

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征 ..... 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 ..... 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 ..... 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 ..... 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 ..... 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 ..... 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 ..... 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 ..... 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 ..... 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 ..... 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 ..... 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 ..... 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 ..... 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 ..... 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 ..... 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 ..... 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水地区透水停车场的水文控制效果 ..... 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 ..... 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 ..... 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 ..... 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 ..... 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 ..... 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 ..... 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附  $Pb^{2+}$  的性能 ..... 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制 ..... 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 ..... 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 ..... 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 ..... 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 ..... 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 ..... 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 ..... 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 ..... 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 ..... 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 ..... 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤  $CH_4$ 、 $N_2O$  排放的影响 ..... 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 ..... 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 ..... 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 ..... 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 ..... 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 ..... 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 ..... 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 ..... 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 ..... 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 ..... 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 ..... 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

*Pantoea* sp. IMH 介导土壤中砷的形态转化 ..... 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 ..... 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 ..... 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 ..... 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 ..... 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 ..... 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

# 珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价

蔡云梅<sup>1,2</sup>, 黄涵书<sup>1</sup>, 任露陆<sup>1</sup>, 张艳林<sup>1\*</sup>

(1. 广东环境保护工程职业学院, 佛山 528216; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640)

**摘要:** 以佛山一高校为研究对象, 采集教工区和学习区共 30 个样点的室内灰尘, 测定灰尘中 8 种重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量, 采用 Spearman 相关系数、主成分分析、美国 EPA 风险评价模型, 探讨了室内灰尘重金属污染程度、来源, 并评估了重金属对人体可能的健康风险。结果表明, 相对于广东省土壤背景值, 室内灰尘 8 种重金属污染严重; 与国内其他城市相比, 室内灰尘金属含量处于较高水平, Hg 除外; 8 种金属含量在教工区和学习区无显著性差异。室内灰尘 8 种金属存在相似的来源, Hg 主要来源于室外人为源, 其余金属主要来源于室内人为源。非致癌日均暴露量为手-口接触摄入量 > 皮肤吸收量 > 呼吸摄入量, 手-口摄入是室内灰尘重金属暴露的主要途径; 除个别样点 Cr 非致癌风险 > 1, 致癌风险值达  $10^{-6}$  外, 多数样点 8 种重金属非致癌风险 < 1, 4 种致癌重金属呼吸途径致癌风险未达  $10^{-6}$ , 对人体不会造成健康危害。打印机/复印机、仪器设备等是室内重金属的重要污染源和风险源, 应采取一定的防护措施降低人体暴露风险。

**关键词:** 室内灰尘; 重金属; 来源; 暴露剂量; 健康风险

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3620-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703256

## Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta

CAI Yun-mei<sup>1,2</sup>, HUANG Han-shu<sup>1</sup>, REN Lu-lu<sup>1</sup>, ZHANG Yan-lin<sup>1\*</sup>

(1. Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China; 2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environment and Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Thirty indoor dust samples were collected from staff and study areas in a college in Foshan, and the As, Hg, Cd, Cu, Zn, Ni, Pb, and Cr contents were measured. The Spearman correlation coefficient, principal component analysis, and US EPA health risk assessment model were used to determine the sources and degree of pollution and the health risks. The results showed that the levels of the eight heavy metals were higher than the background values in Guangdong Province and the reported values in other Chinese cities, excluding Hg. The levels of the eight heavy metals were higher in the staff area than in the study area, but the difference was not significant. The eight heavy metals were derived from similar sources; Hg was mainly derived from outdoor anthropogenic sources, while the others were mainly derived from indoor anthropogenic sources. The daily non-carcinogenic exposure dose was in the following order: ingestion > dermal exposure > inhalation. Ingestion was the major pathway of heavy metal exposure from indoor dust. Except for Cr, the non-carcinogenic hazard indexes of ingestion and dermal exposure were taken from partial sample points > 1. All of the health risks were lower than the average risk thresholds of the heavy metals, and would not cause health risks to humans. Printers, copiers, instruments, and equipment were important sources of indoor pollution and risk sources of heavy metals. Thus, protective measures should be taken to reduce the risk of exposure.

**Key words:** indoor dust; heavy metals; sources; exposure dosage; health risk

重金属是环境中普遍存在的一类污染物, 具有难降解性、持久性、可累积性等特点, 绝大多数重金属具有致癌或潜在致癌作用<sup>[1,2]</sup>。As 是公认的致癌物<sup>[3]</sup>, Cd、Ni 具有较强的致癌性<sup>[4,5]</sup>。Cu、Zn 是人体必须的微量元素, 但过量摄入也会对人体肝、肾、消化系统和大脑等器官产生不良影响<sup>[6]</sup>。

灰尘是一种复杂、多相的粒子混合物, 是许多污染物的载体和反应体。灰尘中含有的重金属, 可通过手-口摄入、吸入和皮肤接触等暴露途径对人体

健康带来危害。室内外灰尘中重金属的研究国外关注较早, 研究涉及灰尘中重金属污染程度、分布特

收稿日期: 2016-03-29; 修订日期: 2017-05-26

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2016A030313758); 广东省科技计划项目(2014B030301060); 广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目(YQ2015203); 广东省高等职业教育品牌专业建设项目(2016gzpp036); 广东环境保护工程职业学院院长基金项目(KY201302003)

作者简介: 蔡云梅(1979~), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为环境与健康, E-mail: 18520108910@163.com

\* 通信作者, E-mail: zylin1980@126.com

征、来源和健康风险等<sup>[7-10]</sup>。灰尘重金属的研究国内相对较晚,且主要集中在室外灰尘的研究<sup>[11-17]</sup>,对室内灰尘的关注相对较少<sup>[18-23]</sup>。已有研究表明,在不同城市、不同室内环境中,室内灰尘重金属的含量变化很大,影响因素各不相同,室内灰尘中重金属的含量比室外更高,加上人 80% 以上的时间在室内活动,所以室内灰尘中重金属暴露特征及其健康风险更应引起关注<sup>[18]</sup>。

学校作为一个典型的功能区,是学生长时间学习和生活的场所,人群相对密集。学校灰尘重金属的研究已有少量报道,但主要是校园灰尘的研究,室内灰尘的研究未见报道。有研究发现,上海<sup>[11]</sup>、北京<sup>[12]</sup>、合肥<sup>[13]</sup>、淮南<sup>[16]</sup>、沈阳<sup>[24]</sup>等地校园灰尘重金属 Pb、Zn、Cu 等含量高于当地土壤环境背景值,存在一定程度的累积。此外,研究表明珠三角地区受重金属污染严重,但缺乏对人体健康影响的有效评估<sup>[25-27]</sup>。佛山地处珠三角腹地,是综合交通枢纽,是广东、全国的重要制造业基地,家用电器、机械装备、金属材料加工及制品、陶瓷建材、电子信息、家居用品制造等是其优势行业。因此,本文以佛山一高校作为珠三角地区高校的代表,以其室内灰尘为研究对象,考察教工区和学习区重金属的含量水平、污染来源,评估其可能的健康风险,保障师生身体健康,同时对于城市环境健康监测和环境风险管理具有重要意义。

## 1 材料与方

### 1.1 样品的采集

于 2015 年 6 月底至 7 月初,根据功能区不同,选择有代表性的教职工办公区打字室、普通办公室和学生学习区课室、机房、实验室等采集灰尘样品。用塑料小刷子和塑料小撮箕,在室内易积累灰尘的地方多点收集混合成一个样,每个房间采集灰尘约 3~5 g,共采集灰尘样品 30 个,其中教工区 10 个,学习区 20 个。样品采集后装入聚乙烯塑料袋,同时标注采样点信息。样品带回实验室自然风干,去除毛发、纸屑等杂物,用玛瑙研钵磨细,过 100 目尼龙筛,装入聚乙烯密封袋保存备用。

### 1.2 样品的分析

灰尘样品经 HCl-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消解后,用原子吸收分光光度计(GTA 120 Graphite Tube Atomizer, 美国安捷伦科技公司)测定 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量;王水消解后,用原子荧光光度计(AFS-930,北京吉天)测定 As 和 Hg 含量。为保证分析结

果的准确性,器皿用 10% 硝酸溶液浸泡 24 h 以上,自来水、去离子水清洗 3 遍以上;用 10% 平行样、国家标准土样(GSS-24)、空白样进行质量控制,测定结果达到质量控制要求。分析过程中所用水均为二次去离子水,试剂均为优级纯。数据的统计分析采用 Excel 和 SPSS 软件。

## 1.3 健康风险评价

### 1.3.1 暴露量

灰尘中重金属进入人体的途径主要有 3 种,即经手-口途径直接摄入、呼吸系统吸入和皮肤接触。本研究 8 种重金属对人体都有慢性非致癌风险(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn),As、Cd、Cr 和 Ni 同时还有致癌风险。

对于非致癌效应,上述 3 种暴露途径的长期日均暴露量计算式如下<sup>[11,13]</sup>。

经手-口直接摄入日平均暴露量:

$$ADD_{oral} = \frac{c \times IR_{oral} \times CF \times EF_{oral} \times ED_{oral}}{BW \times AT} \quad (1)$$

经呼吸吸入日平均暴露量:

$$ADD_{inh} = \frac{c \times IR_{inh} \times EF_{inh} \times ED_{inh}}{PEF \times BW \times AT} \quad (2)$$

经皮肤表面接触日平均暴露量:

$$ADD_{dermal} = \frac{c \times SA \times CF \times SL \times ABS \times EF_{dermal} \times ED_{dermal}}{BW \times AT} \quad (3)$$

式中,ADD<sub>oral</sub>、ADD<sub>inh</sub>、ADD<sub>dermal</sub> 分别表示经手-口直接摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径的长期日均暴露量[mg·(kg·d)<sup>-1</sup>];c 表示灰尘中重金属含量(mg·kg<sup>-1</sup>);IR<sub>oral</sub> 表示经手-口途径摄入灰尘速率(mg·d<sup>-1</sup>),IR<sub>inh</sub> 表示呼吸速率(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>);EF<sub>oral</sub>、EF<sub>inh</sub>、EF<sub>dermal</sub> 分别表示 3 种途径的年暴露频率(d·a<sup>-1</sup>);ED<sub>oral</sub>、ED<sub>inh</sub>、ED<sub>dermal</sub> 分别表示 3 种途径的暴露年限(a);BW 为平均体重(kg);AT 为平均暴露时间(d);PEF 为颗粒物排放因子(m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>);SA 为暴露皮肤面积(cm<sup>2</sup>);SL 为皮肤黏着度[mg·(cm<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>];ABS 为皮肤吸收因子,无量纲;CF 为转换系数(kg·mg<sup>-1</sup>)。

对于致癌效应,需将个体总暴露量,平摊到整个生命周期中。因只能获取 As、Cd、Cr 和 Ni 经呼吸途径的致癌斜率因子,故本研究将仅就呼吸暴露途径 As、Cd、Cr 和 Ni 致癌风险进行评估,相应地长期日均暴露量按式(4)计算<sup>[11,13]</sup>。

$$LADD_{inh} = \frac{c \times IR_{inh} \times EF_{inh} \times ED_{inh}}{PEF \times BW \times AT} \quad (4)$$

式中,  $LADD_{inh}$  表示基于人体生命周期的吸入途径终生日均暴露量 [ $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ];  $IR_{inh}$  表示成人的呼吸速率 ( $m^3 \cdot d^{-1}$ );  $EF_{inh}$  表示成年人的呼吸途径的年暴露频率 ( $d \cdot a^{-1}$ );  $ED_{inh}$  表示成人的暴露年限 (a);

BW 表示成人的平均体重 (kg); AT 为致癌物的平均暴露时间 (d);  $c$  和 PEF 的含义同上. 因本研究中涉及的人群均已成年, 故不考虑儿童期的暴露. 相关暴露参数取值如表 1 所示.

表 1 灰尘重金属日均暴露量计算参数

Table 1 Parameters of average daily exposure of heavy metals in dust

参数	单位	取值	文献
$c$	$mg \cdot kg^{-1}$	样点灰尘重金属含量	本研究
$IR_{oral}$	$mg \cdot d^{-1}$	100	[1, 23]
$IR_{inh}$	$m^3 \cdot d^{-1}$	12.8	[13]
$EF_{oral} = EF_{inh} = EF_{dermal}$	$d \cdot a^{-1}$	200	[11]
$ED_{oral} = ED_{inh} = ED_{dermal}$	a	3 (学生), 30 (教职工)	本研究
BW	kg	55.9	[1]
AT	d	$ED \times 365$ (非致癌物), $70 \times 365$ (致癌物)	[11]
PEF	$m^3 \cdot kg^{-1}$	$1.36 \times 10^9$	[11]
SA	$cm^2$	5000	[1]
SL	$mg \cdot (cm^2 \cdot d)^{-1}$	1 (成人)	[1, 17]
ABS	无量纲	0.001	[11]
CF	$kg \cdot mg^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$	[11]

### 1.3.2 健康风险

对于非致癌风险, 利用非致癌风险商度量<sup>[11]</sup>, 即:

$$HQ = ADD/RfD \quad (5)$$

式中, RfD 表示污染物的参考剂量,  $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ , 即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. 对于多污染物多暴露途径情况, 非致癌总风险 HI 表示为<sup>[11]</sup>:

$$HI = \sum HQ_i \quad (6)$$

若 HQ 或 HI < 1, 认为风险较小或可以忽略; 若 HQ 或 HI > 1, 认为存在非致癌风险.

对于致癌风险, 一般采用终生日暴露量与致癌

斜率因子的乘积来度量<sup>[11]</sup>, 即:

$$Risk = LADD_{inh} \times SF \quad (7)$$

式中, SF 为致癌斜率因子, 表示人体暴露于一定剂量某种污染物产生致癌效应的最大概率, [ $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ]<sup>-1</sup>. 对于多污染物多暴露途径, 致癌总风险 (Risk)<sub>T</sub> 可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$(Risk)_T = \sum (Risk)_i \quad (8)$$

通常认为, 当致癌风险低于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  时 (即每 1 万人到 100 万人增加 1 个癌症患者), 认为该物质不具有致癌风险<sup>[11]</sup>. 各重金属元素不同暴露途径 RfD 和 SF 如表 2 所示.

表 2 灰尘重金属不同暴露途径 RfD 和 SF<sup>1)</sup>

Table 2 Reference doses of metals and slope factors of heavy metal exposure

项目	Zn	Pb	Cu	Hg	As	Ni	Cr	Cd
$RfD_{oral}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	0.300	$3.50 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$
$RfD_{inh}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	0.300	$3.52 \times 10^{-3}$	$4.02 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-4}$	$2.06 \times 10^{-2}$	$2.86 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-3}$
$RfD_{dermal}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	$6.00 \times 10^{-2}$	$5.25 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$2.40 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$5.40 \times 10^{-3}$	$6.00 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-5}$
$SF_{inh}/[mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}]^{-1}$					$4.30 \times 10^{-3}$	0.84	42.0	6.3

1) As 的 RfD 参考[17]; Hg 的 RfD 参考文献[28], 其余 6 种金属 RfD 参考文献[11]; As 的 SF 参考文献[17, 28]; 其余 3 种致癌金属 SF 参考文献[11]

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属含量

#### 2.1.1 室内灰尘重金属含量

经单样本 K-S 检验, 室内灰尘 Cr、Ni 含量不符合

正态分布, As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 含量符合正态分布. 8 种重金属含量几何均值均超出了广东省土壤背景值<sup>[29]</sup>, 其中 Zn、Cd 分别高达背景值 103.37 倍、102.44 倍, Cr 污染相对最轻也达到了 4.36 倍, 表明佛山市该高校室内灰尘重金属污染相当严重 (表 3).

表 3 室内灰尘重金属的含量

Table 3 Concentrations of heavy metals in indoor dust

元素	$P(K-S)$	最小值 /mg·kg <sup>-1</sup>	最大值 /mg·kg <sup>-1</sup>	算术均值 /mg·kg <sup>-1</sup>	几何均值 /mg·kg <sup>-1</sup>	变异 系数	广东省土壤 背景值/mg·kg <sup>-1</sup>	倍数 (几何均值/土壤背景值)
As	0.446	15.14	189.99	58.54	47.59	0.72	6.8	7.00
Cd	0.361	1.10	15.756	5.35	4.20	0.70	0.041	102.44
Cr	0.000	48.18	5 748.25	494.39	155.38	2.78	35.6	4.36
Cu	0.354	152.50	900.90	356.16	320.26	0.52	10.5	30.50
Hg	0.412	0.18	1.35	0.66	0.59	0.49	0.055	10.73
Ni	0.000	52.50	1 360.11	200.59	131.08	1.58	9.6	13.65
Pb	0.903	126.44	588.132	315.90	297.30	0.34	29.8	9.98
Zn	0.145	1 452.82	4 882.32	3 909.31	3 783.49	0.23	36.6	103.37

### 2.1.2 教工区和学习区室内灰尘重金属含量差异性分析

教工区 Cr、Ni 除外,教工区、学习区室内灰尘重金属含量均符合正态分布. 8 种金属含量均值教工区大于学习区,Cr、Ni 差异较大,与表 3 Cr、Ni 变异系数超过 1.0 一致. As 含量在教工区和学习区存

在显著差异( $P=0.004$ ),经分析是因教工区个别样点 As 含量较高(放置较多频繁使用的打印机、复印机). 教工区金属含量分布更集中,学习区相对分散,As 和 Cd 除外,与学习区室内环境多样,人员流动大,教工区室内环境相对一致,人员流动小有关(表 4).

表 4 教工区和学习区室内灰尘重金属的统计<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>Table 4 Statistics of heavy metals in the staff and study areas/mg·kg<sup>-1</sup>

元素	教工区		学习区		差异性分析 $P$
	范围	均值	范围	均值	
As <sup>a</sup>	29.53 ~ 189.99	83.86	15.14 ~ 83.11	45.87	0.004
Hg <sup>a</sup>	0.35 ~ 1.07	0.67	0.18 ~ 1.35	0.66	0.107
Cu <sup>a</sup>	205.85 ~ 900.90	425.46	152.50 ~ 562.38	321.51	0.069
Zn <sup>a</sup>	2 527.53 ~ 4 674.35	3 917.02	1 452.82 ~ 4 882.32	3 905.46	0.968
Cr <sup>b</sup>	62.78 ~ 5 748.25	1 202.86	48.18 ~ 289.64	140.16	0.983
Ni <sup>b</sup>	69.65 ~ 1 360.11	364.59	52.50 ~ 192.35	118.59	0.422
Pb <sup>a</sup>	309.12 ~ 453.48	374.04	126.44 ~ 588.13	286.82	0.052
Cd <sup>a</sup>	2.27 ~ 14.72	6.47	1.10 ~ 15.76	4.79	0.606

1) a(教工区和学习区同一金属均值)独立样本  $t$  检验;b(教工区和学习区同一金属均值)独立样本 Mann-Whitney 检验

### 2.1.3 与国内不同城市灰尘重金属含量比较

如表 5 所示,Cd、Cu、Pb、Zn 高于多数室外地表灰尘;As 高于其他室内外灰尘,铜陵除外;Cu 高于北京室内灰尘,和贵阳、重庆家庭灰尘相近,低于贵阳办公室灰尘;Cr、Ni 处于较高的水平,和贵阳室内灰尘水平接近(去异常值);Pb 低于北京地铁站地表灰尘、贵阳家庭灰尘;Cd 低于铜陵市和河南某驾校地表灰尘. 总体上,与国内其他城市相比,除 Hg 外,本研究室内灰尘 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量处于较高水平.

## 2.2 重金属来源

### 2.2.1 相关性分析

除去个别样点,灰尘中 8 种金属含量均符合正态分布. 如表 6 所示,8 种金属多数在 0.05 或 0.01 水平上存在明显的相关性,表明灰尘中重金属可能存在相似的来源.

### 2.2.2 主成分分析

如表 7 所示,前 4 个主成分可以解释总变量的 88.056%. 第 1 主成分中载荷最高的是 Ni. 有研究表明 Ni 与背景值接近,主要来源于土壤母质,是自然源<sup>[30]</sup>. 本研究中 Ni 几何均值是广东省土壤背景值的 13.65 倍<sup>[29]</sup>,同时高于佛山市土壤中含量<sup>[31,32]</sup>,第 1 主成分排除自然源. 第 2 主成分载荷较大的是 Zn、Cr、Cu,第 3 主成分中载荷较大的是 Pb、Cd. 交通运输会造成环境中 Pb、Zn、Cu、Cd 的污染<sup>[17]</sup>. 本研究中 Pb 和 Cu 不具有相关性;离公路远的样点和近的样点 Pb、Zn 含量不存在显著性差异( $P>0.05$ ),说明第 2 主成分和第 3 主成分的主要污染源不是交通运输. 另外,Zn、Pb、Cd 含量高于佛山土壤中含量<sup>[31,32]</sup>和广东省土壤背景值<sup>[29]</sup>,与文献[18,23]报道的室内灰尘含量相近. 有研究发现 Zn、Cu、Pb 等来源于室内油漆涂料、金属磨损、

表 5 国内不同城市灰尘重金属含量比较/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 5 Comparison of heavy metals concentrations in dusts between different cities in China/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 

城市	元素含量水平(均值)								灰尘类型	文献
	As	Hg	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd		
北京	— <sup>1)</sup>	—	63.73	—	77.36	23.60	50.79	0.47	室外	[1]
开封	5.12	0.5	44.29	240.27	53.25	23.15	144.84	1.02	室外	[5]
上海	—	—	186.41	687.25	218.91	64.91	212.94	0.97	室外	[11]
北京	7.69	—	54.3	243	—	27.6	59.0	0.765	室外	[12]
合肥	—	—	67.50	2332.96	96.88	—	132.15	4.531	室外	[13]
铜陵	259.37	—	1346.59	2689.61	145.47	121.15	312.03	20.72	室外	[14]
许昌	7.8	—	35.4	145.3	96.7	18.5	41.9	—	室外	[15]
淮南	—	—	35.94	348.77	86.69	31.54	97.29	—	室外	[16]
河南某市	11.04	54.93	46.56	7782.53	70.21	17.96	285.26	5.92	室外	[17]
贵阳家庭	—	—	439	1253	128	117	290	2.67	室内	[18]
贵阳办公室	—	—	1645	2170	187	110	266	2.70	室内	[18]
贵阳	—	—	314	1707	109	116	406	2.25	室内	[21]
重庆	—	—	355	868	129	71.7	270	0.798	室内	[21]
南宁	—	—	159	1495	154	170	296	0.872	室内	[21]
北京办公室 A	—	—	192	2310	77.6	68.2	77.2	3.1	室内	[23]
北京办公室 B	—	—	200	255	59.0	83.9	47.1	3.7	室内	[23]
北京	9.09	0.35	67.33	—	131.92	41.77	437.41	1.11	地铁	[30]
佛山	58.54	0.66	356.16	3909.31	494.39	200.59	315.90	5.35	室内	本研究
佛山	49.33	—	317.66	—	133.18	117.82	306.51	4.64	室内	本研究去异常值

1) 无相应数据

表 6 佛山某高校室内灰尘重金属元素含量之间的相关性<sup>1)</sup>

Table 6 Correlation of heavy metal concentrations in dust in a college in Foshan

	As	Hg	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd
As	1							
Hg	0.456 *	1						
Cu	0.801 **	0.656 **	1					
Zn	0.675 **	0.432 *	0.649 **	1				
Cr	0.671 **	0.405 *	0.760 **	0.536 **	1			
Ni	0.583 **	0.386 *	0.633 **	0.338	0.653 **	1		
Pb	0.386 *	0.141	0.282	0.500 **	-0.011	0.074	1	
Cd	0.701 **	0.232	0.497 **	0.528 **	0.337	0.380 *	0.490 **	1

1) \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

电镀金属的腐蚀<sup>[18]</sup>. 此外,本研究中含频繁使用打印机、复印机的样点 Cu、Cr、Ni 的含量异常高;含小型、大型仪器设备的样点 Pb、Cd 的含量分别较高. 综合分析,本研究中第 1 主成分,第 2 主成分,第 3 主成分都代表室内人为污染源.

第 4 主成分中载荷较大的是 Hg. Hg 含量与佛山市土壤中 Hg 含量相近<sup>[31]</sup>,可能是通过人为活动、扬尘、大气沉降等引入室内的室外源. 另外,本研究中 Hg 几何均值是广东省土壤背景值的 10.73 倍<sup>[29]</sup>,故第 4 主成分代表室外人为源.

煤的燃烧是 As 一个主要污染源. 佛山是一个以工业为主导的制造业基地,煤炭是其主要的能源. 研究发现珠三角城市群大气中 As 污染较严重<sup>[33]</sup>. 另外,本研究中 As 含量高于佛山土壤中 As 含量,含打

印机复印机的样点 As 含量出现高值,说明本研究灰尘中较高的 As 含量,可能既有室内源也有室外源.

### 2.3 重金属健康风险评价

暴露量计算模型中暴露浓度的取值,本研究采用重金属含量平均值,未采用重金属含量数据的 95% 置信上限,即 95% UCL 计算风险,因一些学者认为,这样会过高估计风险发生的水平<sup>[13]</sup>. 重金属非致癌日均暴露剂量和非致癌风险结果如表 8 所示. 重金属非致癌日均暴露量均为手-口接触摄入量 > 皮肤吸收量 > 呼吸摄入量,手-口摄入是室内灰尘重金属暴露的主要途径. 重金属非致癌风险 HQ, Cr、Cd 为皮肤吸收 > 手-口接触 > 呼吸摄入,其余 6 种金属均为手-口接触 > 皮肤吸收 > 呼吸摄入. 教工区个别样点 Cr 手-口暴露、皮肤暴露非致癌风险

HQ > 1, 分别达到 1.88、4.70, 存在明显非致癌健康风险, 经分析发现对应样点含较多使用频繁的打印机、复印机, 应加强风险防范, 采取一定措施降低灰

尘中 Cr 对人体的暴露量。总体上, 8 种重金属不同途径非致癌风险 HQ 和总非致癌风险 HI 均 < 1, 对人体基本不会造成健康危害。

表 7 不同重金属含量在前 4 个主成分中的因子载荷<sup>1)</sup>

Table 7 Factor load of different heavy metals in the top four principal components

项目	旋转后主成分载荷			
	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
Ni	0.871	0.186	0.027	0.221
As	0.567	0.541	0.448	0.204
Zn	0.062	0.779	0.483	0.229
Cr	0.580	0.739	-0.119	0.149
Cu	0.510	0.583	0.218	0.488
Pb	-0.099	0.109	0.898	0.114
Cd	0.511	0.173	0.735	-0.018
Hg	0.196	0.202	0.081	0.941
特征值	4.444	1.340	0.754	0.507
贡献率/%	55.552	16.746	9.427	6.332
累计贡献率/%	55.552	72.297	81.724	88.056

1) 旋转法为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法

表 8 灰尘重金属非致癌日均暴露剂量和风险

Table 8 Daily non-carcinogenic exposure dose and non-carcinogenic risk of heavy metals in dust

元素	ADD (均值)			HQ (均值)			HI
	ADD <sub>oral</sub>	ADD <sub>inh</sub>	ADD <sub>derm</sub>	HQ <sub>oral</sub>	HQ <sub>inh</sub>	HQ <sub>derm</sub>	
As	$5.68 \times 10^{-5}$	$5.40 \times 10^{-9}$	$2.87 \times 10^{-6}$	0.19	$4.39 \times 10^{-5}$	$9.57 \times 10^{-3}$	0.20
Hg	$6.67 \times 10^{-7}$	$6.09 \times 10^{-11}$	$3.24 \times 10^{-8}$	$2.22 \times 10^{-3}$	$2.03 \times 10^{-7}$	$1.35 \times 10^{-3}$	$3.57 \times 10^{-3}$
Cu	$3.50 \times 10^{-4}$	$3.29 \times 10^{-8}$	$1.75 \times 10^{-5}$	$8.75 \times 10^{-3}$	$8.18 \times 10^{-7}$	$1.46 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-2}$
Zn	$3.78 \times 10^{-3}$	$3.61 \times 10^{-7}$	$1.92 \times 10^{-4}$	$1.26 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-6}$	$3.20 \times 10^{-3}$	$1.58 \times 10^{-2}$
Cr	$4.84 \times 10^{-4}$	$4.56 \times 10^{-8}$	$2.42 \times 10^{-5}$	0.16	$1.59 \times 10^{-3}$	0.40	0.57
Ni	$1.99 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-8}$	$9.83 \times 10^{-6}$	$9.95 \times 10^{-3}$	$8.98 \times 10^{-7}$	$1.82 \times 10^{-3}$	$1.18 \times 10^{-2}$
Pb	$3.09 \times 10^{-4}$	$2.91 \times 10^{-8}$	$1.55 \times 10^{-5}$	$8.83 \times 10^{-2}$	$8.27 \times 10^{-6}$	$2.95 \times 10^{-2}$	0.12
Cd	$5.26 \times 10^{-6}$	$4.93 \times 10^{-10}$	$2.62 \times 10^{-7}$	$5.26 \times 10^{-3}$	$4.93 \times 10^{-7}$	$2.62 \times 10^{-2}$	$3.15 \times 10^{-2}$

如图 1 所示, 4 种致癌重金属呼吸途径致癌风险大小依次为 Cr > Ni > Cd > As, 但致癌风险值及总致癌风险均未超  $10^{-6} \sim 10^{-4}$ , 远低于致癌风险的量级水平, 表明佛山该高校室内灰尘中重金属致癌风险总体较低, 对人体不会造成健康危害。

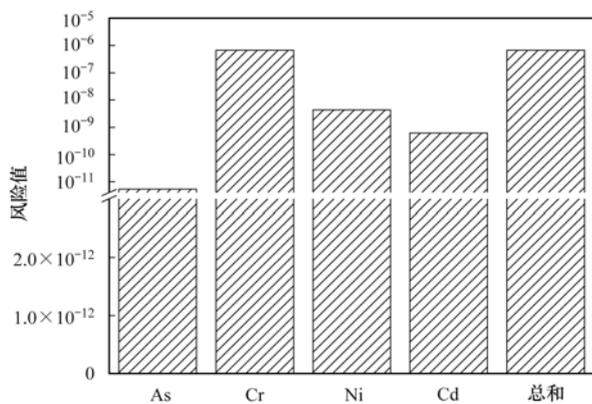


图 1 灰尘重金属致癌风险

Fig. 1 Carcinogenic risks of heavy metals in dusts

### 3 结论

(1) 珠三角某高校室内灰尘 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 共 8 种金属含量高于广东省土壤背景值; 金属含量均值在教工区和学习区不存在显著差异; 与国内其他城市相比, 金属含量均值处于较高水平, Hg 除外。

(2) 室内灰尘 8 种金属存在相似的来源。其中, As、Cu、Zn、Cr、Ni、Pb 和 Cd 主要来源于室内人为源, Hg 主要来源于室外人为源。

(3) 除个别样点 Cr 非致癌风险 > 1, Cr 致癌风险值达  $10^{-6}$  外, 多数样点 8 种金属非致癌风险 < 1, 4 种致癌金属呼吸途径致癌风险 <  $10^{-6}$ , 对人体不会造成健康危害。

(4) 打印机/复印机、仪器设备等是室内重金属的重要污染源和风险源, 应采取一定的防护措施如人机物理隔离、经常通风除尘, 降低人体暴露风险。

## 参考文献:

- [ 1 ] 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价[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8):2006-2015.  
Tang R L, Ma K M, Zhang Y X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals of street dust in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(8): 2006-2015.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] Bhattacharjee P, Banerjee M, Giri A K. Role of genomic instability in arsenic-induced arcinogenicity. A review [J]. *Environment International*, 2013, **53**:29-40.
- [ 4 ] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3):547-553.  
Li X P, Qi J Y, Chen Y H. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the main drinking water sources of Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(3): 547-553.
- [ 5 ] 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.  
Duan H J, Cai X Q, Ruan X L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- [ 6 ] 尤汉虎, 庞智锋, 梁雅慧, 等. 佛山市某城区饮用水重金属健康危害风险初步评估[J]. 华南预防医学, 2011, **37**(3): 32-36.  
You H H, Pang Z F, Liang Y H, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water in a certain district of Foshan City [J]. *South China Journal of Preventive Medicine*, 2011, **37**(3):32-36.
- [ 7 ] Ordóñez A, Álvarez R, De Miguel E, *et al.* Spatial and temporal variations of trace element distribution in soils and street dust of an industrial town in NW Spain: 15 years of study [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **524-525**:93-103.
- [ 8 ] Acosta J A, Gabarrón M, Faz A, *et al.* Influence of population density on the concentration and speciation of metals in the soil and street dust from urban areas [J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 328-337.
- [ 9 ] Akinwunmi F, Akinhanmi T F, Atobatele Z A, *et al.* Heavy metal burdens of public primary school children related to playground soils and classroom dusts in Ibadan North-West local government area, Nigeria [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2017, **49**:21-26.
- [ 10 ] Keshavarzi B, Tazarvi Z, Rajabzadeh M A, *et al.* Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **119**:1-10.
- [ 11 ] 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.  
Chang J, Liu M, Li X H, *et al.* Primary research on health risk assessment of heavy metals in road dust of Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(5):548-554.
- [ 12 ] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京城市广场及校园表土(灰尘)中重金属水平与健康风险[J]. 地理研究, 2010, **29**(6): 989-996.  
Li X Y, Chen T B, Lei M, *et al.* Concentrations and risk of heavy metals in surface soil and dust in urban squares and school campus in Beijing [J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(6): 989-996.
- [ 13 ] 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.  
Li R Z, Zhou A J, Tong F, *et al.* Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9):2661-2668.
- [ 14 ] 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.  
Li R Z, Pan C R, Chen J, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12):2261-2270.
- [ 15 ] 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.  
Yan H, Chen J, Xiao J. Heavy metal content in street dust and environmental risk assessment of agricultural city: a case study of Xuchang City [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 4017-4023.
- [ 16 ] 武家园, 方凤满, 林跃胜, 等. 淮南市校园灰尘重金属污染特征及生物有效性[J]. 环境化学, 2016, **35**(7):1346-1353.  
Wu J Y, Fang F M, Lin Y S, *et al.* Contamination characteristics and bioavailability of heavy metals in campus dusts of Huainan City [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(7): 1346-1353.
- [ 17 ] 陈铁楠, 马建华. 河南省某市驾校地表灰尘重金属污染及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8):3017-3026.  
Chen Y N, Ma J H. Assessment of pollution and health risks of heavy metals in surface dusts from driving schools in a city of Henan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 3017-3026.
- [ 18 ] 李晓燕, 汪浪, 张舒婷. 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 [J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2889-2896.  
Li X Y, Wang L, Zhang S T. Level and the courses of heavy metals and its risk assessment in indoor dust of city: take Guiyang as a case [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8):2889-2896.
- [ 19 ] He C T, Zheng X B, Yan X, *et al.* Organic contaminants and heavy metals in indoor dust from e-waste recycling, rural, and urban areas in South China: Spatial characteristics and implications for human exposure [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **140**:109-115.
- [ 20 ] 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.  
Yang W L, Bi X Y, Han Z X, *et al.* Dust lead contamination in rural households of several provinces in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(6):1246-1250.
- [ 21 ] 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.  
Li X Y, Xie X J. A study on heavy metals in household dusts in 3 cities in Southwestern China [J]. *China Environmental*

- Science, 2013, **33**(2): 365-371.
- [22] 李良忠, 胡国成, 张丽娟, 等. 矿区家庭灰尘中重金属污染及其潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1230-1238.
- Li L Z, Hu G C, Zhang L J, *et al.* The pollution and potential ecological risk assessment of the heavy metals in household dusts from mineral areas[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(4): 1230-1238.
- [23] 曹治国, 余刚, 吕香英, 等. 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[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1272-1278.
- Cao Z G, Yu G, Lü X Y, *et al.* Particle size distribution, seasonal variation characteristics and human exposure assessment of heavy metals in typical settled dust from Beijing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1272-1278.
- [24] 贺彬, 郑冬梅, 金丹. 沈阳市大学校园室内外灰尘铅暴露研究[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2016, **28**(5): 373-378.
- He B, Zheng D M, Jin D. Pb exposure of indoor and outdoor dust in university campuses of Shenyang [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2016, **28**(5): 373-378.
- [25] Zheng J Y, Ou J M, Mo Z W, *et al.* Mercury emission inventory and its spatial characteristics in the Pearl River Delta region, China[J]. Science of the Total Environment, 2011, **412**-**413**: 214-222.
- [26] Li Z, Xia C H, Wang X M, *et al.* Total gaseous mercury in Pearl River Delta region, China during 2008 winter period [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(4): 834-838.
- [27] Fu X X, Feng X B, Zhang H, *et al.* Mercury emissions from natural surfaces highly impacted by human activities in Guangzhou province, South China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **54**: 185-193.
- [28] DB11/T 656-2009 场地环境评价导则[S].
- DB11/T 656-2009 Environmental site assessment guideline[S].
- [29] 张朝阳, 彭平安, 刘承帅, 等. 华南电子垃圾回收区农田土壤重金属污染及其化学形态分布[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(10): 1742-1748.
- Zhang C Y, Peng P A, Liu C S, *et al.* Heavy metal contaminations and chemical speciation of farmland soils in an e-waste recycling town in South China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(10): 1742-1748.
- [30] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 944-950.
- Yang X Z, Chen Y, Xu D D, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution and health risk assessment in subway dust in Beijing[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(6): 944-950.
- [31] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 130-135.
- Cui X F, Li S Y, Ding X D, *et al.* Contents of heavy metals in soil and vegetables at typical vegetable plot in the Pearl River Delta[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(1): 130-135.
- [32] 关共凑, 魏兴琥, 陈楠纬. 佛山市郊菜地土壤理化性质与重金属含量及其相关性[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(2): 78-82.
- Guan G C, Wei X H, Chen N W. Study on physical-chemical properties and contents of heavy metals and their correlation in vegetable fields of Foshan [J]. Environmental Science and Management, 2013, **38**(2): 78-82.
- [33] 黄娇. 珠三角地区大气重金属的污染特征与环境风险评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. 1-56.
- Huang J. Study on the pollution characteristics and environmental risk assessment on the heavy metal of the particles in the Pearl River Delta[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. 1-56.

## CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China .....	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing .....	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels .....	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust .....	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014 .....	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing .....	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System .....	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province .....	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta .....	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus .....	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City .....	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations .....	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River .....	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	..... HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes .....	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas .....	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China .....	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills .....	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment .....	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions .....	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon .....	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb <sup>2+</sup> Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode .....	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode .....	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite .....	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Biochemical Method .....	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process .....	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge .....	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen .....	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge .....	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria .....	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems .....	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Lou Soil .....	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province .....	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil .....	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region .....	..... FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles .....	..... FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi .....	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China .....	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation .....	..... JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil .....	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice .....	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH .....	..... ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil .....	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI) .....	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge .....	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar .....	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance .....	..... HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)