

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔骁勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析

厉炯慧, 翁珊, 方婧*, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012)

摘要: 以海宁市电镀工业园区周边土壤为对象, 研究土壤重金属污染特征, 并采用 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法对土壤中重金属的潜在生态危害进行了评价. 结果表明, 海宁市电镀工业园区附近土壤中平均重金属含量低于我国土壤环境质量标准的二级标准, 对植物和环境不构成危害性影响. 尽管土壤平均重金属浓度较低, 但是仍有 6 个采样点重金属浓度超出土壤环境质量标准的二级标准, 超标率达 13%, 且超标点位置主要位于路边. 统计分析结果显示, 路边土壤中的 Cu 和 Cd 含量显著高于非路边 ($P < 0.05$), 这说明海宁电镀工业园区周边土壤重金属的累积与道路运输存在密切联系. 海宁电镀工业园区附近平均土壤潜在生态危害指数为 46.6, 表明海宁电镀工业园区附近土壤平均重金属污染程度较低, 存在轻微生态危害. 然而局部重金属超标采样地块潜在生态危害指数达到 220~278, 存在中等生态危害, 尤其是 Cd 的生态危害最为严重.

关键词: 电镀工业园区; 土壤; 潜在生态风险; 重金属污染; 生态危害

中图分类号: X131.3; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1509-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.045

Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park

LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, HUANG Jia-lei, LU Fang-hua, LU Yu-hao, ZHANG Hong-ming

(College of Environmental Science and Technology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The pollution status and potential ecological risks of heavy metal in soils around Haining electroplating industrial park were studied. Hakanson index approach was used to assess the ecological hazards of heavy metals in soils. Results showed that average concentrations of six heavy metals (Cu, Ni, Pb, Zn, Cd and Cr) in the soils were lower than the secondary criteria of environmental quality standard for soils, indicating limited harmful effects on the plants and the environment in general. Though the average soil concentrations were low, heavy metal concentrations in six sampling points located at the side of road still exceeded the criteria, with excessive rate of 13%. Statistic analysis showed that concentrations of Cu and Cd in roadside soils were significantly higher than those in non-roadside soils, indicating that the excessive heavy metal accumulations in the soil closely related with traffic transport. The average potential ecological hazard index of soils around Haining electroplating industrial park was 46.6, suggesting a slightly ecological harm. However, the potential ecological hazard index of soils with excessive heavy metals was 220-278, suggesting the medium ecological hazards. Cd was the most seriously ecological hazard factor.

Key words: electroplating industrial park; soil; potential ecological risk; heavy metal pollution; ecological hazard

当前我国土壤重金属污染严重. 2012 年 6 月 13 日,《经济参考报》发表题为“中国土壤重金属污染进入集中多发期”的报道,指出据农业部门近 5 年来农业环境质量定位监测的结果,仅湘江流域农产品产地受重金属污染的面积已逾 118 万亩. 环保部部长周生贤在重金属污染综合防治“十二五”规划会议上指出,从 2009 年至今,我国已有 30 多起重特大重金属污染事件,各部门必须统一思想,建立起完善的重金属污染防治体系、事故应急和环境与健康风险评估体系,解决一批损害群众健康的突出问题.

随着工业发展和城市化进程的加剧,土壤重金属污染与工业企业重金属污染排放密切相关. 电镀工业通常是重金属排放和污染的大户,为了集中管理和污染治理,我国先后建立了超过 50 个电镀工业

园区. 然而,近年来许多电镀工业园区污染物集中处理没有实现,企业偷排、漏排现象严重. 电镀工业园区成为附近居民环保投诉最多的目标之一. 因此,研究工业园区附近土壤重金属污染特征,评价其潜在生态危害是必要的. 近几年来,国内外学者已经研究了一些城市和典型区域土壤重金属污染状况^[1~8],但是对于电镀工业园区附近土壤重金属污染的研究很少,对浙江海宁电镀工业园区附近重金属污染及生态风险评估尚鲜见报道.

收稿日期: 2013-08-07; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(21007057)

作者简介: 厉炯慧(1977~),男,高级工程师,主要研究方向为环境工程设计、环境影响评价和环境监理, E-mail: ljh-yll@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: rceesfangjing@126.com

浙江海宁电镀工业园区从 2008 年起正式入驻企业,目前有 25 家电镀企业. 由于电镀企业生产污染严重,对周边村民的环境安全造成严重隐患,附近村民投诉不断. 2012 年浙江海宁市政府决定关停电镀工业园区,实施园区转型发展策略. 为了让老百姓切实地了解海宁电镀工业园附近土壤重金属污染的现状和潜在的生态风险,本研究以海宁电镀工业园区周边土壤为对象,综合分析海宁电镀工业园区附近土壤重金属的污染特征和空间分异性,并利用 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法评价重金属的潜在生态危害,以期合理地规划和利用园区土壤、改善和提高环境质量、保障人群健康提供重要的科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究以海宁电镀工业园区为中心,选定电镀工业园区南北各 2 km,东西各 0.5 km 为研究区域(实地考察过后发现该区域人口相对比较密集,农业生产活动频繁),并将该区域自北而南分为 A、B、C、D 这 4 个区域,即每个区域南北向 1 km,东西向 1 km,共选取采样点 46 个(如图 1). 采样点的位置和数量包括路边水稻田和旱地(20 个),河边水稻田和旱地(15 个),大片水稻田和旱地中心(11 个). 土壤样品采自 0~20 cm 表层土壤,混合均匀后按四分法获取足量的样品,装入塑料袋中,于实验室内自然风干,剔除植物残体和石块,磨碎、过 100 目筛,保存于自封袋中备用.

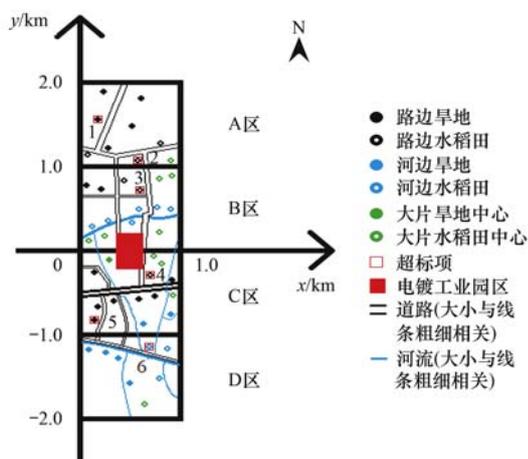


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Soil sampling locations

1.2 分析测试方法

1.2.1 微波消解

土壤样品的分析采用微波消解法. 称取土壤样品 0.4~0.5 g 于微波消解罐中,分别加入 2 mL HCl、2 mL HF、4 mL HNO₃, 加盖,置于微波消解仪中消解,当温度下降至 80℃ 以下时取出消解罐,当消解罐温度降至室温时即可打开消解罐,将消解罐中的剩余物质转移至特制玻璃管中,并置于 170℃ 控温电加热器中,赶酸至样品呈淡黄色,取下冷却至室温,用蒸馏水定容至 25 mL,过 0.22 μm 滤膜以备测. 空白和标准样品(GBW08303)同时消解,用以进行分析测定的质量控制.

1.2.2 重金属测定方法

参照国家标准分析方法,土壤消解后的溶液采用火焰原子吸收分光光度法测定. 火焰原子吸收分光光度法测定 Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr 含量的检出限分别为 1 mg·kg⁻¹ (GB/T 17138-1997)、0.5 mg·kg⁻¹ (GB/T 17138-1997)、5 mg·kg⁻¹ (GB/T 17139-1997)、0.2 mg·kg⁻¹ (GB/T 17140-1997)、0.05 mg·kg⁻¹ (GB/T 17140-1997)、5 mg·kg⁻¹ (HJ 491-2009).

1.3 潜在生态危害评价方法

评价土壤重金属污染生态风险评估方法很多,包括阈值比较、概率方法、地质积累指数法、TCLP (toxicity characteristic leaching procedure) 方法和潜在生态危害指数法等^[6,9,10]. 本研究采用瑞典科学家提出的潜在生态危害指数法^[10]. 该法是根据重金属性质及环境行为特点,从沉积学角度提出来的对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法. 该方法不仅考虑土壤重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用具有可比的、等价属性指数分级法进行评价. 潜在生态危害指数涉及到单项污染系数、重金属毒性响应系数以及潜在生态危害单项系数,其公式为:

$$RI = \sum E_r^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times c_f^i \quad (2)$$

$$C_f^i = c_{\text{表层}}^i / c_n^i \quad (3)$$

式中,RI 为潜在生态风险污染指数, E_r^i 为潜在生态危害单项系数, T_r^i 为某一种金属的毒性响应系数采用 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数为评价依据,重金属毒性水平次序为 Cd > Pb = Cu = Ni > Cr > Zn,毒性系数为 Cd = 30, Pb、Ni、Cu = 5, Cr = 2, Zn = 1. C_f^i 为单项污染系数, $c_{\text{表层}}^i$ 为表层土壤重金属浓度实测值, c_n^i 为参比值,本研究土壤参比值采用的是中国土壤(A 层)元素背景值^[11],Cu、Zn、

Ni、Pb、Cd、Cr 的土壤背景值分别为 25.3、85.4、26.9、34.4、0.142、65.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。重金属污染生态危害系数和生态危害指数分级标准列于表 1^[5,12]。

表 1 E_r^i 和 RI 的分级标准Table 1 Grade standard of E_r^i and RI

生态危害系数 E_r^i	生态危害指数 RI	污染程度
≤ 40	≤ 150	轻微生态危害
40 ~ 79	150 ~ 299	中等生态危害
80 ~ 159	300 ~ 600	强生态危害
160 ~ 320	>600	很强生态危害
>320	—	极强生态危害

2 结果与讨论

2.1 海宁市电镀工业园区土壤重金属含量

海宁市电镀工业园区附近土壤重金属含量测定统计结果如表 2 所示。不同区域土壤中重金属含量差别较大。比较各区域重金属含量的算术平均值可以看到,Zn 和 Pb 在 D 区的平均浓度最大,分别为 115 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 16.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cu、Cr 和 Ni 在 A 区的平均浓度最大,分别为 37.2、148 和 25.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cd 在 C 区的平均浓度最大,为 0.239 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从地图上看,D 和 A 两个区域是离电镀工业园区相对较远的区域,均处在离电镀工业园区 1 ~ 2 km 的范围内。而离电镀工业园区相对较近的 B

和 C 区(离电镀工业园区 1 km 以内),其土壤中重金属的含量则相对较小。这说明并不是越靠近电镀工业园区的土壤重金属含量越高,除了工业三废会给土壤带来危害,人们的其他活动也可能对土壤造成污染,例如交通运输以及农业生产等。

将海宁市电镀工业园区附近各区土壤重金属平均含量与中国土壤(A 层)元素背景值比较,可以得出:对于 Pb、Ni 和 Cd 这 3 个重金属而言,A、B、C、D 这 4 个区域土壤重金属平均含量均未超过土壤背景值。而 D 区土壤 Zn 含量和 A 区土壤 Cu 含量超过了土壤背景值,分别是土壤背景值的 1.35 倍和 1.47 倍。A、B、C、D 这 4 个区域土壤 Cr 的含量均超过土壤背景值,是土壤背景值的 1.17 ~ 2.25 倍。这说明在人类活动的影响下,电镀工业园区附近土壤已经受到了不同程度的污染,特别是 Cr 的污染最为严重。然而,将海宁市电镀工业园区附近各区土壤重金属平均含量与土壤环境质量标准(GB 15618-1995,表 3)比较,可以得出:对于所调查的海宁市电镀工业园区附近 A、B、C、D 这 4 个区域土壤 Cu、Ni、Pb、Zn、Cd、Cr 等 6 种重金属平均浓度均低于我国土壤环境质量标准的二级标准,即适用于一般农田、蔬菜地的土壤环境质量标准。这说明海宁市电镀工业园区附近土壤中的平均重金属含量对植物和环境不构成危害性影响。

表 2 海宁市电镀工业园区附近土壤重金属含量统计值¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 2 Statistic values of heavy metal concentrations of soils around Haining electroplating industrial park/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

区域	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni	Cd
A 区	91.1 ^a	6.16 ^a	37.2 ^a	148 ^a	25.0 ^a	未检出 ^a
	62.4 ~ 144 ^b	2.25 ~ 14.6 ^b	15.4 ~ 113 ^b	61.2 ~ 441 ^b	15.3 ~ 45.2 ^b	未检出 ^b
B 区	77.4 ^a	7.94 ^a	25.3 ^a	105 ^a	20.1 ^a	0.060 ^a
	43.1 ~ 123 ^b	2.07 ~ 19.1 ^b	16.4 ~ 51.1 ^b	49.0 ~ 156 ^b	11.4 ~ 29.3 ^b	未检出 ~ 1.03 ^b
C 区	101 ^a	11.2 ^a	28.2 ^a	102 ^a	17.7 ^a	0.120 ^a
	73.1 ~ 144 ^b	2.49 ~ 52.5 ^b	19.2 ~ 65.8 ^b	61.3 ~ 147 ^b	13.8 ~ 27.7 ^b	未检出 ~ 1.26 ^b
D 区	115 ^a	16.5 ^a	29.6 ^a	76.8 ^a	23.9 ^a	0.120 ^a
	88.6 ~ 158 ^b	2.65 ~ 30.7 ^b	20.5 ~ 47.8 ^b	29.9 ~ 126 ^b	18.4 ~ 40.7 ^b	未检出 ~ 0.980 ^b
CV	96.9 ^a	10.6 ^a	30.6 ^a	108 ^a	21.9 ^a	0.101 ^a
	43.1 ~ 158 ^b	2.07 ~ 52.5 ^b	15.4 ~ 113 ^b	29.9 ~ 441 ^b	11.4 ~ 45.2 ^b	未检出 ~ 1.26 ^b

1) a 代表金属含量的算术平均值; b 代表金属含量范围; CV 代表调查区块重金属总体分布情况

2.2 海宁市电镀工业园区土壤重金属空间分布特征

如图 2 所示,以电镀工业园区为中心南北向分布的采样点中重金属的含量分布相对比较集中。土壤中 Zn、Pb、Cu、Cr、Ni、Cd 主要集中分布的浓度区域分别是 43.1 ~ 158、2.07 ~ 52.5、15.4 ~ 65.8、29.9 ~ 156、11.4 ~ 40.7、0.000 ~ 0.200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。然而,对于重金属 Cu、Cr、Ni 和 Cd,分别有 1、1、1

和 4 个采样点的浓度明显高于它们集中分布的浓度区域,并且其重金属浓度数值已经明显超过了我国土壤环境质量标准的二级标准。这说明尽管海宁电镀工业园区土壤重金属总体态势良好,但是在局部区块已经出现了明显的重金属超标情况。重金属 Cu、Cr、Ni 的超标率分别均为 2.2%,Cd 的超标情况最为严重,达到 8.7%。

分析重金属超标采样点发现,有些采样点仅出

现一种重金属超标,而有些采样点则出现多种重金属超标.仅本次调查数据而言,有重金属超标的采样点为6个,采样点重金属超标率达13.0%.结合采

样点的地理分布来看,超标的6个采样点中,有3个位于在路边水稻田,有2个位于路边旱地,有1个位于河边水稻田(图1).

表3 土壤环境质量标准^[13]/mg·kg⁻¹

Table 3 Environmental quality standard for soils/mg·kg⁻¹

项目	样点	一级		二级		三级
		(自然背景)	pH < 6.5	pH 6.5 ~ 7.5	pH > 7.5	(pH > 6.5)
镉		≤0.20	≤0.30	≤0.30	≤0.60	≤1.0
汞		≤0.15	≤0.30	≤0.50	≤1.0	≤1.5
砷	水田	≤15	≤30	≤25	≤20	≤30
	旱地	≤15	≤40	≤30	≤25	≤40
铜	农田等	≤35	≤50	≤100	≤100	≤400
	果园	—	≤150	≤200	≤200	≤400
铅		≤35	250	≤300	≤350	≤500
铬	水田	≤90	≤250	≤300	350	≤400
	旱地	≤90	≤150	≤200	≤250	≤300
锌		≤100	≤200	≤250	≤300	≤500
镍		≤40	≤40	≤50	≤60	≤200
六六六		≤0.05	≤0.50	≤1.0		
滴滴涕		≤0.05	≤0.50	≤1.0		

土壤重金属来源于成土母质和人类活动^[14].土壤中重金属含量的显著增加和人类活动密切相关.电镀工业生产过程中会产生大量的电镀废液(包括废电镀液、镀件漂洗水、酸洗废水、碱洗除油废水等)、固体废弃物以及废气.这些电镀废液、废渣和废气中含有大量铜、镍、铬、锌等金属和其他等有毒有害物质^[15,16].工业废气和粉尘中的重金属会经过自然沉降和雨淋沉降进入土壤,其浓度往往随着采样点与污染源的距离增大而减小^[17].本实验相关性分析表明海宁电镀工业园区周边土壤重金属分布浓度与其离园区中心的距离没有显著相关性.这说明海宁电镀工业园区排放

的废气并不是引起其周围土壤重金属污染的主要的来源.

为了更深入地弄清海宁市电镀工业园区附近土壤重金属的空间分布特征,采用了统计软件 SPSS 11.0 的 *F* 检验,分析了路边与非路边土壤重金属含量的差异性,以及水稻田和旱地土壤重金属含量的差异性.如表4所示,路边土壤中 Cu 和 Cd 含量显著高于非路边土壤,其他4种重金属则在路边和非路边土壤中不存在显著差异.水稻田中 Pb 的含量显著高于旱地土壤,而旱地土壤中 Cd 的含量显著高于水稻田土壤,其他4种重金属在水稻田和旱地土壤之间不存在显著性差异.

表4 海宁市电镀工业园区附近路边和非路边、水稻田和旱地土壤重金属含量差异分析¹⁾

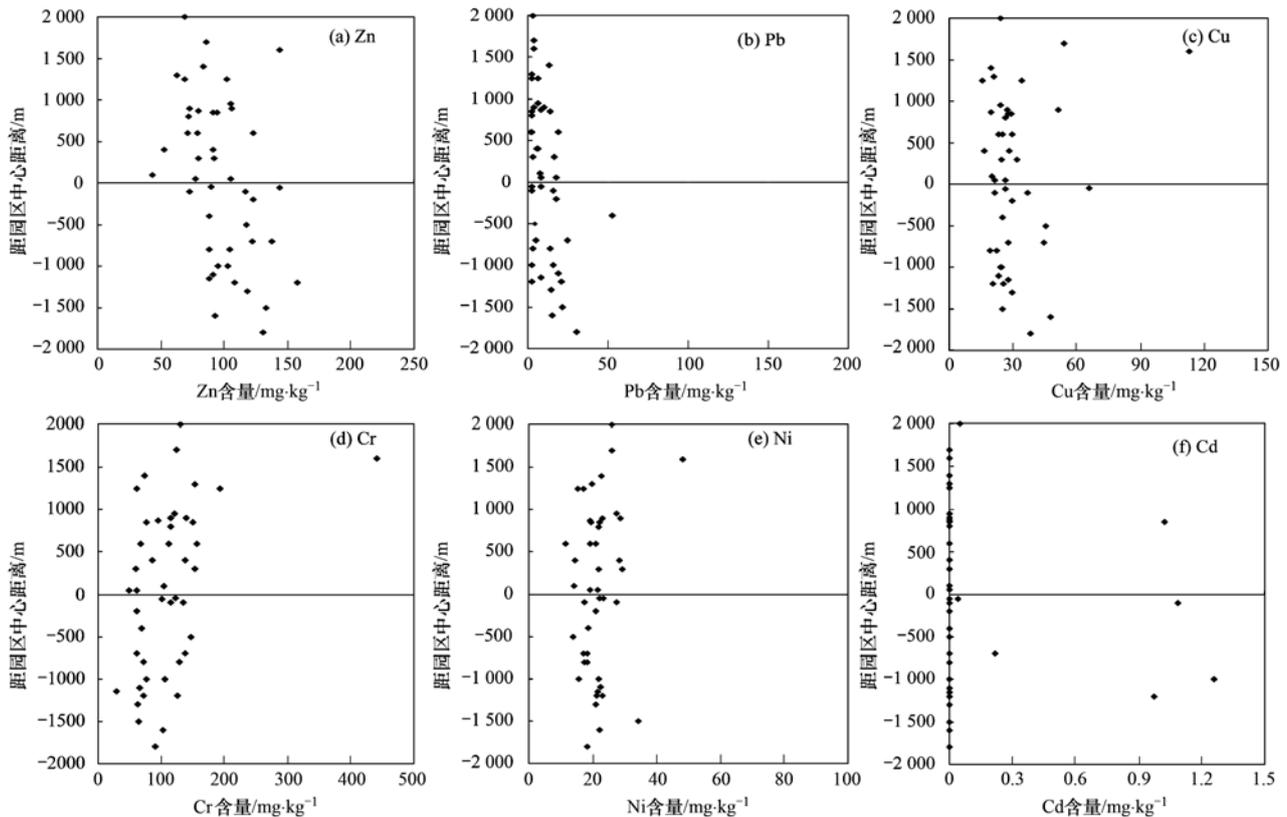
Table 4 Differences of heavy metal concentrations between roadside and non- roadside around Haining electroplating industrial park

元素	均值/mg·kg ⁻¹		路边和非路边 显著性差异 <i>P</i> 值	均值/mg·kg ⁻¹		水稻田和旱地 显著性差异 <i>P</i> 值
	路边	非路边		水稻田	旱地	
Zn	101	94.1	0.409	82.1	101	0.724
Pb	8.20	12.4	0.102	13.1	9.91	0.002 **
Cu	34.5	27.7	0.033 *	30.6	30.6	0.773
Cr	126	93.3	0.309	103	109	0.520
Ni	22.2	21.6	0.174	20.9	22.1	0.308
Cd	0.180	0.040	0.003 **	未检出	0.130	0.015 *

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

已有研究表明机动车车辆直接排放的微粒物是引起道路两侧土壤重金属含量变高的主要因素^[18~23].这些微粒主要来自于机动车尾气的排放、刹车衬里的机械磨损、车辆的镀锌层,轮胎的磨损、润滑油的燃烧等.燃料中除含 Pb 和 Cd 外,尚有多

种微量的重金属元素,车辆轮胎成分中亦含有多种重金属元素.车辆燃料燃烧、轮胎磨损都是重金属元素的重要物质来源^[18,22].本研究分析结果表明,超标采样点主要位于路边田,且路边土壤中 Cu 和 Cd 含量显著高于非路边土壤,这说明海宁电镀工业



图中0点表示电镀工业园区位置

图2 土壤重金属 Zn、Pb、Cu、Cr、Ni、Cd 含量与采样点距电镀工业园区中心距离的分布情况

Fig. 2 Distribution of Zn, Pb, Cu, Cr, Ni and Cd in soils around Haining electroplating industrial park

园区土壤重金属超标累积和交通运输密切相关. 电镀工业园区的道路主要承载着园区企业原料、废液和废渣运输. 除了机动车本身带来的重金属污染之外, 运输过程中可能会发生原料或废液渣的泄漏. 而对于电镀企业而言, 其原料和废液渣中往往含有大量的重金属, 一旦泄漏, 这些重金属必然通过各种途径进入土壤环境, 引起土壤重金属污染. 此外, 从电镀厂运输的汽车轮胎上也可能携带厂内重金属污染介质, 随着运输过程, 轮胎上的重金属介质也将进入公路, 从而引起公路周边土壤污染.

研究表明污水灌溉是造成农田土壤重金属污染的重要途径之一^[24]. 长期污灌将导致农田土壤 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 等 7 种重金属相对自然背景下有不同程度的累积^[25]. 电镀工业园区的污水排放一旦违反国家相关排放标准, 就可能会对下游河流造成一定的重金属污染^[26]. 本研究调查数据显示, 重金属超标的采样点主要为水稻田, 且统计分析结果显示水稻田中的 Pb 含量显著高于旱地土壤. 这一结果说明海宁电镀工业园区附近水稻田土壤可能是重金属污染的主要受体. 水稻田是浙江一带最为

典型的需水灌溉田种. 对于浙江一带一年两熟的水稻种植模式, 水稻田一年需要灌溉的时间达 6 个月之多. 如果周边灌溉水体受到重金属的污染, 那么水稻田土壤受重金属污染的风险将显著增加. 然而, 调查发现旱地土壤中 Cd 的含量显著高于水稻田土壤, 这说明灌溉因素对海宁电镀工业园区附近土壤 Cd 累积的贡献较小. 土壤中重金属的累积因素非常复杂, 不同重金属累积的途径和稳定性各不相同^[27]. 海宁电镀工业园区附近土壤重金属累积与灌溉因素之间的确认关系还需进一步开展系统研究.

2.3 海宁市电镀工业园区土壤重金属污染评价及潜在的生态危害

应用 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法, 计算了海宁市电镀工业园区各调查区块土壤单项污染潜在生态危害系数特征值和潜在生态危害指数. 如表 5 所示, 海宁电镀工业园区附近 A、B、C、D 这 4 个区块土壤单项污染潜在生态危害系数特征值为 30.3 ~ 64.6, 平均土壤潜在生态危害指数为 46.6, 其数值远远小于 150, 说明海宁电镀工业园区附近土壤平均重金属污染程度较低, 存在轻微生态危害.

尽管海宁电镀工业园区附近土壤平均重金属污染程度较低,但本研究调查结果仍然出现了6个采样点重金属超出我国土壤环境质量的二级标准.为了准确评估重金属超标采样点的生态风险情况,本研究计算了超标采样点的土壤单项污染潜在生态危害系数特征值和潜在生态危害指数.如表6所示,在A区的2个超标采样点的土壤重金属污染生态危害系数(E_r)和土壤潜在生态危害指数(RI)均较小,属于存在轻微生态危害范畴.处于B、C、D这3个区块的4个超标采样点,Cd的污染生态危害系数(E_r^{Cd})值均达到200以上,并且它们的土壤潜在生态危害指数(RI)值也均超过200,说明B、C、D这3个区块的4个超标采样点土壤已经存在中等

生态危害,有必要对它们进行重金属污染治理,尤其应该加强对土壤Cd的治理.

表5 海宁市电镀工业园区附近土壤重金属潜在污染生态危害系数特征值和潜在生态危害指数

Table 5 Eigen values of potential ecological hazard coefficients and the potential ecological hazard index in soils around

Haining electroplating industrial park					
项目	A区	B区	C区	D区	CV
E_r^{Pb}	0.90	1.03	1.87	2.40	1.54
E_r^{Cr}	5.78	3.07	2.48	2.33	3.27
E_r^{Cd}	10.6	22.8	50.5	35.0	30.6
E_r^{Zn}	1.07	0.910	1.18	1.35	1.14
E_r^{Cu}	7.36	4.95	5.25	5.85	6.05
E_r^{Ni}	4.65	3.65	3.30	4.43	4.06
RI	30.3	36.4	64.6	51.4	46.6

表6 海宁市电镀工业园区超标采样点土壤重金属潜在污染生态危害系数特征值和潜在生态危害指数

Table 6 Eigen values of potential ecological hazard coefficients and the potential ecological hazard index in soils that exceeded the national standard around Haining electroplating industrial park

超标采样点编号	所在区位	E_r^{Pb}	E_r^{Cr}	E_r^{Cd}	E_r^{Zn}	E_r^{Cu}	E_r^{Ni}	RI	污染程度
1	A	0.5223	13.4	0.050	1.68	22.3	8.41	46.4	轻微生态危害
2	A	0.326	5.04	0.050	1.20	6.75	3.21	16.6	轻微生态危害
3	B	0.395	4.55	216	1.07	5.45	4.14	232	中等生态危害
4	C	0.361	3.49	230	0.86	4.18	3.25	242	中等生态危害
5	C	0.399	3.23	265	1.20	4.83	2.93	278	中等生态危害
6	D	0.386	3.84	206	1.27	4.05	3.95	220	中等生态危害

3 结论

(1)海宁电镀工业园区周边土壤Cu、Ni、Pb、Zn、Cd、Cr等6种重金属的平均浓度均低于我国土壤环境质量的二级标准,说明总体来说海宁市电镀工业园区附近土壤中的平均重金属含量对植物和环境不构成危害性影响.

(2)部分采样点重金属超出我国土壤环境质量的二级标准,超标率达13%.海宁电镀工业园区周边土壤重金属累积与园区道路运输存在密切联系.

(3)从潜在生态危害指数分析得出,海宁电镀工业园区周边土壤平均重金属污染程度较低,总体存在轻微生态危害.然而位于电镀园区B、C、D这3个区块内的4个重金属超标采样点存在中等生态危害,尤其是Cd生态危害最为严重.

参考文献:

[1] Aelion C M, Davis H T, McDermoot S, *et al.* Metal concentrations in rural topsoil in South Carolina: potential for human health impact[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **402**(2-3): 149-156.

[2] Martin J A R, Arias M L, Corbó J M G. Heavy metals contents in

agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geo-statistical methods to study spatial variations [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 1001-1012.

[3] Hu K L, Zhang F R, Li H, *et al.* Spatial patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing[J]. *Pedosphere*, 2006, **16**(6): 690-698.

[4] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1561-1567.

[5] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评估[J]. *地理科学*, 2005, **25**(1): 108-112.

[6] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 土壤重金属污染的生态风险评估分析: 个案研究[J]. *土壤*, 2006, **38**(5): 565-570.

[7] 郭岩, 杨国义, 董巧香, 等. 汕头市典型区域土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 1067-1074.

[8] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 768-774.

[9] Chang E E, Chiang P C, Lu P H, *et al.* Comparisons of metal leachability for various wastes by extraction and leaching methods [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(1): 91-99.

[10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.

[11] 陈怀满. 环境土壤学[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2010.

- [12] 兰天水, 林建, 陈建安, 等. 公路旁土壤中重金属污染分布及潜在生态危害的研究[J]. 海峡预防医学杂志, 2003, **9**(1): 4-6.
- [13] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [14] Galley F A, Lloyd O L. Grass and surface soils as monitors of atmospheric metal pollution in central Scotland[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1985, **24**(1): 1-18.
- [15] Fernandez A J, Ternero M, Barragan F J, *et al.* An approach to characterization of sources of urban airborne particles through heavy metal speciation [J]. Chemosphere - Global Change Science, 2000, **2**(2): 123-136.
- [16] Chang I S, Kim B H. Effect of sulfate reduction activity on biological treatment of hexavalent chromium [Cr(VI)] contaminated electroplating wastewater under sulfate-rich condition[J]. Chemosphere, 2007, **68**(2): 218-226.
- [17] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析[J]. 中国公共卫生, 2001, **17**(7): 623-624.
- [18] 郭广慧, 陈同斌, 宋波, 等. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 922-930.
- [19] Yassoglou N C, Kosmas J, Asimakopoulos J. Heavy metal contamination of roadside soils in the Greater Athens Area[J]. Environmental Pollution, 1987, **47**(4): 293-304.
- [20] Jaradat Q M, Momani K A. Contamination of roadside soil, plants, and air with heavy metals in Jordan, a comparative study [J]. Turkish Journal of Chemistry, 1999, **23**: 209-220.
- [21] 林健, 邱卿如, 陈建安, 等. 公路旁土壤中重金属和类金属污染评价[J]. 环境与健康杂志, 2000, **17**(5): 284-286.
- [22] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 204-212.
- [23] 康玲芳, 李锋瑞, 张爱胜, 等. 交通污染对城市土壤和植物的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 556-560.
- [24] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境保护, 2012, **31**(11): 2152-2159.
- [25] 周振民. 污水灌溉重金属在农田土壤中的运移分布规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, **29**(6): 76-78.
- [26] 杭小帅, 王火焰, 周健民. 电镀厂下游水体中重金属的分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2736-2742.
- [27] 张俊会. 电子废物拆解区水稻田的重金属污染、生态毒性及其微生物修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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