

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮	(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健	(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋	(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红	(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军	(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅	(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲	(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵	(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静	(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰	(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅	(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰	(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林	(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷	(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠	(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军	(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻	(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌	(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永	(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴	(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋	(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成	(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青	(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏	(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国	(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红	(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋	(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰	(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅	(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙	(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣	(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪	(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松	(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌	(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州	(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军	(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静	(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟	(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强	(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才	(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红	(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红	(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛	(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩	(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英	(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵	(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰	(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军	(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野	(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰	(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙	(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷	(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥	(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁	(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)	信息(1490,1496,1586,1743)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性

杨胜香¹, 袁志忠¹, 李朝阳¹, 龙华¹, 唐文杰²

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 吉首 416000; 2. 桂林矿产地质研究院, 桂林 541004)

摘要:以花垣矿区 4 个锰矿点、5 个铅锌矿点为现场,对湘西花垣矿区的土壤重金属总量及有效态含量进行了测定,采用污染指数法对矿区土壤重金属污染状况进行了评价,在此基础上,结合主成分分析和线性回归分析等统计学方法,探讨了该矿区重金属污染的主要因子,重金属有效态含量与其对应总量的关系。结果表明:①两矿区土壤 Mn、Pb、Cd 含量较高,分别为湖南省土壤背景值的 8.7、21.5 和 2.9 倍,且大多数土样 Pb、Cd 含量超过国家土壤环境质量三级标准,对矿区土壤造成污染。②重金属污染评价结果显示,目前两矿区土壤受到轻度的 Pb 污染,中-重度 Cd 污染。综合污染指数显示锰矿区为轻-中度污染;铅锌矿区为中-重度污染。③两矿区土壤中 Pb、Cd 有效态含量相对较高,占总量的比例 > 10%,且 DTPA 提取态 Mn、Pb、Zn、Cd 含量与其总量呈极显著正相关($P < 0.01$)。主成分分析结果显示, Mn、Pb、Zn、Cd 和 DTPA-Mn、DTPA-Pb、DTPA-Zn、DTPA-Cd 是导致花垣两矿区重金属污染的主要因子。因此,应采取一定措施对矿区土壤重金属污染进行治理。

关键词:重金属污染; 生物有效性; 锰矿; 铅锌矿; 湘西

中图分类号: X131.3; X820.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1718-07

Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi

YANG Sheng-xiang¹, YUAN Zhi-zhong¹, LI Zhao-yang¹, LONG Hua¹, TANG Wen-jie²

(1. College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China; 2. Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: An extensive sampling was conducted from 4 Manganese mine sites and 5 Lead/Zinc mine sites in Huayuan, Xiangxi. The total and diethylenetriaminepentaacetic (DTPA)-extractable heavy metal (Mn, Pb, Zn, Cu and Cd) concentrations were determined and the heavy metal contamination of mine soils was assessed with pollution index. A principal component analysis (PCA) was performed to identify the key parameters and a simple linear regression was employed to evaluate the relationships between the total and DTPA-extractable heavy metals. The results showed the following: ① The mine soils were characterized by elevated levels of Mn, Pb and Cd in terms of Hunan soil background concentrations, being 8.7, 21.5 and 2.9 times of their local soil background values, respectively. According to China Environmental Quality Standard for Soils (GB 15618-1995), most Pb and Cd exceeded the threshold values of Class III. ② Pollution index showed the mine soil was slightly polluted by Pb and moderately to severely polluted by Cd. Comprehensive pollution index indicated slight to moderate pollution for Manganese mine and moderate to severe pollution for Lead/Zinc mine, respectively. ③ The DTPA-extractable Pb and Cd concentrations were relatively high in Manganese and Lead/zinc mine soils and their fractions in comparison to the total metal concentrations exceeded 10%. A significant positive correlation was observed between DTPA-extractable and total concentrations of soil Mn, Pb, Zn and Cd ($P < 0.01$). The principal component analysis showed the total and DTPA-extractable Mn, Pb, Zn and Cd were the key factors resulting heavy metal contamination of mine soils. Therefore, various protective measures should be taken to avoid heavy metal contamination.

Key words: heavy metal contamination; bioavailability; Manganese mine; Lead/Zinc mine; Xiangxi

湖南湘西自治州矿产资源丰富,已发现矿产 63 种,500 多处矿产地,有 18 个矿种已探明储量^[1]。目前已开发的金属矿藏资源主要有锰(Mn)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、铜(Cu)和汞(Hg),铅锌矿和锰矿分别排名为全省第一和全国第二^[2],湘西州最具资源潜力的锰矿带和铅锌矿带位于花垣县境内。自 80 年代以来,采矿业成为花垣县乃至湘西州的支柱产业,为当地带来了前所未有的经济繁荣。然而长期以来以民采为主,技术落后,缺乏约束和监督机制。经过近 30 年重利润轻保护的掠夺式开采,原有的地质地貌和自然景观遭受严重破坏,各类废石废渣堆置、

尾矿坝不稳定、水土流失、泥土滑坡、地面塌陷等问题十分突出^[3,4]。采矿已严重破坏了矿区的生态环境,并给当地带来了严重的重金属污染问题,在很大程度上制约了自治州整体经济的可持续发展,也影响了当地人民身体健康和生活质量。

矿区重金属污染治理及生态修复已成为湘西自

收稿日期: 2011-08-06; 修订日期: 2011-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101532); 湖南省科技计划项目(2011SK314); 湖南省教育厅科研项目(11JC1041); 湖南省重点学科建设项目; 湖南湘西自治州科技计划项目; 吉首大学引进人才科研启动基金项目

作者简介: 杨胜香(1972 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为矿山污染治理及生态恢复, E-mail: yangsx1998@163.com

治州生态环境保护所面临的紧迫任务. 土壤重金属污染诊断是重金属污染防治与修复的前提和重要环节^[5]. 目前有关本区重金属污染的研究仅限于汞矿区的 Hg、Pb 污染及其复合污染^[6~8]. 对花垣矿区土壤重金属污染现状的研究尚鲜见报道. 本研究以湖南湘西自治州花垣县锰矿、铅锌矿区为现场,对锰矿带的 4 个锰矿点、铅锌矿带的 5 个铅锌矿点重金属总量及有效态含量进行了测定,采用污染指数法对矿区土壤重金属污染状况进行评估,借助主成分分析法分析矿区重金属污染的主要因子,探讨重金属总量与有效态含量的相互关系,旨在揭示采矿活动对矿区土壤重金属污染的影响,为今后矿区重金属污染治理及生态修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

花垣县(东经 109°11′~110°55′,北纬 27°44′~29°47′)地处湘、渝、黔边陲,位于湘西土家族苗族自治州中部、总面积1 100多平方公里. 境内矿产资源丰富,已探明矿产 20 余种,其中锰矿、铅锌矿储量分别居全国第二位和第三位,有“东方锰都”、“有色金

属之乡”的美称^[9]. 地势由东南向西北倾斜,形成高山台地、丘陵地带,最高海拔1 248 m,最低海拔 212 m. 属中亚热带季风湿润气候,年均气温 16.7℃,年均降水量1 421 mm,无霜期 270 d.

1.2 样品采集及处理

2010 年 10 月对花垣县锰矿带的 4 个锰矿点(排吾乡、猫儿乡、民乐镇和两河乡)、铅锌矿带的 5 个铅锌矿点(茶洞镇、团结镇、龙潭镇、猫儿乡和民乐镇)进行了现场调查和土样采集(图 1). 根据各矿点的面积和地形特点,分别采用梅花布点法、S 形路线法或带状布点法,共采集锰矿区土样 50 个,铅锌矿区 58 个,每个土样由 5~6 个子样混合而成,采集深度 0~30 cm,采集量为 500 g,样品采集后立即装入洁净的聚乙烯封口袋,运回实验室. 在实验室,将采集的土壤样品去除碎石和植物残体,风干,用木锤捣碎,四分法弃取,保留 500 g 左右的样品. 将样品分为两部分,一部分过 2 mm 尼龙筛;另一部分用研钵研磨成粉末,过 100 目尼龙筛,装袋备测.

1.3 土壤重金属含量及 pH 值测定

土壤重金属总量采用混合酸消解法,称取过

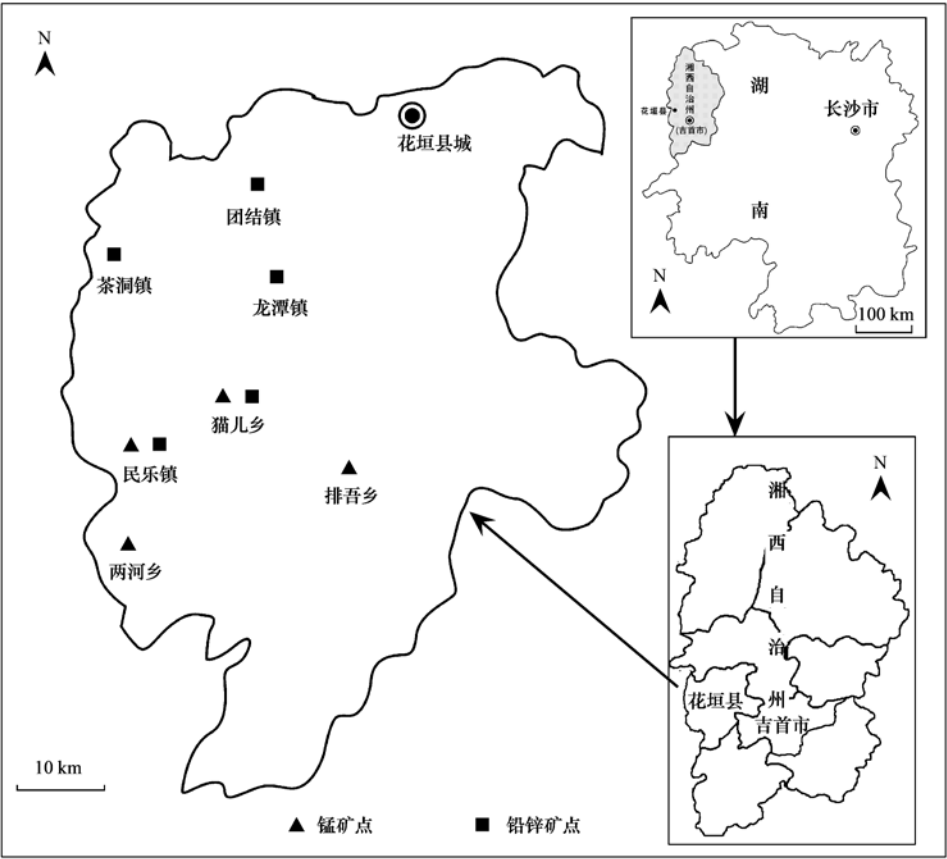


图 1 采样区地理位置示意
Fig. 1 Geographic location of sampling sites

100 目尼龙筛的土样0.500 0 g,加入 10 mL 的混合酸($\text{HNO}_3\text{:HCl:HF}=5\text{:}3\text{:}2$)于微波消解系统(WX-2010,上海,屹尧)加热消解.土壤有效态含量采用 DTPA 浸提法^[10],称取过 2 mm 尼龙筛的土样 10.00 g,加入 20 mL DTPA 浸提液($0.005\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ DTPA + $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 + $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TEA, $\text{pH}=7.3$),于 25°C 振荡器 $180\text{次}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 2 h,过滤.消解液和浸提液中的重金属元素(Mn、Pb、Zn、Cu、Cd)含量采用 iCAP6300 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定.质量保证采用双平行样和加标回收法,各元素的加标回收率在 $92.5\%\sim 106.4\%$,符合元素分析质量控制标准.土壤 pH 值测定采用国标法,称取过 2 mm 尼龙筛的土样 4.00 g,按照水土比 $2.5\text{:}1(\text{V:W})$,加入 10 mL 的纯水.用 pH 计(PHS-3C 型)测定.

1.4 重金属污染评价

矿区土壤重金属污染评价采用单因子污染指数法和综合污染指数法进行评价.

单因子污染指数法:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 为重金属单因子污染指数; C_i 为重金属的实测值; S_i 为重金属*i*的评价标准.

综合污染指数法:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}}$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为重金属综合污染指数; P_{ave} 为单因子污染指数的平均值; P_{max} 为单因子污染指数中的最大值.污染等级划分标准见表 1.

表 1 重金属污染指数分级标准

Table 1 Classification of pollution indices of heavy metals				
级别	单因子污染指数	污染等级	综合污染指数	污染等级
1	$P_i < 1$	清洁	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全
2	$1 \leq P_i < 2$	轻污染	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级
3	$2 \leq P_i < 3$	中污染	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻污染
4	$P_i \leq 3$	重污染	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中污染
5			$3 < P_{\text{综}}$	重污染

1.5 数据分析

数据分析采用 Excel 2003 和 SPSS 15.0 进行.利用主成分分析法(principal component analysis)分析矿区重金属污染的关键因子;利用线性回归分析法(liner regression)分析重金属有效态含量与其对应总量间的关系,显著性水平为 0.05,极显著性水平为 0.01.

2 结果与分析

2.1 花垣矿区土壤重金属含量

花垣锰矿、铅锌矿区土壤 pH 值、重金属总量范围及均值见表 2. 锰矿区 pH 值范围为 $4.41\sim 7.01$,

表 2 花垣锰矿、铅锌矿区土壤 pH 值、重金属总量范围及平均值¹⁾

Table 2 The pH and the ranges and means of heavy metal concentrations in Manganese and Lead/Zinc mine, Huayuan

矿区	采样点	样品数	pH 值	Mn / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
锰矿	两河乡	12	4.91~7.01 (5.53)	1 191~6 250 (3 162)	296~850 (507)	229~393 (307)	49.7~161 (97.5)	0.28~4.88 (2.68)
	民乐镇	15	4.56~6.71 (5.20)	2 052~9 148 (6 181)	208~913 (530)	278~736 (444)	51.1~171 (101)	0.30~5.01 (2.70)
	猫儿乡	13	4.41~6.90 (5.29)	2 042~9 476 (5 720)	208~982 (566)	229~859 (500)	57.1~351 (125)	0.61~4.98 (2.21)
	排吾乡	10	4.99~6.93 (5.51)	2491~7 150 (4 127)	240~779 (415)	248~324 (291)	60.7~135 (102)	0.34~3.69 (1.90)
	均值	50	4.41~7.01 (5.36)	1 191~9 476 (4 925)	208~982 (511)	229~859 (395)	51.1~351 (106)	0.28~5.01 (2.41)
	茶洞镇	10	5.48~7.20 (6.42)	1 075~3 720 (2 126)	396~1 178 (747)	223~1165 (631)	74.9~184 (124)	0.50~8.93 (3.56)
铅锌矿	团结镇	12	6.04~7.49 (6.99)	708~5 646 (2 733)	220~1 499 (853)	240~1 139 (666)	53.8~179 (117)	1.20~9.00 (4.01)
	龙潭镇	13	6.20~7.66 (7.09)	960~5 614 (2 821)	217~1 373 (758)	240~1281 (720)	43.8~174 (113)	1.24~9.03 (3.83)
	猫儿乡	12	4.95~7.68 (6.35)	1 191~6 250 (3 530)	296~1 320 (717)	229~1235 (654)	39.8~153 (99)	0.30~6.16 (2.60)
	民乐镇	11	4.89~7.06 (5.56)	1 758~8 325 (4 288)	350~1 365 (761)	259~1 170 (498)	51.1~161 (95.5)	0.85~4.88 (2.89)
	均值	58	4.89~7.66 (6.51)	708~8 325 (3 108)	217~1 499 (768)	223~1281 (638)	43.8~184 (109)	0.30~9.00 (3.39)
	湖南省背景值 ^[13]			459	29.7	94.9	27.3	0.126
国家土壤环境质量三级标准 ^[11]				—	500	500	400	1.0

1) 括号外为范围,括号内为平均值

铅锌矿区为 4.89 ~ 7.66,均以弱酸性为主.4 个锰矿点、5 个铅锌矿点土壤 5 种重金属元素 (Mn、Pb、Zn、Cu、Cd) 的含量均远远高于湖南省土壤背景值,分别为背景值的 10.7 ~ 6.8、17.2 ~ 25.8、4.2 ~ 6.7、3.9 ~ 4.0、19.1 ~ 26.9 倍,其中 Mn、Pb、Cd 超标倍数较大.从两矿区比较来看,锰矿区土壤除 Mn 含量超过铅锌矿区外,Pb、Zn 和 Cd 含量均低于铅锌矿区,两矿区 Cu 元素含量基本持平.根据国家土壤环境质量标准^[11]三级标准(为保障农林生产和植物正常生长的土壤临界值),除排吾乡锰矿点外,其它 3 个锰矿点、5 个铅锌矿点 Pb 含量均超过三级标准;4 个锰矿点 Zn 含量均值在三级标准允许范围内,5 个铅锌矿点 Zn 含量均值超过三级标准;两矿区 Cu 元素均在三级标准范围内;Cd 元素含量均超过三级标准,分别为三级标准值的 2.41 和 3.39 倍.目前土壤环境质量标准未对 Mn 元素做出规定,据报道^[12],土壤中 Mn 元素的适中标准为 170 ~ 1 200 mg·kg⁻¹,锰矿、铅锌矿区土壤 Mn 平均含量分别为该上限值的 2.9 和 1.8 倍.

2.2 花垣矿区重金属污染评价

花垣锰矿、铅锌矿区重金属污染指数及污染程度见表 3.单因子污染指数的计算以国家土壤环境质量三级标准(GB 15618-1995)为评价标准,由于环境质量标准未对 Mn 元素作出规定,本研究只对 Pb、Zn、Cu、Cd 进行了评价.两矿区土壤 4 种重金属元素的单项污染指数范围分别为: P_{Pb} 0.83 ~ 1.71、 P_{Zn} 0.58 ~ 1.44、 P_{Cu} 0.24 ~ 0.31、 P_{Cd} 1.90 ~ 4.01.从污染程度上看,除排吾乡锰矿点外,Pb 对两矿区造成轻污染;Zn 对猫儿乡锰矿点和铅锌矿区造成轻污染;Cu 未对两矿区造成污染;除排吾乡锰矿点外,Cd 对两矿区造成中-重污染.综合污染指数反映了 4 种重金属元素的综合污染状况, $P_{综}$ 的范围为 1.48 ~ 3.12,总的污染程度锰矿区的猫儿乡、排吾乡为轻污染,锰矿区的两河乡、民乐镇和铅锌矿区的茶洞镇、龙潭镇、猫儿乡、排吾乡为中污染,铅锌矿区的团结镇为重污染.从数值上看,铅锌矿区 Pb、Zn 和 Cd 的单项指数和综合污染指数均高于锰矿区,这主要与这 3 种重金属在铅锌矿区土壤中含量相对较高有关.

表 3 花垣锰矿、铅锌矿区重金属污染指数及污染程度
Table 3 Pollution indices and their grading in Manganese and Lead/Zinc mine, Huayuan

矿区	采样点	Pb		Zn		Cu		Cd		$P_{综}$	污染等级
		P_i	污染等级	P_i	污染等级	P_i	污染等级	P_i	污染等级		
锰矿	两河乡($n=12$)	1.01	轻污染	0.61	清洁	0.24	清洁	2.68	中污染	2.06	中污染
	民乐镇($n=15$)	1.06	轻污染	0.89	清洁	0.25	清洁	2.71	中污染	2.10	中污染
	猫儿乡($n=13$)	1.13	轻污染	1.00	轻污染	0.31	清洁	2.21	中污染	1.77	轻污染
	排吾乡($n=10$)	0.83	清洁	0.58	清洁	0.26	清洁	1.90	轻污染	1.48	轻污染
	均值($n=50$)	1.02	轻污染	0.79	清洁	0.27	清洁	2.41	中污染	1.88	轻污染
铅锌矿	茶洞镇($n=10$)	1.49	轻污染	1.26	轻污染	0.31	清洁	3.56	重污染	2.78	中污染
	团结镇($n=12$)	1.71	轻污染	1.33	轻污染	0.29	清洁	4.01	重污染	3.12	重污染
	龙潭镇($n=13$)	1.52	轻污染	1.44	轻污染	0.28	清洁	3.84	重污染	2.99	中污染
	猫儿乡($n=12$)	1.44	轻污染	1.31	轻污染	0.25	清洁	2.60	中污染	2.09	中污染
	民乐镇($n=11$)	1.52	轻污染	1.00	轻污染	0.24	清洁	2.89	中污染	2.27	中污染
	均值($n=58$)	1.54	轻污染	1.28	轻污染	0.27	清洁	3.39	重污染	2.66	中污染

2.3 矿区土壤重金属有效态含量

重金属有效态含量一般认为是土壤中具有生物有效性,能直接为植物吸收的那部分重金属^[14].DTPA 能浸提出土壤中水溶性、交换态、吸附态、有机固定态和部分氧化态的重金属,被认为是高度生物有效的形态^[15].两矿区土壤重金属有效态含量见表 4,5 种重金属元素有效态含量范围为 Mn 53.23 ~ 430.42 mg·kg⁻¹,Pb 26.35 ~ 129.23 mg·kg⁻¹,Zn 20.41 ~ 73.56 mg·kg⁻¹,Cu 1.30 ~ 4.61 mg·kg⁻¹,Cd 0.15 ~ 0.57 mg·kg⁻¹,其中 Pb、Cd 有效态含量较高,甚至超过了湖南省背景值(表 2),可

能成为影响植物生长的限制因子.从两矿区比较来看,锰矿区土壤 Mn 有效态含量超过铅锌矿区,铅锌矿区 Pb、Zn、Cu 和 Cd 有效态含量均高于锰矿区,与重金属总量结果一致.重金属有效态含量占全量的比值(B/T 值)常常作为评价重金属环境效应的一个指标^[16, 17],本研究显示,5 种重金属元素的 B/T 值分别为 Mn 2.50% ~ 6.96%,Pb 5.33% ~ 15.15%,Zn 6.64% ~ 11.65%,Cu 1.33% ~ 4.82%,Cd 7.79% ~ 17.56%.从均值上看,铅锌矿区的 Pb、Zn,两矿区的 Cd 活化程度相对较高,>10%.

表 4 花垣锰矿、铅锌矿区土壤重金属有效态含量¹⁾ (均值 ± 标准差)/mg·kg⁻¹

Table 4 Available concentrations of heavy metal in Manganese mine and Lead/Zinc mine, Huayuan¹⁾ (mean ± SD)/mg·kg⁻¹

矿区	采样点	Mn	Pb	Zn	Cu	Cd
锰矿	两河乡 (n = 12)	115.67 ± 19.59	27.01 ± 5.5	20.41 ± 3.73	1.30 ± 0.13	0.35 ± 0.09
	B/T/%	3.66	5.33	6.64	1.33	12.90
	民乐镇 (n = 15)	430.42 ± 55.06	41.77 ± 7.19	33.38 ± 5.11	2.54 ± 0.41	0.47 ± 0.13
	B/T/%	6.96	7.88	7.51	2.53	17.56
	猫儿乡 (n = 13)	306.38 ± 48.84	40.23 ± 6.54	41.03 ± 6.3	2.42 ± 0.27	0.33 ± 0.12
	B/T/%	5.36	7.11	8.20	1.94	14.79
	排吾乡 (n = 10)	129.19 ± 15.64	26.35 ± 7.17	28.29 ± 4.24	1.39 ± 0.2	0.15 ± 0.10
	B/T/%	3.13	6.35	9.72	1.35	7.79
	均值 (n = 50)	262.38 ± 28.33	34.74 ± 3.42	31.24 ± 2.71	1.98 ± 0.17	0.34 ± 0.06
铅锌矿	B/T/%	5.33	6.80	7.90	1.86	14.10
	茶洞镇 (n = 10)	53.23 ± 9.94	97.66 ± 22.79	73.56 ± 12.39	3.58 ± 0.61	0.44 ± 0.2
	B/T/%	2.50	13.07	11.65	2.89	9.63
	团结镇 (n = 12)	109.77 ± 18.22	129.23 ± 22.76	62.92 ± 16.2	2.49 ± 0.55	0.48 ± 0.16
	B/T/%	4.02	15.15	9.45	2.13	11.91
	龙潭镇 (n = 13)	162 ± 26.7	90.85 ± 18.95	64.08 ± 15.02	3.07 ± 0.41	0.57 ± 0.13
	B/T/%	5.74	11.98	8.90	2.72	14.96
	猫儿乡 (n = 12)	134.87 ± 24.8	95.27 ± 20.98	68.61 ± 10.98	3.86 ± 0.47	0.33 ± 0.13
	B/T/%	3.82	13.28	10.49	3.88	12.72
	民乐镇 (n = 11)	184.78 ± 35.71	112.03 ± 18.59	52.90 ± 18.85	4.61 ± 0.43	0.38 ± 0.12
	B/T/%	4.31	14.72	10.61	4.82	13.12
	均值 (n = 58)	131.15 ± 12.25	104.9 ± 9.19	64.29 ± 6.54	3.49 ± 0.23	0.44 ± 0.06
	B/T/%	4.22	13.66	10.08	3.91	13.07

1) B/T:生物有效态含量与总量的比值

2.4 矿区土壤重金属污染主成分分析

利用主成分分析法对矿区重金属污染的关键因子进行分析,根据特征根和累积贡献率选取前两个主成分,第一个主成分(PC1)解释了54.64%的原始数据信息,第二个主成分(PC2)解释了13.10%的数据信息(表5)。根据主分量的负荷矩阵,Mn、Pb、Zn、

表 5 花垣锰矿、铅锌矿区土壤重金属污染主成分分析¹⁾

Table 5 Factor loadings of each variable along PC1 and PC2 resulted from principal component analysis in Manganese mine and Lead/Zinc mine, Huayuan

参数	PC1	PC2
pH	0.69	-0.16
Mn	0.55	-0.21
Pb	0.48	0.10
Zn	0.59	0.21
Cu	0.18	-0.58
Cd	0.41	-0.33
DTPA-Mn	0.63	-0.41
DTPA-Pb	0.59	0.25
DTPA-Zn	0.61	0.10
DTPA-Cu	0.19	0.22
DTPA-Cd	0.60	0.48
特征根	2.71	1.44
贡献率/%	54.64	13.10

1) PC1:第一主成分,PC2:第二主成分

Cd 在 PC1 上的负荷系数分别为 0.55、0.48、0.59 和 0.41,DTPA-Mn、DTPA-Pb、DTPA-Zn、DTPA-Cd 在 PC1 上的负荷值分别为 0.63、0.59、0.61 和 0.60。这说明 Mn、Pb、Zn、Cd 和 DTPA-Mn、DTPA-Pb、DTPA-Zn、DTPA-Cd 是导致花垣两矿区重金属污染的主要因子。另外,pH 在 PC1 上的负荷值为 0.69、说明 pH 值与重金属污染有关。

2.5 矿区土壤重金属有效态含量与总量相关性分析

图 2 显示了两矿区土壤重金属有效态含量与其对应总量的相关性关系。从图 2 可以看出两矿区土壤重金属 DTPA 提取态含量与总量呈正相关关系。其中,锰矿区土壤 DTPA 提取态 Mn、Pb、Zn、Cd 含量与其总量呈极显著正相关($P < 0.01$),Cu 与总 Cu 之间相关性不明显($P = 0.49$)。铅锌矿区土壤 DTPA 提取态 Mn、Pb、Zn、Cd 含量与其总量也呈极显著正相关($P < 0.01$),DTPA 提取态 Cu 含量与总 Cu 呈显著性正相关($P < 0.05$)。另外,对矿区土壤 pH 值与重金属总量及其有效态含量进行 Pearson 相关性分析(数据未出示),结果表明两矿区 pH 值与 Mn、Pb、Zn、Cd 总量和 DTPA 提取态 Mn、Pb、Zn、Cd 含量均呈负相关。

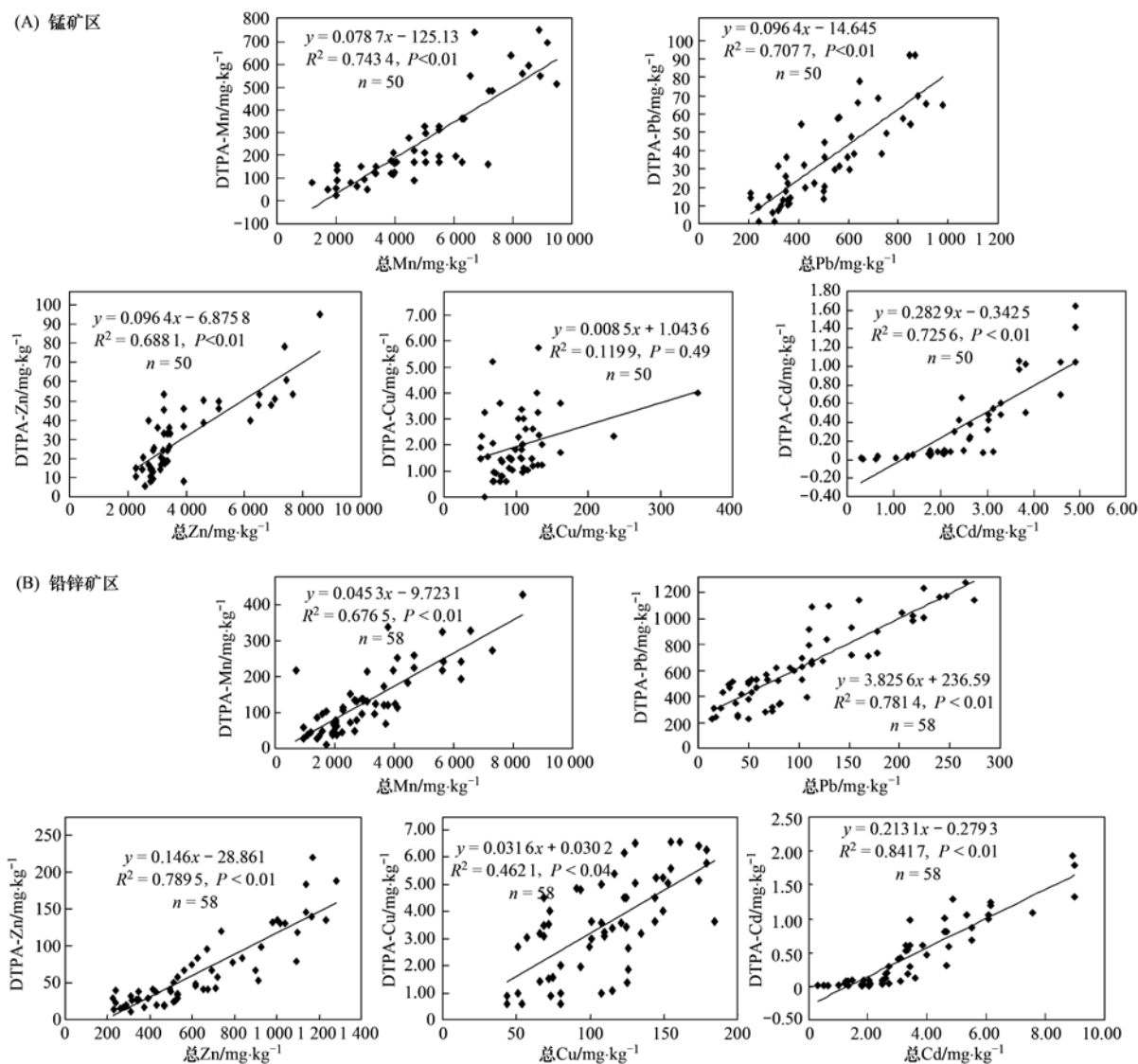


图2 花垣锰矿、铅锌矿区土壤重金属有效态含量与总量之间的关系

Fig. 2 Relationships between total Mn, Pb, Zn, Cu, Cd and their DTPA-extractable fractions in Manganese and Lead/Zinc mine, Huayuan

3 讨论

土壤基质被污染,重金属毒害是矿区普遍存在且最为严重的环境问题之一^[18]。如湖南湘潭锰矿土壤 Mn、Cd 的平均含量分别为 $8\,853\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $13.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[19]。广西铅锌矿土壤 Pb、Zn 含量分别为 $1\,420 \sim 18\,212\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3\,236 \sim 32\,375\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[20]。本研究结果表明,花垣锰矿、铅锌矿区土壤 5 种重金属元素 (Mn、Pb、Zn、Cu、Cd) 的含量范围为 Mn $708 \sim 9\,476\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb $208 \sim 1\,499\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn $223 \sim 1\,481\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cu $51.1 \sim 351\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd $0.28 \sim 9.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。其中 Mn、Pb、Cd 的含量较高,均值分别为湖南省土壤背景值的 8.7、21.5 和 2.9 倍。与国家土壤环境质量三级标准 (GB 15618-1995) 相比,大多数土样中 Pb、Cd 含量超

过三级标准警戒值,对矿区土壤造成污染。土壤 Mn 含量也大大超过了 $170 \sim 1\,200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 适中标准的上限值,成为两矿区重金属污染元素。

对花垣两矿区重金属污染评价结果表明:目前 Pb 对两矿区造成轻污染;Zn 对铅锌矿区造成轻污染;Cd 对两矿区造成中-重污染;Cu 未对两矿区造成污染。从综合污染指数来看,锰矿区为轻-中度污染;铅锌矿区为中-重度污染 (表 3)。评价结果与李静等^[21]对浙江上虞铅锌矿和 Li 等^[22]对广西平乐锰矿区的相关研究结果一致。

土壤重金属有效态含量能更好地反映土壤重金属的生物有效性及潜在环境效应。本研究结果表明,两矿区土壤 Pb、Cd 的有效态含量较高,分别为 $34.7 \sim 104.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.34 \sim 0.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能成为影响植物生长的限制因子。一

般来说,重金属有效态含量占总量的比例不高,很少超过 10%^[14]. 乐昌铅锌尾矿 DTPA 提取态 Pb、Zn、Cu 和 Cd 在其总量中所占的比例分别为 6.4%、2.2%、3.1% 和 3.7%^[23],广东大宝山硫铁矿/铜矿排土场土壤 DTPA 提取态 Pb、Zn、Cu 和 Cd 占总量的比例不到 3%^[24]. 本研究中两矿区 DTPA 态重金属的比例偏高,且部分土样 Pb、Zn、Cd 的 B/T 值超过 10% (表 4),显示了较高的植物学毒性和潜在的生态风险,这可能与两矿区土壤弱酸性性质有关^[25,26]. 线性回归分析显示,两矿区土壤 DTPA 提取态重金属与总量呈正相关关系(图 2). 此外,主成分分析结果表明 Mn、Pb、Zn、Cd 和 DTPA-Mn、DTPA-Pb、DTPA-Zn、DTPA-Cd 是导致花垣两矿区重金属污染的主要因子. 因此,应采取一定措施对矿区土壤重金属污染进行治理.

4 结论

(1)花垣锰矿、铅锌矿区土壤 Mn、Pb、Cd 含量较高,大多数土样 Pb、Cd 含量超过国家土壤环境质量三级标准,对矿区土壤造成污染.

(2)重金属污染评价结果表明,目前两矿区土壤受到轻度的 Pb 污染,中-重度 Cd 污染. 多种重金属的综合污染情况来看,锰矿区为轻-中度污染;铅锌矿区为中-重度污染.

(3)两矿区土壤中 DTPA 提取态 Pb、Cd 含量相对较高,甚至超过了湖南省背景值,且占总量的比例相对较高(>10%),显示了较高的植物学毒性和潜在的生态风险. 两矿区土壤重金属 DTPA 提取态含量与总量呈显著正相关关系, Mn、Pb、Zn、Cd 和 DTPA-Mn、DTPA-Pb、DTPA-Zn、DTPA-Cd 是导致花垣两矿区重金属污染的主要因子.

参考文献:

- [1] 苏良. 湖南锰矿现状及发展前景[J]. 中国锰业, 1983, (1): 16-17, 13.
- [2] 刘益贵, 彭克俭, 沈振国. 湖南湘西铅锌矿区植物对重金属的积累[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1042-1048.
- [3] 王星敏, 徐龙君, 李虹. 锰矿资源绿色开发及安全管理对策[J]. 资源开发与市场, 2010, 26(7): 633-636.
- [4] 朱程, 马陶武, 周科, 等. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 3982-3993.
- [5] 方晰, 田大伦, 谢荣秀. 湘潭锰矿渣废弃地植被修复前的土壤诊断[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1494-1501.
- [6] 李永华. 湘西典型金属矿区汞铅的环境行为及健康效应[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2004. 48-71.
- [7] 李永华, 王五一, 杨林生, 等. 湘西多金属矿区汞铅污染土壤的环境质量[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 187-191.
- [8] 孙宏飞, 李永华, 姬艳芳, 等. 湘西汞矿区土壤中重金属的空间分布特征及其生态环境意义[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1159-1165.
- [9] 陈明辉, 孙际茂, 付益平, 等. 湘西州矿产资源现状及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2008, 22(2): 93-96.
- [10] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, 42(3): 421-428.
- [11] GB 15618-1995. 中华人民共和国土壤环境质量标准[S].
- [12] 王敬国. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1995.
- [13] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [14] 朱维晃, 杨元根, 毕华, 等. 海南土壤中 Zn、Pb、Cu、Cd 四种重金属含量及其生物有效性的研究[J]. 矿物学报, 2004, 24(3): 239-244.
- [15] 李永涛, 刘科学, 张池, 等. 广东大宝山地区重金属污染水田土壤的 Cu Pb Zn Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1110-1114.
- [16] Ye Z H, Shu W S, Zhang Z Q, *et al.* Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques[J]. Chemosphere, 2002, 47(10): 1103-1111.
- [17] Li M S, Luo Y P, Su Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China[J]. Environmental Pollution, 2007, 147(1): 168-175.
- [18] 夏汉平, 蔡锡安. 采矿地的生态恢复技术[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1471-1477.
- [19] 谢荣秀, 田大伦, 方晰. 湘潭锰矿废弃地土壤重金属污染及其评价[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(20): 38-41.
- [20] 路畅, 王英辉, 杨进文. 广西铅锌矿区土壤重金属污染及优势植物筛选[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1471-1475.
- [21] 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2327-2330.
- [22] Li M S, Yang S X. Heavy metal contamination in soils and phytoaccumulation in a Manganese mine wasteland, South China [J]. Air, Soil and Water Research, 2008, 1: 31-41.
- [23] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, *et al.* Natural colonization of plants on five Lead/Zinc Mine tailings in Southern China[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(1): 49-60.
- [24] Yang S X, Liao B, Li J T, *et al.* Acidification, heavy metal mobility and nutrient accumulation in the soil-plant system of a revegetated acid mine wasteland[J]. Chemosphere, 2010, 80(8): 852-859.
- [25] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils[J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 775-780.
- [26] Adriano D C, Wenzel W W, Vangronsveld J, *et al.* Role of assisted natural remediation in environmental cleanup [J]. Geoderma, 2004, 122(2-4): 121-142.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbiantan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人