

环境科学

(HUANJING KEXUE)

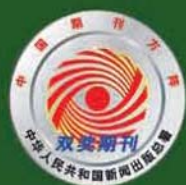
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015 年北京市两次红色预警期间 PM _{2.5} 浓度特征	
..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)
南京北郊冬季 PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 李秀镇 (2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹, 王建力 (2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例	
..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)	
华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)
岩溶地下水水中多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邵义萍, 樊静静 (2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)
活性炭负载 Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙 G	王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学	张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究	
..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)	
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究	陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究	鲍林林, 陈婉秋 (2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)	
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)
磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)
三峡库区消落带 N ₂ O 排放及其影响因素	李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N ₂ O 排放研究	高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀兰, 木志坚 (2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)	
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较	
..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -SCR 活性探究	徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)
《环境科学》征订启事 (2569) 《环境科学》征稿简则 (2576) 信息 (2744, 2769, 2790)	

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价

杨春^{1,2}, 塔西甫拉提·特依拜^{1,2*}, 侯艳军^{1,2}, 高宇潇^{1,2}, 刘芳^{1,2}, 夏楠^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态重点实验室(教育部省部共建), 乌鲁木齐 830046)

摘要: 为研究准东煤田大气降尘重金属的污染状况及潜在健康风险, 选取 52 个覆盖全区的样点采集大气降尘, 并测试分析样品中 Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 共 6 种重金属元素含量。结合地累积指数(I_{geo})进行污染研究, 使用 EPA 人体暴露风险评价。结果表明, 研究区大气降尘重金属浓度具有明显差异, $Zn > Cr > Cu > As > Pb > Hg$ 。Hg、Cu 和 As 的变异系数为 381.91%、99.94% 和 97.82%, 受人类活动影响较大; 6 种重金属间的相关性较复杂, Zn-Cu-Cr 较 Hg-As-Pb 的相关性更强。地累积指数评价表明, 重金属 Zn、Cr 的污染较严重, Zn 处于极强度污染, Hg 可视为无污染, Cu、Pb、As 处于轻度-中度污染。研究区致癌风险暴露量与非致癌风险暴露量差异不大。非致癌风险商均小于 1, $HQ_{Cr} > HQ_{As} > HQ_{Zn} > HQ_{Pb} > HQ_{Cu} > HQ_{Hg}$, 总非致癌风险指数 0.258, 研究区 6 种重金属健康风险较小。致癌风险 $CR_{As} > CR_{Cr} > CR_{Pb}$, Pb 无致癌风险。其中 As 的致癌风险值占总致癌风险(TCR)的 93.85%, 是最主要的致癌因子。TCR 均值为 $1.95E-05$, 处于人体可耐受的致癌风险范围。

关键词: 大气降尘; 重金属; 地累积指数; 健康风险评价; 准东煤田

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2453-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.006

Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang

YANG Chun^{1,2}, Tashpolat Tiyip^{1,2*}, HOU Yan-jun^{1,2}, GAO Yu-xiao^{1,2}, LIU Fang^{1,2}, XIA Nan^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology (Xinjiang University) Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: In order to evaluate the contamination and health risk of heavy metals from atmospheric dust fall in Zhundong opencast coalfield in Xinjiang, samples of atmospheric dust fall were collected from 52 sampling sites covering the entire region and the contents of Zn, Cu, Cr, Pb, Hg and As were tested and analyzed. The contamination was assessed by geo-accumulation index method, and the risk to human health was assessed using the US EPA Health Risk Assessment Model. The results showed that: The contamination of heavy metals from atmospheric dust fall had a significant difference, in the order of $Zn > Cr > Cu > As > Pb > Hg$, and the average contents were higher than the soil background of Changji. The coefficient of variation of Hg, Cu and As was 381.91%, 99.94% and 97.82%, and human activities had a greater impact on them. The correlation coefficients in 6 heavy metals were complex, the correlation coefficients among Zn-Cu-Cr were more relevant than Hg-As-Pb. The assessment results of geo-accumulation index indicated that the Zn pollution in the atmospheric dust fall should be classified as extreme degree, and that of Cu, Pb, As as between slight and extreme degrees, and Hg as practically uncontaminated. The exposure content of carcinogenic risk and non-carcinogenic risk of the study area had little difference. It was $HQ_{Cr} > HQ_{As} > HQ_{Zn} > HQ_{Pb} > HQ_{Cu} > HQ_{Hg}$, the total non-cancer hazard index was 0.258, the non-cancer hazard indexes were both lower than their threshold values, suggesting that they would not harm the health. The carcinogenic risk hazard indexes were in the order of $CR_{As} > CR_{Cr} > CR_{Pb}$, suggesting that Pb had no cancer risk, while As was the most important carcinogenic factor. The average TCR was $1.95E-05$, indicating that the risk was within the limit that human can tolerate.

Key words: atmospheric dust fall; heavy metals; geo-accumulation index; health risk assessment; Xinjiang Zhundong opencast coalfield

大气降尘是有机颗粒、无机非金属颗粒和金属颗粒的不均匀混合物, 粒径大于 $10\ \mu\text{m}$, 因重力和降雨等自然降落于地面[单位: $\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{月})^{-1}$]^[1,2]。在无风及降水作用下某些粒径 $10\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒物也能沉降^[3]。降尘通过重力落在土壤、植物和水体, 并在各介质中迁移转化和富集, 对生态环境产生侵害, 并最终影响人类身体健康^[4-7]。土壤颗粒、燃煤、交通运输等是大气降尘中重金属的主要来

源^[8], 矿采活动带来的重金属污染对居民的健康风险成为全球性问题^[9,10]。

新疆地处中国西北边陲, 沙漠的扬尘乃至尘暴是该区背景大气粒子的重要来源。准东地区是我区

收稿日期: 2015-11-02; 修订日期: 2016-03-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC15B01)

作者简介: 杨春(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区资源与环境遥感监测, E-mail: ycsilence@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tash@xju.edu.cn

重要的露天煤矿采集区,是煤化工、电力、冶炼工业的集聚区,煤炭粉尘是主要大气污染因子. 对其周边降尘污染特征及居住人群的健康风险评价具有重要意义.

本研究通过对覆盖准东地区的 52 个样点大气降尘量及重金属元素的测试,分析研究降尘重金属污染物的污染状况、空间分布特征,最后分析降尘重金属污染对人体健康风险,以期为准东地区大气降尘重金属的污染控制和治理提供科学依据,保障居民的身体健康.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

准东煤田位于天山北麓,准噶尔盆地东南部,在昌吉回族自治州东部三县(吉木萨尔县、奇台县和木垒县)境内,地处卡拉麦里西南山前戈壁荒漠地

带. 地理坐标 $88^{\circ}36' \sim 90^{\circ}10'E$, $44^{\circ}10' \sim 45^{\circ}10'N$, 属典型的极端干旱大陆气候,主导风向为西北风. 煤田无常年性地表水体,地表植被稀疏,物种单一.

准东煤田是我国最大的整装煤炭基地,煤田面积约 $13\,000\text{ km}^2$,预测煤炭资源储量 $3\,900\text{ 亿 t}$,煤层稳定性好,埋藏较浅,易于开采,储煤量占全国储煤量的 7%. 新疆准东经济技术开发区属国家级经济技术开发区,五彩湾煤电煤化工产业带、将军庙煤化工工业园、北山煤化工园区、大沙丘煤电园区等聚集于此.

1.2 数据收集与处理

1.2.1 采样点的设置

根据研究区的功能区划和污染源分布架设覆盖全区的 52 个降尘采集点,充分考虑风向、地形、功能区等因素. 采集点四周无高大遮挡物,避开局部污染源. 共分 8 个方向布置(图 1).

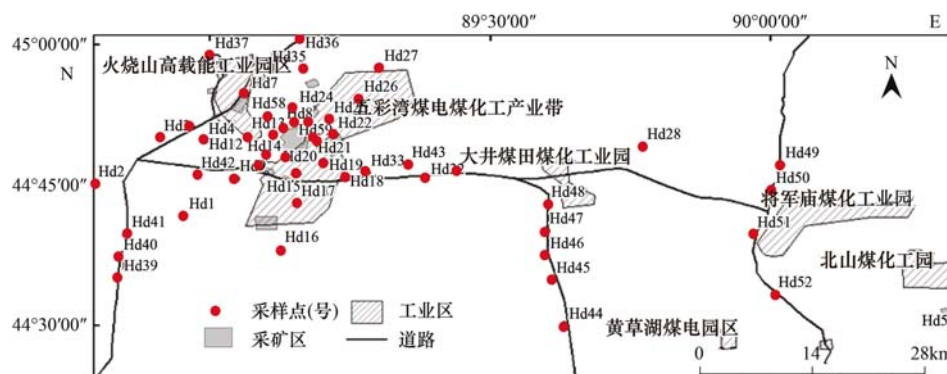


图 1 研究区地理位置及采样点分布示意

Fig. 1 Geographical position map of study area and distribution of sampling points

1.2.2 样品采集

于 2014 年 5 月~2014 年 12 月,对大气降尘进行连续收集. 降尘收集器距地面 2.0 m ,每个降尘收集器放置 3 个高 20 cm ,直径 18 cm 的降尘缸,为防止风沙对降尘量的影响,上置不锈钢漏斗. 采样期内的干湿沉降样品采用干法收集,去除降尘缸内的树枝、小石子等异物,用装有超纯水的气压喷壶将降尘样品冲洗到采样瓶中,直至洗净为止. 降尘缸洗净用于后续降尘收集,如有损坏或缺失及时更换.

实验室内将采样瓶中所收集样品倒入培养皿中,蒸干后得到降尘样品. 各采集点降尘重量取 3 个降尘缸降尘量的平均值. 降尘样品于锡箔纸中密封保存. 合并监测期间所有降尘样品,测定重金属含量.

1.2.3 重金属含量的测定

电子天平称取降尘样品 0.5000 g 于聚四氟乙烯

坩埚,先加入 9 mL 的浓盐酸后滴入 3 mL 的浓硝酸,电热板加热至沸腾 20 min ,再加入 5 mL 的氢氟酸加热 30 min ,然后滴入 3 mL 的高氯酸加热至近似蒸干状态,最后滴入 10 mL $1:10$ 的稀硝酸煮沸 15 min . 如若坩埚内的液体絮状物和沉淀物较多,则重复上述步骤,直至获得澄清液. 标准液与空白样同时消煮. 坩埚内的澄清液冷却后用超纯水定容至 20 mL . 研究实验用水均为去离子水,试剂为优纯级.

容量瓶的定容澄清液样品送于新疆大学理化测试中心进行重金属含量测定. 样品共测定锌(Zn)、铜(Cu)、铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)和砷(As) 6 种重金属元素. 每个样品重复测定 3 次. Zn、Cu、Cr 和 Pb 由日立 Z-2000 型原子吸收分光光度计测定;普析通用 PF6-2 原子荧光光度计测定 Hg 和 As. 重金属 Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 的检出限分别为 $0.005\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 0.02

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.2\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 平均回收率为 96.2%、99.5%、100.3%、105.4%、98.2% 和 100.1%。相对标准偏差 1.5%、1.0%、3.0%、1.0%、3.5% 和 3.0%, 测试结果符合质量控制要求。

1.2.4 数据分析方法

通过 Microsoft Excel 和 SPSS 19.0 对实测数据整理计算,以实测数据为依据利用 Arc GIS10.1 软件进行插值分析。

1.3 重金属污染评价方法

地累积指数(geo-accumulation index, I_{geo}) 是由德国科学家 Muller 提出并广泛应用于土壤及灰尘重金属污染的研究方法,充分考虑不同地区的背景值差异^[11,12],公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (1.5 \times B_n)] \tag{1}$$

式中, C_n 为重金属的实测值; B_n 为土壤背景值,本文选择新疆昌吉州土壤背景值;1.5 为未来消除背景差异值的转换系数。

据分级标准^[13,14] 将污染程度分为 7 级。0 级: $I_{\text{geo}} \leq 0$,无污染;1 级: $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$,轻度-中度污染;2 级: $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$,中度污染;3 级: $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$,中-强度污染;4 级: $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$,强度污染;5 级: $4 < I_{\text{geo}} \leq$

5,强-极强度污染;6 级: $I_{\text{geo}} \geq 5$,极强度污染。

1.4 大气降尘重金属的健康风险评价

1.4.1 模型与参数选择

环境中的重金属可以通过手-口直接摄入、呼吸摄入和皮肤接触进入人体^[15,16]。研究根据前人的成果和对城市道路灰尘重金属的健康风险评价的相关研究,采用美国 EPA 土壤健康风险评价模型,修正模型变量取值^[17~25]。根据美国 EPA 人体暴露风险评价方法,得到公式(2)~(4)。参数及取值见表 1。

经手-口途径日平均暴露量 $[\text{ADD}_{\text{ing}} / \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]$:

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = (c \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{IngR} \times \text{ED}) \times (\text{AT} \times \text{BW})^{-1} \tag{2}$$

经呼吸途径日平均暴露量 $[\text{ADD}_{\text{inh}} / \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]$:

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = (c \times \text{EF} \times \text{InhR} \times \text{ED}) \times (\text{PEF} \times \text{AT} \times \text{BW})^{-1} \tag{3}$$

经皮肤接触日平均暴露量 $[\text{ADD}_{\text{derm}} / \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]$

$$\text{ADD}_{\text{derm}} = (c \times \text{CF} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{SA} \times \text{ED}) (\text{AT} \times \text{BW})^{-1} \tag{4}$$

表 1 重金属暴露量的计算参数及取值¹⁾

Table 1 Parameters and values for exposure calculation of heavy metals					
项目	参数	含义	单位	成人取值	文献
基础参数	c	实测重金属浓度	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	95% UCL	[23~25]
	EF	暴露频率	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	300	[22]
	ED	暴露年限	a	30	[22]
	AT	平均暴露时间	d	$365 \times \text{ED}$ (非致癌作用); 365×70 (致癌作用)	[23~25]
	BW	平均体重	kg	60	[22]
暴露行为参数	CF	转换系数	$\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}$	1×10^{-6}	[22~25]
项目	参数	含义	单位	成人取值	文献
手-口摄入	IngR	摄入降尘速率	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	50	[22]
呼吸摄入	InhR	呼吸速率	$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	13.77	[24,25]
	PEF	颗粒物排放因子	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	1.36×10^9 (EPA, 2001)	[24,25]
皮肤接触	SL	皮肤黏着度	$\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	0.07	[22~25]
	SA	暴露皮肤面积	$\text{cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$	4 350	[22]
	ABS	皮肤吸收因子	无量纲	1×10^{-3}	[22~25]

1) 根据美国 EPA 人体暴露风险评价方法和场地环境评价导则相关规定确定模型参数,由于研究区主要为荒漠戈壁和围绕露天矿区建立的工业区,故模型暴露参数选择工业区参数。据北京场地环境评价导则暴露参数建议值,工业区暴露参数只考虑成人取值^[23]

1.4.2 人体的健康风险表征

本研究 6 种重金属元素 Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 均具有慢性非致癌健康风险,其中 Cr、Pb、As 具有致癌风险。降尘重金属的非致癌风险商(HQ)、总非致癌风险指数(HI)和致癌风险指数(TCR)计

算公式为^[24~26]:

$$\text{HQ}_{ij} = \text{ADD}_{ij} / \text{RfD}_{ij} \tag{5}$$

$$\text{HI} = \sum_{i=6}^{j=3} \text{HQ}_{ij} \tag{6}$$

$$\text{CR} = \sum_{i=3}^{j=3} \text{ADD}_{ij} \times \text{SF}_{ij} \tag{7}$$

$$TCR = \sum_{i=3}^{j=3} CR_{ij} \tag{8}$$

式中,ADD_{ij}为重金属*i*第*j*种暴露途径的暴露量mg·(kg·d)⁻¹;RfD_{ij}为重金属*i*第*j*种暴露途径的参考剂量mg·(kg·d)⁻¹,即每天每kg人体摄取的不会引起人体不良反应的污染物的最大量^[27];HQ_{ij}是非致癌重金属*i*第*j*种暴露途径下的风险商;HI为6种重金属在3种暴露途径下总的非致癌风险指数;CR_{ij}为致癌重金属*i*第*j*种暴露途径的风险指数;SF_{ij}为污染物*i*第*j*种暴露途径的致癌斜率(kg·d)·mg⁻¹;TCR为3种致癌重金属在3种暴露途径下总的致癌风险指数.

已有研究使用慢性中毒的参考剂量评价非致癌风险.一般认为HI<1或HQ<1,表示重金属的健康风险较小,或者可以忽略;当HI≥1或HQ≥1时存在非致癌风险,值越大健康风险越大^[22~24].

美国EPA和我国场地环境评价导则均表明当TCR<10⁻⁶,表示重金属无致癌风险;10⁻⁶<TCR<10⁻⁴,表示处于人体可耐受的致癌风险,TCR>10⁻⁴,处于人体不可耐受的致癌风险^[23,24].

参考国内外相关研究及我国环境评价导则^[22~24],重金属Zn、Cu、Cr、Pb、Hg和As在不同暴露途径下对人体的健康风险参考剂量RfD见表2.

表2 不同暴露途径下重金属元素的参考剂量RfD^[22~24]/mg·(kg·d)⁻¹
Table 2 Reference doses of heavy metals for each exposure pathway/mg·(kg·d)⁻¹

项目	Zn	Cu	Cr	Pb	Hg	As
RfD _{ing}	3.00×10 ⁻¹	4.00×10 ⁻²	3.00×10 ⁻³	3.50×10 ⁻³	3.00×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴
RfD _{inh}	3.00×10 ⁻¹	4.02×10 ⁻²	2.86×10 ⁻⁵	3.52×10 ⁻³	1.50×10 ⁻⁵	1.23×10 ⁻⁴
RfD _{derm}	6.00×10 ⁻²	1.20×10 ⁻²	6.00×10 ⁻⁵	5.25×10 ⁻⁴	8.60×10 ⁻⁵	3.00×10 ⁻⁴

2 结果与讨论

2.1 大气降尘重金属特征

本研究区大气降尘重金属受矿区露天开采、工业园区工业生产、煤炭燃烧和交通运输等人为因素和地形、土壤及风速风向等自然因素的综合影响,呈现出随机分布的特征.高值区主要集中在露天采区、工业园区和运输道路,受盛行风向影响会扩散至下风向区域.研究区西侧荒漠地带重金属元素含量较低.根据准东煤田大气降尘样品化验分析结果,通过SPSS 19.0得到大气降尘重金属统计情况表(表3).

根据表3可以看出,研究区大气降尘重金属浓度具有明显差异,依次为Zn>Cr>Cu>As>Pb>Hg,Zn的含量最高.降尘重金属Zn、Cu、Cr、Pb、Hg和As的含量分别为5 840.19、78.66、482.07、

20.10、0.19和40.40 mg·kg⁻¹,各种降尘重金属含量的差异很大.

6种大气降尘重金属含量均值均高于昌吉州土壤背景值,分别为昌吉州土壤背景值的90.97、3.28、10.17、1.97、2.38和2.69倍.重金属Zn、Cr、As的含量均值也远高于土壤环境质量二级标准限值.研究区大气降尘重金属呈现出不同程度的累积.

变异系数用以表征大气降尘重金属的离散程度.变异系数依次为Hg>Cu>As>Zn>Cr>Pb.Hg元素为强变异,其他5种元素为中等变异,Hg的变异系数最大为381.92%,Pb的变异系数最小为42.59%,重金属元素时空分布非常不均匀.Hg变异系数为381.92%最高,Cu、As的变异系数接近1,说明这3种元素受人类活动影响较大.

表3 重金属的统计¹⁾
Table 3 Statistics of heavy metals

项目	Zn	Cu	Cr	Pb	Hg	As
最大值/mg·kg ⁻¹	32 787.72	508.34	2421.70	43.43	5.18	298.25
最小值/mg·kg ⁻¹	1 226.45	4.91	26.49	5.89	0.02	15.00
均值/mg·kg ⁻¹	5 840.19	78.66	482.07	20.10	0.19	40.40
标准差/mg·kg ⁻¹	5 248.34	78.61	432.00	8.56	0.72	39.52
变异系数/%	89.87	99.94	89.61	42.59	381.92	97.82
新疆昌吉州土壤背景值/mg·kg ⁻¹	64.20	24.00	47.40	10.20	0.08	15.00
国家二级标准/mg·kg ⁻¹	250.00	100.00	200.00	300.00	0.50	30.00

1) 环境空气质量标准(GB 3095-2012)的污染物限值,只列出了Cd、Hg、As、Cr(VI)、F的浓度限值,故用土壤背景值作为比较值,说明大气降尘重金属含量特征;土壤环境质量标准(修订)(GB 15618-2008)尚未施行,故仍采用土壤环境质量标准(GB 15618-1995)

2.2 相关性分析

相关性分析对重金属元素的来源识别具有重要意义^[28],相关性显著的元素可能存在相似的来源或复合污染^[29]. 由表 4 可以看出,6 种重金属间的相关性较复杂,Zn-Cu-Cr 较 Hg-As-Pb 的相关性更强,Cu-Cr 和 Hg-As 两两相关系数为 0.960 和 0.938,在 $P < 0.01$ 水平极显著相关,Zn-Cu、Zn-Cr 的相关系数为 0.611 和 0.490,Pb-Hg、Pb-As 的相关系数为

0.393 和 0.561,且均在 $P < 0.01$ 水平极显著相关.

2.3 重金属污染空间分布特征

利用式(1)得到准东煤田降尘重金属的 I_{geo} (表 5),重金属 Zn、Cr 的污染较严重,Zn 处于极强度污染. Hg 的污染级别为 0 级,可视为无污染. Cu、Pb、As 处于 1 级即轻度-中度污染. 重金属平均 I_{geo} 指数为 $Zn > Cr > Cu > As > Pb > Hg$, Zn 为主要污染因子,与降尘重金属浓度结果相一致.

表 4 大气降尘重金属元素的相关性¹⁾

Table 4 Correlation coefficient among heavy metals in atmospheric dust fall

	Zn	Cu	Cr	Pb	Hg	As
Zn	1					
Cu	0.611 **	1				
Cr	0.490 **	0.960 **	1			
Pb	0.083	0.092	0.151	1		
Hg	0.052	-0.031	-0.026	0.393 **	1	
As	0.025	0.019	0.059	0.561 **	0.938 **	1

1) * * 表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)上极显著相关,* 表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)显著相关; $n = 52$

表 5 大气降尘重金属的 I_{geo}

Table 5 Geo-accumulation indexes of heavy metals in atmospheric dust fall

项目	Zn	Cu	Cr	Pb	Hg	As
I_{geo}	5.58	0.74	2.31	0.27	-0.71	0.61
污染程度	极强度污染	轻度-中度污染	中-强度污染	轻度-中度污染	无污染	轻度-中度污染

选择反距离加权法(inverse distance weighted, IDW)对 6 种大气降尘重金属的 I_{geo} 进行插值和计算,得到降尘重金属污染的空间分布图(图 2). 国内外众多研究成果表明,交通运输源是 Zn、Cu 和 Pb 等多种重金属的重要来源,可作为交通污染的指示元素^[30~32]. Zn、Cu、Cr 主要源自于生产过程和金属冶炼,主要集中在研究区北部、西北部地区. 五彩湾煤电煤化工产业带、火烧山高载能产业园区和将军庙煤化工工业园有大型金属冶炼制造业,污染严重. 金属冶炼和煤的燃烧是 As 的主要人为源^[33],区域内露天煤矿开采产生的煤尘扩散煤粉颗粒. 煤粉的燃烧和机动车辆尾气的排放是造成大气降尘 Pb 空间分布的主要原因^[29~31]. Hg、As、Pb 主要集中在将军庙煤化工工业园和主要交通线路交汇处,北部五彩湾煤电

煤化工产业带存在小范围高值区.

3 降尘重金属健康风险评价

3.1 降尘重金属的日平均暴露量

由式(2)~(4)计算得到准东地区降尘重金属在 3 种暴露途径下的非致癌和致癌风险日平均暴露量. 结果见表 6. 非致癌风险日平均暴露量的大小为 $Zn > Cr > Cu > As > Pb > Hg$,与研究区大气降尘重金属浓度大小一致,不同暴露途径下重金属的暴露剂量呈现出手-口途径>皮肤途径>呼吸途径,手-口途径摄入重金属暴露量是总日平均暴露量的 99.37%,是研究区降尘重金属暴露风险的最主要途径. 重金属致癌风险日平均暴露量的大小为 $Cr > As > Pb$,致癌风险暴露量与非致癌风险暴露量差异不大.

表 6 研究区降尘重金属不同途径的暴露剂量

Table 6 Average daily doses for heavy metals and exposure routes in study area

重金属	非致癌风险暴露量			致癌风险暴露量		
	ADD _{ing}	ADD _{inh}	ADD _{derm}	ADD _{ing}	ADD _{inh}	ADD _{derm}
Zn	4.00E-03	8.10E-07	2.44E-05	—	—	—
Cu	5.39E-05	1.09E-08	3.28E-07	—	—	—
Cr	3.30E-04	6.69E-08	2.01E-06	1.42E-04	2.87E-08	8.62E-07
Pb	1.38E-05	2.79E-09	8.38E-08	5.90E-06	1.19E-09	3.59E-08
Hg	1.29E-07	2.61E-11	7.84E-10	—	—	—
As	2.77E-05	5.60E-09	1.69E-07	1.19E-05	2.41E-09	7.22E-08

表 7 准东地区不同暴露途径大气降尘重金属对人体健康风险

Table 7 Characteristics for the HQ and CR of heavy metals in the atmospheric dust fall to human health under various exposure approaches							
健康风险类型	重金属	最大值	最小值	均值	SD	Cv/%	
非致癌风险	HQ _{ing}	Zn	7.49E-02	2.80E-03	1.33E-02	1.20E-02	89.87
		Cu	8.70E-03	8.40E-05	1.35E-03	1.35E-03	99.94
		Cr	5.53E-01	6.05E-03	1.10E-01	9.86E-02	89.61
		Pb	8.50E-03	1.15E-03	3.93E-03	1.68E-03	42.59
		Hg	1.18E-02	4.11E-05	4.29E-04	1.64E-03	381.91
		As	6.81E-01	3.42E-02	9.22E-02	9.02E-02	97.82
	HQ _{inh}	Zn	1.52E-05	5.67E-07	2.70E-06	2.43E-06	89.87
		Cu	1.75E-06	1.70E-08	2.71E-07	2.71E-07	99.94
		Cr	1.17E-02	1.28E-04	2.34E-03	2.10E-03	89.61
		Pb	1.71E-06	2.32E-07	7.92E-07	3.37E-07	42.59
		Hg	4.79E-05	1.66E-07	1.74E-06	6.64E-06	381.91
		As	3.36E-04	1.69E-05	4.56E-05	4.46E-05	97.82
	HQ _{derm}	Zn	2.28E-03	8.53E-05	4.06E-04	3.65E-04	89.87
		Cu	1.77E-04	1.70E-06	2.73E-05	2.73E-05	99.94
		Cr	1.68E-01	1.84E-03	3.35E-02	3.00E-02	89.61
		Pb	3.45E-04	4.68E-05	1.60E-04	6.80E-05	42.59
		Hg	2.51E-04	8.73E-07	9.12E-06	3.48E-05	381.91
		As	4.15E-03	2.09E-04	5.62E-04	5.50E-04	97.82
致癌风险	HI	1.53	4.67E-02	2.58E-01	2.39E-01	92.39	
	CR	Cr	6.05E-06	6.61E-08	1.20E-06	1.08E-06	89.61
		Pb	6.60E-10	8.95E-11	3.05E-10	1.30E-10	42.59
		As	1.35E-04	6.81E-06	1.83E-05	1.79E-05	97.82
	TCR	1.41E-04	6.87E-06	1.95E-05	1.90E-05	97.32	

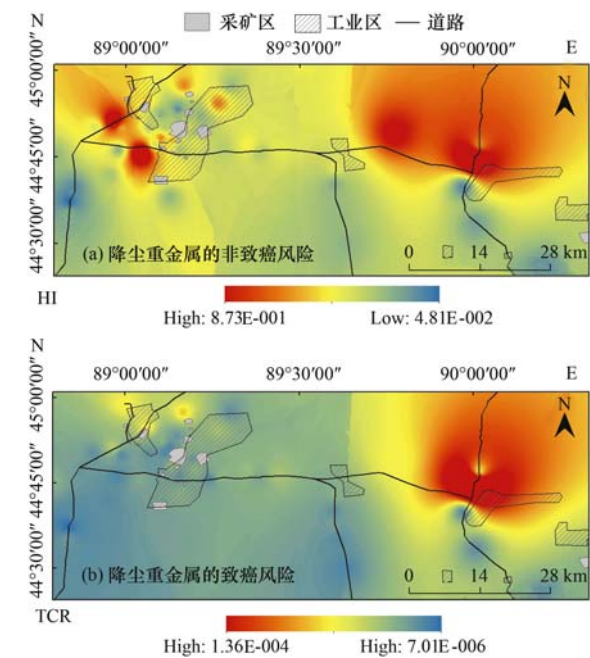


图 3 研究区降尘重金属的健康风险评估

Fig. 3 Spatial distributions of health risk assessment of heavy metals in atmospheric dust fall

用,可能对人体健康产生危害(图 3). 将军庙煤化工业园与主要交通干线交汇处的致癌风险值 TCR

大于标准限值,处于不可耐受的致癌风险范围.

4 讨论

4.1 大气降尘重金属污染分析

大气降尘重金属的来源主要是自然源和人为源. 人为源由人类生产活动产生,是导致降尘重金属暴露量差异的最主要原因. 本研究 6 种大气降尘重金属含量均值均高于昌吉州土壤背景值,说明研究区大气降尘重金属受到人类活动的影响,并呈现出不同程度的累积. 重金属 Hg、As 及 Zn、Cu、Cr 在来源、运移、富集等过程有较高的相似性^[34],与本研究的结果一致.

4.2 降尘重金属的健康风险评估

降尘重金属的暴露量和非致癌与致癌风险均表现为手-口途径>皮肤途径>呼吸途径. 手-口途径摄入重金属暴露量是总日平均暴露量的 99.37%,通过手-口途径摄入重金属的非致癌风险值占总非致癌风险值的 85.66%,通过手-口途径摄入重金属的致癌风险值占总致癌风险值的 91.28%. 手-口途径摄入是研究区降尘重金属暴露的最主要途径,同时也是影响人类健康风险的主要途径.

研究区非致癌风险值未超出规定限值,且总非致癌风险值也小于1,说明研究区大气降尘重金属在安全范围内,基本不会对人体健康造成危害.研究区致癌风险处于人体可耐受的致癌风险,重金属Pb无致癌风险,As是最主要的致癌因子.

值得注意的是由于重金属的累积,研究区部分地区的非致癌风险值和致癌风险值均大于标准限值,对人体健康产生危害,甚至可能引起人体不可耐受的致癌风险,需要引起注意,制定相关举措.

5 结论

(1)研究区大气降尘重金属浓度具有明显差异, $Zn > Cr > Cu > As > Pb > Hg$,且呈现出不同程度的累积. Hg、Cu和As受人类活动影响较大.

(2)6种重金属间的相关性较复杂,Zn-Cu-Cr相关性较高.

(3) I_{geo} 结果表明重金属Zn、Cr的污染较严重,Zn处于极强度污染;Hg可视为无污染.

(4)手-口途径摄入是研究区降尘重金属暴露的最主要途径同时也是影响人类健康风险的主要途径. 致癌风险暴露量与非致癌风险暴露量差异不大. 非致癌风险 $HQ_{Cr} > HQ_{As} > HQ_{Zn} > HQ_{Pb} > HQ_{Cu} > HQ_{Hg}$,单项风险商与总非致癌风险指数均小于1,基本不会对人体健康造成危害. Pb无致癌风险,As的致癌风险值占总致癌风险(TCR)的93.85%,是最主要的致癌因子. TCR均值为 1.95×10^{-5} ,处于人体可耐受的致癌风险.

参考文献:

- [1] 王赞红. 大气降尘监测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, **17**(1): 54-59.
- [2] 付宗敏. 大气降尘和TSP的地质化学特点及来源分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [3] 张新民, 柴发合, 孙新章. 大气降尘研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, **18**(专刊): 658-662.
- [4] Zhao H R, Xia B C, Fan C, *et al.* Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **417-418**: 45-54.
- [5] 吴辰熙, 祁士华, 方敏, 等. 福建省泉州湾大气降尘中的重金属元素的沉降特征[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(6): 27-30.
- [6] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(2): 951-972.
- [7] 杜金花, 张宜升, 何凌燕, 等. 深圳某地区大气 $PM_{2.5}$ 中重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(9): 838-840.
- [8] 郝社锋, 陈素兰, 朱佰万. 城市环境大气降尘重金属研究进展[J]. 地质学刊, 2012, **36**(4): 418-422.
- [9] Cai L M, Xu Z C, Qi J Y, *et al.* Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near Tonglushan mine in Hubei, China[J]. *Chemosphere*, 2015, **127**: 127-135.
- [10] 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.
- [11] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geo Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [12] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1021-1028.
- [13] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- [14] Lu X W, Wang L J, Lei K, *et al.* Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 1058-1062.
- [15] 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.
- [16] Kurt-Karakus P B. Determination of heavy metals in indoor dust from Istanbul, Turkey: estimation of the health risk [J]. *Environment International*, 2012, **50**: 47-55.
- [17] Keshavarzi B, Tazarvi Z, Rajabzadeh M A, *et al.* Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **119**: 1-10.
- [18] Wu S, Peng S Q, Zhang X X, *et al.* Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **148**: 71-78.
- [19] Xiao Q, Zong Y T, Lu S G. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **120**: 377-385.
- [20] 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.
- [21] Liu X T, Zhai Y B, Zhu Y, *et al.* Mass concentration and health risk assessment of heavy metals in size-segregated airborne particulate matter in Changsha [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **517**: 215-221.
- [22] DB11/T 656-2009, 场地环境评价导则[S].
- [23] [京环发[2007]8号], 北京市环境保护局文件——场地环境评价导则[S].
- [24] U.S. EPA (Environmental Protection Agency). Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2002. 4-24.

- [25] US EPA. Integrated risk information system [R/OL]. <https://www.epa.gov/iris>.
- [26] 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.
- [27] 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价[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 548-554.
- [28] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.
- [29] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **355** (1-3): 176-186.
- [30] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran [J]. Science of the Total Environment, 2015, **505**: 712-723.
- [31] 李小飞, 陈志彪, 张永贺. 等. 福州市公交枢纽站地表灰尘重金属含量、来源及其健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(8): 906-912.
- [32] Abbasi M N, Tufail M, Chaudhry M M. Assessment of heavy elements in suspended dust along the Murree highway near capital city of Pakistan[J]. World Applied Sciences Journal, 2013, **21** (9): 1266-1275.
- [33] 江华亮, 王宗爽, 武雪芳, 等. 我国大气 PM_{2.5} 中砷的污染特征、来源及控制[J]. 环境工程技术学报, 2015, **5**(6): 464-470.
- [34] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 944-950.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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