

在蚯蚓影响下土壤 Pb、Cd 有效态的变化及小白菜对 Pb、Cd 的富集转移作用

袁宇飞, 李光德^①, 林立, 周楠楠, 敬佩, 焦伟

(山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 研究了在蚯蚓影响下 Pb、Cd 添加量不同 (Pb: 500 ~ 1 700 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; Cd: 1 ~ 30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 的土壤中 Pb 和 Cd 有效态及其含量的变化以及小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 对土壤中 Pb 和 Cd 的富集和转移作用。结果显示, 在蚯蚓的影响下, Pb 添加量为 500 ~ 1 400 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的土壤中酸提取态和可还原态 Pb 含量显著提高, 有效态 Pb 总含量也随土壤中 Pb 添加量的提高逐渐增加; Cd 添加量为 5 ~ 20 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的土壤中酸提取态 Cd 含量显著提高, 有效态 Cd 总含量也随土壤中 Cd 添加量的提高而逐渐增加; 当土壤中 Pb 和 Cd 添加量分别达到 1 700 和 30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 蚯蚓对 Pb 和 Cd 基本无活化作用。在蚯蚓的影响下, 小白菜地上部分 Pb 含量显著提高, 对 Pb 的转移系数也均高于各自的对照, 地上部分和地下部分对 Pb 的富集系数分别为 0.037 ~ 0.061 和 0.401 ~ 0.628。在蚯蚓影响下, 在 Cd 添加量较低 (1 ~ 5 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 的土壤中小白菜地上部分和地下部分的 Cd 含量以及对 Cd 的富集系数均高于各自的对照; 而在 Cd 添加量较高 (10 ~ 30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 的土壤中小白菜地上部分和地下部分的 Cd 含量以及对 Cd 的富集系数均低于各自的对照, 并随土壤中 Cd 添加量的提高逐渐降低; 小白菜地上部分和地下部分对 Cd 的富集系数分别为 1.196 ~ 11.516 和 1.744 ~ 20.425; 各处理组小白菜对 Cd 的转移系数与各自的对照差异不显著。研究结果显示, 蚯蚓主要对土壤中酸提取态和可还原态 Pb 以及酸提取态 Cd 有活化作用, 并且可促进 Pb 由小白菜地下部分向地上部分的转移, 但对 Cd 的转移无明显促进作用; 此外, 小白菜对 Pb 的富集作用不明显, 但对 Cd 有一定的富集能力, 这种能力的大小与土壤 Cd 含量有关。

关键词: 蚯蚓; 小白菜; Pb; Cd; 有效态; 富集作用

中图分类号: Q959.193; S154; X53 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2010)02-0079-07

Change of available state of Pb, Cd in soil and enrichment and transfer abilities of *Brassica chinensis* to Pb, Cd as affected by earthworm YUAN Yu-fei, LI Guang-de^①, LIN Li, ZHOU Nan-nan, JING Pei, JIAO Wei (College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2010, 19(2): 79-85

Abstract: As affected by earthworm, the changes of Pb and Cd available states and their contents in soil with different addition amount of Pb and Cd (Pb: 500-1 700 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; Cd: 1-30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) were studied, and their enrichment and transfer abilities of *Brassica chinensis* L. to Pb and Cd were also researched. The results show that as affected by earthworm, contents of acid extractable Pb and reducible Pb in soil with addition amount of 500-1 400 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Pb are increased significantly, and total content of available Pb increases gradually with increasing of Pb addition amount in soil. The acid extractable Cd content enhances obviously in soil with addition amount of 5-20 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cd and total content of available Cd increases gradually with increasing of Cd addition amount in soil. While earthworm generally has no activation effect on Pb and Cd in soil with addition amount of 1 700 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Pb or 30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cd. As affected by earthworm, Pb content in above-ground part of *B. chinensis* enhances obviously and Pb transfer coefficients in treatment groups all are higher than those in control groups. And the Pb enrichment coefficient of above-ground and under-ground parts of *B. chinensis* is 0.037-0.061 and

0.401–0.628, respectively. As affected by earthworm, Cd content and its enrichment coefficient in above-ground and under-ground parts of *B. chinensis* are higher than those of control groups in soil with lower addition amount of Cd ($1\text{--}5\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), while those are lower than those of control groups in soil with higher addition amount of Cd ($10\text{--}30\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), and Cd enrichment coefficient gradually decreases with increasing of Cd addition amount. And Cd enrichment coefficient in above-ground and under-ground parts of *B. chinensis* is 1.196–11.516 and 1.744–20.425, respectively. There is no obvious difference in Cd transfer coefficients between the treatment and control groups. It is revealed that earthworm has an activation effect to acid extractable Pb, reducible Pb and acid extractable Cd in soil, and promotes Pb transfer from under-ground part to above-ground part of *B. chinensis*, but has no obvious promoting effect on Cd transfer. Moreover, *B. chinensis* has no obvious effect on Pb enrichment, while has a certain Cd enrichment capability which relates to Cd content in soil.

Key words: earthworm; *Brassica chinensis* L.; Pb; Cd; available state; enrichment effect

经过物理、化学或生物过程,人类活动或自然作用释放出的重金属在土壤中逐渐积累而造成土壤的重金属污染,土壤重金属污染已成为全球面临的严重环境问题之一^[1–3]。Pb和Cd是土壤重金属污染中危害较为严重的重金属元素,已引起了广泛关注。Pb在土壤中吸附性强,被表层土壤滞留后残留时间长,通常认为其半衰期长达约1 000年,属难迁移累积型重金属^[4]。Cd在土壤中迁移转化的最大特点是不能或不易被生物体分解转化后排出体外,不易随水移动,只能沿食物链逐级往上传递,具有生物累积性,当积累到较高含量时就会对生物体产生毒性效应,影响生物的正常发育和代谢平衡^[5]。

植物修复(phytoremediation)是一种新兴的治理重金属污染土壤的绿色生物技术,近年来得到了众多研究者的青睐及重视。有研究表明,该技术能否成功应用除与植物本身积累重金属的能力有关外,植物从土壤中吸收重金属离子的能力还与土壤中重金属的生物有效性有很大关系^[6],而土壤中有效态重金属是植物能够直接或易吸收的重金属存在形态,具有直接生物有效性^[7]。

研究表明,与非根际土壤相比,根际土壤酸性强且富含有机质,而金属的溶解性受到土壤pH值和有机质含量的制约,所以根际环境必将改变土壤重金属的存在形态并影响其有效性^[8–9]。蚯蚓在改良土壤和提高土壤肥力等方面的作用已经被国内外大量实验结果所证实^[10]。蚯蚓在取食、作穴和排泄代谢产物等生命活动过程中可能对土壤性质和土壤中的重金属化学行为产生直接或间接的影响^[11–12],进而对土壤中重金属的有效性产生间接作用。

为了弄清蚯蚓在土壤植物修复过程中的作用,寻找高效的植物修复途径,作者采用在栽培土中添加蚯

蚓的方法,研究了在蚯蚓存在的条件下栽培土壤中重金属Pb、Cd的有效态变化及小白菜(*Brassica chinensis* L.)对Pb、Cd的生物富集和转移作用,以期生物诱导条件下重金属污染土壤的植物修复提供理论支持和科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试土壤为棕壤土,取自山东农业大学南校区实验站。取0~20 cm表层土,自然风干,剔除土壤中的植物残体和石块,磨碎后过20目筛,备用。供试土壤中含有机质 $10.9\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.814\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $65.69\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、速效磷 $10.42\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、速效钾 $81.43\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、全铅(Pb) $68.4\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和全镉(Cd) $0.412\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, pH 6.92。

供试蚯蚓为市售赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*);供试小白菜品种为‘上海青’,购自山东农业大学种业有限公司。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 实验于2009年4月在山东农业大学南校区实验站进行。土壤风干后过孔径3 mm的尼龙筛,备用。取直径20 cm、高20 cm的塑料盆,每盆装土5 kg;Pb和Cd分别以固体 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 CdCl_2 的形式施入土壤,充分混匀,加水使土壤含水量为田间持水量的60%,平衡1周。

以GB 15618—1995规定的土壤中Pb和Cd含量的三级标准(分别为500和 $1\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为基准,分别设置T1、T2、T3、T4和T5等5个处理组,各处理组土壤中Pb和Cd的添加量分别为: $500\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Pb和 $1\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cd(T1); $700\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Pb和 $5\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cd

(T2); 1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$ 和 10 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$ (T3); 1 400 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$ 和 20 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$ (T4); 1 700 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$ 和 30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$ (T5)。

实验前用去离子水将蚯蚓洗净并置于湿润的滤纸上 3 h,待排净肠道内含物后冲洗干净,滤纸吸干。在平衡 1 周的各处理组土壤中直播小白菜籽,每盆播种约 20 粒。播种后加入蚯蚓,每盆 20 条;各处理组同时设置不加蚯蚓的对照组。

出苗后进行间苗,每盆定植 10 株长势一致的幼苗。小白菜生长期间保持土壤含水量为田间持水量的 60%,定植 50 d 后收获。每个处理组和对照组各设 3 次重复(3 盆),共 30 盆。

1.2.2 土壤中 Pb 和 Cd 有效态的测定 处理结束后,将塑料盆中的处理土分别倒出,自然风干后过 100 目筛,每盆取 0.5 g 土样用于 Pb 和 Cd 有效态的测定。

采用欧洲共同体标准物质局(European Communities Bureau of Reference)提出的三步提取法(BCR 法)测定 Pb 和 Cd 有效态,包括酸提取态(可交换及碳酸盐结合态)、可还原态(Fe/Mn 氧化物结合态)、可氧化态(有机物及硫化物结合态)和残渣态。

1.2.3 小白菜中 Pb 和 Cd 含量的测定 分别收集各盆中小白菜全部植株,将地上部分与地下部分分开后分别用去离子水冲洗干净,吸干表面水分后置于鼓风干燥箱内于 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 5 min,然后于 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量。分别磨碎后过 20 目筛,备用。

取 0.5 ~ 1.0 g 粉末样品置于瓷坩埚中,于电炉上炭化至样品全部变为黑色且不冒黑烟为止,将炭化后的样品置于马弗炉内于 500 $^{\circ}\text{C}$ 下灰化至样品全部变为灰白色为止。

灰化的样品用 5 mL 盐酸溶液[$V(38\% \text{ 盐酸}):V(\text{水})=1:1$]分别溶解并定容至 50 mL,摇匀后即待测液。用火焰原子吸收分光光度法(FAAS)测定各待测液中的 Pb 和 Cd 含量。

1.3 数据处理

参照文献[13]的方法计算小白菜对 Pb 和 Cd 的富集系数和转移系数。富集系数=植株中某种重金属元素的含量/土壤中该种重金属元素的含量;转移系数=植株地上部分某种重金属元素的含量/植株地下部分该种重金属元素的含量。

实验数据采用 Excel 和 SPSS 软件进行分析计算。

2 结果和分析

2.1 在蚯蚓影响下土壤中 Pb 和 Cd 有效态及其含量的变化

2.1.1 对 Pb 有效态及其含量的影响 在蚯蚓影响下土壤中 Pb 有效态及其含量见表 1。由表 1 可以看出,土壤中酸提取态 Pb 和可还原态 Pb 含量及有效态 Pb 总含量均随土壤中 Pb 添加量的提高而逐渐增加,各对照组土壤中可氧化态 Pb 含量也随 Pb 添加量的提高而逐渐增加,但在蚯蚓的影响下可氧化态 Pb 含量则随土壤中 Pb 添加量的提高呈现先逐渐增加然后小幅下降再略有升高的变化趋势。

T1(500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$) ~ T4(1 400 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$) 处理组中,添加蚯蚓后,土壤中有有效态 Pb 总含量显著提高($P<0.05$),分别为各自对照的 1.20、1.24、1.08 和 1.04 倍,其中 T2(700 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$)处理组中蚯蚓对土壤 Pb 的活化作用最明显,而在 Pb 添加量较高(1 000 和 1 400 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$)的处理组中,蚯蚓的活化作用减弱。

在各处理组的土壤中添加蚯蚓后,3 种有效态 Pb 的含量均有一定程度增加,其中酸提取态 Pb 含量和可还原态 Pb 含量与各自的对照间差异显著($P<0.05$),但可氧化态 Pb 含量与各自的对照组间差异不显著($P>0.05$)。表明蚯蚓对土壤中 Pb 的活化作用主要体现在酸提取态 Pb 含量和可还原态 Pb 含量的增加。

T2 处理组中,蚯蚓对土壤中酸提取态 Pb 和可还原态 Pb 的活化作用达到最高,二者的含量分别为对照组的 1.42 和 1.19 倍。在 T5(1 700 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Pb}$)处理组中,土壤中酸提取态 Pb 和可还原态 Pb 含量以及有效态 Pb 总含量均比对照有所降低,可氧化态 Pb 含量比对照略有升高,但差异不显著($P>0.05$)。表明在 Pb 添加量较高的土壤中,蚯蚓基本失去了对 Pb 的活化能力。

2.1.2 对 Cd 有效态及其含量的影响 蚯蚓影响下土壤中 Cd 的有效态及其含量见表 2。由表 2 可以看出,土壤中各有效态 Cd 含量随着土壤中 Cd 添加量的提高而增加。

在 T1(1 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$) ~ T4(20 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$) 处理组中添加蚯蚓可显著提高土壤中有有效态 Cd 总含量($P<0.05$)。在 T2(5 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$) ~ T4 处理组中添加

蚯蚓,可使土壤中酸提取态Cd含量显著提高($P<0.05$),分别为各自对照的1.51、1.52和1.49倍。在蚯蚓影响下,T2($5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{Cd}$)~T5($30\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{Cd}$)处理组土壤中可还原态Cd含量与可氧化态Cd含量均较各自的对照有所降低。说明蚯蚓对土壤中Cd

的活化作用主要体现在对酸提取态Cd的活化。
在T5处理组中,添加蚯蚓的土壤中3种有效态Cd的含量均较对照有所降低,说明土壤中过高的Cd浓度抑制了蚯蚓的活化作用。

表 1 蚯蚓影响下 Pb 添加量不同的土壤中有有效态 Pb 含量的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 1 Content comparison of available Pb in soil with different addition amount of Pb as affected by earthworm ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	蚯蚓数 Number of earthworm	Pb 添加量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Pb addition amount	土壤中有有效态 Pb 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Content of available Pb in soil			
			酸提取态 Acid extractable	可还原态 Reducible	可氧化态 Oxidable	总量 Total
T1	0(CK)	500	72.48±2.54	284.47±6.45	51.29±1.23	408.24±10.22
	20	500	101.21±3.28	334.02±7.72	54.40±1.35	489.63±12.35
T2	0(CK)	700	76.89±2.68	409.87±8.96	59.64±1.67	546.40±13.31
	20	700	109.39±2.65	485.88±9.19	81.30±2.91	676.57±14.75
T3	0(CK)	1 000	139.70±2.37	692.64±7.37	70.84±2.11	903.18±11.85
	20	1 000	147.45±2.68	726.62±7.84	101.20±3.85	975.27±14.37
T4	0(CK)	1 400	240.48±2.68	977.60±8.16	69.20±2.58	1 287.28±13.42
	20	1 400	265.68±4.10	995.12±9.69	81.12±2.12	1 341.92±15.91
T5	0(CK)	1 700	322.65±2.63	1 273.29±8.32	86.24±2.59	1 682.18±13.54
	20	1 700	308.69±6.30	1 240.61±9.67	96.07±4.48	1 645.37±20.45

¹⁾表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of three replications.

表 2 蚯蚓影响下 Cd 添加量不同的土壤中有有效态 Cd 含量的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 2 Content comparison of available Cd in soil with different addition amount of Cd as affected by earthworm ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	蚯蚓数 Number of earthworm	Cd 添加量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cd addition amount	土壤中有有效态 Cd 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Content of available Cd in soil			
			酸提取态 Acid extractable	可还原态 Reducible	可氧化态 Oxidable	总量 Total
T1	0(CK)	1	0.23±0.15	0.25±0.15	0.39±0.12	0.87±0.42
	20	1	0.23±0.10	0.43±0.11	0.39±0.10	1.05±0.31
T2	0(CK)	5	2.03±0.26	2.47±0.26	0.41±0.12	4.91±0.64
	20	5	3.06±0.52	1.66±0.23	0.40±0.15	5.12±0.90
T3	0(CK)	10	4.23±0.24	4.17±0.28	0.57±0.18	8.97±0.70
	20	10	6.42±0.75	3.25±0.25	0.40±0.12	10.07±1.12
T4	0(CK)	20	9.83±0.45	3.98±0.49	3.14±0.35	16.95±1.29
	20	20	14.64±0.85	3.14±0.32	2.16±0.17	19.94±1.34
T5	0(CK)	30	16.89±1.32	7.93±0.97	3.58±0.82	28.40±3.11
	20	30	14.83±0.91	6.43±0.95	2.43±0.75	23.69±2.61

¹⁾表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of three replications.

2.2 蚯蚓影响下小白菜对土壤中 Pb 和 Cd 的转移及富集作用

2.2.1 小白菜对 Pb 的转移及富集作用 蚯蚓影响下小白菜对土壤中 Pb 的转移及富集作用见表 3。由表 3 可见,添加蚯蚓后,T1($500\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{Pb}$)~T5($1\text{ }700\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{Pb}$)处理组中小白菜地上部分 Pb 含量

均显著高于对照组($P<0.05$),分别为各自对照组的18.72、8.82、7.17、6.31和4.67倍,说明蚯蚓的存在能够促进小白菜地上部分对Pb的富集。

转移系数为植物地上部分与地下部分重金属含量的比值,体现了植物由地下部分向地上部分运输重金属的能力。蚯蚓影响下,除T1处理组外,T2(700

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{Pb}$) ~ T5 处理组中小白菜地下部分的 Pb 含量均较各自的对照低,且 T1 ~ T5 处理组中小白菜对 Pb 的转移系数较各自的对照显著提高 ($P<0.05$),分别为各自对照的 15.50、9.50、10.44、8.21 和 5.11 倍,说明蚯蚓的存在可以促进 Pb 在小白菜体内由地下部分向地上部分转移。

富集系数是植物体内重金属含量与土壤中重金属含量的比值。在蚯蚓的影响下,小白菜地上部分和地下部分对 Pb 的富集系数分别为 0.037 ~ 0.061 和 0.401 ~ 0.628,其中地上部分对 Pb 的富集系数明显

高于各自的对照(0.002 ~ 0.013);除 T1 处理组外,其他处理组小白菜地下部分对 Pb 的富集系数均小于各自的对照,说明蚯蚓的存在能在一定程度上提高小白菜地上部分对 Pb 的富集能力,但对小白菜地下部分 Pb 富集能力没有明显的促进作用。随着土壤中 Pb 添加量的增加,小白菜地上部分对 Pb 的富集系数逐渐增大,地下部分则未表现出明显的变化规律。总体上看,小白菜地上部分和地下部分对 Pb 的富集系数均小于 1,说明小白菜对 Pb 的富集能力较弱。

表 3 蚯蚓影响下小白菜对土壤中 Pb 的转移及富集能力的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 3 Comparison of transfer and enrichment abilities of *Brassica chinensis* L. to Pb in soil as affected by earthworm ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	蚯蚓数 Number of earthworm	Pb 添加量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Pb addition amount	Pb 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Pb content		转移系数 Transfer coefficient	富集系数 Enrichment coefficient	
			地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part		地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part
T1	0 (CK)	500	1.13±0.02	180.88±2.22	0.006	0.002	0.318
	20	500	21.15±0.25	227.94±7.37	0.093	0.037	0.401
T2	0 (CK)	700	3.85±0.12	473.04±12.45	0.008	0.005	0.616
	20	700	33.97±1.43	448.53±12.52	0.076	0.044	0.584
T3	0 (CK)	1 000	7.36±1.08	779.41±25.98	0.009	0.007	0.730
	20	1 000	52.78±2.32	558.82±20.30	0.094	0.049	0.523
T4	0 (CK)	1 400	13.52±1.20	938.73±30.84	0.014	0.009	0.639
	20	1 400	85.26±2.45	742.65±27.72	0.115	0.058	0.506
T5	0 (CK)	1 700	23.08±1.50	1 183.82±21.97	0.006	0.013	0.669
	20	1 700	107.69±3.83	1 110.29±25.11	0.093	0.061	0.628

¹⁾ 表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of three replications.

2.2.2 小白菜对 Cd 的转移及富集作用 蚯蚓影响下小白菜对土壤中 Cd 的转移及富集作用见表 4。由表 4 可以看出,在蚯蚓影响下,T1 ($1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{Cd}$) ~ T2 ($5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{Cd}$) 处理组中小白菜地上部分和地下部分的 Cd 含量显著提高,与各自对照组的差异达显著水平 ($P<0.05$);其中 T2 处理组中地上部分和地下部分的 Cd 含量分别为对照组的 1.38 和 1.86 倍,差异最大,表明在 T2 处理组中蚯蚓对小白菜吸收 Cd 的促进作用最大。在蚯蚓影响下,T3 ($10 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{Cd}$) ~ T5 ($30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{Cd}$) 处理组小白菜地上部分和地下部分 Cd 含量明显低于对照,说明在 Cd 添加量较高的土壤中蚯蚓对小白菜吸收 Cd 无促进作用。

在蚯蚓影响下,T1 ~ T5 处理组中小白菜对 Cd 的转移系数均小于 1,其中 T1 和 T2 处理组的转移系数小于各自的对照组,以 T2 处理组的转移系数最小;而

T3、T4 和 T5 处理组的转移系数则高于各自的对照组,但 5 个处理组的转移系数与各自的对照组间差异均不显著 ($P>0.05$),说明蚯蚓的存在对 Cd 在小白菜体内的转移没有明显的促进作用。

由表 4 还可见,不论是处理组还是各自的对照组,小白菜地上部分和地下部分对 Cd 的富集系数均大于 1,且富集系数基本上随土壤中 Cd 添加量的增加逐渐减小,说明小白菜对 Cd 有较强的富集能力,且与土壤中 Cd 浓度呈一定的负相关关系,即小白菜对 Cd 的富集能力随 Cd 添加量的增加而减弱。在蚯蚓影响下,小白菜地上部分和地下部分对 Cd 的富集系数分别为 1.196 ~ 11.516 和 1.744 ~ 20.425,T1 和 T2 处理组小白菜地下部分和地上部分对 Cd 的富集系数均大于各自的对照组,而 T3、T4 和 T5 处理组小白菜地下部分和地上部分对 Cd 的富集系数均小于各自的

表 4 蚯蚓影响下小白菜对土壤中 Cd 的转移及富集能力的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 4 Comparison of transfer and enrichment abilities of *Brassica chinensis* L. to Cd in soil as affected by earthworm ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	蚯蚓数 Number of earthworm	Cd 添加量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cd addition amount	Cd 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cd content		转移系数 Transfer coefficient	富集系数 Enrichment coefficient	
			地上部分	地下部分		地上部分	地下部分
			Above-ground part	Under-ground part		Above-ground part	Under-ground part
T1	0 (CK)	1	13.29 $\pm$ 1.25	19.68 $\pm$ 1.52	0.675	9.412	13.938
	20	1	16.26 $\pm$ 2.48	28.84 $\pm$ 1.46	0.564	11.516	20.425
T2	0 (CK)	5	20.19 $\pm$ 2.68	54.08 $\pm$ 5.28	0.373	3.731	9.993
	20	5	27.85 $\pm$ 1.56	100.38 $\pm$ 5.52	0.277	5.146	18.548
T3	0 (CK)	10	41.28 $\pm$ 5.84	95.47 $\pm$ 6.58	0.432	3.965	9.169
	20	10	31.93 $\pm$ 5.58	71.97 $\pm$ 5.39	0.444	3.067	6.912
T4	0 (CK)	20	68.29 $\pm$ 6.81	167.65 $\pm$ 7.52	0.407	3.346	8.213
	20	20	26.75 $\pm$ 5.17	61.57 $\pm$ 6.25	0.434	1.311	3.016
T5	0 (CK)	30	87.90 $\pm$ 4.71	147.73 $\pm$ 6.10	0.595	2.890	4.858
	20	30	36.36 $\pm$ 5.60	53.03 $\pm$ 4.85	0.686	1.196	1.744

¹⁾表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of three replications.

对照组,表明在土壤 Cd 添加量较低的条件下,蚯蚓的存在能在一定程度上促进小白菜对 Cd 的富集作用,但在土壤 Cd 添加量较高的条件下蚯蚓的存在不能促进小白菜对 Cd 的富集作用。

3 讨论和结论

3.1 蚯蚓活动对土壤中 Pb 和 Cd 有效态及其含量的影响

刘德鸿等^[14]的研究结果显示,蚯蚓可以通过改变土壤 pH 值和排泄蚓粪等途径提高土壤重金属的有效态含量。此外,蚯蚓体表还可以分泌出大量的含有 -COOH、-NH₂ 和 -CO 等活性基团的胶粘物质,这些物质通过络合或螯合作用推动土壤重金属的活化;同时,蚯蚓的活动能够刺激土壤微生物的活动^[15-16],且微生物的活动也可以直接或间接活化重金属。这些研究结果均说明蚯蚓活动可以改变土壤中重金属的有效态含量。

基于前人的研究结果,作者在 Pb 和 Cd 污染土壤中添加蚯蚓,以期研究蚯蚓活动对土壤中 Pb 和 Cd 有效态及其含量的影响,结果显示,在 Pb 添加量为 500 ~ 1 400 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,蚯蚓活动可显著提高土壤中酸提取态 Pb 含量和可还原态 Pb 含量,但对可氧化态 Pb 含量影响不显著,该结果与敬佩等^[17]的研究结果一致,推测可能由于蚯蚓的生理活动促进了土壤中的 Pb 向酸提取态和可还原态转化。当土壤中 Pb 添加量达到 1 700 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,过高的 Pb 含量抑制

了蚯蚓的正常代谢和生命活动,使蚯蚓基本失去活化作用。

蚯蚓对土壤中 Cd 的活化作用主要体现在酸提取态 Cd 含量的提高,这可能与蚯蚓对 Cd 的强烈富集作用有关。王振中等^[18]研究证明,蚯蚓体内 Cd 含量可达到土壤的 5 ~ 7 倍。Cd 经蚯蚓体内排入土壤后,经过沉淀和吸附等物理化学过程,可转化为酸溶解态 Cd。当土壤中 Cd 添加量达到 30 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,过高的 Cd 含量抑制了蚯蚓的正常代谢和生命活动,影响了蚯蚓对土壤中 Cd 的活化作用,同时可能由于蚯蚓对 Cd 的富集作用导致土壤中有效态 Cd 含量的减少。

3.2 蚯蚓活动对小白菜吸收 Pb 和 Cd 的影响

植物对重金属元素的迁移转化能力是指植物从土壤中吸取重金属元素并由生长周期较长的根向生长周期较短的茎叶转移的能力^[6],可用转移系数表示。转移系数大于 1 就意味着在更新周期较短的植物地上部分器官中累积和吸收了较多的重金属元素,对植物地上部分进行收割,就可以使土壤中重金属元素浓度逐渐降低,从而达到修复污染土壤的目的。因而,提高植物对污染土壤的修复效率,重要的是要提高植物对土壤中重金属元素的吸收、富集及转移能力。

本实验中,蚯蚓对土壤中 Pb 和 Cd 均表现出一定的活化作用,在一定浓度范围内使得土壤中的 Pb 和 Cd 向植物可吸收的有效态转化,因而,可以促进小白菜对土壤中 Pb 和 Cd 的吸收,提高小白菜对土壤 Pb 和 Cd 污染的修复效率。

实验结果还显示,在蚯蚓影响下,各处理组小白菜地上部分 Pb 含量以及富集系数较各自的对照有显著提高,同时,小白菜对 Pb 的转移系数也明显高于各自的对照,说明蚯蚓活动能够促进小白菜对土壤中 Pb 的吸收,并能显著提高 Pb 在小白菜体内由地下部分向地上部分的转移能力,使地上部分的 Pb 富集能力提高。在蚯蚓影响下, T2 ~ T5 处理组小白菜地下部分的 Pb 含量均较各自的对照有所降低,可能与小白菜地下部分 Pb 转移至地上部分有关,也说明了蚯蚓活动能促进小白菜体内 Pb 的转移。

在土壤 Cd 添加量较低($1 \sim 5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$)的条件下,蚯蚓活动能在一定程度上促进小白菜对 Cd 的吸收和富集作用,蚯蚓通过对土壤中 Cd 的活化作用,促进了小白菜对 Cd 的吸收和富集,使小白菜地上部分和地下部分的 Cd 含量较对照有所增加。但在土壤 Cd 添加量较高($10 \sim 30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$)的条件下,由于蚯蚓对 Cd 有强烈的富集作用,使土壤中的 Cd 大量富集于蚯蚓体内,减少了小白菜对 Cd 的吸收,导致小白菜地上部分和地下部分 Cd 含量低于各自的对照,且富集系数也低于各自的对照。虽然在土壤 Cd 添加量较低($1 \sim 5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$)和较高($10 \sim 30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{Cd}$)的土壤中,因蚯蚓的作用使小白菜对 Cd 的转移系数分别低于或高于各自的对照,但差异并不显著,说明蚯蚓活动对 Cd 在小白菜体内的转移没有明显影响。

在蚯蚓影响下,小白菜地上部分和地下部分对 Pb 的富集系数均小于 1、对 Cd 的富集系数均大于 1。说明小白菜地上部分和地下部分对 Pb 没有明显的富集能力,而对 Cd 则有一定的富集能力。

综合分析后可见,蚯蚓对土壤中的 Pb 和 Cd 均有一定的活化作用,但这种活化作用因 Pb 和 Cd 不同的有效态以及土壤中 Pb 和 Cd 的添加量而异。而在蚯蚓影响下小白菜对 Pb 和 Cd 的富集、吸收以及转移作用与土壤中 Pb 和 Cd 的添加量以及蚯蚓本身对 Pb 和 Cd 的吸收、富集作用有密切关系,其作用机制有待进一步的实验研究。

参考文献:

[1] Chen Z S, Lee G. J, Liu J C. The effects of chemical remediation treatments on the extractability and speciation of cadmium and lead in

contaminated soils[J]. Chemosphere, 2000, 41(1/2): 235-242.

[2] Khan A G, Kuek C, Chaudhry T M, et al. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation[J]. Chemosphere, 2000, 41(1/2): 197-207.

[3] Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals [J]. Chemosphere, 2000, 41(1/2): 229-234.

[4] 栗银,袁兴中,曾光明,等. 土壤-植物系统中铅的迁移转化影响因素研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(16): 6953-6955.

[5] 罗绪强,王世杰,张桂玲. 土壤镉污染及其生物修复研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2008, 27(4): 357-361.

[6] 孙健,铁柏清,秦普丰,等. 铅锌矿区土壤和植物重金属污染调查分析[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(2): 63-67.

[7] 王学锋,杨艳琴. 土壤-植物系统重金属形态分析和生物有效性研究进展[J]. 化工环保, 2004, 24(1): 24-28.

[8] Seguin V, Gagnon C, Courchesne F. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil-root interface of forested soils[J]. Plant and Soil, 2004, 260(1/2): 1-17.

[9] 陈有鑑,陶澍,邓宝山,等. 不同作物根际环境对土壤重金属形态的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 54-59.

[10] 黄福珍. 蚯蚓[M]. 北京: 农业出版社, 1982: 83-84.

[11] Willems J J G M, Marinissen J C Y, Blair J M. Effects of earthworms on nitrogen mineralization[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 23(1): 57-63.

[12] Winding A, Ronn R, Hendriksen N B. Bacteria and protozoa in soil microhabitats as affected by earthworms [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 24(2): 133-140.

[13] 崔爽,周启星,晁雷. 某冶炼厂周围 8 种植物对重金属的吸收与富集作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 512-515.

[14] 刘德鸿,成杰民,刘德辉. 蚯蚓对土壤中铜、镉形态及高丹草生物有效性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(2): 209-214.

[15] Brown G G. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? [J]. Plant Soil, 1995, 170: 209-231.

[16] Hu F, Li H X, He Y Q. Organic matter decomposition in red soil as affected by earthworms [J]. Pedosphere, 2000, 10(2): 143-148.

[17] 敬佩,李光德,刘坤,等. 蚯蚓诱导对土壤中铅、镉形态的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 65-68.

[18] 王振中,张友梅,胡觉莲,等. 土壤重金属污染对蚯蚓 (*Opisthopora*) 影响的研究[J]. 环境科学学报, 1994, 14(2): 236-243.