

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.10.2015042102

王婉华,陈丽红,刘征涛,等.重金属铬(VI)和铅对南京土壤中赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响[J].环境化学,2015,34(10):1839-1844
WANG Wanhua, CHEN Lihong, LIU Zhengtao, et al. Effects of chromium(VI) and lead on the growth and reproduction of *Eisenia Fetida* in Nanjing soils[J].Environmental Chemistry, 2015, 34(10):1839-1844

重金属铬(VI)和铅对南京土壤中赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响*

王婉华¹ 陈丽红^{1**} 刘征涛¹ 王晓南¹ 张 聪²

(1. 中国环境科学研究院,国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室,环境基准与风险评估国家重点实验室,北京,100012; 2.中海油环保服务有限公司,天津,300452)

摘 要 以南京化学工业园的土壤为研究对象,分析土壤中重金属 Cr(VI)和 Pb 对赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)生长及繁殖的影响.结果表明,与对照组比较,暴露 28 d 时,较低浓度的 Cr(VI)(4—8 mg·kg⁻¹)和 Pb(1000—1500 mg·kg⁻¹)能促进赤子爱胜蚓的生长发育,而较高浓度的 Cr(VI)(32—64 mg·kg⁻¹)和 Pb(3000 mg·kg⁻¹)则显著抑制赤子爱胜蚓的生长发育;赤子爱胜蚓的产茧量随着 Cr(VI)和 Pb 浓度的升高被显著抑制,其中,Cr(VI)抑制赤子爱胜蚓产茧量的 EC₅₀(半数有效浓度)、NOEC(无观察效应浓度)和 LOEC(最低观察效应浓度)分别为 22.86(20.56—25.42)、8、16 mg·kg⁻¹.Pb 抑制赤子爱胜蚓产茧量的 EC₅₀、NOEC 和 LOEC 分别为 2280.34(2200.90—2362.65)、1500、2000 mg·kg⁻¹;与人工土壤中 Cr(VI)和 Pb 对赤子爱胜蚓产茧量的 28 d-EC₅₀有显著性差异.
关键词 Cr(VI), Pb, 南京土壤, 人工土壤, 赤子爱胜蚓, 生长, 繁殖.

Effects of chromium(VI) and lead on the growth and reproduction of *Eisenia Fetida* in Nanjing soils

WANG Wanhua¹ CHEN Lihong^{1**} LIU Zhengtao¹ WANG Xiaonan¹ ZHANG Cong²

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chemicals, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China; 2. China Offshore Environmental Services Co. Ltd., Tianjin, 300452, China)

Abstract: In the current study, the effects of chromium(VI) and lead on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* in Nanjing soils were investigated. The results showed that: (1) compared with the control group, the growth of *Eisenia fetida* was promoted significantly in low concentration groups (4—8 mg·kg⁻¹ chromium(VI)) and 1000—1500 mg·kg⁻¹ lead), while the body weight was inhibited significantly in high concentration groups (32—64 mg·kg⁻¹ chromium(VI) and 3000 mg·kg⁻¹ lead) after the exposure duration of 28 d. (2) the cocoon production was inhibited significantly with increasing chromium(VI) and lead concentrations. The EC₅₀(medium effective concentration), NOEL(No observed effect concentration) and LOEC(lowest observed effect concentration) values of cocoon production of chromium(VI) were 22.86(20.56—25.42), 8 and 16 mg·kg⁻¹, while the values of lead were 2280.34(2200.90—2362.65), 1500 and 2000 mg·kg⁻¹, respectively. (3) the 28 d-EC₅₀ value of cocoon production in Nanjing soils was

2015 年 4 月 21 日收稿.

* 国家环境保护公益性行业科研专项(201109032);环境基准与风险评估国家重点实验室自由探索基金(SKLECR20140FP06)资助.

** 通讯联系人,E-mail: red-cup@163.com

significantly different from the value in the artificial soils.

Keywords: chromium (VI), lead, Nanjing soils, artificial soils, *Eisenia fetida*, growth, reproduction.

近几十年来,随着工业化的快速发展,重金属排放量不断增加,农业中肥料不合理的使用,也使得重金属大量积聚于土壤中,导致重金属对土壤的污染越来越严重,引起了人们的广泛关注^[1].重金属对土壤的污染,因其隐蔽性、不可逆性和长期性的特点,对陆生生态系统构成了巨大的潜在威胁.

铬(Cr)和铅(Pb)是广泛应用于工农业领域的两种重金属,是化肥农药、冶金、金属加工等行业常用的基本原料,随着生产过程中产生的含 Cr 或 Pb 废水、废液、废渣、废气的排放进入环境,导致土壤污染^[2-5].其中,Cr 进入土壤后,常致使植物发育不良、根系发育低、叶片卷曲和褪色^[6],叶片萎黄小^[7],严重者可能造成植物的快速萎蔫或死亡^[8].Pb 进入土壤后,会产生明显的生物效应,可导致植物特别是其根部中毒、植株枯萎死亡、产量降低等^[9-11],此外,还可抑制土壤动物(蚯蚓、跳虫等)的生长及繁殖,导致其体重、产卵率、卵孵化率下降等^[12-13].

土壤污染物的毒性除与其固有的物理、化学性质有关外,还受到土壤性质(如 pH、有机质含量、阳离子交换量等)、土壤污染时间、气候条件等各种因素的影响^[14-16].由于我国地域辽阔,土壤类型多样,不同土壤的理化性质差异较大,对土壤污染物的毒性影响也千差万别,而目前我国不同土壤类型的 Cr(VI)和 Pb 的生态毒理数据还相对匮乏,因此,及时开展 Cr(VI)和 Pb 在自然土壤中的毒性比较研究,以弥补我国长期存在的基础生态毒理数据的缺失和不足,仍是目前亟待解决的问题.

本研究以南京化学工业园内相对未受污染的农田土壤为测试介质,测定了 Cr(VI)和 Pb 对赤子爱胜蚓的生长及繁殖的影响,研究结果可望为 Cr(VI)和 Pb 污染土壤的生态风险评价和我国土壤环境质量标准的修订提供基础参考数据.

1 材料和方法

1.1 试剂和材料

K₂Cr₂O₇(分析纯)、Pb(NO₃)₂(分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司.

1.2 试验蚯蚓

试验所用蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),购自北京坤龙养殖中心,新购置的赤子爱胜蚓以牛粪土和草炭的混合物作为饲养基质,在室温 20—25 ℃、自然光照条件下长期繁殖与饲养,选取行为活跃、体色鲜亮、体重 300—600 mg、有生殖环的性成熟赤子爱胜蚓用于试验.试验前将赤子爱胜蚓放在与试验相同的环境条件下驯养 7 d 后再进行正式试验.

1.3 试验土壤

试验所用土壤采自南京化学工业园内相对未受污染的农田,土壤类型为黄棕壤,采集表层土壤(0—20 cm),主要理化性质见表 1,Cr(VI)和 Pb 的背景值分别为 0.63 mg·kg⁻¹和 21.04 mg·kg⁻¹.试验土壤在使用前先于室内自然条件下风干,过 2 mm 筛除去植物根系和大颗粒,测试前在烘箱中 80 ℃烘烤 24 h.

表 1 试验土壤的理化性质
Table 1 Physico- chemical properties of the test soils

	粘粒/%	粉粒/%	沙粒/%	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)
平均值	2.51	27.27	70.22	8.22	23.46

1.4 生长、繁殖毒性试验

试验按照 OECD^[17]蚯蚓繁殖试验的方法进行,通过预试验对浓度设置的摸索,在正式试验中配制的污染物 Cr(VI)浓度分别为 0、4、8、16、32、64 mg·kg⁻¹,污染物 Pb 浓度分别为 0、1000、1500、2000、2500、3000 mg·kg⁻¹.

配置试验土壤时,先将 K₂Cr₂O₇、Pb(NO₃)₂配制成母液,通过母液稀释成一定体积的水溶液,分别加

入到 500 g 试验土壤中,直接配成土壤持水量的 35%,充分混匀土壤,然后将配好的土壤装入到 1 L 的玻璃烧杯中,土壤老化 28 d 后用于试验,以使污染物在土壤颗粒中充分吸附、平衡。

试验所用蚯蚓被随机分成 10 条 1 组,每组称重后放在试验土壤表面,待蚯蚓钻蛀进入试验土壤后,在试验土壤表面均匀撒布 5 g 牛粪作为蚯蚓的食物,并喷洒适量去离子水使牛粪湿润,然后将玻璃烧杯移入人工气候箱内,在光照周期 16L:8D、光照强度 600—1000 lux、温度 $20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 80% 的条件下培养。

培养至第 28 d 时对蚯蚓称重,蚯蚓称重前先在湿润的滤纸上清肠 24 h,将清肠后的蚯蚓表面用去离子水冲洗干净并用滤纸吸去多余的水,然后称重.用湿筛法将试验土壤中的茧挑出并计数。

整个试验期间每周给蚯蚓添加 1 次牛粪,添加牛粪时若发现有多余的牛粪及时清除,以避免细菌繁殖.每个测试浓度重复 4 次。

1.5 统计分析

所用数据统计均采用 SPSS 20.0 软件进行分析. EC_{50} (半数有效浓度)通过直线回归法求出, NOEC (无观察效应浓度)和 LOEC (最低可观察效应浓度)按照 OECD^[18] 方法在 $P = 0.05$ 的显著水平上采用 Dunnett's 多重比较检验方法求出.数据以平均值 $\pm$ 标准差 ($\bar{X} \pm SD$) 表示。

2 结果与讨论

2.1 Cr(VI)和Pb对赤子爱胜蚓生长的影响

Cr(VI)在试验土壤中对赤子爱胜蚓生长的影响见图 1.在对照土壤中,试验开始时,赤子爱胜蚓的体重为 $0.38\pm 0.05\text{ g}$,至第 28 天时,达到 $0.48\pm 0.03\text{ g}$,表明体重随着时间的推移增加明显;在较低浓度 Cr(VI) ($4\text{--}16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染土壤中,开始时赤子爱胜蚓的体重分别为 0.41 ± 0.06 、 $0.40\pm 0.06\text{ g}$ 和 $0.39\pm 0.04\text{ g}$,至第 28 天时,分别为 0.52 ± 0.07 、 $0.51\pm 0.06\text{ g}$ 和 $0.45\pm 0.05\text{ g}$,与对照组比较无显著性差异 ($P>0.05$),表明赤子爱胜蚓体重对较低浓度的 Cr(VI) 相对不敏感;在较高浓度 Cr(VI) ($32\text{--}64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染土壤中,开始时赤子爱胜蚓的体重分别为 $0.41\pm 0.04\text{ g}$ 和 $0.38\pm 0.03\text{ g}$,至第 28 天时,体重分别为 $0.42\pm 0.02\text{ g}$ 和 $0.32\pm 0.06\text{ g}$,与对照组比较显著下降 ($P<0.01$),分别下降了 12.63% 和 32.72%,表明赤子爱胜蚓的生长发育在较高浓度 Cr(VI) 污染土壤中受到了显著抑制。

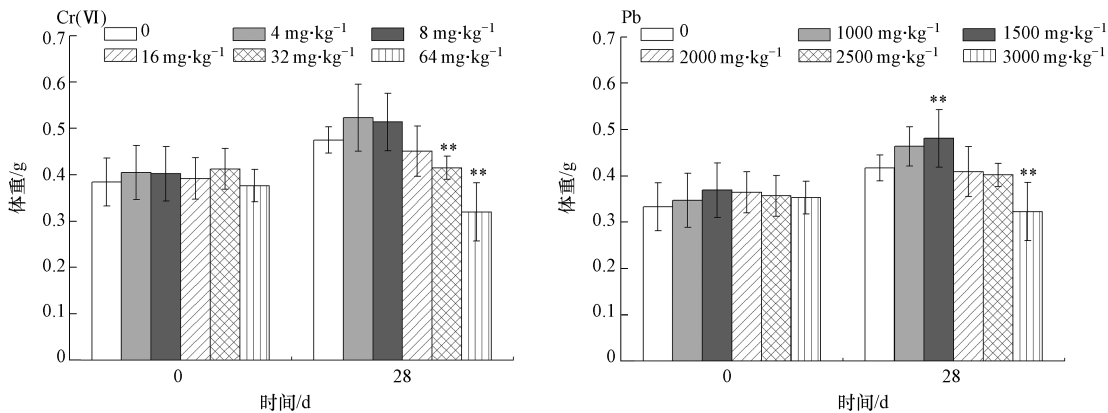


图 1 Cr(VI)和Pb对赤子爱胜蚓体重变化的影响
(**表示与对照组比较, $P<0.01$)

Fig.1 Effects of Cr(VI) and Pb on body weight development of *Eisenia fetida*

Pb在南京土壤中对赤子爱胜蚓生长的影响见图 1.在对照土壤中,试验开始时,赤子爱胜蚓的体重为 $0.33\pm 0.05\text{ g}$,至第 28 天时,体重为 $0.42\pm 0.03\text{ g}$;在较低浓度 Pb ($1000\text{--}1500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染土壤中,开始时体重分别为 $0.35\pm 0.05\text{ g}$ 和 $0.37\pm 0.06\text{ g}$,至第 28 天时,达到 $0.46\pm 0.04\text{ g}$ 和 $0.48\pm 0.06\text{ g}$,与对照组比较,增加了 11.27% 和 15.35%.表明较低浓度 Pb 有促进赤子爱胜蚓生长的作用;在中浓度 Pb ($2000\text{--}2500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染土壤中,开始时体重分别为 $0.36\pm 0.04\text{ g}$ 和 $0.35\pm 0.04\text{ g}$,至第 28 天时,体重分别为

0.41±0.05 g 和 0.40±0.03 g, 与对照组比较没有差异 ($P>0.05$); 在较高浓度 Pb (3000 mg·kg⁻¹) 污染土壤中, 开始时体重为 0.35±0.04 g, 至第 28 天时, 体重为 0.32±0.06 g, 与对照组比较, 体重下降了 22.54%, 下降显著 ($P<0.01$), 表明赤子爱胜蚓的生长发育在高浓度 Pb 污染土壤中受到了显著抑制。

2.2 Cr(VI) 和 Pb 对赤子爱胜蚓产茧量的影响

Cr(VI) 在南京土壤中对赤子爱胜蚓产茧量的影响见图 2, 至试验第 28 天时, 对照组赤子爱胜蚓产茧量为 28.24±3.24 个; 而 Cr(VI) 浓度为 4、8、16、32 mg·kg⁻¹ 的试验组, 产茧量分别为 32.45±7.51、27.26±5.27、18.26±4.39、9.34±5.67 个, 在 Cr(VI) 浓度为 4 mg·kg⁻¹ 时, 与对照组比较, 产茧量显著增加 ($P<0.05$), 表明低浓度的 Cr(VI) 能够促进赤子爱胜蚓繁殖; 在 Cr(VI) 浓度从 16—32 mg·kg⁻¹ 阶段, 产茧量随污染物浓度的升高而显著减少, 产茧量的抑制率分别为 35.34% 和 66.93%; 而在 Cr(VI) 浓度为 64 mg·kg⁻¹ 的试验组中, 赤子爱胜蚓的产茧量几乎为零。

数据分析表明, Cr(VI) 抑制赤子爱胜蚓产茧量的 EC₅₀ 为 22.86 (20.56—25.42) mg·kg⁻¹. 当 Cr(VI) 高于 16 mg·kg⁻¹ 时, 试验土壤中赤子爱胜蚓的产茧量与对照组比较有显著差异 ($P<0.01$). Cr(VI) 对赤子爱胜蚓产茧量的 28 d EC₅₀、NOEC 和 LOEC 见表 2。

Pb 在南京土壤中对赤子爱胜蚓产茧量的影响见图 2. 至试验第 28 天时, 对照组赤子爱胜蚓产茧量为 30.24±4.24 个; 而 Pb 浓度为 1000、1500、2000 和 2500 mg·kg⁻¹ 的试验组, 赤子爱胜蚓产茧量分别为 (31.28±6.12)、(33.51±7.27)、(22.26±4.39)、(9.84±5.67) 个, 与对照组比较, 在 Pb 浓度从 1500 mg·kg⁻¹ 至 2500 mg·kg⁻¹ 阶段, 产茧量随 Pb 浓度的升高而显著减少, 尤其在 2000 mg·kg⁻¹ 和 2500 mg·kg⁻¹ 的试验土壤中, 赤子爱胜蚓的产茧量急剧下降; 在 3000 mg·kg⁻¹ 的试验土壤中, 赤子爱胜蚓的产茧量几乎为零。数据分析表明, Pb 抑制赤子爱胜蚓产茧量的 EC₅₀ 为 2280.34 (2200.90—2362.65) mg·kg⁻¹. 产茧量的 28 d EC₅₀、NOEC 和 LOEC 见表 2。

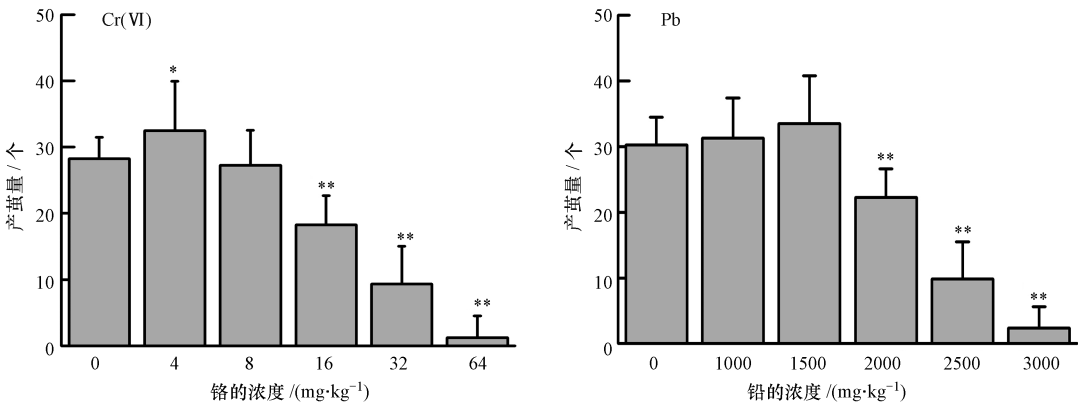


图 2 Cr(VI) 和 Pb 对赤子爱胜蚓产茧量的影响
(* 表示与对照组比较, $P<0.05$; ** 表示与对照组比较, $P<0.01$)

Fig.2 Effects of Cr(VI) and Pb on cocoon production of *Eisenia fetida*

表 2 Cr(VI) 和 Pb 在南京土壤中影响赤子爱胜蚓产茧量的 EC₅₀、NOEC 和 LOEC

Table 2 EC ₅₀ , NOEC and LOEC of Cr(VI) and Pb for cocoon production of <i>Eisenia Fetida</i> in Nanjing soils			
	EC ₅₀ (95%置信限)	NOEC	LOEC
Cr(VI)	22.86 (20.56—25.42)	8 ($P<0.01$)	16 ($P<0.01$)
Pb	2280.34 (2200.90—2362.65)	1500 ($P<0.01$)	2000 ($P<0.01$)

土壤污染物的毒性受土壤性质的影响, 包括 pH、有机质含量、阳离子交换量等. 它们通过各种方式影响重金属的有效性和重金属在土壤中的稳定化过程, 进而影响污染物在土壤中的毒性。

对于土壤污染物 Cr, 土壤中 Cr(VI) 还原为 Cr(III), 土壤对 Cr(VI) 的吸附, Cr(III) 在土壤中沉淀和吸附等都受土壤性质的影响, 其中以土壤 pH 值对 Cr(VI) 的毒性影响最为突出. 从理论上讲, Cr(VI) 在中性和碱性土壤中的毒性要比酸性土壤中高^[19]. 本实验室前研究^[20]发现, Cr(VI) 在老化 28 d 的人工土壤中影响赤子爱胜蚓产茧量的 28 d-EC₅₀ 为 62.32 mg·kg⁻¹, 其用于研究的人工土壤的主要理化性质见

表 3,其中,人工土壤的 pH 值为 7.00.而该研究中,Cr(Ⅵ)在南京土壤中影响赤子爱胜蚓产茧量的 28 d-EC₅₀为 22.86 mg·kg⁻¹,其土壤的 pH 值为 8.22.结果表明 Cr(Ⅵ)随土壤 pH 值的升高毒性趋于增强,不同类型土壤的理化性质对 Cr(Ⅵ)的毒性影响很大.

表 3 人工土壤的理化性质
Table 3 Physico-chemical properties of the artificial soils

	粘粒/%	粉粒/%	沙粒/%	pH	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)
平均值	15.99	16.49	67.52	7.00	9.90

对于土壤污染物 Pb,外源 Pb 进入土壤后,受各种物理、化学作用的影响,土壤中重金属 Pb 的毒性除了与其自身的总量和形态有关外,更与所处的土壤环境密切相关^[21],不同土壤性质会对重金属的活性造成显著的影响^[22-23].研究表明,不同土壤中有效态 Pb 含量差异很大,一般在 pH 值较低的土壤中,有效态 Pb 含量较高;在 pH 值较高的土壤中,有效态 Pb 含量较低.有效态 Pb 含量的差异,可以通过赤子爱胜蚓产茧量进行表征,有效态 Pb 含量越高,赤子爱胜蚓产茧量越低.同时,不同土壤中 Pb 的稳定化过程差异较大,土壤 pH 值对 Pb 的有效性影响最为显著.在中性、碱性土壤中,绝大部分的 Pb 在加入土壤的初期就被大量固定;而在酸性土壤中 Pb 的固定速率则较慢,且 Pb 有效性较高,同时,土壤阳离子交换量、有机质和黏粒含量对土壤中外源 Pb 污染物的有效性也有显著影响.

本实验室前研究^[12]发现,Pb 在老化 28 d 的人工土壤中影响赤子爱胜蚓产茧量的 28 d-EC₅₀为 1666.86 mg·kg⁻¹,该研究中,Pb 在南京土壤中影响赤子爱胜蚓产茧量的 28 d-EC₅₀为 2280.34 mg·kg⁻¹,结果表明不同类型土壤的土壤性质对 Pb 的毒性影响很大.

因而,鉴于我国土壤类型的多样性,不同地区土壤性质差异较大的特点,在制定土壤基准时需考虑污染物在不同类型土壤中毒性的差异.本试验在南京自然土壤中重金属对赤子爱胜蚓幼蚓生长及繁殖的研究结果,通过与人工土壤的研究结果的比较,可为不同类型土壤 Cr(Ⅵ)和 Pb 的污染风险评价和防治提供理论依据.

3 结论

(1)较低浓度的 Cr(Ⅵ)(4—8 mg·kg⁻¹)和 Pb(1000—1500 mg·kg⁻¹)能促进赤子爱胜蚓的生长发育,而较高浓度的 Cr(Ⅵ)(32—64 mg·kg⁻¹)和 Pb(3000 mg·kg⁻¹)则显著抑制赤子爱胜蚓的生长发育.

(2)赤子爱胜蚓的产茧量随着 Cr(Ⅵ)和 Pb 浓度的升高被显著抑制,其中,Cr(Ⅵ)抑制赤子爱胜蚓产茧量的 EC₅₀、NOEC 和 LOEC 分别为 22.86 (20.56—25.42)、8、16 mg·kg⁻¹. Pb 抑制赤子爱胜蚓产茧量的 EC₅₀、NOEC 和 LOEC 分别为 2280.34 (2200.90—2362.65)、1500、2000 mg·kg⁻¹.

(3)通过比较南京自然土壤与人工土壤的研究结果,表明不同的土壤性质对污染物的毒性影响显著,因而,鉴于我国土壤类型的多样性,不同地区土壤性质差异较大的特点,在制定土壤基准时需考虑污染物在不同土壤中毒性的差异.

参 考 文 献

[1] 陈炳卿,孙长颖. 食品污染与健康[M]. 北京:化学工业出版社,2002:149-152

[2] Molnar L, Fischer E, Kallay M. Laboratory studies on the effect, uptake and distribution of chromium in *Eisenia foetida* (Annelida, Oligochaeta)[J]. Zoologischer Anzeiger, 1989, 223:57-66

[3] Richard F C, Bourg A C M. Aqueous geochemistry of chromium: a review[J]. Water Research, 1991, 25(7):807-816

[4] Coleman R N. Chromium toxicity: effects on microorganisms with special reference to the soil matrix. In: Nriagu J O, Nieboer E(Eds). Chromium in Natural and Human Environments[M]. Wiley-Interscience, New York, 1988:335-350

[5] Cary E E. Chromium in air soil and natural waters. In: Langard S(Ed). Biological and Environmental Aspects of Chromium, Topics in Environmental Health[M]. Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, 1982:49-64

[6] Chapman H D. Diagnostic criteria for plant s and soils[M]. Berkeley: University of California, 1973

[7] Hunter J G, Vergnano O. Trace-element toxicities in oat plants[J]. Annals of Applied Biology, 1953, 40(4):761-776

[8] Parr P D, Tatlor F G. Germination and growth effects of hexavalent chromium in Orocol TL (a corrosion inhibitor) on *Phaseolus vulgaris*

- [J]. *Environment International*, 1982, 7(3):197-202
- [9] Yang Y, Paterson E, Campbell C. Accumulation of heavy metal in urban soils and impacts on microorganism[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(3): 44-48
- [10] Grakovskii V G, Frid A S, Timokhin P A. Evaluation of soil pollution by heavy metals and arsenic in Chelyabinsk Oblat[J]. *Eurasian Soil Science*, 1997, 30(1):74-81
- [11] Terelak H, Stuczynski T, Piotrowska M. Heavy metals in agricultural soils in Poland [J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1997, 30(2): 35-42
- [12] 陈丽红, 刘征涛, 方征, 等. 老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(4):274-278
- [13] Xu J, Ke X, Krogh P H. Evaluation of growth and reproduction as indicators of soil metal toxicity to the Collembolan, *Sinella curviseta*[J]. *Insect Science*, 2009, 16: 57-63
- [14] 成杰民, 解敏丽, 朱宇恩. 赤子爱胜蚓对 3 种污染土壤中 Zn 及 Pb 的活化机理研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5):91-97
- [15] Lock K, Janssen C R. Test designs to assess the influence of soil characteristics on the toxicity of copper and lead to the oligochaete *Enchytraeus albidus*[J]. *Ecotoxicology*, 2001, 10(3):137-144
- [16] Nelson Beyer W, Cromartie E J. A survey of Pb, Cu, Zn, Cd, As and Se earthworms and soil from diverse sites[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1987, 8(1):27-36
- [17] OECD. Guidelines for testing of chemicals. test 222: earthworm reproduction test[S]. Paris: Organization for Economic Coporation and Development, 2004
- [18] OECD. OECD series on testing and assessment No. 54. Current Approaches in the Statistical Analysis of Ecotoxicity Data: A Guidance to Application[S].
- [19] 陈英旭. pH、温度对 Cr(VI)减少动力学的影响[J]. *环境科学*, 1992, 13(3): 7-10
- [20] 王婉华, 陈丽红, 方征, 等. 土壤铬(VI)对赤子爱胜蚓的生态毒性效应[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(6):653-657
- [21] 徐明岗, 纳明亮, 张建新, 等. 红壤中 Cu、Zn、Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制效应[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(2):153-157
- [22] Kabala C, Singh B R. Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter[J]. *Journal of Environment Quality*, 2001, 30(2): 485-492
- [23] 寇士伟, 吴锦标, 谢素, 等. 红薯对 Pb、Cd 的吸收累积特征及根际土壤 Pb、Cd 形态分布研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4):677-683