ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 36 卷 第 9 期
2015 年 9 月 15 日

目 次

长江三角洲 $PM_{2.5}$ 质量浓度遥感估算与时空分布特征 …… 徐建辉,江洪(3119)
宁波市 $PM_{2.5}$ 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 …… 杜博涵,黄晓锋,何凌燕,胡敏,王川,任宇超,应红梅,周军,汪伟峰,许丹丹(3128)
青岛大气中酸碱气体及 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 …… 周佳佳,石金辉,李丽平,姚小红,高会旺(3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 …… 胡凌飞,张柯,王洪宝,李娜,王洁,杨文慧,殷喆,焦周光,温占波,李劲松(3144)
2015 年春节北京市空气质量分析 …… 程念亮,陈添,张大伟,李云婷,孙峰,魏强,刘嘉林,刘保献,孙瑞雯(3150)
上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系 …… 王红丽(3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 …… 陈东之,缪孝平,欧阳杜娟,叶杰旭,陈建孟(3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 …… 郭宇龙,李云梅,李渊,吕恒,刘阁,王旭东,张思敏(3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 …… 叶琳琳,吴晓东,刘波,闫德智,张玫琪,周阳(3186)
河北洨河溶解性有机物光谱学特性 …… 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰(3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征 …… 吴海燕,傅世锋,蔡晓琼,汤坤贤,曹超,陈庆辉,梁修雨(3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 …… 梁作兵,孙玉川,王尊波,师阳,江泽利,张媚,谢正兰,廖昱(3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的影响 …… 黄奇波,覃小群,刘朋雨,张连凯,苏春田(3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 …… 张艳,吴勇,杨军,孙厚云(3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 …… 陈聪聪,饶拉,黄金良,白敏冬(3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 …… 胡珍珍,崔益斌,李梅,余静(3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 …… 杨秋婵,赵玲,尹平河,谭烁,舒万姣,侯少玲(3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 …… 李怀正,陈珂莉,危忠,王卫刚(3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 …… 李敦柱,管运涛, 刘安, 李思远(3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 …… 张民盛,徐斌,张天阳,程拓,夏圣骥,楚文海(3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 …… 刘海龙,郭雪峰,王敏慧,焦茹媛,石健(3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 …… 吴悦,吴纯德,刘吕刚,袁博杰(3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 …… 王莹,许丽英,王少锋,肖翻,贾永锋(3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 …… 申洋洋,刘锐,徐灿灿,舒小铭,许江军,兰亚琼,陈吕军(3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 …… 覃彩霞,佟娟,申佩弘,魏源送(3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 …… 税勇,川岸朋树,宋小燕,刘锐,陈吕军(3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 …… 孔晓,崔丙健,金德才,吴尚华,杨波,邓晔,庄国强,庄绪亮(3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 …… 张岩,孙凤侠,谢杭冀,陈敬,眭稀,甘志明,王修平,史扬(3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 …… 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶(3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 …… 刘小朋,王建芳,钱飞跃,王琰,陈重军,沈耀良(3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究:以长江中下游地区夏玉米季为例 …… 桑蒙蒙,范会,姜珊珊,蒋静艳(3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 …… 傅志强,龙攀,刘依依,钟娟,龙文飞(3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N_2、N_2O、NO、CO_2 和 CH_4 排放特征 …… 曹娜,王睿,廖婷婷,陈诺,郑循华,姚志生,张海,Klaus Butterbach-Bahl(3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 …… 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪(3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 …… 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,赵世伟,张兴昌(3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 …… 倪银霞,黄懿梅,牛丹,赵彤,闫浩,蒋跃利(3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 …… 胡宁, 马志敏,蓝家程,伍宇春,陈高起, 傅瓦利,文志林,王文净(3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点:以潜江市为例 …… 王玉竹,肖和艾,周萍,童成立,葛体达,曾冠军,吴金水(3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 …… 李睿,江长胜,郝庆菊(3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 …… 聂燕,王新,王博,许淑婧,高福元, 余晔,夏敦胜,夏昕鸣(3438)
电镀厂周边环境中重金属分布特征及人体健康暴露风险评价 …… 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钏(3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 …… 刘洁,李晓东,赵中华,祁志福,陈彤,严建华(3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 …… 赵炎,郑国灿,朱恒,张进忠,朱秀英,胡淑春,吴娅林(3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 …… 焦海华,崔丙健,吴尚华,白志辉,黄占斌(3471)
4 株外生菌根真菌对 Al^{3+} 吸收与吸附的研究 …… 王明霞,袁玲,黄建国,周志峰(3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 …… 于锐,刘景双,王其存,刘强,王洋(3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 …… 宋立娜,王磊,夏孟婧,苏月,李振山(3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 …… 吕文洲,乔宇祥,余宁,史荣华,王光明(3501)
V_2O_5-WO_3/TiO_2 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 …… 任咏,纪莎莎,俞明锋,李晓东,严建华(3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 …… 林晓丹,田良,吕彬,杨建新(3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 …… 江梅,邹兰,李晓倩,车飞,赵国华,李刚,张国宁(3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 …… 司友斌,王娟(3533)
《环境科学》征订启事(3297) 《环境科学》征稿简则(3303) 信息(3127, 3202, 3277, 3318)

电镀厂周边环境中重金属分布特征及人体健康暴露风险评价

郭鹏然[1], 雷永乾[1], 周巧丽[1], 王畅[2], 潘佳钏[1]
(1. 中国广州分析测试中心广东省化学危害应急检测技术重点实验室, 广州 510070; 2. 中山大学公共卫生学院, 广州 510080)

摘要: 以广州市白云区两电镀厂为研究对象,采集电镀厂车间废气和周围空气及土壤样品,分析了样品中重金属(包括 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和类重金属 As、Hg)含量分布,分别应用地累积指数(I_{geo})和 US EPA 的 RAGS 风险评估模型,对土壤中重金属污染程度、空气和土壤中重金属人体健康风险进行评价. 结果表明,车间废气中 Hg 和 Pb,空气中 Cr 分别高于相应标准限值, 土壤中 Cd、Hg 和 Zn 达到中等污染程度. 土壤和空气中重金属暴露的非致癌风险指数 HQ 和 HI 均 <1, 非致癌健康风险可忽略. 土壤中 As 和 Cr 的致癌风险 $>10^{-4}$, 高于最大可接受风险水平, CR_{Cr}对 TCR 贡献率 >81%. 空气中 Cr 和 Ni 的致癌风险 CR 和 TCR 在 10^{-6} ~ 10^{-4}, 存在致癌风险可能但低于最大可接受风险水平. 土壤中重金属对儿童暴露的 CR 明显高于成人, 而空气中重金属对成人暴露的 CR 值明显较高. 相关分析表明土壤中重金属与废气中重金属含量密切相关, 主成分分析表明土壤中达到中等污染的重金属来源可能不同于其它重金属.

关键词:电镀厂; 重金属; 土壤; 空气; 人体健康风险
中图分类号: X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)09-3447-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.09.041

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment

GUO Peng-ran[1], LEI Yong-qian[1], ZHOU Qiao-li[1], WANG Chang[2], PAN Jia-chuan[1]
(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Emergency Test for Dangerous Chemicals, China National Analytical Center (Guangzhou), Guangzhou 510070, China; 2. School of Public Health, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China)

Abstract: This study aimed to investigate the pollution degree and human health risk of heavy metals in soil and air samples around electroplating factories. Soil, air and waste gas samples were collected to measure 8 heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) in two electroplating factories, located in Baiyun district of Guangzhou city. Geoaccumulation index and USEPA Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS) were respectively carried out. Results showed that concentrations of Hg and Pb in waste gas and Cr in air samples were higher than limits of the corresponding quality standards, and concentrations of Cd, Hg and Zn in soil samples reached the moderate pollution level. The HQ and HI of exposure by heavy metals in air and soil samples were both lower than 1, indicating that there was no non-carcinogen risk. CR_{As} and CR_{Cr} in soil samples were beyond the maximum acceptable level of carcinogen risk (10^{-4}), and the contribution rate of CR_{Cr} to TCR was over 81%. CR_{Cr}, CR_{Ni} and TCR in air samples were in range of 10^{-6}-10^{-4}, indicating there was possibly carcinogen risk but was acceptable risk. CR values for children were higher than adults in soils, but were higher for adults in air samples. Correlation analysis revealed that concentrations of heavy metals in soils were significantly correlated with these in waste gas samples, and PCA data showed pollution sources of Cd, Hg and Zn in soils were different from other metals.
Key words: electroplating factories; heavy metals; soil; air; human health risk

广州及周围地区近几十年来的经济高速发展带动了电镀行业在本地区的大规模增长. 近年来为保护城市生态环境和居民人体健康,大多数电镀厂从城区搬迁. 然而,由于广州较快的城市化进程,一些原位于城郊的电镀厂目前已处于居民生活和生产区. 电镀企业排放大量废水、固体废物和废气中含有的重金属等有害物质[1,2],它们在环境中不断迁移、转化,最终进入并累积于水体、空气、土壤、植物中[3,4]. 重金属元素如 Cd、Pb、Hg、As、Cr 具有致癌性,会导致人体功能性障碍和不可逆损伤,对人体的健康有较大风险.

本文选择广州市距居民生产和生活区较近的两个电镀厂,考察电镀厂周围土壤和空气中重金属污染状况,分析电镀厂对周围土壤和空气中重金属富集的影响, 并应用美国 EPA Risk Assessment

收稿日期: 2015-02-15; **修订日期**: 2015-04-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(21307120); 珠江科技新星项目(2012J2200054)
作者简介: 郭鹏然(1978 ~),男,博士,副研究员,主要研究方向为重环境毒害物质的分析和环境化学行为, E-mail: prguo@fenxi.com.cn

Guidance for Superfund (RAGS)模型评价,研究了其周边大气中重金属污染水平和健康风险评价,以期为评估电镀厂对周边空气中重金属的贡献情况提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

广州市白云区 RH 和 SJ 两个电镀厂周围情况类似, 附近皆为城市居民生活和生产区, 电镀厂墙外周围分布有果场和农田. 2013 年 8 月对两个电镀厂周围的表层土壤(0 ~ 20 cm)进行采集. 采样位点如图 1 所示. RH 电镀厂周围位点分别为厂南 300 m A(果场)、厂西 300 m B(果场)、厂北 500 m C(荔枝园)和厂东 400 m D(农田); SJ 电镀厂周围位点分别为厂南 400 m A(草坪)、厂西 500 m B(绿化带)、厂北 500 m C(农田)和厂东 500 m D(农田). 采集的土壤样品风干后,研磨过孔径 0.25 mm 筛网,保存在 PE 袋中备用.

选择位于电镀厂下风向的居民区和较近的学校区域作为空气采样点. 分别在 2013 年 5 月(偏南风)和 10 月(偏北风)采集气体样品. RH 电镀厂空气采样点 K 位于厂南边 400 m 的居民区附近; SJ 电镀厂空气采样点 K 位于厂东边约 500 m 处学校附近. 车间废气采样方法按照标准 HJ/T 397-2007 进行采集; 气体采样结束后,封闭吸收管进出气口,置于样品箱内避光运回,样品采集后应尽快分析. 空气样品按照标准 HJ/T 396-2007 采样方法,利用中流量 TSP 采样器(TH-150C)每个位点采集 3 个,采样结束后将滤膜的采样面向里对折两次放入与样品膜编号相同的滤膜袋中.

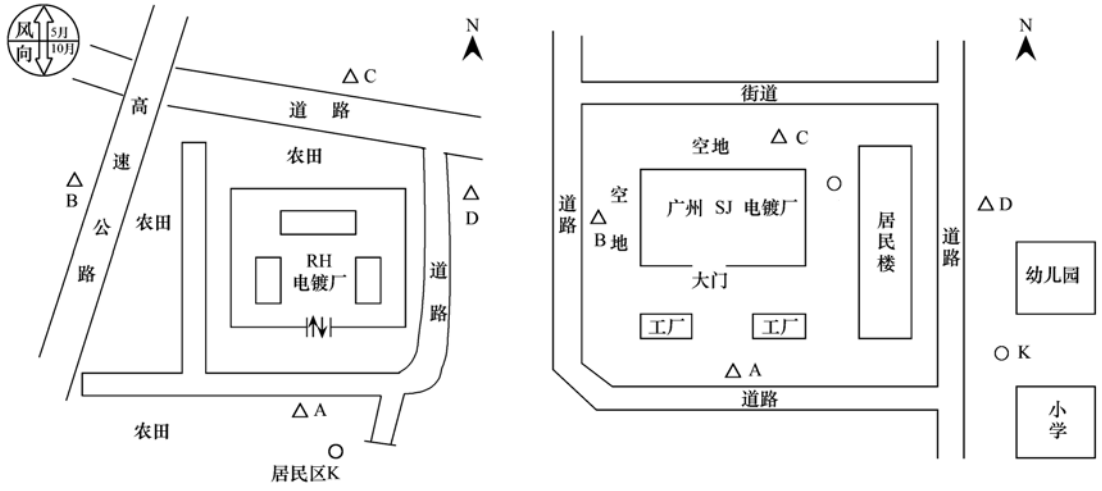


图 1 电镀厂周围采样点分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of the distribution of sampling sites around electroplating factories

1.2 样品分析

废气样品:将吸收管中的吸收液移入 25 mL 容量瓶中,用吸收液洗涤吸收管 1 ~ 2 次,洗涤液并入容量瓶中,摇匀定容. 同时制备空白试样. 采用原子荧光光谱法(AFS)测定溶液中 As 和 Hg,采用原子吸收光谱法(AAS)测定溶液中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn.

空气样品:将滤膜剪碎后置于 250 mL 锥形瓶中,加水润湿后用硝酸和过氧化氢溶液加热消解至溶液颜色变浅. 冷却先后用滤纸过滤和硝酸溶液(1 +99)洗涤. 合并滤液与洗涤液,电热板上微沸至近干. 对于 AFS 测定 As 和 Hg 的溶液,再加 5 mL 盐酸溶液(1 +1); 对于 AAS 测定 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的溶液,再加入 2 mL(1 +1)硝酸溶液,加热使残渣溶解,全部转移至 50 mL 容量瓶中,用水定容至刻度,摇匀后分析.

土壤样品:称取干样0.500 0 g置于溶样杯中,润湿后加入 8 mL 王水. 待剧烈反应结束后将溶样杯置于微波消解仪中消解. 将消解液过滤、定容于 50 mL 容量瓶中, AFS 测定 As 和 Hg. 另称取干样 0.100 0 g置于溶样杯中,润湿后加入 5 mL 硝酸和 2 mL 氢氟酸,摇匀待剧烈反应结束后将溶样杯置于微波消解仪中消解. 将消解溶液转移至烧杯中,加入 0.5 mL 高氯酸于电热板上 150℃加热溶液至白烟冒尽, 2 mL 硝酸溶解固体定容至 50 mL 容量瓶,AAS 测定 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn.

质量控制: 每个样品平行消解 3 份, 同时带流程空白. 实验用酸皆为优级纯, 水为超纯水. 土壤分析过程用土壤成分分析标准物质 GBW07401 和

GBW07403 进行质量控制, 其分析结果与标准值差异小于 10%.

1.3　土壤中重金属污染状态评价

重金属的污染程度常采用地累积指数(I_{geo})评价[5]. I_{geo}是通过比较目前沉积物中重金属含量和工业化前重金属含量,从而评估目前沉积物重金属污染程度和环境情况. I_{geo}数学计算式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

式中,C_n 为沉积物中重金属的测定含量,B_n 为重金属地化背景值,1.5 是由于成岩影响而产生的背景系数矩阵校正因子. Müller 将地累积指数区分为 7 个级别(见表 1),最高级别(6 级)反映了目前沉积物中重金属含量为背景值的 100 倍富集(极端污染)[6]; 最低级别(0 级)时重金属富集程度不到背景值 1.5 倍,表示没有污染产生. I_{geo}在评估土壤中重金属的污染水平方面已广泛应用[7,8].

表 1　地累积指数的穆勒分级

Table 1　Müller's classification for geoaccumulation index

分级	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	≤0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	>5
污染程度	无污染	无污染至中等污染	中等污染	中等污染至强污染	强污染	强污染至极强污染	极强污染

1.4　重金属暴露模型与参数

根据表层土壤和空气在城市空间环境中的迁移转化特征,土壤中重金属可能通过经手-口途径直接摄入、经皮肤接触和经呼吸吸入 3 种暴露途径进入人体; 空气中重金属可能通过呼吸吸入和皮肤接触这 2 种暴露途径对人体健康产生影响. 经各种途径摄入的重金属暴露量按以下公式计算[9~11].

手-口途径摄入日均暴露量:

$$ADD_{ing} = \frac{c \times IngR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

呼吸途径摄入日均暴露量:

$$\text{土壤}\quad ADD_{inh} = \frac{c \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (2)$$

$$\text{空气}\quad ADD_{inh} = \frac{c \times InhR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

皮肤接触途径摄入日均暴露量:

$$\text{土壤}\quad ADD_{derm} = \frac{c \times SA \times CF \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

$$\text{空气}\quad ADD_{derm} = \frac{c \times SA \times CF \times PC \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (5)$$

式中, ADD_{ing}、ADD_{inh}和 ADD_{derm}分别为手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径的日均暴露量, $mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$; c 为土壤和空气中重金属含量, $mg\cdot kg^{-1}$(土壤), $mg\cdot m^{-3}$(空气); IngR 为摄入土壤频率, $mg\cdot d^{-1}$; InhR 为呼吸频率, $m^3\cdot d^{-1}$; CF 转换系数, $kg\cdot mg^{-1}$ 和 $m^3\cdot cm^{-3}$; EF 为暴露频率, $d\cdot a^{-1}$; ED 为暴露年限,a; BW 为平均体重, kg; ET 为暴露时间, $h\cdot d^{-1}$; AT 为重金属平均暴露时间, d; PEF 为灰尘排放因子, $m^3\cdot kg^{-1}$; SA 为暴露皮肤面积, cm^2; SL 为皮肤黏着度, $mg\cdot(cm^2\cdot d)^{-1}$; PC 为皮肤渗透系数, $cm\cdot h^{-1}$; ABS 为皮肤吸收因子, 无量纲.

参考 US EPA 健康风险评价方法[9~12]、中国人群暴露参数手册[13]以及国内外相关研究成果[14~20],式(1) ~ (3)中的参数取值见表 2.

1.5　重金属健康风险评价方法

本研究中 8 种目标重金属都具有非致癌危害风险,其中 As、Cd、Cr 和 Ni 则同时具有致癌风险[14]. 重金属每一暴露途径的非致癌和致癌效应按下式计算评估:

$$HQ_i = \sum_{j=1}^{3} \frac{ADD_{ij}}{RfD_{ij}} \quad (6)$$

$$HI = \sum_{i=1}^{8} HQ_i \quad (7)$$

$$CR_i = \sum_{j=1}^{3} ADD_{ij} \times SF_{ij} \quad (8)$$

$$TCR = \sum_{i=1}^{4} CR_i \quad (9)$$

式中, HQ_i 为非致癌重金属 i 的单项健康风险指数; ADD_{ij}为非致癌重金属 i 在第 j 种暴露途径的日均暴露量, $mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$; RfD_{ij}为非致癌重金属 i 在第 j 种暴露途径的参考剂量, $mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$; HI 为 8 种重金属通过 3 种暴露途径所致的总非致癌风险指数. 当 HQ_i 或 HI < 1 时,表示非致癌健康风险可以忽略; 当其 > 1 时表示存在非致癌健康风险. CR_i 为致癌重金属 i 的单项健康风险指数; SF_{ij}为非致癌重金属 i 在第 j 种暴露途径的致癌风险斜率系数, $(kg\cdot d)\cdot mg^{-1}$; TCR 为 8 种重金属通过 3 种暴露途径所致的总致癌风险. CR_i 或 TCR 在 10^{-4}为最大可

接受风险水平,其 $\leqslant 10^{-6}$ 为可忽略致癌风险水平[9,11,14,15,18]. 据 US EPA 综合危险信息系统(IRIS)中信息[16]和相关资料[14,15,17,18,21],各种暴露途径的 RfD 和 SF 见表 3.

表 2 重金属日均暴露量计算参数取值

Table 2 Parameter values in average daily dose calculation models of heavy metals

项目	参数	取值	数据来源
手-口摄入途径	ADD_{ing}/mg·(kg·d)$^{-1}$	式(1)计算	[9~11]
	IngR/mg·d^{-1}	200(儿童),100(成人)	[9~11]
呼吸接触途径	ADD_{inh}/mg·(kg·d)$^{-1}$	式(2)计算	[9~11]
	InhR/m^3·d^{-1}	7.63(儿童),14.7(成人)	[9,10,14]
	PET/m^3·kg^{-1}	1.36×10^9	[9,11,14]
皮肤接触途径	ADD_{derm}/mg·(kg·d)$^{-1}$	式(3)计算	
	SA/cm^2	2 800(儿童),16 000(成人)	[12,13]
	SL/mg·(cm^2·d)$^{-1}$	0.2	[14, 15]
	PC/cm·h^{-1}	0.001 8(As)、0.001(Cd)、0.002(Cr)、0.000 6(Cu)、0.001(Hg)、0.000 1(Ni)、0.000 004(Pb)、0.000 6(Zn)、	[16, 17]
暴露行为参数	ABS	0.001	[9,11,14]
	ED/a	6(儿童),24(成人)	[9, 14]
	ET/h·d^{-1}	4	[13]
	EF/d·a^{-1}	180	[14, 18]
	BW/kg	15.9(儿童),62.0(成人)	[13,14,19,20]
	AT/d	ED×365(非致癌) 70×365(致癌)	[9,11,14] [9,11,14]
	CF/kg·mg^{-1}; m^3·cm^{-3}	1×10^{-6}	[11,14, 15]

表 3 重金属不同暴露途径的参考剂量(RfD)和斜率因子(SF)

Table 3 References dose for non-carcinogen metals and slope factors for carcinogen metals

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
RfD_{ing}/mg·(kg·d)$^{-1}$	0.000 3	0.001	0.003	0.04	0.000 3	0.02	0.003 5	0.3
RfD_{inh}/mg·(kg·d)$^{-1}$	0.000 3	0.001	0.000 029	0.04	0.000 3	0.02	0.003 5	0.3
RfD_{derm}/mg·(kg·d)$^{-1}$	0.001 2	0.000 01	0.000 06	0.012	0.000 021	0.005 4	0.000 52	0.06
SF/(kg·d)·mg^{-1}	15.1	6.30	42.0			0.840		

2 结果与分析

2.1 电镀厂周围土壤中重金属分布特征及污染状况

2.1.1 电镀厂周围土壤中重金属含量

两电镀厂周围土壤中重金属含量见表 4. RH 电镀厂周围土壤中 Hg 含量[(0.65 ± 0.38) mg·kg^{-1}]相比 SJ 电镀厂土壤中[(0.22 ± 0.07) mg·kg^{-1}]较高,这可能是由于土壤较低 pH 值有利于有机质对汞的吸附积累[22]. 其它重金属,特别是 Cd、Cu 和 Zn 含量在 SJ 电镀厂周围土壤较高,这可能与其主要从事镀锌有关. 土壤环境质量标准[23]的二级标准是为保障农业生产,维护人体健康的土壤限值. 据土壤环境质量标准和土壤样品 pH 值,土壤样品中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 低于二级标准限定值,而 RH 电镀厂南、北和东面土壤中 Hg 含量超过二级标准限值, SJ 电镀厂东边和西边土壤中 Cu、北边农田土壤中 Zn 超过二级标准限值.

2.1.2 电镀厂周围土壤中重金属污染状况

两个电镀厂周围土壤中重金属的地累积指数(I_{geo})计算结果见表 5. RH 电镀厂周围土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Pb 主要处于无污染水平; RH 电镀厂东边土壤(D)中 Cd 和 Zn、西边土壤(B)中 Ni 和 Zn 处于无污染向中等污染变化状态; 而 Hg 主要处于中等污染状态,特别北边土壤(C)中 Hg 为中等污染至强污染变化程度. SJ 电镀厂周围土壤中 As 和 Cr 主要处于无污染水平; 西边(B)和东边(D)土壤中 Hg 和 Ni 较高,处于无污染向中等污染变化状态; 土壤中 Cd 和 Zn 主要处于中等污染状态,而 Pb 主要处于无污染向中等污染变化状态; 南北两边土壤中 Cu 为无污染向中等污染变化状态,而东西边土壤中 Cu 达到中等污染程度.

表 4　电镀厂周围土壤中重金属含量/mg·kg^{-1}

Table 4　Concentrations of heavy metals in soils around electroplating factories/mg·kg^{-1}

采样点		pH 值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
RH 电镀厂	A	5.80	11.3	0.11	35.7	10.4	0.49	12.6	47.7	73.6
	B	6.22	16.7	0.13	57.3	20.9	0.27	27.5	46.3	118
	C	5.59	10.7	0.08	33.5	9.68	1.16	12.8	63.9	57.9
	D	5.54	11.1	0.23	43.0	22.1	0.66	21.9	48.9	102
SJ 电镀厂	A	7.96	12.4	0.28	43.5	37.2	0.17	25.7	48.3	87.1
	B	8.03	20.4	0.46	56.9	73.5	0.28	31.1	75.1	152
	C	7.95	13.9	0.50	38.9	37.0	0.14	19.0	92.2	231
	D	7.92	19.1	0.57	93.1	81.6	0.27	46.9	84.4	280
广州土壤背景值[1)]			18.4	0.14	60.3	21.8	0.16	18.1	47.1	62.0
二级标准		<6.5	30	0.30	150	50	0.30	40	250	200
		>6.5	25	0.60	200	100	0.50	50	300	250

1)广东省环境监测总站 1990 年公布的广州市土壤背景值

表 5　电镀厂周围土壤中重金属地累积指数

Table 5　Geoaccumulation index (I_{geo}) values of heavy metals in soils around electroplating factories

采样点		I_{geo}							
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
RH 电镀厂	A	−1.29	−0.93	−1.34	−1.65	1.03	−1.11	−0.57	−0.34
	B	−0.72	−0.69	−0.66	−0.65	0.17	0.02	−0.61	0.34
	C	−1.37	−1.39	−1.43	−1.76	2.27	−1.08	−0.14	−0.68
	D	−1.31	0.13	−1.07	−0.57	1.46	−0.31	−0.53	0.13
	Mean	−1.15	−0.61	−1.09	−1.05	1.43	−0.54	−0.45	−0.08
SJ 电镀厂	A	−1.15	0.42	−1.06	0.19	−0.48	−0.08	−0.55	−0.09
	B	−0.44	1.13	−0.67	1.17	0.25	0.20	0.09	0.71
	C	−0.99	1.25	−1.22	0.18	−0.78	−0.51	0.38	1.31
	D	−0.53	1.44	0.04	1.32	0.15	0.79	0.26	1.59
	Mean	−0.75	1.11	−0.64	0.81	−0.15	0.18	0.09	1.01

2.2　电镀厂废气和周围空气中重金属含量

两电镀厂车间废气和周围空气中重金属含量见表 6. 据《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996) 中限值 (Hg ≤ 0.015 mg·m^{-3}、Cd ≤ 1.0 mg·m^{-3}、Pb≤0.90 mg·m^{-3}、Ni≤5.0 mg·m^{-3}),废气中 Cd、Hg、Ni 和 Pb 含量皆低于限值. 不同季节废气中的重金属(除 Pb 外)浓度有明显差异, 10 月时两电镀厂车间废气中 As、SJ 电镀厂废气中 Hg 浓度明显较高,而其它重金属浓度在 5 月时明显较高. 总体而言, 5 月废气中重金属浓度较 10 月高,这可能是由于广州天气因素影响所致:广州 5 月降水较多,空气湿度较大,空气流动性较差,导致排放口废气扩散和空气置换较慢; 广州 10 月降水较少,空气流动性较好,排放口废气被空气稀释较快. As 和 Hg 可能由于易于蒸发而不同.

据表 6 结果,电镀厂附近居民区空气中 As、Cd、Hg 和 Pb 含量低于环境空气质量标准[24]中的相应限值,而 SJ 电镀厂附近居民区空气中 Cr 浓度在 10 月时远高于标准限值,可能存在危害风险. 空气中 Cu、Ni 和 Zn 浓度尚未评价标准. 总体而言, 5 月电镀厂周围空气中重金属浓度较 10 月低,原因可能是 5 月时排放口废气扩散较 10 月慢所致.

2.3　样品中重金属的人体健康风险评价

2.3.1　土壤中重金属人体健康风险评价

电镀厂周围土壤中各重金属经不同途径的单项非致癌指数见图 2 和 3. 从结果可知,在两电镀厂周围土壤中,8 种重金属经手-口摄入途径、呼吸途径和皮肤接触途径的暴露的非致癌风险指数 HQ 和 HI 均 <1,表明电镀厂周围土壤中重金属的非致癌健康风险可以忽略. 电镀厂周围土壤中重金属除 Cr 的 HI 指数部分由 HQ_{derm} 贡献外,其它重金属则主要由 HQ_{ing} 贡献. 土壤中重金属对儿童的 HI 值明显高于对成人 HI 值,As、Cr 和 Pb 的 HI 值较高.

电镀厂周围土壤中各重金属经不同途径的单项致癌风险见图 4. 土壤中各重金属经呼吸途径和皮肤接触途径暴露的致癌风险 (CR_{inh} 和 CR_{derm}) < 10^{-7},土壤中重金属经此两种途径暴露的致癌风险

可以忽略. 土壤中重金属的致癌风险主要是 As 和 Cr 经手-口摄入途径暴露所致,其中 Cr 的 CR_{ing} > 10^{-4},高于最大可接受风险水平,特别是两电镀厂的 B 和 D 两位点对儿童致癌风险达到 10^{-3} 以上; As 在两电镀厂的 B 和 D 位点对于儿童 $CR_{ing} > 10^{-4}$,高于最大可接受风险水平.

表 6 2013 年电镀厂车间废气附近空气中重金属含量/μg·m^{-3}

Table 6 Concentrations of heavy metals in workshop waste gas and ambient air of electroplating factories in 2013/μg·m^{-3}

项目	车间废气				附近位点空气				GB 3095-2012
	RH 电镀厂		SJ 电镀厂		RH 电镀厂		SJ 电镀厂		
采样时间(月-日)	05-08	10-22	05-08	10-22	05-08	10-22	05-08	10-23	
As	1.90	2.90	1.20	3.40	ND[1)]	ND	ND	ND	0.006
Cd	0.21	0.05	0.01	0.01	0.001 2	0.000 7	ND	0.003	0.005
Cr	4.80	0.21	4.30	0.63	ND	ND	ND	0.47	0.000 025
Cu	5.20	0.10	0.80	0.10	ND	ND	0.34	ND	
Hg	4.00	2.90	1.20	6.20	ND	ND	ND	ND	0.05
Ni	6.70	0.02	2.30	1.40	ND	0.087	ND	0.079	
Pb	6.40	6.50	6.50	6.50	ND	0.032	0.053	0.062	0.5
Zn	53	3.50	12	6.20	2.4	2.8	1.2	3.4	
∑	82.21	16.18	28.31	24.44	2.401 2	2.919 7	1.553	3.543	

1)ND: 未检出

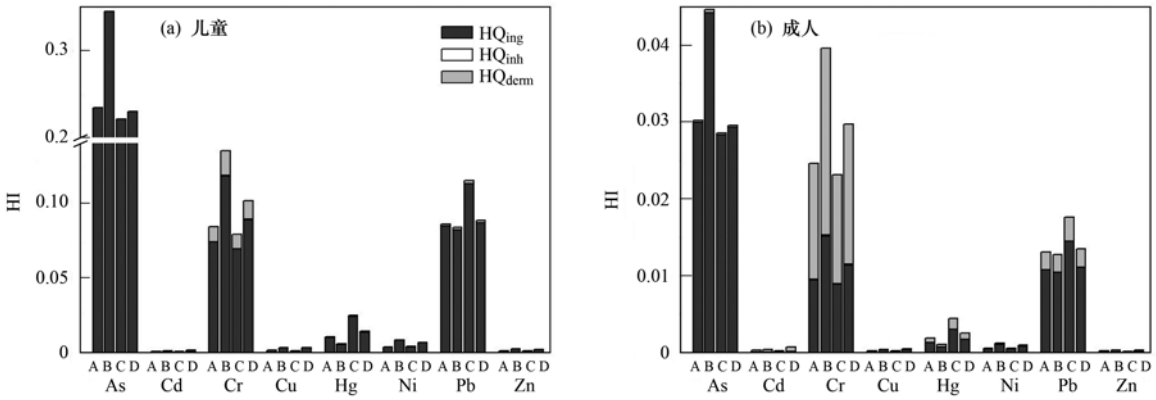


图 2 RH 电镀厂周围土壤中重金属非致癌风险指数

Fig. 2 Hazard quotients (HQs) of heavy metals in soils around the RH electroplating factory

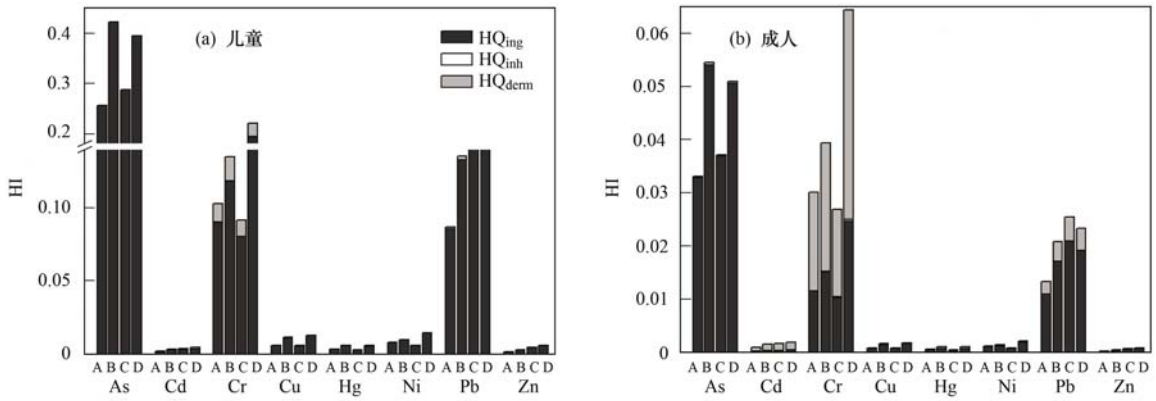


图 3 SJ 电镀厂周围土壤中重金属非致癌风险指数

Fig. 3 Hazard Quotients (HQs) of heavy metals in soils around the SJ electroplating factory

电镀厂周围土壤中重金属经不同途径的总非致癌指数和总致癌风险指数见表 7. 从结果可知,8 种重金属经 3 种暴露途径的 HI < 1,表明两电镀厂周围土壤中重金属非致癌风险可忽略,土壤中重金属不会对电镀厂周围人群产生非致癌健康危害. 然而,两电镀厂周围土壤中重金属经不同途径暴露的总

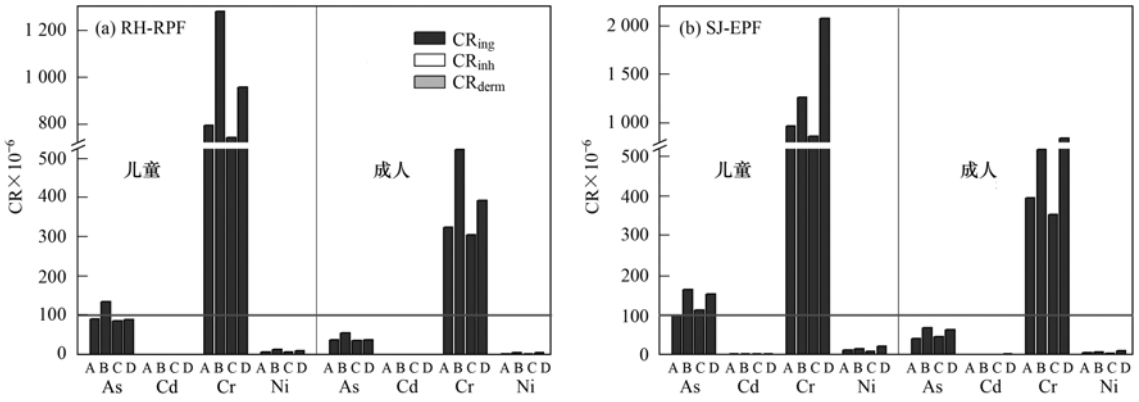


图 4　电镀厂周围土壤中重金属致癌风险

Fig. 4　Cancer Risk (CR) of heavy metals in soils around electroplating factories

致癌风险皆大于 10^{-4}，高于最大可接受风险水平，而且对儿童的总致癌风险明显高于成人. 土壤中重金属的高致癌风险主要由经手-口途径摄入 Cr 的暴露所致(占 TCR 的 81% ~92%)，因此电镀厂周围居住人群在生产和生活活动中，需避免土壤经手-口途径摄入造成健康危害，且儿童更需特别注意.

表 7　电镀厂周围土壤中重金属总非致癌危害指数和总致癌风险

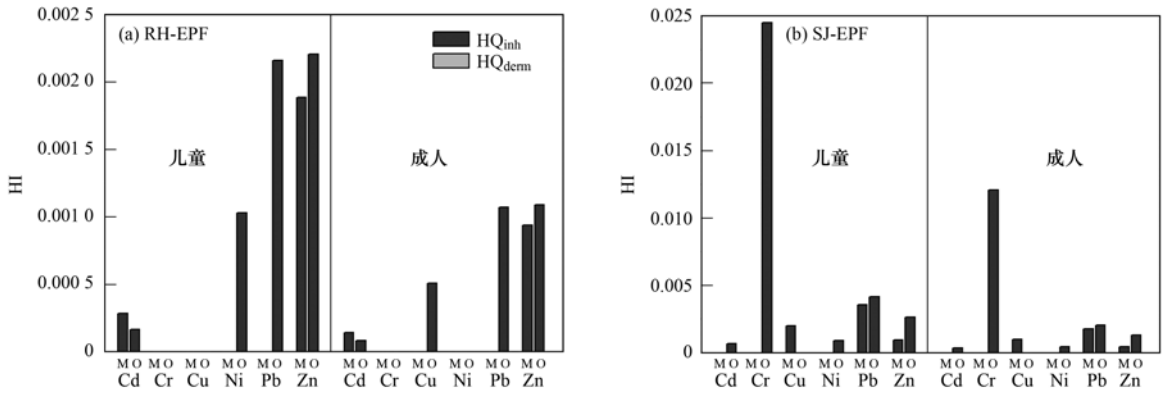
Table 7　Total hazard index (HI) and total cancer risk (TCR) of heavy metals in soils around electroplating factories

电镀厂	类别	项目	A(南边)	B(西边)	C(北边)	D(东边)	$\bar{x}$
RH	儿童	HI	4.23×10^{-1}	5.86×10^{-1}	4.48×10^{-1}	4.49×10^{-1}	4.77×10^{-1}
		TCR	8.94×10^{-4}	1.43×10^{-3}	8.40×10^{-4}	1.06×10^{-3}	1.05×10^{-3}
	成人	HI	7.14×10^{-2}	1.01×10^{-1}	7.52×10^{-2}	7.81×10^{-2}	8.13×10^{-2}
		TCR	3.64×10^{-4}	5.82×10^{-4}	3.43×10^{-4}	4.33×10^{-4}	4.30×10^{-4}
SJ	儿童	HI	4.69×10^{-1}	7.26×10^{-1}	5.69×10^{-1}	8.11×10^{-1}	6.43×10^{-1}
		TCR	1.08×10^{-3}	1.45×10^{-3}	9.91×10^{-4}	2.26×10^{-3}	1.45×10^{-3}
	成人	HI	8.03×10^{-2}	1.21×10^{-1}	9.41×10^{-2}	1.46×10^{-1}	1.10×10^{-1}
		TCR	4.42×10^{-4}	5.91×10^{-4}	4.04×10^{-4}	9.20×10^{-4}	5.89×10^{-4}

2.3.2　空气中重金属人体健康风险评价

电镀厂附近空气中各重金属经不同途径的单项非致癌指数见图 5. 从中可知，在两电镀厂附近空气中，重金属经不同途径暴露的非致癌风险指数 HQ 和 HI 皆 <1，表明电镀厂附近空气中重金属的非致癌健康风险可以忽略. 空气中重金属 HI 主要由经呼吸途径暴露 HQ_{inh} 贡献. 电镀厂附近空气中重金属对儿童的 HI 值也明显高于对成人 HI 值，RH 电镀厂 Pb 和 Zn 的 HI 值较高，SJ 电镀厂 Cr 的 HI 值较高.

电镀厂附近空气中各重金属经不同途径的单项



M：5 月，O：10 月

图 5　电镀厂周围空气中重金属非致癌风险指数

Fig. 5　Hazard Quotients (HQs) of heavy metals in air around electroplating factories

致癌风险见图 6. 空气中重金属经皮肤接触途径暴露的 $CR_{derm} < 10^{-6}$ 可忽略,而空气中 Cr 和 Ni 经呼吸途径暴露 $10^{-6} < CR_{inh} < 10^{-4}$,经呼吸途径暴露的致癌风险低于最大可接受风险水平. Cr 和 Ni 的暴露分别占 TCR 的 62% ~65% 和 26% ~30%,电镀厂附近空气中重金属对成人的 CR 值明显高于对儿童 CR 值.

电镀厂附近空气中重金属经不同途径的总非致癌指数和总致癌风险指数见表 8. 从结果可知,重金属经 2 种暴露途径的 HI < 1、TCR < 10^{-5},表明两电镀厂附近空气中重金属非致癌风险可忽略,总致癌风险低于最大可接受风险水平,且对成人的风险值为儿童的 2 倍. 电镀厂周围居住人群在下风向区域时,建议戴口罩避免空气中灰尘吸入.

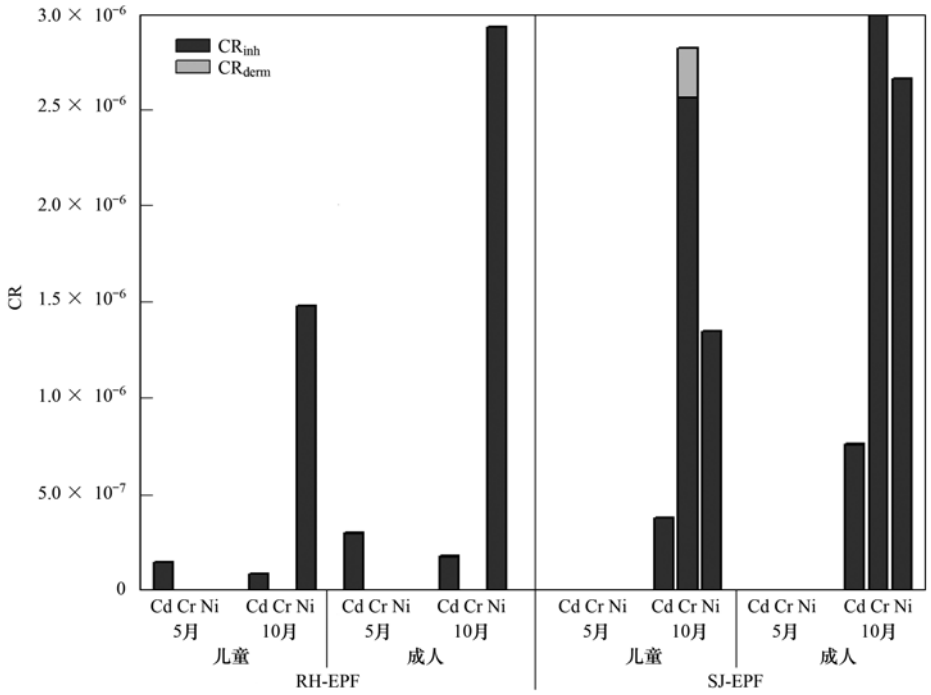


图 6 电镀厂周围空气中重金属致癌风险

Fig. 6 Cancer Risk (CR) of heavy metals in air around electroplating factories

表 8 电镀厂周围空气中重金属总非致癌危害指数和总致癌风险

Table 8 Total hazard index (HI) and total cancer risk (TCR) of heavy metals in air around electroplating factories

采样月份	位点	RH 电镀厂		SJ 电镀厂	
		儿童	成人	儿童	成人
5	HI	2.17×10^{-3}	1.08×10^{-3}	6.53×10^{-3}	3.23×10^{-3}
	TCR	1.50×10^{-7}	3.02×10^{-7}	—[1)]	—
10	HI	5.57×10^{-3}	2.75×10^{-3}	3.30×10^{-2}	1.63×10^{-2}
	TCR	1.57×10^{-6}	3.11×10^{-6}	4.55×10^{-6}	1.01×10^{-5}

1)致癌重金属测定时未检出

3 讨论

RH 电镀厂周围土壤中 Hg 和 SJ 电镀厂周围土壤中 Cd、Cu 和 Zn 污染明显,而附近空气中重金属含量很低,这表明电镀厂对周围土壤经废气或废水污染严重,而经废气对周围空气污染影响较小.

土壤样品在 8 月采集,与 5 月排放的车间废气中污染物浓度显著相关,而受 10 月排放的废气中污染物影响很小. 电镀厂周围土壤中重金属含量与车间废气中重金属浓度有明显相关性(表 9). RH 电镀厂附近 C 位点为荔枝园,由于荔枝树的遮蔽使此位点土壤中重金属受废气中重金属影响相对其它位点较小($r^2 = 0.603\,5$). SJ 电镀厂附近 B 位点由于绿化带植物枝叶遮蔽使此位点与车间废气污染物相关系数相比其它位点较低($r^2 = 0.888\,9$). 除位点植被状况影响外,两电镀厂南边 A 位点土壤中重金属与车间废气中重金属相关系数稍低,这可能由广州 5 ~8 月期间风向主要为偏南风所致.

表 9　土壤中重金属含量与车间废气重金属浓度相关系数(r^2)[1)]

Table 9　Correlation coefficients (r^2) between value of ambient soils and workshop waste gas

项目	排放月份	采样点			
		A	B	C	D
RH 电镀厂车间废气	5	0.808 4	0.889 6	0.603 5	0.888 5
	10	0.518 8	0.309 7	0.669 1	0.388 8
SJ 电镀厂车间废气	5	0.915 5	0.888 9	0.962 5	0.924 6
	10	0.317 4	0.330 4	0.519 6	0.345 1

1) $P < 0.05$

两电镀厂周围土壤中重金属非致癌和致癌危害风险主要由手-口摄入途径和皮肤接触途径贡献，而电镀厂周围空气中重金属的人体健康危害风险主要由呼吸途径贡献，这为电镀厂周围环境中重金属人体健康风险评价的暴露途径提供了方法.

由 Pearson 相关分析($P < 0.05$)，废气中重金属排放总量废气中重金属含量与土壤中重金属污染明显相关，但与空气中重金属总非致癌指数($\sum$HI)、总致癌风险(TCR)不存在明显相关性，这可能与废气中重金属在土壤表层易于沉积，而在空气中不易长期驻留有关[25].

主成分分析可用来分析土壤中重金属的化学行为和来源相关性[26]. 据主成分分析(图 7)，对于 RH 电镀厂，PC1 解释结果的 73.5%，土壤中处于无污染状态的 As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 在 PC1 有较高的负载；PC2 解释了结果的 16.2%，土壤中具有高致癌风险的 Cr 在 PC2 上有较高负载；达到中等污染的 Hg 在 PC1 和 PC2 上都无较高负载，它的来源可能与其它重金属不同. 对于 SJ 电镀厂，PC1 和 PC2 分别解释结果的 67.7% 和 24.2%，As、Cr、Cu、Hg 和 Ni 在矩阵中聚集分布，它们含量密切相关；而在土壤中达到中等污染的 Cd、Pb 和 Zn 在 PC2 都有较高负载，表明它们来源相似，可能由 SJ 电镀厂镀锌产生的废水和废气中 Cd、Pb 和 Zn 污染造成.

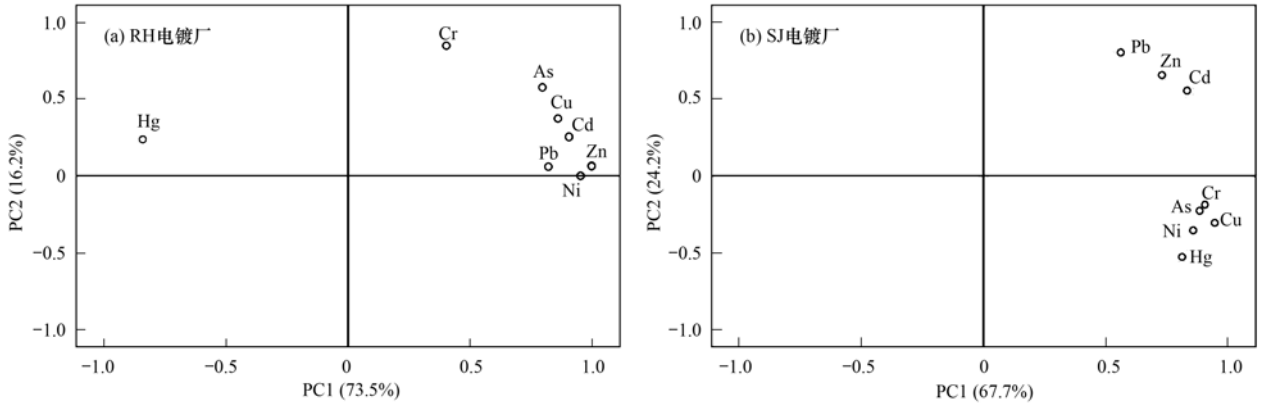


图 7　电镀厂周围土壤中重金属主成分分析

Fig. 7　Principal component analysis of heavy metals in soils around electroplating factories

在暴露量计算过程中，需要考虑污染物的生物可利用性这一因素，现阶段的研究通常是直接将利用强提取剂溶解的污染物含量(即所谓总量)作为计算暴露量的基础数据，而不考虑在人体中的生物可利用性，在计算风险商的时候往往可能会出现风险过高评估的情况. 因此如何正确地评估特定场地污染物的生物有效性对准确评价风险尚具有重要意义[15].

4　结论

(1)电镀厂周围土壤中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 低于二级标准限定值，部分位点土壤中 Cu、Hg 和 Zn 含量超过二级标准限值. RH 电镀厂周围土壤中 Hg 达到中等污染程度，SJ 电镀厂周围土壤中 Cd 和 Zn 为中等污染. 土壤中重金属含量与车间废气中重金属浓度密切相关.

(2)电镀厂车间废气排放口废气中 Pb 和 Hg 含量高于《大气污染物综合排放标准》限值，Hg 含量为限值 100 ~ 400 倍. 电镀厂附近居民区秋季空气中 Cr 含量高于环境空气质量标准限值，电镀厂车间废气中的重金属浓度在不同季节有明显差异.

(3)土壤中重金属经手-口摄入途径、呼吸途径

和皮肤接触途径暴露的非致癌健康风险可以忽略.土壤中重金属经呼吸途径和皮肤接触途径暴露的致癌风险可以不予考虑,但经手-口摄入途径暴露所致致癌风险(As 和 Cr)高于最大可接受风险水平.

(4)电镀厂附近空气中重金属经不同途径暴露的非致癌健康风险可以忽略.空气中重金属经皮肤接触途径暴露的致癌风险可以忽略,经呼吸途径暴露的致癌风险(Cr 和 Ni)虽然低于最大可接受风险水平,但要予以考虑.

参考文献:

[1] Liu T Y, Yang X, Wang Z L, *et al*. Enhanced chitosan beads-supported Fe^0-nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating wastewater in permeable reactive barriers [J]. Water Research, 2013, **47**(17): 6691-6700.

[2] 陈志良, 赵述华, 周建民, 等. 典型电镀污染场地重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(10): 1-4, 11.

[3] 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.

[4] 杭小帅, 王火焰, 周健民, 等. 电镀厂附近土壤重金属污染特征及其对微生物与酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(11): 2133-2138.

[5] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.

[6] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuijp T J, *et al*. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 843-853.

[7] Li Z G, Feng X B, Li G H, *et al*. Distributions, sources and pollution status of 17 trace metal/metalloids in the street dust of a heavily industrialized city of central China [J]. Environmental Pollution, 2013, **182**: 408-416.

[8] Wei X, Gao B, Wang P, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **112**: 186-192.

[9] US EPA. Risk assessment guidance for superfund, Vol. I: Human health evaluation manual (Part A) [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.

[10] US EPA. Risk assessment guidance for superfund, Vol. I: Human health evaluation manual (Part B, Development of risk-based preliminary remediation goals) [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1991.

[11] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2002.

[12] US EPA. Risk assessment guidance for superfund (RAGS), Vol. I: Human health evaluation manual (part E, Supplemental guidance from dermal risk assessment) interim [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2004.

[13] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.

[14] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. Atmospherc Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.

[15] 张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 等. 青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 [J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2736-2741.

[16] US EPA. EPA/600/8-91/011B. Dermal exposure assessment: Principle and applications [EB/OL]. http://www.epa.gov, 1992.

[17] 段小丽, 王宗爽, 李琴, 等. 基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1329-1339.

[18] Hu X, Zhang Y, Ding Z H, *et al*. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and $PM_{2.5}$ in Nanjing, China[J]. Atmospheric Environment, 2012, **57**: 146-152.

[19] 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 等. 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 [J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1667-1678.

[20] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al*. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 143-153.

[21] Hsiao H W, Ullrich S M, Tanton T W. Burdens of mercury in residents of Temirtau, Kazakhstan: Ⅱ: Verification of methodologies for estimating human exposure to high levels of Hg pollution in the environment [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(19): 4033-4044.

[22] Xu J Y, Kleja D B, Biester H, *et al*. Influence of particle size distribution, organic carbon, pH and chlorides on washing of mercury contaminated soil [J]. Chemosphere, 2014, **109**: 99-105.

[23] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].

[24] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].

[25] Gunawardena J, Ziyathb A M, Egodawattab P, *et al*. Sources and transport pathways of common heavy metals to urban road surfaces [J]. Ecological Engineering, 2015, **77**: 98-102.

[26] Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2575-2585.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 9

Sep. 15, 2015

CONTENTS

Estimation of $PM_{2.5}$ Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations ····· XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)

Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in $PM_{2.5}$ in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon ····· DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, *et al.* (3128)

Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ and Gas-Particle Partitioning in Qingdao ····· ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, *et al.* (3135)

Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing ····· HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, *et al.* (3144)

Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015 ····· CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, *et al.* (3150)

Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai ····· WANG Hong-li (3159)

Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter ····· CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, *et al.* (3168)

A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery ····· GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, *et al.* (3175)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu ····· YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, *et al.* (3186)

Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei ····· YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, *et al.* (3194)

Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island ····· WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, *et al.* (3203)

Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area ····· LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, *et al.* (3212)

Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}C_{DIC}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River ····· HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, *et al.* (3220)

Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City ····· ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, *et al.* (3230)

Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China ····· CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, *et al.* (3238)

Physiological Effect of *Vallisneria natans* Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol ····· HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, *et al.* (3248)

Effects of Algicidal Substance on *Phaeocystis globosa* and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment ····· YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, *et al.* (3255)

Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions ····· LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, *et al.* (3262)

Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts ····· LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, *et al.* (3269)

Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes ····· ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, *et al.* (3278)

Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results ····· LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, *et al.* (3285)

Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water ····· WU Yue, WU Chun-de, LIU Lü-gang, *et al.* (3292)

XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment ····· WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, *et al.* (3298)

AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries ····· SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, *et al.* (3304)

Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production ····· QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, *et al.* (3311)

A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater ····· SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, *et al.* (3319)

Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System ····· KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, *et al.* (3329)

Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community ····· ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, *et al.* (3339)

Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducting Anaerobic Ammonium Oxidation ····· LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, *et al.* (3345)

Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge ····· LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (3352)

Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An *In-situ* Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River ····· SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, *et al.* (3358)

Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH_4 and N_2O Emission from Double-Season Rice Paddy Field ····· FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, *et al.* (3365)

Characteristics of N_2, N_2O, NO, CO_2 and CH_4 Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil ····· CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, *et al.* (3373)

Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau ····· CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, *et al.* (3383)

Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region ····· GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, *et al.* (3393)

Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During *In-situ* Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia ····· NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, *et al.* (3401)

Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification ····· HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, *et al.* (3411)

Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jianghan Plain: A Case Study of Qianjiang City ····· WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, *et al.* (3422)

Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain ····· LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)

Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China ····· NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, *et al.* (3438)

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment ····· GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, *et al.* (3447)

Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil ····· LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, *et al.* (3457)

Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil ····· ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, *et al.* (3464)

Influence of *Mirabilis jalapa* Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil ····· JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, *et al.* (3471)

Al^{3+} Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi ····· WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, *et al.* (3479)

Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China ····· YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, *et al.* (3486)

Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing ····· SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, *et al.* (3493)

Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables ····· LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, *et al.* (3501)

Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V_2O_5-WO_3/TiO_2 Catalyst and Activated Carbon ····· REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, *et al.* (3508)

Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services ····· LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, *et al.* (3515)

Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China ····· JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, *et al.* (3522)

Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil ····· SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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　刘　毅　汤鸿霄　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）

2015 年 9 月 15 日　第 36 卷　第 9 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 9　Sep. 15, 2015

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：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行