

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响

陈丽红¹, 刘征涛¹, 方征¹, 王晓南^{1,2}, 王婉华^{1*}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 采用赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 为测试生物, 人工土壤为测试介质, $Pb(NO_3)_2$ 为土壤污染物, 研究土壤老化对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响。结果表明, 与对照组相比, 污染土壤中赤子爱胜蚓体重随土壤中 $Pb(NO_3)_2$ 浓度的升高呈现降低的趋势。 $Pb(NO_3)_2$ 在人工土壤中老化 0、7、28 和 84 d 后, 不同老化时间, $Pb(NO_3)_2$ 抑制赤子爱胜蚓的生长也不相同, 影响最明显的是 1 000 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 1 500 $mg \cdot kg^{-1}$ 试验组。不同老化时间的 $Pb(NO_3)_2$ 对赤子爱胜蚓繁殖的影响有很大差异, 其产茧量的半数有效浓度 (EC_{50}) 分别为 1 085. 10、1 163. 32、1 666. 86 和 1 606. 94 $mg \cdot kg^{-1}$; 幼蚓孵化量的 EC_{50} 分别为 700. 01、703. 88、1 031. 34 和 1 017. 89 $mg \cdot kg^{-1}$ 。 $Pb(NO_3)_2$ 在人工土壤中经过不同老化时间后, 其对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响有很大的差异, 这种差异影响到对土壤 $Pb(NO_3)_2$ 污染的毒性评估, 因此, 进行 $Pb(NO_3)_2$ 毒性试验时应考虑其在土壤中的老化作用。此研究结果可为老化土壤中污染物的生态风险评估以及土壤环境质量标准的制定提供科学依据。

关键词: 土壤老化; 铅; 赤子爱胜蚓; 生长; 繁殖

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1486-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.041

Effects of Lead on the Growth and Reproduction of *Eisenia fetida* with Aged Soils

CHEN Li-hong¹, LIU Zheng-tao¹, FANG Zheng¹, WANG Xiao-nan^{1,2}, WANG Wan-hua¹

(1. State Key Laboratory for Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Water Science Research, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this study, effects of $Pb(NO_3)_2$ on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* were investigated with artificial soils. The results showed that: compared with the control group, the growth of *E. fetida* in contaminated soil was inhibited significantly with increasing $Pb(NO_3)_2$ concentrations. But there were great differences in the extent of inhibition after 0, 7, 28 and 84 days of aging in the artificial soils. The most obvious effect occurred in 1 000 $mg \cdot kg^{-1}$ and 1 500 $mg \cdot kg^{-1}$ experimental groups. There was a very big difference in the effects of $Pb(NO_3)_2$ on reproduction of *E. fetida* with different aging times. The medium effective concentration (EC_{50}) values of cocoon production inhibition were 1 085. 10, 1 163. 32, 1 666. 86 and 1 606. 94 $mg \cdot kg^{-1}$. In addition, the EC_{50} values of the number of juvenile inhibition were 700. 01, 703. 88, 1 031. 34 and 1 017. 89 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. This study indicates that soil aging which affects the toxicity of $Pb(NO_3)_2$ should be taken into consideration when toxicity tests of $Pb(NO_3)_2$ were carried out. The results could provide a scientific basis for the ecological risk assessment of aging soils and soil environmental quality standards.

Key words: soil aging; lead; *Eisenia fetida*; growth; reproduction

目前, 全世界平均每年排放 Pb 约 500 万 t, 其中大部分进入土壤, 致使世界各国土壤出现不同程度的 Pb 污染^[1-3]。土壤 Pb 超标不仅影响植物体的正常生长, 而且通过食物链危害人类健康, 长期或过量摄入 Pb 会引起人体神经系统、消化系统、造血系统和肾脏的损害等中毒反应^[4-6]。近年来, 我国儿童血 Pb 中毒事件频发, 对儿童的智力发育和生长发育产生极大的影响。

蚯蚓作为土壤无脊椎动物的代表, 在评价土壤生态系统的污染方面起着重要作用^[7-9]。目前关于 Pb 对蚯蚓的毒理学研究报道很多^[10-13], 然而多数主要采用新加污染物的人工土壤模拟重金属污染,

并没有考虑污染物在土壤中的老化作用^[14,15], 即水溶性重金属加入土壤后, 迅速完成固-液分配, 其生物有效性或毒性随时间延长而逐渐降低的特性^[16-18]。正是由于老化作用, 使得田间污染土壤中的生物有效性或毒性与添加重金属的人工土壤中的生物有效性或毒性存在着较大的差异。大量研究表明, 重金属在土壤中经过长时间老化后, 其存在形态发生了变化, 有效态浓度降低^[19,20]。Lock 等^[21]研究

收稿日期: 2013-08-30; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109054)

作者简介: 陈丽红(1980~), 女, 硕士, 主要研究方向为生态毒理学, E-mail: red-cup@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangwh@craes.org.cn

了土壤老化对 Cu 生物有效性的影响, 结果表明: 新加入 Cu 的土壤, 其孔隙水中 Cu 的浓度和 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 提取的 Cu 形态, 要显著高于经过长时间老化的土壤中相应的 Cu 浓度; 此外, Cu 的毒性效应与孔隙水中 Cu 的浓度或者 CaCl_2 提取的 Cu 形态之间具有剂量-效应关系. Bruus Pedersen 等^[22]的研究同样表明: 土壤老化对弹尾目昆虫的繁殖产生了很大影响.

因此, 本试验利用赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 为测试生物, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 为土壤污染物, 人工土壤为测试介质, 土壤分别经过 0、7、28 和 84 d 老化后, 研究土壤老化对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响, 以期对老化土壤中污染物的生态风险评估以及土壤环境质量标准的制定提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (分析纯)、 CaCO_3 (分析纯)、石英砂和高岭土均购自国药集团化学试剂有限公司; 草炭购自北京市来广营花卉市场.

1.2 试验蚯蚓

试验所有蚯蚓为赤子爱胜蚓, 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 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 、自然光照条件下长期繁殖与饲养, 选取行为活跃、体色鲜亮、体质量 $300 \sim 600 \text{ mg}$ 、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

试验土壤采用 OECD^[23] 标准人工土壤: 70% 的石英砂、20% 的高岭土、10% 的草炭, 用 CaCO_3 将 pH 调节至 7.0 ± 0.3 .

1.4 生长、繁殖试验

试验按照 OECD^[23] 的方法进行, 选择 6 个浓度组进行赤子爱胜蚓繁殖试验, 其 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 浓度分别为 0、250、500、1 000、1 500、2 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 先将适量的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 配制 (通过母液稀释) 成 50 mL 的水溶液, 分别加入到 500 g 干燥人工土壤中, 充分混匀后, 再用去离子水将土壤湿度调节至其持水量的 35%, 已配好的人工土壤分别经过 0、7、28 和 84 d 老化后用于试验. 试验所用赤子爱胜蚓被随机分成 10 条一组, 每组称重后放在人工土壤表面, 待赤子爱胜蚓钻蛀进入人工土壤后, 在土壤表面均匀撒布 5 g 燕麦片作为赤子爱胜蚓的食物, 并喷洒适量去离

子水使燕麦片湿润, 然后将玻璃烧杯移入人工气候箱内, 在光照周期 16: 8、光照强度 $600 \sim 1\,000 \text{ lx}$ 、温度 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 80% 的条件下培养. 第 28 d 时对赤子爱胜蚓称重后不再放回人工土壤中, 第 56 d 时用湿筛法将土壤中的茧和幼蚓挑出和计数, 试验前 5 周每周给赤子爱胜蚓添加 1 次燕麦片, 多余的食物及时清除, 以避免细菌繁殖. 每个测试浓度重复 4 次.

赤子爱胜蚓体重变化率按以下公式进行计算:

$$\text{体重变化率} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\%$$

式中, W_0 和 W_1 分别是赤子爱胜蚓的初始体重和暴露在污染物中第 28 d 时的体重.

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_{10} (10% 有效浓度) 和 EC_{50} (半数有效浓度) 通过直线回归法求出, NOEC (无可见效应浓度) 按照 OECD^[24] 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 ($\bar{X} \pm \text{SD}$) 表示.

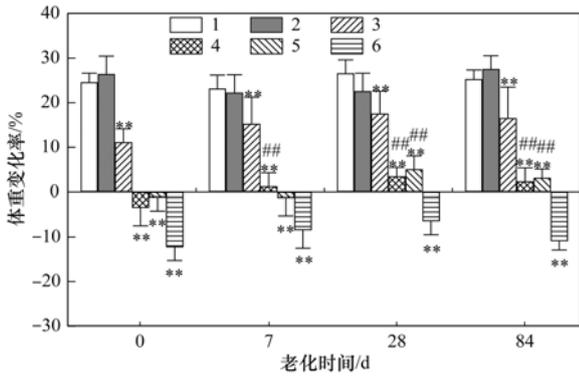
2 结果与讨论

2.1 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 对赤子爱胜蚓生长的影响

整个试验过程中, 试验组和对照组均未出现赤子爱胜蚓死亡现象. 所有对照组的赤子爱胜蚓体重变化率均为正值, 体重都比试验初始有所增加, 生长状态良好, 说明培养的营养条件可以保证赤子爱胜蚓生长的需要.

$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 对赤子爱胜蚓的生长抑制见图 1. 结果表明, 在人工土壤中老化 0、7、28 和 84 d 后, 各试验组 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 对赤子爱胜蚓体重变化率的影响基本一致, 赤子爱胜蚓的体重变化率呈显著的剂量-效应关系, 表现为随着土壤中 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 浓度的增加, 各试验组赤子爱胜蚓的体重与对照组比较明显降低. 当土壤中 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 浓度为 $2\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 对赤子爱胜蚓体重的抑制率均达到最大, 分别为 36.81%、31.59%、33.03% 和 36.14%. 土壤老化对赤子爱胜蚓体重变化影响最大的是 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1\,500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 试验组, 当土壤老化 84 d 时, 其体重比老化 0 d 时分别增加了 5.79% 和 4.32% ($P < 0.01$).

总体来说, 与对照组相比, 污染土壤中赤子爱胜蚓体重随土壤中 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 浓度的升高呈现降低的趋势. 说明 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 污染严重影响了蚯蚓的生长,



Pb(NO₃)₂/mg·kg⁻¹: 1. 0, 2. 250, 3. 500, 4. 1 000, 5. 1 500, 6. 2 000; *表示与对照组比较, P<0.05; **表示与对照组比较, P<0.01; #表示与老化0 d比较, P<0.05; ##表示与老化0 d比较, P<0.01, 下同

图1 在老化土壤中Pb(NO₃)₂作用下赤子爱胜蚓的体重变化率

Fig. 1 Rate of weight change of *Eisenia fetida* exposed to Pb(NO₃)₂ in aged soils

对其体重产生了明显的抑制作用. 此外, Pb(NO₃)₂抑制赤子爱胜蚓生长发育, 还与赤子爱胜蚓的自然生存策略(如为了减轻毒性, 通过减少食物的摄入来避免污染物对机体的损伤)有关^[25]. Maboeta等^[26]研究了食物中(牛粪)加入Pb(NO₃)₂对掘穴环爪蚓生长的影响, 结果表明: 暴露76 d后, 试验组掘穴环爪蚓的生长与对照组相比显著降低. 此外, 土壤不同老化时间, Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓的体重抑制率也不相同, 其中影响最明显的是1 000 mg·kg⁻¹和1 500 mg·kg⁻¹试验组. 因而体重变化率可以成为Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓毒性的一个敏感指标.

2.2 Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓繁殖的影响

2.2.1 Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓产茧量的影响

由图2可见, Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓产茧量的抑制作用表现为随老化时间延长呈现出逐渐降低的趋势, 且产茧量随着土壤中Pb(NO₃)₂浓度的升高呈现出逐渐下降的趋势. 在Pb(NO₃)₂浓度为1 000、1 500和2 000 mg·kg⁻¹试验组, 老化28 d土壤中的赤子爱胜蚓产茧量分别为19.5、15.2和10.2个, 比老化0 d时的产茧量(16.2、9.7、5.5个)分别增加20.4%、56.7%和85.4% (P<0.05); 到老化84 d时, 赤子爱胜蚓产茧量分别为23.0、18.5和9.7个, 比老化0 d分别增加了41.9%、90.7%和76.3% (P<0.05); 但与老化28 d时的产茧量相比只增加了17.9%、21.7%和-4.9%. 方差分析结果表明, 当Pb(NO₃)₂浓度高于1 000 mg·kg⁻¹时, 老化28 d和84 d的人工土壤中Pb(NO₃)₂对赤子爱

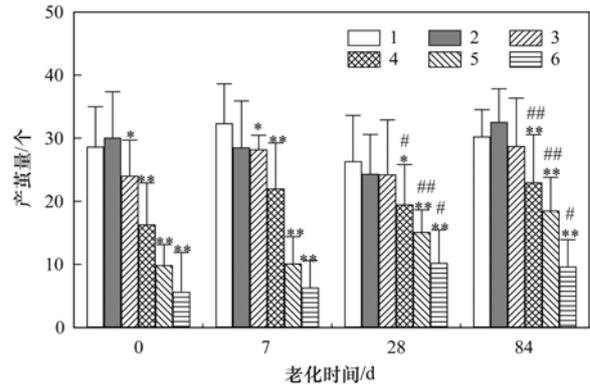


图2 在老化土壤中Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓产茧量的影响

Fig. 2 Effect of Pb(NO₃)₂ on cocoon production of *Eisenia fetida* in aged soils

胜蚓产茧量的抑制作用与老化0 d的人工土壤比较有显著差异(P<0.05).

2.2.2 Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓幼蚓孵化量的影响

由图3可见, 在Pb(NO₃)₂浓度为500、1 000、1 500和2 000 mg·kg⁻¹的试验组中, 老化28 d土壤中的赤子爱胜蚓幼蚓孵化量从老化0 d时的26.5、18.5、11.7和4.0条分别增加到36.2、26.7、16.2和7.5条, 增加了36.6%、44.3%、38.4%和87.5%; 到老化84 d时, 幼蚓孵化量比老化0 d时分别增加52.8%、65.5%、74.8%和37.0%; 但与老化28 d时土壤中的幼蚓孵化量相比只增加12.2%、13.8%、27.8%和-26.8%. 方差分析结果表明, 当Pb(NO₃)₂浓度高于500 mg·kg⁻¹时, 老化28 d和84 d的人工土壤中Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓幼蚓孵化量的抑制作用与老化0 d的人工土壤比较有显著差异(P<0.05).

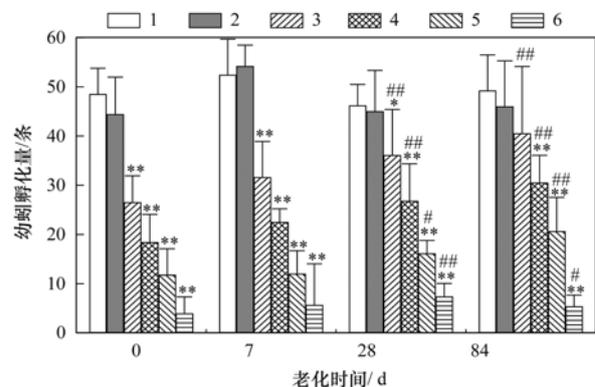


图3 在老化土壤中Pb(NO₃)₂对赤子爱胜蚓幼蚓孵化量的影响

Fig. 3 Effect of Pb(NO₃)₂ on number of juvenile of *Eisenia fetida* in aged soils

2.2.3 Pb(NO₃)₂影响赤子爱胜蚓产茧量和幼蚓孵化量的EC₁₀、EC₅₀和NOEC

由表 1 可见, 土壤老化 0、7、28 和 84 d 后, $Pb(NO_3)_2$ 影响赤子爱胜蚓产茧量和幼蚓孵化量的 EC_{10} 、 EC_{50} 和 NOEC. 在开始的 0~28 d 老化时间内,

$Pb(NO_3)_2$ 对赤子爱胜蚓产茧量和幼蚓孵化量的影响明显, 随后 28~84 d 老化对其的影响逐渐变弱, 趋于平衡.

表 1 在老化土壤中 $Pb(NO_3)_2$ 影响赤子爱胜蚓繁殖的 EC_{10} 、 EC_{50} 和 NOEC

Table 1 EC_{10} , EC_{50} and NOEC reproduction values of *Eisenia fetida* exposed to $Pb(NO_3)_2$ in aged soils

项目	老化时间/d	EC_{10} (95% 置信限)	EC_{50} (95% 置信限)	NOEC
产茧量	0	415.81 (352.86 ~ 490.00)	1 085.10 (920.66 ~ 1 278.50)	250 ($P < 0.05$)
	7	495.56 (428.25 ~ 573.46)	1 163.32 (1 005.31 ~ 1 346.17)	250 ($P < 0.05$)
	28	567.41 (471.85 ~ 682.34)	1 666.86 (1 386.12 ~ 2 004.47)	500 ($P < 0.05$)
	84	663.13 (569.90 ~ 771.61)	1 606.94 (1 381.02 ~ 1 869.82)	500 ($P < 0.01$)
幼蚓孵化量	0	239.01 (198.88 ~ 293.90)	700.01 (582.51 ~ 841.20)	250 ($P < 0.01$)
	7	206.78 (167.65 ~ 255.04)	703.88 (570.69 ~ 868.16)	250 ($P < 0.01$)
	28	383.71 (323.97 ~ 454.46)	1 031.34 (870.76 ~ 1 221.52)	250 ($P < 0.05$)
	84	344.03 (285.76 ~ 414.19)	1 017.89 (845.47 ~ 1 225.46)	500 ($P < 0.01$)

目前, 仅有少量研究关于 $Pb(NO_3)_2$ 对赤子爱胜蚓繁殖的影响, Spurgeon 等^[27] 的研究表明, 在新添加 $Pb(NO_3)_2$ 的人工土壤中, 其抑制赤子爱胜蚓产茧量的 56 d- EC_{50} 为 $1 940 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 本试验中 $Pb(NO_3)_2$ 在老化 0、7、28 和 84 d 的人工土壤中抑制赤子爱胜蚓产茧量的 28 d- EC_{50} 分别为 1 085.10、1 163.32、1 666.86 和 1 606.94 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明 $Pb(NO_3)_2$ 对赤子爱胜蚓繁殖的影响受试验持续时间、土壤老化等因素影响.

Bruus Pedersen 等^[22] 研究表明: Cu 在土壤中未经老化时, 对弹尾目昆虫繁殖的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 $700 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而当土壤老化后, 即使土壤中 Cu 浓度高达 $2 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其对弹尾目昆虫繁殖的影响与对照组比较无显著差异 ($P > 0.05$). 由此可见, 土壤是否经过老化, 对动物繁殖的影响有很大差异.

研究表明, 经过老化后土壤中重金属的存在形态发生了变化, 生物有效性或毒性随着与土壤接触时间的延长而降低, 且老化效应主要发生在与土壤初始接触的阶段^[19,20,28~30]. 本试验也表明, $Pb(NO_3)_2$ 在土壤中老化 0、7、28 和 84 d 后, 其对赤子爱胜蚓繁殖的影响有很大的差异. 土壤中 $Pb(NO_3)_2$ 对赤子爱胜蚓产茧量和幼蚓孵化量的影响在开始的 0~28 d 老化时间内明显, 随后 28~84 d 老化对其的影响逐渐变弱, 趋于平衡. 由此可以看出, $Pb(NO_3)_2$ 在土壤中是否老化, 将极大地影响其对赤子爱胜蚓繁殖的毒性, 因此, 在进行 $Pb(NO_3)_2$ 毒性试验时应考虑土壤的老化作用. 尤其是以赤子爱胜蚓繁殖为测定指标时, 为模拟更接近于自然界的真实情况, 应考虑在实验室中对 $Pb(NO_3)_2$ 进行老化.

因而, 本试验在老化土壤中 $Pb(NO_3)_2$ 对赤子爱胜蚓幼蚓生长及繁殖的研究结果, 可为土壤污染控制及生态风险评价提供科学依据, 也可为土壤质量基准与标准的制定提供基础毒理数据^[7,31,32]; 由于现行的《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995), 都是建立在新加污染物的试验条件下产生的生物效应和生态毒理数据基础上, 往往高估了其生态风险. 因此, 在对《土壤环境质量标准》作进一步修订时, 应考虑土壤的老化作用.

3 结论

(1) 与对照组相比, 污染土壤中赤子爱胜蚓体重随土壤中 $Pb(NO_3)_2$ 浓度的升高呈现降低的趋势. $Pb(NO_3)_2$ 在人工土壤中老化 0、7、28 和 84 d 后, 不同老化时间, $Pb(NO_3)_2$ 抑制赤子爱胜蚓的生长也不相同, 其中影响最明显的是 $1 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 试验组.

(2) $Pb(NO_3)_2$ 在人工土壤中老化 0、7、28 和 84 d 后, 对赤子爱胜蚓繁殖的影响有很大差异, 其产茧量的 EC_{50} 分别为 1 085.10、1 163.32、1 666.86 和 1 606.94 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 幼蚓孵化量的 EC_{50} 分别为 700.01、703.88、1 031.34 和 1 017.89 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(3) 当土壤老化 28 和 84 d 时, $Pb(NO_3)_2$ 浓度高于 $1 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 分别对赤子爱胜蚓产茧量和幼蚓孵化量的抑制作用与老化 0 d 时比较有显著差异.

参考文献:

- [1] Singh O V, Labana S, Pandey G, et al. Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 61(5-6): 405-412.
- [2] Athalye V V, Ramachandran V, D'souza T J. Influence of

- chelating agents on plant uptake of ^{51}Cr , ^{210}Pb and ^{210}Po [J]. *Environmental Pollution*, 1995, **89**(1): 47-53.
- [3] Beyer W N, Cromartie E J. A survey of Pb, Cu, Zn, Cd, Cr, As, and Se in earthworms and soil from diverse sites [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1987, **8**(1): 27-36.
- [4] 宋波, 张学洪, 蒙冬柳, 等. 桂林市菜地土壤和蔬菜铅含量调查与污染评价[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(10): 1155-1160.
- [5] Almeida C M V B, Madureira M A, Bonilla S H, *et al.* Assessing the replacement of lead in solders; effects on resource use and human health[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, **47**: 457-464.
- [6] Gulson B. Stable lead isotopes in environmental health with emphasis on human investigations [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **400**(1-3): 75-92.
- [7] 颜增光, 何巧力, 李发生. 蚯蚓生态毒理试验在土壤污染风险评估中的应用[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(1): 134-142.
- [8] 周娟, 颜增光, 蒋金炜, 等. 几种典型土壤中铜对赤子爱胜蚓的毒性差异比较研究 [J]. *生态毒理学报*, 2008, **3**(4): 394-402.
- [9] Li M, Liu Z T, Xu Y, *et al.* Comparative effects of Cd and Pb on biochemical response and DNA damage in the earthworm *Eisenia fetida* (Annelida, Oligochaeta) [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(5): 621-625.
- [10] 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.
- [11] 张聪, 刘征涛, 王婉华, 等. 铅对赤子爱胜蚓抗氧化酶活性的影响[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(3): 294-299.
- [12] Bur T, Crouau Y, Bianco A, *et al.* Toxicity of Pb and of Pb/Cd combination on the springtail *Folsomia candida* in natural soils: Reproduction, growth and bioaccumulation as indicators [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **414**: 187-197.
- [13] Nursita A I, Singh B, Lees E. The effects of cadmium, copper, lead, and zinc on the growth and reproduction of *Proisotoma minuta* Tullberg (Collembola) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, **60**(3): 306-314.
- [14] 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.
- [15] Lock K, Janssen C R. Ecotoxicity of chromium (III) to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus*, and *Folsomia candida* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2002, **51**(3): 203-205.
- [16] Lu A X, Zhang S Z, Shan X Q. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils[J]. *Geoderma*, 2005, **125**(3-4): 225-234.
- [17] Ma Y B, Uren N C. Effect of aging on the availability of zinc added to a calcareous clay soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, **76**(1): 11-18.
- [18] Oorts K, Ghesquiere U, Smolders E. Leaching and aging decrease nickel toxicity to soil microbial processes in soils freshly spiked with nickel chloride [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, **26**(6): 1130-1138.
- [19] 周世伟, 徐明岗, 马义兵, 等. 外源铜在土壤中的老化研究进展[J]. *土壤*, 2009, **41**(2): 153-159.
- [20] 郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 等. 外源 Cr(III)在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 698-704.
- [21] Lock K, Janssen C R. Influence of aging on copper bioavailability in soils [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(5): 1162-1166.
- [22] Bruus Pedersen M, Van Gestel C A. Toxicity of copper to the collembolan *Folsomia fimetaria* in relation to the age of soil contamination [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, **49**(1): 54-59.
- [23] OECD. Guidelines for testing of chemicals. test 222: earthworm reproduction test[S].
- [24] OECD. OECD series on testing and assessment No. 54. Current Approaches in the Statistical Analysis of Ecotoxicity Data: A Guidance to Application[S].
- [25] Ribeiro S, Sousa J P, Nogueira A J A. Effect of endosulfan and parathion on energy reserves and physiological parameters of the terrestrial isopod *Porcellio dilatatus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, **49**(2): 131-138.
- [26] Maboeta M, Reinecke A, Reinecke S. Effects of low levels of lead on growth and reproduction of the Asian earthworm *Perionyx excavatus* (Oligochaeta) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1999, **44**(3): 236-240.
- [27] Spurgeon D J, Hopkin S P, Jones D T. Effects of cadmium, copper, lead and zinc on growth, reproduction and survival of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny): assessing the environmental impact of point-source metal contamination in terrestrial ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 1994, **84**(2): 123-130.
- [28] 徐明岗, 王宝奇, 周世伟, 等. 外源铜锌在我国典型土壤中的老化特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3213-3218.
- [29] Schreck E, Foucault Y, Geret F, *et al.* Influence of soil ageing on bioavailability and ecotoxicity of lead carried by process waste metallic ultrafine particles [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(10): 1555-1562.
- [30] Tang X Y, Zhu Y G, Cui Y S, *et al.* The effect of ageing on the bioaccessibility and fractionation of cadmium in some typical soils of China [J]. *Environment International*, 2006, **32**(5): 682-689.
- [31] 章海波, 骆永明, 李志博, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究, III 污染土壤的生态风险评估[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(2): 338-349.
- [32] 颜增光, 谷庆宝, 周娟, 等. 构建土壤生态筛选基准的技术关键及方法学概述[J]. *生态毒理学报*, 2008, **3**(5): 417-427.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunoassay for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行