

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

**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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 ..... 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM<sub>2.5</sub> 碳组分来源分析 ..... 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 ..... 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 ..... 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 ..... 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 ..... 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 ..... 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 ..... 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 ..... 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化和季节变化 ..... 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 ..... 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放特征 ..... 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 ..... 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 ..... 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 ..... 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 ..... 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 ..... 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 ..... 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 ..... 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 ..... 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 ..... 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 ..... 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 ..... 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 ..... 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 ..... 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 ..... 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 ..... 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 ..... 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 ..... 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 ..... 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 ..... 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 ..... 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 ..... 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 ..... 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 ..... 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 ..... 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 ..... 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 ..... 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 ..... 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 ..... 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 ..... 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 ..... 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 ..... 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 ..... 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 ..... 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 ..... 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 ..... 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 ..... 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 ..... 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 ..... 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 ..... 宋彩霞, 邓新平, 厉阗, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 ..... 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 ..... 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 ..... 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 ..... 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

# 基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价

陈星<sup>1</sup>, 马建华<sup>1\*</sup>, 李新宁<sup>2</sup>, 刘德新<sup>1</sup>, 李一蒙<sup>1</sup>

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 开封市环境监测站, 开封 475000)

**摘要:** 以河南省某市不同类型的棕地居民小区为研究对象, 采集土壤样品, 测定重金属 (As、Hg、Cd、Pb) 含量, 采用美国环境保护署 (US EPA) 推荐的健康风险模型对其展开健康风险评价。结果表明, 棕地居民小区土壤重金属含量和健康风险比原棕地有了明显改善, 但均高于非棕地居民小区; 各小区土壤重金属的 HQ 和 HI 均小于 1, 不存在非致癌健康风险; CR 和 TCR 略超过 US EPA 推荐的土壤治理标准, 但低于一些专家所提出的宽松标准, 存在致癌风险的可能; 儿童 4 种重金属的 HI 大于成人, 约相当于成人的 7 倍左右。HQ<sub>As</sub> 对 HI 的贡献率在 75% 左右, CR<sub>As</sub> 对 TCR 的贡献率在 80% 左右, As 是最主要的非致癌和致癌风险因子。

**关键词:** 棕地; 重金属; 健康风险; 评价; 居民小区

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1068-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.035

## Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields

CHEN Xing<sup>1</sup>, MA Jian-hua<sup>1</sup>, LI Xin-ning<sup>2</sup>, LIU De-xin<sup>1</sup>, LI Yi-meng<sup>1</sup>

(1. Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Kaifeng Environmental Monitoring Station, Kaifeng 475000, China)

**Abstract:** Nine residential communities which were built on different brownfields in a city of Henan Province were chosen to investigate the health risks of heavy metals (As, Hg, Cd, and Pb) in surface soils. Concentrations of soil heavy metals were measured according to the methods described in the national standard. Based on the health risk models recommended by the U. S. Environmental Protection Agency (US EPA), non-carcinogenic and carcinogenic health risks of soil heavy metals were assessed. The results showed that compared with the original brownfields, the heavy metal concentrations in soils and their health risks in residential communities built on brownfields were significantly improved, and the concentrations and health risks of soil heavy metals in these communities were all higher than those in non-brownfield residential communities. The HQ and HI values of soil heavy metals in all the residential communities were lower than 1, which indicated that there was no non-carcinogenic risk in these communities. Meanwhile, the values of CR and TCR were slightly higher than the standard suggested by the US EPA, indicating that slight carcinogenic risks in the communities, but these values were lower than the lenient standard proposed by some experts. The HI value of the four metals for children was exactly seven times higher than that for adults. The contribution rate of HQ<sub>As</sub> to HI was about 75%, CR<sub>As</sub> to TCR was about 80%, and therefore arsenic was the crucial factor for carcinogenic and non-carcinogenic risk in the residential communities of the city.

**Key words:** brownfield; heavy metals; health risk; assessment; residential community

随着我国经济和城市化的飞速发展, 很多城市开始了工业结构调整以及城市用地结构转换, 许多高污染企业通过关闭、破产或异地迁建等途径退出主城区。原先的这些企业由于生产工艺比较落后、设备老化、“三废”处理系统不完善等原因, 其废弃场地可能存在不同程度的重金属污染。1980 年美国通过的《环境应对、赔偿和责任综合法》将此类废弃及未充分利用的工业用地, 称为棕地 (Brownfields)<sup>[1]</sup>。由于棕地的地理位置优越, 几乎都被开发利用, 其中大部分被开发为住宅小区。虽然棕地的再开发可以为社会提供更多的就业岗位、提高税收、控制城市扩张<sup>[2]</sup>, 但有一些棕地未经严格处理, 导致再利用土地的土壤仍然存在一

定污染, 危害居民的健康。例如, 美国的“拉夫运河事件”<sup>[3]</sup> 和荷兰 Lekkerker 事件<sup>[4]</sup> 等。近些年来, 我国媒体也多次报道棕地再利用引起的公众健康危害事件<sup>[5]</sup>。

西方国家在棕地风险管理与修复方面起步较早, 取得了很多研究成果<sup>[6, 7]</sup>, 一些国家不仅建立了较为完善的棕地管理体系、相关法律和技术规范, 而且实现了棕地管理的信息化和网络化。我国在这

收稿日期: 2013-07-30; 修订日期: 2013-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171409, 41201211); 教育部高等学校博士学科点专项科研项目 (20104103110001)

作者简介: 陈星 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境污染与防治, E-mail: chenxing05281988@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: mjh@henu.edu.cn

方面的研究尚处于起步阶段,有关法律法规和技术标准还不健全,也没有形成完善的污染场地管理体系<sup>[4, 5, 8]</sup>。近些年来,我国十分重视棕地再开发利用的环境安全问题。原国家环境保护总局于 2004 年颁布了《关于切实做好企业搬迁过程中污染防治工作的通知》,2012 年环境保护部等 4 部联合下发了《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》,污染场地风险评估、土壤修复、环境监测技术导则等有关标准正在征求意见当中。我国部分学者也开展过一些棕地风险评估与修复研究<sup>[9~21]</sup>,但这些研究主要集中在棕地现状污染和风险评价方面,对其用途转换后是否仍然存在健康风险却鲜见报道。实际上,棕地修复可能存在技术层面的局限性或施工方面的不规范性、以及用途转换后环境条件的改变和污染物的迁移转化等原因,再利用棕地

也可能仍然存在一定的健康风险危害。本研究以河南省某市为例,采集在棕地上所建居民小区(以下简称棕地小区)土壤样品,测定重金属(As、Hg、Pb、Cd)含量,借助美国环保署(US EPA)推荐的健康风险评估模型开展健康风险评价,旨在为小区居民提供健康保证,并为我国棕地利用管理、修复等相关技术导则的完善提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集

通过对河南省某市一些棕地小区的走访调查,结合原棕地企业的生产状况,按照我国国民经济行业分类,本研究共选择在 4 类工业棕地上开发建设的 6 个棕地小区和 3 个对照区作为采样对象,各小区简况见表 1。

表 1 各采样小区简况表

Table 1 Introduction of the sampling sites

采样小区	建厂时间	编号	小区建成时间	面积/hm <sup>2</sup>	修复状况	
纺织类	毛纺厂	1981 年	YH	2006 年	7.94	客土覆盖
	印染厂	1962 年	XH	2009 年	1.93	客土修复
印刷类	印刷厂	1978 年	WY	2011 年	4.00	客土覆盖
化工类	日化厂	1955 年	TX	2010 年	7.85	客土修复
设备制造类	锅炉厂	1968 年	DS	2008 年	3.40	客土覆盖
	通用机械厂	1953 年	XT	2003 年	1.53	客土覆盖
对照区 <sup>1)</sup>	— <sup>2)</sup>	D1	2009 年	6.70	无修复	
	— <sup>2)</sup>	D2	2006 年	2.58	无修复	
	1953 年	D3	— <sup>3)</sup>	1.13	无修复	

1) D1 是由农用地转换而来的居民小区, D2 是由老住宅用地改造而来的居民小区, D3 是某通用机械厂改建而成的仓库区; 2) 非棕地居民小区, 无建厂时间; 3) 厂房改为仓库, 无小区建成时间

除采样区 D3 只有 1 片绿地, 布设 1 个采样单元外, 其他小区均随机布设 5 个采样单元。在每个采样单元 2 m<sup>2</sup> 范围内, 按“梅花形”布设 5 个采样点, 用不锈钢铲取表层(0~20 cm) 土样 100 g 左右, 拣出植物残体和砖瓦块后将其充分混合, 作为该采样单元的土壤样品。本研究共采集土壤混合样品 41 个。

### 1.2 土壤重金属测定方法

在实验室, 将土壤样品风干, 用木棒撵碎, 多点(30 点左右) 取样约 50 g, 用玛瑙研钵研磨, 全部通过 100 目(0.15 mm) 尼龙筛。土壤 As、Hg 含量采用 DB51/T 836-2008 方法测定, 仪器是 AFS-930 型原子荧光光度计(北京)。土壤 Pb、Cd 采用 GB/T 17138-1997 方法消解, 用 ICP-OES 法测定其含量, 仪器是 X Series 2 型电感耦合等离子体质谱仪(德国)。在测定过程中, 用国家标准土样 GSS-8 和 GSS-3 分别对 As、Hg 测定进行质量控制, 用 ESS-2 对 Cd、Pb 测定进行质量控制, 加标回收率在

95.2%~105.1% 之间。

### 1.3 土壤重金属健康风险评价模型

#### 1.3.1 土壤重金属暴露模型

As、Hg、Cd 和 Pb 都具有慢性非致癌健康风险, 其中 As 和 Cd 同时还具有致癌风险。土壤中的这些重金属可通过手-口摄入、皮肤接触和吸入 3 种暴露途径进入人体, 从而带来健康风险。3 种暴露途径致癌(成人) 和非致癌(成人和儿童) 重金属的日均暴露量按下式计算<sup>[22~25]</sup>:

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

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

$$ADD_{derm} = \frac{c \cdot SA \cdot CF \cdot SL \cdot ABS \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad (3)$$

式中,  $ADD_{ing}$ 、 $ADD_{inh}$ 、 $ADD_{derm}$  分别为摄入、吸入和皮肤接触途径的重金属日均暴露量,

$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $c$  为土壤重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\text{IngR}$  为摄入土壤的频率,  $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\text{InhR}$  为呼吸频率,  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\text{CF}$  为转换系数,  $\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$ ;  $\text{EF}$  为暴露频率,  $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $\text{ED}$  为暴露年限,  $\text{a}$ ;  $\text{BW}$  为平均体重,  $\text{kg}$ ;  $\text{AT}$  为重金属平均暴露时间,  $\text{d}$ ;  $\text{PEF}$  为灰尘排放因子,  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\text{SA}$  为暴露皮肤表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $\text{SL}$  为皮肤黏着度,  $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $\text{ABS}$  为皮肤吸收因子, 无量纲。

儿童致癌重金属不同暴露途径的终生日平均暴露量分别按下式计算<sup>[23, 26]</sup>:

$$\text{LADD}_{\text{ing}} = \frac{c \cdot \text{CF} \cdot \text{EF}}{\text{AT}} \times \left( \frac{\text{IngR}_{\text{child}} \cdot \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{IngR}_{\text{adult}} \cdot \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (4)$$

$$\text{LADD}_{\text{inh}} = \frac{c \cdot \text{EF}}{\text{PEF} \cdot \text{AT}} \times \left( \frac{\text{InhR}_{\text{child}} \cdot \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \cdot \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (5)$$

$$\text{LADD}_{\text{derm}} = \frac{c \cdot \text{CF} \cdot \text{EF} \cdot \text{SL} \cdot \text{ABS}}{\text{AT}} \times \left( \frac{\text{SA}_{\text{child}} \cdot \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{SA}_{\text{adult}} \cdot \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (6)$$

式中,  $\text{LADD}_{\text{ing}}$ 、 $\text{LADD}_{\text{inh}}$ 、 $\text{LADD}_{\text{derm}}$  分别为基于人体生命周期的摄入、吸入和皮肤接触暴露途径的重金属终生日平均暴露量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $\text{InhR}_{\text{child}}$  和  $\text{InhR}_{\text{adult}}$  分别为儿童和成人的呼吸频率,  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\text{ED}_{\text{child}}$  和  $\text{ED}_{\text{adult}}$  分别为儿童和成人的暴露年限,  $\text{a}$ ;  $\text{BW}_{\text{child}}$  和  $\text{BW}_{\text{adult}}$  分别为儿童和成人的平均体重,  $\text{kg}$ ; 其他符号的意义同式(1)~(3)。

参考我国场地环境评价导则 (DB11/T 656-2009) 以及国内外相关研究成果<sup>[23~28]</sup>, 式(1)~(6) 中的参数取值如下:  $\text{IngR}_{\text{adult}}$  为  $100 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\text{IngR}_{\text{child}}$  为  $200 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\text{CF}$  为  $1 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}$ ,  $\text{EF}$  为  $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $\text{BW}_{\text{adult}}$  为  $53.1 \text{ kg}$ ,  $\text{BW}_{\text{child}}$  为  $15 \text{ kg}$ ,  $\text{InhR}_{\text{adult}}$  为  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\text{InhR}_{\text{child}}$  为  $7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\text{PEF}$  为  $1.36 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\text{SA}_{\text{adult}}$  为  $4350 \text{ cm}^2$ ,  $\text{SA}_{\text{child}}$  为  $1600 \text{ cm}^2$ ,  $\text{SL}$  为  $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ,  $\text{ABS}$  为  $0.001$ 。

表 2 土壤重金属不同暴露途径的 RfD 和 SF<sup>1)</sup>

Table 2 Reference dose for non-carcinogenic metals and slope factors for carcinogenic metals

重金属	RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$			SF/ $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$		
	手-口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	手-口摄入	皮肤接触	呼吸吸入
As	3E-04	3E-04	1.23E-04	1.5	1.5	4.3E-03
Hg	3E-04	2.4E-05	3E-04	n. a.	n. a.	n. a.
Cd	1E-03	1E-05	1E-03	6.1	6.1	1.8E-03
Pb	3.5E-03	5.25E-04	3.52E-03	n. a.	n. a.	n. a.

1) n. a.: Hg 和 Pb 属于非致癌重金属, 没有 SF 数据

在暴露量计算中, 致癌和非致癌重金属的 AT 取值不同. 在计算非致癌重金属暴露量时, 成人和儿童的平均 ED 分别设为  $24 \text{ a}$  和  $6 \text{ a}$ <sup>[23, 26]</sup>, 故其 AT 分别为  $24 \times 365 \text{ d}$  和  $6 \times 365 \text{ d}$ . 在计算致癌重金属暴露量时, 成人的平均 ED 为  $24 \text{ a}$ ; 计算儿童的致癌重金属暴露量时, 先将单独个体儿童和成年阶段的暴露量加权平均, 其最大平均 ED 为  $30 \text{ a}$  (其中儿童期为  $6 \text{ a}$ , 成人期  $24 \text{ a}$ ), 再将暴露量平均分配到整个生命期 ( $70 \text{ a}$ ), 成人与儿童的致癌重金属暴露量 AT 均取值为  $70 \times 365 \text{ d}$ .

### 1.3.2 健康风险表征模型

根据本研究的重金属数量和暴露途径, 土壤非致癌和致癌重金属的健康风险表征模型为<sup>[22~25, 27]</sup>:

$$\text{HQ}_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\text{ADD}_{ij}}{\text{RfD}_{ij}} \quad (7)$$

$$\text{HI} = \sum_{i=1}^4 \text{HQ}_i \quad (8)$$

$$\text{CR}_i = \sum_{j=1}^3 \text{ADD}_{ij} \cdot \text{SF}_{ij} \quad (9)$$

$$\text{TCR} = \sum_{i=1}^2 \text{CR}_i \quad (10)$$

式中,  $\text{HQ}_i$  为非致癌重金属  $i$  的单项健康风险指数;  $\text{ADD}_{ij}$  为非致癌重金属  $i$  第  $j$  种暴露途径的日均暴露量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $\text{RfD}_{ij}$  为非致癌重金属  $i$  第  $j$  种暴露途径的参考剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $\text{HI}$  为 4 种重金属通过 3 种暴露途径所致的非致癌总风险指数;  $\text{CR}_i$  为致癌重金属  $i$  的单项健康风险指数;  $\text{SF}_{ij}$  为致癌重金属  $i$  第  $j$  种暴露途径的斜率系数,  $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ ;  $\text{TCR}$  为 As 和 Cd 通过 3 种暴露途径所致的致癌总风险指数. 当  $\text{HQ}_i$  或  $\text{HI} < 1$  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. US EPA 推荐的 CR 和 TCR 的土壤治理标准为  $10^{-6}$ , 也有专家认为当其在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  之间时也是可以接受的<sup>[22~25, 28]</sup>.

参考我国场地环境评价导则 (DB11/T 656-2009) 以及国内外相关研究成果<sup>[24, 27~29]</sup>, 各种暴露途径的 RfD 和 SF 参见表 2.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属含量特征

各采样区土壤 As、Hg、Cd 和 Pb 含量统计见表 3, 不同类型小区土壤重金属平均含量的对比见图 1 和图 2. 由表 3、图 1 和图 2 可见, 各小区土壤重金属含量具有以下特点: 第一, 除 XH、TX 和 D1 的土壤 Pb 含量、XT 的 Hg 含量低于参考背景值外, 其他小区重金属含量均高于背景值; 就平均含量来看, 各小区的 4 种重金属含量均高于背景值. 第二, 各

棕地小区土壤 As 含量普遍高于非棕地对照小区 (D1 和 D2), 多数棕地小区 Cd 含量也高于对照区; 虽然多数棕地小区的 Hg 和 Pb 含量低于对照区, 但其平均含量仍高于对照区. 第三, 除原棕地对照区 (D3) 土壤 As 含量低于部分棕地小区外, 其他重金属含量均高于棕地小区和非棕地对照小区. 第四, 除老住宅区改造的居民小区 (D2) 土壤 Pb 含量高于耕地所建小区 (D1) 外, 其他重金属含量差别不大. 第六, 某通用机械厂的棕地对照区 (D3) 的重金属含量均高于其所建居民小区 (XT).

表 3 各小区 ( $n=5$ ) 土壤重金属含量统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Statistics of soil metal contents ( $n=5$ ) in different communities/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	项目	纺织类		印刷类	化工类	设备制造类		对照区			参考背景值 <sup>1)</sup>
		YH	XH	WY	TX	DS	XT	D1	D2	D3 <sup>2)</sup>	
As	最大值	20.19	9.95	9.76	9.93	10.69	9.39	7.06	7.17	—	
	最小值	8.40	4.70	7.17	6.67	8.70	5.91	4.78	5.00	—	
	平均值	11.53	7.31	8.36	8.42	9.51	7.40	5.72	5.96	8.12	4.93
	SD	4.90	1.89	1.12	1.21	0.81	1.18	0.88	0.87	—	
	Cv/%	42.50	25.86	13.40	14.37	8.52	15.95	15.38	14.60	—	
Hg	最大值	0.14	0.05	0.10	2.07	0.61	0.26	0.31	0.18	—	
	最小值	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.04	—	
	平均值	0.06	0.02	0.06	0.33	0.06	0.09	0.09	0.10	0.67	0.04
	SD	0.04	0.02	0.03	0.10	0.23	0.82	0.12	0.05	—	
	Cv/%	66.67	100.00	50.00	30.30	383.33	248.48	133.33	50.00	—	
Cd	最大值	0.61	0.49	0.93	0.62	0.75	0.47	0.58	0.47	—	
	最小值	0.35	0.28	0.42	0.38	0.40	0.36	0.33	0.26	—	
	平均值	0.44	0.41	0.63	0.50	0.48	0.42	0.43	0.36	0.74	0.23
	SD	0.11	0.08	0.19	0.05	0.14	0.11	0.09	0.07	—	
	Cv/%	25.00	19.51	30.16	10.00	29.17	22.00	20.93	19.44	—	
Pb	最大值	24.18	13.23	29.82	22.25	52.81	130.28	11.24	49.89	—	
	最小值	12.15	4.14	8.70	7.71	13.03	11.22	3.41	13.99	—	
	平均值	17.15	7.35	18.10	12.62	25.37	39.02	8.09	25.57	60.42	13.90
	SD	5.05	3.18	7.61	4.98	15.33	47.22	3.10	15.74	—	
	Cv/%	29.45	43.27	42.04	39.46	60.43	121.01	38.32	61.56	—	

1) 土壤重金属背景参考值根据文献[30,31]统计得到, 土壤 As、Hg、Cd 和 Pb 的统计样本数分别是 6、4、4、4; 2) 由于 D3 只有 1 块绿地, 无统计意义, 故没有统计数据

虽然在棕地基础上建造居民小区时, 采用了客土回填或覆盖, 但可能存在清除污染土壤不彻底, 原棕地残留的重金属可随着土壤毛管上升水到达土壤表层, 发生一定程度的富集, 因此出现了棕地小区土壤重金属含量高于非棕地对照小区的现象. 不同棕地小区由于其转换前的产品性质不同, 导致各棕地小区的重金属含量出现差异. 例如, 在对原某毛纺厂的职工走访中了解到, 纺织品需要使用含有 As 的染料进行染色, 这可能是 YH 小区土壤 As 含量较高的原因. 老住宅改造的居民小区 (D2) 土壤 Pb 含量较高的原因可能与生活垃圾以及房屋油漆涂料中含

有 Pb 有关<sup>[32]</sup>.

### 2.2 小区土壤重金属非致癌健康风险评价

根据表 3 数据, 按照式(1)~(8)分别计算得到成人和儿童经摄入、皮肤接触和吸入途径的重金属单项非致癌健康风险指数 (HQ) 和非致癌风险总指数 (HI), 结果见表 4 和表 5. 由表 4 和表 5 可见, 9 个小区 4 种重金属对儿童和成人的 HQ 以及 HI 均小于 1, 不存在非致癌健康风险. 由于儿童的体重较轻且其通过手-口摄入暴露重金属的摄入频率比成人更高<sup>[23]</sup>, 故重金属对儿童的 HI 大于成人, 约相当于成人的 7 倍左右, 这与已有研究结果相一致<sup>[33]</sup>.

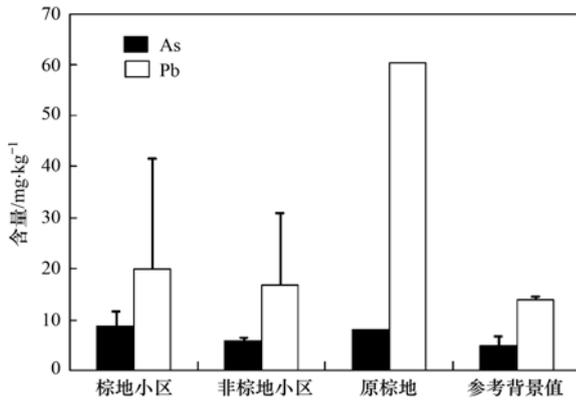


图1 不同类型小区 As 和 Pb 平均含量对比

Fig. 1 Average contents of soil As and Pb in different communities

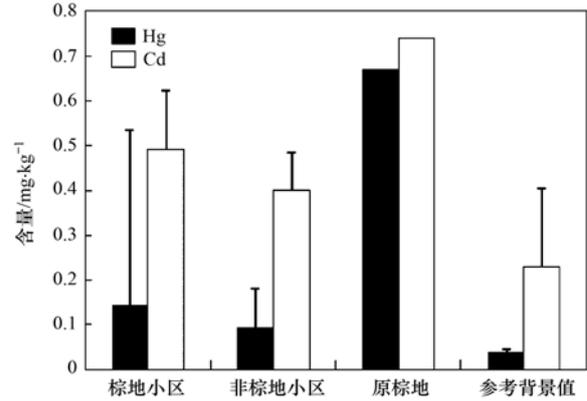


图2 不同类型小区 Hg 和 Cd 平均含量对比

Fig. 2 Average contents of soil Hg and Cd in different communities

表4 儿童非致癌风险指数与致癌风险

Table 4 Indexes of non-carcinogenic risk and carcinogenic risk for children

小区	HQ				HI	CR		TCR
	HQ <sub>As</sub>	HQ <sub>Hg</sub>	HQ <sub>Cd</sub>	HQ <sub>Pb</sub>		CR <sub>As</sub>	CR <sub>Cd</sub>	
TX	0.39	4.01E-03	6.54E-03	4.86E-02	0.45	2.34E-05	4.63E-06	2.80E-05
DS	0.42	2.78E-03	7.37E-03	9.77E-02	0.53	2.56E-05	5.22E-06	3.09E-05
YH	0.51	2.51E-03	6.84E-03	6.60E-02	0.59	3.11E-05	4.85E-06	3.59E-05
WY	0.37	2.57E-03	9.81E-03	6.97E-02	0.45	2.25E-05	6.95E-06	2.94E-05
XT	0.33	1.51E-02	7.67E-03	0.15	0.50	1.99E-05	5.43E-06	2.54E-05
XH	0.33	1.00E-03	6.26E-03	2.83E-02	0.36	1.97E-05	4.44E-06	2.41E-05
D1	0.26	4.11E-03	6.58E-03	3.11E-03	0.30	1.54E-05	4.66E-06	2.01E-05
D2	0.27	4.70E-03	5.64E-03	9.84E-02	0.37	1.61E-05	3.99E-06	2.01E-05
D3	0.36	3.04E-02	1.15E-02	0.23	0.64	2.19E-05	8.12E-06	2.99E-05

表5 成人非致癌风险指数与致癌风险

Table 5 Indexes of non-carcinogenic risk and carcinogenic risk for adults

小区	HQ				HI	CR		TCR
	HQ <sub>As</sub>	HQ <sub>Hg</sub>	HQ <sub>Cd</sub>	HQ <sub>Pb</sub>		CR <sub>As</sub>	CR <sub>Cd</sub>	
TX	5.49E-02	6.16E-04	1.49E-3	7.19E-03	6.42E-02	8.74E-06	1.68E-06	1.01E-05
DS	6.03E-02	4.26E-04	1.68E-3	1.44E-02	7.68E-02	9.30E-06	1.89E-06	1.12E-05
YH	7.31E-02	3.85E-04	1.56E-3	9.76E-03	8.48E-02	1.13E-05	1.76E-06	1.30E-05
WY	5.29E-02	3.95E-04	2.23E-3	1.03E-02	6.59E-02	8.17E-06	2.52E-06	1.07E-05
XT	4.68E-02	2.32E-03	1.75E-3	2.22E-02	7.31E-02	7.22E-06	1.97E-06	9.19E-06
XH	4.63E-02	1.54E-04	1.43E-3	4.19E-03	5.21E-02	7.14E-06	1.61E-06	8.75E-06
D1	3.63E-02	6.31E-04	1.50E-3	4.60E-03	4.30E-02	5.59E-06	1.69E-06	7.28E-06
D2	3.78E-02	7.23E-04	1.28E-3	1.46E-02	5.43E-02	5.83E-06	1.45E-06	7.27E-06
D3	5.14E-02	4.67E-03	2.61E-3	3.44E-02	9.31E-02	7.93E-06	2.94E-06	1.09E-05

在儿童非致癌总风险中, HQ<sub>As</sub> 的贡献率变化在 48.00% ~ 91.67% 之间, 平均为 77.76%; 成人 HQ<sub>As</sub> 对 HI 的贡献率变化在 45.56% ~ 88.87% 之间, 平均为 75.89%。可见, 土壤 As 是非致癌风险的最大贡献因子。

除棕地小区 XH 的 HI 略低于非棕地对照小区 D2 外, 其他棕地小区的 HI 均高于非棕地对照小区。不同棕地小区由于主要污染重金属不同以及土壤修复的差异, 其 HI 也存在一定差异, 表现为纺织类 >

设备制造类 > 印刷类 > 化工类。棕地小区土壤重金属的 HI 比原棕地明显下降, 例如 XT 对儿童和成人的 HI 分别相当于 D3 的 64.00% 和 55.96%, 土壤修复效果比较明显。

### 2.3 土壤重金属致癌健康风险评价

根据表 3 数据, 按照式 (9) 和 (10) 分别计算得到各小区土壤 As 和 Cd 对成人和儿童的单项致癌健康风险指数 (CR) 和致癌风险总指数 (TCR), 结果见表 4 和表 5。从中可知, 各小区土壤 As、Cd 对成

人和儿童的 CR 和 TCR 均大于 US EPA 推荐的土壤治理标准( $10^{-6}$ ), 虽然未超过有关专家所建议的土壤治理标准( $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ), 但其致癌风险已达到了较高的水平, 值得引起重视. 各小区土壤 As、Cd 对儿童的 CR 和 TCR 都大于对成人, 儿童的  $CR_{As}$  在  $10^{-5}$  数量级, 而成人的  $CR_{As}$  在  $10^{-6}$  数量级. 不管是对儿童还是成人, 棕地小区重金属致癌风险都大于非棕地小区. 儿童的  $CR_{As}$  对 TCR 贡献率变化在 76.62% ~ 86.63% 之间, 平均为 78.90%; 成人的  $CR_{As}$  对 TCR 贡献率变化在 63.94% ~ 86.92% 之间, 平均为 79.33%. 所以, 土壤 As 也是各小区主要的致癌风险因子.

各类棕地小区的 TCR 大小顺序与 HI 基本相同, 表现为纺织类 > 印刷类 > 设备制造类 > 化工类. 与原棕地对照区(D3)相比, 在其上所建棕地小区(XT)的 TCR 有所减小, 后者仅相当于前者的 80% 左右.

各采样小区土壤 As 含量和健康风险高于其他重金属的原因主要与当地燃煤、硫酸铵类化肥企业排放的“三废”有关. 据报道<sup>[34, 35]</sup>, 煤炭中 As 含量在  $2 \sim 82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 燃煤产生的飞灰和灰渣中含有大量的 As, 大约 50% 的 As 进入大气. 该市工业和居民燃煤来自于华北聚煤区的河南、山西两省, 其煤炭中含 As 量为  $0.24 \sim 70.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[36]</sup>, 与上述国外数据<sup>[34, 35]</sup> 基本一致. 该市属于典型的燃煤城市, 燃煤排放的 As 通过干湿沉降可进入并富集在土壤中. 该市化肥厂排放的“三废”中含较高的 As. 据该市环境状况公告(2001 ~ 2011 年), 该厂排放废水中平均 As 含量为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 远超过我国地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中的 V 类标准( $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 引用该厂废水的污灌区土壤普遍发生了 As 污染<sup>[37]</sup>. 化肥厂排放的含砷气溶胶及其污灌区表层土壤可随空气迁移进入市区, 通过干湿沉降进入土壤, 从而导致土壤 As 含量和健康风险高于其他重金属.

### 3 结论

(1) 与棕地相比, 经过土壤修复后所建居民小区的重金属含量和健康风险均有不同程度的下降, 表明污染场地再利用的土壤修复是必不可少工程技术措施.

(2) 居民小区土壤重金属含量高于其背景值, 棕地小区重金属含量高于非棕地居民小区.

(3) 各居民小区土壤 As、Hg、Cd 和 Pb 的 HQ

和 HI 均小于 1, 不存在非致癌健康风险. 4 种重金属对儿童的 HI 大于成人, 约相当于成人的 7 倍左右.  $HQ_{As}$  对 HI 的贡献率在 75% 左右, As 是最主要的非致癌风险因子.

(4) 各居民小区土壤的 CR 和 TCR 均超出 US EPA 推荐的治理标准, 虽然未超出相关专家的宽松标准, 但其致癌风险已达到了较高的水平, 值得引起重视.  $CR_{As}$  对 TCR 的贡献率在 80% 左右, As 也是最主要的致癌风险因子.

(5) 本研究只分析了居民小区土壤 As、Hg、Cd 和 Pb 的健康风险, 实际上土壤中还存在其他很多重金属(如 Cr、Ni、Cu、Zn 等)和有机污染物(如 PAHs、POPs 等), 因此本研究的结果要低于实际的健康风险.

### 参考文献:

- [1] Office of Technology Assessment (OTA). State of the states of brownfields: programs for clean up and reuse of contaminated sites [R]. 1995, <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc39804>.
- [2] Amekudzi A, Fomunung I. Integrating brownfields redevelopment with transportation planning [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2004, **130**(4): 204-212.
- [3] Seuly. 美国拉夫运河事件 [J]. *环境*, 2005, (8): 74-77.
- [4] 赵沁娜, 杨凯. 发达国家污染土地置换开发管理实践及其对我国的启示 [J]. *环境污染与防治*, 2006, **28**(7): 540-543.
- [5] 谢剑, 李发生. 中国污染场地的修复与再开发的现状分析 [R]. 2010, 3-5. <http://sir.cespn.net/readings>.
- [6] Wcislo E, Lovon D, Kucharski R, et al. Human health risk assessment case study: an abandoned metal smelter site in Poland [J]. *Chemosphere*, 2002, **47**(5): 507-515.
- [7] Morra P, Bagli S, Spadoni G. The analysis of human health risk with a detailed procedure operating in a GIS environment [J]. *Environment International*, 2006, **32**(4): 444-454.
- [8] 余勤, 文方, 侯红, 等. 发达国家污染场地分类机制及其对中国的启示 [J]. *环境污染与防治*, 2010, **32**(11): 78-83.
- [9] 谌宏伟, 陈鸿汉, 刘菲, 等. 污染场地健康风险评估的实例研究 [J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 230-235.
- [10] 李建三, 吴祖煜, 陈彬, 等. 工业废弃场地再开发的环境评估 [J]. *环境科学与管理*, 2007, **32**(6): 54-57.
- [11] 晁雷, 周启星, 陈苏. 沈阳某冶炼厂废弃厂区的人类健康风险评估 [J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(8): 1807-1812.
- [12] 曹云者, 施烈焰, 李丽和, 等. 石油烃污染场地环境风险评估与风险管理 [J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(3): 265-272.
- [13] 董向阳, 李建三, 吴祖, 等. 工业废弃场地再开发的环境评估: II 健康风险评估 [J]. *环境科学与管理*, 2008, **31**(1): 187-190.
- [14] 张兴庆, 李小风, 白娟, 等. 搬迁企业原址场地土壤污染环境风险评估——以重庆某搬迁企业为例 [J]. *四川兵工学报*, 2009, **30**(10): 144-147.

- [15] 臧振远, 赵毅, 尉黎. 北京市某废弃化工厂的人类健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2008, **3**(1): 48-54.
- [16] 张厚坚, 王兴润, 陈春云, 等. 典型铬渣污染场地健康风险评估及修复指导限值[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(7): 1445-1450.
- [17] 朱方志, 李东伟, 廖世国, 等. 城市搬迁场地重金属污染健康风险评估[J]. 城市建设, 2010, **16**(66): 93-94.
- [18] 苗东阳, 张有贤, 陈海滨. 硝基苯生产企业搬迁厂址的健康风险评估[J]. 中国科技论文在线, 2010, **5**(9): 703-707.
- [19] 李建萍, 张建红, 王存政, 等. 工业废弃场地再开发的土壤环境评价与修复研究[J]. 环境工程, 2011, **29**(4): 109-210.
- [20] 崔超, 窦立宝, 熊婷, 等. 污染场地人体健康风险评估研究[J]. 工业安全与环保, 2011, **37**(7): 57-59.
- [21] 刘媛. 电镀企业搬迁后场地调查及其环境影响评价[J]. 岩矿测试, 2012, **3**(14): 638-644.
- [22] US EPA. Risk assessment guidance for superfund, vol. I: human health evaluation manual [R]. Office of Emergency and Remedial Response 1989. <http://www.docin.com/p-549363036.html>.
- [23] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 548-554.
- [24] 谷蕾, 仝致琦, 宋博, 等. 基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险: 以连霍高速公路郑州—商丘段为例[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3577-3584.
- [25] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评估中的应用比较[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(2): 241-247.
- [26] Ferreira B L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [27] Lim H S, Lee J S, Chon H T, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, **96**(2-3): 223-230.
- [28] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的县城土壤重金属健康风险评估——以浙江省慈溪市为例[J]. 土壤通报, 2008, **39**(3): 634-639.
- [29] US EPA. Integrated risk information system [R]. 2011. <http://www.epa.gov/iris/index.html>.
- [30] 马建华, 李灿, 陈云增. 土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响——以开封市为例[J]. 土壤学报, 2011, **48**(4): 743-750.
- [31] 杜习乐, 马诗院, 楚纯洁, 等. 郑州市城市土壤砷含量的分布特征及其成因探讨[J]. 土壤, 2008, **40**(4): 635-639.
- [32] Mielke H W, Conzales C R, Smith M K, *et al.* The urban environment and children's health: soils as an integrator of lead, zinc, and cadmium in New Orleans, Louisiana, U. S. A [J]. Environmental Research, 1999, **81**(2): 117-129.
- [33] 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估[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2327-2330.
- [34] Bertine K K, Goldberg E D. Fossil fuel combustion and the major sedimentary cycle [J]. Science, 1971, **173**(3393): 233-235.
- [35] Smith E, Naidu R, Alston A M. Arsenic in the Soil Environment: A Review [J]. Advances in Agronomy, 1998, **64**: 149-195.
- [36] 王明仕, 郑宝山, 胡军, 等. 我国煤中砷含量及分布[J]. 煤炭学报, 2005, **30**(3): 344-348.
- [37] 韩晋仙, 马建华, 魏林恒. 污灌对潮土重金属含量及分布的影响——以开封市化肥河污灌区为例[J]. 土壤, 2006, **38**(3): 292-297.

## CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region .....	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> ( 801 )
Carbon Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Chongqing Based on Local Carbon Profiles .....	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> ( 810 )
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing .....	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> ( 820 )
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties .....	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> ( 830 )
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves .....	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> ( 839 )
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise .....	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> ( 847 )
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation .....	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo ( 853 )
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus .....	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian ( 864 )
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> ( 870 )
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in the River Estuarine Marsh .....	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng ( 879 )
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer .....	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> ( 885 )
Emission of CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O and NH <sub>3</sub> from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts .....	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> ( 892 )
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles .....	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> ( 901 )
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea .....	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> ( 908 )
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River .....	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian ( 915 )
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis .....	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> ( 924 )
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas .....	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> ( 933 )
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland .....	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> ( 942 )
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun .....	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> ( 951 )
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River .....	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> ( 958 )
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway .....	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> ( 964 )
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron .....	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> ( 972 )
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System .....	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> ( 979 )
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification .....	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> ( 987 )
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier .....	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo ( 995 )
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature .....	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 1002 )
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides .....	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 1009 )
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion .....	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> ( 1016 )
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou .....	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 1021 )
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary .....	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> ( 1029 )
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay .....	LI Fei, XU Min ( 1035 )
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater .....	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> ( 1041 )
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin .....	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 1051 )
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 1060 )
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields .....	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> ( 1068 )
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil .....	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 1075 )
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain .....	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> ( 1081 )
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China .....	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> ( 1091 )
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province .....	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> ( 1098 )
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil .....	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> ( 1105 )
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate .....	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao ( 1111 )
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil .....	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> ( 1119 )
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil .....	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> ( 1125 )
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry .....	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> ( 1131 )
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil .....	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> ( 1138 )
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils .....	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> ( 1144 )
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area .....	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> ( 1151 )
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor ( <i>Cinnamomum camphora</i> ) Tree Bark from Southern Jiangsu, China .....	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> ( 1159 )
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable .....	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua ( 1164 )
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress .....	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> ( 1169 )
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8 .....	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> ( 1176 )
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering .....	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> ( 1183 )
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China .....	LIANG Jing, MAO Jian-su ( 1191 )
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model .....	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> ( 1198 )
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins .....	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> ( 1205 )

# 《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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