

## 黄芥-螯合剂修复对土壤 Pb 和磷酸酶活性的影响

祝方\*, 张飞, 陈雨, 柴华

太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030024

**摘要:** 通过盆栽实验进行两种螯合剂(草酸、乙二胺四乙酸二钠(EDTA))诱导黄芥修复重金属 Pb 污染土壤, 探讨了土壤中 Pb 总量变化、黄芥生长及对土壤中磷酸酶活性和有效磷含量的影响, 并通过回归分析, 研究了 Pb 含量与磷酸酶活性和有效磷与磷酸酶活性的相关性。草酸和 EDTA 质量摩尔浓度分别为 2 和 5 mmol·kg<sup>-1</sup>, Pb 质量分数最低, 对土壤的修复效果好。草酸促进了黄芥的生长, 而 EDTA 降低了黄芥的生物量。草酸和 EDTA 诱导修复土壤, 对磷酸酶活性都有促进作用, 分别达到了 85.71%和 128.57%。加入 EDTA, 磷酸酶的活性随 Pb 质量分数的增加而减小。草酸和 EDTA 修复后, 土壤中有效磷的质量分数增加, 最大有效磷质量分数分别为 124.48 和 105.62 mg kg<sup>-1</sup>。在加入草酸后, 有效磷含量与磷酸酶的相关性呈现出极显著关系( $P<0.01$ ); 添加 EDTA, 两者呈正相关( $P=0.0883$ )。结果表明, EDTA 对 Pb 的活化能力强于草酸, EDTA 对酶活性的促进效果优于草酸, 在促进磷酸酶将不可利用的磷转化为有效态时, 草酸优于 EDTA。磷酸酶可作为评价草酸和 EDTA 修复重金属 Pb 污染土壤能力的重要指标。

**关键词:** 草酸; EDTA; 重金属 Pb; 土壤; 磷酸酶; 有效磷

**中图分类号:** X131

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2013) 07-1231-05

**引用格式:** 祝方, 张飞, 陈雨, 柴华. 黄芥-螯合剂修复对土壤 Pb 和磷酸酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1231-1235. ZHU Fang, ZHANG Fei, CHEN Yu, CHAI Hua. Effect of yellow mustard and chelating agents treatment on Pb content and phosphatase activity in the soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1231-1235.

重金属污染土壤的修复研究已经成为当前国内外研究的热点问题。污染土壤中的重金属, 一部分是以有效态的形式存在于土壤中, 但是大部分重金属还是以铁锰氧化态、残渣态等形态存在于土壤固相中, 并且很难被植物吸收<sup>[1]</sup>。土壤重金属的形态对螯合剂-植物联合修复重金属污染土壤和重金属的迁移都有着重要的意义<sup>[2]</sup>。单一的植物修复方法无法完全将污染物的浓度降低到土壤背景值。螯合剂能够与土壤中的重金属有效螯合, 改变重金属的形态, 增加可溶态的重金属浓度, 使其成为活化状态, 提高了重金属的生物有效性, 并促进植物对重金属的吸收<sup>[3-4]</sup>。EDTA 能有效地增溶重金属 Pb 并诱导植物提取 Pb<sup>[5]</sup>, 添加螯合剂影响了土壤中水溶态重金属的含量和各种酶的活性。土壤酶在土壤养分的转化、利用和循环等方面有重要作用<sup>[6]</sup>。土壤酶具有稳定、敏感的特性, 其活性大小能较准确的反映中土壤生化反应的方向和程度, 是探讨重金属污染效应的有效指标之一<sup>[7]</sup>。晋松等<sup>[8]</sup>研究表明对 Cu 污染敏感的土壤酶类依次为磷酸酶>蔗糖酶>脲酶>过氧化氢酶, 且磷酸酶可作为 Cu 污染土壤的检测指示酶。

EDTA 的施用可引起植物的生物量不同程度的降低<sup>[9-10]</sup>。植物体所需的氮素和磷素基本上依赖于土壤无机氮和有效磷的供给<sup>[11]</sup>, 但土壤中大部分有机磷和无机磷处于植物不能直接吸收和利用的形态<sup>[12]</sup>。土壤酶活性与土壤养分含量间相关性强<sup>[13]</sup>。无论是酸性磷酸酶还是碱性磷酸酶与土壤有效磷含量都有显著的相关性, 磷酸酶的产生可以一定程度上提高有效磷的含量<sup>[14]</sup>。有研究指出, 对于淋溶褐土、山地褐土及石灰性褐土来说, 碱性磷酸酶能促进有机磷的降解<sup>[15-17]</sup>, 从而可以提高土壤中有有效磷的含量。过量施用还可能导致重金属淋溶引起地下水污染<sup>[18]</sup>。因此, 研究螯合剂联合植物修复重金属污染土壤对土壤磷酸酶活性的影响及其与有效磷的关系有较强的实际意义。

到目前为止, 螯合剂诱导修复重金属 Pb 污染土壤方面的研究, 只是探讨了对植物生长或者生理特性的影响和对重金属的积累性<sup>[19-20]</sup>, 对土壤磷酸酶活性和有效磷的影响研究在国内外还鲜有报道。本文通过黄芥盆栽实验, 研究不同浓度的草酸和 EDTA 与黄芥联合修复对污染土壤中 Pb 总量和土壤中有有效磷和磷酸酶活性的影响及其相关

**基金项目:** 山西省基础研究计划项目 (2013011040-1); 山西省教育厅科技开发项目 (20090012)

**作者简介:** 祝方(1965年生), 女, 副教授, 博士, 主要从事污染土壤修复和土壤环境化学方面的研究。E-mail: zhufang@tyut.edu.cn

\*通信作者

**收稿日期:** 2013-01-09

性,为螯合剂-植物联合修复重金属Pb污染土壤提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用植物为四川黄芥。供试土壤取自太原市南郊污水灌溉区土壤,土壤类型属石灰性褐土,取土壤表层0~20 cm的土样。土样风干后,磨碎,过2 mm筛,常温保存备用。其基本理化性质如表1。

### 1.2 实验设计

试验设置两个螯合剂,分别有5个不同浓度的处理,此外还设置一个不加任何螯合剂的对照组CK。螯合剂草酸和乙二胺四乙酸二钠(EDTA)的浓度都设置5个浓度梯度,浓度为1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mmol·kg<sup>-1</sup>。

分别取土壤2 kg装入花盆中,其大小为20 cm×20 cm。调节土壤水分含量为田间持水量的60%~70%。平衡后,所有花盆中播种四川黄芥,待幼苗生长至适当大小时,间苗,每盆留3株。当黄芥生长2个月后,开始添加螯合剂,CK不加任何螯合剂,施加螯合剂2周后,收获植物,取根际土样测定。

### 1.3 样品分析与测定

#### 1.3.1 样品前处理

收获植物后,采集盆中的土样,风干后,磨碎,过0.149 mm筛,用于测定土壤重金属总量和土壤磷酸酶活性。

#### 1.3.2 Pb总量分析

土壤重金属Pb总量的测定采用浓HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>法消解,火焰原子吸收分光光度法测定。

#### 1.3.3 土壤酶活性测定方法

磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,以37℃培养12 h 1 g土壤中酚的毫克数表示,本实验采用pH 10.0的硼酸缓冲液提取,测定的是碱性磷酸酶活性。

#### 1.3.4 土壤中有效磷的测定方法

有效磷采用碳酸氢钠法。

#### 1.3.5 土壤酶活性定浓抑制率的计算

螯合剂修复对土壤酶活性的抑制或激活作用,可以采用酶活性抑制率(即定浓抑制率)来

进行表征,计算式<sup>[21]</sup>为:

酶活性抑制率=(1-处理样品的酶活性/对照样品的酶活性)×100%

### 1.4 数据处理

所有数据均采用SPSS 12.0和Microsoft Excel 2003进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属Pb总量对土壤磷酸酶活性的胁迫

#### 2.1.1 草酸修复后重金属Pb总量对土壤磷酸酶活性的影响

图1是草酸修复后土壤w(Pb总量)对土壤磷酸酶活性的影响。由图1可知,随着Pb质量分数的增加,磷酸酶活性先降低后增加,整体上磷酸酶的活性是逐渐加大的,并且在Pb质量分数为61.552 mg·kg<sup>-1</sup>,其活性最大。说明在草酸作用之后,虽然重金属Pb总量增加,但促进了磷酸酶活性,这可能是由于草酸本身对磷酸酶的活性的作用强于Pb对其的抑制作用。为了更好的讨论重金属Pb总量与酶活性的关系,以重金属Pb总量为x,酶活性为y作回归分析。草酸修复后,重金属Pb总量与磷酸酶活性的标准化回归方程分别为y=0.1355 x-1.3876。随着Pb含量的增加,土壤磷酸酶的活性呈现出递增趋势,促进了该酶的活性。但土壤磷酸酶的活性与重金属Pb总量是不显著的正相关关系(P=0.187>0.05)。

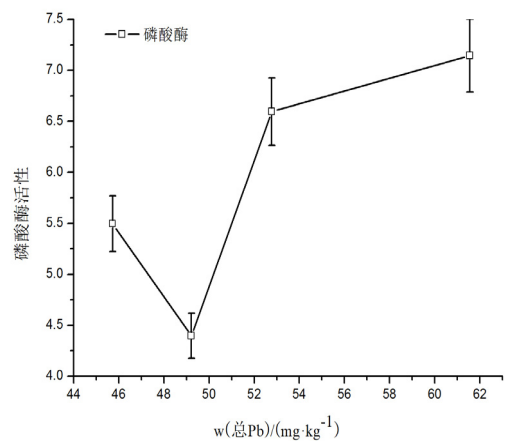


图1 草酸诱导下重金属Pb对磷酸酶活性的影响

Fig.1 Effect of heavy metal Pb on the phosphatase activity in the soil in the presence of oxalic acid

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soils in the experiment

指标	pH值	w(有机质)/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(全氮)/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(速效钾)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(有效磷)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(Pb)/(mg·kg <sup>-1</sup> )
数值	8.44	29.08	0.77	78.45	3.092	80.00

### 2.1.2 EDTA修复后重金属Pb总量对土壤磷酸酶活性的影响

图2显示了EDTA修复后重金属对土壤磷酸酶活性的影响。由图2可知, EDTA对磷酸酶活性的影响与草酸的影响相反, 低质量分数的重金属Pb对磷酸酶有较强促进作用。随着Pb质量分数的增加, 土壤磷酸酶的活性呈现出下降的趋势, 比 $w(\text{Pb})$ 总量为 $45.496 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的酶活性低。说明Pb质量分数越大, 对磷酸酶活性的抑制作用越强。草酸和EDTA分别修复土壤后, 该酶的活性对其响应不同, 表现出不仅重金属Pb影响酶活性, 同时螯合剂本身也对酶活性产生一定的影响。经过EDTA诱导修复后, 以重金属Pb总量为 $x$ , 酶活性为 $y$ 作回归分析。Pb总量与磷酸酶( $y$ )的标准化回归方程分别为:  $y=15.110-0.1426x$ 。重金属Pb总量与土壤磷酸酶活性呈极显著的负相关 ( $P=0.0006 < 0.01$ ), 抑制了该酶的活性。

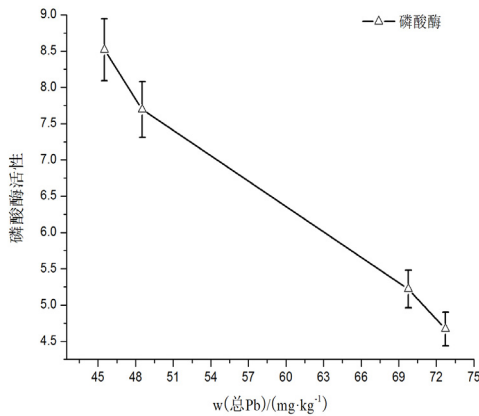


图2 EDTA 诱导下重金属 Pb 对土壤磷酸酶活性的影响

Fig.2 Effect of heavy metal Pb on the phosphatase activity in the soil in the presence of EDTA

### 2.1.3 两种螯合剂最佳处理效果比较

通过草酸和 EDTA 处理, 磷酸酶的活性都有一个最优值。图 3 比较了草酸和 EDTA 诱导联合黄芥修复重金属 Pb 污染土壤后对磷酸酶的最佳处理效果, 同时与空白 CK 做了比较。测得 CK 的磷酸酶活性值为 3.8473, 草酸和 EDTA 修复后分别为 7.1450 和 8.7939, 分别高出 CK 3.2977 和 4.9466, EDTA 的处理效果明显优于草酸。由此可知, 两种螯合剂对磷酸酶活性的影响效果是 EDTA 优于草酸, 因此若利用螯合剂修复重金属 Pb 污染土壤, 优先选择 EDTA, 同时该螯合剂不抑制磷酸酶的活性。螯合剂不仅间接通过影响重金属 Pb 的含量来影响土壤磷酸酶的活性, 而且其螯合剂本身对其活性也有一定程度的影响。

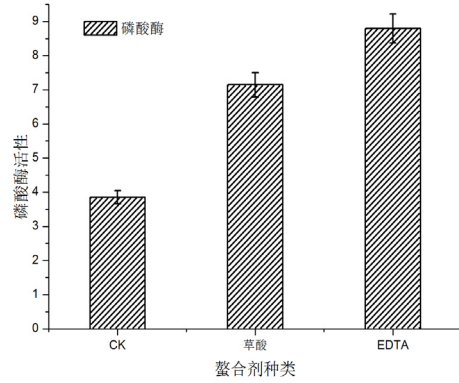


图3 最佳处理效果比较

Fig.3 Comparison of different chelator

### 2.2 螯合剂修复对土壤中重金属 Pb 总量的影响变化

图4显示了经过 $b$ (螯合剂)修复, 土壤 $w(\text{Pb})$ 总量的变化。由图4可知, 草酸浓度逐渐增大, 土壤中 $w(\text{Pb})$ 含量大体上呈先降低后增加的趋势, 在 $2 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 对 $w(\text{Pb})$ 的去除率达到 $42.84\%$ , Pb质量分数最低, 说明该浓度是草酸与黄芥联合处理Pb的最佳浓度。后续浓度下, Pb质量分数增加, 黄芥的生长并没有吸收更多的重金属。EDTA的添加使得土壤中Pb质量分数在低质量摩尔浓度EDTA诱导下急剧下降, 在 $5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Pb质量分数最少, 效果最优, 去除率达 $43.13\%$ 。当质量摩尔浓度在 $3 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上, Pb质量分数变化较小, 显示出EDTA在高质量摩尔浓度下诱导修复Pb污染土壤, Pb的质量分数已较为稳定。所以, 在考虑综合因素条件下,  $3 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是添加 $b$ (EDTA)的最优浓度。在低浓度条件下, 草酸的处理效果优于EDTA, 高浓度下EDTA强于草酸。

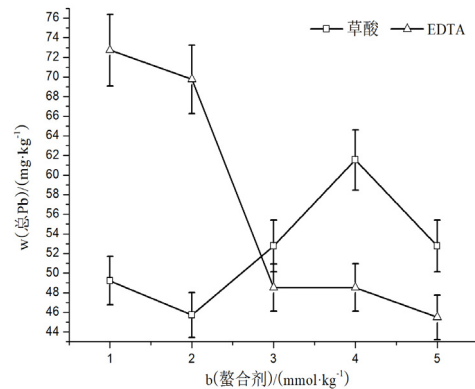


图4 施加螯合剂对重金属 Pb 总量的影响

Fig 4 Effect of chelator on the total heavy metal Pb

### 2.3 螯合剂修复对植物生物量的影响

螯合剂修复对黄芥生物量的影响可从表2得知。结果表明,当质量摩尔浓度为 $2 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,促进了黄芥的生长,其生物量质量为 $4.45 \text{ g}$ ,相较于其他浓度和空白CK,生物质量最高。当加入

表2 螯合剂添加量对黄芥生物量的影响

Table 2 Effect of the amount of chelating agents on brassica biomass

$b$ (螯合剂)/( $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	CK	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
草酸	3.23	2.86	4.45	3.78	3.27	1.93
EDTA	3.23	2.34	1.83	2.12	2.77	2.61

$1 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的草酸时,黄芥的生物量较低;当草酸质量摩尔浓度大于 $2 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤的酸度逐渐增加,导致重金属有效态浓度增加,进而也抑制了黄芥的生长,其生物质量逐渐递减,质量摩尔浓度为 $5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其生物质量达到最低。因此施用草酸的优选质量摩尔浓度为 $2 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。添加EDTA后,由表2可知,所有浓度下黄芥的生物量都比CK低,这可能是由于黄芥吸收了较多的游离态的Pb,黄芥的生长状况受到了抑制。说明EDTA对土壤中Pb的活化能力较强,EDTA与Pb形成水溶态的络合物存在与土壤中,易于黄芥吸收。高浓度的EDTA使得植物萎蔫、甚至死亡,表现出严重的生物毒性,因此在有效态Pb的胁迫下,黄芥的生长发育受到一定程度的抑制。低含量的草酸处理促使黄芥的生长状况良好,生物量较高,而高浓度的草酸则抑制了黄芥的生长。说明相比较于EDTA,草酸对Pb的活化能力较弱,虽然也使得土壤中有效态的Pb有所增加,但是没有EDTA的效果强。

### 2.4 两种螯合剂诱导对土壤磷酸酶活性的抑制率及土壤中有效磷含量

表3显示了草酸和EDTA修复后对磷酸酶,有

表3 添加螯合剂对土壤磷酸酶活性的抑制率及有效磷的影响

Table 3 Effect of chelating agents on inhibition of phosphatase activity and available phosphorus in the soil

螯合剂处理	磷酸酶活性	w(有效磷)	磷酸酶抑制率/%
CK	3.8473	57.99	0
草酸 1	4.3969	53.51	-14.29
草酸 2	5.4962	83.77	-42.86
草酸 3	6.5954	115.52	-71.43
草酸 4	7.1450	124.48	-85.71
草酸 5	4.9466	73.05	-28.57
EDTA 1	4.6718	59.07	-21.43
EDTA 2	5.2214	29.76	-35.72
EDTA 3	8.7939	84.31	-128.57
EDTA 4	7.6947	102.09	-100.00
EDTA 5	8.5191	105.62	-121.43

效磷含量的影响及对磷酸酶的抑制率。从表3可知,当草酸和EDTA的质量摩尔浓度分别为4和 $3 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,磷酸酶的活性最大,分别为7.1450和8.7939。对磷酸酶的抑制率范围分别为-14.29%~-85.71%和-21.43%~-128.57%,说明草酸和EDTA的处理对磷酸酶的活性都是促进作用,与不添加螯合剂的CK相比,激活了磷酸酶的活性。草酸和EDTA质量摩尔浓度分别为4和 $3 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 对磷酸酶的促进效果最强,分别达到85.71%和128.57%,同时说明EDTA的效果优于草酸,也间接反映出EDTA对Pb的活化能力强于草酸,能够将Pb转化为易于植物吸收的状态。

当草酸和EDTA质量摩尔浓度分别大于2和 $3 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤中有效磷的质量分数都增加,其中分别在4和 $3 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其质量分数最大,达到了124.48和105.62  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而且在此浓度下磷酸酶的活性也最大,可以得出,该磷酸酶能降解土壤中的不可利用的有机磷和无机磷,使其矿化,转化为能够被植物利用的有效态的磷。为了能够更好的描述磷酸酶活性与有效磷含量的关系,以磷酸酶活性为 $x$ ,以有效磷含量为 $y$ 作回归分析。草酸修复后,其标准化回归方程为: $y=2.2589+0.0384x$ ,有效磷含量与磷酸酶活性有极显著的正相关关系( $P=0.0003<0.01$ )。EDTA修复后,标准化回归方程为: $y=3.2258+0.0493x$ ,有效磷含量与磷酸酶活性的正相关关系不显著( $P=0.0883>0.05$ )。说明草酸修复后,磷酸酶能更好的催化土壤中的有机磷,将其转化为有效态。EDTA的作用虽然不显著,但也促进了磷酸酶的催化能力。显然,对于促进磷酸酶的催化能力,草酸优于EDTA。

### 3 结论

通过本实验研究分析,可以得出以下结论。

1) 添加草酸,随着重金属Pb含量的增加,磷酸酶活性先降低后增加,且此时磷酸酶活性与Pb含量关系不显著。EDTA施入土壤中,磷酸酶的活性由于Pb含量的增加而逐渐减小,磷酸酶活性与Pb含量呈现出极显著的负相关关系( $P<0.01$ )。

2) 经过不同浓度的螯合剂的修复,土壤中重金属Pb的含量得到了不同程度的改善。当 $b$ (草酸)和 $b$ (EDTA)分别在2和 $5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,处理结果最优,对土壤的改良作用较好。添加草酸可促进黄芥的生长,而EDTA则降低了黄芥的生物量水平。

3) 草酸和EDTA的添加,都相对的促进了磷酸酶的活性,促进效率最大分别达到了85.71%和128.57%。同时说明EDTA对重金属Pb的活化能力强于草酸,EDTA对酶的促进效果优于草酸。

4) 土壤中的磷酸酶能够促进有机磷的降解,从而增加了可被植物利用的有效磷的含量。草酸和EDTA修复后,磷酸酶使得土壤中的 $w(\text{有效磷})$ 增加,分别达到了124.48和105.62  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,并且两种螯合剂作用下两者之间的关系分别为极显著的正相关( $P<0.01$ )和不显著的正相关( $P=0.0883$ ),说明在促进磷酸酶将不可利用的磷转化为有效态时,草酸优于EDTA。磷酸酶可以作为螯合剂修复Pb污染土壤能力的重要指标之一。

#### 参考文献:

- [1] 唐世荣. 污染环境植物修复的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 185-186.
- [2] 杜志敏,郝建设,周静,等. 四种改良剂对Cu、Cd复合污染土壤中Cu、Cd形态和土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1507 - 1512.
- [3] SETH C S, MISRA V, SINGH R. R., et al. EDTA-enhanced lead phytoremediation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) hydroponic culture[J]. Plant Soil, 2011, 347(1/2):231-242.
- [4] 熊国焕,潘义宏,何艳明,等. 螯合剂对大叶井口边草Pb、Cd、As吸收性影响研究[J]. 土壤, 2012,44 (2): 282 - 289.
- [5] SAIFULLAH E, MEERS M, QADIR P, et al. EDTA-assisted Pb phytoextraction [J]. Chemosphere, 2009, 74(10):1279 - 1291.
- [6] 原海燕,佟海英,黄苏珍. 马蔺对铅尾砂土壤酶活性和铅形态的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1885 - 1890.
- [7] 孟庆峰,杨劲松,姚荣江,等. 单一及复合重金属污染对土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 545 - 550.
- [8] 晋松,吴克,俞志敏,等. 铜胁迫对白茅根际和非根际土壤酶活性影响的研究[J]. 土壤通报, 2011,42(4):937 - 941.
- [9] KOMÁREK M, TLUSTOS P, SZÁKOVÁ J, et al. The use of maize and poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soils[J]. Chemosphere, 2007, 67: 640-651.
- [10] FAZAL H, ASGHARI B, MICHAEL P F. The improved phytoextraction of lead (Pb) and the growth of maize (*Zea mays* L.): the role of plant growth regulators (GA3 and IAA) and EDTA alone and in combinations[J]. Chemosphere, 2010, 80(4):457 - 462.
- [11] 张宏,沈章军,陈政,等. 铜尾矿区9种优势植物体内重金属和氮磷含量研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1478 - 1484.
- [12] 钟传青,黄为一. 不同种类解磷微生物的溶磷效果及其磷酸酶活性的变化[J]. 土壤学报, 2005,42(2):286 - 294.
- [13] 秦嗣军,吕德国,李作轩,等. 樱桃根际土壤酶活性与土壤养分动态变化及其关系研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(6):1175 - 1178.
- [14] 耿玉清,白翠霞,赵广亮,等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报,2008,30(增2):139 - 143.
- [15] 陆欣,王申贵,王海洪. 山西五台山垂直带谱土壤磷酸酶活性与有机磷含量关系研究[J]. 土壤通报, 1995,26(4):159-161.
- [16] 宋丹,王吉磊. 外源植酸酶对土壤磷酸酶活性和有效磷含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009(5):15-17.
- [17] 吴强盛,夏仁学,邹英宁. 柑橘丛枝菌根真菌生长与根际有效磷和磷酸酶活性的相关性[J]. 应用生态学报, 2006,17(4):685-689.
- [18] 钟钊芝,王丹,徐长合,等. 螯合剂对铀镉污染土壤中蚕豆幼苗生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2011,30(4):639-644.
- [19] 丁竹红,胡忻,张宇峰. 螯合剂对小麦幼苗吸收金属以及土壤金属形态的效应[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 97-101.
- [20] SAIFULLAH E, MEERS M, QADIR P, et al. EDTA-assisted Pb phytoextraction [J]. Chemosphere, 2009, 74(10):1279-1291.
- [21] 宋静,钟继承,吴龙华,等. EDTA 与EDDS螯合诱导印度芥菜吸取修复重金属复合污染土壤研究[J]. 土壤, 2006, 38 (5): 619-625.
- [21] 卢显芝,金建华,郝建朝,等. 不同土层土壤酶活性对重金属汞和镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2009,28(9):1844-1848.

## Effect of yellow mustard and chelating agents treatment on Pb content and phosphatase activity in the soil

ZHU Fang\*, ZHANG Fei, CHEN Yu, CHAI Hua

College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

**Abstract:** In this article, pot experiments were carried out by oxalic acid and EDTA induced phyto-remediation of Pb contaminated soil by yellow mustard. Changes of Pb content, yellow mustard biomass, the effects of Pb content and yellow mustard biomass on phosphatase activity and phosphorus content in the polluted soil and the correlation between phosphatase activity and Pb content through regression analysis were investigated. When the concentration of oxalic acid and EDTA were 2 and 5  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, the concentration of Pb in the soil reached the lowest and had a better soil remediation result. The biomass of yellow mustard increased under adding oxalic acid and decreased under adding EDTA. Oxalic acid and EDTA induced phytoremediation could increase the activity of phosphatase which reached 85.71% and 128.57%, respectively. After adding EDTA, phosphatase activity decreased with increasing of Pb content. After oxalic acid and EDTA induced phytoremediation, the available phosphorus increased and the maximum content were 124.48 and 105.62  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. After the addition of oxalic acid, the available phosphorus and phosphatase showed a very significant relevance ( $P<0.01$ ). After adding EDTA, available phosphorus and phosphatase had a positive correlation ( $P=0.0883$ ). The activity of EDTA on Pb was stronger than that of oxalic acid, the phosphatase activity under EDTA was better than that under oxalic acid. Not Available phosphorus could be changed to available phosphorus by Phosphatase under Oxalic acid better than that under EDTA. The phosphatase activity could be used as an important indicator of evaluating the remediation ability of oxalic acid and EDTA based on Pb contaminated soil.

**Key words:** Oxalic acid; EDTA; Heavy metal Pb; Soil; phosphatase; available phosphorus