

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f ₂ 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究

王旌¹, 罗启仕^{1*}, 张长波¹, 谈亮², 李旭²

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 华东理工大学中德工学院, 上海 200237)

摘要: 利用不同投加比例的 FeS、FeSO₄、Fe⁰ 和 Na₂S₂O₄, 分别对铬污染土壤进行处理, 通过土壤浸出浓度和六价铬含量的测定, 考察这 4 种还原剂对铬污染土壤的短期 (3 d、28 d) 和长期 (1 a) 稳定作用。结果表明, 将 FeS 和 Fe⁰ 直接用于铬污染土壤的稳定化时, 由于其溶解度很低, 稳定效果不好。而 FeSO₄ 对铬污染土壤的稳定化具有很好的效果, 可以在短期内降低总铬和六价铬的浸出浓度, 减少土壤中的六价铬含量, 且其效果随着投加浓度的增加而提高。在长期稳定过程中, 由于铁的氢氧化物的逐渐形成, 其稳定化效果进一步提高。Na₂S₂O₄ 同样有利于铬污染土壤的稳定化。在适当的投加比例下, FeSO₄ 和 Na₂S₂O₄ 对土壤 pH 值影响很小, 维持在 6~8。

关键词: 铬; 土壤; 还原; 稳定化; 长期效果

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4036-06

Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil

WANG Jing¹, LUO Qi-shi¹, ZHANG Chang-bo¹, TAN Liang², LI Xu²

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Sino-German College of Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Short-term (3 d and 28 d) and long-term (1 a) stabilization effects of Cr contaminated soil were investigated through nature curing, using four amendments including ferrous sulfide, ferrous sulfate, zero-valent iron and sodium dithionite. The results indicated that ferrous sulfide and zero-valent iron were not helpful for the stabilization of Cr(VI) when directly used because of their poor solubility and immobility. Ferrous sulfate could effectively and rapidly decrease total leaching Cr and Cr(VI) content. The stabilization effect was further promoted by the generation of iron hydroxides after long-term curing. Sodium dithionite also had positive effect on soil stabilization. Appropriate addition ratio of the two chemicals could help maintain the soil pH in range of 6-8.

Key words: chromium; soil; reduction; stabilization; long term effect

重金属铬作为一种工业原材料,在其长期的生产和应用中,会对土壤环境造成一定的影响^[1]。土壤中的铬主要以三价和六价的形式存在^[2]。三价铬毒性较低,90%的三价铬以氢氧化物的形式附着于土壤组分中,不易迁移。而六价铬毒性相对较大,且具有较高的活性,更易在土壤及其孔隙水中进行迁移^[3,4]。因此铬污染土壤的稳定化处理关键在于将六价铬还原为三价铬。研究表明,亚铁^[5]、硫化物^[6,7]以及一些有机络合物^[8,9]均可以有效应用于六价铬的处理中。

然而,土壤中各种形态的铬可以在一定条件下相互转化,尤其在氧化条件下(pH 6.5~8.5),三价铬可以部分转化为六价铬^[10]。因此,在铬污染土壤的修复中,六价铬能否稳定于土壤中,且保持不在长期自然条件下析出,需要实际的长期稳定数据进行技术支持,而目前该研究数据还十分缺乏。

本实验利用 FeS、FeSO₄、Fe⁰ 和 Na₂S₂O₄ 这 4 种还原剂分别对铬污染土壤进行处理,研究了在自然养护条件下,各还原剂在不同投加比例下对铬污

染土壤的短期(3 d、28 d)和长期(1 a)稳定效果,以期对铬污染土壤的长期稳定化处理提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试样品和材料

实验所用土壤取自苏州市某化工企业搬迁后的遗留场地,污染土壤风干,研磨,过筛,待用。土壤呈棕黄色,pH 值为 8.4。实验所用的 4 种还原剂均来源于国药集团化学试剂有限公司。其中 FeS 为 CR 级,FeSO₄ 为 AR 级七水合物,Fe⁰ 和 Na₂S₂O₄ 均为 AR 级。

1.2 土壤稳定化实验方法

分别取 1 000 g 土壤于搅拌锅中,以表 1 中所列

收稿日期: 2013-01-15; 修订日期: 2013-04-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109019);上海市科委迪斯尼专项(11dz1201700);上海市徐汇区科委项目(RCT201003)

作者简介: 王旌(1984~),男,硕士,工程师,主要研究方向为污染土壤修复技术,E-mail: wangjingsean@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: qsluo99@126.com

条件分别以固体方式投加各药剂,其中 FeSO_4 为扣除结晶水后的比例. 药剂添加后,加入适量去离子水保持土壤水分含量在 40%,利用搅拌机搅拌 10 min. 混合均匀后,将样品转移至烧杯中进行养护. 养护过程中于烧杯口用塑料膜密封以减少水分的流失,且设置若干细小通风口,以确保养护过程中的空气流通. 如此在室温下养护 3 d、28 d、1 a 后,对土壤进行浸出浓度和六价铬含量的测试.

表 1 土壤稳定化处理药剂投加比例/%

Table 1 Addition ratio of stabilization amendments/%				
还原剂		投加比例		
FeS	3	6	9	12
FeSO_4	3	6	9	12
Fe^0	3	6	9	12
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$	3	6	9	12

1.3 测试分析方法

1.3.1 重金属总量测试

取过 100 目筛的风干土壤 1 g,采用 HNO_3 - HClO_4 -HF 体系消解法^[11]对土壤样品进行消解,用以测定土壤中重金属的总量. 测试包含 3 个平行样,结果以算数平均值表示.

1.3.2 浸出浓度测试

采用美国环保署颁布的 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 方法^[12]测定土壤浸出浓度. 用 $\text{pH} = 2.88$ 的醋酸溶液对土壤样品进行浸提,固液比(质量体积比)为 1:20,在 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下翻转振荡 18~20 h. 采用二苯碳酰二肼分光光度法(GB/T 15555.5-1995)对六价铬浓度进行测试,采用原子吸收仪(耶拿, novAA400)测定浸提液中的其它金属浓度. 实验过程以空白浸提液作为对照,所得测试数据为扣除空白后的结果.

1.3.3 六价铬含量测试

称取 2~4 g 土壤,加入 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液 25~50 mL,磁力搅拌 5 min,离心分离后,上清液转移至 100 mL 容量瓶中,残渣继续用 10~20 mL KCl 溶液搅拌,重复上述操作 2~3 次,上清液均转移至容量瓶中,定容^[13,14]. 采用二苯碳酰二肼分光光度法(GB/T 15555.5-1995)对六价铬浓度进行测试.

2 结果与讨论

2.1 土壤污染性质

该污染土壤中的重金属含量及其浸出浓度如表 2 所示.

表 2 土壤金属含量及浸出浓度

Table 2 Total volume and leaching concentration of metals in the soil			
重金属	总量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	浸出浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	我国危险废物浸出 毒性鉴别标准/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
总铬	6 416.6	216.7	15
六价铬	2 365	128.8	5
镉	7.6	0.08	1
锌	181.37	0.05	100
铅	37.5	ND	5
铜	53.8	0.1	100
镍	52.9	0.03	5

由表 2 可知,该土壤样品中的总铬和六价铬含量均很高,且浸出浓度均超过我国的危险废物浸出鉴别标准(GB 5085.3-2007),锌、铅、铜和镍的污染并不严重,而镉的总量虽然较高,但其浸出浓度较低,为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 因此,在后续的实验分析和讨论中,仅将总铬和六价铬作为关注污染物进行讨论.

2.2 各还原剂对铬污染土壤的稳定效果

图 1 反映了 4 种还原药剂在不同添加比例下对铬污染土壤的稳定效果. 从中可知, FeS 和 Fe^0 直接用于铬污染土壤的稳定化处理时效果很差,这是由于二者在中性偏碱性条件下溶解度很低,难与土壤介质中的六价铬反应. 事实上, FeS 仅在酸性条件下形成 Fe^{2+} 离子. 有研究者将 FeCl_2 和 Na_2S 溶液混合形成的 FeS 悬浮液用于铬污染土壤处理中^[15],该悬浮液在酸性条件下能够起到较好的稳定效果,然而这种工艺在实际应用中会增加实施的复杂性. Fe^0 在含铬污水的处理中应用较多,然而很少用于土壤^[16,17]. 也有研究将纳米铁应用于土壤及地下水的处理中^[18,19].

FeSO_4 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 可以大幅度降低土壤金属浸出浓度以及六价铬含量. 由图 1,当 FeSO_4 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 投加量分别达到 6% 和 3% 时,即可达到显著降低土壤污染程度. 如在养护时间为 3 d 时,土壤总铬和六价铬浸出浓度以及六价铬含量分别为 $49.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $13.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $66.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 除了 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$,其它含氧硫酸盐,包括 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 、 NaHSO_3 、 Na_2SO_3 以及 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 对六价铬均有不同程度的稳定作用^[20],然而含氧硫酸盐大多应用于废水处理中,将其应用于土壤六价铬的处理研究鲜有报道. 事实上,含氧硫酸盐需要在酸性条件下才能发挥其还原效果,而在较大规模的土壤处理应用中,很难进行 pH 值调节,因此本研究考察 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 直接应用于铬污染土壤的稳定化处理效果具有一定的实际意义.

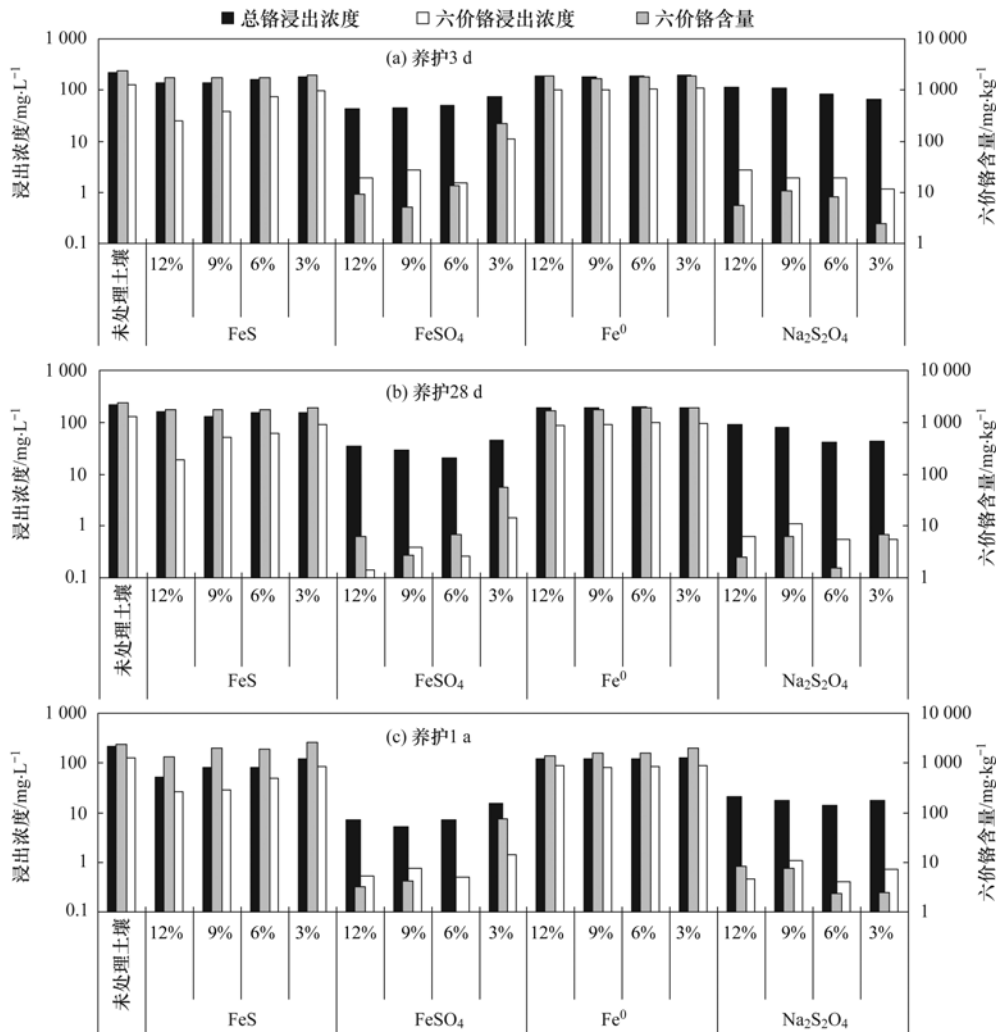


图1 各还原剂对铬污染土壤的稳定效果

Fig. 1 Stabilization effect with different amendments

亚铁可以迅速还原土壤中的六价铬,从而降低其在土壤中的含量以及其浸出浓度^[15],同时,有研究表明土壤中其它含有溶解性 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 离子的矿物可以加速六价铬的还原^[21,22]。

2.3 铬污染土壤长期稳定效果

尽管稳定化技术在国外尤其是美国的污染土壤治理中有着较多的应用,但在我国铬污染以及其它重金属污染土壤的修复中,该技术应用尚不广泛。长期稳定性数据的缺乏可能是导致这种状况的原因之一。在我国,大多数的稳定化效果评估仅限于可行性研究中的数据,比较常见的是 28 d 的稳定数据^[23]。而在长期自然养护条件下的稳定数据尚且不足。图 2~图 4 比较了自然养护条件下,短期和长期稳定化效果。

总体上看,当养护时间达到 1 a 时,对于利用 FeS 和 Fe^0 处理的土壤,总铬的浸出浓度降低,而六

价铬含量及浸出浓度基本没有变化。而利用 FeSO_4 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 处理的土壤,其稳定效果随着时间的增加而提高。经长期稳定处理后,不同比例 FeSO_4 处理后的土壤中,总铬和六价铬浸出浓度分别降低至 $5.2 \sim 15.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,六价铬含量减小至 $0.4 \sim 74.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 不同比例 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 处理后的土壤中,总铬和六价铬浸出浓度分别降低至 $14.3 \sim 20.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.4 \sim 1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,六价铬含量减小至 $2.3 \sim 8.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。值得注意的是,在 FeSO_4 处理后的土壤中,六价铬的含量及浸出浓度在养护 3 d 后即迅速降低,随后降低程度变弱。然而,经长期养护后,总铬的浸出浓度仍然明显减少。这种情况的产生可能是因为在稳定化初期,主要是亚铁还原六价铬,到了稳定化后期,随着亚铁的逐渐氧化,形成了铁的氢氧化物,而研究表明^[24],铁的氢氧化物对铬以及其它金属有着较强的吸附性能。

利用各种还原剂处理后的土壤 pH 值如图 5 所示. 在本研究的投加比例和投加方式下, FeS 和 Fe^0 的对土壤 pH 几乎没有影响. 而亚铁可以通过下式对土壤 pH 产生影响^[25], 且投加量越高, 影响越大.

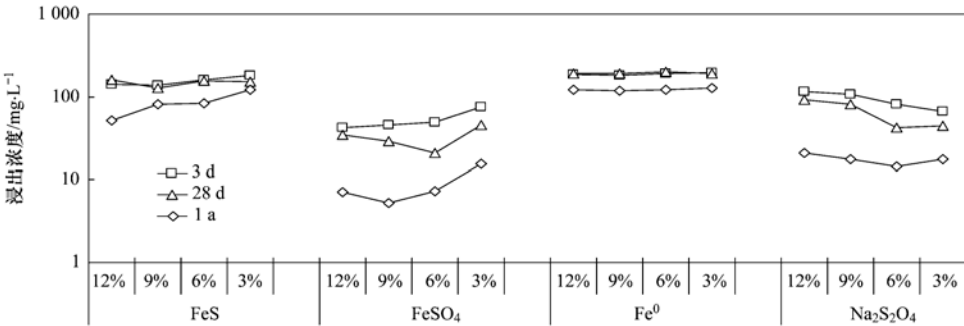


图 2 不同养护时间下土壤中总铬浸出浓度变化

Fig. 2 Total Cr leaching concentration with different curing periods

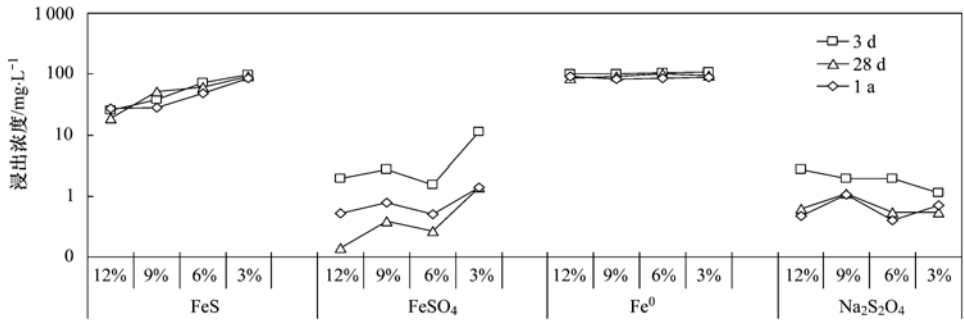


图 3 不同养护时间下土壤中六价铬浸出浓度变化

Fig. 3 Cr(VI) leaching concentration with different curing periods

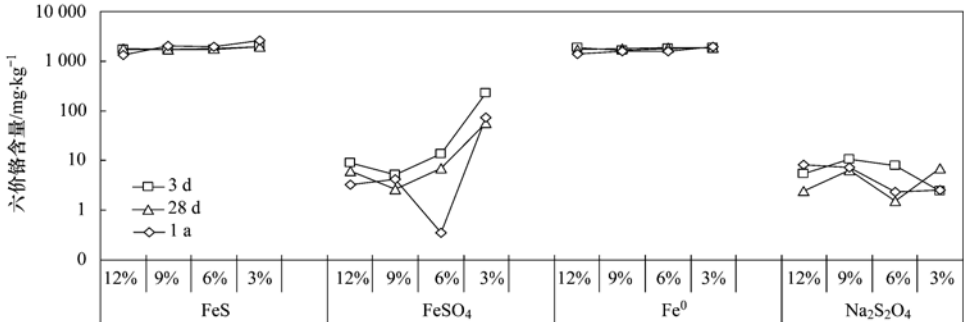


图 4 不同养护时间下土壤中六价铬含量变化

Fig. 4 Cr(VI) content with different curing periods

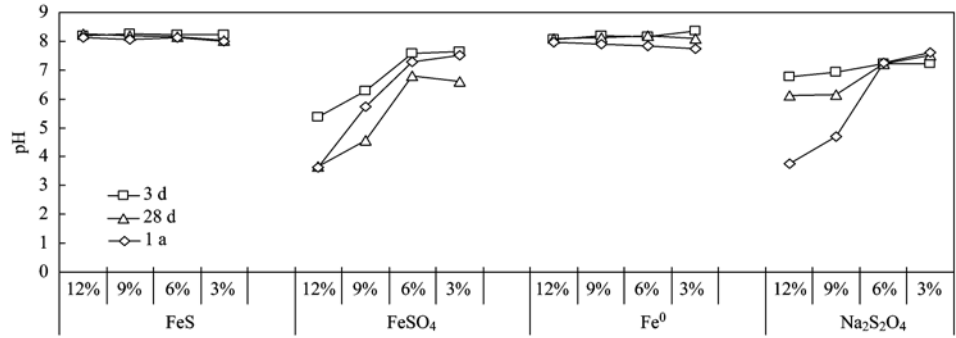
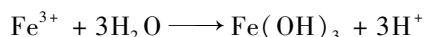
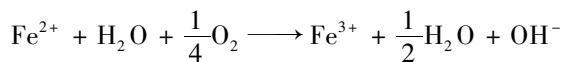


图 5 不同养护时间下土壤中 pH 变化

Fig. 5 The pH of soil with different curing periods



然而,当 FeSO_4 投加量为 6% 时,土壤 pH 的变化并不十分明显,且在这种比例下,当养护时间达到 1a 时,pH 甚至呈弱碱性,为 7.3. 因此,投加 6% FeSO_4 可作为最佳处理方式同时稳定土壤中的铬和保持土壤 pH 值.

事实上,对于铬污染土壤或者其他重金属污染土壤的稳定化效果评估有很多方法,除了本实验中的 TCLP 方法,还有英国环保署的 1 h 浸出测试,ASTM 浸出测试等^[26]. 然而,大多数的方法只是对污染土壤的短期稳定效果进行评估,而无法预测长期稳定效果. 荷兰的柱浸出测试方法可以通过模拟自然条件下金属的性质变化来评估长期稳定效果^[26]. 尽管如此,本研究中通过自然条件下长期养护所得到的稳定效果数据可能会更加具有实际意义,更能够为稳定化技术的实际应用提供基础数据支持.

3 结论

(1) FeS 和 Fe^0 由于其难溶解性,直接应用于铬污染土壤处理中没有明显的稳定效果.

(2) FeSO_4 可以在短期内大幅降低土壤中的浸出浓度和六价铬含量,且随着时间的增加稳定效果逐渐提高. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 也可以对铬污染土壤进行有效的处理,且保持长期的稳定效果.

(3) 投加 6% FeSO_4 可作为最佳处理方式同时稳定土壤中的铬和保持土壤 pH 值.

参考文献:

- [1] Zayed A M, Terry N. Chromium in the environment; factors affecting biological remediation[J]. *Plant and Soil*, 2003, **249** (1): 139-156.
- [2] Kantar C, Cetin Z, Demiray H. *In situ* stabilization of chromium (VI) in polluted soils using organic ligands; the role of galacturonic, glucuronic and alginic acids [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **159**(2-3): 287-293.
- [3] Srivastava S, Prakash S, Srivastava M M. Chromium mobilization and plant availability-the impact of organic complexing ligands [J]. *Plant and Soil*, 1999, **212**(2): 201-206.
- [4] 陈英旭,何增耀,吴建平. 土壤中铬的形态及其转化[J]. *环境科学*, 1994, **15**(3): 53-56.
- [5] Cheng C J, Lin T H, Chen C P, *et al.* The effectiveness of ferrous iron and sodium dithionite for decreasing resin-extractable Cr(VI) in Cr(VI)-spiked alkaline soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(2-3): 510-516.
- [6] Pettine M, Millero F J, Passino R. Reduction of chromium (VI) with hydrogen sulfide in NaCl media [J]. *Marine Chemistry*, 1994, **46**(4): 335-344.
- [7] Chrysoschoou M, Ferreira D R, Johnston C P. Calcium polysulfide treatment of Cr(VI)-contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 650-657.
- [8] Zhong L Y, Yang J W. Reduction of Cr(VI) by malic acid in aqueous Fe-rich soil suspensions [J]. *Chemosphere*, 2012, **86** (10): 973-978.
- [9] Chiu C C, Cheng C J, Lin T H, *et al.* The effectiveness of four organic matter amendments for decreasing resin-extractable Cr(VI) in Cr(VI)-contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 1239-1244.
- [10] 张辉,马东升. 南京某合金厂土壤铬污染研究[J]. *中国环境科学*, 1997, **17**(1): 80-82.
- [11] 孙颖,陈玲,赵建夫,等. 测定城市生活污水中重金属的酸消解方法[J]. *环境污染与防治*, 2004, **26**(3): 170-172.
- [12] U S EPA Method 1311. Toxicity Characterization Leaching Procedure[S].
- [13] 于世繁,张国封,齐艳丽. 铬污染土壤中六价铬的测定[J]. *干旱环境监测*, 1996, **10**(4): 207-208, 241.
- [14] 付融冰,刘芳,马晋,等. 可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 280-285.
- [15] Patterson R R, Fendorf S, Fendorf M. Reduction of hexavalent chromium by amorphous iron sulfide[J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, **31**(7): 2039-2044.
- [16] Astrup T, Stipp S L S, Christensen T H. Immobilization of chromate from coal fly ash leachate using an attenuating barrier containing zero-valent iron [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, **34**(19): 4163-4168.
- [17] Melitas N, Chuffe-Moscoco Q, Farrell J. Kinetics of soluble chromium removal from contaminated water by zero-valent iron media; Corrosion inhibition and passive oxide effects [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, **34**(19): 3948-3953.
- [18] Singh R, Misra V, Singh R R. Removal of Cr(VI) by nanoscale zero-valent iron (nZVI) from soil contaminated with tannery wastes [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(2): 210-214.
- [19] Tanboonchuy V, Grisdanurak N, Liao C H. Background species effect on aqueous arsenic removal by nano zero-valent iron using fractional factorial design [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **205-206**: 40-46.
- [20] 谢腊平,杨玉杰,连庆堂,等. 硫的含氧酸盐处理混合电镀废水中六价铬的研究[J]. *电镀与环保*, 2008, **28**(1): 37-39.
- [21] He Y T, Chen C C, Traina S J. Inhibited Cr(VI) reduction by aqueous Fe(II) under hyperalkaline conditions [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(21): 5535-5539.
- [22] Tzou Y M, Loeppert R H, Wang M K. Fluorescent light induced Cr(VI) reduction by citrate in the presence of TiO_2 and ferric

- ions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, **253**(1-3): 15-22.
- [23] Zhang C B, Luo Q S, Geng C N, *et al.* Stabilization treatment of contaminated soil: a field-scale application in Shanghai, China [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering in China, 2010, **4**(4): 395-404.
- [24] Kantar C. Heterogeneous processes affecting metal ion transport in the presence of organic ligands: reactive transport modeling [J]. Earth-Science Reviews, 2007, **81**(3-4): 175-198.
- [25] Leupin O X, Hug S J. Oxidation and removal of arsenic (Ⅲ) from aerated groundwater by filtration through sand and zero-valent iron[J]. Water Research, 2005, **39**(9): 1729-1740.
- [26] Hartley W, Edward R, Lepp N W. Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated soils as evaluated by short-and long-term leaching tests[J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(3): 495-504.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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