

蚯蚓对土壤中重金属的富集作用研究

伏小勇, 秦 赏, 杨 柳, 陈学民, 黄 魁, 侯培强

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 甘肃 730070)

摘 要: 通过向供试土壤中添加 CuSO_4 、 ZnSO_4 、 $\text{Pb}(\text{Ac})_2$ 、 HgCl_2 以模拟受污土壤, 研究接种于其中的微小双胸蚯蚓对重金属的富集作用。以不加重金属盐类为对照, 分别研究了不同培养时间和不同重金属浓度对富集量的影响。结果表明, 蚯蚓对各种重金属的富集量随着培养时间的增加而变化, 且对不同重金属最大富集量的出现时间也不相同。在第 2 周时蚯蚓对 Cu、Pb 富集量达到最大, 而对 Zn 的富集量在第 4 周时达到最大。与 Cu、Zn、Pb 的富集量相比, 蚯蚓对 Hg 没有明显的富集作用, 且对 Hg 的最大富集量时间不明显。在其耐受浓度范围内, 蚯蚓对重金属的富集量随着重金属浓度的增加而增加, 且蚯蚓对重金属的吸收顺序为: $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Hg}$, 说明了微小双胸蚯蚓对 Cu、Zn、Pb、Hg 4 种元素有一定的忍耐和富集能力, 但其对重金属的忍耐和富集能力是有选择性的, 说明不同重金属表现出的毒性是不一样的。研究结果初步推断, 影响蚯蚓对重金属富集作用的主要原因可能是体内酶的作用, 不同重金属可以从多方面干扰了动物机体内的生理生化功能。

关键词: 微小双胸蚯蚓; 富集; 重金属; 土壤

中图分类号: X174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)01-0078-06

Effects of Earthworm Accumulation of Heavy Metals in Soil Matrix

FU Xiao-yong, QIN Shang, YANG Liu, CHEN Xue-min, HUANG Kui, HOU Pei-qiang

(School of Environmental and Municipal Engineering of Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The objective of this work was to investigate the effects of earthworm (*Bimastus parvus*) on the accumulation of heavy metals in the contaminated soil by adding CuSO_4 , ZnSO_4 , $\text{Pb}(\text{Ac})_2$ and HgCl_2 . Through the comparison between adding and without adding the heavy metal salts into soil for control, the influences of the different incubation time and different concentrations on accumulation of heavy metals were studied. The results showed that the accumulation of heavy metals in earthworm body varied with the increased incubation time when the maximum accumulation times were variously determined for the different heavy metals added. The maximum accumulation of copper and lead could reach the maximum for two weeks, but four weeks for zinc. However, accumulation of mercury, in comparison with Cu, Zn and Pb, appeared to be unobvious and did not have the significant differences with time too. The results also proved that the accumulation of heavy metals in earthworm increased with the increase of heavy metal concentrations within its tolerance limitation. The heavy metals were absorbed by earthworm in priority following the order as $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Hg}$. It certified that the earthworm had the capability of tolerance and accumulation to copper, zinc, lead and mercury, but these capabilities had the apparent selectivity, indicating that the different heavy metals showed a big difference in toxicity. On basis of the research results, it could be inferred that the main reason influencing the heavy metal accumulation might be the effect of enzyme in earthworm body. The different heavy metals could interfere with the physiological and biochemical functions of animals from various aspects.

Keywords: *Bimastus parvus*; accumulation; heavy metals; soil

目前, 土壤重金属污染的日益加剧对人类的生存

和生态维持构成了严重威胁, 尤其是复合重金属污染, 因此污染土壤的生态安全评价和治理已成为环境研究领域中的热门课题之一, 受到高度重视^[1-2]。利用生长在污染土壤中的蚯蚓作为指示生物, 可以评价和预测土壤污染水平和生态风险^[3, 16-17]。在自然生态系统中, 蚯蚓生活在土壤中, 是污染物从土壤到食物链高

收稿日期: 2008-03-02

作者简介: 伏小勇 (1959—), 男, 甘肃秦安人, 副教授, 从事水污染控制工程、污泥资源化利用等方面研究。

E-mail: fuxiaoyong7362@mail.lzjtu.cn

通讯作者: 陈学民 E-mail: xueminch@sina.com

营养级转移的重要环节^[4]。因此蚯蚓常被用作化学物质在土壤中毒理实验的模拟生物来监测生态系统的状态和可能发生的变化,以此评价土壤的生态和环境健康状况^[5]。同时蚯蚓在改善土壤结构、水分和养分供应,提高土壤肥力,促进物质循环等方面也起着重要的作用。据报道蚯蚓体内黄色组织中的黄色细胞还具有富集某些重金属的作用^[6]。因此,蚯蚓不仅可以作为土壤重金属污染的重要指示生物,而且对被重金属污染的土壤具有一定的净化能力^[7,18-19]。在自然界中,复合污染是一种普遍存在的现象,因而研究蚯蚓在重金属复合污染土壤中的作用更具现实意义。

本文模拟在重金属污染的土壤中接种耐受蚯蚓,通过蚯蚓对重金属的富集作用研究,探讨蚯蚓修复重金属污染土壤的可行性,为治理土壤中的重金属污染寻求安全、经济的技术途径,同时为重金属污染土壤修复技术提供一定的基础数据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试蚯蚓为微小双胸蚓(*Bimastus parvus*),为本实验室室内饲养,选用 1~2 月龄,体长约 3~4 cm,健康状况良好的个体。实验用土壤采自学校后面的农田土,属第四纪湿陷性黄土,主要采集表层土(0~20 cm),土壤的基本化学性质见表 1。

表 1 供试土壤的化学性质

Table 1 The chemical properties of soils for experiments

项目	pH	有机质/ %	总 Cu/ mg·kg ⁻¹	总 Zn/ mg·kg ⁻¹	总 Pb/ mg·kg ⁻¹	总 Hg/ mg·kg ⁻¹
土壤	7.86	0.35	15.10	6.45	1.09	0.119

1.2 土壤的处理

以湿陷性黄土为供试土壤,将适量 CuSO₄、ZnSO₄、Pb(Ac)₂、HgCl₂ 分别以盐质量比为 0%、0.001%、0.005%、0.01% 不同比例与供试土壤混合均匀,调节其水分含量,形成如下实验土壤:(1)对照,不加任何盐类;(2)含重金属盐浓度为 0.001% 的实验土壤,即施加外源性铜、锌、铅、汞离子浓度分别为 4.00、4.03、6.38、7.39 mg·kg⁻¹ 的土壤;(3)含重金属盐浓度为 0.005% 的实验土壤,即施加外源性铜、锌、铅、汞离子浓度分别为 20.00、20.15、31.90、36.95 mg·kg⁻¹ 的土壤;(4)含重金属盐浓度为 0.01% 的实验土壤,即施加外源性铜、锌、铅、汞离子浓度分别为 40.00、40.30、

63.80、73.90 mg·kg⁻¹ 的土壤。

1.3 蚯蚓饲养方法

取口径 15 cm、底部有透气孔的塑料盆 12 个。盆底部垫一层纱布,保证透气性良好,并防止蚯蚓从底部钻出;然后分别装入已平衡 48 h 的不同比例的实验土壤各 800 g,每个处理做 3 个重复。之后在各盆中放入 15 条蚯蚓,盆上做好标记。将它们分别放在阴凉的暗处饲养,定期喷射少量的水保持土壤的湿度,实验在室温下进行。

1.4 测定方法

将取出的蚯蚓放入培养皿中吐泥 3 d,用蒸馏水洗净,冰冻致死,于烘箱中 105 ℃ 烘 4 h,取出冷却后研磨过 20 目筛,制成粉备用。称取适量蚯蚓粉末于 50 mL 小烧杯中,加浓硝酸 20 mL,加盖放置过夜后,加 5 mL 高氯酸,在通风橱中加热消解至冒出大量白烟为止(若样品未溶解完全,冷却后再加浓硝酸和高氯酸,加热至消解液变澄清),冷却后加 1 mL 浓硝酸和少量水,转入 100 mL 容量瓶中,定容后过滤。采用 IRIS Intrepid II XSP 型电感耦合等离子发射仪(ICP-AES)(美国 Thermo Elemental 公司)进行测定重金属浓度。

1.5 数据分析

数据分析采用 Statistica6.0 统计软件,对实验的数据进行单因素方差分析(ANOVA),利用最小显著性差异(LSD)多重比较方法,在 95% 的可靠性下对不同处理之间的差异性进行比较分析。

2 结果

2.1 不同培养时间对蚯蚓体内重金属富集量的影响

2.1.1 蚯蚓体内铜富集量在同一浓度下随培养时间的变化

在 3 种 Cu 浓度污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Cu 富集量的影响见表 2。

由表 2 可知,在 3 种浓度 Cu 污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Cu 富集量的影响均表现出显著性差异(如对于 4.0 mg·kg⁻¹ Cu 污染的土壤, $F_{5,10}=2\ 149.15$, $P<0.001$;对于 20.0 mg·kg⁻¹ Cu 污染的土壤, $F_{5,10}=11\ 359.79$, $P<0.001$;对于 40.0 mg·kg⁻¹ Cu 污染的土壤, $F_{5,10}=1\ 177.44$, $P<0.001$)。与对照组相比,不同培养时间的蚯蚓体内 Cu 富集量均显著增加,且都表现出:随着培养时间的延长,蚯蚓体内 Cu 的富集量先增大后减小,在第 2 周时达到最大。

2.1.2 蚯蚓体内锌富集量在同一浓度下随培养时间的变化

在 3 种浓度 Zn 污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Zn 富集量的影响见表 2。

由表 2 可知,在 3 种浓度 Zn 污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Zn 富集量的影响均表现出显著性差异(如对于 $4.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zn 污染的土壤, $F_{5,10}=258.78, P<0.001$; 对于 $20.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zn 污染的土壤, $F_{5,10}=406.31, P<0.001$; 对于 $40.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zn 污染的土壤, $F_{5,10}=590.35, P<0.001$)。与对照组相比,不同培养时间的蚯蚓体内 Zn 富集量均显著增加,且都表现出:随着培养时间的延长,蚯蚓体内 Zn 的富集量先增大后减小,在第 4 周时达到最大。

2.1.3 蚯蚓体内铅富集量在同一浓度下随培养时间的变化

在 3 种 Pb 浓度污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Pb 富集量的影响见表 2。

由表 2 可知,在 3 种浓度 Pb 污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Pb 富集量的影响均表现出显著性差异(如对于 $6.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 污染的土壤, $F_{5,10}=160.15, P<0.001$; 对于 $31.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 污染的土壤, $F_{5,10}=206.46, P<0.001$; 对于 $63.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 污染的土壤, $F_{5,10}=289.24, P<0.001$)。与对照组相比,不同培养时间的蚯蚓体内 Pb 富集量均显著增加,且都表现

出:随着培养时间的延长,蚯蚓体内 Pb 的富集量先增大后减小,在第 2 周时达到最大。蚯蚓体内铅富集量在同一浓度下随培养时间的变化趋势与铜相似。

2.1.4 蚯蚓体内汞富集量在同一浓度下随培养时间的变化

在 3 种 Hg 浓度污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Hg 富集量的影响见表 2。

由表 2 可知,在 $7.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Hg 污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Hg 富集量的影响均表现出显著性差异($F_{5,10}=9.89, P<0.001$),Hg 富集量随着培养时间的延长先增大后减小,在第 2 周时达到最大,而在第 5 周时 Hg 富集量最小,并且小于对照组;在另外两种不同 Hg 浓度污染的土壤中,不同培养时间对蚯蚓体内 Hg 富集量的影响表现出显著性差异(如对于 $36.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Hg 污染的土壤, $F_{5,10}=19.63, P<0.001$; 对于 $73.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Hg 污染的土壤, $F_{5,10}=12.74, P<0.001$)。与对照组相比,培养时间为 1、2 周时的蚯蚓体内 Hg 富集量显著增加,在第 1 周时达到最大,但培养时间为 3、4 周时的蚯蚓体内 Hg 富集量差异不显著。

以上研究结果表明,蚯蚓对各种重金属的富集量随培养时间的延长而变化,且对不同重金属的最大富集时间也不相同。在实验初期,蚯蚓对 Cu、Pb 有较大量的吸收,到第 2 周时富集量达到最大,然后递减,随

表 2 蚯蚓体内铜、锌、铅、汞的富集量在同一浓度下随培养时间的变化

Table 2 Variation of accumulated copper, zinc, lead and mercury in earthworm with incubation times at the same initial concentrations

重金属	施加外源性重金属 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	对照	培养时间/周					F 值
			1	2	3	4	5	
Cu	4.00	23.0±1.5 ^a	53.0±1.2 ^b	97.0±0.3 ^c	54.0±0.4 ^b	90.0±1.0 ^d	64.0±1.0 ^e	2 149.15***
	20.00	23.0±1.5 ^a	166.0±2.8 ^b	396.0±3.2 ^c	37.0±1.3 ^d	55.0±1.4 ^e	123.0±2.6 ^f	11 359.79***
	40.00	23.0±1.5 ^a	321.0±2.7 ^b	787.0±22.3 ^c	135.0±2.6 ^d	377.0±16.1 ^e	488.0±18.5 ^f	1 177.44***
Zn	4.03	97.0±1.3 ^a	401.0±7.9 ^b	330.0±10.4 ^b	301.0±6.1 ^b	2 606.0±250.0 ^c	322.0±13.1 ^b	258.78***
	20.15	97.0±1.3 ^a	600.0±18.4 ^b	447.0±20.0 ^c	305.0±7.0 ^c	2 703.0±196.8 ^d	667.0±27.0 ^b	406.31***
	40.30	97.0±1.3 ^a	801.0±18.3 ^b	575.0±14.0 ^c	345.0±20.2 ^d	2 956.0±173.9 ^e	1 079.0±33.0 ^f	590.35***
Pb	6.38	1.23±0.04 ^a	19.60±1.20 ^b	22.00±1.59 ^c	12.60±1.39 ^d	12.40±0.17 ^d	16.10±0.30 ^e	160.15***
	31.90	1.23±0.04 ^a	19.90±1.92 ^b	34.00±1.16 ^c	16.00±1.81 ^d	13.80±0.98 ^d	16.40±0.68 ^e	206.46***
	63.80	1.23±0.04 ^a	34.70±0.95 ^b	37.00±1.55 ^b	27.60±1.89 ^c	17.30±1.86 ^d	18.70±0.79 ^d	289.24***
Hg	7.39	0.130±0.020 ^{ac}	0.154±0.008 ^a	0.156±0.014 ^a	0.110±0.020 ^{bc}	0.109±0.011 ^{bc}	0.090±0.011 ^b	9.89***
	36.95	0.130±0.020 ^a	0.178±0.013 ^b	0.160±0.014 ^b	0.119±0.003 ^{ac}	0.126±0.006 ^a	0.097±0.007 ^c	19.63***
	73.90	0.130±0.020 ^a	0.181±0.007 ^b	0.153±0.003 ^{cd}	0.129±0.004 ^a	0.136±0.006 ^{ac}	0.154±0.006 ^d	12.74***

注:表中数据为 mean±S.D.;同行相同字母表示无显著性的差异,同列字母没有相比意义;*** 表明方差分析结果为极显著性的差异,此时 $P<0.001$,下同。

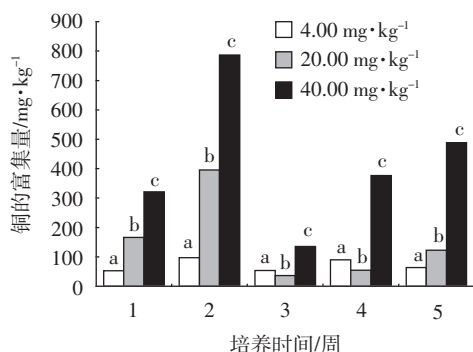
Note: Numbers in the table are mean±S.D. The same letters in one row means no significant difference, but the letters at the same column have no comparability. Mark "***" shows very significantly different ($P<0.001$). The same as follows.

后富集量又开始逐渐递增。而蚯蚓对 Zn 元素的吸收与对 Cu、Pb 完全不同,呈现出先减弱后增加的趋势,即在第 3 周时蚯蚓对锌的富集量最少,随后逐渐增大,在第 4 周时达到最大。与 Cu、Zn、Pb 的富集量相比,蚯蚓对 Hg 则没有明显的富集作用,且对 Hg 的最大富集量时间也不明显,这与陈玉成等的研究结果相同^[8]。

2.2 不同重金属浓度对蚯蚓体内重金属富集量的影响

2.2.1 蚯蚓体内铜富集量在同一时间下随不同浓度的变化

土壤中重金属的浓度对蚯蚓的富集作用的影响也是至关重要的。蚯蚓体内 Cu 的富集量在同一时间下随不同浓度的变化见图 1。



(注:以同一培养周期为一单元,相同字母表示不存在显著性差异,不同周期字母间没有比较性,下同)

(Note: One incubation cycle as one unit, the same letter means no significant difference, and the different cycle letters means no comparability. The same as follows.)

图1 蚯蚓体内铜的富集量在同一时间下随不同浓度的变化

Figure 1 Accumulation of copper in earthworm with concentration alternatives at the same time

从图 1 可以看出,在 Cu 污染的土壤中,不同 Cu 浓度在同一培养时间内对蚯蚓体内 Cu 富集量的影响均表现出极显著性差异 ($F_{2,4}=9\ 808.97, P<0.001$; $F_{2,4}=2\ 127.78, P<0.001$; $F_{2,4}=2\ 798.30, P<0.001$; $F_{2,4}=1\ 072.12, P<0.001$; $F_{2,4}=1\ 352.14, P<0.001$)。但富集趋势不同,当培养时间为 1、2、5 周时,蚯蚓体内 Cu 富集量随着 Cu 浓度的增加而增加;当培养时间为 3、4 周时,蚯蚓体内 Cu 富集量随着 Cu 浓度的增加呈现出先减小后增加的趋势;当 Cu 浓度为 $20.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时富集量最小,而当 Cu 浓度为 $40.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时富集量最大。

2.2.2 蚯蚓体内锌的富集量在同一时间下随不同浓度

的变化

蚯蚓体内 Zn 的富集量在同一时间下随不同浓度的变化见图 2。

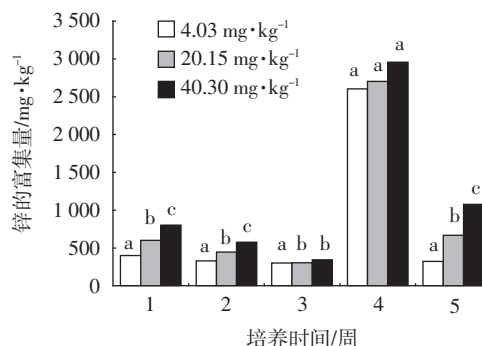


图2 蚯蚓体内锌的富集量在同一时间下随不同浓度的变化

Figure 2 Accumulation of zinc in earthworm with concentration alternatives at the same time

从图 2 可以看出,在 Zn 污染的土壤中,当培养时间为 1、2、5 周时,不同 Zn 浓度在同一培养时间内对蚯蚓体内 Zn 富集量的影响表现出极显著性差异 ($F_{2,4}=489.13, P<0.001$; $F_{2,4}=191.97, P<0.001$; $F_{2,4}=651.25, P<0.001$),在第 3 周时表现出一一般显著性差异 ($F_{2,4}=10.76, P=0.010$),而在第 4 周时未表现出显著性差异。并且蚯蚓体内 Zn 富集量随着 Zn 浓度的增加而增加,当 Zn 浓度为 $4.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时铅富集量最小,而当 Zn 浓度为 $40.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时 Zn 富集量最大。但 Zn 浓度为 4.03 和 $20.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的蚯蚓体内 Zn 富集量之间差异不显著。

2.2.3 蚯蚓体内铅的富集量在同一时间下随不同浓度的变化

蚯蚓体内 Pb 的富集量在同一时间下随不同浓度的变化见图 3。

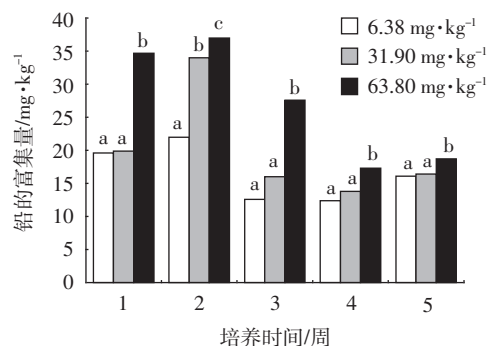


图3 蚯蚓体内铅的富集量在同一时间下随不同浓度的变化

Figure 3 Accumulation of lead in earthworm with concentration alternatives at the same time

从图 3 可以看出,在 Pb 污染的土壤中,当培养时间为 1、2、3 周时,不同 Pb 浓度在同一培养时间对蚯蚓体内 Pb 富集量的影响表现出极显著性差异 ($F_{2,4}=111.50, P<0.001; F_{2,4}=90.47, P<0.001; F_{2,4}=63.47, P<0.001$), 在第 4、5 周时表现出显著性差异 ($F_{2,10}=12.93, P=0.007; F_{2,4}=15.48, P=0.004$);且蚯蚓体内 Pb 富集量随着 Pb 浓度的增加而增加。Pb 浓度为 $6.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时蚯蚓体内 Pb 富集量最小, Pb 浓度为 $63.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时 Pb 富集量最大。但在第 1、3、4、5 周时, Pb 浓度为 6.38 和 $31.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的 Pb 富集量之间差异不显著。

2.2.4 蚯蚓体内汞的富集量在同一时间下随不同浓度的变化

蚯蚓体内 Hg 的富集量在同一时间下随不同浓度的变化见图 4。

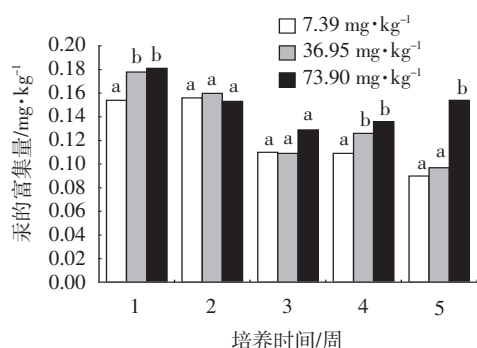


图 4 蚯蚓体内汞的富集量在同一时间下随不同浓度的变化

Figure 4 Accumulation of mercury in earthworm with concentration alternatives at the same time

从图 4 可以看出,在 Hg 污染的土壤中,蚯蚓对汞没有明显的富集作用。当培养时间为 1、4 周时,不同 Hg 浓度对蚯蚓体内 Hg 富集量的影响表现出一般显著性差异 ($F_{2,4}=7.09, P=0.026; F_{2,4}=8.60, P=0.017$), 在第 5 周时表现出极显著性差异 ($F_{2,4}=54.64, P<0.001$), 而培养时间为 2、3 周时未表现出显著性差异。在第 1、4、5 周蚯蚓体内 Hg 富集量随着 Hg 浓度的增加而增加。Hg 浓度为 $7.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的蚯蚓体内 Hg 富集量最小, Hg 浓度为 $73.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时富集量最大, 在第 1、4 周时 Hg 浓度为 36.95 和 $73.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的蚯蚓体内 Hg 富集量之间差异不显著。第 5 周时 Hg 浓度为 7.39 和 $36.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的蚯蚓体内 Hg 富集量之间差异不显著。

从图 1~图 4 可以看出, 在含有重金属浓度为

0.001%的土壤中,微小双胸蚯蚓对重金属元素的吸收是很少的,可能是由于土壤中的重金属的浓度太低,对蚯蚓的生长没有太大的影响。在含有重金属浓度为 0.005%和 0.01%的土壤中,其富集的重金属量都比前一组的高,说明了土壤中高浓度的重金属对微小双胸蚯蚓的生存有很大的影响。

3 讨论

比较以上实验数据发现,蚯蚓对土壤中重金属元素的富集量随不同培养时间和重金属浓度的增加而变化,这与其他学者的研究是相似的^[10-11],说明蚯蚓对重金属有一定的忍耐和富集能力,用蚯蚓修复重金属污染的土壤具有一定的应用价值。但蚯蚓对不同重金属的忍耐和富集能力是有限度的。在蚯蚓的忍受范围内,当蚯蚓吸收的重金属积累到一定程度就会通过粪便和身体分泌物排出^[12],但若蚯蚓吸收的重金属超过了蚯蚓的忍受范围,则土壤中过高的重金属含量会直接毒害蚯蚓,会对其生命活性产生影响,使生长受到抑制。

由蚯蚓对重金属富集显著性分析可知,蚯蚓对 4 种重金属的吸收顺序为 $\text{Zn}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Hg}$ 。这一点与王振中的研究结论相同^[13]。这说明蚯蚓对重金属的富集具有一定的选择性^[8-9]。对于 Cu 和 Zn,在相同的外加浓度下,第 1 周开始蚯蚓便对 Zn 进行大量的吸收,第 4 周达到最大。说明 Cu 对蚯蚓的毒害性比 Zn 大,这一点也被其他学者所证实^[14]。据报道, Zn 和 Cu 之间有拮抗作用,因此在 Cu 和 Zn 同时存在的情况下, Cu 的毒害性可能会得到削弱。

影响蚯蚓体内富集重金属的主要原因可能是体内酶的作用,由于酶分子是蛋白质,重金属含量高时往往会使酶分子因沉淀、络合等反应而失活,不同重金属对酶活性的影响不同,这主要是重金属本身对酶分子的选择能力不同所致。如 Hg 产生毒害作用的主要机制是 Hg^{2+} 极易与机体内巯基 (-SH) 或二巯基 (-S-S-) 结合。由于体内含巯基最多的物质是蛋白质, Hg 与生物体内蛋白中的巯基结合,导致蛋白的结构和功能发生改变,甚至失去活性,抑制 ATP 的合成,从而使其细胞代谢紊乱^[15],因此蚯蚓对汞表现出一般富集作用。相对于汞来说,铅的毒性要富集到一定量时才体现出来。Pb 也可与动物体内一系列蛋白质、酶和氨基酸内的官能团主要是巯基相结合,从多方面干扰机体内的生化和生理功能。

4 结论

(1) 蚯蚓对各种重金属的富集量随着培养时间的增加而变化,且对不同重金属的最大富集量出现的时间也不相同。在第2周时蚯蚓对Cu、Pb富集量达到最大,而蚯蚓对Zn的富集量在第4周时达到最大。与Cu、Zn、Pb的富集量相比,蚯蚓对Hg没有明显的富集作用,且对Hg的最大富集量时间不明显。

(2) 蚯蚓对土壤中重金属元素的富集量随着土壤中重金属浓度的增加而增加。

参考文献:

- [1] 李其林, 刘光德, 魏朝富, 等. 重庆市蔬菜区重金属污染现状[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 104-107.
LI Qi-lin, LIU Guang-de, WEI Zhao-fu, et al. Heavy metals in vegetable-planting areas in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 104-107.
- [2] 王秀丽, 徐建民, 姚槐应, 等. 重金属铜、锌、镉、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 22-27.
WANG Xiu-li, XU Jian-min, YAO Huai-ying, et al. Effects of Cu, Zn, Cd and Pb compound contamination on soil microbial community[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1): 22-27.
- [3] 孙铁珩, 李培军, 周启星, 等. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 146-207.
SUN Tie-heng, LI Pei-jun, ZHOU Qi-xing, et al. Formation mechanisms and remediation technologies of soil contamination[M]. Beijing: Science Publication, 2005. 146-207.
- [4] Lavelle P. Earthworm activity and the soil system[J]. *Bio Fert Soils*, 1988 (6): 237-251.
- [5] Cortet J, Gomot D E, Vaufler A, et al. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects[J]. *Euro J Soil Bio*, 1999, 35(3): 115-134.
- [6] 李许明, 李福燕, 郭彬, 等. 蚯蚓对土壤重金属的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(13): 3940-3941.
LI Xu-ming, LI Fu-yan, GUO Bin, et al. Effect of earthworm on heavy metal in soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(13): 3940-3941.
- [7] Lee K E. Some trends and opportunities in earthworm research or Darwin's children—the future of our discipline[J]. *Soil Biol Bio Chem*, 1992(24): 1765-1771.
- [8] 陈玉成, 皮广洁, 黄伦先, 等. 城市生活垃圾蚯蚓处理的因素优化及其重金属富集研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2006-2010.
CHEN Yu-cheng, PI Guang-jie, HUANG Lun-xian, et al. Factor optimization for municipal domestic wastes treatment by earthworms and its concentration of heavy metals[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 2006-2010.
- [9] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 土壤重金属污染对蚯蚓的急性毒性效应研究[J]. 应用生态学报, 2002, 3(2): 187-190.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, XU Hua-xia, et al. Acute toxicological effects of heavy metal pollution in soils on earthworms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 3(2): 187-190.
- [10] 邓继福, 王振中, 张友梅, 等. 重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究[J]. 环境科学, 1996(2): 1-6.
DENG Ji-fu, WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei, et al. A research on the ecological effect of the soil animals community by the heavy metal pollution[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1996(2): 1-6.
- [11] 张友梅, 王振中, 邢协加. 土壤污染对蚯蚓的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1996, 19(3): 84-90.
ZHANG You-mei, WANG Zhen-zhong, XING Xie-jia. On effects of earthworm by soil pollution[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Normalis Hunanensis*, 1996, 19(3): 84-90.
- [12] Geva B, Mordaunt C, Semple K, et al. Bioavailability of nonextractable (bound) pesticide residues to earthworm[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 501-507.
- [13] 王振中, 张友梅, 邓继福, 等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1948-1952.
WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei, DENG Ji-fu, et al. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1948-1952.
- [14] 贾秀英, 罗安程, 李喜梅, 高铜, 高锌猪粪对蚯蚓的急性毒性效应的研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1527-1530.
JIA Xiu-ying, LUO An-cheng, LI Xi-mei. Acute toxicological effects of excessive Cu and Zn-containing in pig manure on earthworm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1527-1530.
- [15] 周启星, 孔繁翔, 朱琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 307-352.
ZHOU Qi-xing, KONG Fan-xiang, ZHU Lin. Ecotoxicology[M]. Beijing: Science Publication, 2004. 307-352.
- [16] Brookes P C, McGrath S P. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass[J]. *Journal of Soil Science*, 1984, 35: 341-346.
- [17] Jordan M J, LeChevalier M P. Effects of zinc—smelter emissions on forest soil microflora[J]. *Canada Journal of Microbiology*, 1975, 21: 1855-1865.
- [18] Pennanen T A, Frostgard H F, Baath E. Phospholipid fatty acid composition and heavy metal tolerance of soil microbial communities along two heavy metal polluted gradients in coniferous forests[J]. *Applied Environmental and Microbiology*, 1996, 62: 420-428.
- [19] King B P, McGrath S P, Chaudri A M. Biomass carbon measurements and substrate utilization patterns of microbial populations from soils amended with cadmium, copper or zinc[J]. *Applied Environmental and Microbiology*, 1997, 63: 39-43.