LEI Mei<sup>2</sup>, CHEN Tong-bin<sup>2</sup>, LIU Shu-qing<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China; <sup>2</sup>Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China).

**Abstract:** Aiming to investigate the effects of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , citric acid and EDTA on the accumulation and translocation of lead (Pb) and cadmium (Cd) by *Pteris vittata* L., a pot experiment was conducted using two types of Pb and Cd co-contaminated soils (fluvo-aquic soil and meadow cinnamon soil) collected from northern China. Results indicated that EDTA significantly increased the aboveground Pb concentrations of *P. vittata* by 33.9 folds in fluvo-aquic soil and by 5.97 folds in meadow cinnamon soil, respectively. Due to the inhibition of EDTA on the biomass of *P. vittata*, the extent of increase in Pb amount accumulated in the aboveground part was less, being 9.22 folds in fluvo-aquic soil and 1.18 folds in meadow cinnamon soil, respectively. Similarly, EDTA increased the aboveground Cd concentrations of *P. vittata* by 9.16 folds in fluvo-aquic soil and 2.40 folds in meadow cinnamon soil respectively, but did not increase the amount of Cd accumulated in the aboveground parts of *P. vittata*. Neither  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  nor citric acid treatment increased the concentration of Pb and Cd in *P. vittata*. This study can provide a basis for the remediation of Pb-Cd co-contaminated soil.

**Key words:** *Pteris vittata*; lead; EDTA; citric acid; cadmium.

土壤重金属污染严重危害生态环境与人类健康, 已成为阻碍社会与经济发展的重要因素。因此土壤重金属污染治理是人们重点关注的问题之一。

近期我国颁布了《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”), 这将极大地推动土壤污染防治工作的开展与土壤污染修复产业的发展。在众多土壤重金属污染治理方法中, 植物提取技术因其环境友好、修复成本低等优势得到了大量关注(韦朝阳等,

2002)。

蜈蚣草是一种砷(As)的超富集植物,对As具有很强的耐性和富集能力(陈同斌等,2002)。研究发现,蜈蚣草对铅(Pb)、镉(Cd)也具有较强的耐性或富集能力(安志装等,2003;Xiao *et al.*,2008;谢景千等,2010;李影等,2016)。因此,蜈蚣草具有很大的潜力应用于复合污染土壤的修复过程。土壤添加剂可以提高植物修复的修复效率,缩短修复周期,一直是人们研究的热点问题(魏树和等,2004;鲍桐等,2010)。其中,高分子有机螯合物如EDTA与Pb、Cd等重金属具有很强的螯合能力,能够显著提高重金属在土壤中的移动性,因此常被用来促进植物对重金属的吸收(蒋先军等,2003;宋静等,2006;张熹等,2014)。小分子有机酸比如柠檬酸也能够与重金属发生螯合作用,且在环境中可降解,也引起了人们的关注。沈斌等(2015)发现,向土壤中添加柠檬酸可以提高鱼腥草对Pb、Cd的吸收富集能力,其中对Pb的富集能力大于Cd。对龙葵而言,刘萍等(2012)发现,添加柠檬酸可以促进龙葵对Cd的吸收,而对Pb的吸收效果不明显。施肥是传统农艺措施的重要组成部分,将肥料比如磷肥应用于重金属污染土壤的植物修复,可以促进植物生长,提高植物的生物量,对促进植物对重金属的积累具有重要意义(陈同斌等,2002;廖晓勇等,2008;黄化刚等,2012)。而利用土壤添加剂是否可以促进蜈蚣草对Pb、Cd的富集进而提高修复效率?关于这方面还鲜有报道,机理尚不明晰。此外,蜈蚣草主要分布在中国南方,其修复应用目前也主要集中在南方地区(廖晓勇等,2004;谢景千等,2010)。因此,摸清蜈蚣草在中国北方地区的生长规律及对重金属的吸收富集特性将对中国北方地区重金属污染土壤的植物修复具有重要意义。

因此,本研究采集了2种北方典型的Pb-Cd复合污染土壤,通过盆栽试验从土壤条件角度来初步探索蜈蚣草在我国北方地区的生长情况,并研究乙二胺四乙酸(EDTA)、柠檬酸、磷酸二氢铵对蜈蚣草吸收富集Pb、Cd的影响,以期为蜈蚣草应用于北方

地区Pb-Cd复合污染土壤修复以及应用土壤添加剂来提高其修复效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤取自河南省受大气沉降污染农田土壤(潮土)和河北省污水灌溉农田土壤(潮褐土),采自0~20 cm表层土壤。将采集的土壤样品自然风干,研磨,过20目筛后备用。供试土壤基本理化性质如表1所示。

1.1.2 供试蜈蚣草 取成熟蜈蚣草孢子与细沙混合均匀撒在装有基质的育苗盘中,保持基质湿润,控制光照时间为16 h/8 h(昼/夜),白天温度为25±1℃,夜间温度为20±1℃;相对湿度为70%。幼苗长至5 cm高,留长势较好的幼苗,待长至8 cm时,定苗,每个孔穴保证1~2株幼苗,以便于以后移栽。

1.2 试验方法

试验设8种处理:(1)磷酸二氢铵+潮土;(2)磷酸二氢铵+潮褐土;(3)柠檬酸+潮土;(4)柠檬酸+潮褐土;(5)EDTA+潮土;(6)EDTA+潮褐土;(7)去离子水+潮土;(8)去离子水+潮褐土。每种处理重复4次。每盆取过20目筛的土壤0.5 kg与浓度为10 mmol·L<sup>-1</sup>的处理溶液50 mL(合1 mmol·kg<sup>-1</sup>干土),充分混合,调节含水量为田间持水量的70%,恒湿恒温环境下平衡1周。后移栽入大小一致的蜈蚣草幼苗,每盆1株,控制每株带土量不超过20 g,温室内培养90天后收获。

于蜈蚣草移栽前与收获时取根际土壤,冷冻干燥,研磨,过100目筛,备用。收获前利用直尺测量蜈蚣草株高。同时收获蜈蚣草的地上部与根,地上部再分为羽叶与茎秆,自来水冲洗3遍,再用去离子水冲洗3遍,后于烘箱中105℃杀青30 min,再60℃烘至恒重,称重,粉碎,备用。

1.3 样品测定

1.3.1 蜈蚣草重金属含量 用硝酸-高氯酸(V/V=5:1)法进行消解。采用国家标准参比物质(GBW-07603)进行化学分析质量控制。采用原子吸收光

表 1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physico-chemical properties of tested soils

供试土壤	有效磷 (mg·kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg·kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 (cmol·kg <sup>-1</sup> )	全氮 (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质 (g·kg <sup>-1</sup> )	pH
潮土	13.4	278	2.46	16.4	1.02	0.53	18.5	1.72	8.24
潮褐土	70.2	158	5.53	22.9	1.32	1.16	19.6	1.98	8.43

谱仪(Contr AA 700, Analytik Jena, 德国)测定 Pb、Cd 浓度。用浓度与1.2 部分得到的干重相乘得到蜈蚣草各部位的重金属积累量。

**1.3.2 土壤重金属含量** 采用硝酸-过氧化氢法消解(USEPA 3050B)土壤样品。采用国家标准土壤参比物质(GBW-07404)进行化学分析质量控制。采用原子吸收光谱仪测定 Pb、Cd 浓度。

**1.3.3 土壤有效态铅镉** 称取 2.00 g 土壤样品,加入 20 mL 浸提剂( $0.005\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  DTPA- $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  TEA- $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ ),在室温( $25\pm2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )条件下置于转速为  $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  振荡机上振荡 2 h,振荡结束后立即过滤,取滤液采用原子吸收光谱仪测定 Pb、Cd 浓度。

**1.3.4 土壤铅镉形态** 采用 Tessier 五步连续浸提法分析土壤铅、镉的化学形态(Tessier *et al.*, 1979)。提取形态分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰结合态、有机结合态和残渣态。

#### 1.4 数据处理

采用 Excel、SPSS 16.0、Origin 8.0 软件处理试验数据和绘制相关图表。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同添加剂对蜈蚣草生物量的影响

表 2 为 3 种添加剂在 2 种土壤中对蜈蚣草生长的影响。磷酸二氢铵处理蜈蚣草的株高、羽叶干重与茎秆干重在 2 种土壤中均显著高于对照,其中蜈蚣草的株高比对照分别提高了 53.1% 和 55.4%。EDTA 处理的蜈蚣草的株高、羽叶干重与茎秆干重在 2 种土壤中均显著低于对照,其中蜈蚣草的株高分别为对照的 58.6% 和 36.9%。柠檬酸对蜈蚣草生物量的影响效果在 2 种土壤中有所差异。在潮土中柠檬酸处理的蜈蚣草的株高、羽叶干重与茎秆干重与对照无显著差异;而在潮褐土中蜈蚣草的株高与茎秆干重显著高于对照,但低于磷酸二氢铵处理。

#### 2.2 不同添加剂对蜈蚣草体内 Pb、Cd 浓度的影响

表 2 不同添加剂对蜈蚣草株高与干重的影响

Table 2 Effect of soil additives on height and dry weight of *Pteris vittata* L.

添加剂	株高(cm)		羽叶干重( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )		茎秆干重( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )	
	潮土	潮褐土	潮土	潮褐土	潮土	潮褐土
对照	25.6±0.4b	27.1±1.4c	1.31±0.40b	1.42±0.13b	3.80±0.90b	3.48±0.28b
磷酸二氢铵	39.3±0.3a	42.1±0.6a	2.11±0.20a	2.22±0.11a	5.25±0.23a	4.17±0.58a
柠檬酸	24.4±0.4b	31.1±0.1b	1.38±0.38b	1.60±0.15b	4.35±0.38ab	4.10±0.10a
EDTA	15.0±0.1c	10.0±0.1d	0.33±0.01c	0.36±0.01c	0.74±0.03c	0.61±0.01c

表中数据为 4 次重复平均值±标准差,不同字母表示处理间差异达到了显著性水平( $P<0.05$ )。下同。

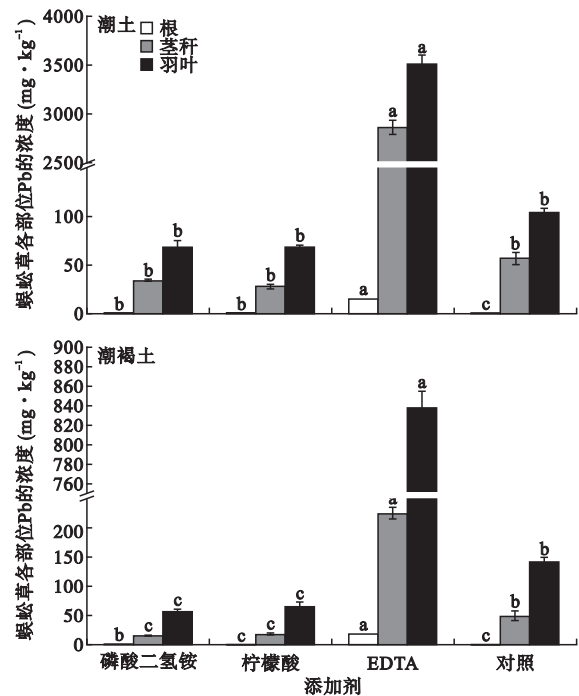


图 1 蜈蚣草各部位 Pb 的浓度  
Fig.1 Lead concentration in organs of *Pteris vittata* L.  
不同字母表示处理间差异达到了显著性水平( $P<0.05$ )。下同。

#### 2.2.1 不同添加剂对蜈蚣草体内 Pb 浓度的影响

由图 1 可知,Pb 在蜈蚣草体内的分布情况为:羽叶>茎秆>根。添加 EDTA 极显著地提高了蜈蚣草的羽叶、茎秆与根的 Pb 浓度,其中蜈蚣草羽叶的 Pb 浓度在潮土与潮褐土中分别高达 3510 与 838  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别为对照的 33.9 倍和 5.97 倍。磷酸二氢铵与柠檬酸处理的蜈蚣草的茎秆与羽叶的 Pb 浓度在潮土中均低于对照但差异不显著,而在潮褐土中显著低于对照。

#### 2.2.2 不同添加剂对蜈蚣草体内 Cd 浓度的影响

由图 2 可知,Cd 在蜈蚣草体内的分布情况会随添加剂的种类与土壤的类型而有所差异。磷酸二氢铵与柠檬酸处理的蜈蚣草体内 Cd 的分布情况为茎秆>羽叶>根;EDTA 为羽叶>茎秆>根;对照处理在潮土中为茎秆>羽叶>根,在潮褐土中为羽叶>茎秆>根。

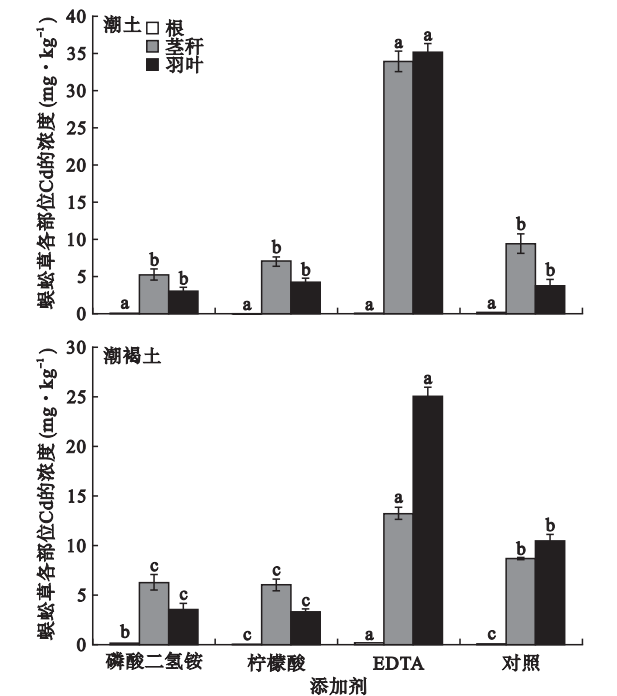


图2 蜈蚣草各部位 Cd 的浓度  
Fig.2 Cadmium concentration in organs of *Pteris vittata* L.

EDTA 显著提高了蜈蚣草茎秆与羽叶的 Cd 的浓度, 其中羽叶 Cd 的浓度在潮土和潮褐土中分别 35.1 和 25.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 分别为对照的 9.16 倍和 2.40 倍。磷酸二氢铵与柠檬酸对蜈蚣草茎秆与羽叶的 Cd 浓度的影响效果在 2 种土壤中有所不同。在潮土中, 磷酸二氢铵与柠檬酸处理的茎秆与羽叶的 Cd 浓度与对照均无明显差异, 而在潮褐土中均显著低于对照。

2.3 不同添加剂对蜈蚣草体内 Pb、Cd 积累量的影响

2.3.1 不同添加剂对蜈蚣草体内 Pb 积累量的影响 由图 3 可见, Pb 在蜈蚣草地上部各部位的积累情况因土壤类型而有所不同, 在潮土中为: 茎秆>羽叶, 在潮褐土中为: 羽叶>茎秆。在 3 种添加剂和对照处理中, EDTA 处理的地上部 Pb 的积累量在潮土与潮褐土中均为最高, 分别高达 3253 和 434  $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 显著高于对照, 分别为对照的 9.21 倍和 1.78 倍; 柠檬酸处理的地上部 Pb 的积累量在潮土和潮褐土中均显著低于对照, 分别为对照的 61.7% 和 49.5%; 磷酸二氢铵处理地上部 Pb 的积累量在潮土中与对照无显著差异, 在潮褐土中显著低于对照, 为对照的 53.3%。

2.3.2 不同添加剂对蜈蚣草体内 Cd 积累量的影响 由图 4 可知, 除潮褐土的 EDTA 处理外, Cd 在蜈蚣草地上部各部位的积累情况为: 茎秆>羽叶。在

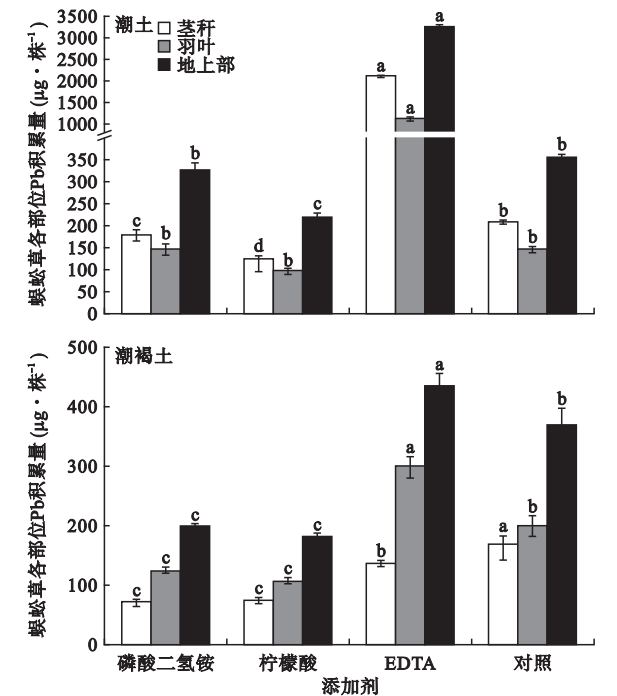


图3 蜈蚣草各部位 Pb 积累量  
Fig.3 Amount of lead uptake in organs of *Pteris vittata* L.

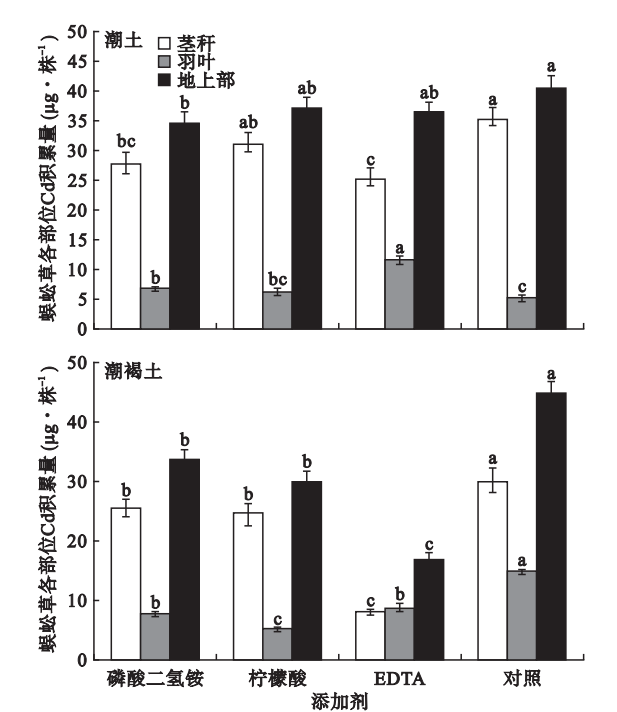


图4 蜈蚣草各部位 Cd 积累量  
Fig.4 Amount of cadmium uptake in organs of *Pteris vittata* L.

潮土中茎秆 Cd 的积累量为羽叶的 2.17~5.05 倍, 在潮褐土中 (EDTA 除外) 为 2.02~4.69 倍。使用添加剂并没有提高蜈蚣草地上部 Cd 的积累量。在潮土



中 4 种处理的蜈蚣草地上部 Cd 的积累量顺序为:对照>柠檬酸、EDTA>磷酸二氢铵,其中柠檬酸、EDTA 处理与对照无显著差异,磷酸二氢铵处理显著低于对照,为对照的 85.0%。在潮褐土中 4 种处理的蜈蚣草地上部 Cd 的积累量顺序为:对照>磷酸二氢铵,柠檬酸>EDTA,3 种添加剂处理的地上部 Cd 积累量均显著低于对照,其中 EDTA 处理为对照的 37.7%。

2.4 不同添加剂对土壤有效态 Pb、Cd 含量的影响

从表 3 可以看出,添加 EDTA 极为显著地提高了土壤有效态 Pb 的含量,在潮土和潮褐土中分别为对照的 131 倍和 174 倍。而磷酸二氢铵与柠檬酸对土壤有效态 Pb 无显著影响。磷酸二氢铵、柠檬酸与 EDTA 对土壤有效态 Cd 含量的影响不明显,只有潮土的 EDTA 处理显著高于对照,也仅为对照的 1.19 倍。

2.5 不同添加剂对土壤 Pb、Cd 形态的影响

2.5.1 不同添加剂对土壤 Pb 形态的影响 由表 4 可以看出,Pb 在 2 种土壤中主要以铁锰氧化物结合态的形式存在,分别占土壤总 Pb 的 65.8% 和 44.2%,可交换态与碳酸盐结合态浓度很低。添加 EDTA 显著减少了铁锰氧化物结合态、有机结合态与残渣态的比例,显著提高了可交换态与碳酸盐结合态的比例,其中可交换态在潮土中由0.23%提升

表 3 不同土壤添加剂的土壤有效态铅、镉含量 (mg · kg<sup>-1</sup>)  
Table 3 Available Pb and Cd concentrations of soils affected by soil additives

添加剂	有效态 Pb 浓度		有效态 Cd 浓度	
	潮土	潮褐土	潮土	潮褐土
磷酸二氢铵	1.72±0.19b	0.61±0.28b	1.44±0.29ab	2.02±0.28ab
柠檬酸	1.21±0.18b	0.42±0.08b	1.25±0.66b	1.75±0.30b
EDTA	145±39a	102±33a	1.55±0.89a	2.12±0.21a
对照	1.11±0.12b	0.59±0.13b	1.30±0.42b	1.87±0.31ab

表 4 蜈蚣草盆栽土壤铅化学形态变化 (%)  
Table 4 Contents of Pb chemical forms of soils treated by different soil additives

供试土壤	添加剂	可交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态
潮土	磷酸二氢铵	0.21	0.18	66.53	15.84	17.25
	柠檬酸	0.20	0.17	68.98	14.49	16.16
	EDTA	42.34	1.33	40.91	9.64	5.78
	对照	0.23	0.19	65.84	16.49	17.24
潮褐土	磷酸二氢铵	0.19	0.12	43.30	28.35	28.05
	柠檬酸	0.12	0.06	47.05	27.47	25.30
	EDTA	29.89	1.06	32.56	19.44	17.05
	对照	0.19	0.07	44.16	28.02	27.57

表 5 蜈蚣草盆栽土壤镉化学形态变化 (%)  
Table 5 Contents of Cd chemical forms of soils treated by different soil additives

供试土壤	添加剂	可交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态
潮土	磷酸二氢铵	24.24	1.06	38.49	5.57	30.64
	柠檬酸	24.30	0.86	43.76	5.60	25.47
	EDTA	43.46	0.69	20.60	7.10	28.16
	对照	20.37	0.90	31.62	4.21	42.90
潮褐土	磷酸二氢铵	22.86	1.10	29.43	4.77	41.84
	柠檬酸	25.60	0.44	36.95	7.06	29.96
	EDTA	40.01	1.71	16.97	2.33	38.97
	对照	23.02	0.87	28.24	4.45	43.43

为 42.3%,在潮褐土中由 0.19% 提升为 29.9%。磷酸二氢铵与柠檬酸对 2 种土壤的 Pb 的形态无明显影响。

2.5.2 不同添加剂对土壤中 Cd 形态的影响 由表 5 可以看出,Cd 在 2 种土壤中主要以可交换态、铁锰氧化物结合态与残渣态的形式存在,这 3 种形态在潮土和潮褐土中分别占总 Cd 的 94.9% 和 94.7%。添加 EDTA 在 2 种土壤中均显著降低 Cd 的铁锰氧化物结合态与残渣态的比例,显著提高可交换态的比例。添加柠檬酸在 2 种土壤中均显著降低了 Cd 的残渣态的比例,显著提高了铁锰氧化物结合态的比例,可交换态的比例也有所提高。磷酸二氢铵显著降低了潮土的残渣态的比例,提高了铁锰氧化物结合态与可交换态的比例;而对潮褐土的各形态 Cd 的百分比浓度无明显影响。

3 讨论

3.1 不同添加剂对蜈蚣草生长的影响

在 2 种土壤条件下,磷酸二氢铵提高了蜈蚣草的生物量,可能是因为磷酸二氢铵为蜈蚣草提供了磷素与氮素,促进了其生长。相反,EDTA 对蜈蚣草的生长具有抑制作用,这可能与 EDTA 对植物的毒害作用有关。安志装等(2003)发现,当土壤 Pb 添加量为 0~500 mg · kg<sup>-1</sup>时,蜈蚣草的生物量是增加的,说明蜈蚣草对 Pb 具有较强的耐性。此外,李影等(2016)通过盆栽试验发现,当土壤中 Cd 的添加量由 0 mg · kg<sup>-1</sup>增长到 200 mg · kg<sup>-1</sup>时,蜈蚣草的株高与地上部鲜重并没有显著降低,说明蜈蚣草对 <200 mg · kg<sup>-1</sup> 的 Cd 具有较强的耐性。而本研究中,2 种试验土壤 Cd 的浓度为 2.46 mg · kg<sup>-1</sup> 与 5.53 mg · kg<sup>-1</sup>,Pb 的浓度为 278 mg · kg<sup>-1</sup> 与 158

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,蜈蚣草在这些浓度下对 Pb、Cd 具有较强的耐性,所以 EDTA 处理的蜈蚣草生物量降低很可能是因为 EDTA 对蜈蚣草的毒害作用 (Shahid *et al.*, 2014)。Evangelou 等 (2007b) 发现,  $1.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 EDTA 能促进烟草的生长,而当添加量  $>6.25 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,烟草的生长才会受到抑制。张磊等 (2015) 发现,  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 EDTA 对棉花地上部的生物量未产生显著影响;而刘婕等 (2015) 发现,相同添加量的 EDTA 会显著抑制反枝苋的生长。可见,EDTA 对植物生长的影响还与 EDTA 的用量以及植物种类有关。因此,本研究 EDTA 处理的蜈蚣草生物量降低也可能是因为蜈蚣草对 EDTA 的耐受性较弱,  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 EDTA 已能够对蜈蚣草产生毒害作用。在接下来的工作中需对 EDTA 的用量进一步研究。而柠檬酸在 2 种土壤中对蜈蚣草的生长无明显影响。

此外,本研究证实,蜈蚣草在北方典型的污染土壤中也能正常生长。对照条件下,2 种土壤的蜈蚣草株高由实验开始时的 5 cm 分别长到了收获时的 25.6 与 27.1 cm,分别提高了 4.12 倍与 4.42 倍。在添加磷酸二氢铵后,株高提高了 6.86 倍和 7.42 倍。可见北方的污染土壤条件能够满足蜈蚣草的生长。这说明蜈蚣草在中国北方引种是可行的,这为蜈蚣草应用于北方污染土壤修复提供了依据。

### 3.2 不同添加剂对蜈蚣草吸收富集 Pb、Cd 的影响

EDTA、磷酸二氢铵与柠檬酸对蜈蚣草地上部 Pb 浓度的影响主要与 3 种添加剂处理的土壤 Pb 的生物有效性有关。土壤重金属的 DTPA 提取态含量与植物体内的重金属浓度具有显著的相关性,故 DTPA 提取态可以很好地反映土壤重金属的生物有效性 (顾国平等, 2006; 李亮亮等, 2008)。在本研究中,EDTA 显著提高了 2 种土壤 Pb 的 DTPA 提取态浓度,而磷酸二氢铵与柠檬酸对 2 种土壤 Pb 的 DTPA 提取态浓度无明显影响 (表 3)。同时,也可以从土壤 Pb 形态转化的角度解释。EDTA 显著提高了 2 种土壤中 Pb 的可交换态的比例,磷酸二氢铵与柠檬酸对 Pb 可交换态的百分比含量无显著影响 (表 4)。土壤中重金属的可交换态是最容易被植物吸收的形式 (刘恩玲等, 2006), 所以 EDTA 能够促进蜈蚣草对 Pb 的吸收,而磷酸二氢铵与柠檬酸无促进作用。在本研究中,EDTA 显著提高了 2 种土壤中蜈蚣草地上部 Pb 的积累量。柠檬酸在 2 种土壤中均显著降低了蜈蚣草地上部 Pb 的积累量。磷酸

二氢铵对潮土中蜈蚣草地上部 Pb 积累量无明显影响,但会显著减少潮褐土中蜈蚣草地上部 Pb 积累量。由此可以看出,EDTA 促进了蜈蚣草对 Pb 的积累,而磷酸二氢铵与 EDTA 无促进效果。因此,EDTA 可以成为促进蜈蚣草提取修复 Pb 污染土壤的活化剂的一种选择。但 EDTA 显著提高了 Pb 在土壤中的移动性,会造成 Pb 淋失进而污染地下水等环境风险 (吴龙华等, 2001; Jiang *et al.*, 2003)。所以 EDTA 的用量需要进一步考量和优化。

与 Pb 相反,2 种土壤 Cd 的 DTPA 提取态浓度不能合理的解释 3 种添加剂对蜈蚣草体内 Cd 浓度的影响。3 种添加剂与对照处理的土壤 Cd 的 DTPA 提取态浓度在潮土中为  $1.25 \sim 1.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在潮褐土中为  $1.75 \sim 2.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (表 4)。但 EDTA 处理的蜈蚣草羽叶 Cd 的浓度在 2 种土壤中分别为对照的 9.16 倍和 2.14 倍,土壤 Cd 的 DTPA 提取态浓度与蜈蚣草地上部 Cd 浓度没有显著的相关性。由此可见,本试验所用的 DTPA 提取剂不能充分反映本研究所用土壤的 Cd 的生物有效性, Ibaraki 等 (2005) 同样发现,在日本西南部的灰色低地土上 DTPA 提取态的 Cd 浓度与小麦籽粒中的 Cd 浓度不存在良好的相关性。而从土壤 Cd 的形态转化的角度看,EDTA 显著提高了 2 种土壤中 Cd 的可交换态的比例,磷酸二氢铵与柠檬酸对可交换态的影响较小 (表 5),相较于土壤有效态更能合理地解释添加剂对蜈蚣草地上部 Cd 浓度的影响。在本研究的 2 种土壤中,磷酸二氢铵、柠檬酸与 EDTA 处理的蜈蚣草地上部 Cd 的积累量均低于对照,其中潮褐土中 EDTA 处理的积累量最低,仅为对照的 37.7%。这主要是因为添加 EDTA 显著降低了蜈蚣草的生物量。可见,磷酸二氢铵、柠檬酸与 EDTA 并不能促进蜈蚣草对土壤 Cd 的积累。

### 3.3 不同添加剂对土壤中 Pb、Cd 生物有效性的影响

在本研究中,EDTA 提高了潮土与潮褐土土壤中 Pb、Cd 的生物有效性,促进了蜈蚣草对 Pb、Cd 的吸收。这主要是因为 EDTA 对 Pb、Cd 等重金属具有很强的络合作用,提高重金属在土壤中的移动性,并促进植物对重金属的吸收 (Lai *et al.*, 2005; Luo *et al.*, 2005; 张熹等, 2014)。柠檬酸也能够络合重金属,提高土壤中重金属的移动性 (Evangelou *et al.*, 2007a; Araújo *et al.*, 2010)。但在本研究中,柠檬酸对土壤中 Pb、Cd 的 DTPA 提取态及可交换态含量

并没有明显的影响,且没有促进蜈蚣草对 Pb、Cd 的吸收积累,与 Wu 等(2004)、刘萍等(2012)的研究结果相似。这可能因为柠檬酸是一种小分子有机酸,在土壤中被微生物降解从而失去了活化重金属的能力(Krishnamurti *et al.*, 1997; Hees *et al.*, 2002; Meers *et al.*, 2004)。可溶性磷酸盐能够与  $\text{Pb}^{2+}$  形成磷酸盐沉淀,是 Pb 在土壤中最稳定的结合形式,因此添加磷酸盐可以固化土壤中的 Pb,减少植物对 Pb 的吸收(Ruby *et al.*, 1994; Melamed *et al.*, 2003)。而在本研究中,添加磷酸二氢铵并没有对 2 种土壤 Pb 的 DTPA 提取态及可交换态含量造成明显影响。这可能是因为 2 种土壤中 Pb 的可交换态含量很低(潮土:0.23%,潮褐土:0.19%),能与磷酸二氢铵生成沉淀的  $\text{Pb}^{2+}$  量很少,故对 Pb 的固化效果不明显。磷酸盐也能与  $\text{Cd}^{2+}$  反应生成沉淀(Matusik *et al.*, 2008)。但在本研究中,添加磷酸二氢铵并没有显著降低土壤 Cd 的 DTPA 提取态及可交换态含量,这与陈苗苗等(2011)、邱静等(2009)的研究结果相似。而这可能与磷酸根离子与  $\text{Ca}^{2+}$  在土壤中的竞争吸附等机制有关,Thakur 等(2006)就此已进行过详细的探讨。

综上所述,蜈蚣草在北方典型污染土壤中可以正常生长。EDTA 能够显著提高蜈蚣草体内 Pb、Cd 的浓度,以及提高 Pb 的积累量,具有很大的潜力可以作为一种活化剂来促进蜈蚣草提取修复污染土壤中的 Pb。但  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 EDTA 会抑制蜈蚣草的生长,且 EDTA 可能造成其他环境风险,因此,其在实际修复过程中的用量需要进一步考量。磷酸二氢铵能够提高蜈蚣草的生物量,但对 Pb、Cd 的富集没有促进作用。柠檬酸对蜈蚣草的生长与对 Pb、Cd 的富集没有促进作用。EDTA 显著提高了土壤 Pb、Cd 的 DTPA 提取态与可交换态含量,而磷酸二氢铵与柠檬酸在本研究所采用的的潮土和潮褐土 Pb、Cd 的生物有效性无明显影响。如果将 EDTA 与磷酸二氢铵以合适的比例配合使用,是否会进一步促进蜈蚣对 Pb、Cd 的富集?此外,EDTA、柠檬酸等土壤添加剂对蜈蚣草对 As、Pb、Cd 的综合作用效果也将做进一步研究。

## 参考文献

安志装,陈同斌,雷梅,等. 2003. 蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力的研究. 生态学报, **23**(12): 2594-2598.  
鲍桐,孙丽娜,孙铁珩,等. 2010. 重金属污染土壤植物修

复技术强化措施研究进展. 环境科学与技术, **17**(2): 858-865.  
陈苗苗,徐明岗,周世伟,等. 2011. 不同磷酸盐对污染土壤中镉生物有效性的影响. 农业环境科学学报, **30**(2): 255-262.  
陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等. 2002. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. 科学通报, **47**(3): 207-210.  
顾国平,章明奎. 2006. 蔬菜地土壤有效态重金属提取方法的比较. 生态与农村环境学报, **22**(4): 67-70.  
黄化刚,李廷强,朱治强,等. 2012. 可溶性磷肥对重金属复合污染土壤东南景天提取锌/镉及其养分积累的影响. 植物营养与肥料学报, **18**(2): 382-389.  
蒋先军,骆永明,赵其国,等. 2003. 镉污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理. 土壤学报, **40**(2): 205-209.  
李影,刘鹏. 2016. Cd 胁迫对 3 种蕨类植物生理代谢及镉累积特性的影响. 水土保持学报, **30**(3): 128-133.  
李亮亮,张大庚,李天来,等. 2008. 土壤有效态重金属提取剂选择的研究. 土壤, **40**(5): 819-823.  
廖晓勇,陈同斌,谢华,等. 2004. 磷肥对砷污染土壤的植物修复效率的影响: 田间实例研究. 环境科学学报, **24**(3): 455-462.  
廖晓勇,陈同斌,阎秀兰,等. 2008. 不同磷肥对砷超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响. 环境科学, **29**(10): 2906-2911.  
刘恩玲,王亮. 2006. 土壤中重金属污染元素的形态分布及其生物有效性. 安徽农业科学, **34**(3): 6-9.  
刘婕,朱宇恩,刘娜,等. 2015. EDTA 和柠檬酸对反枝苋(*Amaranthus retroflexus* L.) Cu 迁移富集影响研究. 生态环境学报, **24**(8): 1399-1405.  
刘萍,翟崇治,余家燕,等. 2012. Cd、Pb 复合污染下柠檬酸对龙葵修复效率及抗氧化酶的影响. 环境工程学报, **6**(4): 1387-1392.  
邱静,李凝玉,胡群群,等. 2009. 石灰与磷肥对籽粒苋吸收镉的影响. 生态环境学报, **18**(1): 187-192.  
沈斌,伍钧,孟晓霞,等. 2015. 柠檬酸对鱼腥草吸收累积铅锌矿区土壤中重金属的影响. 水土保持学报, **29**(3): 320-324.  
宋静,钟继承,吴龙华,等. 2006. EDTA 与 EDDS 螯合诱导印度芥菜吸收修复重金属复合污染土壤研究. 土壤, **38**(5): 619-625.  
韦朝阳,陈同斌. 2002. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状. 地球科学进展, **17**(6): 833-839.  
魏树和,周启星. 2004. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨. 生态学杂志, **23**(1): 65-72.  
吴龙华,骆永明,章海波. 2001. 有机络合强化植物修复的环境风险研究. I. EDTA 对复合污染土壤中 TOC 和重金属动态变化的影响. 土壤, **33**(4): 189-192.  
谢景千,雷梅,陈同斌,等. 2010. 蜈蚣草对污染土壤中 As、Pb、Zn、Cu 的原位去除效果. 环境科学学报, **30**(1): 165-171.  
张磊,张磊. 2015. 螯合剂强化棉花对镉污染土壤修复的初步研究. 水土保持学报, **29**(4): 321-326.  
张熹,何闪英,吴秋玲. 2014. EDTA 与 GA3 强化黑麦草修复 Cd 污染土壤及其解毒机制. 水土保持学报, **28**



- (5): 280–285.
- Araújo JDCTD. 2010. Phytoextraction of lead from soil from a battery recycling site: The use of citric acid and NTA. *Water, Air & Soil Pollution*, **211**: 113–120.
- Evangelou MWH, Ebel M, Schaeffer A. 2007a. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil: Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*, **68**: 989–1003.
- Evangelou MWH, Bauer U, Ebel M, *et al.* 2007b. The influence of EDDS and EDTA on the uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*. *Chemosphere*, **68**: 345–353.
- Hees PAWV, Jones DL, Godbold DL. 2002. Biodegradation of low molecular weight organic acids in coniferous forest podzolic soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 1261–1272.
- Ibaraki T, Kadoshige K, Murakami M. *et al.* 2005. Evaluation of extraction methods for plant-available soil cadmium to wheat by several extraction methods in cadmium-polluted paddy field. *Soil Science and Plant Nutrition*, **51**: 893–898.
- Jiang XJ, Luo YM, Zhao QG, *et al.* 2003. Soil Cd availability to Indian mustard and environmental risk following EDTA addition to Cd-contaminated soil. *Chemosphere*, **50**: 813–818.
- Krishnamurti GSR, Gieslinski G, Huang PM, *et al.* 1997. Kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids: Implication in cadmium availability. *Journal of Environmental Quality*, **26**: 271–277.
- Lai HY, Chen ZS. 2005. The EDTA effect on phytoextraction of single and combined metals-contaminated soils using rainbow pink (*Dianthus chinensis*). *Chemosphere*, **60**: 1062–1071.
- Luo C, Shen Z, Li X. 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere*, **59**: 1–11.
- Matusik J, Bajda T, Manecki M. 2008. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. *Journal of Hazardous Materials*, **152**: 1332–1339.
- Meers E, Hopgood M, Lesage E, *et al.* 2004. Enhanced phytoextraction: In search of EDTA alternatives. *International Journal of Phytoremediation*, **6**: 95–109.
- Melamed R, Cao X, Chen M, *et al.* 2003. Field assessment of lead immobilization in a contaminated soil after phosphate application. *Science of the Total Environment*, **305**: 117–127.
- Ruby MV, Davis A, Nicholson A. 1994. *In situ* formation of lead phosphates in soils as a method to immobilize lead. *Environmental Science & Technology*, **28**: 646–654.
- Shahid M, Austruy A, Echevarria G, *et al.* 2014. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: A review. *Soil & Sediment Contamination*, **23**: 389–416.
- Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, **51**: 844–851.
- Thakur SK, Tomar NK, Pandeya SB. 2006. Influence of phosphate on cadmium sorption by calcium carbonate. *Geoderma*, **130**: 240–249.
- Wu LH, Luo YM, Xing XR, *et al.* 2004. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **102**: 307–318.
- Xiao XY, Chen TB, An ZZ, *et al.* 2008. Potential of *Pteris vittata* L. for phytoremediation of sites co-contaminated with cadmium and arsenic: The tolerance and accumulation. *Journal of Environmental Sciences*, **20**: 62–67.
- 
- 作者简介 杨树深,男,1990年生,硕士研究生,主要从事重金属污染农田植物修复研究。E-mail: yangshuensaner@163.com
- 责任编辑 魏中青
-