

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

**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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 ..... 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 ..... 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM<sub>2.5</sub>浓度日变化及气象条件影响分析 ..... 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 ..... 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 ..... 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 ..... 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 ..... 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 ..... 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 ..... 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH<sub>3</sub>和N<sub>2</sub>O)减排效果比较:以夏玉米季为例 ..... 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量的观测 ..... 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>分压特征分析 ..... 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 ..... 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 ..... 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 ..... 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 ..... 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 ..... 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 ..... 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 ..... 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 ..... 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 ..... 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 ..... 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 ..... 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 ..... 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 ..... 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 ..... 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 ..... 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 ..... 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce<sup>3+</sup>与Cu<sup>2+</sup>协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 ..... 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 ..... 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO<sub>2</sub>光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 ..... 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 ..... 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 ..... 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 ..... 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 ..... 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 ..... 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 ..... 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 ..... 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 ..... 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 ..... 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 ..... 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 ..... 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 ..... 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>的吸附特性 ..... 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 ..... 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 ..... 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 ..... 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 ..... 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 ..... 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 ..... 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 ..... 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

# 城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险：以贵阳市为例

李晓燕, 汪浪, 张舒婷

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

**摘要:** 本研究以贵阳市为研究区域, 选择 73 户家庭和 6 间办公室采集室内灰尘样品, 用 ICP-OES 测定灰尘中常量元素 Ca、Fe 和重金属元素 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量, 探究室内灰尘重金属水平及影响因素, 并综合室内和室外灰尘暴露量, 评估儿童所受灰尘重金属健康风险. 结果表明: ①家庭室内灰尘中 Ca、Fe 的平均含量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )为 107、31.9; Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )分别为 1.77、107、231、81.9、199、721; ②办公室灰尘中 Cu 和 Zn 含量显著高于家庭灰尘, 其他元素与其在家庭灰尘中的含量差别不大; ③不同楼层家庭灰尘中 Ca、Fe 含量差别不大, Cd、Cu 和 Pb 含量差异明显, 1 楼室内灰尘重金属含量相对较高, 同时高层住宅室内 Pb 含量大于低层住宅; ④家庭住户室外环境和室内装修及使用情况等导致家庭室内灰尘重金属水平差异分布; ⑤灰尘重金属对儿童的暴露没有表现出明显的健康风险.

**关键词:** 家庭灰尘; 办公室灰尘; 重金属; 健康风险; 贵阳市

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2889-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.009

## Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case

LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting

(School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** A total of 73 household dust and 6 office dust were collected and the concentrations of Ca, Fe, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were measured by ICP-OES, in order to study the levels of heavy metals in city indoor dust and assess its risk from indoor and outdoor dust to children. The result showed that: ① The concentrations of Ca, Fe were 107, 31.9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and those of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were 1.77, 107, 231, 81.9, 199, 721  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. ② The levels of Cu and Zn in office dust were significantly higher than those in household dust, and the levels of other elements had no obvious difference from those in household dust. ③ The levels of Ca and Fe in household dust with different floor numbers were not significantly different, but the levels of Cd, Cu and Pb in household dust with different floor numbers had obvious difference. The levels of elements in household dust from 1th floor were relatively higher, and the level of Pb in household dust from higher floors was higher than that on lower floors. ④ Outdoor environment, indoor decoration and life styles may cause the difference of elements level in different household dust. ⑤ There was no obvious risk from heavy metals in dust to children.

**Key words:** household dust; office dust; heavy metal; health risk; Guiyang

城市灰尘(包括室外和室内)是重金属等污染物质的源和汇<sup>[1]</sup>, 灰尘在一定动力作用下再悬浮进入空气, 成为危害环境和人类的潜在威胁. 大量研究表明室外灰尘中重金属累积严重, 对人体存在一定的健康风险<sup>[2,3]</sup>, 但相对室外, 室内灰尘重金属累积更重<sup>[4,5]</sup>. 室内灰尘是一种复杂、多相的粒子混合物, 其来源复杂, 既有室内来源又有室外来源<sup>[6,7]</sup>. 城市人群 80% 以上的时间在各种室内环境度过, 其中在家庭住宅中的时间比率最大, 平均为 44%, 在工作或学习场所的时间平均为 37%<sup>[8]</sup>. 有研究表明, 与室外相比, 室内污染物含量高, 由于人群在室内居留的时间长, 因此人群在室内所受污染物的暴露量大约为室外的 1 000 倍<sup>[9]</sup>, 此外, 儿童的手-口活动频繁, 儿童每天通过手-口途径摄入的灰

尘量远高于成年人每天的摄入量<sup>[10]</sup>, 灰尘中重金属对儿童存在更大的健康风险. 因此室内灰尘重金属累积及其对儿童导致的健康风险值得关注<sup>[11]</sup>.

国外对室内灰尘重金属污染关注较早, 研究内容涉及其含量、来源及影响因素、健康风险等方面<sup>[12-15]</sup>, 结果显示城市室内灰尘重金属累积较重, 而且不同城市、不同室内环境之间, 灰尘重金属含量变化较大, 影响因素各不相同. 国内对室内灰尘重金属的污染累积关注较少, Tong 等<sup>[16]</sup>对香港家庭灰尘重金属水平及影响因素以及杨文麟等<sup>[17]</sup>对中

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161079)

作者简介: 李晓燕(1966~), 女, 教授, 主要研究方向为区域环境质量, E-mail: lxyan421@163.com

国部分省份农村室内灰尘铅污染特征进行了研究, 李晓燕等<sup>[18]</sup>对西南三市家庭灰尘重金属进行了研究. 在少量涉及室内灰尘重金属的研究中, 对灰尘中重金属健康风险的研究报道更少. 而且我国目前对灰尘重金属健康风险研究主要集中在室外灰尘, 较少考虑室内灰尘重金属的暴露. 本研究以贵阳市为例, 采集城市家庭室内灰尘, 分析常量元素 Ca、Fe 和重金属元素 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量, 探讨家庭室内灰尘中 Cd、Cu、Pb、Zn 等重金属的平均水平及累积状况, 并与同期获取的少数办公室灰尘重金属数据进行对比, 分析同一城市不同室内环境灰尘重金属水平差异, 探讨室内灰尘重金属可能来源及影响因素; 综合考虑室内和室外两个暴露途径, 根据室内外居留时间的分配, 修正美国环保署 (U. S. EPA) 推荐的人体健康暴露风险评价模型, 以家庭室内灰尘重金属水平及本研究组前期室外灰尘重金属的研究结果<sup>[19]</sup>为暴露水平, 探讨灰尘重金属对儿童导致的潜在健康风险.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域

贵阳市地处黔中山原丘陵中部, 海拔高度 1 100 m 左右, 属亚热带湿润温和型气候, 地貌以山地、丘陵为主, 是我国西南地区最发达的城市之一. 中心城区面积 220 km<sup>2</sup>, 具有人口密度高, 交通拥堵等多数发展中城市具有的通病. 同时, 贵阳城区三面环山, 发展空间小, 城区地形复杂, 与其它大城市

相比又显得狭小和拥挤, 住宅区分布密集, 部分住宅区混合在商业区和交通区. 前期研究显示贵阳市室外灰尘中 Cd、Cu、Pb、Zn 等重金属水平相对于土壤背景值累积较重<sup>[19]</sup>.

### 1.2 样品采集

本研究 73 个家庭采样点主要分布在贵阳市云岩区、南明区两个老城区, 少数分布在其他几个新城区和郊区 (因采样点为私人家庭, 尊重主人意愿, 不进行定位). 家庭灰尘样品采集时间为 2~4 月. 样点分布及楼层信息见表 1. 在每个家庭正常生活情况下 (避免大量客人涌入或其他异常情况带入大量固定源的尘土), 在室内 (客厅、卧房和书房) 地面、桌面和柜顶等易积累灰尘的地方, 用小刷子和小塑料撮箕收集灰尘 (避开厨房和卫生间, 主要是避开生活垃圾), 采集灰尘约 2~5 g, 放入密封袋保存, 共采集家庭灰尘 73 份. 同期收集 6 份办公室灰尘. 采集灰尘的同时, 对各家庭室内外环境进行询问和统计. 采集的样品带回实验室自然风干后过 140 目筛 ( $\leq 105 \mu\text{m}$ ) 备用.

### 1.3 化学分析

样品采用 HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>3</sub> 混酸消解, 纯水定容, ICP-OES 测定 (IRIS Intrepid II) Ca、Fe、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 这 8 种元素, 测定过程中按原始样品 15% 的比例插入国家土壤标准参比物质 (GSS-4, GSS-9) 和重复样进行质量控制, 结果显示标准样和重复样的合格率均达到 100%, 分析数据可靠.

表 1 贵阳市家庭室内灰尘采样点

Table 1 Indoor dust sampling sites in household in Guiyang

区域	样点数									
	总	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层	8 层	>8 层
云岩区	28	7	4	2	3	3	1	5	2	1
南明区	32	9	7	6	1	2	2	0	5	0
其它区 (新城区和郊区)	13	3	3	0	1	1	3	1	0	1
总和	73	19	14	8	5	6	6	6	7	2

### 1.4 数据处理

数据统计分析采用 SPSS 软件. 用单样本 K-S 检验方法对数据进行正态检验, 若  $PK-S > 0.05$ , 表示样本服从正态分布, 对不服从正态分布的数据进行数据转换, 直至数据服从正态分布. 在保证数据服从正态分布的前提下, 对数据进行差异显著性检验和元素相关性分析, 差异显著性检验  $P < 0.05$ , 表示两样本数据具有显著性差异; 相关性检验  $P < 0.05$ , 表示两元素之间具有显著性相关关系.

### 1.5 健康风险评估方法

儿童灰尘重金属健康风险评价主要考虑手-口摄入暴露途径, 综合室内和室外灰尘重金属暴露量和时长, 对美国环保署 (U. S. EPA) 人体暴露风险评价模型进行了修正.

污染物总暴露量按式 (1) 计算:

$$Q_{\text{总吸食}} = Q_{\text{室内}} + Q_{\text{室外}} \quad (1)$$

污染物暴露量  $Q_{\text{室内}}$  和  $Q_{\text{室外}}$  的计算均按照式 (2) 计算:

$$Q_{\text{吸食}} = (C \times 10^{-3} \times \text{IngR}/\text{BW}) \times R \quad (2)$$

式中,  $Q_{\text{吸食}}$  为儿童无意吸入灰尘重金属的量, 即污染物暴露量(以 BW 计, 下同),  $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $C$  为室内外灰尘中重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 室内灰尘重金属浓度为本研究数据, 室外灰尘重金属含量数据来自前期研究<sup>[19]</sup>;  $\text{IngR}$  为摄入的灰尘频率,  $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ , 取值  $200 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\text{BW}$  为儿童平均体重,  $\text{kg}$ ; 取值  $15 \text{ kg}$ ;  $R$  为系数, 室内取  $0.38$ , 室外取  $0.20$ 。

灰尘重金属健康风险商按式(3)计算:

$$\text{HQ} = \frac{Q_{\text{吸食}}}{\text{RfD}} \quad (3)$$

式中,  $\text{HQ}$  为非致癌风险商, 表征单种污染物的非致癌风险;  $\text{RfD}$  为手-口途径的参考剂量,  $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ , 表示在单位时间单位体重摄取的不会引起人体不良反应的污染物最大量, 取值见表 2。当  $\text{HQ} < 1$  时, 表示重金属的健康风险可以忽略; 当  $\text{HQ} > 1$  时, 表示存在重金属健康风险, 其值越大, 健康风险越大。

表 2 灰尘重金属 RfD 参考值<sup>[20]</sup>

Table 2 Reference doses for heavy metals in dust

重金属	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
RfD/ $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	1.0	40	20	3.57	300

表 3 贵阳市家庭室内灰尘元素含量<sup>1)</sup> ( $n=73$ )

Table 3 Content of elements in household indoor dusts in Guiyang

统计量	Ca $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Fe $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cr $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cu $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ni $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
最小值	35.2	10.1	0.322	32.1	50.4	18.5	47	238
最大值	211	194	23.3	1051	10158	735	3740	31332
算术均值	112	37.1	2.67	128	439	117	290	1253
偏差	33.7	26.6	3.38	126	1200	133	483	3653
中值	111	30.2	1.40	98.4	198	76.6	186	622
几何均值	107	31.9	1.77	107	231	81.9	199	721
变异度	3.01	7.17	1.27	0.984	2.73	1.14	1.67	2.92

1) Ca、Fe 为常量元素

Cr 和 Zn 均有交叉来源。

与前期 34 个样本统计数据<sup>[18]</sup>相比, 仅 Pb 含量略低于前期结果, 其余元素含量两次结果基本一致。

不同行政区家庭室内灰尘重金属几何均值略有

## 2 结果与分析

### 2.1 家庭灰尘重金属水平

用单样本 K-S 检验方法对数据进行正态检验, 结果表明贵阳市家庭灰尘中元素含量全部符合对数正态分布, 因此本研究均以几何均值表征元素含量平均水平。贵阳市家庭室内灰尘元素含量统计值见表 3。家庭室内灰尘元素含量的大小排序为:  $\text{Ca} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cd}$ , 与贵州省土壤元素背景值<sup>[21]</sup>排序  $\text{Ca} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$  相比, Cu 和 Pb 的顺序明显提前, 说明室内灰尘中 Cu 和 Pb 受人类活动影响较大, 累积明显。

家庭室内灰尘不同元素在各样点间的含量差异不同, Ca、Fe 和 Cr 的变异度均小于 1, 说明它们受环境影响相对较小; Cd 和 Ni 变异度介于 1~1.5 之间, 其受环境影响的程度处于中间地位, Cu、Pb 和 Zn 含量变异度均大于 1.5, 特别是 Cu 和 Zn, 变异度分别为 2.73 和 2.92, 其受不同家庭具体环境影响的程度最大。家庭灰尘元素相关分析显示, 元素 Fe 与 Cr ( $P=0.010$ ), Cr 与 Cu ( $P=0.000$ ), Cu 与 Zn ( $P=0.003$ ) 显著相关, 说明贵阳市家庭灰尘中的 Cr 既与 Fe 有相近来源, 又与 Cu 有相近来源, 而 Cu 与

差异(表 4), 两个老城区的 Cd、Cr 和 Cu 均值均高于其它区, 云岩区的 Ni、Pb 和 Zn 的均值高于南明区和其它区域, 其它元素 3 个区域平均值相差不大。统计分析显示不同区域各元素含量均不存在显著性差异。

表 4 贵阳市不同区域家庭室内灰尘元素含量

Table 4 Content of elements in household indoor dusts in different regions in Guiyang

统计量	Ca $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Fe $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cr $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cu $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ni $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
云岩区	106	32.9	1.96	120	286	95.1	234	896
南明区	111	35.1	1.92	102	226	69.3	179	635
其它区(新城区和郊区)	99.3	23.6	1.15	93.9	154	89.8	183	619

## 2.2 办公室灰尘重金属水平

表5显示了办公室室内灰尘元素含量水平. 各元素含量大小顺序与家庭室内灰尘一致, 也表现出相对于贵州省土壤背景值, Cu、Pb明显累积的特点. 对比家庭室内灰尘重金属含量(表3), 两种环境中, Fe、Ni、Pb含量相差不大, 办公室灰尘中Ca含量略高于家庭灰尘, 而Cu、Zn含量分别是家庭灰

尘中Cu和Zn含量的4.15和2.13倍, 办公室灰尘中Cu( $P=0.000$ )和Zn( $P=0.017$ )含量显著高于家庭灰尘. 办公室各元素含量变异度均小于1, 说明不同样点办公室灰尘中元素含量相对均衡, 与家庭相比, 元素含量受采样点具体的环境影响相对较小. 这与办公室本身环境较单一, 不同办公室环境差异较小有关.

表5 贵阳市办公室室内灰尘元素含量( $n=6$ )

Table 5 Concentration of elements in office indoor dusts in Guiyang

统计量	Ca / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Fe / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cr / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Ni / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
最小值	75.5	21.2	1.32	75.8	248	34.8	56.7	507
最大值	172	67.8	7.16	421	3893	221	499	5621
算术均值	124	36.5	2.70	187	1645	110	266	2170
偏差	29.4	16.4	2.07	123	1574	66.9	132	1838
几何均值	120	33.4	2.19	152	959	88.9	223	1535
变异度	2.37	4.48	0.766	0.658	0.957	0.608	0.498	0.847

## 2.3 相对于室外灰尘的累积

以贵阳市室外灰尘<sup>[19]</sup>重金属含量作为参照值, 计算家庭灰尘和办公室灰尘重金属含量相对室外灰尘重金属的累积(图1). 所有累积系数均大于1, 说明家庭灰尘和办公室灰尘中重金属水平均高于室外灰尘. 家庭灰尘中Zn累积系数最高, 为1.72, 其次是Ni, 累积系数为1.63, Cd、Cu、Pb累积系数相近, 最低的是Cu, 累积系数为1.41, 家庭灰尘中5种元素累积系数均小于2; 办公室灰尘Cd、Ni和Pb相对于室外灰尘的累积特征与家庭灰尘相似, 但Cu和Zn的累积程度远高于家庭室内灰尘, 累积系数分别高达5.85和3.66.

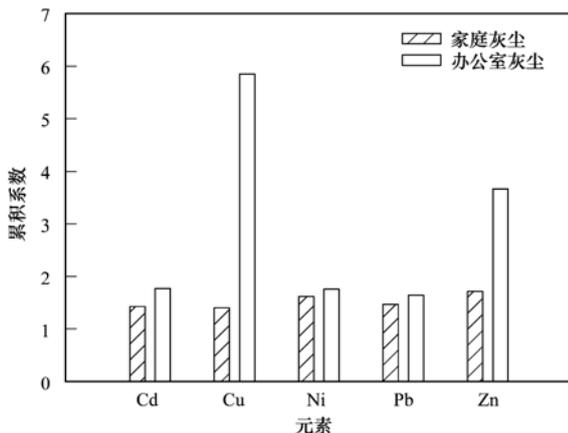


图1 家庭灰尘和办公室灰尘相对室外灰尘的重金属累积系数

Fig. 1 Accumulation coefficient of heavy metals in household and office indoor dust against outdoor dust

## 2.4 不同楼层家庭灰尘重金属分布特征

表6为不同楼层家庭灰尘元素含量水平. 因11

和24层仅一个样本, 不便参与比较, 故将1~8层家庭灰尘元素水平进行统计分析. 结果表明: 1层家庭灰尘元素含量相对较高, 1层家庭灰尘中的Fe( $P=0.034$ )、Cr( $P=0.046$ )、Pb( $P=0.037$ )、Zn( $P=0.044$ )显著高于2层, Zn( $P=0.026$ )显著高于3层, Cu( $P=0.027$ )显著高于6层; 不同楼层之间, 家庭灰尘中常量元素Ca、Fe含量变化较小, 而微量元素Pb、Cu、Cd等含量变化较大, Pb随楼层增高, 含量有增加的趋势, 其中, 5层的Pb( $P=0.016$ )含量显著高于1层, 7、8层的Pb( $P=0.023$ ,  $P=0.017$ )含量显著高于2层, Zn含量除一层较高外, 其它楼层变化不太明显. 为进一步说明不同楼层家庭灰尘的变化趋势, 将1~4层和5~8层分别作为低楼层和高楼层统计, 结果发现, 高楼层的Pb( $P=0.002$ )显著高于低楼层, 其它元素含量虽有些微差别, 但没有统计学意义. 总体来看, 1层室内灰尘重金属含量相对较高, 同时高层住宅室内Pb含量大于低层住宅.

家庭灰尘元素含量随楼层变化的变异度(表6)可以划分为三类, 第一, Ca、Fe、Cr和Zn在灰尘中的含量随楼层变化的变异度较小, 说明这4个元素的含量随垂直空间变化不明显; 第二, Cd和Ni随楼层变化的变异度处于中间水平, 变异度分别为0.535和0.406; 第三, Cu和Pb含量随楼层变化的变异度较大, 分别为0.967和0.676, 说明家庭灰尘中Cu和Pb含量随垂直空间变化差异较大. 综上所述, 家庭灰尘元素含量楼层变异度中Ca、Fe、Cr和Zn元素差异不大, Cu和Pb含量随楼层的变异度最大.

表 6 不同楼层家庭灰尘元素含量

楼层(n)	Ca /g·kg <sup>-1</sup>	Fe /g·kg <sup>-1</sup>	Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	Cr /mg·kg <sup>-1</sup>	Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	Ni /mg·kg <sup>-1</sup>	Pb /mg·kg <sup>-1</sup>	Zn /mg·kg <sup>-1</sup>
1(19)	111	41.6	1.72	139	332	89.2	190	1 044
2(14)	93.9	26.4	1.79	90.2	202	67.2	128	545
3(8)	111	32.0	1.55	94.3	174	65.9	167	549
4(5)	98.3	28.3	1.26	107	261	168	193	686
1~4层	104	33.2	1.65	111	248	83	165	732
5(6)	100	27.0	3.62	98.3	272	147	497	736
6(6)	126	31.9	3.05	97.2	130	74.6	154	634
7(6)	108	31.9	1.58	88.3	173	70.9	277	780
8(7)	120	32.9	1.31	107	213	54.0	262	685
5~8层	112	29.9	1.98	101	204	79.8	275	704
11(1)	115	23.0	1.00	139	197	88.7	687	782
24(1)	78.3	15.9	0.512	146	1 148	85.7	140	584
变异度	0.132	0.234	0.535	0.200	0.967	0.406	0.676	0.211

## 2.5 儿童受灰尘重金属的健康风险

按照式(1)~(3)分别计算儿童手-口途径的灰尘重金属日均暴露量和健康风险商 HQ(表 7)。儿童在室内受灰尘中 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 元素的暴露量分别是 0.009、1.17、0.413、1.01、3.65  $\mu\text{g}(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ,均高于其在室外灰尘中的暴露量;不同重金属健康风险商的大小顺序为 Pb > Cu > Ni > Zn > Cd,说明儿童所受灰尘中 Cd 和 Zn 的风险最小,受 Pb 暴露的风险相对较大,Pb 的风险商约为其他元素风险商的 9.6~32 倍,但风险商 HQ 均小于 1,因此,灰尘中 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 都没有对儿童表现出明显的健康风险。

表 7 儿童所受灰尘重金属暴露量和风险商

Table 7 Exposure amount and Hazard quotient (HQ) of dust heavy metals for children

项目	$Q/\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$			HQ $\times 10^{-2}$
	$Q_{\text{室内}}$	$Q_{\text{室外}}$	$Q_{\text{总吸食}}$	
Cd	0.009	0.003	0.012	1.20
Cu	1.17	0.437	1.61	4.02
Ni	0.413	0.133	0.546	2.73
Pb	1.01	0.359	1.37	38.4
Zn	3.65	1.11	4.77	1.59

## 3 讨论

### 3.1 住户环境对室内灰尘重金属的影响

#### 3.1.1 楼层高度对室内灰尘重金属的影响

家庭室内灰尘是一种复杂、多相的粒子混合物,它来源复杂,可能包括人体脱落的皮肤鳞片、毛发、衣服和地毯纤维、漆片、建筑涂料、食品、化妆品以及家庭做饭和取暖所产生的各种颗粒物,同时还含有一定量的室外道路灰尘和车辆排放的废气颗粒

物<sup>[6]</sup>。室内灰尘的组成及来源的复杂表明了室内灰尘重金属的来源也并不是单一的,而是复杂多变的,室内来源和室外来源共同导致了室内灰尘重金属的累积。城市家庭的室内外环境是影响室内灰尘重金属含量的重要因素<sup>[22]</sup>。已有研究表明室内 PM<sub>10</sub> 中的 Cu、Zn、Cd、Pb 主要是因为室外穿透而进入室内<sup>[23]</sup>。Kim 等<sup>[24]</sup>研究发现新西兰基督堂市家庭灰尘中 Zn 的主要来源是地毯底衬橡胶,而道路灰尘和室内壁炉是灰尘 Cu 的主要来源。Hunt 等<sup>[25]</sup>发现英国里士满伦敦州住户室内灰尘 Pb 主要来源于油漆涂料、道路灰尘和花园土壤。本研究显示,楼层变化对灰尘中不同元素含量影响不同,楼层变化对 Ca、Fe、Cr 和 Zn 的影响较小,对 Cd、Ni 的影响次之,对 Cu 和 Pb 的影响最大,说明不同楼层家庭灰尘中 Cu 和 Pb 的来源相对复杂,另外,Zn 含量在基于所有样本( $n=73$ )计算的变异度最大,而基于楼层变化的变异度相对较小,这可能是因为同一楼层的家庭室内灰尘 Zn 含量数据差异很大,而对一层楼取平均值时含量数据的大小差异正好互补,使得不同楼层的灰尘 Zn 含量平均值反而较为接近,这也说明家庭室内灰尘中 Zn 的来源更为复杂,楼层对 Zn 含量的影响没有表现出明显的规律。本研究显示多数元素在 1 层室内灰尘中含量相对较高,这可能与 1 层最接近地表,空气中灰尘量最大有关,李良玉等<sup>[26]</sup>和本课题组<sup>[27]</sup>都有研究表明室外颗粒物浓度在垂直空间上有随着高度增加而降低的趋势。另外家庭灰尘 Pb 含量有随着楼层增高而增大的趋势,这与贵阳市室外不同楼层空间平台灰尘 Pb 含量变化趋势<sup>[27]</sup>一致,说明室外灰尘 Pb 可能是家庭室内灰尘 Pb 的重要来源之一。

### 3.1.2 燃煤对室内灰尘重金属的影响

本研究中燃煤取暖的家庭住户主要集中在1~2层,室内装修差别不大,均为地面铺设地砖,白色墙壁.家用电器使用情况相似.对1~2层采用燃煤取暖和非燃煤取暖的家庭进行分类统计(表8),元素含量对比分析显示,除Cd外,其他7个元素均表现为燃煤的家庭室内灰尘元素含量高于非燃煤家庭灰尘的含量.研究表明燃煤元素As、Cd、Pb、Zn主要富集于煤尘中,Ni、Cu则主要富集于煤灰中<sup>[28]</sup>.虽然在燃煤取暖过程中,有烟囱将烟尘排到室外,但不可避免会有少部分煤尘沉降于室内,另外煤灰清理直接在室内操作,细粒级的煤灰可能沉降于室内,因此燃煤排放的煤尘和煤灰可能是燃煤家庭室内灰尘重金属的来源之一.

### 3.1.3 临街与不临街对室内灰尘重金属的影响

统计的临街的住户也主要集中在1~2层(表8),室内装修除一户地面铺设木地板外,其他均为地砖铺设,家用电器使用情况相似.将1~2层临街

与非临街的住户室内灰尘重金属含量进行对比分析,发现临街住户室内灰尘中Fe、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量均高于非临街住户,进一步差异分析发现,临街住户室内灰尘中Pb( $P=0.037$ )、Zn( $P=0.006$ )显著高于非临街住户,说明室外灰尘中的Pb、Zn是室内灰尘Pb、Zn的重要来源之一.对1~2层不临街的家庭按燃煤和不燃煤进一步统计发现,除Ca、Fe外,室内灰尘中Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量均表现为不临街非燃煤的家庭略高于不临街燃煤的家庭.这可能是因为家庭具体环境多因素的综合影响导致的最终结果掩盖了燃煤的影响,但比较8个燃煤家庭(2个临街+6个不临街)和6个燃煤但不临街家庭的灰尘元素数据发现,除Ca外,燃煤家庭元素平均值均高于不临街燃煤家庭,特别是Cu和Zn,这说明临街对灰尘元素含量的影响可能大于燃煤的影响,临街对室内灰尘重金属的影响占主导地位.本研究原始数据显示既临街又燃煤的低楼层家庭灰尘重金属含量相对最高.

表8 1~2层不同环境家庭灰尘元素含量

Table 8 Concentration of elements in household dust with different environment(1-2th floor)

因子(n)	Ca /g·kg <sup>-1</sup>	Fe /g·kg <sup>-1</sup>	Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	Cr /mg·kg <sup>-1</sup>	Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	Ni /mg·kg <sup>-1</sup>	Pb /mg·kg <sup>-1</sup>	Zn /mg·kg <sup>-1</sup>
临街(10)	93.5	45.7	2.05	164	611	96	243	1 910
不临街(23)	110	29.0	1.66	102	208	73.5	138	592
燃煤(8)	125	40.1	1.74	144	414	81.3	173	1 296
非燃煤(25)	97.1	32.6	1.75	108	234	78.4	157	677
不临街燃煤(6)	135	35.0	1.61	98.4	185	60.3	123	593
不临街非燃煤(17)	94.8	29.8	1.69	108	205	89.1	158	633

### 3.1.4 室内装修对室内灰尘重金属的影响

Rasmussen等<sup>[5]</sup>研究显示,家庭灰尘中的Pb、Cd等重金属部分来自家庭内部环境,表9统计了不临街家庭使用地砖和使用木地板的室内灰尘元素含量.本研究发现使用地砖的家庭中, Ca、Fe、Cd、Cr含量高于使用木地板的家庭,进一步显著性差异分析发现,家庭灰尘中Fe含量表现为地砖显著高于木地板( $P=0.009$ ),虽然Ca、Cd和Cr含量有较小差异,但无统计学意义;而Cu、Ni、Pb和Zn含量则表现为使用木地板的家庭高于使用地砖的家庭.但木质地板的家庭室内灰尘Cu、Ni、Pb和Zn等元素含量是否一定高于地砖装修的家庭,还有待进一步研究. Kim等<sup>[24]</sup>针对房屋年龄、房屋材质、屋顶类型、地毯的磨损和道路交通等对新西兰家庭灰尘重金属含量的影响,本研究表明,建筑年限相对长的木房室内灰尘Pb含量显著高于砖房.本研究调查发现,部分家庭装修中使用了有颜色的壁纸,而塑料壁

纸中可能含有Pb、Cd、Cr等重金属<sup>[29]</sup>,另外,大多数家庭采用白色乳胶漆刷墙,乳胶漆的主要原料是由烯、酯类原料组成的乳液,其中的白色颜料主要采用钛白粉和立德粉(锌钡白),乳胶漆的抗菌防霉剂中还含有Zn和Cu等离子<sup>[30]</sup>.这些不同墙壁装饰材料的风化和脱落也可能增加室内灰尘重金属的含量.总之室内灰尘重金属来源复杂,途径多样,室内灰尘重金属水平是多种因素共同作用的结果,室内装修状况也会导致灰尘重金属的分布和含量的差异.

### 3.2 家庭与办公室室内灰尘重金属来源差异

有研究发现办公室内的总悬浮颗粒物的浓度高于其在家庭内的浓度,同时办公室内颗粒物的重金属浓度也高于家庭,办公室内Cu、Pb和Zn浓度分别是家庭的16.7、9.44和2.75倍<sup>[31]</sup>.本研究结果也表明办公室灰尘重金属水平高于家庭灰尘重金属水平.相对于家庭环境,办公室环境相对单一,但人口流动大,清洁频率可能低于家庭,而且存在办公用品

表 9 不同地面材料室内灰尘元素含量

Table 9 Concentration of elements in household dust with different flooring materials

因子(n)	Ca /g·kg <sup>-1</sup>	Fe /g·kg <sup>-1</sup>	Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	Cr /mg·kg <sup>-1</sup>	Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	Ni /mg·kg <sup>-1</sup>	Pb /mg·kg <sup>-1</sup>	Zn /mg·kg <sup>-1</sup>
不临街地砖(29)	112	30.9	2.41	108	197	79.5	215	627
不临街木地板(14)	105	23.3	1.42	102	235	97.2	231	852

如打印机、复印机等机械磨损,以上诸多原因可能导致办公室灰尘重金属累积大于家庭。此外,电脑也是室内灰尘沉积最严重的地方,电脑的小风扇在散热过程中,里面的灰尘会再次扬起,沉积于室内。本研究在家庭环境信息采集过程中,发现有少数家庭将电脑、打印机等置于卧室内,但出于安全和降低健康风险的角度考虑,尽量不要将电脑、打印机等办公设备放置于卧室内。

### 3.3 健康风险评估暴露参数的取值

灰尘重金属可通过手-口接触摄入、皮肤接触和呼吸吸入这 3 种暴露途径进入人体,其中经手-口接触行为直接摄入是儿童地表灰尘暴露风险的主要途径<sup>[20, 32]</sup>,因此本研究主要考虑经手-口接触无意摄入灰尘中重金属量。由于室外灰尘 Cr 数据缺失,故主要评价 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 这 5 种元素对儿童的健康风险。

目前众多相关研究都是根据下式(U. S. EPA)估算人群所受健康风险:

$$Q_{\text{吸食}} = C \times \frac{\text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-3}$$

在此模型中, $Q_{\text{吸食}}$ 可以简化为:

$$Q_{\text{吸食}} = (\text{污染物浓度} \times \text{吸食率} / \text{体重}) \times R$$

$R$  值可以作为一个系数,对于不同人群, $R$  值一定,即  $\text{EF} \times \text{ED} / \text{AT} = \text{每年的暴露天数} \times \text{暴露年限} / \text{暴露总天数} = \text{每年的暴露天数} / 365 \text{ d}$ ,即最终  $R$  的值取决于暴露天数  $\text{EF}$  的取值。目前,对暴露天数的取值,多数研究<sup>[20, 33]</sup>对儿童  $\text{EF}$  的取值为 180 d,计算  $R$  值为 0.49,但也有研究<sup>[34]</sup>对儿童的  $\text{EF}$  取值为 320d,计算  $R$  值为 0.88,如此导致的结果是即使人群所受暴露的重金属含量相同,但最终估算的  $Q_{\text{吸食}}$  值也会相差甚远。这种状况不利于不同研究估算的人群受重金属健康风险大小的比较。

对于儿童来说,如果将儿童每天的睡眠时间估算为 10 h(晚上 9.5 h,中午 1.5 h),睡眠期间,儿童的手-口途径的暴露可以忽略不计,则儿童每天接受手-口途径的暴露时间为 14 h。研究表明室内外活动时间因子分别为 0.8 与 0.2<sup>[35]</sup>,按此比例,将一天 24 h 划分为室内和室外各 19 h 和 5 h,室内减掉 10

h 睡眠时间,室内活动时间为 9 h,儿童吸食灰尘土壤更应该主要集中在非睡眠时间,即儿童每天的暴露时间约为 14 h。参照以上的暴露系数  $R$ ,本研究分室内和室外估算儿童受灰尘重金属的暴露量。室外暴露时间为 5 h,则系数  $R_{\text{室外}} = 5 \text{ h} \times 365 \text{ d} / 24 \text{ h} \times 365 \text{ d} = 0.20$ ,室内暴露时间为 9h,则  $R_{\text{室内}} = 9 \text{ h} \times 365 \text{ d} / 24 \text{ h} \times 365 \text{ d} = 0.38$ ,儿童通过手-口途径的暴露系数总计为 0.58,介于以上两份文献所估算的  $R$  值 0.49 和 0.88 之间。

本研究根据室内外暴露时间的不同,分别考虑室内和室外灰尘重金属的暴露量,用修正后的模型评价儿童通过手-口途径所受的灰尘重金属健康风险,以室内暴露量与室外暴露量之和作为灰尘重金属总暴露量,更加准确评价了灰尘重金属对儿童的健康风险。

## 4 结论

(1) 家庭室内灰尘中常量元素 Ca、Fe 的平均含量为 107 g·kg<sup>-1</sup>、31.9 g·kg<sup>-1</sup>,重金属元素 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量为 1.77、107、231、81.9、199、721 mg·kg<sup>-1</sup>,办公室灰尘中 Cu 和 Zn 含量显著高于家庭灰尘,其他元素与家庭灰尘含量差别不大;不同家庭室内灰尘元素含量分异度较大,不同办公室之间室内灰尘各元素的变异度较低。

(2) 不同楼层家庭室内灰尘中 Ca、Fe 含量差别不大,Cd、Cu 和 Pb 含量差异明显,1 层室内灰尘重金属含量相对较高,同时高层住宅室内 Pb 含量大于低层住宅。

(3) 家庭室外环境和室内装修及使用情况导致家庭室内灰尘重金属水平差异。

(4) 灰尘重金属对儿童的暴露健康风险大小为 Pb > Cu > Ni > Zn > Cd,但总体上没有表现出明显的健康风险。

(5) 电脑等办公用品尽量避免放置于卧室内。

### 参考文献:

- [1] 常静,刘敏,侯立军,等. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1153-1158.
- [2] 唐荣莉,马克明,张育新,等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2006-

- 2015.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Yoshinaga J, Yamasaki K, Yonemura A, *et al.* Lead and other elements in house dust of Japanese residences-source of lead and health risks due to metal exposure[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **189**: 223-228.
- [ 5 ] Rasmussen P E, Subramanian K S, Jessiman B J. A multi-element profile of house dust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **267**(1-3): 125-140.
- [ 6 ] Turner A, Ip K H. Bioaccessibility of metals in dust from the indoor environment; application of a physiologically based extraction test[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(22): 7851-7856.
- [ 7 ] 张舒婷,李晓燕. 城市室内灰尘重金属的水平及来源[J]. 环境化学, 2014, **33**(7): 1201-1207.
- [ 8 ] 吴鹏章,张晓山,牟玉静. 室内外空气污染暴露评价[J]. 上海环境科学, 2003, **22**(8): 573-579, 588.
- [ 9 ] Hwang H M, Park E K, Young T M, *et al.* Occurrence of endocrine-disrupting chemicals in indoor dust[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **404**(1): 26-35.
- [ 10 ] Lewis R G, Fortmann R C, Camann D E. Evaluation of methods for monitoring the potential exposure of small children to pesticides in the residential environment [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1994, **26**(1): 37-46.
- [ 11 ] Amorello D, Barreca S, Orecchio S, *et al.* Platinum in indoor settled dust matter (homes and cars) [J]. *Microchemical Journal*, 2015, **123**: 76-83.
- [ 12 ] Al-Momani I F. Trace elements in street and household dusts in Amman, Jordan [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2007, **16**(5): 485-496.
- [ 13 ] Hogervorst J, Plusquin M, Vangronsveld J, *et al.* House dust as possible route of environmental exposure to cadmium and lead in the adult general population [J]. *Environmental Research*, 2007, **103**(1): 30-37.
- [ 14 ] Tahir N M, Chee P S, Jaafar M. Determination of heavy metals content in soils and indoor dusts from nurseries in Dungun, Terengganu[J]. *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 2007, **11**(1): 280-286.
- [ 15 ] Maharachpong N, Geater A, Chongsuvivatwong V. Environmental and childhood lead contamination in the proximity of boat-repair yards in southern Thailand— I : pattern and factors related to soil and household dust lead levels[J]. *Environmental Research*, 2006, **101**(3): 294-303.
- [ 16 ] Tong S T Y, Lam K C. Home sweet home? A case study of household dust contamination in Hong Kong[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **256**(2-3): 115-123.
- [ 17 ] 杨文麟,闭向阳,韩志轩,等. 中国部分省份农村室内灰尘铅污染特征[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(6): 1246-1250.
- [ 18 ] 李晓燕,谢馨洁. 我国西南三市家庭灰尘重金属水平及差异[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 365-371.
- [ 19 ] 李晓燕. 季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2407-2415.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-329.
- [ 22 ] Meyer I, Heinrich J, Lippold U. Factors affecting lead, cadmium, and arsenic levels in house dust in a smelter town in eastern Germany[J]. *Environmental Research*, 1999, **81**(1): 32-44.
- [ 23 ] 何飞,白志鹏,张杰峰,等. 住宅室内外空气中颗粒物及无机元素的分布特征及关系[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(4): 314-319.
- [ 24 ] Kim N, Fergusson J. Concentrations and sources of cadmium, copper, lead and zinc in house dust in Christchurch, New Zealand[J]. *Science of the Total Environment*, 1993, **138**(1-3): 1-21.
- [ 25 ] Hunt A, Johnson D L, Thornton I, *et al.* Apportioning the sources of lead in house dusts in the London borough of Richmond, England [J]. *Science of the Total Environment*, 1993, **138**(1-3): 183-206.
- [ 26 ] 李良玉,任爱玲,梁银英. 石家庄市颗粒物质量浓度及粒度随高度变化规律[J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(1): 61-64.
- [ 27 ] 张舒婷,李晓燕,陈思民. 贵阳市不同空间高度灰尘和重金属沉降通量[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1630-1637.
- [ 28 ] 杨梅,李晓燕. 贵阳市冬季地表灰尘重金属含量动态变化及原因探析[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 2070-2076.
- [ 29 ] 邹战军. 建筑材料及其产生的室内污染物质[J]. 广东化工, 2010, **37**(7): 236-238.
- [ 30 ] 苗卿华,安玉奇,孙立德. 新型纳米涂料提升保障房室内环境质量[J]. 中国住宅设施, 2012, (3): 23-24.
- [ 31 ] Abdul-Wahab S A, Yaghi B. Total suspended dust and heavy metal levels emitted from a workplace compared with nearby residential houses [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(5): 745-750.
- [ 32 ] Olujimi O, Steiner O, Goessler W. Pollution indexing and health risk assessments of trace elements in indoor dusts from classrooms, living rooms and offices in Ogun State, Nigeria[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, **101**: 396-404.
- [ 33 ] Hu X, Zhang Y, Luo J, *et al.* Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(5): 1215-1221.
- [ 34 ] 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价[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [ 35 ] Khan A J. A study of indoor radon levels in Indian dwellings, influencing factors and lung cancer risks [J]. *Radiation Measurements*, 2000, **32**(2): 87-92.

## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China .....	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China .....	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date .....	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang .....	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain .....	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City .....	..... SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case .....	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin .....	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation .....	..... FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons .....	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir .....	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed .....	..... WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai .....	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River .....	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream .....	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch .....	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	..... CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area .....	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region .....	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China .....	..... WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River .....	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland .....	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers .....	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands .....	..... ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce <sup>3+</sup> and Cu <sup>2+</sup> Ions .....	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor .....	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol .....	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO <sub>2</sub> in Aqueous Solution .....	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater .....	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor .....	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment .....	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia .....	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition .....	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid .....	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province .....	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics .....	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties .....	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method .....	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions .....	..... ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges .....	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions .....	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid .....	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization .....	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA .....	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance .....	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils .....	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

# 《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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