

潮褐土施用有机酸对油菜吸收 Cd Zn Pb 的影响

郭艳杰¹, 李博文¹, 谢建治¹, 金美玉¹, 杨 华²

(1. 河北农业大学资环学院, 河北 保定 071001; 2. 承德市环境监测站, 河北 承德 067000)

摘 要:采用盆栽试验研究了潮褐土中施用水杨酸和半胱氨酸对土壤中重金属 Cd、Zn 和 Pb 的活化影响,以及对油菜吸收和生长的影响。结果表明,两种有机酸在一定的添加浓度范围内,可以缓解重金属对油菜地上部的毒害,但浓度较高时,却使油菜生物量显著下降。在一定程度上,水杨酸不但可以促进土壤中 Cd 的活化,还可以提高油菜地上部对 Cd 的吸收,两者呈显著正相关。当水杨酸与土壤中 Zn 的摩尔比大于 1 时,能有效的促进土壤中 Zn 的活化。土壤中有效态 Pb 含量则与水杨酸添加量呈显著正相关,同时水杨酸也提高了油菜地上部对 Zn、Pb 的吸收;随半胱氨酸添加量的增加,土壤中有效态 Cd、Zn、Pb 含量与油菜地上部重金属含量均有所提高,在摩尔比半胱氨酸/Pb=1 时,半胱氨酸不但促进了土壤中 Pb 的活化,同时也提高了油菜地上部对 Pb 的吸收。

关键词:有机酸;潮褐土;Cd;Zn;Pb;油菜

中图分类号:X171.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)02-0472-05

Effect of Organic Acids on Cd Zn Pb Absorption of Rape in Meadow Cinnamon Soil

GUO Yan-jie¹, LI Bo-wen¹, XIE Jian-zhi¹, JIN Mei-yu¹, YANG Hua²

(1. College of Natural Resources & Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2. Chengde Environmental Monitoring Station, Chengde 067000, China)

Abstract: The effects of both organic acids (salicylic acid and cysteine) on mobilization of Cd, Zn and Pb were studied in meadow cinnamon and its accumulation in shoot of rape through pot experiments. The results showed that the two organic acids at lower concentrations could reduce the toxicity of heavy metals. However, when the contents of the two organic acids were higher, the biomass of rape decreases remarkably. Salicylic acid could enhance both mobilization of Cd²⁺ and Cd uptake in shoot of rape to some extent, and there was an obviously positive correlation between them. When the molar ratio of salicylic acid/Zn was above 1, salicylic acid could enhance the mobilization of Zn. The content of available Pb in soil showed an obviously positive correlation with the amount of salicylic acid, while salicylic acid could also increase the Zn and Pb absorption in shoot of rape. With cysteine increasing, the available Cd, Zn, Pb in the soil and heavy metals uptake in shoot of rape would increase too. When the molar ratio cysteine/Pb was 1, cysteine enhanced both mobilization of Pb in soil and amount of Pb in shoot of rape.

Keywords: organic acids; meadow cinnamon; cadmium; zinc; lead; rape

随着现代农业中各种农药和化肥的大量使用、汽车尾气的大量排放、城市污水及垃圾处理不当,以及工业生产中“三废”的不合理排放,其中含重金属的废弃物不断的被输入到环境中从而导致作为环境的主要载体之一的土壤受重金属污染的程度越来越大。土壤重金属污染因其具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点,治理难度大,费用高。因此,修复重金属污染土壤,恢复土壤原有功能,一直是国际上的难点和热点

研究课题^[1]。目前常采用的物理和化学治理技术如客土法、淋溶法、热处理、动电修复、施用化学改良剂等,由于其技术要求高或费用昂贵,对土壤结构破坏严重,还有可能造成二次污染等,不能从根本上解决问题^[2]。而近年来兴起的植物修复技术,因具有投资少、不破坏土壤结构、不引起二次污染等优点,已成为一种可靠的、相对安全的环境友好修复技术,从而被认为是目前修复重金属污染土壤最有前途和发展前景的治理技术^[3]。植物修复技术的效果与重金属在土壤中的生物可利用性密切相关。由于大部分重金属在土壤中的生物有效性较低,能够直接被植物利用的部分很少,因此有研究表明,有机酸能够通过络合或螯合

收稿日期:2007-06-27

基金项目:河北省自然科学基金项目(302340)

作者简介:郭艳杰(1983—),女,满族,河北承德人,在读硕士研究生,从事土壤环境保护研究。E-mail:guoyanjie928@126.com

通讯作者:李博文 E-mail:fauh@mail.hebau.edu.cn,

作用使土壤固态重金属释放出来,增强重金属活性来强化植物吸收、累积,从而提高植物修复效率和缩短修复周期^[4,5]。

水杨酸(SA)是一种广泛存在于植物体内的酚类物质,是一种内源性的植物激素,可以提高植物在逆境中的抗性^[6]。它的水溶液呈酸性反应,其化学结构式中含有羧基和酚羟基,具有酚和羧酸的化学性质,分别具有螯合络合能力。半胱氨酸是一种天然产生的含硫 α -氨基酸之一,存在于许多蛋白质,谷胱甘肽中,与 Ag^+ , Hg^+ , Cu^+ 等金属离子形成不溶性的硫醇盐,在医学上常用作重金属的解毒剂。而且更为重要的是它们都属于天然产生的低分子量有机酸,生物降解很好,对环境无污染,在修复重金属污染土壤方面应用前景更为广阔^[7]。因此,本文针对保定市污灌区土壤重金属污染现状,选取 Cd、Zn、Pb 为目的重金属,油菜为供试植物,通过盆栽试验,研究添加水杨酸和半胱氨酸后对油菜吸收土壤重金属的影响效应,为重金属污染土壤植物修复的有机调控提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采自河北农业大学西校区标本园的潮褐土(0~20 cm)。土壤基本理化性质见表 1。供试植物为油菜。供试有机酸为水杨酸、半胱氨酸,均为分析纯化学试剂。

1.2 盆栽试验

水杨酸和半胱氨酸试验处理分别设 6 个添加量,即 6 个浓度处理,并设一组对照,每个处理重复 3 次,各处理均添加 Cd、Zn、Pb (分别以 $\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$ 、 ZnCl_2 、 PbCl_2 固体粉末形式加入)使其添加量浓度分别为 5、500、500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土(以 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 计)。设 C 为重金属的基础处理浓度(也就是将所添加的 3 种重金属量换算成摩尔数相加得到的和),根据重金属与有机酸反应的摩尔比来设置有机酸的添加浓度和添加量。水杨酸与 Cd、Zn、Pb 反应的摩尔比为 1:2 或 1:4,则设置水杨酸的添加浓度为 1/4C、1/2C、C、2C、4C、8C,即添加量为 0.35、0.70、1.40、2.79、5.58、11.16 $\text{g} \cdot$

kg^{-1} 土;半胱氨酸与 Cd、Zn、Pb 反应的摩尔比为 1:2,则设置半胱氨酸的添加浓度为 1/4C、1/2C、C、2C、4C、6C,即添加量为 0.31、0.61、1.22、2.45、4.90、7.35 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土;称取过 2.5 mm 筛风干土 2.50 kg,同时加入 1.2 g $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 作底肥,与上述设置添加的重金属和有机酸充分混匀后,装入塑料盆,在 60%田间持水量下平衡一个月后播种,出苗后每盆定苗 6 株,油菜生长期用去离子水浇灌,50 d 后收获取样。植物样品取地上部,用去离子水冲洗,晾干后于 105 $^{\circ}\text{C}$ 下杀青 30 min,65 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干,粉碎备用。同时将盆栽土壤混匀取样,土样经风干后磨碎,过筛备用。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质的测定采用土壤农化常规分析法^[8]。

土壤中有效态 Cd、Zn、Pb 含量的测定:取 1 g 土样(过 100 目筛)于 50 mL 塑料离心管中,加 8 mL 1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MgCl_2 (pH 7.0)溶液,在温度为 20 $^{\circ}\text{C} \pm 3$ $^{\circ}\text{C}$ 下振荡 2 h,离心(5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)30 min,过滤,用日立 Z-5000 型原子吸收分光光度计测定 Cd、Zn、Pb 含量。

植物样品中 Cd、Zn、Pb 含量的测定:采用湿法(HNO_3 - HClO_4)消解,日立 Z-5000 型原子吸收分光光度计测定 Cd、Zn、Pb 含量。

1.4 数据分析

采用 SPSS for windows 11.5 进行方差分析和 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 不同有机酸对土壤有效态重金属含量的影响

2.1.1 水杨酸对土壤有效态重金属含量的影响

表 2 为不同有机酸对土壤中有效态重金属含量的影响。土壤中添加水杨酸后,有效态 Cd 含量均高于对照,当水杨酸的添加量 $<1.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,有效态 Cd 含量的增加量随添加量的增加逐渐降低,但仍高于对照,当添加量 $>2.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时又表现出类似的变化趋势,当水杨酸与重金属的摩尔比为 1/4 和 2 时,也就是添加量为 $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,显著地促进了土壤中 Cd 的活化,有效态 Cd 含量分别提高到对

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the experimental soil

土壤类型 soil type	pH(H_2O) (1:2.5 土水比)	有机质 O.M. / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total N / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 Available N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{CaCO}_3/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	重金属总量 Content of heavy metal / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
						Cd	Zn	Pb
潮褐土	8.12	12.64	0.72	32.63	56.2	0.46	77.10	31.12

表 2 不同有机酸对土壤中有效态重金属含量的影响
Table 2 Effect of different organic acids on available heavy metals in soil

水杨酸添加量 Added content of salicylic acid/g·kg ⁻¹	土壤有效态重金属含量 Available heavy metals/mg·kg ⁻¹			半胱氨酸添加量 Added content of cysteine/g·kg ⁻¹	土壤有效态重金属含量 Available heavy metals/mg·kg ⁻¹		
	Cd	Zn	Pb		Cd	Zn	Pb
0.00	1.01 ^b	7.67 ^b	6.78 ^c	0.00	1.01 ^b	7.67 ^c	6.78 ^{ab}
0.35	3.11 ^a	4.96 ^{bc}	6.94 ^c	0.31	3.56 ^a	10.18 ^{ab}	7.47 ^{ab}
0.70	1.42 ^b	4.46 ^{bc}	7.68 ^c	0.61	1.88 ^{ab}	5.40 ^d	7.03 ^{ab}
1.40	1.27 ^b	2.68 ^c	12.62 ^b	1.22	1.32 ^b	7.16 ^c	9.18 ^a
2.79	4.02 ^a	8.92 ^{ab}	5.99 ^c	2.45	1.10 ^b	7.32 ^c	7.43 ^{ab}
5.58	1.78 ^b	8.58 ^{ab}	13.59 ^b	4.90	2.18 ^{ab}	11.07 ^a	7.91 ^a
11.16	1.69 ^b	12.88 ^a	22.84 ^a	7.35	1.88 ^{ab}	9.42 ^b	5.24 ^b

注:数字上标字母相同表示处理间在 5%水平上差异不显著,下同。

Note: Values with same letters in the same column represent no significant differences among treatments. The same below.

照的 3 倍和 4 倍。这是由于本试验所选择的土壤为石灰性潮褐土,它的粘土矿物组成以蛭石、蒙脱石等 2:1 型矿物为主,表面负电荷多,有较强的吸附阳离子能力。而水杨酸是以阴离子的形态存在,负电荷对其有排斥作用^[9],因此潮褐土对水杨酸的吸附能力较弱,加入体系中的水杨酸大部分留在溶液中,当它们与 Cd²⁺形成络合物后,离子所带的正电荷减少,与土壤之间的吸附亲和力减弱,从而促进了 Cd²⁺的解吸附作用,增加土壤中 Cd 的活性和移动性。

土壤中有效态 Zn 的含量随着水杨酸添加量的增加,总体上呈现先降低后增加的变化趋势,在水杨酸添加量<1.40 g·kg⁻¹时,土壤中有效态 Zn 的含量随添加量的增加逐渐降低,在添加量为 1.40 g·kg⁻¹时,有效态 Zn 含量与对照相比降低了 65.06%。而添加量在 1.40~11.16 g·kg⁻¹时,水杨酸却促进了土壤中 Zn 的活化,在添加量为 11.16 g·kg⁻¹时,有效态 Zn 含量增加最多,与对照相比增加 67.93%。这是由于潮褐土中含有的 CaCO₃ 是石灰性土壤吸附和固定锌的主要载体, Jurinak 等认为, CaCO₃ 吸附锌的作用并不仅仅在表面形成溶解度很小的化合物,而且可能还有同晶置换作用^[10]。因此水杨酸浓度较低时,会首先络合土壤中较多的 Mg、Ca 等离子,那么对土壤 Zn 的活化能力就有所降低,只有水杨酸浓度较高时,才可以促进土壤吸附态 Zn 的解吸,从而提高 Zn 的有效性^[11,12]。

可以看出,土壤中添加水杨酸后,有效态 Pb 含量总体上呈现随水杨酸添加量的增加而增加的变化趋势,同时相关分析表明,水杨酸添加量与土壤中有效态 Pb 含量呈显著正相关,相关系数 r 为 0.910**,结果表明施用水杨酸可显著促进土壤中 Pb 的活化,浓

度越大,活化效果越显著。当摩尔比水杨酸/Pb=8,即最大添加量为 11.16 g·kg⁻¹时,土壤中有效态 Pb 含量提高到对照的 3 倍。

2.1.2 半胱氨酸对土壤有效态重金属含量的影响

从表 2 还可以看出,半胱氨酸不同程度上促进了土壤中 Cd 的活化,有效态 Cd 含量与对照相比均有所增加,当摩尔比半胱氨酸/Cd=1/4,即添加量为 0.31 g·kg⁻¹时,半胱氨酸对 Cd 的活化效果最好,有效态 Cd 含量与对照相比提高了 2 倍多。

当摩尔比半胱氨酸/Zn 为 1/4、4、6,即添加量分别为 0.31、4.90、7.35 g·kg⁻¹时,显著地促进了土壤中有效态 Zn 的活化,与对照相比分别增加了 32.72%、44.33%、22.82%。而摩尔比半胱氨酸/Zn=1/2,即添加量为 0.61 g·kg⁻¹时,土壤中有效态 Zn 含量显著下降 ($P<0.05$),与对照相比降低了 29.60%。

半胱氨酸加入到土壤中后,总体上可以说促进了 Pb 的活化,但处理间差异不显著。在摩尔比半胱氨酸/Pb=1,即添加量为 1.22 g·kg⁻¹时,有效态 Pb 含量增加最多,与对照相比增加了 35.40%。可能由于半胱氨酸对于土壤中重金属的作用比较复杂,所以对于土壤中 Cd、Zn、Pb 的活化效果没有明显的规律性。

2.2 不同有机酸对油菜地上部吸收重金属的影响

2.2.1 水杨酸对油菜地上部吸收重金属的影响

表 3 为不同有机酸处理下对油菜地上部吸收重金属的影响。可以看到,添加水杨酸后对油菜地上部 Cd、Zn、Pb 含量的影响不同。对于 Cd,加入水杨酸后不同程度的促进了油菜地上部对 Cd 的吸收,起到了一定的活化作用。在添加量为 0.35 g·kg⁻¹ 和 2.79 g·kg⁻¹ 时,油菜中 Cd 含量与对照相比分别提高了 1.78 倍和 1.65 倍,显著提高了油菜地上部对 Cd 的吸收。

相关分析表明,油菜地上部 Cd 含量与土壤中有有效态 Cd 含量呈显著正相关,相关系数为 0.759^{*}。说明水杨酸促进植物吸收 Cd 与其提高了土壤有效态 Cd 的含量有关。

水杨酸施用后,油菜地上部 Zn 随水杨酸添加量的增加总体上呈现先降低后增加的变化趋势,在摩尔比水杨酸/Zn=1,添加量为 1.40 g·kg⁻¹ 时,水杨酸不但没有促进土壤中 Zn 的活化,也抑制了油菜地上部对 Zn 的吸收,与对照相比降低了 30.11%。

向土壤中加入水杨酸后油菜地上部 Pb 含量随水杨酸添加量的增加呈现先增加后降低的变化趋势,但处理间差异不显著,在添加量为 2.79 g·kg⁻¹ 时,油菜地上部 Pb 含量最大,为对照的 2 倍。

2.2.2 半胱氨酸对油菜地上部吸收重金属的影响

施加半胱氨酸对油菜地上部 Cd 的富集有不同程度的促进作用,随着半胱氨酸添加量的增加呈现先增加后降低的变化趋势,但都高于对照。当半胱氨酸与 Cd 的摩尔比为 2,即添加量为 2.45 g·kg⁻¹ 时,油菜中 Cd 的含量达到 23.41 mg·kg⁻¹,为对照的 3.23 倍,显著的促进了 Cd 的吸收。

半胱氨酸施用后,对油菜地上部 Zn 的吸收有明显的促进作用,摩尔比半胱氨酸/Zn=4,即添加量为

4.90 g·kg⁻¹ 时,油菜中 Zn 的含量为 301.75 mg·kg⁻¹,为对照的 1.97 倍。

表 3 可见,各处理油菜地上部 Pb 含量随添加量的增加没有明显的规律性。在半胱氨酸与 Pb 的摩尔比为 1,添加量为 1.22 g·kg⁻¹ 时,油菜地上部 Pb 含量为对照的 2.50 倍,与对照相比差异显著,结合表 2 可以看到,该浓度下,半胱氨酸不但促进了土壤中 Pb 的活化,还同时提高了油菜对 Pb 的吸收。

2.3 不同有机酸对油菜地上部生物量(干重)的影响

不同外源有机酸对油菜地上部干重的影响见表 4。结果显示,有机酸施用对油菜地上部影响较大。在添加水杨酸的处理中,当水杨酸添加量<1.40 g·kg⁻¹ 时,油菜地上部干重与对照相比无明显差异,而当水杨酸添加量≥2.79 g·kg⁻¹ 时,地上部干重与对照相比,有了显著的降低(P<0.05)。施用半胱氨酸后,当添加量<0.61 g·kg⁻¹ 时,对地上部的干重影响不明显,当添加量≥1.22 g·kg⁻¹ 时,对地上部干重的影响达到了极显著性差异(P<0.01)。

由此可见,水杨酸和半胱氨酸在一定的添加浓度范围内,缓解了重金属对油菜地上部的毒害,因此对地上部生物量的影响并不显著。研究表明,水杨酸 SA 能缓解重金属的氧化伤害^[13]。张芬琴^[14]等研究表明,在

表 3 不同有机酸对油菜地上部吸收重金属的影响

Table 3 Effect of different organic acids on contents of heavy metals in shoot of rape

水杨酸添加量 Added content of salicylic acid /g·kg ⁻¹	地上部重金属含量 Contents of heavy metals in shoot /mg·kg ⁻¹			半胱氨酸添加量 Added content of cysteine/g·kg ⁻¹	地上部重金属含量 Contents of heavy metals in shoot/mg·kg ⁻¹		
	Cd	Zn	Pb		Cd	Zn	Pb
0.00	7.24 ^b	153.22 ^{ab}	10.96 ^a	0.00	7.24 ^b	153.22 ^b	10.96 ^b
0.35	20.10 ^a	232.20 ^a	12.23 ^a	0.31	7.77 ^b	240.87 ^{ab}	6.52 ^b
0.70	15.67 ^{ab}	193.94 ^{ab}	14.87 ^a	0.61	9.08 ^b	233.68 ^{ab}	13.95 ^b
1.40	12.12 ^{ab}	107.08 ^b	21.31 ^a	1.22	12.34 ^{ab}	236.75 ^{ab}	27.42 ^a
2.79	19.21 ^a	198.87 ^{ab}	23.05 ^a	2.45	23.41 ^a	239.75 ^{ab}	11.79 ^b
5.58	17.41 ^{ab}	207.85 ^a	18.98 ^a	4.90	18.31 ^{ab}	268.42 ^a	21.70 ^{ab}
11.16	9.38 ^b	212.89 ^a	18.56 ^a	7.35	13.84 ^{ab}	202.23 ^{ab}	11.09 ^b

表 4 不同有机酸对油菜地上部生物量(干重)的影响

Table 4 Effect of different organic acids on biomass (dry weight) of rape

水杨酸添加量 Added content of salicylic acid/g·kg ⁻¹	地上部干重 Shoot dry weight /g·株 ⁻¹	半胱氨酸添加量 Added content of cysteine/g·kg ⁻¹	地上部干重 Shoot dry weight/g·株 ⁻¹
0.00	1.402±0.217 ^a	0.00	1.402±0.217 ^a
0.35	1.095±0.194 ^{ab}	0.31	1.069±0.232 ^{ab}
0.70	1.240±0.161 ^{ab}	0.61	1.156±0.009 ^{ab}
1.40	1.173±0.353 ^{ab}	1.22	0.725±0.075 ^{bc}
2.79	1.027±0.060 ^b	2.45	0.411±0.006 ^c
5.58	0.832±0.244 ^b	4.90	0.863±0.011 ^b
11.16	0.544±0.255 ^b	7.35	0.270±0.002 ^c

一定的浓度范围内,外源水杨酸对 Cd^{2+} 的影响有抵抗作用,对玉米幼苗 Cd^{2+} 毒害具有一定的缓解作用。半胱氨酸上的巯基与重金属离子结合形成无毒或低毒络合物,从而清除重金属毒害作用,对于 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的解毒效果尤为明显^[15]。但是当有机酸施用超过一定量后,虽然油菜地上部重金属含量没有显著增加,但油菜地上部生物量却显著下降。这可能是由于有机酸浓度较高时,可能导致植物营养缺乏,加之重金属污染产生的复合效应,最终阻碍了植物的正常生长,表现为生物量降低。李玉红^[16]的研究也表明,非包膜有机酸增强了对作物的毒害,导致水稻产量显著降低。

3 结论

试验结果表明,水杨酸和半胱氨酸在一定的添加浓度范围内,缓解了重金属对油菜地上部的毒害,但浓度较高时,使油菜生物量显著下降。施用水杨酸和半胱氨酸在一定程度上能促进土壤中重金属的活化和油菜地上部对重金属的吸收。

参考文献:

- [1] 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟.重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J].应用生态学报,2002,13(6):757-762.
LONG X X, YANG X E, NI W Zh. Current situation and prospect on the remediation of soils contaminated by heavy metals [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6):757-762(in Chinese).
- [2] 周东美,郝秀珍,薛 艳,等.污染土壤的修复技术研究进展[J].生态环境,2004,13(2):234-242.
ZHOU D M, HAO X Zh, XUE Y, et al. Advances in remediation technologies of contaminated soils [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):234-242 (in Chinese).
- [3] 李文一,徐卫红,李仰锐,等.重金属污染土壤植物修复机理研究[J].广东农业科学,2006,4:79-81.
LI W Y, XU W H, LI Y R, et al. Mechanism of Phytoremediating soil polluted by heavy metals [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006, 4:79-81 (in Chinese).
- [4] 吴龙华,骆永明,黄焕忠.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.
WU L H, LUO Y M, HUANG H Zh. Cheate-induced phytoextraction of copper contaminated upland red soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3):435-438(in Chinese).
- [5] Fischer F, Bipp H P. Removal of heavy metals from soil components and soils by natural chelating agents. II. Soil extraction by sugar acids[J]. *Water, Air and Soil pollution*, 2002, 138: 271-288.
- [6] 丁秀英,张 军,苏宝林,等.水杨酸在植物抗病中的作用[J].植物学通报,2001,18(2):163-168.
DING X Y, ZHANG J, SU B L, et al. Role of salicylic acid in plant disease resistance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(2):163-168(in Chinese).
- [7] 可 欣,李培军,巩宗强,等.重金属污染土壤修复技术中有关淋洗剂的研究进展[J].生物学杂志,2004,23(5):145-149.
KE X, LI P J, GONG Z Q, et al. Advances in flushing agents used for remediation of heavy metals contaminated soil [J]. *Chinese Journal Ecology*, 2004, 23(5):145-149(in Chinese).
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第三版.北京:中国农业出版社.
BAO SH D. Soil and Agricultural Chemical Analysis [M]. Chinese Agriculture Publishing House.
- [9] 肖双成,徐仁扣.邻苯二甲酸和水杨酸在可变电荷土壤中的吸附行为[J].土壤学报,2005,42(6):1006-1011.
XIAO Sh Ch, XU R K. Adsorption behavior of phthalic and salicylic acids by variable charge soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6):1006-1011(in Chinese).
- [10] 丁疆华,温琰茂,舒 强,等.土壤环境中镉、锌形态转化的探讨[J].城市环境与城市生态,2001,14(2):47-49.
DING J H, WEN Y M, SHU Q. Fraction transformation of cadmium and zinc in soils [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2001, 14(2):47-49(in Chinese).
- [11] 谢正苗.土壤中锌的化学平衡[J].环境科学进展,1996,4(5):13-30.
XIE Zh M. Chemical equilibria of zinc in soils[J]. *Advances in Environmental Sciences*, 1996, 4(5):13-30(in Chinese).
- [12] 高彦征,贺纪正,凌婉婷.有机酸对土壤中镉的吸附及影响因素[J].土壤学报,2003,40(5):731-737.
GAO Y Zh, He J Zh, LING W T. Effect of organic acids on Cadmium desorption from soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5):731-737 (in Chinese).
- [13] Gordana D, Nevena M. Modification of Cadmium Toxicity in Soybean Seedlings by Salicylic Acid[J]. *Plant Science*, 2005, 168:511-517.
- [14] 张芬琴,李晓利,马斌山,等.水杨酸对镉胁迫下玉米幼苗生理特性的影响[J].湖北农业科学,2006,45(5):567-569.
ZHANG F Q, LI X L, MA B Sh, et al. Effects of SA on Physiological characteristics of maize seedling under Cd^{2+} Stress [J]. *HuBei Agricultural Sciences*, 2006, 45(5):567-569(in Chinese).
- [15] Nathalie A L M, Hassinen V H, Hakvoort H W J. Enhanced copper tolerance in *Silene vulgaris* (Moench) Garcke populations from copper mines is associated with increased transcript levels of a 2b-type metallothionein gene[J]. *Plant Physiology*, 2001, 126:1519-1526.
- [16] 李玉红.外源有机酸对土壤中重金属(Pb、Cd)形态及植物有效性影响的研究[D].南京:南京农业大学,2003.1.
LI Y H. Effect of organic acids on speciation of Cd Pb in soil and Bioavailability [D]. NanJing: NanJing Agricultural University, 2003, 1 (in Chinese).