

施用有机肥对小花南芥和中华山蓼生长生理和 Pb/Zn 累积特征的影响

祖艳群, 李元*, 赵娜, 魏巧

(云南农业大学资源环境学院, 昆明 650201)

摘要: 采用盆栽试验, 模拟 Pb 和 Zn ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 胁迫条件下, 不同猪粪施用量对小花南芥和中华山蓼生长、生理和 Pb、Zn 累积特征的影响。结果表明: 施用猪粪对土壤 pH 值的影响不明显, 土壤 CEC 有增加的趋势。土壤中铁锰氧化物结合态没有显著的变化, 小花南芥土壤水溶态和可交换态、有机物结合态显著增加。中华山蓼土壤中水溶态和可交换态没有显著的变化, 而有机物结合态显著增加。Pb 和 Zn 胁迫下, 施用猪粪促进植物根的生长、生物量、叶绿素含量和相对电导率的增加 (Pb 胁迫下施用猪粪对中华山蓼生物量影响不显著除外)。施用猪粪导致小花南芥中 Pb、Zn 的含量、累积量、富集系数和转移系数增加, 特别是猪粪 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理小花南芥中 Pb、Zn 的含量和累积量最高。施用猪粪导致中华山蓼中 Pb 含量和累积量增加, Zn 含量和累积量下降, 富集系数和转移系数则没有显著的变化。因此, 施用猪粪能促进小花南芥和中华山蓼的生长和生理代谢, 增加 Pb、Zn 在小花南芥、Pb 在中华山蓼中的含量和累积量, 适宜的施用量为猪粪 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词: Pb/Zn; 猪粪; 小花南芥; 中华山蓼

中图分类号: X503.233 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)03-0508-09 doi:10.11654/jaes.2013.03.016

Effect of Pig Manure Application on Growth, Physiology and Accumulation Characteristic of Pb and Zn in *Arabis alpinal* var. *parviflora* Franch and *Oxyria sinensis* Hemsl

ZU Yan-qun, LI Yuan, ZHAO Na, WEI Qiao

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan)

Abstract: Pot experiments were conducted in order to understand the effects of pig manure application on growth, physiology and accumulation of Pb and Zn in *Arabis alpinal* var. *parviflora* Franch and *Oxyria sinensis* Hemsl with Pb ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and Zn ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) stresses. The results showed that soil pH value did not vary significantly and CEC increased with increase in pig manure application. Water soluble and exchangeable Pb and Zn increased in soil of *A. alpinal* and kept stable in soil of *O. sinensis*. Fe-Mn oxide bound Pb and Zn did not vary significantly. Organic bound Pb and Zn increased significantly with increase in pig manure application. The root length, biomass, leave chlorophyll contents and membrane permeability increased under Pb and Zn stresses with increase in pig manure application, except for biomass of *O. sinensis* under Pb stress. Contents, accumulation rate, bioaccumulation factor and transfer factor of Pb and Zn in *A. alpinal* increased with increase in pig manure application, especially contents and accumulation rate reached maximum with pig manure $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ application. Contents and accumulation rate of Pb in *O. sinensis* increased and those of Zn decreased with increase in pig manure application. Bioaccumulation factor and transfer factor of Pb and Zn in *O. sinensis* did not vary significantly. The results indicate that growth and physiology of *A. alpinal* and *O. sinensis* could be improved, companying with Pb and Zn contents in *A. alpinal* and Pb content in *O. sinensis* increasing with pig manure application under Pb and Zn stresses. The optimal rate of pig manure application was $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Keywords: Pb; Zn; *Arabis alpinal* var. *parviflora* Franch; *Oxyria sinensis* Hemsl; pig manure

收稿日期: 2013-01-14

基金项目: 国家自然科学基金-云南联合基金(U1202236); 国家自然科学基金(41261096)

作者简介: 祖艳群(1966—), 女, 湖南沅江人, 博士, 教授, 主要从事土壤重金属污染生态修复研究。

* 通信作者: 李元 E-mail: liyuan03@yahoo.com.cn

植物修复和植物覆盖是减少重金属污染土壤环境风险的重要手段^[1-2]。超富集植物是能超量吸收重金属并将其运移到地上部的植物,去除土壤中重金属^[3]。先锋植物能较快进行植物覆盖,减少土壤的侵蚀。但是,由于矿区重金属污染土壤相对比较贫瘠,植物生长受到除重金属胁迫外的土壤质地、营养元素缺乏或有效性低、水分缺乏等因素的限制^[4-5],采取适宜的施肥措施促进超富集植物和先锋植物的生长和重金属吸收是值得研究的问题。有机肥的施用不仅有助于提高土壤的肥力,还能改变土壤中重金属的活性,影响植物对重金属的吸收和累积^[6-8]。小花南芥(*Arabis alpina* var. *parviflora* Franch)对重金属 Pb、Zn 有较强的富集能力^[9],它属于十字花科,南芥属,一年生至多年生草本,少数半灌木状。中华山蓼(*Oxyria sinensis* Hemsl)是重金属污染土壤的典型的先锋植物,属于蓼科,山蓼属,多年生草本^[10]。对于矿区重金属污染土壤的修复,通过改善土壤条件,促进先锋植物的生长进行植被覆盖,减少环境风险,并促进超富集植物的提取能力提高修复效率^[11-12],已经成为了重金属污染修复关注的重点。研究有机肥的施用对 Pb、Zn 胁迫条件下小花南芥和中华山蓼生长和 Pb、Zn 富集特征的影响,对促进小花南芥和中华山蓼对重金属污染土壤的修复效率,减少环境风险具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验设计

小花南芥和中华山蓼种子均采于云南省会泽县铅锌矿区。小花南芥和中华山蓼种子先用水浸泡,于培养箱里培养 2~3 d 后(28℃左右),再播于土壤,室温(22~27℃),6~7 d 后开始萌发。

盆栽试验采用的土壤基本理化性质为:pH 7.43, CEC 20.88 cmol·kg⁻¹,全氮 0.9 g·kg⁻¹,全磷 1.6 g·kg⁻¹,全钾 6.2 g·kg⁻¹,速效磷 39.7 mg·kg⁻¹,速效钾 232.42 mg·kg⁻¹,碱解氮 52.87 mg·kg⁻¹,有机质 17.9 g·kg⁻¹,Pb 37.04 mg·kg⁻¹,Zn 172.2 mg·kg⁻¹。

每盆(300 mm×250 mm)装 4 kg 土壤,Pb(C₄H₆O₄Pb)和 Zn(ZnSO₄·7H₂O)按照 1000 mg·kg⁻¹ 浓度均匀混入土壤中,重金属混入土壤后,平衡一周时间再施肥和种植作物。有机肥(猪粪)设 4 个梯度,分别为 0、7、14 g·kg⁻¹ 土和 21 g·kg⁻¹ 土;作基肥施入土壤并混合均匀。各处理设 3 次重复。猪粪 N 含量 12.7 g·kg⁻¹,Pb 含量 7.35 mg·kg⁻¹,Zn 含量 20.18 mg·kg⁻¹。

选择生长一致的小花南芥和中华山蓼幼苗移栽,

每盆 8 株,于移栽后 60 d 测量土壤 pH 值、CEC 和土壤中重金属不同形态(水溶态及可交换态、铁锰氧化物结合态和有机质结合态)的含量,同时测定小花南芥和中华山蓼根长、叶片的叶绿素含量、细胞膜透性、地上部分的生物量、地下部分的生物量和小花南芥 Pb、Zn 含量。

1.2 指标测定

植物收获后洗净,将植株地上部分和地下部分分开,105℃杀青 30 min,然后 65~70℃烘干、磨碎待用。同时采集土壤,制 0.25 mm、1 mm 和 2 mm 的土壤样品待用。

土壤 pH 值采用 pH 计测定。土壤阳离子交换量测定采用 0.1 mol·L⁻¹ 的氢氧化钠滴定法。土壤中 Pb、Zn 的不同形态的含量采用连续浸提-原子吸收分光光度法测定(TAS-990 原子吸收分光光度计,北京)。叶绿素含量按张宪政(1992)方法测定(722 型分光光度计,北京)^[13]。细胞质膜透性采用电导仪测定电导率(DDS-307 型电导仪,上海)。植物样中 Pb、Zn 的测定采用硝酸-高氯酸消煮,原子吸收分光光度计测定(TAS-990 原子吸收分光光度计,北京)。

富集系数=植物地上部某元素的含量/该元素在土壤中含量。

转移系数=植物地上部某种元素含量/植物根部该元素含量。

生物累积量=植物某种元素含量×植物生物量。

1.3 统计分析方法

数据分析采用 DPS(Version 3.11)数据处理系统进行方差分析和多重比较,采用 SPSS 11.0 数据处理系统进行相关性分析,用 Excel 2000 软件对数据进行统计分析,均值的比较采用 LSD (Least-Significant Difference)多重比较方法,运用 *t* 检验分析各处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 施用猪粪对土壤 pH 值和 CEC 的影响

Pb 和 Zn 胁迫条件下,施猪粪导致小花南芥土壤 pH 值降低:施用猪粪 14 g·kg⁻¹ 时,小花南芥土壤 pH 值最低;施用猪粪 21 g·kg⁻¹ 时,小花南芥土壤 pH 值有所增加。而猪粪处理导致中华山蓼土壤 pH 值均高于对照(图 1)。

Pb 和 Zn 胁迫条件下,小花南芥土壤中阳离子交换量(CEC)含量比对照高。施猪粪 14 g·kg⁻¹ 的处理,阳离子交换量最高,分别为 24.01 cmol·kg⁻¹ (Pb 胁

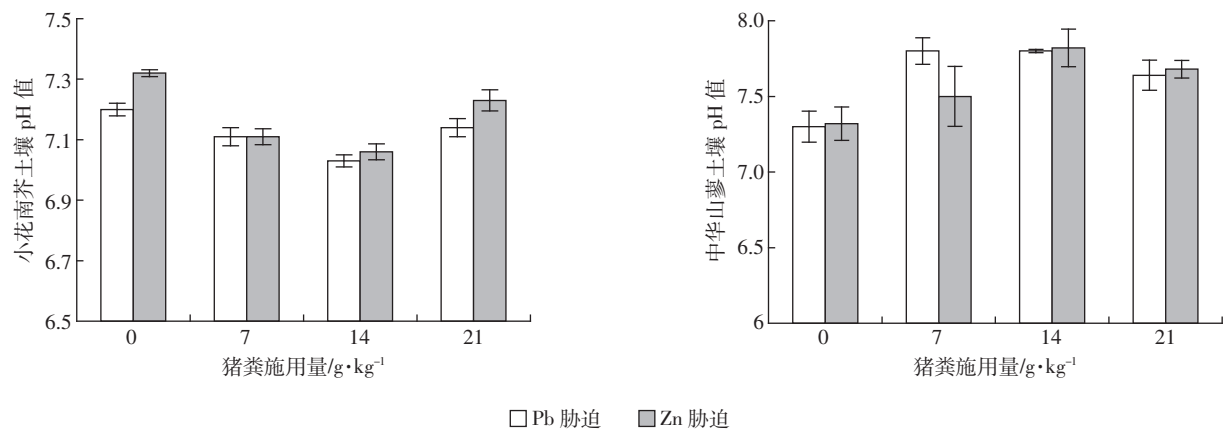


图 1 施用猪粪对小花南芥和中华山蓼土壤 pH 值的影响

Figure 1 Soil pH of *A. alpinal* and *O. sinensis* with pig manure application under Pb and Zn stress

迫)、23.69 cmol·kg⁻¹(Zn 胁迫);施猪粪 21 g·kg⁻¹ 的处理,阳离子交换量值有所下降。施肥处理中华山蓼土壤的 CEC 比对照稍有增加,不同的施肥处理间土壤 CEC 含量差异不显著(图 2)。

2.2 施用猪粪对土壤不同形态 Pb、Zn 含量的影响
猪粪施用量为 7 g·kg⁻¹ 的处理,小花南芥土壤中 Pb 水溶态和可交换态含量最高,为 225.71 mg·kg⁻¹;随着猪粪施用量的增加,Pb 水溶态和可交换态含量有所下降。施用猪粪导致铁锰氧化物结合态和有机质

结合态 Pb 含量上升,但猪粪施用量各处理之间没有显著的差异。施猪粪 14 g·kg⁻¹ 和 21 g·kg⁻¹ 的处理时,各形态含量依次为:有机质结合态 Pb>水溶态及可交换态 Pb>铁锰氧化物结合态 Pb(表 1)。

施猪粪处理条件下,小花南芥土壤中 Zn 水溶态和可交换态含量显著增加,从 13.40%增加到 14.75%~17.13%,各施猪粪处理之间具有一定的差异,施猪粪 14 g·kg⁻¹ 的处理,小花南芥土壤中 Zn 的水溶态和可交换态含量所占比例最高。铁锰氧化物结合态含量从

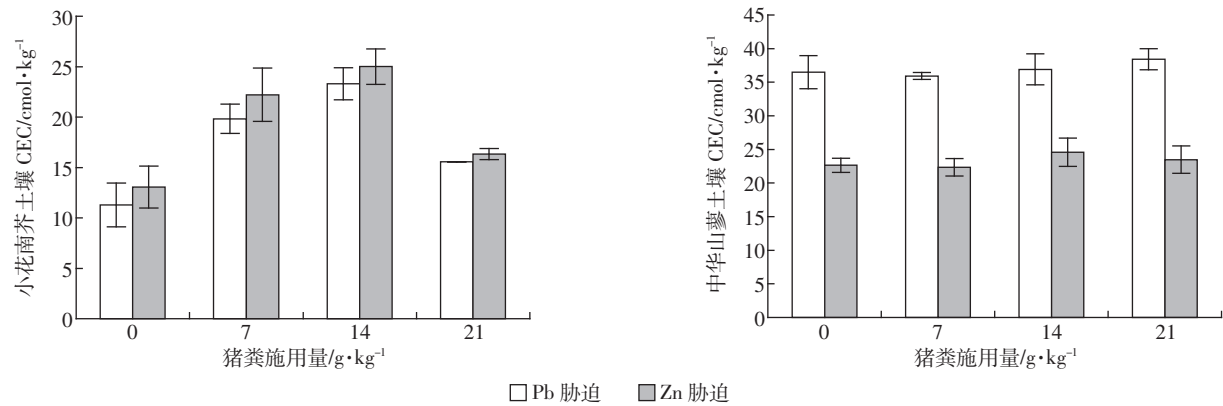


图 2 施用猪粪对小花南芥和中华山蓼土壤 CEC 的影响

Figure 2 Soil CEC of *A. alpinal* and *O. sinensis* with pig manure application under Pb and Zn stress

表 1 猪粪处理对小花南芥土壤中不同形态 Pb 和 Zn 含量(mg·kg⁻¹)及比例(%)的影响

Table 1 Contents and its percentage of Pb and Zn forms in soil of *A. alpinal* with pig manure application

猪粪/ g·kg ⁻¹	Pb			Zn		
	水溶态及可交换态	铁锰氧化物结合态	有机物结合态	水溶态及可交换态	铁锰氧化物结合态	有机物结合态
0	30.64±0.9c(3.86%)	19.17±1.4b(2.46%)	81.95±7.9b(10.53%)	107.79±0.6c(13.40%)	23.38±0.9d(2.92%)	47.05±0.6d(5.87%)
7	225.71±1.3a(7.63%)	38.94±2.1a(6.47%)	101.44±4.9a(11.69%)	153.81±1.3a(15.86%)	31.78±1.2c(3.28%)	70.22±0.9b(7.24%)
14	71.65±1.2 b(8.33%)	40.75±1.9a(4.74%)	114.66±6.1a(13.35%)	161.91±0.9a(17.13%)	33.84±1.4a(3.58%)	72.35±0.7a(7.65%)
21	64.89±1.1b(7.50%)	36.75±2.5a(4.18%)	99.06±5.4a(11.29%)	145.74±1.0b(14.75%)	33.09±1.6a(3.35%)	66.46±1.0c(6.73%)

注:同列数据后的不同字母表示差异显著(P<0.05)。括号内数据为比例。

2.92%增加到 3.28%~3.58%,增加幅度较小。有机物结合态含量也有所增加(表 1)。施用猪粪 60 d 后,各形态含量及所占比例均有一定的上升,土壤 Zn 含量比对照高,有效性有增加的趋势,施猪粪导致土壤中 Zn 以小花南芥易于吸收的形态存在,说明施用猪粪可能导致 Zn 生物有效性增加。施猪粪 $14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理,小花南芥土壤中 Zn 的生物有效态形态含量所占比例最高。各形态含量依次为:水溶态及可交换态 Zn>有机物结合态 Zn>铁锰氧化物结合态 Zn。

施猪粪处理条件下,中华山蓼土壤 Pb 水溶态和可交换态含量没有显著变化,所占比例稍有下降,从 50.53%降到 45.82%~48.36%,不同施猪粪处理之间没有显著的差异。施用猪粪导致中华山蓼土壤铁锰氧化物结合态 Pb 含量显著下降,从 23.70%降到 18.87%~20.16%,但各处理之间没有显著的差异。有机物结合态 Pb 含量显著增加(表 2)。即施用猪粪 60 d 后,中华山蓼土壤有机物结合态 Pb 含量及所占比例均有一定的上升,但是有效性 Pb 含量变化不明显。各形态含量依次为:水溶态及可交换态 Pb>铁锰氧化物结合态 Pb>有机物结合态 Pb。

中华山蓼土壤 Zn 水溶态和可交换态含量在施猪粪处理条件下没有显著变化,所占比例稍有下降,从 17.19%降到 16.57%~17.08%,不同施猪粪处理之间没有显著的差异。施用猪粪导致中华山蓼土壤铁锰氧化物结合态 Zn 含量下降,施用猪粪 $21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤铁

锰氧化物结合态 Zn 含量显著下降,由对照的 $204.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $184.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。有机物结合态 Zn 含量有所增加,施用猪粪 $7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,有机物结合态 Zn 含量显著增加,由 $155.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $182.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。各形态含量依次为:铁锰氧化物结合态 Zn>水溶态及可交换态 Zn>有机物结合态 Zn。

2.3 施用猪粪对植物根长和生物量的影响

Pb 胁迫条件下,未施肥的小花南芥根长最短(14.3 cm),生物量最小(2.83 g),施肥后的小花南芥根长比对照显著增加(表 3)。未施肥的中华山蓼根长最长(14.3 cm),施肥后的中华山蓼根长比对照显著降低。施猪粪 $21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的生物量比对照增加 290%,小花南芥生物量随着施肥量的增加而增加。施肥对中华山蓼生物量的影响不大,除 $14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理外,各处理生物量之间没有显著的差异。

Zn 胁迫条件下,施肥后的小花南芥和中华山蓼根长比对照显著增加。施猪粪 $21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的根长比对照增加了 70.7%,施猪粪 $14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的中华山蓼根长比对照增加了 114.4%。小花南芥根长和生物量随着施肥量的增加而增加。除 $7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理外,中华山蓼生物量随着施肥量的增加而增加(表 3)。

2.4 施用猪粪对植物叶绿素和细胞质膜透性的影响

Pb 和 Zn 胁迫条件下,施肥处理小花南芥叶绿素含量均高于对照,叶绿素含量随施肥水平的增高而增加,叶绿素含量最高的处理为施猪粪 $21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处

表 2 猪粪处理对中华山蓼土壤中不同形态 Pb 和 Zn 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)及比例(%)的影响
Table 2 Contents and its percentage of Pb and Zn forms in soil of *O. sinensis* with pig manure application

猪粪/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb			Zn		
	水溶态及可交换态	铁锰氧化物结合态	有机物结合态	水溶态及可交换态	铁锰氧化物结合态	有机物结合态
0	502.63±8.03a(50.53%)	235.68±9.31a(23.70%)	117.23±13.60b(11.79%)	192.22±4.19a(17.19%)	204.44±9.65a(18.11%)	155.99±12.58b(13.95%)
7	502.33±7.58a(48.36%)	204.21±10.38b(19.66%)	163.13±9.43a(15.71%)	199.73±2.85a(16.85%)	204.03±14.90a(17.21%)	182.59±10.65a(15.40%)
14	501.93±7.68a(47.56%)	212.72±11.53b(20.16%)	169.35±10.98a(16.05%)	191.38±4.06 a(16.57%)	196.37±12.33a(16.52%)	158.68±13.91b(13.35%)
21	495.30±11.65a(45.82%)	204.02±7.79b(18.87%)	196.76±14.03a(18.20%)	204.53±4.56a(17.08%)	184.83±17.71b(15.43%)	168.33±10.63ab(14.06%)

注:同列数据后的不同字母表示差异显著($P<0.05$)。括号内数据为比例。

表 3 施用猪粪对小花南芥和中华山蓼根长和生物量的影响
Table 3 The root length and biomass of *A. alpinal* and *O. sinensis* with pig manure application under Pb and Zn stress

猪粪/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb				Zn			
	小花南芥		中华山蓼		小花南芥		中华山蓼	
	根长/cm	生物量/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	根长/cm	生物量/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	根长/cm	生物量/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	根长/cm	生物量/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$
0	14.3±0.1c	2.66±0.22c	14.4±0.1a	2.71±0.12b	15.1±1.5d	2.26±0.04c	11.1±0.11c	3.56±0.05b
7	23.2±2.8b	5.07±0.21b	10.4±0.08c	2.42±0.13b	21.1±3.2c	5.80±0.10b	18.3±0.12b	2.51±0.10c
14	27.9±0.1a	8.05±0.38a	11.7±0.06b	3.53±0.23a	24.9±4.6b	7.70±0.08b	23.8±0.21a	4.02±0.11a
21	28.6±3.7a	10.39±0.37a	10.8±0.06bc	2.56±0.20b	33.6±3.0a	11.31±0.10a	17.8±0.26b	4.55±0.08a

注:同列数据后的不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

理。中华山蓼叶片叶绿素含量随着猪粪施入有减少的趋势,但各施肥处理之间没有显著的差异(图3)。

Pb 和 Zn 胁迫条件下,施肥处理小花南芥叶片相对电导率值增加,施猪粪 $21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土的小花南芥叶片相对电导率值最高,为对照的 7.8 倍 (Pb 胁迫)和 5.7 倍 (Zn 胁迫);施加猪粪的处理中华山蓼叶片相对电导率小于对照,随着猪粪施入量的增加相对电导率增大, $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的叶片相对电导率最低(图4)。

2.5 施用猪粪对植物 Pb、Zn 含量及其累积特征的影响

Pb 和 Zn 胁迫条件下,猪粪 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理,小花南芥地上部 Pb 含量为 $722.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,地下部分 Pb 含量最高,为 $800.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其次是施猪粪 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理。小花南芥地上部和地下部 Zn 含量随着猪粪的施入而增加,施猪粪 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时 Zn 含量在小花南芥地上部和地下部均达到最高,分别为 $858.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $845.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;施 $21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 Zn 含量下降,但仍然高于对照(表4)。

从累积量来看,Pb 在小花南芥地上部和地下部

的累积量的变化趋势一致,随着猪粪的施用,累积量增加,其中猪粪的施用量为 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Pb 在小花南芥地上部累积量最高;猪粪的施用量为 $21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Pb 地下部的累积量最高(表4)。猪粪处理小花南芥对 Pb 的富集系数和转移系数均有所上升,其中,猪粪 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的富集系数和转移系数均大于 1,随着施用猪粪量的增加而下降。Zn 在小花南芥地上部和地下部的累积量的变化趋势与 Zn 含量一致,即施猪粪促进了 Zn 的累积,施猪粪 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Zn 在小花南芥地上部累积量最高;施猪粪 $21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Zn 在地下部的累积量最高。Zn 胁迫下,除施猪粪 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时富集系数有所增加、转移系数基本不变外,施猪粪导致富集系数和转移系数下降。

施加猪粪的各处理,中华山蓼地上部和地下部 Pb 含量略高于对照,Zn 含量低于对照。随着猪粪施入量的增加中华山蓼地上部、地下部 Pb 和 Zn 含量均表现出在 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时最低, $21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时最高(表5)。

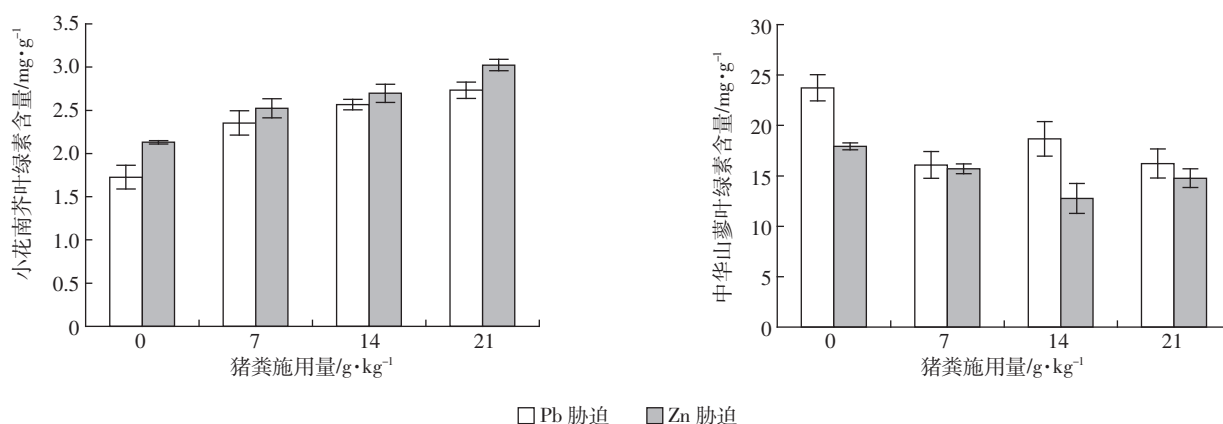


图3 施用猪粪对小花南芥和中华山蓼叶片的叶绿素含量的影响

Figure 3 Chlorophyll contents in leaves of *A. alpinal* and *O. sinensis* with pig manure application under Pb and Zn stress

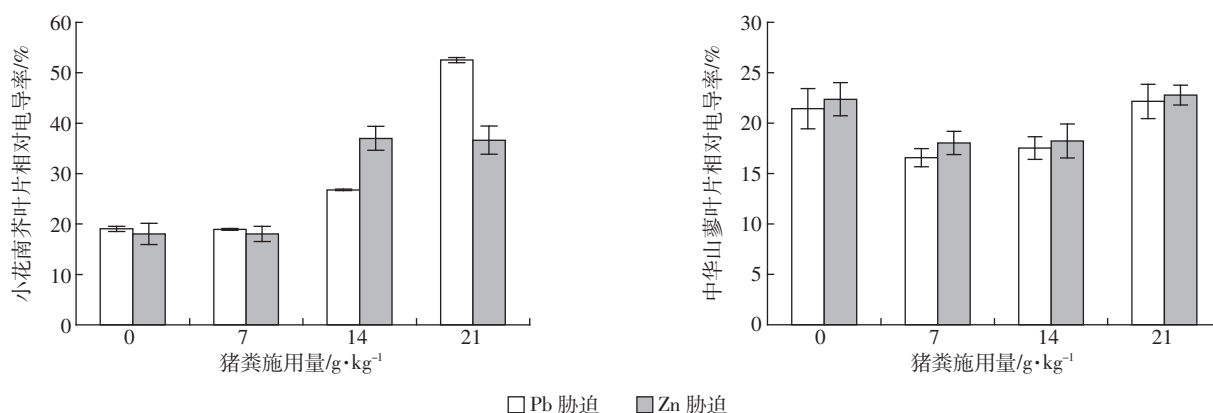


图4 施用猪粪对小花南芥和中华山蓼叶片相对电导率的影响

Figure 4 Membrane permeability in leaves of *A. alpinal* and *O. sinensis* with pig manure application under Pb and Zn stress

表 4 不同猪粪处理下小花南芥对 Pb 和 Zn 的吸收累积特征

Table 4 Pb and Zn accumulation characteristic of *A. alpinal* with N application

猪粪/ g·kg ⁻¹	地上部含量/mg·kg ⁻¹		地下部含量/mg·kg ⁻¹		富集系数		转移系数	
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
0	129.87±2.0d(0.34)	568.77±10.0d(1.25)	323.06±6.2d(0.02)	562.58±15.5c(0.03)	0.167±0.01d	0.71±0.03b	0.402±0.02c	1.01±0.02a
7	566.40±11.0b(2.79)	672.84±19.0b(3.70)	795.50±13.1d(0.11)	838.96±23.5a(0.25)	1.036±0.02a	0.69±0.04b	1.109±0.06a	0.80±0.03b
14	721.99±13.2a(5.30)	858.44±20.2a(5.99)	800.44±15.1d(0.57)	845.76±21.1a(0.61)	0.783±0.02b	0.91±0.02a	0.802±0.05b	1.01±0.04a
21	401.82±5.6c(3.76)	608.60±22.0c(5.93)	637.81±9.2d(0.66)	635.94±18.6b(1.04)	0.307±0.02c	0.62±0.02c	0.470±0.02c	0.96±0.02a

注:同列数据后的不同字母表示差异显著($P<0.05$)。括号内数据为累积量(mg·株⁻¹)。

表 5 不同猪粪处理下中华山蓼对 Pb 和 Zn 的吸收累积特征

Table 5 Pb and Zn accumulation characteristic of *O. sinensis* with pig manure application

猪粪/ g·kg ⁻¹	地上部含量/mg·kg ⁻¹		地下部含量/mg·kg ⁻¹		富集系数		转移系数	
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
0	187.0±10.9b(0.29)	149.0±2.4a(0.28)	210.3±6.8c(0.18)	144.4±1.7a(0.17)	0.19±0.01a	0.71±0.03b	0.13±0.02a	1.03±0.02a
7	191.2±5.7b(0.88)	145.8±2.3b(0.28)	225.3±9.4b(0.27)	143.7±5.1a(0.07)	0.18±0.02a	0.69±0.04b	0.12±0.06a	1.01±0.03a
14	165.4±3.4c(1.01)	121.4±3.8c(0.34)	180.7±7.7d(0.29)	123.5±4.7c(0.09)	0.16±0.02b	0.91±0.02a	0.10±0.05a	0.98±0.04a
21	230.6±7.6a(2.11)	125.3±2.6c(0.26)	242.8±3.4a(0.52)	131.8±3.0b(0.06)	0.21±0.02a	0.62±0.02c	0.10±0.02a	0.95±0.02a

注:同列数据后的不同字母表示差异显著($P<0.05$)。括号内数据为累积量(mg·株⁻¹)。

从累积量来看,Pb 在中华山蓼地上部和地下部的累积量的变化趋势一致,随着猪粪施用量的增加累积量逐渐增加,当猪粪的施用量为 21 g·kg⁻¹ 时 Pb 在中华山蓼地上部和地下部的累积量最高(表 5)。施加猪粪处理的 Pb 富集系数低于对照(21 g·kg⁻¹ 处理除外)。转移系数均小于 1,随着猪粪施用量的增加中华山蓼中 Pb 的转移系数之间没有显著的差异。Zn 在中华山蓼地上部的累积量除猪粪的施用量为 14 g·kg⁻¹ 外,随着猪粪施用量的增加没有显著的差异。Zn 在中华山蓼地下部的累积量随着猪粪的施用而下降,各施肥处理之间没有显著的差异。施加猪粪对 Zn 的富集系数和转移系数没有显著的影响。

3 讨论

施用有机肥对土壤 pH 值的影响取决于有机肥的组成、土壤的氧化还原电位和植物种类等。有机肥在矿化过程中分解产生低分子量的有机酸和腐植酸,可能导致土壤 pH 值下降^[14]。有机肥也可通过分解过程释放的碱性物质以及渍水条件下还原铁、锰等过程,使 pH 值升高^[15-16]。猪粪导致小花南芥土壤 pH 值降低,而中华山蓼土壤 pH 值高于对照。后者可能是盆栽控制条件不严所致,需要进一步的深入研究。

土壤有机物质对重金属污染具有缓冲和净化作用,主要表现在参与土壤离子的交换反应,增加土壤阳离子交换量,提高土壤环境容量。土壤有机物质稳

定土壤结构,提供土壤活性物质,为土壤微生物活动提供基质和能源,从而间接影响土壤重金属行为。施加猪粪在一定程度上改善土壤的有机质含量,增加土壤阳离子交换量。施猪粪 14 g·kg⁻¹ 的处理,小花南芥土壤阳离子交换量最高,而 21 g·kg⁻¹ 处理的土壤阳离子交换量有所下降,可能猪粪 21 g·kg⁻¹ 的处理对小花南芥根系的生长和土壤微生物的活性产生了一定的影响,改变了有机质的矿化速度和过程,其原因还有待于深入研究。施肥处理中华山蓼土壤的 CEC 比对照稍有增加,各处理间土壤 CEC 含量差异不显著。说明中华山蓼土壤对有机肥的缓冲能力较强。

作为重金属的络合剂,腐植酸可与土壤重金属形成络合物降低植物的吸收,富里酸与重金属形成络合物增加植物对重金属的吸收^[7,17-18]。Hu 等^[6]利用苔鲜泥炭作为有机物质,在沙质土中加入 320 g·kg⁻¹ 苔鲜泥炭,有机物结合态、水溶及可交换态的镉由 27% 上升到 54%,而铁锰氧化物结合态则由 19% 下降到 13%。施用低量有机肥(猪粪施用量为 7 g·kg⁻¹ 的处理)小花南芥土壤中 Pb 水溶态和可交换态含量最高,其原因可能由于高量有机肥条件下,植物的生长更快生物量更大,对土壤中 Pb 的吸收更多,导致 60 d 后土壤中 Pb 水溶态和可交换态含量降低。施用猪粪增加小花南芥土壤 CEC,促进小花南芥土壤中可溶态和可交换态的金属含量增加,增加重金属的生物有效性。相

关分析表明,小花南芥土壤中 CEC 与有机物结合态 Pb 含量的 $r=0.965\ 4$ ($P<0.05, n=4$)、小花南芥地上部分 Pb 含量的 $r=0.991\ 5$ ($P<0.05, n=4$)、小花南芥根中 Zn 含量的 $r=0.980\ 8$ ($P<0.05, n=4$) 和中华山蓼根中 Zn 含量的 $r=0.980\ 3$ ($P<0.05, n=4$) 之间具有显著的正相关性。

但是,施用猪粪对中华山蓼土壤 CEC 以及可溶态和可交换态的金属含量没有显著的影响。在猪粪施用条件下,铁锰氧化物结合态重金属含量没有显著的影响,有机物结合态重金属含量显著增加,其原因可能在于猪粪中有机质对 Pb 的结合,中华山蓼土壤有机物结合态 Pb 含量与猪粪的施用量之间呈显著的正相关性 ($r=0.957\ 6, P<0.05, n=4$)。有机质对土壤重金属的化学行为(沉淀-溶解、吸附-解吸、配位-解离形态变化及有效性等)的影响是多方面的^[19-20]。在不同土壤条件、金属种类、有机物种类等条件下,有机质可降低对土壤重金属的有效性,也可能增加其有效性^[21-22]。施用有机肥必须注意低分子量的有机酸和腐殖质的性质和种类。

植物受到重金属胁迫,其叶绿素含量下降,细胞膜结构被严重破坏,细胞膜透性增大。施加肥料可以改善土壤的理化性质,增强土壤肥力,有利于植物的生长并且可以减轻重金属对植物的伤害。植物的生长环境得到改善,其生长和生物量也会有相应的改善和提高。孙健等^[2]施用有机肥改良铅锌尾矿污染土壤后表明,施用有机肥能够显著提高灯心草地上部分的生物量。施加猪粪,小花南芥和中华山蓼的根长和生物量显著增加,猪粪的施用量与小花南芥根长(Zn 胁迫下, $r=0.987\ 4, P<0.05, n=4$)、生物量(Pb 胁迫下, $r=0.999\ 0, P<0.01, n=4$; Zn 胁迫下, $r=0.993\ 5, P<0.01, n=4$)呈显著正相关。具有发达的根系是先锋植物应具有的特征之一,因此,根长的增加在一定程度上能提高植物的抗性和增大对重金属的吸收表面积。但在 Pb 胁迫下,中华山蓼的根长和生物量随着猪粪施用量的增加而下降,其原因可能是由于猪粪施用量的增加,增大了 Pb 的有效性,从而对植物的胁迫增加。小花南芥叶片的叶绿素含量增加,中华山蓼叶片中相对电导率普遍小于未施肥的,可能是施肥之后小花南芥和中华山蓼受到的重金属伤害得到缓解。施肥对小花南芥和中华山蓼叶绿素和细胞膜透性均有很好的改善效果,在一定程度上缓解了重金属对植物的毒害作用。特别是猪粪 $14\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理对叶绿素的提高和膜质过氧化的缓解作用较好。

施加肥料不仅可以改善土壤的理化性质,增加土壤肥力,在一定程度上影响植物生长的根系和生物量,影响重金属向植物体内的转移过程和植物对重金属的吸收累积^[23-24]。猪粪的施用促进了 Pb 和 Zn 含量和累积量的增加。猪粪的施用量与小花南芥根部 Pb ($r=0.955\ 0, P<0.05, n=4$) 和 Zn 的累积量 ($r=0.990\ 5, P<0.05, n=4$)、中华山蓼地上部分 Pb 的累积量 ($r=0.950\ 3, P<0.05, n=4$) 之间具有显著的正相关性。随着猪粪施用量的增加,小花南芥地上部、地下部 Pb 含量表现出在猪粪 $14\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时最高,而累积量随着施肥量的增加而增加(Pb 在地上部分的累积量除外)。可见,猪粪的施用较好地促进了小花南芥对 Pb 和 Zn 的吸收和累积作用,其原因可能与有机物结合态含量的增加有关。相关分析表明,小花南芥土壤有机物结合态 Pb 含量与小花南芥地上部分 Pb 含量 ($r=0.979\ 3, P<0.05, n=4$) 和累积量 ($r=0.964\ 4, P<0.05, n=4$) 呈显著正相关。猪粪的施用不仅提高植物的生物量,而且能促进植物对 Pb 和 Zn 的吸收和累积。随着猪粪施用量的增加,中华山蓼地上部、地下部 Pb 含量先减后增,但 Pb 的累积量随着猪粪施用量的增加而增加,原因可能是猪粪的施用增加了中华山蓼的生物量。即使对 Pb 含量的影响不大,猪粪的施用仍然增加了中华山蓼对 Pb 的累积。中华山蓼地上部分对 Zn 的累积量没有显著的变化,而根中的 Zn 含量和累积量显著下降,可能是施猪粪后增加了土壤有机物结合态 Zn 含量,减小了 Zn 向植物体的转移。张青等^[25]研究发现,有机肥能够降低小油菜中 Zn 的含量,和本试验的结果相似。因此,不论是超富集植物还是先锋植物,施用猪粪都能促进植物的生长、提高生物量,并且不同程度提高对重金属的吸收和累积,对于重金属污染土壤修复效率的提高具有积极的作用。

4 结论

Pb 和 Zn 胁迫下,通过施用猪粪可提高土壤 CEC 和有机物结合态 Pb 和 Zn 含量,增加小花南芥土壤水溶态和可交换态 Pb 和 Zn 含量,同时促进植物根的生长、生物量提高和叶绿素含量增加,缓解重金属对植物产生的胁迫,导致小花南芥中 Pb、Zn 的含量、累积量、富集系数和转移系数的增加,中华山蓼中 Pb 含量和累积量增加。猪粪 $14\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为最适宜的施用量,不仅能有效提高超富集植物小花南芥对重金属的修复效率,而且能促进先锋植物中华山蓼的生长和提高其对重金属的抗性。

参考文献:

- [1] 束文圣, 杨开颜, 张志权. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 7-12.
SHU Wen-sheng, YANG Kai-yan, ZHANG Zhi-quan. Flora and heavy metals in dominant plants growing on an ancient copper spoil heap on Tonglushan in Hubei Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1): 7-12.
- [2] 孙健, 铁柏清, 周浩, 等. 不同改良剂对铅锌尾矿污染土壤中灯心草生长及重金属积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 25(3): 637-643.
SUN Jian, TIE Bai-qing, ZHOU Hao, et al. Effect of different amendments on the growth and heavy metals accumulation of *Juncus effuses* grown on the soil polluted by lead/zinc mine tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 25(3): 637-643.
- [3] 王英辉, 陈学军, 祁士华. 铅污染土壤的植物修复治理技术[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 790-794.
WANG Ying-hui, CHEN Xue-jun, QI Shi-hua. Phytoremediation technology of soil contaminated by lead[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 790-794.
- [4] 郑小林, 朱照宇, 黄伟雄, 等. N、P、K肥对香根草修复土壤镉、锌污染效率的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3): 560-564.
ZHENG Xiao-lin, ZHU Zhao-yu, HUANG Wei-xiong, et al. Effects of N, P, K fertilizer on phytoremediation effectiveness of cadmium and zinc pollution in *Vetiver Grass*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia sinica*, 2007, 27(3): 560-564.
- [5] 祖艳群, 李元, Bock L, 等. 重金属与植物N素营养之间的交互作用及其生态学效应[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 7-14.
ZU Yan-qun, LI Yuan, BOCK Laurent, et al. Interactions between heavy metals and nitrogen and their ecological effects [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 7-14.
- [6] HU Z Y, SHEN H, CAO ZH. Distribution of Cu in soil-crop system polluted by Cu[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(2): 62-65.
- [7] 余贵芬, 蒋新, 孙磊. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 770-776.
YU Gui-feng, JIANG Xin, SUN Lei. A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soil[J]. *Acta ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 770-776.
- [8] 孔文杰, 倪吾钟. 有机无机肥配合施用对土壤-油菜系统重金属平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 32-35.
KONG Wen-jie, NI Wu-zhong. Effects of integrated fertilization with commercial organic manure and chemical fertilizers on heavy metal balance in soil-rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3): 32-35.
- [9] ZU Y Q, LI Y, CHEN J J, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5): 755-762.
- [10] ZU Y Q, LI Y, SCHVARTZ C. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China[J]. *Environment International*, 2004, 30: 567-576.
- [11] 王林, 周启星. 农艺措施强化重金属污染土壤的植物修复[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 772-777.
WANG Lin, ZHOU Qi-xing. Strengthening phytoremediation of heavy-metal contaminated soils by agronomic management practice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 772-777.
- [12] 崔斌, 王凌, 张国印, 等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 373-375, 447.
CUI Bin, WANG Ling, ZHANG Guo-yin, et al. Status and harm of heavy metal pollution in soil and research progress in remediation technology[J]. *Journal of An-hui Agricultural Science*, 2012, 40(1): 373-375, 447.
- [13] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 57-59.
ZHANG Xian-zheng. Crop physiological research methods [M]. Beijing: Agricultural Press, 1992: 57-59.
- [14] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 48-51.
HU Cheng, CAO Zhi-ping, LUO Yan-rui, et al. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomass carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2007, 15(3): 48-51.
- [15] 华路, 白铃玉, 韦东普, 等. 土壤镉锌污染的植物效应与有机肥的调控作用[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2): 291-296.
HUA Luo, BAI Ling-yu, WEI Dong-pu, et al. Plant effects of Cd and Zn combined pollution and adjustment of organic manure[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(2): 291-296.
- [16] 赵中秋, 朱永官, 蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 282-286.
ZHAO Zhong-qiu, ZHU Yong-guan, CAI Yun-long. Transport and transformation of cadmium in soil-plant systems and the influence factors[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 282-286.
- [17] 陈世宝, 华路. 有机质在土壤重金属污染治理中的应用[J]. 农业环境与发展, 1997, 14(3): 26-29.
CHEN Shi-bao, HUA Luo. Application of organic matter in control of soil contaminated by heavy metals[J]. *Agro-Environment and Development*, 1997, 14(3): 26-29.
- [18] 华路, 陈世宝. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. 农业环境保护, 1998, 17(2): 55-59, 62.
HUA Luo, CHEN Shi-bao. Remediation effects of organic matter on soil contaminated by Cd[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1998, 17(2): 55-59, 62.
- [19] 高文文, 刘景双, 王洋. 有机质对冻融黑土重金属Zn赋存形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 1: 147-151.
GAO Wen-wen, LIU Jing-shuang, WANG Yang. Effect of organic matter on fractional transformation of Zn in black soils under freeze-thaw cycle[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 1: 147-151.
- [20] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(4): 82-87.
SUN Hua, TAN Chang-ying, HUANG Dao-you, et al. Effects of soil organic matter on the accumulation, availability and chemical speciation of heavy metal[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2011, 34(4): 82-87.

- [21] 李 波, 青长乐, 周正宾, 等. 肥料中氮磷和有机质对土壤重金属行为的影响及在治污中的应用[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(6):37-40.
- LI Bo, QING Chang-le, ZHOU Zheng-bin, et al. Effects of N, P and organic matter on behavior of heavy metals in soils and its application [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(6):37-40.
- [22] 李本银, 黄邵敏, 张玉婷, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 129-135.
- LI Ben-yin, HUANG Shao-min, ZHANG Yu-ting, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):129-135.
- [23] 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (7):1302-1309.
- WU Qing-qing, MA Jun-wei, JIANG Li-na, et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1302-1309.
- [24] 唐明灯, 艾绍英, 罗英健, 等. 有机无机配施对生菜生长及其 Cd、Pb 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6):1104-1110.
- TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LUO Ying-jian, et al. Effects of organic manures on the growth, Cd and Pb concentrations of lettuce plant based on the same nitrogen level[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6):1104-1110.
- [25] 张 青, 李菊梅, 徐明岗, 等. 改良剂对复合污染红壤中镉锌有效性的影响及机理[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):861-865.
- ZHANG Qing, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Effects of amendments on bioavailability of cadmium and zinc in compound contaminated red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):861-865.