

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

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

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娴 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全克隆及雌雄经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

重金属铬(VI) 的生态毒性及其土壤环境基准

王晓南^{1,2}, 刘征涛^{1*}, 王婉华¹, 张聪³, 陈丽红¹

(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, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中海油环保服务有限公司, 天津 300452)

摘要: 目前我国正在系统的开展水质基准研究, 但是关于土壤环境基准的研究相对比较薄弱. 以保定市农田潮土为研究对象, 进行重金属Cr(VI) 对 8 种土壤植物(小麦、莴苣、黄瓜、玉米、白菜、大豆、韭菜、番茄) 的发芽及根伸长和对 1 种土壤动物(蜗牛) 的生长抑制的慢性生态毒理学试验, 结合搜集的本土生物毒性数据, 基于 log-normal 物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD), 计算Cr(VI) 的 HC₅ (对 5% 物种产生危害的浓度) 值和土壤环境基准值. 结果表明, Cr(VI) 对小麦、莴苣、白菜、玉米、黄瓜、大豆、韭菜、番茄和土壤无脊椎动物蜗牛的生长影响的无观察效应浓度(NOEC) 值分别为 19.0、21.0、28.0、32.0、28.0、32.0、32.0、12.0 和 20.0 mg·kg⁻¹. 通过对相同试验条件下生物毒性数据的比较可知, 番茄对Cr(VI) 污染的敏感性最高, 小麦和莴苣对Cr(VI) 污染的敏感性相似, 而玉米、黄瓜、白菜、大豆和韭菜对Cr(VI) 污染的敏感性相似. 基于 log-normal SSD 的保定市潮土中Cr(VI) 的 HC₅ 值为 7.7 (4.1 < CI < 11.3) mg·kg⁻¹, Cr(VI) 的土壤环境基准值范围为 1.5 ~ 7.7 mg·kg⁻¹.

关键词: 土壤环境基准; 铬(VI); 土壤植物; 土壤动物; 物种敏感性分布

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3155-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.08.045

Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)

WANG Xiao-nan^{1,2}, LIU Zheng-tao¹, WANG Wan-hua¹, ZHANG Cong³, CHEN Li-hong¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. China Offshore Environmental Services Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: Nowadays, systematic studies about water quality criteria are being carried out in China, but studies on soil environmental criteria are comparatively insufficient. In this study, germination and root growth of 8 terrestrial plants (*Triticum aestivum*, *Lactuca sativa*, *Cucumis sativus*, *Zea mays*, *Brassica pekinensis*, *Glycine max*, *Allium tuberosum* and *Solanum lycopersicum*) and growth inhibition of 1 terrestrial animal (*Achatina fulica*) were used to determine the chronic ecotoxicological effects of chromium (VI) using the agricultural moisture soil of Baoding. In addition, with the native toxicity data selected, the HC₅ (hazardous concentration for 5% of species) and the ecological protected soil environmental criteria of chromium(VI) in Baoding moisture soil were calculated using the log-normal species sensitivity distribution (SSD) method. Results showed that the no observed effect concentration (NOEC) values for the growth of the terrestrial plants *T. aestivum*, *L. sativa*, *C. sativus*, *Z. mays*, *B. pekinensis*, *G. max*, *A. tuberosum*, *S. lycopersicum*, and the terrestrial invertebrate snail *A. fulica* were 19.0, 21.0, 28.0, 32.0, 28.0, 32.0, 32.0, 12.0 and 20.0 mg·kg⁻¹, respectively. The comparison of species toxicity data that were tested in the same conditions showed that the terrestrial plant *S. lycopersicum* was the most sensitive species to chromium (VI), *T. aestivum* and *L. sativa* had the same sensitivity to chromium (VI) exposure, whereas, plants *C. sativus*, *Z. mays*, *B. pekinensis*, *G. max* and *A. tuberosum* had the same sensitivity to chromium (VI) exposure. Finally, the HC₅ value of chromium (VI) in the moisture soil of Baoding was calculated to be 7.7 (4.1 < CI < 11.3) mg·kg⁻¹ using the log-normal SSD method, and the ecological protected soil environmental criteria of chromium (VI) was 1.5-7.7 mg·kg⁻¹. With the investigation of this work, we expect that it could provide useful information for the study of soil environmental criteria in China.

Key words: soil environmental criteria; chromium (VI); terrestrial plant; terrestrial animal; species sensitivity distribution

目前,我国正在系统地开展水质基准技术方法的研究^[1~4],并且已经进行了镉^[5]、氨氮^[6]、硝基苯^[7]、三氯生^[8]等污染物水质基准的推导,然而对土壤环境基准的研究相对比较薄弱. 土壤环境基准是指土壤中某一污染物对特定暴露受体不产生不良或有害影响的最大剂量(无作用剂量)或浓度^[9].

土壤环境基准是制定土壤质量标准、土壤质量评价、质量控制的重要依据. 近年来,国内已有部分

收稿日期: 2013-12-24; 修订日期: 2014-03-25

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(2011467054)

作者简介: 王晓南(1986~),男,博士研究生,主要研究方向为生态毒理学与环境基准, E-mail: nan625@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: liuzt@craes.org.cn

学者对土壤环境基准的构建进行了综述^[10,11],但缺乏对土壤环境基准的实地应用和推导的研究.而国外在土壤环境基准值的实地推导方面已有相关报道^[12],可为我国土壤环境基准值的推导提供借鉴.

重金属铬及其化合物是冶金、金属加工、电镀、制革等行业常用的基本原料,生产过程中产生的含铬废水、废渣、废气的排放可导致土壤环境的污染^[13].土壤中重金属铬主要以Cr(Ⅲ)和Cr(VI)形态存在,其中Cr(VI)很少自然形成,主要由人工合成,其对生物具有很强的毒性,毒性比Cr(Ⅲ)强100~1 000倍^[14].

该研究以重金属Cr(VI)为例,选择8种土壤植物[小麦(*Triticum aestivum*)、莴苣(*Lactuca sativa*)、黄瓜(*Cucumis sativus*)、玉米(*Zea mays*)、白菜(*Brassica pekinensis*)、大豆(*Glycine max*)、韭菜(*Allium tuberosum*)、番茄(*Solanum lycopersicum*)]、1种土壤动物[蜗牛(*Achatina fulica*)]进行Cr(VI)暴露的慢性生态毒理学试验,并结合文献搜集的本土物种毒性数据采用物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD),对该研究区域保定市农田土壤中保护土壤植物、无脊椎动物生态安全的重金属Cr(VI)的土壤环境基准值进行推导,以期为我国土壤环境基准的研究工作提供数据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验药品:采用 $K_2Cr_2O_7$ (分析纯, >97.0%)进行Cr(VI)毒性测试,其他试剂均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司.

试验生物:所用种子为中农6号黄瓜、莴苣、中蔬85号白菜、中糯2号玉米、小麦、大豆、韭菜、番茄,均购自中国农业科学研究院种子公司.蜗牛为褐云玛瑙螺,购自北京市昌平区蜗牛繁育农场,选择同一批3~4周龄的蜗牛幼体,试验前将蜗牛放在与试验相同的环境条件下驯养7 d,驯养期间不存在死亡现象.

试验土壤:试验所用土壤采自项目研究区域(河北保定)相对未受污染的农田,采集表层土壤(0~20 cm),土壤类型为潮土,土壤pH为8.1, ω (有机质)为23.1 g·kg⁻¹,阳离子交换量为17.2 cmol·kg⁻¹,沙粒、粉粒和黏粒分别占63.6%、32.5%、3.9%.对土壤中8种重金属的总量进行了测定, ω (As)、 ω (Cd)、 ω (Cr)、 ω (Cu)、 ω (Mn)、 ω (Ni)、 ω (Pb)和 ω (Zn)分别为9.6、0.2、71.4、

18.5、590.9、38.5、16.7和104.0 mg·kg⁻¹.在试验前,土壤经过自然风干,然后过2 mm筛以备使用.

1.2 试验方法

1.2.1 土壤植物的毒性试验

Cr(VI)对植物种子的毒性试验依据OECD 208的标准测试方法进行^[15],称取上述土壤100.0 g,置于12.0 cm直径的玻璃结晶皿中进行试验. ω [Cr(VI)]的莴苣、玉米、大豆、韭菜试验浓度设置为0.0、14.0、21.0、32.0、48.0、72.0和107.0 mg·kg⁻¹;在小麦、黄瓜、白菜、番茄试验浓度设置为0.0、12.0、19.0、28.0、42.0、64.0和95.0 mg·kg⁻¹.每个浓度设4个重复,添加Cr(VI)后的土壤进行了1周的老化,以使污染物在土壤颗粒中充分吸附、平衡,然后每个重复随机放置10粒种子.试验条件为:光暗周期16 h(光照):8 h(黑暗),温度(24.0 ± 1.0)℃,空气相对湿度为(80.0 ± 2.0)%,土壤含水量调至60.0%(为最大持水率).试验周期为空白组种子发芽率达到50.0%的21 d后结束试验.试验结束后测量每一组植物的根伸长和发芽率.

1.2.2 土壤动物的毒性试验

Cr(VI)对蜗牛的生长抑制试验依据ISO 15952的标准测试方法进行^[16],称取上述土壤200.0 g,置于12.0 cm直径结晶皿中进行试验, ω [Cr(VI)]设为0.0、10.0、20.0、40.0、80.0、160.0和320.0 mg·kg⁻¹.每个浓度设3个重复,添加Cr(VI)后的土壤进行1周老化,以使污染物在土壤颗粒中充分吸附、平衡.在每个重复随机放置6只蜗牛,试验开始时蜗牛的平均体质量为(1.0 ± 0.1)g.土壤含水量调至50.0%(最大持水率),在光暗周期为16 h(光照):8 h(黑暗)、温度(20.0 ± 1.0)℃、空气湿度80.0% ± 2.0%的人工气候箱中培养,试验周期为28 d.试验结束后称取每一组中蜗牛的质量.

1.2.3 土壤中Cr(VI)背景值分析

称取2.5 g土壤样品(2012年采样),加入50.0 mL消解剂(20.0 g NaOH和30.0 g Na₂CO₃,去离子水定容到1.0 L),在80.0~95.0℃条件下消解1 h,冷却后加去离子水定容至50.0 mL,离心3 min,取上清液,向上清液中缓慢加入浓硝酸,pH在7.0~8.0时停止,加入去离子水定容至100.0 mL,在540.0 nm波长处测量.

1.3 数据搜集与分析

对土壤中Cr(VI)的物种毒性数据进行搜集和

筛选,数据来源主要包括 US EPA ECOTOX 毒性数据库 (<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>)、ELSEVIER 数据库 (<http://www.sciencedirect.com>) 和 CNKI 数据库 (<http://www.cnki.net>)。物种毒性数据筛选原则:①去除非该研究区域(保定)所存在的物种;②毒性试验在自然土壤中进行,并且对土壤的理化性质进行了分析;③测试终点为慢性 NOEC 或 LOEC 值,优先使用 NOEC 值;④一些有问题或有疑点的数据(如:没有设立对照组、试验生物曾经暴露于污染物、试验设计不科学的数据)均不能采用。

试验数据采用 SPSS 20.0 中单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验各浓度组与空白组间的显著性差异, $P < 0.05$ 为存在统计学的显著性差异。NOEC (no observed effect concentration) 为与空白组相比不存在显著性差异的最高无可观察效应浓度。

土壤环境基准值的推导方法可分为基于分布的 SSD 法和评估因子法 (assessment factor, AF)^[17] 等,其中 SSD 法所得基准值较为可靠,但需要一定的毒性数据量。该研究采用基于 log-normal SSD 的荷兰 RIVM ETX 2.0 软件^[18] 计算 HC_5 值和土壤环境基准值 (HC_5 值除以 1~5 的一个因子,该因子取值取决于行政管理、受试物种数量、数据质量、土壤类型等^[12]), 该软件常被应用于我国环境基准的推导和环境暴露的风险评价^[2,3,7,8]。

2 结果与讨论

2.1 Cr(VI) 对土壤生物的毒性与分析

图 1 和图 2 为 Cr(VI) 对土壤植物小麦、莴苣、白菜、玉米、黄瓜、大豆、韭菜、番茄和土壤动物蜗牛的生态毒理学效应,表 1 中列出了各物种对 Cr(VI) 污染最敏感 NOEC 值,为使文献数据能够适用于该区域,该文以研究区域土壤的性质为标准对文献毒性数据进行了统一化。从中可知,符合 1.3 节数据筛选原则的 Cr(VI) 的植物毒性测试的研究较少,主要为对谷物、蔬菜等经济作物生长影响的研究^[19~21],但由于测试条件差异或描述不祥,本研究未采用文献的植物毒性数据;对土壤动物的毒性研究也较少,主要为对蚯蚓体质量、产茧量、茧孵化的影响^[13]。

重金属 Cr(VI) 对植物的毒性影响常致使其发育不良、根系发育低、叶片卷曲和褪色^[22],叶片萎黄小^[23],严重者可能造成植物的快速萎蔫或死亡^[24]。通过对图 1 中植物根伸长和种子发芽抑制率的比较可知,植物根伸长对 Cr(VI) 的敏感性高于

种子发芽,在高浓度下种子发芽率才会受到显著抑制。由图 1、表 1 可知,该试验中茄科的番茄对 Cr(VI) 的敏感性最高,禾本科的小麦和菊科的莴苣对 Cr(VI) 的敏感性相似,其在相同条件下根伸长的 NOEC 值分别为 $19.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $21.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而禾本科的玉米、葫芦科的黄瓜、十字花科的白菜、豆科的大豆和葱科的韭菜对 Cr(VI) 污染的敏感性相似,根伸长的 NOEC 值分别为 32.0 、 28.0 、 28.0 、 32.0 和 $32.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

陆生无脊椎动物是土壤生态系统的重要组成部分,它们通常与土壤颗粒和孔隙水直接接触;当它们暴露于污染土壤中时,所产生的毒害效应要比其他动物更容易被观测到。因此,国际标准化组织 (ISO) 和国际经合组织 (OECD) 等发布了多种土壤无脊椎动物的污染物毒性测试标准,主要包括蚯蚓、蜗牛、跳虫、线虫等^[25~27]。相关标准为各类土壤污染的生态毒理学测试提供了依据,然而由于土壤动物的培养条件复杂、难以获得、试验周期较长等因素,导致关于土壤动物的毒性试验特别是慢性试验的报道较少,已有的研究主要集中于对蚯蚓(主要为赤子爱胜蚓、安德爱胜蚓)的毒性测试。

该研究采用的褐云玛瑙螺(白玉蜗牛)属玛瑙螺科,目前广泛分布于亚洲、非洲、欧洲和美洲等地区,国内分布较为广泛,已被广泛应用于污染物质的生态毒理学试验^[28~30]。由表 1 和图 2 可知,Cr(VI) 对褐云玛瑙螺生长抑制的 NOEC 值为 $20.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 Cr(VI) 的土壤基准值推导与分析

利用表 2 中的生物毒性数据,采用基于 log-normal 物种敏感性分布的 ETX 2.0 (图 3) 软件,计算保定市潮土中重金属 Cr(VI) 的土壤环境基准值。基于 log-normal 物种敏感性分布法所推导的 HC_5 (即保护 95% 生物不收危害的浓度) 为 $6.5 (2.9 < CI < 10.1) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于不同区域土壤中 Cr(VI) 的背景浓度存在差异,并且会对 Cr(VI) 的土壤生物毒性产生影响,因此具体区域的 HC_5 值的确定也要充分考虑当地土壤中 Cr(VI) 的背景值。经检测,该研究区域的土壤 Cr(VI) 背景值为 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,考虑背景值后的 HC_5 值为 $7.7 (4.1 < CI < 11.3) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。欧盟委员会于 2006 年制定的 REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) 法规^[31] 规定,土壤基准值由 HC_5 值除以因子 (1~5) 得出。而该因子的具体取值由行政管理部门依据管理水平、数据质量等因素进行综合评价后确定。Amorim 等^[12] 在推导三氯生的

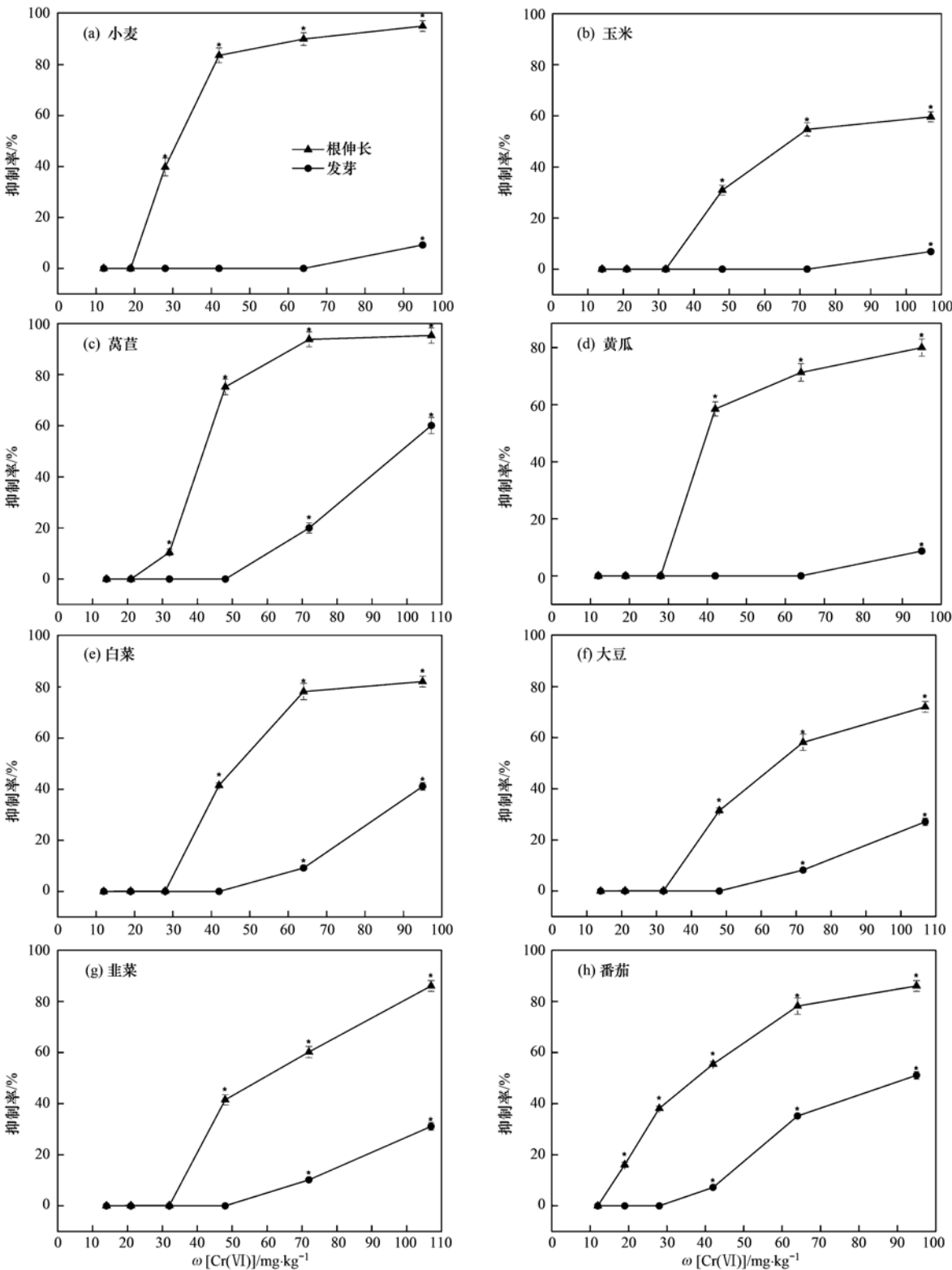


图1 重金属Cr(VI)对小麦、玉米、莴苣、黄瓜、白菜、大豆、韭菜和番茄的生态毒理学效应

Fig. 1 Ecotoxicological effects of the heavy metal Cr(VI) on *Triticum aestivum*, *Zea mays*, *Lactuca sativa*, *Cucumis sativus*, *Brassica pekinensis*, *Glycine max*, *Allium tuberosum* and *Solanum lycopersicum*

土壤环境基准时受条件所限未确定该因子的具体取值,而是提供土壤基准值范围.有鉴于此,该研究根

据HC₅值,计算保定潮土中重金属Cr(VI)的土壤环境基准值范围为1.5~7.7 mg·kg⁻¹.

表 1 重金属Cr(Ⅵ)对土壤生物的生态毒理学效应¹⁾

Table 1 Ecotoxicological effects of the heavy metal Cr(Ⅵ) on terrestrial organisms						
分类	科	物种名称	试验终点	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	P	数据来源
植物	禾本科	小麦 <i>Triticum aestivum</i>	根伸长 NOEC	19.0	<0.05	本研究
		玉米 <i>Zea mays</i>	根伸长 NOEC	32.0	<0.05	本研究
	菊科	莴苣 <i>Lactuca sativa</i>	根伸长 NOEC	21.0	<0.05	本研究
	葫芦科	黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	根伸长 NOEC	28.0	<0.05	本研究
	十字花科	白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	根伸长 NOEC	28.0	<0.05	本研究
	豆科	大豆 <i>Glycine max</i>	根伸长 NOEC	32.0	<0.05	本研究
	葱科	韭菜 <i>Allium tuberosum</i>	根伸长 NOEC	32.0	<0.05	本研究
	茄科	番茄 <i>Solanum lycopersicum</i>	根伸长 NOEC	12.0	<0.05	本研究
动物	正蚓科	赤子爱胜蚓 <i>Eisenia fetida</i>	体重抑制 NOEC	15.2 *	<0.05	[13]
			产茧量 NOEC	7.6 *	<0.05	
			蚓茧孵化 NOEC	3.8 *	<0.05	
	玛瑙螺科	褐云玛瑙螺 <i>Achatina fulica</i>	生长抑制 NOEC	20.0	<0.05	本研究

1) * 为以该研究的土壤性质进行统一化后的毒性数据

表 2 各国家和地区 Cr 的土壤基准值与标准值的比较/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

土壤基准值				标准值	
本项目Cr(Ⅵ) (HC ₅ /AF, AF:1~5)	美国 ^[32]	加拿大 ^[33]	荷兰 ^[34]	中国 ^[35] (二级, pH>7.5)	北京污染场地 ^[36] (用途为公园绿地)
1.5~7.7	数据不足, 未推导	数据不足, 未推导	总铬 100.0	总铬 250.0	Cr(Ⅵ) 30.0

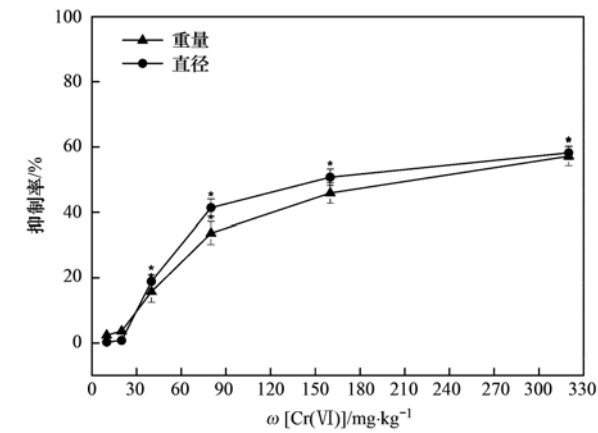


图 2 重金属Cr(Ⅵ)对蜗牛的生态毒理学效应

Fig. 2 Ecotoxicological effects of the heavy metal Cr(Ⅵ) on *Achatina fulica*

该研究所得土壤基准值主要是以农田土壤生物为保护对象,而以保护土壤生物为目的的基准值在不同的国家也被称为土壤生态安全阈值、土壤生态筛选值和土壤目标值等. 鉴于Cr(Ⅵ)的生物毒性数据缺乏,美国、加拿大未计算Cr(Ⅵ)的生态筛选值^[32,33],荷兰只推荐了总铬的目标值为 100.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[34]. 我国 GB 15618-1995 土壤环境质量标准只给出总铬的标准值为 250.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (二级:旱地、菜地, pH > 7.5)^[35],北京市污染场地Cr(Ⅵ)的筛选值为 30.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (用途为公园和绿地

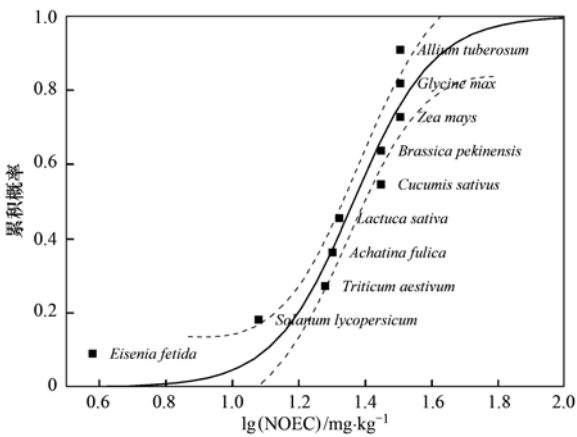


图 3 Cr(Ⅵ)的物种敏感性分布

Fig. 3 Distribution of species sensitivity for Cr(Ⅵ)

时)^[36]. 与其他基准值与标准值相比,该研究所推导的保定潮土中Cr(Ⅵ)基准值(1.5~7.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)远低于荷兰的总铬目标值(100.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和我国总铬的标准值(250.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),这主要是因为该研究以Cr(Ⅵ)为研究对象,而Cr(Ⅵ)对生物的毒性远高于总铬中的Cr(Ⅲ),并且土壤中Cr(Ⅲ)含量也高于Cr(Ⅵ)^[14]. 此外,该研究主要以农田、菜地等较清洁的土壤为研究对象,清洁土壤中生物种类较多且对污染物比较敏感,而污染场地土壤生物种类较少且可能存在污染物的生物耐受现象,所以保定潮土基准值(1.5~7.7

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)也低于北京市污染场地的筛选值($30.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,用途为公园和绿地时)^[36]。

3 结论

(1)Cr(VI)对土壤植物小麦、莴苣、白菜、玉米、黄瓜和土壤无脊椎动物蜗牛的生长影响的NOEC值分别为19.0、21.0、28.0、32.0、28.0、32.0、32.0、12.0和20.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2)在该研究区域土壤中,番茄对Cr(VI)污染的敏感性最高,小麦和莴苣对Cr(VI)污染的敏感性相似,而玉米、黄瓜、白菜、大豆和韭菜对Cr(VI)污染的敏感性相似。

(3)基于log-normal物种敏感性分布的该研究区域土壤中Cr(VI)的 HC_5 值为7.7($4.1 < \text{CI} < 11.3$) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cr(VI)的土壤环境基准值范围为1.5~7.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 孟伟,张远,郑丙辉.水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略[J].环境科学研究,2006,19(3):1-6.
- [2] 刘征涛,王晓南,闫振广,等.“三门六科”水质基准最少毒性数据需求原则[J].环境科学研究,2012,25(12):1364-1369.
- [3] 王晓南,刘征涛,闫振广,等.麦穗鱼物种敏感性评价[J].环境科学,2013,34(6):2329-2334.
- [4] Yan Z G, Yang N Y, Wang X N, *et al.* Preliminary analysis of species sensitivity distribution based on gene expression effect [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(6): 907-913.
- [5] 闫振广,孟伟,刘征涛,等.我国淡水水生生物铜基准研究[J].环境科学学报,2009,29(11):2393-2406.
- [6] 闫振广,孟伟,刘征涛,等.我国淡水生物氨氮基准研究[J].环境科学,2011,32(6):1564-1570.
- [7] 吴丰昌,孟伟,张瑞卿,等.保护淡水水生生物硝基苯水质基准研究[J].环境科学研究,2011,24(1):1-10.
- [8] Wang X N, Liu Z T, Yan Z G, *et al.* Development of aquatic life criteria for triclosan and comparison of the sensitivity between native and non-native species [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 1017-1022.
- [9] 徐猛,颜增光,贺萌萌,等.不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示[J].环境科学,2013,34(5):1667-1678.
- [10] 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.
- [11] 周启星,安婧,何康信.我国土壤环境基准研究与展望[J].农业环境科学学报,2011,30(1):1-6.
- [12] Amorim M J B, Oliveira E, Soares A M V M, *et al.* Predicted No Effect Concentration (PNEC) for triclosan to terrestrial species (invertebrates and plants) [J]. Environment International, 2010, 36(4): 338-343.
- [13] 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.
- [14] Grabarczyk M, Korolczuk M, Tyszczyk K. Extraction and determination of hexavalent chromium in soil samples [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, 386(2): 357-362.
- [15] OECD. Guideline for the testing of chemicals no. 208. Terrestrial plant test; seedling emergence and seedling growth test [S]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2006.
- [16] ISO. 15952 (E). Soil quality-effects of pollutants on juvenile land snails (*Helicidae*)-Determination of the effects on growth by soil contamination [S]. Geneva Switzerland: International Standardization Organisation, 2006.
- [17] European Chemicals Bureau. Technical Guidance Document 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 98/9/EC of the European Parliament and of the Council Concerning the Placing of Biocidal Products on the Market. Part II [R]. EUR 20418 EN/2. Ispra, Italy: European Chemicals Bureau, Institute for Health and Consumer Protection, 2003.
- [18] van Vlaardingen P L A, Traas T P, Wintersen A M, *et al.* ETX 2.0, a program to calculate hazardous concentrations and fraction affected, based on normally distributed toxicity data [R]. Bilthoven, BA: National Institute for Public Health and the Environment, 2004.
- [19] Adema D M M, Henzen L. A comparison of plant toxicities of some industrial chemicals in soil culture and soilless culture[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1989, 18(2): 219-229.
- [20] López-Lunaa J, González-Chávezb M C, Esparza-García F J, *et al.* Toxicity assessment of soil amended with tannery sludge, trivalent chromium and hexavalent chromium, using wheat, oat and sorghum plants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(2-3): 829-834.
- [21] Ali N A, Ater M, Sunahara G I, *et al.* Phytotoxicity and bioaccumulation of copper and chromium using barley (*Hordeum vulgare* L.) in spiked artificial and natural forest soils [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2004, 57(3): 363-374.
- [22] Chapman H D. Diagnostic criteria for plants and soils [M]. Berkeley: University of California, 1973.
- [23] Hunter J G, Vergnano O. Trace-element toxicities in oat plants [J]. Annals of Applied Biology, 1953, 40(4): 761-776.
- [24] 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.
- [25] OECD. Guideline for the testing of chemicals no. 222. Earthworm reproduction test (*Eisenia fetida*/*Eisenia Andrei*) [S]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2004.

- [26] OECD. Guidelines for the testing of chemicals no. 220. Enchytraeid reproduction test [S]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2004.
- [27] ISO. Soil quality-inhibition of reproduction of collembola (*Folsomia candida*) by soil pollutants [S]. Guideline 11267. Genève, Switzerland: ISO-The International Organization for Standardization, 1999.
- [28] Chandran R, Sivakumar A A, Mohandass S, *et al.* Effect of cadmium and zinc on antioxidant enzyme activity in the gastropod, *Achatina fulica* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology, 2005, **140** (3-4): 422-426.
- [29] Rao I G, Singh D K. Toxic effect of single and binary treatments of synthetic and plant-derived molluscicides against *Achatina fulica* [J]. Journal of Applied Toxicology, 2002, **22** (3): 211-215.
- [30] Salway K D, Tattersall G J, Stuart J A. Rapid upregulation of heart antioxidant enzymes during arousal from estivation in the Giant African snail (*Achatina fulica*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology, 2010, **157** (3): 229-236.
- [31] EU Regulation. 1907/2006 of the European, Parliament and the European Council of 18 December, 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Regulation 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 93/793 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/677/EEC, 93/105/EEC and 2000/21/EC [R]. Helsinki: Official Journal of European Union, 2006.
- [32] US EPA. Ecological soil screening levels for chromium [R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2008.
- [33] CCME. A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines [R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of Environment, 2006.
- [34] VROM. Ministerial circular on target and intervention values [R]. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 2000.
- [35] 中华人民共和国环境保护局. GB 15618-1995 土壤环境质量标准 [S]. 北京: 国家环境保护局, 1995.
- [36] 北京市质量技术监督局. DB11-811-2011 场地土壤环境风险评价筛选值 [S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2011.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPC Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《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8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 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