

刘海龙, 王玉军, 宣亮, 等. 土壤基本理化性质对外源镉蚯蚓慢性毒性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 225–233.

LIU Hai-long, WANG Yu-jun, XUAN Liang, et al. Effects of soil physico-chemical properties on chronic toxicity of cadmium to earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 225–233.

土壤基本理化性质对外源镉蚯蚓慢性毒性的影响

刘海龙^{1,2}, 王玉军^{2*}, 宣亮², 周东美², 宋吟玲^{1*}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

摘要: 为了给污染土壤生态风险评价和构建土壤生态筛选基准提供基础参考数据, 参考经济合作与发展组织(OECD)颁布的蚯蚓慢性毒性试验方法, 研究了镉在我国 18 种典型土壤中对赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)的慢性毒性。结果表明, 镉在不同类型土壤中对蚯蚓产茧量最大无影响浓度 NOEC 变化范围为 10~100 mg·kg⁻¹, 半数有效抑制浓度 EC₅₀ 变化范围为 66.5~263.5 mg·kg⁻¹。土壤基本性质显著影响着镉的生物毒性, 通过对 EC₅₀ 与土壤的主要理化性质逐步多元回归分析, 发现土壤 pH 值和有机质含量与 EC₅₀ 呈显著正相关关系, 黏粒与 EC₅₀ 呈显著负相关关系, 三种因子共同控制了 EC₅₀ 预测回归模型变异的 89.1%。同时分析不同类型土壤中蚯蚓体内镉积累量变化可知, 土壤 pH 越高, 有机质含量越高, 土壤中镉生物有效性就越低。

关键词: 镉; 土壤; 赤子爱胜蚓; 慢性毒性

中图分类号: X503.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)02-0225-09 doi:10.11654/jaes.2016.02.003

Effects of soil physico-chemical properties on chronic toxicity of cadmium to earthworm *Eisenia fetida*

LIU Hai-long^{1,2}, WANG Yu-jun^{2*}, XUAN Liang², ZHOU Dong-mei², SONG Yin-ling^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The effects of soil physico-chemical properties on the chronic toxicity of cadmium (Cd) to earthworm were investigated in 18 soils spiked with Cd by employing the methods of Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Results showed that Cd toxicity to *E. fetida* differed in different soils. No observed effect concentrations (NOEC) of Cd varied from 10 to 100 mg·kg⁻¹. The Cd concentration for 50% of maximal inhibition effect (EC₅₀) of cocoon production ranged from 66.5 to 263.5 mg·kg⁻¹. Significant positive correlations were observed between soil pH, organic matter content and cadmium EC₅₀, while significant negative correlation was present between clay content and cadmium EC₅₀. These three factors accounted for 89.1% of variance for cadmium EC₅₀. The bioavailability of Cd was lower in soil with higher pH and more soil organic matter, which was in accordance with the results of the inhibition of cocoon production experiments. The Cd ecotoxicity data generated in the current study may provide useful reference information for the environmental risk assessment of Cd contaminated soils and the development of soil screening values.

Keywords: cadmium; soils; *Eisenia fetida*; chronic toxicity

土壤重金属污染是近年来国内外普遍关注的环境问题, 2014 年环境保护部和国土资源部共同颁布了《全国土壤污染状况调查公报》^[1]。公报指出, 全国土

壤污染严重, 点位超标率为 16.1%, 农田土壤状况尤其糟糕, 其点位超标率高达 19.4%。在所有污染物当中, 重金属污染最为严重, 占比 82.8%, 其中镉排在第一位, 我国土壤镉点位超标率达 7.0%; 耕地土壤中主要污染物排在第一位的也是镉, 我国土壤镉污染越来越受到大家的重视。镉进入土壤后, 会在土壤中积累, 并可以通过食物链在动植物体内传递, 镉在生物体内长期积累会对生物体造成极大的危害^[2-5], 因此开

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家环保部公益性项目(20140941); 国家自然科学基金(41422105); 江苏省自然科学基金(BK20130050)

作者简介: 刘海龙(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事重金属的土壤毒理学研究。E-mail: liuhailong179350@sina.com

* 通信作者: 王玉军 E-mail: yjwang@issas.ac.cn

展土壤镉污染研究已迫在眉睫。

欧美许多国家先后颁布了针对镉污染土壤的质量标准,我国也于1996年制定土壤镉污染三级标准,用于生态风险评估^[6-9]。然而由于不同种类土壤的理化性质不同,重金属镉的毒性有很大差别^[10-12]。因此,及时开展基于不同类型土壤中镉生态毒理的研究,了解其毒性差异及作用机理,对于镉的生态筛选值制定及风险评估均有重要意义。

我国土壤种类众多,不同土壤之间性质相差很大,如土壤pH变化范围大致为4.0~9.0,有机质含量也有很大差异,其含量范围大致为3.0~132 g·kg⁻¹^[13]。目前,基于我国不同土壤类型的污染物生态毒理数据还相对匮乏,已获得的可用于生态效应评价的数据多针对国外土壤和物种,对我国土壤和生物的适用性有待评估。因此,需要及时开展生态毒理试验,以便补充在环境标准修订过程中所缺失的毒理数据^[14]。目前我国土壤镉污染生态毒理研究主要集中在单一田间土壤或者人工土壤的急性实验研究^[15-17]。相比急性毒性试验的致死效应,慢性毒性试验对生物体繁殖的影响更能反映出土壤中重金属的实际毒性^[18-19],因为重金属进入土壤中,本身毒性稳定需要一个过程,而急性试验时间太短,不能准确反映出重金属的实际毒性。

作为土壤生态系统的重要组成部分,蚯蚓可以通过食物链吸收土壤中重金属^[20]并在体内大量积累,对生长和生殖产生影响,进而致死,因此蚯蚓已经成为监测土壤重金属污染的重要指示生物^[21-22]。本研究选用我国18种典型土壤,测定镉在不同土壤中对赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)的慢性毒性,揭示土壤理化性质对镉毒性和生物有效性的重要影响,研究结果可为土壤镉污染生态风险评估提供数据支持。

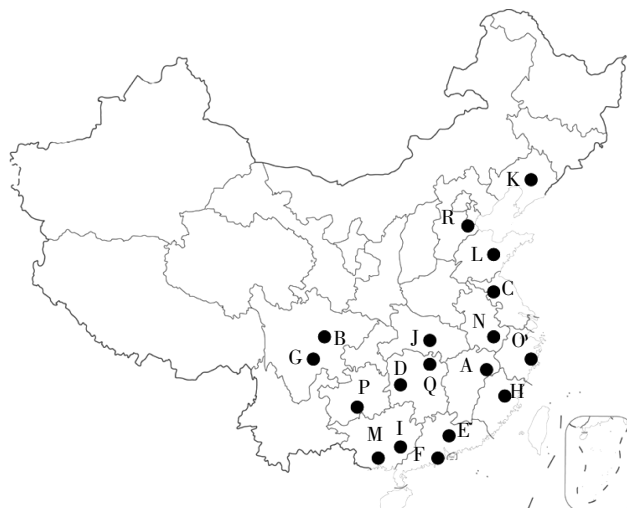
1 材料和方法

1.1 试剂和材料

试验所用Cd(Cl)₂·2.5H₂O为国产分析纯试剂。

试验用蚓为赤子爱胜蚓,购自江苏句容蚯蚓养殖基地,是ISO和OECD推荐使用蚓种,对污染物中度敏感。蚯蚓买回后放于人工培养箱中,在(20±2)℃于供试土壤中培养驯化两周,适当添加牛粪作为食物。实验选用行为活泼、体色鲜亮、体重300~600 mg、生长期2~3个月、个体相对均匀的成熟蚯蚓。

18种供试土样采集覆盖我国华东、西南、华南、华中、华北、东北六大地理分区,为0~20 cm耕层土壤,具体采样点分布和相应的土壤类型见图1。样品



A 鹰潭红壤;B 乐山紫色土;C 盱眙黄棕壤;D 长沙水稻土;
E 韶关赤红壤;F 肇庆砖红壤;G 都江堰水稻土;H 泉州水稻土;
I 河池红壤;J 宜昌水稻土;K 沈阳棕壤;L 潍坊褐土;M 崇左砖红壤;
N 合肥水稻土;O 宁波水稻土;P 贵阳黄壤;Q 湘乡水稻土;R 保定潮土
A-Red soil (Yingtan); B-Purple soil (Leshan); C-Yellow brown soil (Xuyi); D-Paddy soil (Changsha); E-Lateritic red soil (Shaoguan); F-Latosol (Zhaoqing); G-Paddy soil (Dujiangyan); H-Paddy soil (Quanzhou); I-Red soil (Hechi); J-Paddy soil (Yichang); K-Brown soil (Shenyang); L-Cinnamon soil (Weifang); M-Latosol (Chongzuo); N-Paddy soil (Hefei); O-Paddy soil (Ningbo); P-Yellow earth (Guiyang); Q-Paddy soil (Xiangxiang); R-Calcareous soil (Baoding)

图1 试验土壤的类型和采集地点

Figure 1 Soil types and sampling sites

采回后风干、研磨,过5 mm筛备用。土壤Cd背景浓度和土壤主要理化性质(pH、有机质、粘粒、阳离子交换量CEC、持水量)测定结果见表1,具体分析参照《土壤农业化学分析方法》^[23]。

1.2 蚯蚓慢性毒性试验

蚯蚓慢性毒性试验参考OECD(OECD Guideline 222)^[24]。试验之前蚯蚓需在玻璃皿中清肠24 h,然后用去离子水洗净,取10条称重,以保证加进去的蚯蚓质量基本一致。镉浓度设置参考急性毒性试验的数据,其最高浓度不超过急性试验最低致死浓度,每个土壤对应设置6个浓度,每个浓度设置4个平行。称取一定量的Cd(Cl)₂·2.5H₂O于50 mL抗凝管中配成水溶液,加入到含有500 g供试土壤的1 L塑料盆中,充分混匀,调节土壤水分含量为最大含水量的60%(定期称量容器来监测土壤的含水量,必要时添加适量水分,以保持一定的湿度),平衡一周后用于试验,土壤中镉的含量范围是0~1000 mg·kg⁻¹。每盆加10条蚯蚓,待蚯蚓爬进去以后,添加5 g牛粪于土壤表面,然后用保鲜膜封住盆口以防止蚯蚓爬出,并在

表 1 试验土壤的主要理化性质

Table 1 Main physico-chemical properties of tested soils

编号	土壤	pH	最大持水量/%	有机质/g·kg ⁻¹	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	黏粒/%	粉砂粒/%	砂粒/%	镉本底浓度/mg·kg ⁻¹
A	鹰潭红壤	4.69	56.46	55.30	14.50	13.80	51.30	34.90	0.41
B	乐山紫色土	5.52	44.41	20.50	13.00	34.30	57.50	8.20	0.46
C	盱眙黄棕壤	5.02	47.81	22.00	25.60	12.70	80.10	7.20	0.20
D	长沙水稻土	4.62	65.70	43.60	6.94	20.00	67.00	13.00	0.48
E	韶关赤红壤	5.51	43.24	18.50	16.20	22.90	41.40	35.70	0.27
F	肇庆砖红壤	5.33	58.58	40.00	13.40	27.10	53.70	19.20	0.34
G	都江堰水稻土	7.03	54.41	31.70	26.10	13.60	61.80	24.60	0.42
H	泉州水稻土	6.14	45.32	14.30	9.23	12.60	47.10	40.30	0.30
I	河池红壤	5.40	64.91	58.20	9.87	32.50	43.20	24.30	2.27
J	宜昌水稻土	5.94	44.79	26.50	6.98	11.90	64.50	23.60	0.39
K	沈阳棕壤	7.64	42.90	5.65	15.70	47.00	49.80	3.20	0.33
L	潍坊褐土	7.03	44.61	7.90	18.00	10.40	57.70	31.90	0.26
M	崇左砖红壤	7.43	44.88	33.10	16.50	41.30	29.50	29.20	0.97
N	合肥水稻土	8.20	44.05	5.57	19.10	21.40	72.70	5.90	0.27
O	宁波水稻土	8.09	46.16	24.60	18.40	22.20	59.60	18.20	0.23
P	贵阳黄壤	7.60	45.53	81.10	9.94	48.10	41.40	10.50	1.14
Q	湘乡水稻土	7.99	53.12	38.60	14.80	29.50	48.90	21.60	0.93
R	保定潮土	8.69	41.97	5.70	10.90	13.10	61.50	25.40	0.27

保鲜膜上用医用小镊子扎几个小孔用以通气。温度设置为(20±1)℃,湿度控制在75%左右,光照强度设在400~800 lx。每周添加一次牛粪,每盆添加5 g。4周后将成蚓取出。用湿筛法将土壤中的蚓茧挑出和计数(上面2.0 mm和下面1.0 mm过两层筛),通过统计土壤中存在的蚓茧数来评估镉对蚯蚓繁殖的影响^[25]。在 $P=0.05$ 的显著水平上采用Dunnett's检验方法对处理组和对照组的繁殖输出进行多重比较,以确定最大无影响浓度NOEC^[26],同时分析镉对蚯蚓产茧量的抑制率,以确定半数有效抑制浓度 EC_{50} 。

1.3 蚯蚓体内镉含量测定

暴露后的蚯蚓用去离子水洗净,清肠24 h,再次用去离子水洗净,用滤纸吸干表面水分,放于-70℃冰箱中冷冻,然后用冻干机冻干,称量蚯蚓干重。取整条蚯蚓放于100 mL三角瓶中,加入15 mL浓硝酸并分3次加入2 mL双氧水,加上小漏斗,放置过夜;150℃消煮2 h,在此期间加入一定量双氧水,升高温度到200℃左右消煮,直至瓶中只剩少量澄清溶液为止。稍冷后加入5 mL 2 mol·L⁻¹的盐酸定容至25 mL容量瓶中,用原子吸收分光光度计测定(F-AAS;Hitachi Z-2000, Japan)。同时测定龙虾标准物质(TORT-2, Notional Research Council Canada)中重金属镉的含量,回收率可以达到95%以上。

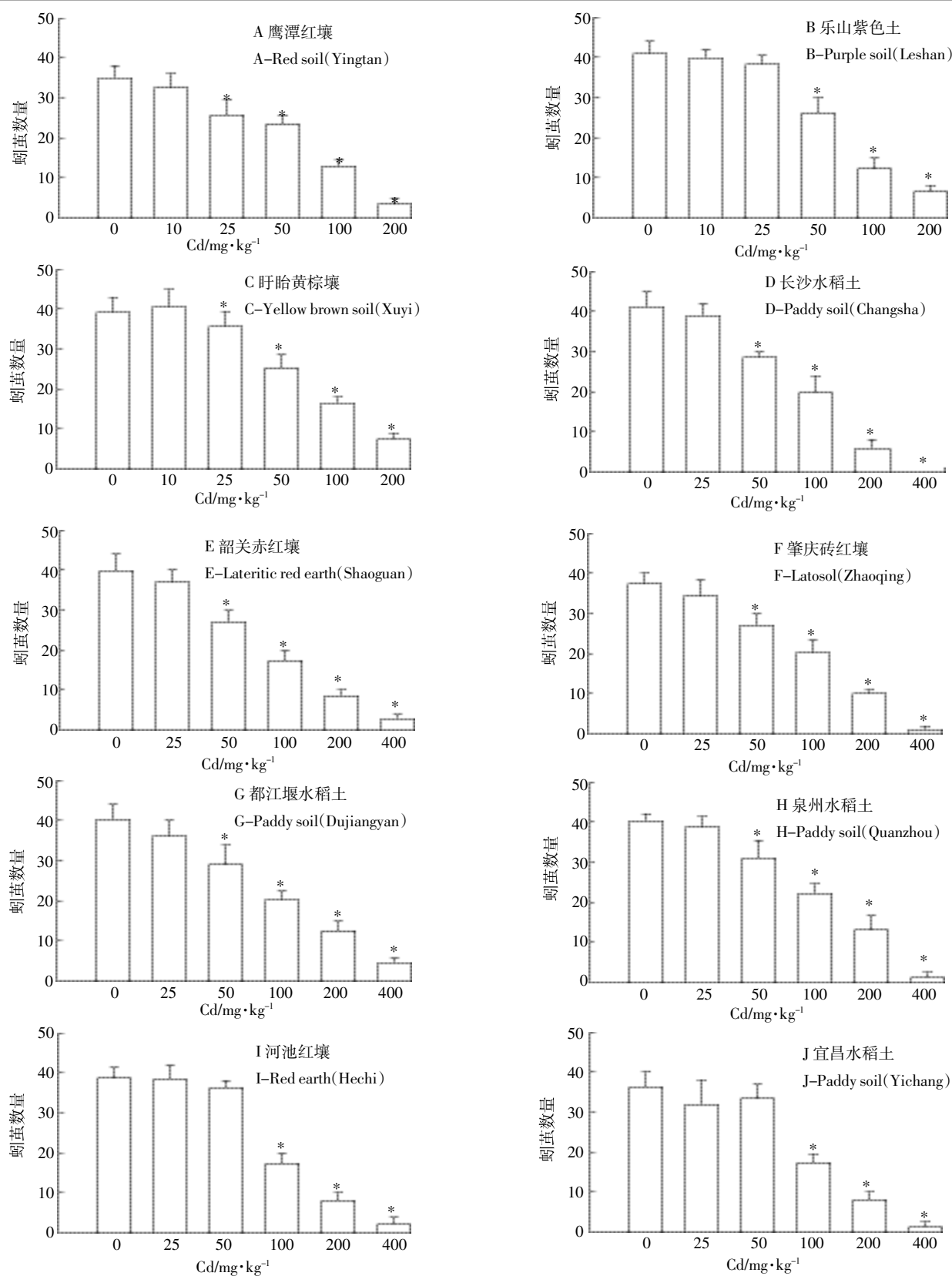
2 结果与分析

2.1 土壤中镉对蚯蚓繁殖的影响

整个实验过程中,实验组和对照组均没有出现成蚓死亡现象。以产茧量作为参数可以看到,随着土壤镉浓度增加,蚓茧数逐渐降低(图2)。镉在不同土壤中对蚯蚓产茧量的NOEC并不相同(表2),以在鹰潭红壤中为最低(10 mg·kg⁻¹),在保定潮土中最高(100 mg·kg⁻¹)。镉在18种土壤中对赤子爱胜蚓产茧量的 EC_{50} 差异也比较大(表2),在鹰潭红壤中为66.52 mg·kg⁻¹,而在保定潮土中为263.48 mg·kg⁻¹,两者之间相差约200.00 mg·kg⁻¹。可以利用镉对蚯蚓产茧量 EC_{50} 来判断镉对蚯蚓的慢性毒性大小,其结果为:鹰潭红壤>乐山紫色土>盱眙黄棕壤>长沙水稻土>韶关赤红壤>肇庆砖红壤>都江堰水稻土>泉州水稻土>河池红壤>宜昌水稻土>沈阳棕壤>潍坊褐土>崇左砖红壤>合肥水稻土>宁波水稻土>贵阳黄壤>湘乡水稻土>保定潮土。

2.2 土壤主要理化性质与镉慢性毒性之间的关系

通过 EC_{50} 与土壤主要的理化性质逐步多元回归分析,发现pH值($P<0.001$)、有机质含量($P=0.006$)、黏粒含量($P=0.015$)显著影响镉对蚯蚓的慢性毒性,其中pH值是最主要影响因素。以pH值、有机质含

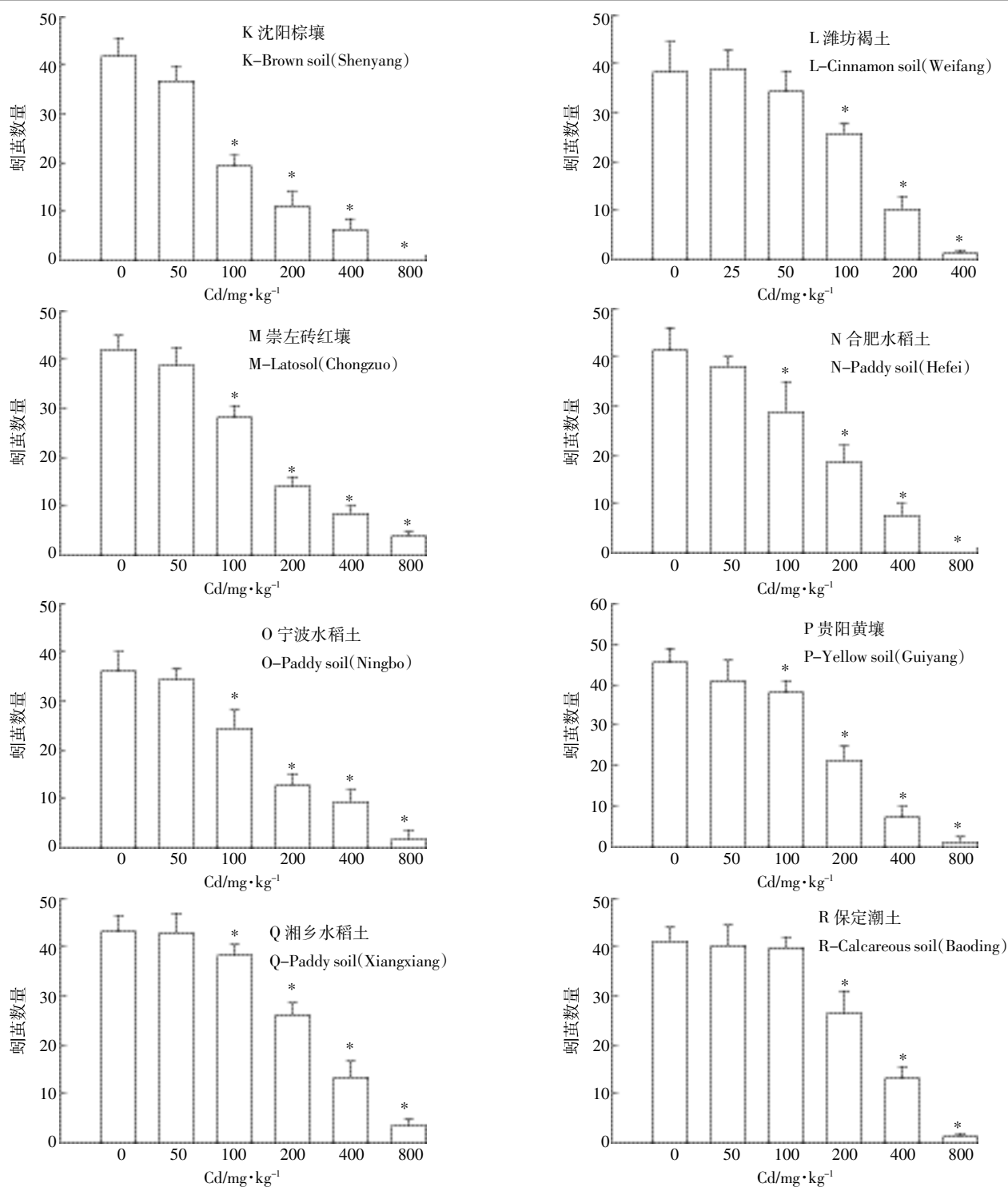


图中数据表示平均值±标准误; * 表示与对照相比差异显著, $P < 0.05$

Mean values are shown with standard deviation; * indicate significant decrease compared with the control group, $P < 0.05$

图2 28 d 时镉对赤子爱胜蚓产茧量的影响

Figure 2 Effect of cadmium on cocoon production of *Eisenia fetida* after 28 d exposure



图中数据表示平均值±标准误; * 表示与对照相比差异显著, $P < 0.05$

Mean values are shown with standard deviation; * indicate significant decrease compared with the control group, $P < 0.05$

续图 2 28 d 时镉对赤子爱胜蚓产茧量的影响

Continued figure 2 Effect of cadmium on cocoon production of *Eisenia fetida* after 28 d exposure

量、黏粒含量为因子, 得出一个包含土壤理化性质的回归方程, 此方程可以解释 EC_{50} 回归模型变异的 89.1% (表 3)。同时, 对 EC_{50} 的实测值和预测值作图

(图 3, 1:1 完全匹配), 发现 R^2 可以达到 0.874 8。这表明, 构建的预测模型能够准确预测不同土壤中镉对蚯蚓的慢性毒性。

表 2 暴露 28 d 时镉对赤子爱胜蚓产茧量的

EC₅₀、NOEC(mg·kg⁻¹)

Table 2 EC₅₀ and NOEC of cadmium for cocoon production of *Eisenia fetida* after 28 d exposure(mg·kg⁻¹)

编号	土壤	EC ₅₀ (95%置信区间)	NOEC
A	鹰潭红壤	66.52(54.38~72.98)	10
B	乐山紫色土	71.96(51.73~97.06)	25
C	盱眙黄棕壤	78.06(56.33~105.76)	25
D	长沙水稻土	83.74(63.85~109.11)	25
E	韶关赤红壤	88.41(77.60~100.44)	25
F	肇庆砖红壤	94.34(61.70~144.63)	25
G	都江堰水稻土	100.24(87.51~114.37)	25
H	泉州水稻土	110.49(80.41~153.98)	25
I	河池红壤	110.81(72.82~155.91)	50
J	宜昌水稻土	111.30(86.04~140.06)	50
K	沈阳棕壤	116.43(62.78~180.84)	50
L	潍坊褐土	126.74(114.48~139.89)	50
M	崇左砖红壤	162.75(117.66~218.02)	50
N	合肥水稻土	164.85(125.64~214.18)	50
O	宁波水稻土	170.87(120.10~232.41)	50
P	贵阳黄壤	181.24(245.14~224.46)	50
Q	湘乡水稻土	251.86(229.90~281.91)	50
R	保定潮土	263.48(200.57~342.04)	100

2.3 土壤中蚯蚓体内镉积累量变化

从上述 18 种土壤中选出鹰潭红壤、韶关赤红壤、沈阳棕壤、保定潮土 4 种土壤,分析 28 d 蚯蚓体内镉积累量。如图 4 可见,蚯蚓体内镉积累量随着土壤中的镉浓度增加而增加,且体内镉含量与 4 种土壤添加镉的浓度均显著正相关($P<0.05$), R^2 分别为 0.979、0.988、0.991、0.993。同时比较这 4 种土壤添加同样浓度外源镉时蚯蚓体内镉含量,发现鹰潭红壤>韶关赤红壤>沈阳棕壤>保定潮土(图 5)。土壤 pH 和有机质显著影响 Cd 的生物有效性,土壤 pH 越高,有机质含量越高,其生物有效性就越低。这与我们前面研究 18 种土壤中镉对蚯蚓慢性毒性大小是一致的。蚯蚓体内镉积累量越高,对机体产生的毒性越大,蚯蚓的繁殖能力也就越低。

表 3 土壤主要理化性质与镉对蚯蚓产茧量 EC₅₀(mg·kg⁻¹)之间的简单和多元回归方程

Table 3 Simple and multiple linear regressions between EC₅₀(mg·kg⁻¹) of cadmium for cocoon production of *Eisenia fetida* and soil properties

回归方程	R^2	显著性水平(P)
方程 1 $\lg EC_{50}=1.311+0.118pH$	0.792	<0.001
方程 2 $\lg EC_{50}=1.17+0.14pH+0.029OM-0.003Clay$	0.891	<0.001 0.006 0.015

注:OM 为有机质含量,g·kg⁻¹;Clay 为黏粒含量,%。

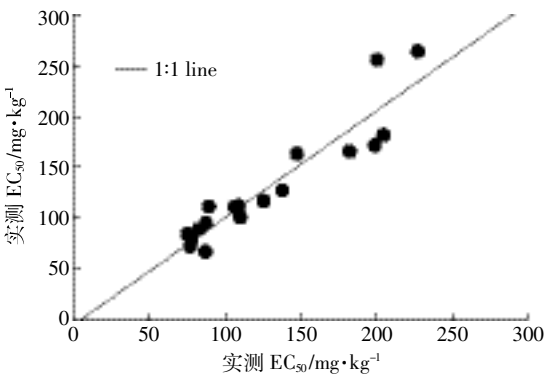


图 3 镉对蚯蚓产茧量的实测 EC₅₀与预测 EC₅₀之间的关系
Figure 3 Correlation between measured and predicted EC₅₀ of cadmium for cocoon production of *Eisenia fetida*

3 讨论

关于不同类型土壤中重金属镉的毒性差异已有一些报道。宋文恩等^[27]研究了镉在 8 种不同性质的土壤中对 T167 水稻的生长毒性,发现镉在不同类型土壤中抑制根伸长的 EC₁₀ 范围为 1.40~5.25 mg·kg⁻¹,最大相差 275.0%,EC₅₀ 为 17.83~46.93 mg·kg⁻¹,最大相差 163.2%。余淑娟等^[28]研究了 8 种不同性质的土壤中添加外源镉对番茄根系的毒害效应,发现镉抑制根伸长的 EC₂₀ 为 0.26~11.61 mg·kg⁻¹。本研究结果与先前的研究结果是一致的,18 种土壤中镉对蚯蚓产茧量产生抑制作用的 EC₅₀ 为 66.5~263.5 mg·kg⁻¹(表 2)。

先前有学者发现,土壤 pH、阳离子交换量、有机质含量是影响土壤镉毒性的主要因素^[27]。余淑娟等^[28]认为,土壤 pH 是影响番茄根长的主要土壤性质,土壤有机质含量是影响番茄根系生物量的主要土壤性质,这一观点在研究不同土壤中镉的有效态含量时得到了进一步证实^[29]。Rafiq 等^[30]认为土壤 pH 是影响镉毒性和生物有效性的主要因子。本研究结果表明,pH 值、有机质含量和粘粒含量是影响镉对蚯蚓慢性毒性的主要因素。

比较 4 种土壤中蚯蚓的体内镉积累量发现,蚯蚓

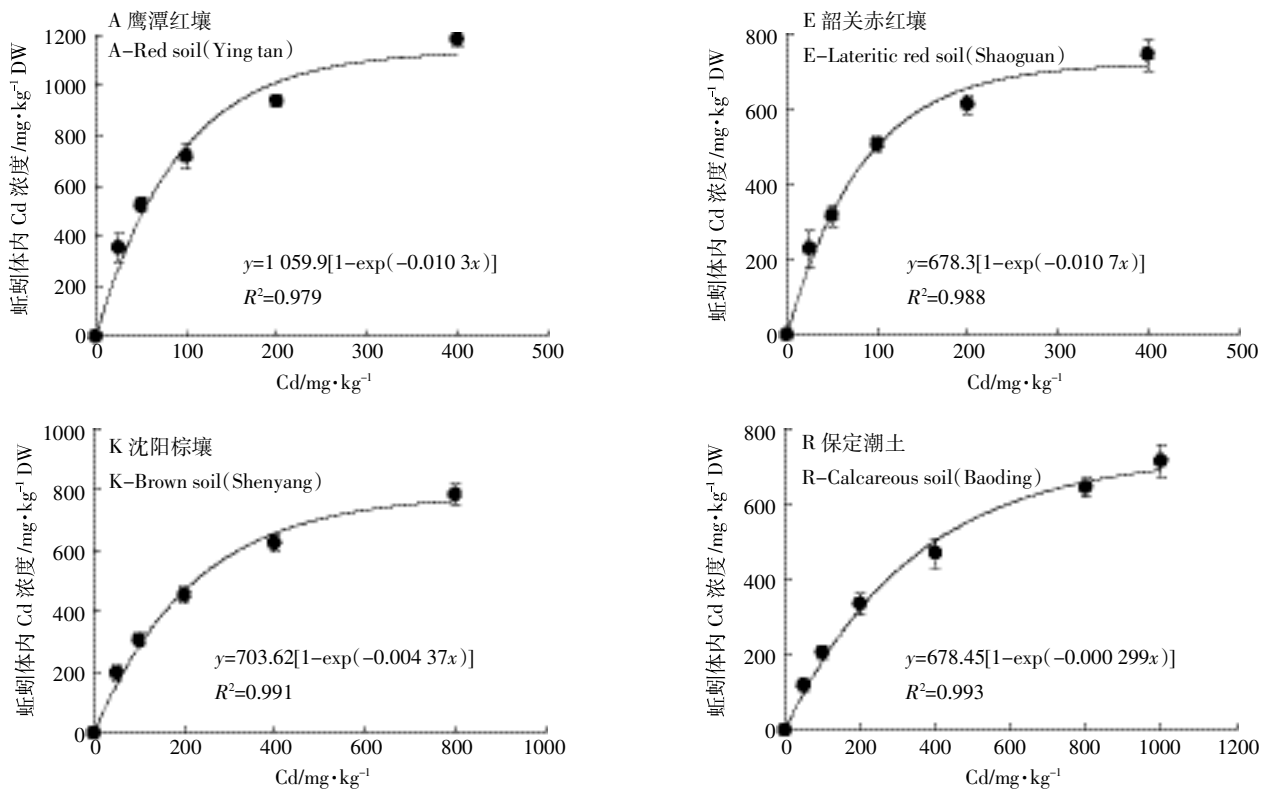
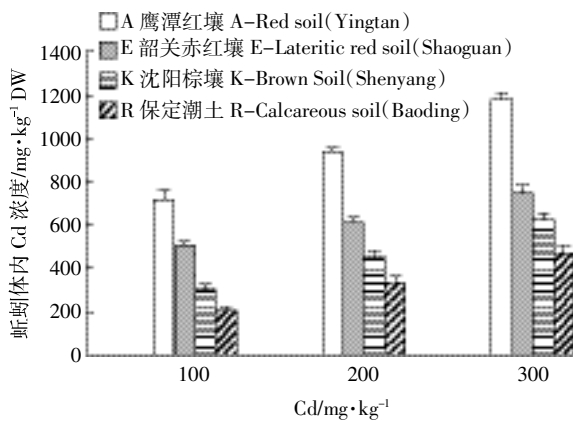


图 4 土壤镉浓度与蚯蚓体内镉浓度的回归关系

Figure 4 Regressions between cadmium concentration in soils and in *Eisenia fetida*图 5 同样浓度外源镉时 4 种土壤中蚯蚓体内镉积累量
Figure 5 Accumulation of Cd by *Eisenia fetida* exposed to four soils for 28 d

体内镉积累量随着土壤中镉浓度的增加而增加,且体内镉含量与 4 种土壤添加镉的浓度均显著正相关 ($P < 0.05$),但是当土壤中镉浓度较高时,蚯蚓体内镉积累量降缓。这可能是蚯蚓暴露于高浓度的污染物中,其自身活性降低,进而减少了对污染土壤的摄入,这与先前的研究结果也是一致的。贺萌萌^[31]研究北京潮土中蚯蚓对镉的吸收和富集发现,随着土

壤中镉浓度的升高,蚯蚓体内镉的含量先上升后趋于稳定或者略有降低。本研究比较这 4 种土壤添加同样浓度外源镉时蚯蚓体内含量发现:鹰潭红壤>都江堰水稻土>崇左砖红壤>保定潮土(图 5)。蚯蚓体内镉积累量越高,对机体产生的毒性越大,蚯蚓的繁殖能力也就越低。

土壤老化会对重金属毒性产生很大的影响,这一点已经得到普遍的证实。先前,刘彬等^[32]研究发现,经 180 d 老化后土壤中重金属镉对水稻生长毒性相对 14 d 老化处理显著降低^[32]。本研究土壤中外源添加镉以后只平衡一周用于试验,对于平衡不同时间(1、14 d、一个月乃至更长的时间)镉对蚯蚓的生殖毒性差异,有待于进一步研究。

4 结论

土壤 pH 值、有机质含量和黏粒含量是影响镉对蚯蚓慢性毒性的主要因素,三者的变化解释了蚯蚓产茧半抑制浓度 EC_{50} 回归模型变异的 89.1%。土壤 pH 和有机质含量等因素也显著影响镉的生物吸收,土壤 pH 越高,有机质含量越高其生物有效性就越低。

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 2014.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. The investigation communique on national soil pollution condition[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2014.
- [2] Benavides M P, Gallego S M, Tomaro M L. Cadmium toxicity in plants [J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, 17(1): 21-34.
- [3] Yang Q, Lan C, Wang H, et al. Cadmium in soil-rice system and health risk associated with the use of untreated mining wastewater for irrigation in Lechang, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1): 147-152.
- [4] Kilic G A. Histopathological and biochemical alterations of the earthworm (*Lumbricus terrestris*) as biomarker of soil pollution along Porsuk River Basin (Turkey)[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(8): 1175-1180.
- [5] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
CHEN Huai-man. Heavy metal pollution in the soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [6] Gomes P C, Fontes M P F, Da Silva A G, et al. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(4): 1115-1121.
- [7] Hankard P, Bundy J, Spurgeon D, et al. Establishing principal soil quality parameters influencing earthworms in urban soils using bioassays[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133(2): 199-211.
- [8] European Commission. Technical guidance document on risk assessment in support of commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances, commission regulation (EC) No 1488/94 on risk assessment for existing substances, and directive 98/8/EC of the European parliament and of the council concerning the placing of biocidal products on the market[M]. Brussels: European Commission, 2003.
- [9] 陈梦舫, 骆永明, 宋 静, 等. 中、英、美污染场地风险评估导则异同与启示[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(3): 14-18.
CHEN Meng-fang, LUO Yong-ming, SONG Jing, et al. Comparison of USA, UK and Chinese risk assessment guidelines and the implications for China[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, 23(3): 14-18.
- [10] Aziz R, Rafiq M T, He Z L, et al. In vitro assessment of cadmium bioavailability in Chinese cabbage grown on different soils and its toxic effects on human health[J]. *Biomed Research International*, 2015, 28(1): 5351-5362.
- [11] Rafiq, Muhammad T, Aziz, et al. Rukhsanda cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils: A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 103(1): 101-107.
- [12] Marti E, Sierra J, Cáliz J, et al. Ecotoxicity of Cr, Cd, and Pb on two mediterranean soils[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 64(3): 377-387.
- [13] 周启星, 王 毅. 我国农业土壤质量基准建立的方法体系研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(1): 38-44.
ZHOU Qi-xing, WANG Yi. Methodological systems of building agricultural soil quality criteria in China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(1): 38-44.
- [14] 夏家淇, 骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 1-6.
XIA Jia-qi, LUO Yong-ming. Several key issues in research of soil environmental quality in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1): 1-6.
- [15] 刘德鸿, 刘德辉, 成杰民. 土壤 Cu、Cd 污染对两种蚯蚓种的急性毒性[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(6): 706-710.
LIU De-hong, LIU De-hui, CHENG Jie-min. Acute toxicity of Cu, Cd to two species of earthworms in soil[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2005, 11(6): 706-710.
- [16] 杨雪峰, 葛亚明, 姜金庆, 等. 氯化镉对小鼠的急性毒性效应[J]. 中国兽医学报, 2012, 32(3): 467-471.
YANG Xue-feng, GE Ya-ming, JIANG Jin-qing, et al. Acute toxicity of cadmium chloride to mice[J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2012, 32(3): 467-471.
- [17] 曹会聪, 王金达, 任慧敏, 等. 土壤镉暴露对玉米和大豆的生态毒性评估[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 298-303.
CAO Hui-cong, WANG Jin-da, REN Hui-min, et al. Ecotoxicity assessment of cadmium in soil to maize (*Zea mays*) and soybean (*G. lycine-ma*) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 298-303.
- [18] Spurgeon D J, Hopkin S P. Effects of metal-contaminated soils on the growth, sexual development, and early cocoon production of the earthworm *Eisenia fetida*, with particular reference to zinc[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1996, 35(1): 86-95.
- [19] Zltauskaite J, Sodiene I. Effects of total cadmium and lead concentrations in soil on the growth, reproduction and survival of earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Ekologija*, 2010, 56(1): 10-16.
- [20] Hook R I. Cadmium, lead and zinc distributions between earthworms and soils: Potentials for biological accumulation[J]. *Soil*, 1974, 6(5): 120-125.
- [21] Fent K. Ecotoxicological problems associated with contaminated sites [J]. *Toxicology Letters*, 2003, 140(11): 353-365.
- [22] Arillo A, Melodia F. Reduction of hexavalent chromium by the earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 1991, 21(1): 92-100.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学出版社, 2000.
LUO Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [24] Organization for Economic Cooperation and Development. Guideline for the testing of chemicals. Test 222: Earthworm reproduction test[S]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2004.
- [25] Owojori O J, Reinecke A J, Rozanov A B. The combined stress effects of salinity and copper on the earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(3): 277-285.

- [26] Organization for Economic Cooperation and Development. OECD series on testing and assessment No 54. Current approaches in the statistical analysis of ecotoxicity data: A guidance to application[S]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2006.
- [27] 宋文恩, 陈世宝. 基于水稻根伸长的不同土壤中镉(Cd)毒性阈值(EC_x)及预测模型[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17): 3434–3443. SONG Wen-en, CHEN Shi-bao. The toxicity thresholds(EC_x) of cadmium(Cd) to rice cultivars as determined by root-elongation tests in soils and its-predicted models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3434–3443.
- [28] 余淑娟, 高树芳, 屈英明, 等. 不同土壤条件下镉对番茄根系的毒害效应及其毒害临界值研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 640–646. YU Shu-juan, GAO Shu-fang, QU Ying-ming, et al. Toxicity and its threshold of cadmium to tomato roots in different soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 640–646.
- [29] 邓朝阳, 朱霞萍, 郭兵, 等. 不同性质土壤中镉的形态特征及其影响因素[J]. 南昌大学学报, 2012, 34(4): 340–346. DENG Zhao-yang, ZHU Xia-ping, GUO Bing, et al. Distribution and influence factors of Cd speciation on the soil with different properties[J]. *Journal of Nanchang University*, 2012, 34(4): 340–346.
- [30] Rafiq M T, Aziz R, Yang X, et al. Cadmium phytoavailability to rice(*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils: A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 103: 101–107.
- [31] 贺萌萌. 镉在北京褐潮土中对玉米幼苗和蚯蚓的毒性效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. HE Meng-meng. Toxic effects of cadmium on maize seedlings and earthworm in fluvo-aquic soils of Beijing[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [32] 刘彬, 孙聪, 陈世宝, 等. 水稻土中外源Cd老化的动力学特征及老化因子[J]. 中国环境科学, 2015, 25(7): 2137–2145. LIU Bin, SUN Cong, CHEN Shi-bao, et al. Dynamic characteristics and ageing factors of Cd added to paddy soils with various properties[J]. *China Environmental Science*, 2015, 25(7): 2137–2145.