

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 CO₂ 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 O₃/H₂O₂ 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, 左剑丞, 王雅娇, 于里 (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, 阴方芳, 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, 麦碧娟 (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N₂O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N₂O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CH₄和N₂O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B₁₂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)

多溴联苯醚在市场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基因全长克隆及雌鱼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)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究

陈莉薇^{1,2}, 徐晓春¹, 王军³, 陈芳⁴

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 青海大学化工学院, 西宁 810016; 3. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230061; 4. 安徽省地质调查院, 合肥 230001)

摘要: 以安徽铜陵相思河流域为例, 研究金属矿山开采活动区重金属的分布特征. 在该流域分别采集了采矿废石、土壤、水系沉积物及地表水样品, 测试了其中的 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg 的含量, 实验并计算了采矿废石产生矿山酸性排水的可能性, 采用改进的 Förlsner 5 步逐级提取法分析了采矿废石中 Pb 和 Cr 的赋存形态, 进而总结了各类样品中重金属元素的分布特征, 探讨了矿山开采活动区重金属的生态危害. 研究表明, 铜陵相思河流域上游凤凰山铜矿的采矿废石较少或不产生矿山酸性排水, 而中游新桥硫铁矿的采矿废石会产生矿山酸性排水, 缘于前者富含重金属元素的硫化物矿物含量较低而 CaO 含量较高. 采矿废石中重金属元素含量一般较高, 且其中还原态含量与之呈正相关关系, 表明采矿废石中的重金属元素极易溶解于矿山酸性排水中而迁移至矿山周围环境. 相思河流域土壤、水系沉积物和水体中的重金属分布具有明显的规律性, 上游地区重金属元素含量较低, 没有超过相应的国家污染标准和元素背景值, 而中游地区重金属元素含量均较高, 有明显的重金属污染, 反映中游地区新桥硫铁矿的采矿活动对采矿区周边环境有一定的生态危害, 矿山企业应重视采矿废石的排放及酸性矿山排水的处置.

关键词: 重金属; 分布特征; 采矿废石; 矿山酸性排水 (AMD); 赋存形态

中图分类号: X52; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-2967-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.08.018

Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China

CHEN Li-wei^{1,2}, XU Xiao-chun¹, WANG Jun³, CHEN Fang⁴

(1. School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Chemical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. Anhui Provincial Academy of Environmental Science, Hefei 230061, China; 4. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China)

Abstract: The Xiangsi River valley was selected to study the distribution of heavy metals in mining area. Waste rocks, soils, sediments and waters of Xiangsi River valley were sampled. The concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As and Hg were analyzed. The possibility of generating acid drainage of the waste rocks was studied. Meanwhile, the speciation of Pb and Cr in waste rocks was analyzed by the five-step sequential chemical extract method developed by Förlsner. And then the distribution of heavy metals in various samples was summarized, and the ecological risk of heavy metals in mining area was discussed. The results indicated that the waste rocks of Fenghuangshan copper mine upriver barely generated acid mine drainage (AMD). But the waste rocks of Xinqiao pyrite mine in the middle area generated AMD. The content of sulfide mineral rich of heavy metals was lower and the content of CaO was higher in the waste rocks of Fenghuangshan copper mine, resulting in the different AMD generation ability. The contents of heavy metals in waste rocks were higher, and the deoxidization of Pb and Cr was positively correlated with their concentrations in waste rocks. The results indicated that heavy metals in waste rocks would be most likely dissolved in AMD and then contaminate the environment. There was obvious regularity in the distributions of heavy metals in soils, sediments and waters of Xiangsi river valley. The concentrations of heavy metals upriver were lower than those of corresponding national standards and elements background values. But there was obvious heavy metal contamination in the middle area. It was shown that the mining activities of Xinqiao pyrite mine in the middle area had ecological harm to the surrounding environment. And mining enterprises should pay attention to the emissions of mining wastes and the treatment of AMD.

Key words: heavy metals; distribution; waste rock; acid mine drainage (AMD); speciation

安徽铜陵地区地处长江中下游著名的铁、铜、金、多金属成矿带, 是我国著名的有色金属生产基地. 相思河是一条乡间小溪, 位于铜陵市东南郊, 起源于凤凰山, 最后流入长江. 相思河上游地区有凤凰山铜矿及两座尾矿库, 中游地区是新桥硫铁矿, 设有露天采场和废石堆场. 铜陵市是我国著名的矿业城市, 采矿历史悠久. 矿山开采为社会发展带来巨

大经济效益的同时, 也造成了一系列环境污染问题^[1]. 其中一个最普遍的问题就是重金属污染. 伴随着金属矿山开采活动, 矿石中的重金属元素迁移

收稿日期: 2013-12-30; 修订日期: 2014-03-07

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(090415204)

作者简介: 陈莉薇(1980~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为采矿过程中重金属的环境地球化学特征, E-mail: chenliwei@sina.com

转化到附近的土壤、水体及农作物中,造成潜在的健康危害. 针对金属矿山开采过程中土壤、水体、水系沉积物及植物中重金属污染问题,已经有很多学者做了大量的研究,其中主要包括尾矿库土壤复垦和植物修复^[2~5]、重金属的存在形态和分布特征^[6~14]、迁移转化可能引起的环境问题^[15~21]等. 这些研究大多专注于尾矿库和尾矿砂,而对未经处理的采矿废石缺乏系统研究,也较少有对整个采矿区域土壤、水体、水系沉积物及相关植物的重金属污染进行全面分析. 基于此,在我国著名的矿业型城市铜陵选取采矿活动至今仍非常活跃的相思河流域开展研究,系统调查了该流域土壤和水体中重金属元素的分布特征,有针对性地分析了采矿废石及其所产生的矿山酸性废水中重金属元素含量及赋存状态,研究采矿活动,特别是采矿废石的露天堆积对周边土壤、水系沉积物和地表水的污染现状.

1 样品采集、制备及分析方法

系统采集了相思河流域的采矿废石、土壤、水及水系沉积物样品进行研究. 采样点示意如图 1 所示.

7 个采矿废石样品是在凤凰山铜矿排料场和新桥硫铁矿露天采场废石堆中随机采集的颜色不同的采矿废石. 样品先经铁锤破碎后用玛瑙研钵研磨至过 200 目筛. 粉末样品保存在聚乙烯塑料袋中送至安徽省地质测试中心检测其中重金属元素含量. 按照改进的 Föritsner 5 步逐级提取的方法^[22]对采矿废石样品中 Pb 和 Cr 的赋存形态进行研究,得到的提取液在安徽省地质测试中心进行检测. 重金属元素含量用原子荧光分析仪(AFS, AFS-230E)、石墨炉型原子吸收光谱仪(AAS, AASZEEEnit60)和等离子体全谱直读光谱仪(ICP-OES, Iris advantage)测定.

土壤样品采自相思河流域的山坡、旱地、农田及河滩(图 1 中以 S1 ~ S11 标示,采样地点及土壤特征见表 1). 土壤样品用聚乙烯塑料袋密封,带回实验室后装入干净的布袋,放入 40℃ 的恒温烘箱烘干. 3 d 后取出,用铁锤破碎后用玛瑙研钵研磨至过 200 目筛. 粉末样品保存在聚乙烯塑料袋中送至安徽省地质测试中心进行检测. 重金属元素含量用原子荧光分析仪(AFS, AFS-230E)、X 射线荧光光谱仪(X-Ray FS, ZSX100C)和石墨炉型原子吸收光谱仪(AAS, AASZEEEnit60)测定.

水系沉积物样品取自相思河河道中 4 个不同地点(图 1 中以 Sed1 ~ Sed4 标示,采样地点及样品颜



图 1 相思河流域采样点示意

Fig. 1 Location of samples in Xiangsi River valley

色见表 2). 每个采样点用塑料铲采集大约 2 kg 河流表层水系沉积物,装入聚乙烯塑料袋中带回实验室,先自然风干后除去其中的树枝、小石块等杂质,再装入干净的布袋中放入 40℃ 的恒温烘箱烘干. 3 d 后取出,用玛瑙研钵研磨至过 200 目筛. 粉末样品保存在聚乙烯塑料瓶中送至安徽省地质测试中心进行检测. 测试方法与土壤样品的测试方法相同.

表 1 相思河流域土壤样品采样地点及土壤性质

Table 1 Locations and characteristics of soil samples

样号	土壤性质	采样地点
S1	山坡土	相西村村口山坡
S2	旱地土	相思河畔距新桥上游 2 km 处油菜地
S3	农田土	相西村种植丹皮农田
S4	旱地土	距凤凰山铜矿排料场 100 m 处旱地
S5	农田土	距凤凰山铜矿排料场 500 m 种植丹皮农田
S6	旱地土	新桥镇上游 200 m 旱地
S7	山坡土	相思河畔距新桥镇 1.5 km 山坡
S8	农田土	距新桥硫铁矿废石堆 100 m 处农田
S9	山坡土	圣冲水库坝下山坡
S10	农田土	圣冲水库坝下种植白菜农田
S11	农田土	公路与铁路之间种植油菜农田

10 个水样沿相思河从上游到下游采集(图 1 中以 W1 ~ W10 标示,采样地点及样品性质见表 3). 样品采集于水面下 0.2 ~ 0.5 m,保存在去离子水清洗干净并用采样水润洗过的 500 mL 聚乙烯瓶中. 水样用纯硝酸酸化至 pH < 2,并避光保存于 4℃ 的

环境中送至安徽省地质测试中心进行检测. 重金属元素含量使用电感耦合等离子体全谱直读光谱仪(ICP-OES, Iris advantage)和原子荧光光谱仪(AFS, AFS230E)测定.

表 2 相思河流域水系沉积物样品采样地点及样品颜色

样号	样品颜色	采样地点
Sed1	深灰褐色	新桥硫铁矿上游 2 km
Sed2	灰褐色	新桥露天采矿场附近
Sed3	灰黄色	新桥镇上游 200 m
Sed4	黑黄色	公路铁路之间

采矿废石样品中的 S 元素含量采用非水滴定燃烧法测定, 产酸能力(AP)按 Sobek 等^[23]的计算方法得到, 为最大产酸能力, 由硫含量计算得出, 结果列于表 4. 酸中和潜力(NP)按照 Lawrence 等^[24]提出的改进酸碱计数测试法的步骤进行实验: 称取实验样品 2 g, 记录消耗的 HCl(1.0 mol·L⁻¹)和 NaOH(0.1 mol·L⁻¹)的体积(mL), 并由公式 $NP [kg \cdot t^{-1}] = \{ [HCl (mL) \times HCl (mol \cdot L^{-1}) - NaOH (mL) \times NaOH (mol \cdot L^{-1})] \times 50 \} \div \text{样品质量}(g)$.

表 3 相思河流域水样采样地点及样品性质

样号	样品性质	pH	采样地点
W1	尾矿库内水	5.5	相思谷尾矿库内
W2	尾矿库渗水	6	相思谷尾矿库坝下
W3	井水	6	相思谷
W4	农田水	6	相思河东农田
W5	相思河水	6	新桥硫铁矿上游 2 km
W6	矿坑水	4	新桥硫铁矿
W7	水库水	6	圣冲水库
W8	渗滤液	2	新桥硫铁矿废石堆
W9	选矿废水	4.5 ~ 5.5	新桥硫铁矿
W10	相思河水	6	新桥镇上游 200 m

表 4 尾矿和采矿废石样品改进的酸碱计数法的测试结果及产酸可能性

样号	S/%	AP	HCl /mL	NaOH /mL	NP	产生 AMD 的可能性
R1	0.42	13.12	2.40	23.00	2.50	产生
R2	0.04	1.20	2.40	23.70	0.75	不确定
R3	0.05	1.56	2.40	23.20	2.00	不确定
R4	1.42	44.37	2.00	11.90	20.25	产生
R5	0.62	19.37	4.20	0.60	103.50	不产生
R6	0.33	10.31	2.10	20.40	1.50	产生
R7	3.44	107.5	2.50	23.60	3.50	产生

2 结果与讨论

2.1 采矿废石产生 AMD 的可能性分析

矿山酸性排水(AMD)是 pH < 5, 产生于金属矿山尾矿库、采矿场、采矿废石堆场中含硫矿物的废水^[25]. AMD 不仅可以溶解大量的可溶性 Fe、Mn、Ca、Mg、Al 而且可以溶解很多重金属如 Pb、Cu、Zn、Ni、Co、Cr、As、Hg 和 Cd 等. 如果处置不当, 会造成地下水、土壤和生态环境的污染. 通常情况下, 矿山环境中最主要的硫化物是黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等, 这些金属硫化物矿物在淋滤作用下会产生含有高浓度重金属的酸性矿山排水^[26]. 产酸能力和酸中和潜力是金属硫化物矿山开采安全性评价中的两个重要指标. 当 AP > NP 时, 则可能会产生酸性排水. 由表 4 可以看出随机采集于凤凰山铜矿和新桥硫铁矿的 7 个采矿废石样品中, S 含量的差异很大(0.04% ~ 3.44%), 由此计算的产酸能力差异也较大. 而且, 随机采取的采矿废石样品因为矿物组成不同, 酸中和潜力差异也很大. 其中 1 个样品 NP > AP, 无酸性排水产生; 2 个样品 NP 接近 AP, 其余样品均为 NP < AP, 即产生酸性排水. 结合矿床地质特征, 凤凰山铜矿的赋矿岩石以花岗闪长岩和石灰岩(大理岩)为主, 排料场中多数采矿废石的 CaO 含量较高而中和了硫化物矿物产生的矿山酸性排水, 所以凤凰山铜矿的采矿废石较少或不产生矿山酸性排水; 而新桥硫铁矿的赋矿围岩以砂页岩为主, 碳酸盐岩较少, 大多数样品的 CaO 含量较低, 因此新桥硫铁矿的采矿废石大多可以产生矿山酸性排水.

2.2 采矿废石中的重金属元素及其赋存形态

采矿废石中重金属元素的含量列于表 5. 由表 5 可知, 采矿废石中 Hg 的含量较低, 不会对周边环境产生危害, 但是 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 As 的含量较高, 可能会对环境产生危害. 在表生条件下, 有害元素的赋存形态控制了它对环境的危害程度, 不同赋存形态的元素含量决定了它与生物相互作用以及向其它状态转化的难易程度. 徐晓春等^[1]对采矿废石中含量最高的 Cu 和 Zn 进行了赋存形态的研究, 结果表明 Cu 和 Zn 赋存于还原态和氧化态的含量与这两种重金属元素在废石中的总量虽然不是严格相关, 但总的趋势是废石中含量越高, 它们的还原态和氧化态的含量就相对越高, 故 Cu 和 Zn 容易溶解于 AMD 而从废石中迁移出来对环境产生严重危害. 由表 5 可知, 虽然 Pb 和 Cr 的含量不如 Cu 和 Zn

的含量高,但是其进入环境后对人类和动植物的影响程度较高,故本文对采矿废石样品中 Pb 和 Cr 的赋存形态进行研究。

2.2.1 Pb 的赋存形态

新桥硫铁矿采矿废石样品中 Pb 的赋存形态列

表 5 采矿废石中重金属元素含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 5 Concentrations of heavy metal elements

样号	in waste rocks/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg $\times 10^{-9}$
R1	778.5	429.8	7793.5	12.3	56.9	380.2	84
R2	94.4	541.4	134.4	0.3	132.8	148.0	26
R3	472.3	414.9	63.6	0.2	83.9	237.5	313
R4	368.2	176.3	1420.9	4.3	129.0	168.6	139
R5	93.5	269.5	2266.8	5.6	92.0	124.6	148
R6	972.0	443.0	8339.6	35.9	44.2	190.6	130
R7	76.7	72.1	93.0	0.3	135.8	68.8	187

于表 6。从中可知,采矿废石中的 Pb 主要以硅酸盐态存在,其次为还原态、可氧化态、碳酸盐态。其中,碳酸盐态的 Pb 含量最高的为 R3,达 $29.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 还原态的 Pb 含量最高的为 R1,达 $126.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且在所有采矿废石样品中,R1 中还原态的 Pb 含量所占的质量分数也最高,为 29.3%。R6 中可氧化态的 Pb 含量最高,达 $40.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 R7 中可氧化态的 Pb 所占的质量分数最高,为 13.5%。其中,Pb 的碳酸盐态与可氧化态含量与采矿废石中的总量无明显相关性,但还原态含量与采矿废石中的 Pb 总量呈正相关关系。由于处于还原态与可氧化态的 Pb 在一定的条件下会向可交换态转化,继而向周围环境迁移。因此,新桥硫铁矿采矿废石中的 Pb 是破坏生态环境的有害元素。

表 6 采矿废石中 Pb 的赋存形态/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 6 Speciation of Pb in waste rocks/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

赋存形态	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
可交换态	未检出	未检出	2.6	0.4	未检出	未检出	未检出
碳酸盐态	10.0	1.3	29.3	4.6	1.0	0.8	1.4
还原态	126.0	5.5	29.2	35.5	16.1	99.5	4.8
还原态质量分数/%	29.3	1.0	7.0	20.1	6.0	22.5	6.7
可氧化态	35.4	3.7	23.7	8.2	16.0	40.5	9.7
可氧化态质量分数/%	8.2	0.7	5.7	4.6	5.9	9.1	13.5
硅酸盐态	258.5	531.0	330.2	127.3	236.5	302.3	56.3
总量	429.8	541.4	414.9	176.3	269.5	443.0	72.1

2.2.2 Cr 的赋存形态

采矿废石样品中 Cr 的赋存形态列于表 7。由表 7 可知,采矿废石中 Cr 的含量变化不是很大,R7 中 Cr 含量最大,为 $135.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; R6 中 Cr 含量最小,为 $44.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。所有采矿废石样品中 Cr 的可交换态的含量都低于检测下限,碳酸盐态、可氧化态的含量也较低。采矿废石中的 Cr 以硅酸盐态为主(R5、R7 除外),因此大部分的 Cr 都处于稳定状态。Cr 的还原态含量相对较高,尤其是 R7 中还原

态含量为 $73.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占该采矿废石中 Cr 总量的 54.2%。所有采矿废石样中,R5 的 Cr 还原态含量所占的质量分数最高,为 55.2%。Cr 的还原态含量与采矿废石中 Cr 的总量呈正相关关系,即采矿废石中 Cr 的含量越高,其还原态含量就越高。而且处于还原态的 Cr 在周围条件发生变化,尤其是长期处于地表风化氧化条件下会向可交换态转化,其迁移活性将大大增强,进而成为危害生态环境的重金属元素之一。

表 7 采矿废石中 Cr 的赋存形态/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 7 Speciation of Cr in waste rocks/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

赋存形态	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
可交换态	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
碳酸盐态	0.3	未检出	0.7	2.2	5.7	0.2	0.9
还原态	12.9	48.4	13.9	47.9	50.8	6.5	73.6
还原态质量分数/%	22.7	36.4	16.5	37.1	55.2	14.7	54.2
可氧化态	1.6	9.6	0.4	2.3	1.9	0.8	4.0
硅酸盐态	42.1	74.6	68.9	76.7	33.6	36.7	57.3
总量	56.9	132.8	83.9	129.0	92.0	44.2	135.8

2.3 土壤样品中的重金属元素

相思河流域土壤样品中重金属元素的含量列于表 8。从中可知,土壤样品中重金属元素的含量上游较低、中下游较高,且除了 Hg 和上游的 Cr 含量之外,其余所有样品的重金属元素含量都超过了铜陵地区土壤元素背景值。Hg 和上游 Cr 的浓度低于土壤环境质量标准(GB 15618-1995)中的二级标准。这表明在相应区域内不存在 Hg 和 Cr 污染。样品 S6 中 Cr、Pb、Zn、As、Hg 的浓度和样品 S11 中 Cu、Cd 的浓度在所有样品中最高,这两个采样点位于相思河流域的中下游地区。图 2 为土壤中 Cu、Pb、

Zn、Cd、As、Hg 浓度变化趋势图,从图中可以看出这些重金属元素具有相同的变化趋势。土壤中重金属元素含量上游较低,中游急剧升高,下游开始下降。总体说来,中游的重金属元素浓度都高于土壤环境质量标准(GB 15618-1995)中的二级标准(pH < 6.5),显然是位于中游地区的新桥硫铁矿造成了周边土壤的重金属污染。一方面,新桥硫铁矿在采矿过程中重金属元素通过大气扬尘和沉降进入周围土壤;另一方面,由于新桥硫铁矿产生 AMD,大量的重金属元素会溶解在酸性废水中,随着地表径流进入土壤。

表 8 相思河流域土壤样品中重金属元素含量 $\times 10^{-6}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 8 Concentrations of heavy metal elements in soils of Xiangsi River valley $\times 10^{-6}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

样号	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg $\times 10^{-9}$
S1	35.50	121.80	80.7	25.00	0.20	13.0	38
S2	35.60	258.30	149.6	68.10	0.32	25.4	42
S3	46.20	95.00	243.3	126.80	0.60	29.2	112
S4	58.80	903.40	541.6	146.30	2.00	85.5	93
S5	16.60	120.50	155.2	69.70	0.44	11.6	48
S6	102.00	1 264.60	2 245.5	863.90	25.00	259.8	183
S7	71.55	246.05	332.0	230.25	2.60	33.5	73
S8	74.65	663.10	127.9	111.35	2.45	34.9	86
S9	76.70	34.80	80.6	31.80	0.90	19.3	44
S10	95.40	62.00	351.7	220.40	4.30	34.1	112
S11	59.50	1 543.70	1121.4	374.10	28.95	135.8	156
标准 ¹⁾	150.00	50.00	200.00	250.00	0.30	40.00	0.30
背景值 ²⁾	62.00	32.15	85.50	47.79	0.086	12.44	0.25

1) 标准:土壤环境质量标准(GB 15618-1995) (二级); 2) 背景值:铜陵地区土壤元素背景值^[28]

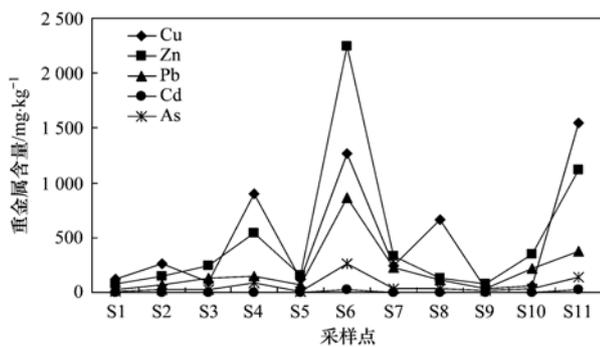


图 2 相思河流域土壤样品重金属元素浓度

Fig. 2 Concentrations of heavy metals in soils of Xiangsi River valley

2.4 水系沉积物样品中的重金属元素

河流沉积物主要是陆地表层岩石风化产生的原生和次生矿物颗粒经水气搬运沉积于河底的产物。因此河流沉积物中元素的含量和特征在一定程度上反映了其流域土壤元素的含量水平和分布特点。研究河流沉积物中元素的含量和地球化学特征,对于了解流域土壤元素地球化学特征具有重要价值。

相思河流域水系沉积物中重金属元素的含量如表 9 所示。由表 9 可知,Cu、Pb、Zn、Cd、As 含量的变化幅度很大,其浓度大多远远高于铜陵地区水系沉积物的元素背景值。相思河流域水系沉积物

表 9 相思河流域水系沉积物中重金属元素含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 9 Concentrations of heavy metal elements in sediments of xiangsi River/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

样号	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg $\times 10^{-9}$
Sed1	30.60	949.80	504.60	67.30	2.15	81.20	84
Sed2	33.00	885.10	582.30	67.00	1.70	75.20	73
Sed3	40.20	1 768.20	1 444.80	222.10	48.90	125.00	110
Sed4	47.10	2 181.80	2 162.50	410.00	79.55	138.40	93
背景值 ¹⁾	69.25	58.80	118.15	56.70	0.050	18.00	0.08

1) 背景值:铜陵地区沉积物元素背景值^[28]

中重金属元素的含量与分布特征与其在土壤中的含量与分布特征呈现出一致的规律。即上游地区(样品 Sed1 和样品 Sed2)重金属元素含量相对较低,中游地区有明显上升,样品 Sed3 和样品 Sed4 中所有的重金属含量均很高。

地表水系中重金属元素的分布和迁移是污染源、河流水文状况、悬浮物(泥沙)运动共同作用的结果。相思河是一条发源于低山的小溪,除春季河水时有暴涨外,常年水流不大,因此,地表污染源是影响水系沉积物中重金属元素含量及其变化的主要原因。一方面,重金属元素通过采矿过程中的大气扬尘和雨水冲刷,采矿区细碎屑沉积物迁移至水系;另一方面,采矿废石因地表风化氧化和雨水淋滤而产生酸性矿山排水,溶解大量重金属随地表径流进入附近水系。它们既可使水系中的水体重金属元素含量升高,亦可能使水系中的沉积物重金属元素含量升高。

2.5 水样中的重金属元素

相思河流域水样中 As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的含量如表 10 所示,而水样的 pH 值见表 3。由表 3 和表 10 可知,中游采矿过程中产生的渗滤液 pH 值很低、偏酸性,其中重金属元素的含量相对较高,而上游及下游河水的 pH 值较高接近中性,重金

属含量较低。相对较低的 pH 值是由采矿废石堆场中含硫矿物的溶解和迁移造成的^[27]。

上游地区水样中重金属元素的含量均低于地表水环境质量标准(GB 38389-2002)(二级)。但是中游地区的采样点 W8 和 W9 的重金属元素含量很高。W8 中重金属元素浓度超过了地表水环境质量标准,As、Cu、Zn、Cd 和 Cr 的最大值分别达到 0.107, 25.08, 29.88, 0.365 和 0.056 mg·kg⁻¹。这显然是由于新桥硫铁矿采矿区产生酸性矿山排水溶解大量重金属元素进入水系所致。这些重金属元素会不断释放到水系中的水体和沉积物中,随着远离采矿区向下游距离的增加重金属元素含量逐渐下降,但其沿途造成污染,日积月累将后患无穷。

上述水样和水系沉积物样重金属元素含量的分析结果表明,相思河中游地区新桥硫铁矿的开采活动和采矿废石堆场对铜陵地表水系产生较大的影响,造成了地表水体的污染。当重金属元素进入水体后,仅有一小部分发生溶解,而绝大部分重金属元素迅速从水相转入固相,即迅速结合到悬浮物或沉积物中。结合到悬浮物中的重金属在水流搬运过程中,当其负荷量超过搬运能力时,便最终进入水系沉积物中。

表 10 相思河流域水样中重金属元素含量/mg·kg⁻¹

Table 10 Concentrations of heavy metal elements in waters of xiangsi River valley/mg·kg⁻¹

样号	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
W1	0.001 2	0.000 011	0.032	UTB ²⁾	0.017	UTB	0.002
W2	0.000 4	0.000 044	0.011	UTB	0.008	UTB	0.002
W3	0.000 7	0.000 006	0.003	UTB	0.004	UTB	0.002
W4	0.001 7	0.000 050	0.017	UTB	0.015	UTB	UTB
W5	0.001 0	0.000 058	0.021	UTB	0.009	UTB	UTB
W6	0.000 7	0.000 012	1.775	0.050	2.84	0.958	0.002
W7	0.000 2	0.000 025	0.038	UTB	0.23	0.006	0.002
W8	0.107 0	0.000 012	25.08	UTB	29.88	0.365	0.056
W9	0.000 5	0.000 012	4.420	0.049	6.28	0.482	0.003
W10	0.000 6	0.000 040	0.374	UTB	0.72	0.083	0.002
标准 ¹⁾	0.1	0.001	1.0	0.1	2.0	0.01	0.1

1) 标准:地表水环境质量标准(GB 38389-2002)(二级); 2) UTB:低于检测限

3 结论

(1) 新桥硫铁矿采矿废石的产酸能力大于中和潜力,产生矿山酸性排水。

(2) 采矿废石中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 和 As 元素的含量较高,Pb 和 Cr 的含量虽然不是最高,但是其处于还原态和可氧化态的量较多,在氧化条件尤其是 AMD 的作用下其迁移活动性与生理毒性都将

增大,从而危害新桥采矿废石场周围的生态环境。

(3) 相思河流域上游土壤、水系沉积物和水体中的重金属元素含量均没有超过相应的国家二级污染标准,说明上游地区的矿山开采活动和尾矿处置较为合理,没有造成重金属污染。但是位于中游地区的新桥硫铁矿采矿废石露天堆积造成了周边土壤和水体的重金属污染。相对于尾矿库来说,采矿废石处置不当造成的环境污染问题更应引起关注。

参考文献:

- [1] 徐晓春, 陈芳, 王军, 等. 铜陵矿山酸性排水及固体废弃物中的重金属元素[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, **24**(6): 591-597.
- [2] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- [3] 邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 796-804.
- [4] 董霁红, 卞正富, 于敏, 等. 矿区充填复垦土壤重金属分布特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, **39**(3): 335-341.
- [5] 赵中秋, 周增科, 梁登, 等. 金属矿复垦中的污染防治与生态复垦设计探讨——以广东云安县高枞铅锌矿为例[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(S2): 114-118.
- [6] Yuan H Z, Shen J, Liu E F, *et al.* Assessment of nutrients and heavy metals enrichment in surface sediments from Taihu Lake, a eutrophic shallow lake in China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, **33**(1): 67-81.
- [7] Woo N C, Choi M J. Arsenic and metal contamination of water resources from mining wastes in Korea [J]. Environmental Geology, 2001, **40**(3): 305-311.
- [8] Mohammad A H, Lutfar P, Islam M A. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **173**(1-3): 384-392.
- [9] Kraus U, Wiegand J. Long-term effects of the Aznalcóllar mine spill-heavy metal content and mobility in soils and sediments of the Guadiamar river valley (SW Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2006, **367**(2-3): 855-871.
- [10] Lei L Q, Song C A, Xie X L, *et al.* Acid mine drainage and heavy metal contamination in groundwater of metal sulfide mine at arid territory (BS mine, Western Australia) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, **20**(8): 1488-1493.
- [11] 张鑫, 周涛发, 袁峰, 等. 铜陵矿区水系沉积物中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境化学, 2005, **24**(1): 106-107.
- [12] 林春野, 何孟常, 李艳霞, 等. 松花江沉积物重金属元素含量、污染及地球化学特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2123-2130.
- [13] Cui Y S, Du X. Soil heavy-metal speciation and wheat phytotoxicity in the vicinity of an abandoned lead-zinc mine in Shangyu City, eastern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62**(2): 257-264.
- [14] Bogush A A, Lazareva E V. Behavior of heavy metals in sulfide mine tailings and bottom sediment (Salair, Kemerovo region, Russia) [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **64**(5): 1293-1302.
- [15] 周元祥, 岳书仓, 周涛发. 安徽铜陵杨山冲尾矿库尾砂重金属元素的迁移规律[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 497-503.
- [16] 初娜, 赵元艺, 张光弟, 等. 江西省德兴铜矿矿区重金属元素的环境效应[J]. 地质学报, 2008, **82**(4): 562-576.
- [17] Espinosa E, Armienta M A, Cruz O, *et al.* Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapán, a historical polymetallic mining zone of México [J]. Environmental Geology, 2009, **58**(7): 1467-1477.
- [18] 李玲, 张国平, 刘虹, 等. 广西大厂多金属矿区河流中 Sb 和 As 的迁移及环境影响[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(6): 682-687.
- [19] 马少健, 李辉, 莫伟, 等. 钼矿尾矿铜铅重金属离子溶出规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, **38**(6): 829-834.
- [20] 秦燕, 徐晓春, 谢巧勤, 等. 铜矿采矿废石重金属环境污染的淋溶实验研究——以安徽铜陵凤凰山矿田药园山铜矿床为例[J]. 地球学报, 2008, **29**(2): 247-252.
- [21] 王兰, 刘方, 王俭, 等. 铅锌矿渣酸性淋溶下重金属释放特征及其对植物幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(6): 1121-1126.
- [22] 赵锋华, 任德貽, 尹金双, 等. 煤中 As 赋存状态的逐级化学提取研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(2): 79-81.
- [23] Sobek A A, Schuller F W J, Smith R. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils [R]. West Virginia; Morgantown College of Agriculture and Forestry, West Virginia University, 1978. 47-50.
- [24] Lawrence R W, Wang Y. Determination of neutralization potential for acid rock drainage prediction [R]. Ottawa: Canadian Centre for Mineral and Energy Technology, 1997.
- [25] Xu X C, Lu S M, Chen F, *et al.* Acid mine drainage and heavy metal pollution from solid waste in the Tongling Mines, China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2008, **82**(1): 146-153.
- [26] Aykol A, Budakoglu M, Kumral M, *et al.* Heavy metal pollution and acid drainage from the abandoned Balya Pb-Zn sulfide mine, NW Anatolia, Turkey [J]. Environmental Geology, 2003, **45**(2): 198-208.
- [27] Jung M C. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea [J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**(11-12): 1369-1375.
- [28] 祁轶宏. 基于 GIS 的铜陵地区土壤重金属元素的空间分布及污染评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006. 49-50.

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 JIAN, <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/Zelite 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 SPG 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-yan (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-ni, 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