

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估

张文超¹, 吕森林^{1*}, 刘丁彧¹, 刘品威¹, 米持真^{1,2}, 王效举², 王青躍³

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 琦玉环境科学国际研究中心, 日本; 3. 琦玉大学理工学研究科, 日本)

摘要: 云南肺癌高发区(宣威)的环境污染与人群健康之间的关系一直是环境科学研究领域的热点之一。本研究采集了宣威市电厂及其上风向地区和下风向地区的街道灰尘, 利用 ICP-MS 对样品中的重金属元素进行了分析; 利用富集因子法对样品中的重金属污染及来源进行探究; 并运用美国环境保护署 (US EPA) 发布的人体暴露风险评价方法对样品中重金属元素的健康风险进行了评估。结果表明, 宣威街道尘土中 Al、V、Ni、Co、Zn 和 Cd 等金属元素的质量浓度明显呈“电厂 > 来宾 > 倘塘”的特征; V、Cd、Cr、Cu、Mn、Co、Ni、Pb、As 和 Zn 等 10 种重金属的含量明显高于云南省土壤背景值, 显示宣威市地表灰尘重金属污染较为严重; 宣威街道中 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 等重金属主要来源于电厂排放的燃煤颗粒物。健康风险评估的结果表明, 宣威街道灰尘中 10 种重金属元素对儿童的非致癌风险大于成人, 手-口摄入是灰尘重金属暴露的主要途径; 宣威街道尘土中 Cd、Cr、Ni、Co 和 As 等 5 种致癌重金属存在潜在的致癌风险; Cr 是威胁儿童健康的主要污染因子。

关键词: 街道灰尘; 重金属; 富集因子; 健康风险评估; 宣威

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1810-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.041

Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment

ZHANG Wen-chao¹, LÜ Sen-lin^{1*}, LIU Ding-yu¹, LIU Pin-wei¹, Yonmochi Shinich², WANG Xiao-ju², WANG Qing-yue³

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Center for Environmental Science in Saitama, Saitama, Japan; 3. Graduate School of Science and Technology in Saitama University, Saitama, Japan)

Abstract: Relationship between high lung cancer incidence in Xuanwei residents and environmental pollution has been a hot topic in the field of environmental sciences. Street dusts in Xuanwei power plant area as well as its upwind area (Banqiao town) and downwind area (Laibin town, Tangtang town) were collected. Chemical elements in the street dust samples were investigated using ICP-MS. Health risk assessment of heavy metals in the street dusts was carried out using the US EPA Health Risk Assessment Model. Our results showed that the mass level of Al, V, Ni, Co, Zn and Cd in street dusts followed the order of Xuanwei power plant > Laibin town > Tangtang town. The mean concentrations of V, Cd, Cr, Cu, Mn, Co, Ni, Pb, As and Zn were all higher than the background values in Yunnan soil, indicating that the street dusts of Xuanwei city have been heavily polluted by those metals. The health risk assessment results showed that the non-cancer hazard risks induced by the 10 heavy metals were higher to children compared to adults. The heavy metals in street dust were mainly ingested by human bodies through hand-mouth ingestion. The 5 carcinogenic metals, including Cd, Cr, Ni, Cr and As, had a potential risk of carcinogenicity in human after exposed to the dusts. Cr was the major toxic element to the local children's health.

Key words: street dust; heavy metal; enrichment factors; health risk assessment; Xuanwei

城市街道灰尘主要是指经人工或自然搬运、沉淀、积聚于城市地表颗粒物的总称^[1,2]。街道灰尘是城市环境中重金属污染的主要载体之一, 城市街道灰尘重金属污染源自多方面, 如周围土壤、道路铺筑物(如沥青、混凝土)、机动车(轮胎、车体、刹车磨损及尾气排放)、化石燃料燃烧排放以及大气颗粒物沉降等^[3~6]。由于在一定动力条件(如机动车碾压、风力及人群活动等)下, 地表灰尘颗粒物能够被再次扬起, 进入环境大气, 成为危害生态环境和人类健康的污染物^[7~10]。近年来, 有学者对重庆^[1]、南京^[4]、合肥^[7]、北京^[11]、上海^[12,13]、保定^[14]、乌鲁木齐^[15]、西安^[16]、沈阳^[17]、铜陵^[18]和

宝鸡^[19,20]等国内城市街道灰尘重金属污染及其健康风险进行了相应的研究, 但对肺癌发病率较高的宣威地区的地表尘的健康风险的研究还未见报道。

宣威市位于我国云南省东北部乌蒙山区, 位于东经 103°35'30" ~ 104°40'50"、北纬 25°53'30" ~ 26°44'50"之间, 是世界上肺癌发病率较高的地区之一^[21]。通过现场调查, 发现位于宣威肺癌高发区的宣威电厂排放出大量的污染物, 这些污染物在风力

收稿日期: 2014-11-24; 修订日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273127, 21477073)

作者简介: 张文超(1989~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境毒理学, E-mail: hdzhangwenchao@163.com

* 通讯联系人, E-mail: senlinlv@shu.edu.cn

的作用下能够传输到较远的区域,考虑到电厂燃煤排放的颗粒物的危害性,本研究选择位于宣威电厂上、下风向区域的地表尘为对象,利用 ICP-MS 对宣威地表尘中的主要化学元素进行了检测;利用富集因子法对宣威街道尘土中重金属的来源进行了探讨;并运用 US EPA 人体暴露风险评价模型对宣威市街尘土重金属的健康风险进行了评估,该成果能够对该区环境污染治理措施的制定提供科学数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析测试

采样时间为 2013 年 12 月 11~13 日,采样点位于宣威电厂、板桥镇(位于宣威电厂的上风向)、来宾镇和倘塘镇(下风向),如图 1 所示^[22]. 街道尘样品用洁净塑料刷和塑料簸箕采集,每个采样点采

集 10 个样品,每个样品重约 1 000 g;样品带回实验室后,利用 200 目的尼龙网筛除去大的沙粒,树叶等杂质,过筛后的样品作为街道尘土的有效样品进行密封保存,用以分析重金属元素的含量.

使用 ICP-MS 对样品进行元素分析,步骤如下:用分析天平称取 0.1 g 不同采样点的样品并放入消解罐中,用 HNO₃-HF-H₂O₂ [其体积比为 3:1:1,即加入 3 mL 浓 HNO₃ (61%)、1 mL HF (50%) 和 1 mL H₂O₂ (30%)] 将颗粒物溶解,样品在微波消解仪中消解 40 min,然后冷却 30 min,再将消解罐放入微波消解仪中对溶液进行彻底消解并富集,然后将消解溶液过滤后转移到 10 mL 容量瓶中,加入 200 g·L⁻¹ 的 In 作为内标元素,最后用 2% 稀 HNO₃ 定容至 10 mL. 每个样品的内标物回收率都介于 90%~120% 之间.

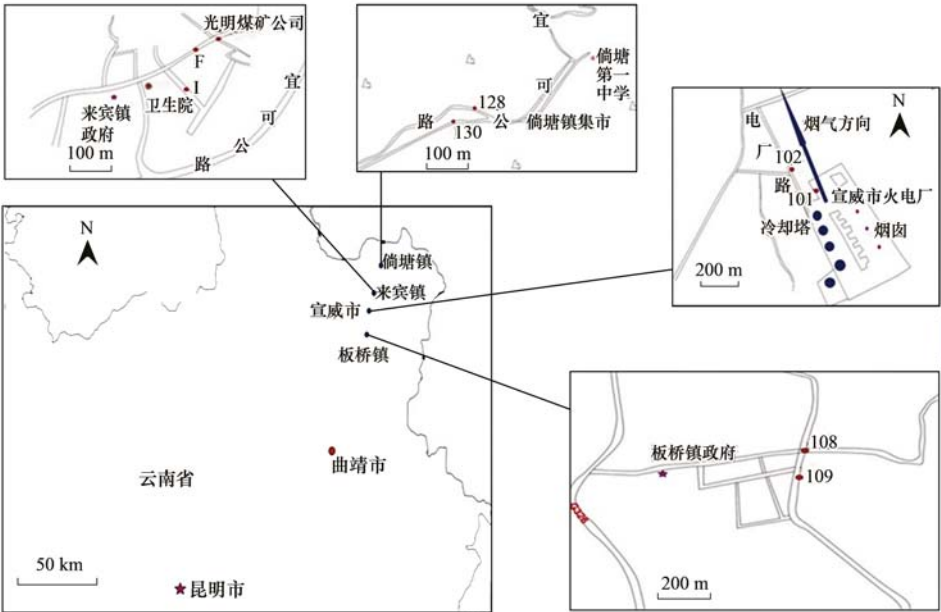


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Sampling map for street dusts

1.2 元素富集因子分析

富集因子(enrichment factors, EF)法用于研究样品中化学元素的富集程度,该方法已广泛应用于大气、土壤、地表尘、降水、湖泊沉积物等研究中^[24~27]. 其计算公式^[23]如下:

$$EF = (C_i/C_r)_{\text{样品}} / (C_i/C_r)_{\text{背景}}$$

式中,EF 为富集因子; C_i 为元素 i 的含量, C_r 为参比元素的含量;背景值为地壳中相应元素的相对浓度.

根据富集因子的大小,可以将元素的富集(污染)程度分为 5 个级别^[28],污染级别越高,受到人

类活动的影响越大(见表 1).

表 1 富集因子的污染判断标准^[28]

Table 1 Judge criterion of contamination degree by enrichment factor		
EF 值	富集(污染)程度	污染级别
<2	<1 为无污染或 1~2 为轻微污染	1
2~5	中度污染	2
5~20	显著污染	3
20~40	高度污染	4
>40	极度污染	5

1.3 暴露模型与参数

本研究参考 US EPA 人体暴露风险评价方法^[29~31]对宣威市主城区街道灰尘的重金属进行健

康风险评估,主要包括污染物识别、暴露途径确定、暴露量计算和暴露风险评估.

所测得的元素中,V、Cd、Cr、Cu、Mn、Co、Ni、Pb、As 和 Zn 等 10 种重金属具有慢性的非致癌风险,Cd、Cr、Ni、Co 和 As 则同时具有致癌风险. 根据街道灰尘在环境中的迁移循环方式,确定灰尘污染物从环境介质到人体的暴露途径有 3 种:手-口摄入、口鼻呼吸吸入和皮肤接触^[32]. 不同暴露途径计算模型如公式(1)~(4)所示,污染物的暴露量 ADD(average daily dose)以单位时间、单位体重、人体暴露的污染量 $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]$ 来表示.

呼吸吸入日平均暴露量 ADD_{inh} (average daily dose by breathing):

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{C \cdot \text{InhR} \cdot \text{EF} \cdot \text{ED}}{\text{PEF} \cdot \text{BW} \cdot \text{AT}} \quad (1)$$

皮肤接触日平均暴露量 $\text{ADD}_{\text{dermal}}$ (average daily dose by skin contacting):

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} = \frac{C \cdot \text{SA} \cdot \text{SL} \cdot \text{ABS} \cdot \text{EF} \cdot \text{ED} \cdot 10^{-6}}{\text{BW} \cdot \text{AT}} \quad (2)$$

表 2 灰尘重金属日平均暴露量评价暴露参数取值

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

参数	物理含义	物理量纲	参数赋值		文献
			儿童	成人	
C	重金属暴露水平	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	街道尘中重金属的质量浓度		本研究
IngR	经手-口摄入频率	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	200	100	[29~31]
InhR	呼吸频率	$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	7.63	20	[29~31]
EF	暴露频率	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	320	350	[29~31]
PEF	颗粒物排放因子	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	1.36E+09	1.36E+09	[29~31]
ED	暴露年限	a	6	24	[29~31]
AT(非致癌)	平均暴露	d	365ED	365ED	[29~31]
AT(致癌)	时间	d	71.4×365	71.4×365	[29~31]
BW	平均体重	kg	15	70	[29~31]
SL	皮肤黏着度	$\text{mg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0.2	0.07	[29~31]
SA	暴露皮肤面积	cm^2	1 150	2145	[33]
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	对于砷(As),取 $\text{ABS}=0.03$; 其他元素取 $\text{ABS}=0.01$		[34]

(hazard index),即将暴露量与参考量(reference dose,RfD)进行比较. 首先计算第*i*种重金属第*j*种暴露途径的非致癌风险商(hazard quotient,HQ),即:

$$\text{HQ}_{ij} = \text{ADD}_{ij}/\text{RfD}_{ij} \quad (5)$$

然后计算重金属非致癌总风险指数(hazard index,HI),即:

$$\text{HI}_i = \sum_{j=1}^3 \text{HQ}_{ij} \quad (6)$$

若 HQ 或 HI < 1,则认为风险较小或可以忽略;

手-口摄入日平均暴露量 ADD_{ing} (average daily dose by intaking):

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = \frac{C \cdot \text{IngR} \cdot \text{EF} \cdot \text{ED} \cdot 10^{-6}}{\text{BW} \cdot \text{AT}} \quad (3)$$

考虑到 US EPA 没有给出致癌重金属经手-口摄入和皮肤接触的致癌暴露量参考值,本研究仅计算 Cd、Cr、Ni、Co 和 As 这 5 种致癌重金属经口鼻呼吸途径的暴露量. 其终生日平均暴露剂量 LADD_{inh} (Lifetime average daily dose by breathing)为:

$$\text{LADD}_{\text{inh}} = \frac{C \cdot \text{EF}}{\text{PEF} \cdot \text{AT}} \cdot \left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \cdot \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \cdot \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (4)$$

上面诸式中其他参数的物理含义及取值如表 2 所示,由于中国人与美国人体型等方面的差异,对公式中人群皮肤表面积(SA)的参数取值根据王喆等^[33]的研究进行了修正,其中儿童的皮肤表面积为 1 150 cm^2 ,成人的则为 2 145 cm^2 .

1.4 健康风险的表征

对于非致癌重金属,采用非致癌风险指数法

当 HQ 或 HI > 1 时,则认为存在非致癌风险. ADD_{ij} 为第*i*种重金属第*j*种暴露途径的暴露量; RfD_{ij} 为第*i*种重金属第*j*种暴露途径的参考量.

对于致癌重金属 Cd、Cr、Ni、As、Co,其致癌效应应采用风险(Risk)表示,即根据暴露水平的数据和特定化学物质的量-反应关系,估算个体终生暴露所产生的癌症概率. US EPA 认为在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 级别内的风险值都是可以接受的.

致癌重金属的致癌风险为:

$$\text{Risk}_i = \text{LADD}_{\text{inh}} \times \text{SF}_i \quad (7)$$

总致癌风险为：
$$\text{Risk}_T = \sum_{j=1}^3 \text{Risk}_j \quad (8)$$
 $[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]$, SF_i 为斜率因子,即人体暴露于一定量重金属环境下产生致癌效应的概率. Risk_T 为 5 种重金属的致癌总风险; 几种重金属的参考量式中, LADD_{inh} 为经口鼻呼吸终生日平均暴露量 (RfD_{ij}) 与斜率因子 (SF_i) 见表 3.

表 3 US EPA 提供的几种重金属的 RfD 和 SF

Table 3 RfD and SF of heavy metals provided by US EPA										
RfD_{ij}	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	V	Mn	Co	As
RfD_{inh}	2.86E-05	2.06E-02	4.02E-02	3.00E-01	1.00E-03	3.52E-03	7.00E-03	1.43E-05	5.71E-06	3.01E-04
RfD_{ing}	3.00E-03	2.00E-02	4.00E-02	3.00E-01	1.00E-03	3.50E-03	7.00E-03	4.60E-02	2.00E-02	3.00E-04
$\text{RfD}_{\text{dermal}}$	6.00E-05	5.40E-03	1.20E-02	6.00E-02	1.00E-05	5.25E-04	7.00E-05	1.84E-03	1.60E-02	1.23E-04
SF	42	0.84			6.3				9.8	15.1

2 结果与分析

2.1 宣威街道尘土中化学组分

各采样点灰尘样品中所测得的 Li、Be、Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Rb、Sr、Ag、Cd、Cs、Ba、Tl、Pb、Bi、Th、U 等 29 种元素的平均含量见表 4,从中可以看出,宣威街道尘中 Al 和 Fe 含量较高,Al 元素的含量在不同区域的分布规律明显呈“电厂 > 来宾 > 倘塘”的特征(图 2),V、Ni、Co、Zn 和 Cd 等重金属元素的含量也呈现出与 Al 元素变化的类似规律(图 3); Fe 元素在 4 个地区的含量则趋于稳定.

表 4 各采样点金属元素的含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Mass concentration of chemical elements at different sampling sites/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					
金属	电厂	板桥	倘塘	来宾	平均值 ± 方差
Li	81.37	83.57	47.44	37.19	62.39 ± 23.57
Be	2.45	3.78	2.12	6.97	3.83 ± 2.21
Na	2 359.21	2 860.79	2 429.74	12 146.96	4 949.17 ± 4 803.64
Mg	17 685.29	17 771.76	12 814.01	22 900.18	17 792.81 ± 4 118.48
Al	104 827.49	94 790.21	54 158.83	92 942.14	86 679.67 ± 22 300.58
K	9 972.48	11 367.76	8 478.13	12 701.22	10 629.90 ± 1 816.32
Ca	15 629.31	15 781.06	12 377.99	17 638.36	15 356.68 ± 5 185.80
V	333.60	364.49	219.87	277.06	298.75 ± 63.85
Cr	1 377.15	2 803.71	1 052.06	546.35	1 444.82 ± 968.28
Mn	1 814.47	1 820.45	1 037.90	2 092.55	1 691.34 ± 454.53
Fe	111 220.11	131 521.48	75 622.56	117 257.77	108 905.48 ± 23 765.20
Co	58.62	60.21	34.45	62.92	54.05 ± 13.19
Ni	182.02	175.99	70.53	117.52	136.51 ± 52.74
Cu	433.39	362.22	151.23	421.10	341.98 ± 130.91
Zn	1 271.09	1 010.79	295.69	534.17	777.93 ± 443.25
Ga	99.11	101.31	72.24	117.28	97.49 ± 18.68
As	33.99	37.41	17.93	12.08	25.09 ± 12.61
Se	11.27	7.67	3.92	9.72	8.15 ± 3.18
Rb	58.85	63.91	42.51	50.68	53.99 ± 9.39
Sr	301.75	282.99	194.56	418.40	299.43 ± 92.06
Ag	0.78	0.64	0.32	0.45	0.55 ± 0.20
Cd	33.57	23.60	2.07	4.91	16.04 ± 15.10
Cs	6.29	6.58	4.14	2.45	4.87 ± 1.94
Ba	491.96	504.14	386.23	607.67	497.50 ± 90.54
Tl	0.90	0.85	0.36	0.16	0.57 ± 0.36
Pb	460.98	365.51	112.94	75.12	253.64 ± 189.00
Bi	6.39	4.81	0.66	0.46	3.08 ± 2.98
Th	16.98	18.01	10.89	8.19	13.52 ± 4.74
U	7.45	7.08	4.32	4.35	5.80 ± 1.70

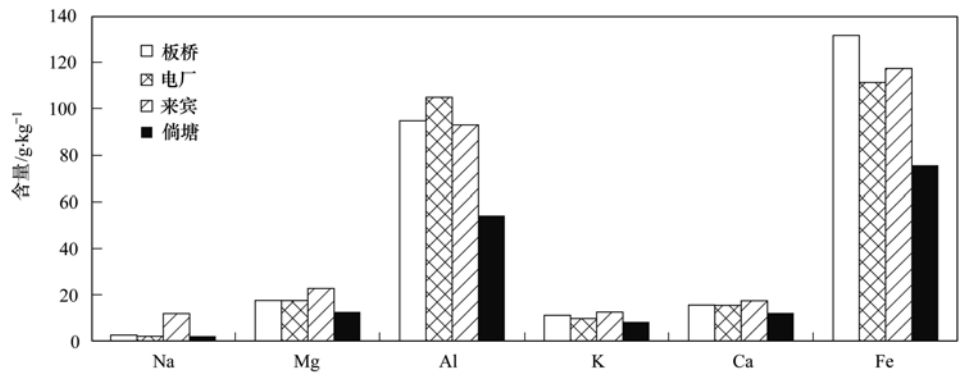


图2 宣威街道尘中常量化学元素分布

Fig. 2 Distribution of crustal metals in street dusts in Xuanwei

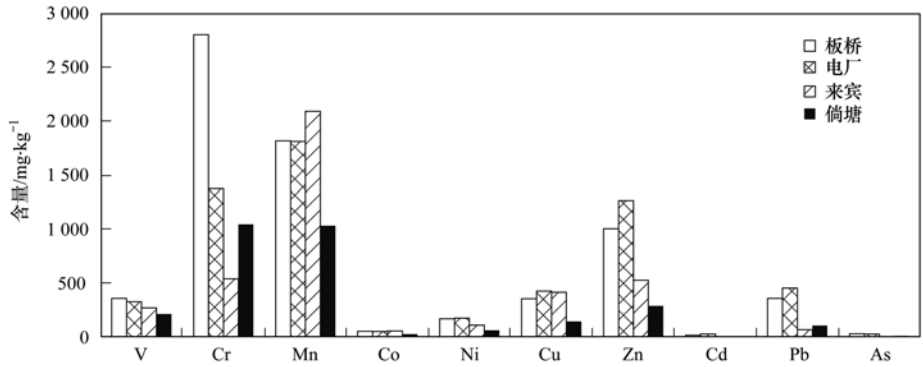


图3 宣威街道尘中重金属元素分布

Fig. 3 Distribution of heavy metals in street dusts in Xuanwei

2.2 宣威街道尘和其他区域街道尘中重金属元素含量比较

表5中列出了宣威和国内其他一些城市街道尘土中重金属的平均含量以及云南省土壤背景值。不难看出,宣威街道灰尘中V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、

Zn、Cd、Pb和As等10种重金属平均含量值均显著高于云南省土壤背景值,其中Cr、Cu、Cd和As等重金属的含量要高于国内其他地方(有色重金属工业基地铜陵市除外)的街道尘土重金属含量,表明宣威市地表灰尘重金属污染较为严重。

表5 宣威及国内其他城市街道尘土重金属的平均含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 5 Mean concentrations of heavy metals in street dust in Xuanwei and several other cities/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

城市	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	文献
宣威	298.75	1 444.82	1 691.34	54.05	136.51	341.98	777.93	16.04	253.64	25.09	本研究
重庆	—	83.93	—	—	34.65	78.22	144.69	0.31	73.63	12.16	[1]
北京	—	69.33	—	—	25.97	72.13	219.20	0.64	201.82	—	[11]
上海	—	218.91	—	—	64.91	186.41	687.25	0.97	212.94	—	[12]
南京	42.33	67.13	—	10.11	46.24	102.83	302.70	4.37	82.65	—	[4]
保定	—	225.00	—	—	—	177.00	416.00	2.84	279.00	—	[14]
乌鲁木齐	—	109.69	585.80	10.97	43.28	81.06	549.01	—	82.71	—	[15]
沈阳	—	—	—	—	—	81.33	334.47	4.35	106.26	—	[17]
铜陵	—	145.47	—	—	121.15	1 346.59	2 689.61	20.72	312.30	259.37	[18]
宝鸡	88.9	126.7	804.2	15.9	48.8	123.20	715.3	—	433.20	19.80	[19]
合肥	—	96.88	—	—	—	67.50	2 332.96	4.531	132.15	—	[7]
云南省土壤背景值	154.9	65.2	626	17.5	42.5	46.3	89.7	0.218	40.6	18.4	[29]

1) “—”表示无数据

2.3 宣威街道尘土中重金属的源解析

富集因子法中的参比元素应选择地壳中普遍

大量存在的,人为污染源很小,化学稳定性好和挥发性较低的元素^[23]。本研究所采用的参比元素是

Al,参比系统为地壳的元素丰度. 所计算的宣威街道尘土中重金属的富集因子见表 6. 可以看出,所研究的 10 种重金属中,V、Mn、Co 和 Ni 的富集因子接近于 2,属于轻微富集(污染),表明这几种元素主要来源于地壳;Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 的

富集因子要大于 5,污染比较严重,说明这几种元素明显受到当地人类活动的影响,由于采样点周边没有重工业,且宣威当地机动车辆稀少,推测这几种重金属元素主要来源于宣威电厂排放的燃煤颗粒物.

表 6 宣威街道尘土重金属的富集因子

Table 6 Enrichment factors of heavy metals in street dust in Xuanwei										
重金属	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As
富集因子	2.08	13.55	1.67	2.03	1.71	5.83	10.42	75.22	18.30	13.07

2.4 宣威街道尘土中重金属的健康风险评价

对于暴露量计算公式中重金属含量 C 的取值,目前国内外的研究没有统一的标准,US EPA 推荐采用重金属含量数据的 95% 置信上限,即 95% UCL^[31] 计算暴露量,但一些学者认为这样可能会过高估计风险水平^[7,18,36]. 因此,本研究采用重金属的平均含量作为估算风险的指标. 由公式(1)~(4)计算出重金属的暴露量如表 7,从中可以得出各

种重金属的暴露量均表现为手-口途径的暴露量 > 皮肤接触暴露量 > 呼吸吸入途径的暴露量,说明手-口途径摄入是宣威市街道灰尘暴露风险的最大途径. 在手-口暴露中,儿童的非致癌暴露量总和是成人的 8.53 倍;呼吸暴露途径中,儿童的非致癌暴露量总和是成人的 1.63 倍;皮肤接触暴露中,儿童的非致癌暴露量总和是成人的 6.54 倍. 因此儿童的非致癌健康风险要比成人大.

表 7 宣威市街道尘土重金属暴露量/mg·(kg·d)⁻¹

Table 7 Exposure dose of heavy metals in street dust in Xuanwei/mg•(kg•d) ⁻¹							
重金属	非致癌剂量						致癌剂量 呼吸暴露
	呼吸暴露		手-口暴露		皮肤暴露		
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	
Cr	4.74E-07	2.91E-07	1.69E-02	1.98E-03	1.94E-05	2.97E-06	1.29E-07
Ni	4.48E-08	2.75E-08	1.60E-03	1.87E-04	1.84E-06	2.81E-07	1.22E-08
Cu	1.12E-07	6.89E-08	4.00E-03	4.68E-04	4.60E-06	7.03E-07	
Zn	2.55E-07	1.57E-07	9.09E-03	1.07E-03	1.05E-05	1.60E-06	
Cd	5.26E-09	3.23E-09	1.87E-04	2.20E-05	2.16E-07	3.30E-08	1.43E-09
Pb	8.32E-08	5.11E-08	2.96E-03	3.47E-04	3.41E-06	5.22E-07	
V	9.80E-08	6.02E-08	3.49E-03	4.09E-04	4.02E-06	6.14E-07	
Mn	5.55E-07	3.41E-07	1.98E-02	2.32E-03	2.27E-05	3.48E-06	
Co	1.77E-08	1.09E-08	6.32E-04	7.40E-05	7.27E-07	1.11E-07	4.84E-09
As	8.23E-09	5.05E-09	2.93E-04	3.44E-05	3.37E-07	5.16E-08	2.24E-09
总和	3.75E-05	2.31E-05	1.34E+00	1.57E-01	1.54E-03	2.35E-04	1.50E-07

由公式(5)和(6)计算出各种重金属的非致癌风险商(HQ)和风险指数(HI)见表 8,可以看出,各种重金属经呼吸暴露和皮肤暴露的 HQ 均小于 1,暴露风险不大;但在经手-口暴露途径中,儿童的 Cr 的 HQ 大于 1,表明该地区 Cr 对儿童的健康风险较高;而且 Pb、V、Mn、As 的 HI 都接近于 1,对儿童存在一定的非致癌健康风险. 各种金属不同暴露途径的风险顺序均为手-口暴露 > 皮肤暴露 > 呼吸暴露;不同人群的风险顺序为:儿童 > 成人,说明宣威市街道灰尘的主要风险途径是经手-口暴露,危害的人群主要是儿童. 这与重庆^[1]、上海^[8]、乌鲁木齐^[11]、沈阳^[13]和宝鸡^[15]等城市研

究结果相似.

对于致癌风险,由公式(7)和(8)计算出各采样点 Cd、Cr、Ni、As、Co 致癌风险(Risk)如表 9,从中可以看出宣威街道灰尘重金属致癌总风险为 5.53×10^{-6} ,其中 Cr 的致癌风险为 5.43×10^{-6} ,介于 US EPA 推荐的可接受风险阈值范围 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,存在潜在的致癌风险;Cd、Ni、Co、As 的致癌风险均小于 10^{-6} ,致癌风险较低;不同重金属元素的致癌风险依次为 Cr > Co > As > Cd > Ni; 不同地方的致癌风险顺序为板桥 > 电厂 > 来宾 > 倘塘,这与 Ni、Cd 等致癌重金属在 4 个采样点的含量呈现出了相似的空间变化趋势.

表 8 宣威市街道尘土重金属的非致癌风险商 (HQ) 与非致癌风险指数 (HI)

Table 8 HQ and HI of heavy metals in street dust in Xuanwei

重金属	风险商 (HQ)						风险指数 (HI)	
	呼吸暴露		手-口暴露		皮肤暴露		儿童	成人
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人		
Cr	1.66E-02	1.02E-02	5.63E+00	6.60E-01	3.24E-01	4.95E-02	5.97E+00	7.19E-01
Ni	2.17E-06	1.33E-06	7.98E-02	9.35E-03	3.40E-04	5.20E-05	8.01E-02	9.40E-03
Cu	2.79E-06	1.71E-06	9.99E-02	1.17E-02	3.83E-04	5.86E-05	1.00E-01	1.18E-02
Zn	8.50E-07	5.22E-07	3.03E-02	3.55E-03	1.74E-04	2.67E-05	3.05E-02	3.58E-03
Cd	5.26E-06	3.23E-06	1.87E-01	2.20E-02	2.16E-02	3.30E-03	2.09E-01	2.53E-02
Pb	2.36E-05	1.45E-05	8.47E-01	9.93E-02	6.49E-03	9.94E-04	8.54E-01	1.00E-01
V	1.40E-05	8.60E-06	4.99E-01	5.85E-02	5.74E-02	8.78E-03	5.56E-01	6.73E-02
Mn	3.88E-02	2.38E-02	4.30E-01	5.04E-02	1.24E-02	1.89E-03	4.81E-01	7.61E-02
Co	3.10E-03	1.91E-03	3.16E-02	3.70E-03	4.54E-05	6.95E-06	3.47E-02	5.62E-03
As	2.73E-05	1.68E-05	9.77E-01	1.15E-01	2.74E-03	4.19E-04	9.80E-01	1.15E-01

表 9 宣威街道尘土重金属致癌风险

Table 9 Carcinogenic risk of street dust heavy metals in Xuanwei

地点	致癌风险					致癌总风险
	Cr	Ni	Cd	As	Co	
电厂	5.17E-06	1.37E-08	1.89E-08	4.59E-08	5.14E-08	5.30E-06
板桥	1.05E-05	1.32E-08	1.33E-08	5.07E-08	5.28E-08	1.07E-05
倘塘	3.95E-06	5.30E-09	1.17E-09	2.31E-08	3.02E-08	4.01E-06
来宾	4.85E-06	8.83E-09	2.77E-09	1.58E-08	5.52E-08	4.93E-06
平均值	5.43E-06	1.03E-08	9.04E-09	3.39E-08	4.74E-08	5.53E-06

3 结论

(1)宣威街道尘土中 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 As 等 10 重金属的平均含量均显著高于云南省土壤背景值,其中 Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 和 As 等重金属的富集程度较高,Cr、Cu、Cd 和 As 等重金属的含量要高于国内部分城市的街道尘土重金属含量,表明宣威市地表灰尘重金属污染已较为严重. 在空间分布上,部分金属元素的含量呈现出了顺风向上的“电厂>来宾>倘塘”的趋势. 宣威街道尘土中 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 等重金属主要来源于电厂排放的燃煤颗粒物.

(2)对于非致癌风险,宣威街道灰尘重金属的暴露量 (ADD) 和非致癌风险商 (HQ) 均为手-口暴露>皮肤暴露>呼吸暴露的顺序;不同人群的风险顺序为儿童>成人;而且,儿童对 Cr 手-口暴露的非致癌风险商为 5.63,大于安全阈值 1,因此该地区 Cr 对儿童的危害较大.

(3)宣威街道尘土中各种重金属的致癌总风险为 5.53×10^{-6} ,其中 Cr 的致癌风险为 5.43×10^{-6} ,介于 US EPA 推荐的可接受风险阈值范围 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,存在潜在的致癌风险;Cd、Ni、Co、As 的致癌风险均小于 10^{-6} ,致癌风险较低;不同重金属

元素的致癌风险依次为 $\text{Cr} > \text{Co} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Ni}$;不同地方的致癌风险顺序为板桥>电厂>来宾>倘塘.

(4)Cr 元素对宣威的儿童来说既具有致癌风险又具有非致癌风险,而儿童对重金属的暴露途径主要是手-口摄入. 建议当地政府及环境卫生部门查明重金属尤其是 Cr 元素的来源,同时要教育当地儿童养成良好的生活习惯.

参考文献:

- [1] 李章平. 重庆市主城区街道灰尘的污染与风险特征研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [2] Shi G T, Chen Z L, Bi C J, *et al.* A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(3): 764-771.
- [3] Arslan H. Heavy metals in street dust in Bursa, Turkey[J]. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 2001, **19**(3): 439-445.
- [4] Li H M, Qian X, Hu W, *et al.* Chemical speciation and human health risk of trace metals in urban street dusts from a metropolitan city, Nanjing, SE China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 212-221.
- [5] Manasreh W A. Assessment of trace metals in street dust of Mutah City, Karak, Jordan[J]. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2010, **5**(1): 5-12.
- [6] Sutherland R A, Tolosa C A. Multi-element analysis of road-

- deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **110** (3): 483-495.
- [7] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评估[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [8] Cook A G, Weinstein P, Centeno J A. Health effects of natural dust: role of trace elements and compounds[J]. *Biological Trace Element Research*, 2005, **103**(1): 1-15.
- [9] Acosta J A, Faz A, Kalbitz K, *et al.* Partitioning of heavy metals over different chemical fraction in street dust of Murcia (Spain) as a basis for risk assessment [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **144**: 298-305.
- [10] Bae S, Inyang H I, De Brito Galvão T C, *et al.* Soil desiccation rate integration into empirical dust emission models for polymer suppressant evaluation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **132**(1): 111-117.
- [11] Du Y R, Gao B, Zhou H D, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in road dusts in urban parks of Beijing, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **18**: 299-309.
- [12] 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.
- [13] Zhang J, Deng H G, Wang D Q, *et al.* Toxic heavy metal contamination and risk assessment of street dust in small towns of Shanghai suburban area, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(1): 323-332.
- [14] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(10): 2195-2202.
- [15] 刘玉燕, 刘浩峰, 刘敏. 乌鲁木齐市地表灰尘重金属含量及其健康风险[J]. *干旱区研究*, 2009, **26**(5): 750-754.
- [16] Lu X W, Zhang X L, Li L Y, *et al.* Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China[J]. *Environmental Research*, 2014, **128**: 27-34.
- [17] 李法云, 胡成, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的环境影响与健康风险评估[J]. *气象与环境学报*, 2010, **26**(6): 59-64.
- [18] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
- [19] 陈灿灿, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡市街道灰尘重金属污染的健康风险评估[J]. *城市环境与城市生态*, 2011, **24**(2): 35-38.
- [20] Wang L J, Lu X W, Ren C H, *et al.* Contamination assessment and health risk of heavy metals in dust from Changqing industrial park of Baoji, NW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(5): 2095-2104.
- [21] Lu S L, Yi F, Hao X J, *et al.* Physicochemical properties and ability to generate free radicals of ambient coarse, fine, and ultrafine particles in the atmosphere of Xuanwei, China, an area of high lung cancer incidence[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **97**: 519-528.
- [22] 刘丁戡, 张文超, 吕森林, 等. 宣威街道尘中有害化学元素的组成 [A]. 见: 第十六届中国科协年会——分3 环境污染及职业暴露与人类癌症学术研讨会论文集 [C]. 2014.
- [23] 唐孝炎, 李金龙, 栗欣等. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 207-208.
- [24] Loska K, Cebula J, Pelczar J, *et al.* Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **93**(1-4): 347-365.
- [25] Reimann C, de Caritat P. Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, **34**(24): 5084-5091.
- [26] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的作用[J]. *地质科技情报*, 2006, **25**(1): 65-72.
- [27] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2006, **39**(2): 94-99.
- [28] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(6): 611-627.
- [29] U.S. Environmental Protection Agency. Soil screening guidance: technical background document[R]. Washington, D. C.: Office of Solid Waste and Emergency Response, US Environmental Protection Agency, 1996.
- [30] U.S. Environmental Protection Agency. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington, D. C.: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2002.
- [31] U.S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund (vol. I): human health evaluation manual [R]. Washington, D. C.: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [32] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(27): 3239-3245.
- [33] 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 等. 健康风险评估中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. *安全与环境学报*, 2008, **8**(4): 152-156.
- [34] Ferreira-Baptista 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.
- [35] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-383.
- [36] Grzetic I, Gharani R H A. Potential health risk assessment for soil heavy metal contamination in the central zone of Belgrade (Serbia)[J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2008, **73**(8-9): 923-934.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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