

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

**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

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 ..... 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>中硝酸盐的定量分析 ..... 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O<sub>3</sub>、HONO、HCHO、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对·OH的贡献率研究 ..... 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 ..... 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 ..... 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 ..... 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 ..... 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 ..... 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 ..... 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 ..... 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 ..... 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 ..... 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 ..... 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 ..... 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 ..... 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 ..... 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 ..... 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 ..... 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 ..... 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 ..... 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 ..... 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 ..... 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 ..... 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 ..... 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 ..... 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 ..... 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 ..... 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 ..... 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N<sub>2</sub>O产生量的研究 ..... 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 ..... 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 ..... 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 ..... 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 ..... 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 ..... 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 ..... 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 ..... 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 ..... 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 ..... 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 ..... 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 ..... 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 ..... 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 ..... 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO<sub>2</sub>储存性能研究 ..... 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 ..... 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

**重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文**

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 ..... 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 ..... 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 ..... 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 ..... 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 ..... 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 ..... 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 ..... 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 ..... 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 ..... 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 ..... 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 ..... 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 ..... 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 ..... 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 ..... 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

# 湘中矿区不同用地类型面源 Cd 输出负荷的原位实验研究

刘孝利<sup>1,3</sup>, 曾昭霞<sup>2\*</sup>, 陈喆<sup>1</sup>, 铁柏清<sup>1</sup>, 陈求稳<sup>3</sup>, 叶长城<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 受污染土壤重金属随降雨径流输出已成为河流、湖泊等水体重金属超标的主要来源之一, 近年来日益受到关注. 研究表明湘江中下游农田土壤重金属超标问题日益严峻, 以镉超标最为严重. 研究以湘中矿区 Cd 超标农业小流域为实验场, 选取流域内水稻、旱田、荒草地这 3 类土地利用模式设置径流小区进行自然降雨水文过程的原位观测. 结果表明, 雨水 pH 值由春季到夏季呈升高趋势, 径流水相溶解态 Cd 浓度呈明显的季节性差异, 春季显著高于夏季, 雨水 pH 值可显著影响土壤溶解态 Cd 向径流水相迁移, 与径流水相溶解态 Cd 浓度呈负相关关系. 相同降雨条件下, 稻田径流水相溶解态 Cd 浓度显著低于旱田和荒草地, 旱田与荒草地 Cd 面源输出负荷显著高于水稻田, 由于降雨量差异, 3 类土地利用类型溶解态 Cd 面源输出负荷的季节性规律不明显. 本研究可为流域尺度重金属面源输出负荷定量估算以及湘江流域水环境安全与水质预警提供数据支持和科学依据.

**关键词:** 湘中矿区; 土地利用; 重金属; 自然降雨; 面源负荷

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3557-05

## Non-Point Loads of Soluble Cadmium by *in situ* Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area

LIU Xiao-li<sup>1,3</sup>, ZENG Zhao-xia<sup>2</sup>, CHEN Zhe<sup>1</sup>, TIE Bai-qing<sup>1</sup>, CHEN Qiu-wen<sup>3</sup>, YE Chang-cheng<sup>1</sup>

(1. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Non-point source loads of heavy metals from contaminated soil has increasingly become the major cause of heavy metal concentrations of rivers and lakes surpassed the limitation value, while only few studies had focused on quantitative monitoring of soil heavy metal transportation to water, *in situ* field conditions. As reported, agricultural farmland heavy metal contamination was the major contamination problem, especially for cadmium (Cd) pollution in middle and downstream of Xiangjiang River. This study selected the typical Cd polluted agricultural watershed for a case study, three typical landuse types of rice, dry farmland and unused grassland with three replicate quadrates were carried out for natural rainfall runoff hydrology processes monitoring, from 2011-2012. Results showed that, precipitation pH value increased from spring to summer, soluble Cd concentration of spring runoff was significantly higher than that of summer rainfall runoff, which presented an obviously seasonal heterogeneity and had a negative correlation with rainfall pH value, and rainfall pH value can obviously impact soil soluble Cd transportation into surface runoff charge. In the same rainfall event, soluble Cd concentration and non-point load of rice were significantly lower than those of dry land and unused grassland, while no obviously seasonal trend was found for non-point load of Cd from three typical landuse types because of the rainfall depth variance, which needs more researches and concerns in the future. These results can provide valuable data and scientific supports for watershed scale's heavy metal non-point source load quantitative estimation and water environment management and water quality diagnosis and early warning.

**Key words:** central Hunan Province mining area; landuse; heavy metal; natural rainfall; non-point loads

最近研究显示,我国近  $2 \times 10^7$   $\text{hm}^2$  的农田存在不同程度的重金属超标问题,是当前农业环境污染研究热点之一<sup>[1]</sup>. 土壤重金属容易在水力作用下进入水体,并且在水体中具有相当高的稳定性和难降解性,积累到一定限度就会对水-水生植物-水生动物系统产生危害,进而通过饮水、食物链直接或间接影响人类的自身健康. 目前针对土壤、水体重金

属污染的风险评价及修复技术研究已有很多<sup>[2-4]</sup>,然而要通过重金属污染水体的治理与修复,减少其

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100329,51279196); 湖南农业大学青年基金项目(62020111031); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-001-05)

作者简介: 刘孝利(1979~),男,博士,主要研究方向为水环境及面源污染, E-mail: zzhxll@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: elizeberth@163.com

对环境特别是人类健康的风险,首先必需明确重金属从污染土壤向水体面源输出的通量及规律.曾希柏等<sup>[5]</sup>从农田生态系统角度论述了我国重金属生物地球化学循环与调控研究的现状和不足,并指出今后研究重点之一是土壤重金属向水体迁移原位监测及其迁移规律,强调了重金属在农田生态系统循环中定量研究的重要意义和科学价值.

国内曾率先在白洋淀区开展地表径流中重金属 Pb、Cd 等的化学形态变化研究,并在重金属非点源污染来源、负荷定量化研究方面进行了有益的探索<sup>[6]</sup>.目前有关降雨径流重金属迁移研究大多关注城市用地、城市道路降雨产流中重金属迁移量及其风险评价,城区土壤重金属向地下水迁移及空间分布研究,以及河流、湖泊水体中重金属元素水沙环境中的迁移转化模拟研究<sup>[7]</sup>,或限于室内土柱淋溶、盆栽及其模拟降雨条件下的迁移规律研究<sup>[8]</sup>,尚缺乏重金属面源输出的原位监测、迁移通量研究.

湖南省是我国著名的有色金属之乡,同时也是我国农田土壤重金属超标最为严重的区域,相关研究显示,湘江中下游农田土壤重金属超标问题异常严峻,湘江流域重金属污染已由以前的汞污染转变为镉污染,且重金属面源输出已成为湘江长株潭段水质重金属超标风险的主要来源之一<sup>[9,10]</sup>.因此,

本研究选取湘中矿区典型 Cd 超标农业小流域,选取最具代表性的土地利用类型设置野外原位观测小区,通过原位观测与实验探析溶解态 Cd 向水相迁移规律,以期为大尺度重金属面源污染负荷定量估算以及湘江水环境安全提供科学依据和数据支持.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

研究地点位于湖南省株洲市马家河镇新马村(N27°50'1.3",E113°02'8.4")农业小流域,因附近一小型电镀厂废水的无序排放而导致周围农田受到严重污染(该电镀厂已于2007年关闭,农田已通过政府补偿形式禁止农民自行耕种,但仍有少量稻田被用作农业生产),前期采样分析研究显示该区为镉超标区,属亚热带季风性湿润气候,年均降雨量1300 mm,年均气温17.6℃.

新马村农业小流域部分农田已撂荒变成荒草地,且与水稻田一样具有天然的径流小区特征,为野外原位观测研究提供了便利的“实验场”,研究选取流域内最具代表性的水稻田、旱田、荒草地等3类典型的土地利用类型设置径流监测小区,每处理3重复.各监测小区面积及3种土地利用类型的表层土壤(0~20 cm)基本理化性状见表1.

表1 原位实验不同土地利用监测小区及土壤基本理化性状参数

Table 1 Monitoring quadrates and soil basic chemical and physical properties of field experiment area

参数	土地利用类型		
	水稻田	旱田(大豆)	荒草地
平均坡度/(°)	0	0	0
监测小区面积/m <sup>2</sup>	678, 512, 563	54, 33, 30	75, 61, 54
土壤 pH 值	4.97 ± 0.07	4.65 ± 0.08	5.08 ± 0.15
表层(0~5cm)土壤容重/g·cm <sup>-3</sup>	1.16 ± 0.06	1.14 ± 0.07	1.21 ± 0.10
土壤有机碳/%	3.69 ± 0.30	2.97 ± 0.33	3.58 ± 0.26
有效态氮/mg·kg <sup>-1</sup>	115.7 ± 20.1	96.8 ± 13.0	78.8 ± 33.0
有效态磷/mg·kg <sup>-1</sup>	9.97 ± 1.39	8.12 ± 0.68	5.05 ± 0.93
土壤总 Cd <sup>1)</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	3.91 ± 0.26a	4.13 ± 1.19 a	3.34 ± 0.23 a

1) 同行相同字母表示差异不显著( $P \leq 0.05$ )

表1数据显示,研究所选取的3种土地利用类型设置的实验小区平均坡度均为0,土壤总Cd含量一致,无显著性差异,避免了由于坡度及土壤Cd背景值不同造成的差异和迁移规律影响,以便本研究更加真实科学地揭示不同土地利用类型自然降雨条件下溶解态重金属Cd向水相迁移的真实规律性.

### 1.2 研究方法

研究于2011年7月进行实验小区的布置并开始预监测实验,于2012年3~8月期间监测了4次典型的自然降雨过程,降雨开始后以1h为步长监

测降雨量,并记录各实验小区开始产流时间,开始产流后以1h为步长监测各小区流速,2h为步长采集水样测定溶解态重金属Cd浓度,降雨事件径流水相溶解态Cd平均浓度通过监测时段的流量与实时浓度的加权平均方法计算得出,计算公式如下:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i \times q_i + \dots c_n \times q_n)}{\sum_{i=1}^n (q_i + \dots q_n)} \quad (1)$$

式中,  $\bar{c}$  表示某降雨事件经流水相溶解态 Cd 平均浓度,  $c_i$  表示降雨产流后第  $i$  时段水样溶解态 Cd 浓度,  $q_i$  表示第  $i$  时段流量。

研究采用雨量器获取降雨参数, 同时每监测小区按三角形随机采集 3 个土壤样品混匀后进行土壤基本理化性质分析, 文中图表中显示数据为各处理 3 个重复样本的平均值 (表 1)。实验周期内旱田种植作物为大豆, 荒草地撂荒年数为 4 a。

表 2 监测降雨事件的基本特征

Table 2 Properties of selected rainfall-runoff events

降雨起止时间	雨前干燥天数/d	历时/h	总降雨量/mm
05:10(03-29) ~ 10:50(03-30)	5	29.7	35.9
23:50(05-11) ~ 17:10(05-12)	2	17.3	52.3
17:40(07-15) ~ 20:20(07-16)	14	26.7	88.1
13:20(08-04) ~ 14:50(08-04)	9	1.5	16.4

#### 1.4 分析方法与数据处理

土壤样品采集后自然风干, 按土壤农化常规分析方法测定基本理化性质, 自然降雨雨水与水文过程水样采集后及时过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜, 加 1:1 分析纯硝酸溶液酸化至 pH 为 1~2 并带回实验室内用石墨炉分光光度计法测定。自然降雨雨水样品在无过滤情况下用密封干净的聚乙烯塑料瓶带回实验室及时用精密酸度计 (PHS3C 型, 测量精度  $\pm 0.01$ ) 进行 pH 值的测定。

本研究数据处理与差异分析采用 Excel 2003 和 SPSS (Statistical Product and Service Solutions, 12.0) 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同土地利用自然降雨溶解态 Cd 随径流迁移特征

图 1 给出了 2012 年 3~8 月期间第一次自然降雨事件 (2012 年 3 月 29~30 日) 原位监测结果, 由图 1 可以得出, 3 种土地利用类型产流时间先后分别为稻田 > 旱田 > 荒草地, 其他几次降雨水文响应规律与第一次降雨相同, 且径流开始后径流水相溶解态 Cd 浓度呈逐渐下降趋势, 与梁涛等<sup>[12]</sup> 在太湖流域野外模拟人工暴雨条件下研究结果一致。

通过加权平均估算降雨事件径流水相溶解态 Cd 平均浓度 [式 (1)], 结果如表 3 所示, 自然降雨 pH 值从春季到夏季呈逐渐升高趋势, 3 月 29 日降雨 pH 值仅有 4.1, 而 8 月 4 日雨水 pH 值则为 5.3。吴甫成等<sup>[13]</sup> 与向仁军等<sup>[14]</sup> 对湘中中长株潭地区典型酸雨区的雨水 pH 值变化动态进行了研究, 均得出 1

### 1.3 自然降雨事件选择

依据修订通用的水土流失方程 RUSLE 中指出, 降雨间歇时间在 6 h 以上被视为二次降雨事件, 否则看作一次降雨事件<sup>[11]</sup>。研究选取 2012 年 3~8 月期间的 3 月 29~30 日, 5 月 11~12 日, 7 月 15~16 日, 8 月 4 日的 4 次典型自然降雨事件, 均为同一次降雨, 且降雨前至少 24 h 内无降雨, 4 次降雨事件主要特征见表 2。

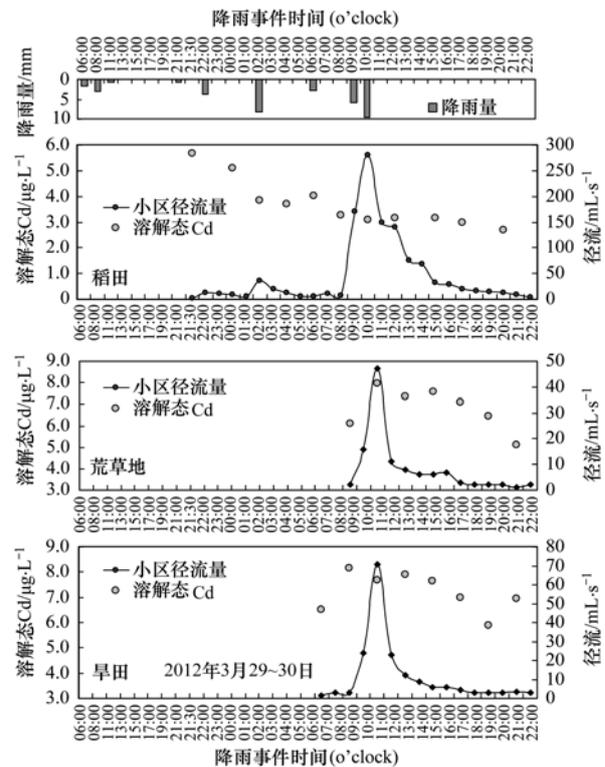


图 1 自然降雨不同土地利用类型产流及溶解态 Cd 浓度特征

Fig. 1 Runoff response and soluble Cd concentration of different landuses under natural rainfall events

a 中酸雨污染最严重的为冬春两季, 夏秋季污染较轻。

从表 3 可以看出, 相同降雨条件下, 旱田和荒草地径流水相溶解态 Cd 浓度显著高于水稻田, 旱田略高于荒草地, 但差异不显著。实验周期内 (3~8 月), 3 种土地利用类型在自然降雨条件下, 径流水相溶解态 Cd 平均浓度均呈现明显下降趋势, 可见

雨水 pH 值可显著影响土壤重金属向水相迁移输出,随着 pH 值升高,径流水相溶解态 Cd 浓度呈明显下降趋势(表 3)。已有研究表明,土壤理化性质

可显著影响土壤重金属的生物有效性和溶解性,其中 pH 值是最显著影响因子<sup>[15~17]</sup>,可显著影响土壤中重金属的生物有效性与可给性<sup>[18]</sup>。

表 3 不同土地利用自然降雨条件下土壤溶解态 Cd 向水相迁移特征<sup>1)</sup>

Table 3 Soluble Cd transportation from soil to water phase under different landuses and natural rainfall events

降雨事件	降雨/mm	雨水 pH	雨水中溶解态 Cd / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	径流水相溶解态 Cd 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		
				稻田	旱田(大豆)	荒草地
3 月 29 ~ 30 日	35.9	4.13	0.242	3.46 ± 0.32aA	7.23 ± 1.03bA	6.92 ± 1.19bA
5 月 11 ~ 12 日	52.3	4.71	0.206	1.39 ± 0.22aB	4.65 ± 0.53bB	4.17 ± 0.49bB
7 月 15 ~ 16 日	88.1	4.90	未检测	0.89 ± 0.18aC	3.32 ± 0.41bC	2.98 ± 0.37bC
8 月 4 日	16.4	5.28	0.208	1.27 ± 0.30BC	—	—

1) 同行相同小写字母表示差异不显著( $P \leq 0.05$ ), 同列相同大写字母差异不显著( $P \leq 0.05$ ); “—”: 表示因未产生径流无监测数据

## 2.2 不同土地利用重金属 Cd 向水体面源输出负荷

为进一步定量估算不同土地覆盖自然降雨地表径流重金属面源输出负荷,地表径流中溶解态重金属 Cd 面源输出负荷可用径流深、径流水相溶解态 Cd 浓度进行估算,进而定量估算自然降雨情况下单位面积,不同土地类型径流水相溶解态 Cd 的面源

污染负荷,计算公式如下:

$$L = R_d \times (\bar{c}_r - c_p) \quad (2)$$

式中, $L$  表示某次降雨事件重金属面源输出负荷( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), $R_d$  表示地表径流深(mm), $\bar{c}_r$  表示地表径流水相中某种重金属平均浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $c_p$  表示降雨雨水中某种重金属平均浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),计算结果见表 4。

表 4 不同土地利用自然降雨条件下 Cd 面源输出负荷<sup>1)</sup>

Table 4 Cadmium non-point loads of different landuses under natural rainfall events

降雨事件	降雨/mm	雨水 pH	雨水中 Cd / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	径流深/mm			面源输出负荷/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$		
				稻田	旱田(大豆)	荒草地	稻田	旱田(大豆)	荒草地
3 月 29 ~ 30 日	35.9	4.13	0.242	23.6	15.8	13.8	81.66a	114.23b	95.50ab
5 月 11 ~ 12 日	52.3	4.71	0.206	39.6	30.4	31.3	55.04a	141.36b	130.52b
7 月 15 ~ 16 日	88.1	4.90	未检测	79.8	63.5	60.9	71.02a	210.82b	181.48b
8 月 4 日	16.4	5.28	0.208	10.8	—	—	13.72	—	—

1) 同行相同字母表示差异不显著( $P \leq 0.05$ ); “—”: 表示因未产生径流无监测数据

曾希柏等<sup>[5]</sup>从农田生态系统角度指出今后土壤重金属污染研究重点之一是土壤重金属向水体迁移原位监测及其迁移规律,目前已有的土柱淋溶、盆栽及其模拟短期降雨研究为了计算方便,把气温、土壤理化参数设为常数,导致研究结果与实际情形往往存在一定偏差<sup>[8, 12, 19, 20]</sup>。本研究通过原位观测实验,根据不同土地利用类型径流深和径流水相溶解态 Cd 平均浓度计算得出自然降雨条件下不同土地利用溶解态重金属 Cd 面源输出负荷[式(1)和(2)],由表 4 可以得出,同样降雨条件下由于水稻田处于淹水期,所以水稻田径流深大于旱田和荒草地,但面源输出负荷低于旱田和荒草地(表 4),8 月 4 日降雨荒草地和旱田均未产生径流。雨水 pH 值从春季到夏季呈下降趋势,径流水相溶解态 Cd 浓度也呈现下降趋势,与 pH 值负相关,呈明显的季节性差异,但因降雨量差异,溶解态 Cd 面源输出负荷季节性变化不明显(表 3、4),杨洋等<sup>[21]</sup>研究发现,低 pH 值可显著增加 Cd 在土水系统间的迁移量,与

本研究结果一致。然而,重金属面源污染负荷的季节性差异对于地表水体水环境管理和水质预警具有重要的意义,因此,这方面尚需开展进一步的研究。

目前国内外有关农业氮、磷营养盐面源负荷研究较多,但针对农业生态系统的重金属面源输出负荷定量研究尚处于起步阶段。已有研究表明,随着金属矿产的累年采冶以及大量工业“三废”长期排放,导致湘江流域,特别是湘江中下游地区的农田土壤重金属污染问题日益凸显<sup>[10, 22]</sup>,陈咏淑等<sup>[23]</sup>研究显示近 20 年来,湘江水体重金属超标问题日益突出,以株洲、湘潭和长沙江段最为严重,且 Cd 超标问题尤其严峻。袁啸等<sup>[24]</sup>对湘江水质进行了 1 a 的监测结果显示,湘江水体存在较大的重金属超标风险,其中 Cd 超标尤为明显。因此,开展湘江流域重金属面源污染负荷定量估算研究对湘江水质安全与水资源管理具有重要的现实意义。综上,研究对在流域尺度上重金属 Cd 迁移通量估算,以及湘江水质安全和水环境管理具有重要的科学参考价值。

### 3 结论

(1) 研究区自然降雨雨水 pH 值由春季到夏季呈升高趋势, 雨水 pH 值与径流水相溶解态 Cd 浓度呈负相关关系, 降雨产流中溶解态 Cd 的浓度呈明显的季节性差异。

(2) 相同降雨条件下, 旱田和荒草地径流水相溶解态 Cd 浓度显著高于水稻田, 旱田略高于荒草地, 但差异不显著。相同降雨条件下, 稻田 Cd 面源输出负荷显著低于其他 2 种土地利用类型。因监测周期较短, Cd 面源输出负荷季节性规律尚不明显。

致谢: 在野外实验观测过程中, 株洲新马村胡铁光师傅给予了大力的协助, 在此表示诚挚的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 顾继光, 周启星, 王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, **11**(2): 143-151.
- [2] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1214-1222.
- [3] Varol M, Şen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. Catena, 2012, **92**: 1-10.
- [4] 敖亮, 单保庆, 张洪, 等. 三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评估[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1176-1181.
- [5] 曾希柏, 苏世鸣, 马世铭, 等. 我国农田生态系统重金属的循环与调控[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(9): 2418-2426.
- [6] 陈喜保, 章申. 模拟降水-地表径流系统中重金属化学形态变化的研究[J]. 中国环境科学, 1992, **12**(5): 349-354.
- [7] Davis B, Birch G. Comparison of heavy metal loads in stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(8): 2541-2545.
- [8] 隋红建, 吴璇, 崔岩山. 土壤重金属迁移模拟研究的现状与展望[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(6): 197-200.
- [9] Zhang Q, Li Z W, Zeng G M, *et al.* Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques in red soil hilly region: a case study of Xiangjiang watershed, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **152**(1-4): 123-131.
- [10] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 260-265.
- [11] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 等. 间歇降雨条件下黄土坡面土壤溶质的迁移特征[J]. 中国农业科学, 2009, **42**(4): 1299-1305.
- [12] 梁涛, 王浩, 张秀梅, 等. 不同土地类型下重金属随暴雨径流迁移过程及速率对比[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(10): 1756-1760.
- [13] 吴甫成, 吴君维, 王晓燕, 等. 湖南酸雨污染特征[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(6): 807-809.
- [14] 向仁军, 柴立元, 张青梅, 等. 中国典型酸雨区大气湿沉降化学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(1): 38-45.
- [15] Vega F A, Covelo E F, Andrade M L. Competitive sorption and desorption of heavy metals in mine soils: influence of mine soil characteristics [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, **298**(2): 582-592.
- [16] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 84-91.
- [17] Zhao K L, Liu X M, Xu J M, *et al.* Heavy metal contaminations in a soil-rice system: identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **181**(1-3): 778-787.
- [18] 崔岩山, 陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 403-408.
- [19] 彭郦成, 黄占斌, 石宇, 等. 不同环境材料对 Pb、Cd 污染土壤的淋溶效应[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 1033-1038.
- [20] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(1): 81-86.
- [21] 杨洋, 铁柏清, 张鹏, 等. 降雨和植被覆盖对土壤重金属流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(1): 39-42, 46.
- [22] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, **63**(1): 3-11.
- [23] 陈咏淑, 吴甫成, 吕焕哲, 等. 近 20 年来湘江水质变化分析[J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(5): 508-512.
- [24] 袁啸, 铁柏清, 陈喆, 等. 长沙水利枢纽工程蓄水前湘江长沙段水质评价[J]. 水资源保护, 2012, **28**(3): 59-63.

## CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources .....	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM <sub>2.5</sub> with Fourier Transform Infrared Spectroscopy .....	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O <sub>3</sub> , HONO, HCHO and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province .....	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System .....	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying .....	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai .....	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay .....	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics .....	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea .....	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions .....	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas .....	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River .....	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source .....	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance .....	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake .....	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water .....	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland .....	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi .....	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase .....	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City .....	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes .....	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg( II ) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent .....	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment .....	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum( III )-magnesium( II )-sulfate .....	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO <sub>3</sub> .....	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization .....	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator .....	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material .....	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N <sub>2</sub> O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge .....	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM .....	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules .....	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia .....	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake .....	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County .....	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance .....	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil .....	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province .....	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types .....	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-wei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i> .....	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13 .....	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge .....	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO <sub>2</sub> over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples .....	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations .....	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals .....	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities .....	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City .....	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station .....	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant .....	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery .....	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site .....	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management .....	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils .....	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory .....	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction .....	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil .....	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd <sup>2+</sup> on Biochar from Aqueous Solution .....	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils .....	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

# 《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9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 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