

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估

曹治国^{1,2}, 余刚², 吕香英¹, 王梦蕾¹, 李琦路¹, 冯精兰¹, 闫广轩¹, 余浩¹, 孙剑辉^{1*}

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境污染与防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007; 2. 清华大学环境学院, 新兴有机污染物控制北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要: 于 2012 年采集了 4 类分别来自于北京市办公室、宾馆、大学生宿舍和道路的灰尘样品, 探究 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd 和 Ni 等 6 种重金属元素在灰尘中的粒径分布规律. 不同重金属在灰尘中的粒径分布规律呈现出不同特征, 道路灰尘中重金属元素更易于在细颗粒物上富集. 分别于 2012 年 3~8 月和 2012 年 3~12 月对北京市一座办公楼内的 2 间办公室进行了每周 1 次和每 2 周 1 次的灰尘样品采集, 发现 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd 和 Ni 等 6 种重金属元素在灰尘中的含量随季节变化总体保持稳定, 但 Cr 和 Pb 含量的波动性较其它 4 种重金属显著. 地积累指数法显示, Zn、Cu 和 Pb 在所测灰尘样品中污染程度较高, 且 Zn 在办公室和宾馆灰尘中达到了中度污染水平. 人体健康风险评估结果显示, 6 种重金属在 4 类灰尘中的非致癌健康风险值都远小于 1, 即风险可以忽略.

关键词: 灰尘; 重金属; 粒径; 季节; 风险

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1272-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.011

Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing

CAO Zhi-guo^{1,2}, YU Gang², LÜ Xiang-ying¹, WANG Meng-lei¹, LI Qi-lu¹, FENG Jing-lan¹, YAN Guang-xuan¹, YU Hao¹, SUN Jian-hui^{1*}

(1. Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. Beijing Key Laboratory for Emerging Organic Contaminants Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Four types of dust from dormitories, offices, hotels and roads in Beijing were collected and fractionated into 9 fractions, respectively. Totally 36 samples were obtained and analyzed for heavy metals including Cu, Zn, Cr, Pb, Cd and Ni. Particle size distributions of those heavy metals in these four types of dust were investigated and the influencing mechanisms were discussed. Distribution patterns of the same heavy metal in different types of dust showed various characteristics. Also different metals in the same type of dust represented different distribution patterns. Heavy metals in road dust tended to concentrate in finer particles. Two offices from the same building, located in Beijing, China, were selected to study the seasonality of heavy metals in dust. Dust sampling from Office A was conducted at weekly intervals between March 2012 and August 2012, while dust from Office B was sampled fortnightly from March 2012 to December 2012. Generally, levels of all heavy metals remained stable among different seasons, however, Cr and Pb represented more significant fluctuations than other four heavy metals. Based on the geo-accumulation index method, the pollution of Zn, Cu and Pb was more serious in the investigated samples, and dust from offices and hotels were moderately polluted by Zn. According to the risk assessment results, the carcinogenic health risks of the six heavy metals in the four types of dust were negligible.

Key words: dust; heavy metal; particle size; season; risk

灰尘是由成分、形貌、尺寸迥异的纤维和颗粒物所构成的复杂混合物, 广泛存在于室内外环境中, 是各种污染物的“储藏库”和人居环境污染状况的指示器. 人主要通过皮肤接触、摄食、呼吸等途径对灰尘及其中蕴含的污染物产生暴露^[1~4].

来源于室内应用、工业、交通等污染源的重金属元素富集在室内外灰尘中, 进入环境后能够对人体和生态系统产生持久性危害^[5,6]. 早在 20 世纪 80 年代, 科学家就开始关注室内灰尘中的 Pb 污染及其

对人体健康的影响^[7], 随后科学家针对不同国家和地区室内灰尘中多种重金属的污染水平、来源、影

收稿日期: 2015-11-09; 修订日期: 2015-12-11

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2015M570629); 河南师范大学博士科研启动课题项目(5101219170102, 5101219170104); 河南省高等学校重点科研项目(15A610005, 15A610001); 河南师范大学博士后流动站建设经费项目(5101219470205); 国家自然科学基金项目(21507025)

作者简介: 曹治国(1984~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境污染化学及人体暴露组学, E-mail: wq11ab@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunjh@htu.cn

响因素、人体暴露等问题展开了大量调查研究^[8,9]。室内灰尘中重金属的污染水平通常高于室外灰尘^[10,11],加之人们在室内生活时间较长,因而室内灰尘中重金属的人体暴露及健康风险更加引人注目。然而,我国对灰尘中重金属的研究主要集中于室外地表灰尘,对于室内灰尘重金属污染特征的相关研究仅见于少量报道^[12,13]。

粒径是表征灰尘性质的重要指标,灰尘中污染物的分布可能会因颗粒物粒径的不同存在差异^[14,15],灰尘是否能够粘附于皮肤表面进而产生人体暴露,也取决于灰尘粒径^[16]。然而,关于重金属在灰尘中粒径分布规律的相关研究尚不多见^[17~19]。此外,灰尘中重金属污染及人体暴露在时间尺度上的变化规律也逐渐引起了学者的关注,亟需加强室内灰尘重金属污染时间尺度变化的相关研究以提高污染评价的准确性^[20~23]。

鉴于此,本研究以北京市 4 类典型室内外灰尘为例,探究重金属在灰尘中的粒径分布和季节变化规律,同时对北京市室内外灰尘中重金属的污染水平和健康风险进行评估,以期为推进城市环境重金属污染的防控提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

于 2012 年 10 月在北京市海淀区选择了室内陈设具有代表性的 22 间商务集体办公室、3 座宾馆、40 间大学生宿舍作为采样地,用吸尘器分别采集了地面降尘样品。在北京市三环道路上选择了 10 个采样点并用吸尘器采集了地面降尘样品(表 1)。把同一类型的灰尘样品混合在一起,并通过尼龙筛对每类混合样品进行粒径分级。每类灰尘共获得 9 个不同径级的样品[F1(900~2 000 μm)、F2(500~900 μm)、F3(400~500 μm)、F4(300~400 μm)、F5(200~300 μm)、F6(100~200 μm)、F7(74~100 μm)、F8(50~74 μm)和 F9(<50 μm)],共计获得 36 个样品以供分析(表 2)。

于 2012 年 3 月选取北京市海淀区一座办公楼中的 2 间办公室作为研究对象,依据这 2 间办公室的除尘习惯,对办公室 A、B 分别进行了每周 1 次和每 2 周 1 次的样品采集工作,办公室 A 的采样工作持续到 2012 年 8 月,办公室 B 的采样工作持续到 2012 年 12 月(表 1)。利用尼龙筛对所有样品进行筛分并取粒径<50 μm 部分,共计获得 40 个样品以供分析。

所有样品经铝箔包裹并用聚乙烯自封袋密封,于-20℃保存。

表 1 灰尘样品的采样信息

Table 1 Sampling information for all dust samples			
采样点	简称	样品质量/g	采样面积/m ²
办公室(22 间)	O	930	~4 500
道路(10 个样点)	R	139	~400
宾馆(3 座)	H	260	~600
宿舍(40 间)	D	557	~1 400
办公室 A	OA	~20 g·个 ⁻¹	~140
办公室 B	OB	~120 g·个 ⁻¹	~550

表 2 不同径级灰尘样品质量/g

Table 2 Weight of the fractionated dust samples/g				
样品径级	办公室	宾馆	宿舍	道路
F1	65.2	49.8	46.1	21.7
F2	79.9	47.4	31.8	49.0
F3	24.2	23.7	20.0	21.1
F4	44.2	18.6	23.3	47.0
F5	39.3	13.9	8.6	31.8
F6	90.6	39.7	41.4	101
F7	60.1	84.0	21.6	54.5
F8	102	96.9	15.4	51.1
F9	424	183	52.2	35.3

1.2 样品重金属的测定

所有样品采用石墨消解仪在混酸体系(HNO₃-HF-HClO₄)下进行消解。准确称量约0.200 0 g灰尘样品于 50 mL 聚四氟乙烯消解管中,用去离子水润湿,依次加入 5 mL HNO₃、10 mL HF 和 2 mL HClO₄,在 150℃条件下不加盖消解约 2 h,再依次加入 5 mL HNO₃、10 mL HF 和 2 mL HClO₄,逐渐升温至 200℃并加盖消解约 2~3 h。重复上述步骤直至消解液澄清,加入 10 mL 去离子水并浓缩至约 1 mL,定容于 50 mL 容量瓶中待测。使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(X Series II 型;美国热电公司)对 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 和 Ni 等 6 种在地表灰尘重金属污染研究中普遍受到关注的重金属元素进行定量测定。采用国家标准土壤样品(GSS-3)做回收率试验,所测元素的回收率均在 90%~105%之间。用去离子水替代灰尘样品,按上述步骤进行空白试验,每分析 12 个样品做 2 个空白试验。每分析 12 个样品随机抽取 1 个样品作 4 次重复测定,所有元素定量结果的相对标准偏差均小于 15%。

1.3 污染评价

污染评价采用地累积指数法,这一方法早期主要用于定量研究沉积物中重金属的污染程度,近年来也被应用到灰尘重金属污染研究中^[24]。其计算

公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right] \quad (1)$$

式中, C_n 代表办公室灰尘中第 n 类重金属的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_n 采用北京市土壤背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[25,26]; I_{geo} 则为灰尘中重金属的地累积污染指数, I_{geo} 值越大代表着办公室灰尘重金属污染程度越高。

1.4 暴露模型与参数

地面降尘中的重金属主要通过皮肤接触和灰尘摄食被人体暴露^[4]. 具体暴露剂量按照下式计算^[12,13]:

经手-口摄食途径日平均暴露量 [ADD_{ing} , $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]:

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{IngR} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

皮肤接触日平均暴露量 [ADD_{derm} , $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]:

$$\text{ADD}_{\text{derm}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{CF} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

参照美国 EPA 土壤健康风险评价方法^[27]及我国场地环境评价指南^[28], 具体变量取值如表 3 所示。

表 3 地表灰尘重金属日平均暴露量计算参数取值
Table 3 Parameter values in average daily dose calculation
models of heavy metals in settled dust

参数	物理意义	单位	取值
C	地表灰尘重金属暴露水平	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	本研究实测含量
IngR	经手、口摄入灰尘频率	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	100
EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	180
ED	暴露时间	a	24
SA	暴露皮肤表面积	cm^2	2 140
SL	皮肤粘着度	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.07
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	1.00×10^{-3}
BW	平均体重	kg	70
AT	平均暴露时间	d	$\text{ED} \times 365$ (非致癌物)

1.5 健康风险表征

由于缺乏灰尘摄食和皮肤接触致癌暴露量参考值^[28], 因此本研究只考虑灰尘中重金属的非致癌效应:

$$\text{HQ} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \quad (5)$$

$$\text{HI} = \sum \text{HQ}_i \quad (6)$$

式中, HQ 为非致癌风险商, 表征单种污染物的非致癌风险; RfD 为参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 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; HI 为多污染物多暴露途径的非致癌总风险; 当 HQ 或 $\text{HI} < 1$ 时, 认为风险较小或可以忽略, > 1 时认为存在非致癌风险。

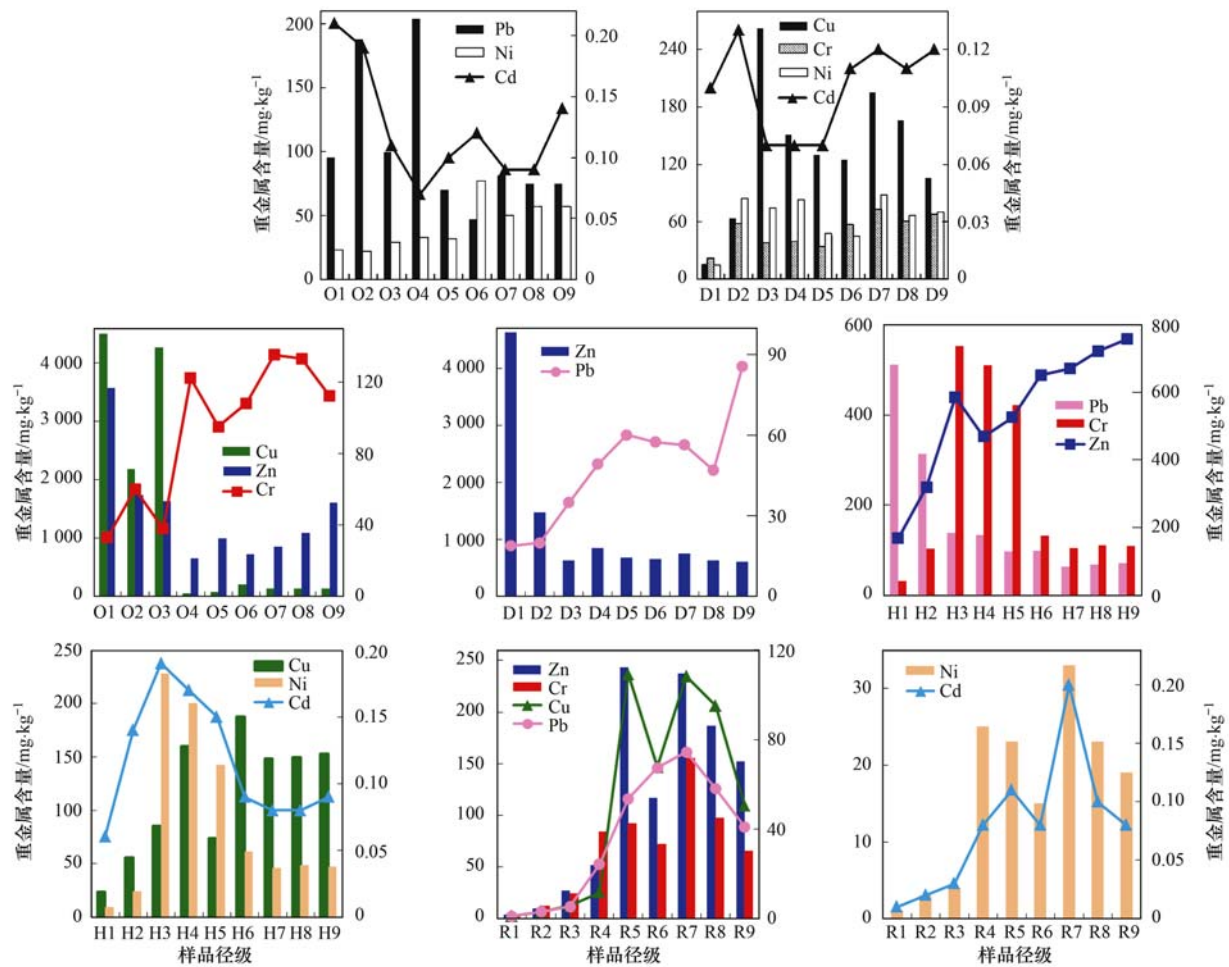
2 结果与讨论

2.1 重金属的粒径分布规律

6 种重金属元素在 36 个不同径级灰尘样品中都有检出, Cu 、 Zn 、 Pb 、 Cd 、 Cr 和 Ni 的含量范围分别为: $1.0 \sim 4\,500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (R1 , O1)、 $4.0 \sim 4\,620 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (R1 , D1)、 $1.0 \sim 511 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (R1 , H1)、 $0.01 \sim 0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (R1 , O1)、 $3.0 \sim 552 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (R1 , H3) 和 $1.0 \sim 228 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (R1 , H3)。重金属元素在灰尘中的粒径分布规律复杂多变, 总体表现出 3 种分布模式。图 1 显示, 部分重金属元素在不同径级灰尘颗粒上的分布呈现不规则波动, 即无明显一致性规律或含量在不同粒径段上的差异不大。例如办公室灰尘中的 Pb 、 Cd 和 Ni ; 宿舍灰尘中的 Cu 、 Cd 、 Cr 和 Ni 。部分情况下, 重金属含量随灰尘粒径的减小而升高, 例如办公室灰尘中的 Cr 、宿舍灰尘中的 Pb 、宾馆灰尘中的 Cu 和 Zn 、以及道路灰尘中的 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Cd 、 Cr 和 Ni 。部分情况下, 重金属的含量随灰尘粒径的减小而降低, 例如办公室灰尘中的 Cu 、宿舍灰尘中的 Zn 和宾馆灰尘中的 Pb 。此外, 部分重金属元素在粗颗粒中表现出异常高值, 如办公室灰尘中的 Cu 在 $400 \sim 500 \mu\text{m}$ 、 $500 \sim 900 \mu\text{m}$ 和 $900 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 粒径段的含量分别达到 $4\,270$ 、 $2\,190$ 和 $4\,500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 宿舍灰尘中的 Zn 在 $900 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 粒径段的含量达到 $4\,620 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 宾馆灰尘中的 Pb 、 Cr 、 Ni 和 Cd 在 $900 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 、 $400 \sim 500 \mu\text{m}$ 、 $400 \sim 500 \mu\text{m}$ 和 $400 \sim 500 \mu\text{m}$ 粒径段的含量分别达到 511 、 552 、 228 和 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1)。

由图 1 可知, 不同重金属元素在同一类室内灰尘中通常表现出不同的粒径分布规律。然而, 同一种重金属元素在不同类型灰尘中也会表现出不同的粒径分布规律, 如 Cu 在办公室和道路灰尘中的粒径分布规律迥异, Zn 在 4 类灰尘中的粒径分布规律互不相同。从空间差异上看, 室内外灰尘中重金属的粒径分布差异显著。道路灰尘中不同重金属表现出的粒径分布规律较为一致, 而 3 类室内灰尘中不同重金属元素并未表现出一致的粒径分布规律。由此可见, 粒径分布规律受到重金属来源以及灰尘性质的双重影响。

在灰尘重金属污染及人体暴露研究中, 灰尘的



左坐标轴对应柱状图,右坐标轴对应散点图

图1 重金属在4类灰尘中的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution patterns of heavy metals in four types of dust

粒径选择方式十分多样^[17]。表4呈现了4种典型粒径选择方式下重金属含量的评估结果。由此可以看出,对于大多数重金属元素,粒径选择方式对含量评估结果的影响可以忽略,不同粒径选择方式所得的评估结果一致性较好。仅仅在办公室和道路灰尘中Cu、宿舍灰尘中Zn和Pb、宾馆灰尘中Pb的含量会因粒径选择方式的不同而有较大差异(4种粒径选择方式评估结果之间的RSD>20%)。

由表4可知,总体上灰尘中Zn、Cu含量最高,Pb、Cr、Ni含量相当,而Cd含量最低。且Zn在办公室、宿舍灰尘中的污染在世界范围内都处于较高水平^[20, 29]。重金属在室内灰尘中的污染水平普遍高于道路,这也进一步说明了室内灰尘中重金属的累积高于室外,需要引起重视^[29, 30]。具体来讲,Zn、Cu在办公室灰尘中的含量最高,在道路灰尘中含量最低,这可能是由于室内的Cu、Zn金属制品在使用过程中因受到加热和磨损对室内灰尘造成了污

表4 不同粒径选择方式对重金属含量分析的影响/mg·kg⁻¹

Table 4 Influence of selection mode of dust fraction on heavy metal content analysis/mg·kg⁻¹

样品类型	粒径	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
O	<2 mm	729	1 500	90.5	0.13	103	50.2
	<500 μm	266	1 300	80.2	0.12	114	55.3
	<200 μm	148	1 350	71.9	0.13	117	59.1
	<50 μm	140	1 610	75.0	0.14	112	57.0
D	<2 mm	116	1 473	48.7	0.11	50.9	60.3
	<500 μm	150	678	61.2	0.10	56.9	67.4
	<200 μm	134	652	67.4	0.12	64.5	64.7
	<50 μm	106	610	85.8	0.12	68.0	70.0
H	<2 mm	130	618	138	0.10	144	57.8
	<500 μm	149	697	79.4	0.10	160	66.6
	<200 μm	155	720	72.7	0.09	112	48.4
	<50 μm	153	757	72.6	0.09	110	47.0
R	<2 mm	57.6	123	45.0	0.09	75.1	17.7
	<500 μm	68.7	149	53.6	0.10	88.4	20.8
	<200 μm	79.7	163	63.3	0.11	94.2	21.1
	<50 μm	50.5	152	41.0	0.08	65.0	19.0

染^[29]; Pb 和 Ni 在办公室、宿舍和宾馆中的污染水平相当,在道路灰尘中最低; Cd 在 4 类灰尘样品中含量相当; Cr 在办公室和宾馆灰尘中含量相当,在宿舍灰尘中最低.

2.2 重金属的季节变化规律

办公室 A、B 中重金属含量最高的元素均为 Zn (办公室 A: 2 270 mg·kg⁻¹, 办公室 B: 2 550 mg·kg⁻¹), 其次为 Cu (办公室 A: 181 mg·kg⁻¹, 办公室 B: 198 mg·kg⁻¹), 含量最低的重金属元素均为 Cd (办公室 A: 3.08 mg·kg⁻¹, 办公室 B: 3.66 mg·kg⁻¹, 见表 5).

本研究通过连续高密度采样,集中探讨了办公室灰尘中重金属污染的季节变化规律. 结果表明 6 种重金属在办公室灰尘中都未呈现出明确的季节变化规律. 图 2 显示 6 种重金属的总含量随季节变化保持稳定(办公室 A: RSD 为 15.8% ~ 49.2%; 办

公室 B: RSD 为 12.3% ~ 72.1%), 与少量相关研究结果一致^[20]. 然而,统计结果显示,不同重金属含量随季节变化的波动性有所不同. 相比之下, Cr 和 Pb 波动性较强. 办公室 A、B 灰尘中 Cr 和 Pb 的含量范围分别为 13.1 ~ 151 mg·kg⁻¹ (RSD = 49.2%)、8.7 ~ 276 mg·kg⁻¹ (RSD = 72.1%) 和 8.6 ~ 179 mg·kg⁻¹ (RSD = 48.7%)、14.9 ~ 92.9 mg·kg⁻¹ (RSD = 39.8%), 其变异系数显著高于其它 4 种重金属. 含量数据的波动性也反映了基于不同时段采样分析所获得的数据之间可能会存在较大的偏差. 进而说明在室内外灰尘重金属污染及人体暴露研究中通过单点单次采样所获得的评估数据存在一定的随机性,可靠性值得质疑. 同时,通过分季节、每年 2 ~ 4 次采样去探究室内外灰尘中重金属污染的季节变化规律^[21~23], 所得结果也不够可靠.

表 5 办公室灰尘中重金属含量统计/mg·kg⁻¹
Table 5 Level of heavy metals in dust in the two offices/mg·kg⁻¹

重金属	办公室 A				办公室 B			
	Mean	MIN	MAX	RSD/%	Mean	MIN	MAX	RSD/%
Cu	192	131	302	23.2	200	163	276	17.7
Cr	77.6	13.1	152	49.2	59.0	8.7	157	72.1
Zn	2 310	1 800	3 300	15.8	255	2 000	3 080	12.3
Cd	3.1	1.2	5.5	30.2	3.7	2.2	5.0	26.0
Pb	77.2	8.6	179	48.7	47.1	14.9	92.9	39.8
Ni	68.2	40.0	105	25.6	83.9	45.9	109	27.8

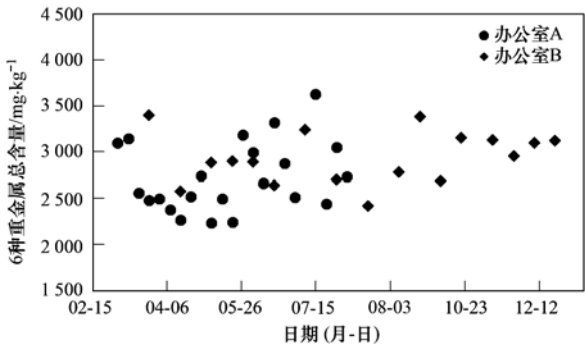


图 2 办公室灰尘中重金属总含量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of heavy metals contents in office dust

2.3 污染评价及人体健康风险评估

为了体现评估结果的统计学意义,仅对 4 类混合灰尘样品进行了重金属污染及人体健康风险评估. 由于粒径选择方式对重金属含量分析结果的影响不大,且细颗粒物更易于被人体暴露,故只针对 < 50 μm 的粒径选择方式进行了重金属污染评价. 地积累指数法显示, Zn、Cu、Pb 和 Cr 在办公室、宾馆、宿舍、道路灰尘中大部分处

于轻度污染以上水平,尤其是 Zn 在办公室和宾馆中已经达到了中度污染水平,需要引起一定的重视. Cd 和 Ni 在 4 类混合灰尘样品中都处于无污染状态(表 6).

灰尘中重金属的人体健康风险包括致癌健康风险和非致癌健康风险两部分,暴露途径则包括呼吸、摄食及皮肤接触这 3 种途径^[12]. 然而,呼吸暴露与摄食及皮肤接触对灰尘的粒径选择性迥然不同^[31]. 当前多数研究并未注意到这个问题,普遍使用采集自同一灰尘样品的重金属分析结果进行 3 种暴露途径的健康风险评估^[12,13],而未考虑到 3 种暴露途径在灰尘粒径选择性方面的显著差异,由此对评估结果的准确性产生了一定影响. 本研究避免了这个问题,只针对摄食和皮肤接触两种暴露途径开展了非致癌健康风险评估. 评估结果显示(表 6), 6 种重金属在 4 类灰尘中的非致癌健康风险值都远小于 1, 即风险可以忽略. 但相比之下, Pb 与 Cr 对人体造成的健康风险较其它 4 种重金属略高,需要引起一定重视.

表 6 地积累指数(I_{geo})和重金属非致癌风险(HI)评价结果

Table 6 Assessment results of geoaccumulation index and non-carcinogenic risks of heavy metals

I_{geo}	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	
O	2.32	4.23	1.02	-0.35	1.33	0.50	
D	1.91	2.82	1.22	-0.57	0.61	0.80	
H	2.44	3.13	0.98	-0.99	1.30	0.23	
R	0.85	0.82	0.15	-1.16	0.54	-1.08	
HI	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	$\sum$ HI
O	2.47E-03	3.82E-03	1.52E-02	1.13E-04	2.83E-02	2.02E-03	5.19E-02
D	1.87E-03	1.44E-03	1.74E-02	9.72E-05	1.72E-02	2.48E-03	4.05E-02
H	2.70E-03	1.79E-03	1.48E-02	7.29E-05	2.78E-02	1.66E-03	4.88E-02
R	8.94E-04	3.60E-04	8.34E-03	6.48E-05	1.64E-02	6.73E-04	2.67E-02

3 结论

(1)北京市室内外灰尘中 Zn、Cu 的含量及污染水平都显著高于 Pb、Cd、Cr 和 Ni；而 Pb、Cr 的人体非致癌健康风险在 6 种重金属中处于相对较高水平,室内灰尘中重金属的积累显著高于道路。

(2)室内外重金属在灰尘中的粒径分布规律存在显著差异；重金属来源以及环境类型都对灰尘中重金属的粒径分布产生重要影响；不同粒径选择方式对灰尘中重金属的分析结果不会产生显著影响。

(3)重金属在办公室灰尘中的含量随季节变化保持总体稳定,但相比之下 Cr、Pb 的波动性较强。

参考文献：

[1] 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.

[2] Praveena S M, Motalib N S A, Aris A Z. Determination of heavy metals in indoor dust from primary school (Sri Serdang, Malaysia): estimation of the health risks [J]. Environmental Forensics, 2015, **16**(3): 257-263.

[3] Butte W, Heinow B. Pollutants in house dust as indicators of indoor contamination [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, **175**: 1-46.

[4] Frederiksen M, Vorkamp K, Thomsen M, *et al.* Human internal and external exposure to PBDEs-a review of levels and sources [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health 2009, **212**(2): 109-134.

[5] 杨忠平,王雷,翟航,等. 长春市城区近地表灰尘重金属健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1247-1255.

[6] 李崇,李法云,张营,等. 沈阳市街道灰尘中重金属的空间分布特征研究[J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 560-564.

[7] Chattopadhyay G, Lin K C P, Feitz A J. Household dust metal levels in the Sydney metropolitan area [J]. Environmental Research, 2003, **93**(3): 301-307.

[8] Wang W, Wu F Y, Zheng J S, *et al.* Risk assessments of PAHs and Hg exposure via settled house dust and street dust, linking with their correlations in human hair[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **263**: 627-637.

[9] Rasmussen P E, Levesque C, Chénier M, *et al.* Canadian house dust study: population-based concentrations, loads and loading rates of arsenic, cadmium, chromium, copper, nickel, lead, and zinc inside urban homes [J]. Science of the Total Environment, 2013, **443**: 520-529.

[10] Lin Y S, Fang F M, Wang F, *et al.* Pollution distribution and health risk assessment of heavy metals in indoor dust in Anhui rural, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(9): 565.

[11] Glorennec P, Lucas J P, Mandin C, *et al.* French children's exposure to metals via ingestion of indoor dust, outdoor playground dust and soil: contamination data [J]. Environment International, 2012, **45**: 129-134.

[12] 常仕镭,叶芝祥. 成都市地表灰尘重金属污染分布特征及健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(2): 70-75.

[13] 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.

[14] Meng Q Z, Fan S X, He J B, *et al.* Particle size distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons during a heavy haze episode in Nanjing, China [J]. Particuology, 2015, **18**: 127-134.

[15] 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.

[16] Mercier F, Glorennec P, Thomas O, *et al.* Organic contamination of settled house dust, a review for exposure assessment purposes [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(16): 6716-6727.

[17] 常静,刘敏,李先华,等. 上海城市地表灰尘重金属污染粒级效应与生物有效性[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3489-3495.

[18] Zhao H T, Li X Y, Wang X M, *et al.* Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **183**(1-3): 203-210.

[19] Zhou Q H, Zheng N, Liu J S, *et al.* Residents health risk of Pb, Cd and Cu exposure to street dust based on different particle sizes around zinc smelting plant, Northeast of China [J].

- Environmental Geochemistry and Health, 2015, **37**(2): 207-220.
- [20] 林跃胜, 方凤满, 徐明露, 等. 室内灰尘重金属污染研究进展[J]. 城市环境与城市生态, 2015, **28**(3): 29-34.
- [21] 李晓燕, 张舒婷. 城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2274-2282.
- [22] 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.
- [23] 胡军, 李晓燕, 曹益金. 贵阳城区垃圾站周边地表灰尘重金属水平及季节分异[J]. 地球与环境, 2012, **40**(4): 584-588.
- [24] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 应用地质累积指数分析城市颗粒物源解析土壤风沙尘的污染[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(4): 949-953.
- [25] 闫慧, 陈杰, 肖军. 典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 4017-4023.
- [26] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117-122.
- [27] USEPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2002.
- [28] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 163-180.
- [29] 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.
- [30] 方凤满, 林跃胜, 王海东, 等. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应[J]. 生态学报, 2011, **31**(23): 7301-7310.
- [31] Cao Z G, Yu G, Chen Y S, *et al.* Particle size: a missing factor in risk assessment of human exposure to toxic chemicals in settled indoor dust[J]. Environment International, 2012, **49**: 24-30.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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	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