

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洺河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评估 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估

李敦柱^{1,3}, 管运涛^{3*}, 刘安^{2,3}, 李思远^{1,3}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 京都大学-清华大学环境教育与研究中心, 深圳 518055; 3. 清华大学深圳研究生院, 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 深圳 518055)

摘要: 以华南地区 4 种典型材料屋面(瓷砖、混凝土、金属和沥青)为研究对象, 采用改进式 BCR 连续提取法对其屋面积尘中 10 种重金属(Ba、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb、Sr 和 Zn)进行形态分析与风险评估. 结果表明, 屋面积尘重金属平均含量明显高于道路积尘. 形态分析表明, Zn 的酸溶态比例明显高于其他重金属, Pb 和 Cu 主要以可氧化态存在, 其余重金属均以残渣态为主; 屋面积尘重金属可移动态比例表现为 Pb > Zn > Cu > Mn > Co > Sr > Sb > Ni > Ba > Cr, 其中 Pb、Zn、Cu、Mn 和 Co 可移动态比例均超过 50%. 环境风险评估发现, 污染指数(C_r)与风险评价编码指数(RAC)最大值均为 Zn, 其生态风险较高. 健康风险评估表明, 屋面积尘重金属对成人与儿童非致癌风险均表现为: Pb > Cr > Sb > Zn > Mn > Cu > Ba > Ni > Co > Sr, 其对成人非致癌风险均小于安全限值, 不构成威胁, 但 Pb 对儿童的非致癌风险高于安全限值, 形成威胁; 屋面积尘中 Cr、Co 和 Ni 低于致癌风险阈值, 对人体无致癌风险.

关键词: 典型材料; 屋面积尘; 重金属; BCR 方法; 形态分布; 风险评估

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3269-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.019

Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts

LI Dun-zhu^{1,3}, GUAN Yun-tao^{3*}, LIU An^{2,3}, LI Si-yuan^{1,3}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Cooperative Research and Education Centre for Environmental Technology, Kyoto University-Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: With the modified BCR sequential extraction procedure, the chemical speciation and risk for 10 heavy metals (Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr and Zn) in roof dusts were investigated. The subjects of this study were collected from four typical material paved roofs (i. e., ceramic tile, concrete, metal and asphalt) in southeast China. The results indicated that the average contents of heavy metals in roof dust significantly exceeded road dust. The analysis of chemical fraction showed that the acid soluble/exchangeable fraction of Zn was much higher than other elements, the existence of Pb and Cu was mainly in oxidization fraction, while other heavy metals dominated by the residual fraction. The mobility sequence percentages for all roof dust samples decreased in the order of Pb > Zn > Cu > Mn > Co > Sr > Sb > Ni > Ba > Cr, and it should be noted that Pb, Zn, Cu, Mn and Co all have more than 50% proportion in mobility sequence. Based on environmental risk assessment, the highest values of contamination factors (C_r) and risk assessment code (RAC) consistently was observed in Zn, which indicated that Zn had relatively high ecological risk. Health risk assessment showed that the non-carcinogenic hazard indexes (HI) of heavy metals decreased in the order of Pb > Cr > Sb > Zn > Mn > Cu > Ba > Ni > Co > Sr, the HI of heavy metals for adults were lower than safe value while the HI of Pb for children was higher than safe value, suggesting that they will not harm the adult's health except Pb for children. The carcinogenic risk for Cr, Co and Ni were all below the threshold values, which indicated that there was no carcinogenic risk.

Key words: typical materials; roof dusts; heavy metals; BCR sequential extraction procedure; speciation distribution; risk assessment

屋面积尘作为重金属、氮磷等污染物的载体, 主要来源于大气降尘与屋面表层材料腐蚀^[1]. 由于具有粒径小、比表面积大等特点, 屋面积尘易于携带高含量重金属污染物并长时间停留在城市环境或在风力作用下重新悬浮于大气, 进而威胁环境与人体安全^[2,3]. 研究发现, 屋面材料对屋面积尘重金属含量影响显著. Van Metre 等^[3]研究发现沥青屋面积尘是重金属 Pb 的重要来源而彩钢金属屋面则倾向于产生较多的颗粒态重金属 Zn 和 Cr. Mendez

等^[1]研究发现彩钢金属屋面产生的径流重金属 Zn 的浓度较高而绿色屋面径流重金属 Pb 的浓度则较高. 可以发现, 屋面材料会明显影响其积尘中重金属产物. 当前, 混凝土、瓷砖和沥青是国内居民区

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07301-001); 深圳市水务科技创新一般专题项目; 深圳市科技计划项目(CJHZ20140416153751129)

作者简介: 李敦柱(1988~), 男, 硕士, 主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: lidunzh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: guanyt@tsinghua.edu.cn

建筑物最常使用的屋面材料,而彩钢金属屋面则最常出现在工业区与大型场馆^[4],因此在国内选取上述4种材料屋面积尘开展研究具有代表意义。

目前,国内外关于屋面积尘重金属形态分布与风险评估的研究鲜有报道,已有的相关研究多关注河道沉积物、污泥、土壤与大气降尘等^[5-8],针对道路与公园地表积尘的健康风险研究正逐步展开^[9-11]. 多项研究发现道路积尘中重金属 Pb 含量较高,可能对人体产生危害^[2, 12-14]; 吴绽蕾等^[15]研究发现公园地表积尘中重金属 Cr 对人群的健康风险最高,而屋面积尘中重金属 Zn 的含量往往较高^[3]. 随着人类屋面活动愈加频繁,其与屋面积尘接触的可能性极大增加,同时屋面积尘在风力、重力等作用下极易飘落,最终通过饮食、皮肤及呼吸等途径进入人体,威胁人体健康. 因此,屋面积尘重金属风险研究显得尤为必要。

本文通过研究4种材料(瓷砖、混凝土、金属和沥青)屋面积尘10种重金属(Ba、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb、Sr和Zn)含量与形态分布,评估其环境与居民健康风险,旨在为屋面积尘重金属污染识别与居民健康保护提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于深圳市南山区(如图1),该区域年降雨量为1933 mm,年平均气温为23℃,该区域占地1.3 km²,常住居民超过3.5万人,研究区域屋面材料多为瓷砖、混凝土、金属和沥青,是目前国内最典型的屋顶材料,有利于研究的展开。

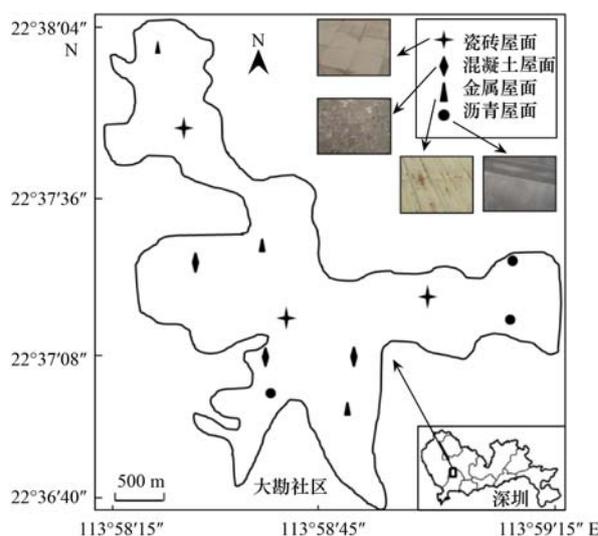


图1 研究区域与采样点位置示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

1.2 样品采集

本研究选择干期天数10 d时采用湿式真空吸尘法^[16-18]采集屋面积尘,共设12个采样点,每种类型屋面含3个采样点(如图1). 采样点均位于屋面中部,采样面积为1.5 × 2 m²,每个采样点吸尘4次,包括3次干式吸尘与1次湿式吸尘. 表1给出了不同类型屋面的基本信息. 采样完毕后,每个样品均用去离子水定容至5 L,同种类型屋面的3个样品充分混合,最终取出2 L并冷冻干燥备用. 研究显示小于63 μm的颗粒物是环境与健康威胁的主体(易于再悬浮)^[2, 19],所以冷冻干燥后颗粒物均通过63 μm尼龙筛进行筛分。

表1 不同材料屋面基本特征

Table 1 Characteristics of sample sites in each material roof

屋面类型	采样点尺寸/m	采样点数量	干期天数/d	屋面特征
瓷砖	1.5 × 2	3	10	几乎没有腐蚀,表面最光滑
混凝土	1.5 × 2	3	10	密布孔隙与颗粒,表面最粗糙
金属	1.5 × 2	3	10	覆盖油漆层,相对光滑
沥青	1.5 × 2	3	10	覆盖细集料,表面相对粗糙

1.3 样品提取、检测与质量保证

本研究采用欧共体标准物质局提出的改进式BCR连续提取法对屋面积尘样品进行分级提取^[2, 20-23]. 每种类型屋面样品选取0.5 g,其具体提取方法见表2. 按照提取顺序可得到4种形态重金属:酸溶态(F1)、可还原态(F2)、可氧化态(F3)与残渣态(R).

本研究采用电感耦合等离子体质谱仪(Elan

6000,美国)检测各形态重金属含量与重金属总含量(前处理为HCl + HNO₃ + HF混酸湿法消解).

为保证检测结果准确可靠,整个过程中使用标准土壤样品(GBW 07430-GSS16)为参照物,检验消解方法与检测可靠性,10种重金属的回收率均介于75.6% ~ 105.8%,上述方法可靠有效^[17]. 采用内部回收率检验本研究中BCR方法的可靠性,其检测

公式如下:

$$\text{Recovery}(\%) = \frac{F1 + F2 + F3 + R}{TC} \times 100 \quad (1)$$

式中, Recovery 表示内部回收率(%), F1、F2、F3

与 R 表示各形态重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), TC 表示直接检测的重金属总含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 计算发现, 10 种重金属内部回收率(89.8% ~ 113.1%)均满足要求^[2], 数据可靠.

表 2 改进式 BCR 顺序提取法

Table 2 Modified BCR sequential extraction scheme used for operational of metals

步骤	重金属形态	提取溶剂	振荡与温度条件
F1	酸溶态	20 mL 0.11 mol·L ⁻¹ CH ₃ COOH	室温, 16 h 振荡
F2	可还原态	20 mL 0.5 mol·L ⁻¹ HONH ₂ ·HCl (pH=2)	室温, 16 h 振荡
F3	可氧化态	5 mL 8.8 mol·L ⁻¹ H ₂ O ₂ (pH=2) 25 mL 1 mol·L ⁻¹ NH ₄ OAC	先加入 H ₂ O ₂ , 1 h 室温, 85℃ 蒸至近干, 连续 2 次, 最后加入 NH ₄ OAC, 室温, 16 h 振荡
R	残渣态	5 mL 12 mol·L ⁻¹ HCl 和 15.8 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 混酸(3:1) + 1 mol·L ⁻¹ HF	85℃ 加热 2 h, 最后以 5% HNO ₃ 溶解

1.4 健康风险评估模型

本研究采用改进后 EPA 土壤健康风险模型为基本框架评价屋面积尘重金属健康风险^[2, 7, 11, 20, 24]. 结合相关文献假设屋面积尘可通过 3 种途径进入人体: 呼吸吸入, 皮肤接触和手-口直接摄入.

1.4.1 暴露量的计算

暴露量是指人体单位质量单位时间暴露污染物的量. 式(2)~(4)给出了重金属经手-口直接摄入, 呼吸吸入和皮肤接触这 3 种途径日暴露量计算方法. 式(5)给出了致癌重金属(Cr、Co 和 Ni)暴露剂量的计算方法.

$$D_{\text{ing}} = C \times \frac{\text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$D_{\text{inh}} = C \times \frac{\text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

$$D_{\text{dermal}} = C \times \frac{\text{SL} \times \text{SA} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$\text{LADD} = \frac{C \times \text{EF}}{\text{AT} \times \text{PEF}} \times$$

$$\left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (5)$$

式中, D_{ing} 、 D_{inh} 和 D_{dermal} 分别表示手-口直接摄入, 呼吸吸入和皮肤接触这 3 种途径日暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], LADD 表示致癌重金属吸入途径的终身日平均暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 式中相关参数的含义与取值如表 3 所示, 参数取值时以 EPA 土壤模型标准为主, 同时结合我国情况进行一定程度修正.

表 3 屋面积尘重金属日平均暴露量计算参数含义及其取值

Table 3 Daily dose parameter of heavy metals in roof dust

参数	单位	含义	儿童取值	成人取值	文献
C	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	重金属可移动态含量	BCR 法提取含量	BCR 法提取含量	本研究
ED	a	暴露年限	6	24	[20]
BW	kg	平均体重	15	70	[2, 10]
EF	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	暴露频率	180	180	[20]
AT(非致癌)	d	平均作用时间	$365 \times \text{ED}$	$365 \times \text{ED}$	[20]
AT(致癌)	d	平均作用时间	25 550	25 550	[20]
IngR	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	摄食灰尘量	200	100	[20]
InhR	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	空气摄入量	7.6	20	[20]
PEF	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	颗粒物排放因子	1.36×10^9	1.36×10^9	[20]
SL	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	皮肤附着因子	0.2	0.7	[2, 10]
SA	$\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	暴露皮肤面积	2 800	5 700	[20]
ABS	/	吸入因子	0.001	0.001	[7]

1.4.2 健康风险表征

根据式(2)~(5)暴露量计算结果, 利用式(6)

~(8)可得出屋面积尘重金属健康风险.

$$\text{HQ} = D/R_{\text{fD}} \quad (6)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (7)$$

$$CR = LADD \times SF \quad (8)$$

式中, HQ 为单种污染物通过某一途径的非致癌风险; D 为单种污染物的某一途径的非致癌风险量; $R_i D$ 为该途径的参考剂量, 表示单位体重在单位时间内摄取的不会引起人体不良反应的污染物最大量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 其取值见表 4; HI 为 3 种途径重

金属非致癌风险的加和. 当 HQ 或 $HI < 1$ 时, 风险较小或可以忽略, HQ 或 $HI \geq 1$ 时一般认为存在非致癌风险; CR 为致癌风险, 表示单位数量人口出现癌症患者的概率, 若 CR 小于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 则认为该物质不具备致癌风险; SF 为致癌风险斜率系数, 表示人体暴露于一定剂量某种重金属下产生致癌效应的最大概率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] [2, 12], 其取值见表 4.

表 4 重金属不同途径 $R_i D$ (非致癌) 与 SF (致癌) 值¹⁾

Table 4 Reference dose for non-carcinogenic metals ($R_i D$) and slope factors (SF) for carcinogenic metals

项目	Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
$R_i D_{\text{ing}}$	2.00E-01	2.00E-02	3.00E-03	4.00E-02	4.70E-02	2.00E-02	3.50E-03	4.00E-04	6.00E-01	3.00E-01
$R_i D_{\text{inh}}$	2.00E-01	5.71E-06	2.86E-05	4.00E-02	4.70E-02	2.00E-02	3.50E-03	4.00E-04	6.00E-01	3.00E-01
$R_i D_{\text{derm}}$	1.40E-02	1.60E-02	6.00E-05	1.20E-02	2.40E-03	5.40E-03	5.25E-04	6.00E-05	1.20E-01	6.00E-02
SF	—	9.80E+00	4.20E+01	—	—	8.40E-01	—	—	—	—

1) 数据来源参见文献[2, 20]

2 结果与分析

2.1 屋面积尘重金属总量分析

表 5 给出屋面积尘与部分城市道路积尘重金属总量. 可以发现, 屋面积尘重金属的排序为 $Zn > Ba > Pb > Mn > Cr > Cu > Sr > Ni > Sb > Co$, 这与道路积

尘重金属的排序大致相当^[9, 10, 19]. Ba、Mn 和 Sr 的最高含量分别出现在沥青、瓷砖和混凝土屋面, 其余 7 种重金属最高含量均出现在金属屋面, 说明金属屋面重金属污染明显偏高. 对比华南地区城市道路积尘发现, 屋面积尘重金属含量明显高于道路积尘, 说明屋面积尘重金属污染不容忽视.

表 5 屋面与道路积尘重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 5 Heavy metal contents in dust among roofs and roads/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
瓷砖屋面	1 814.1	20.9	182.4	230.6	946.0	122.8	1 507.9	23.2	173.3	3 020.5
混凝土屋面	1 273.6	17.9	96.1	164.1	788.9	58.3	212.2	8.6	182.9	1 124.8
金属屋面	1 027.1	27.7	1 041.7	849.9	699.0	151.9	2 391.2	40.0	137.4	16 167.6
沥青屋面	2 868.4	15.8	84.1	184.1	534.8	58.2	195.5	16.9	116.2	1 087.1
屋面均值	1 745.8	20.6	351.1	357.2	742.2	97.8	1 076.7	22.2	152.5	5 350.0
深圳道路 ^[18]	—	—	12.2	95.7	—	73.2	52.8	—	—	725.7
广州道路 ^[25]	—	—	78.8	176	—	23	240	—	—	586
香港道路 ^[26]	—	—	—	173	—	—	181	—	—	1 450

2.2 屋面积尘重金属形态分析

2.2.1 屋面积尘重金属 4 种形态分布

图 2 给出了屋面积尘重金属 4 种形态分布比例. 可以发现, 同一重金属在 4 种屋面积尘中形态分布规律基本相似, 不同重金属之间形态分布差异很大.

Ba、Co 和 Ni 主要以残渣态 (R) 形式存在, 其残渣态所占比例分别为 51.1% ~ 87.5%、40.0% ~ 57.4% 和 55.7% ~ 67.9%, 说明此类重金属与颗粒物矿物基质结合紧密, 生物可利用性较差. 同时上述 3 种重金属可氧化态 (F3) 比例均显著高于酸溶态 (F1) 和可还原态 (F2).

Sr 和 Mn 残渣态比例分别为 32.7% ~ 71.9% 和

39.3% ~ 55.6%, 明显高于其它 3 种形态. Pb 和 Cu 则以可氧化态 (F3) 为主要存在形态, 其可氧化态比例分别为 51.0% ~ 73.2% 和 46.5% ~ 67.4%, 明显高于道路积尘相关研究结果^[18, 27]. 由于金属与有机物的结合能力随着氧化还原电位增加而降低^[28], 说明屋面积尘中 Pb 和 Cu 比道路积尘更容易释放到环境中, 造成环境危害.

对比发现, 重金属 Zn 酸溶态比例明显高于其他重金属, 说明 Zn 比其它重金属更加活泼, 加之 Zn 会破坏人体的神经组织^[15, 29], 其对人体的危害值得进一步关注.

与上述重金属不同, Cr 与 Sb 在不同屋面积尘上形态分布差异显著. Cr 在瓷砖、混凝土和沥青屋

面积尘中均主要以残渣态存在,但在金属屋面中主要以可氧化态存在(77.8%),这说明金属屋面积尘中重金属 Cr 易于释放到环境中,其对生态安全的威胁较大. 重金属 Sb 在瓷砖和混凝土屋面积尘中主要以残渣态存在,而在金属和沥青屋面则主要以可氧化态存在.

2.2.2 屋面积尘重金属可移动态分析

重金属可移动态(mobility sequence)是指重金属酸溶态、可还原态与可氧化态之和^[2, 13, 30]. 结合图2屋面积尘重金属非移动态(即残渣态R)所占比例,可以反推得出重金属可移动态均值呈现 Pb

(87.9%) > Zn (85.2%) > Cu (81.6%) >> Mn (53.7%) > Co (50.5%) >> Sr (46.0%) > Sb (41.8%) > Ni (38.3%) > Ba (32.2%) > Cr (30.9%),其中 Pb、Zn、Cu、Mn 和 Co 的可移动态都超过 50%,说明其可移动性与生物可利用性很强. 瓷砖、混凝土、金属和沥青屋面积尘的可移动态比例分别是 52.1%、50.9%、62.9% 和 53.3%,金属屋面积尘重金属可移动态比例明显高于其他 3 种屋面. 这是由于金属屋面表层油漆中 Pb、Cr 等可移动态比例较高^[31],进而导致其积尘(腐蚀产物)重金属可移动态比例高于其它屋面.

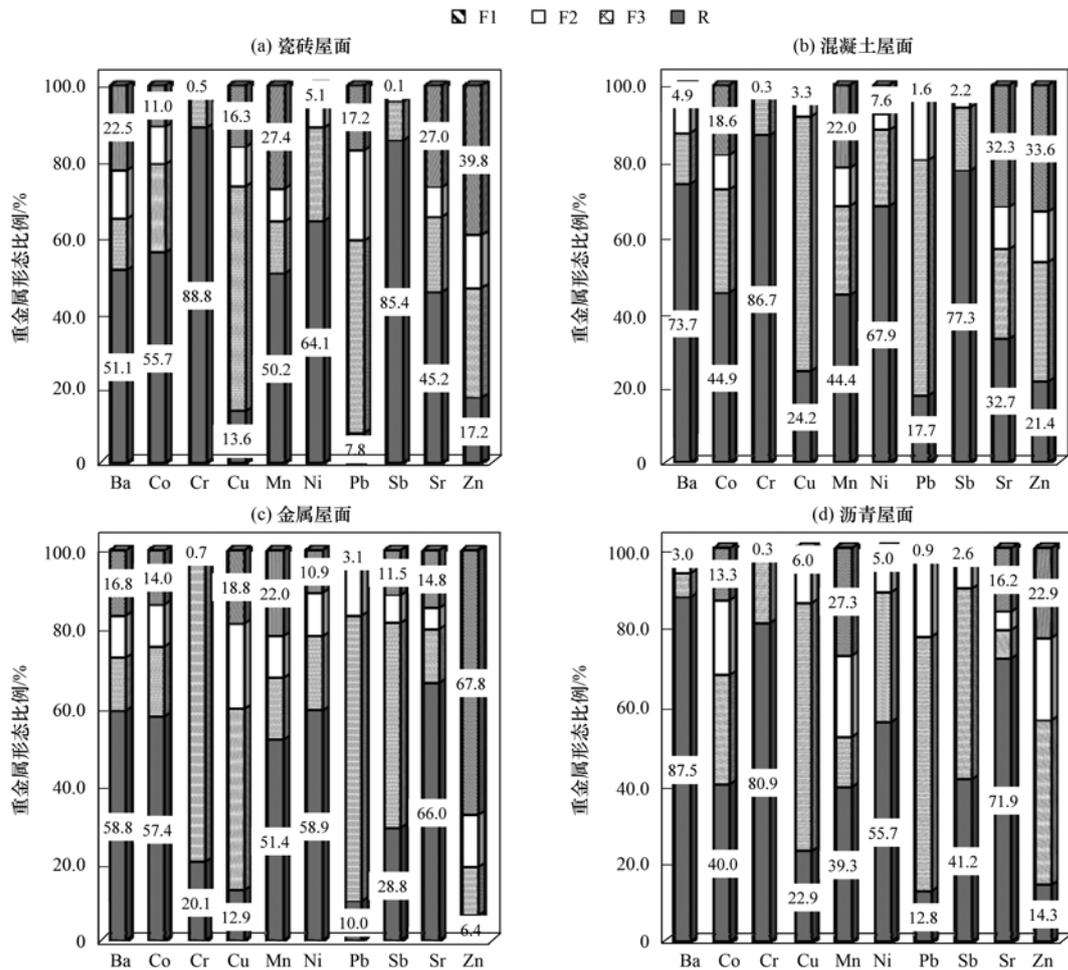


图 2 4 种屋面积尘重金属形态分布

Fig. 2 Chemical speciation of heavy metals for roof dust

2.3 屋面积尘重金属环境风险评价

2.3.1 RAC (risk assessment code) 风险评价

RAC 值是指重金属酸溶态(F1)所占比例,该指标常用于评价重金属活性风险. RAC < 1% 表示无风险,1% < RAC < 10% 表示轻度风险,10% < RAC < 30% 表示中度风险,30% < RAC < 50% 表示高度风险,RAC > 50% 表示极高风险^[32].

由图2可以发现,RAC 最高值为 Zn,其中金属屋面积尘 Zn 的 RAC 值高达 67.8%,4 种屋面积尘 RAC 均值为 41.0%,属于高度风险,说明其对生态系统具有较高的潜在威胁. Mn、Sr、Co 和 Cu 的 RAC 值分别为 22.0% ~ 27.4%、14.8% ~ 32.3%、11.0% ~ 18.6% 和 3.3% ~ 18.8%,属于中度和轻度风险; Ba、Cu、Ni 和 Pb 的 RAC 均值分别为

11.8%、11.1%、7.2%和5.7%,说明上述4种重金属活性较低;Cr在4种屋面的RAC值均低于1%,表明其活性最低。

4种屋面积尘RAC值排序为:金属屋面(18.0%)>瓷砖屋面(16.7%)>混凝土屋面(12.6%)>沥青屋面(9.8%),基本均表现出中度风险。

2.3.2 C_f (contamination factors) 风险评价

C_f 是用于衡量重金属在环境中停留时间的重要指标, C_f 值越高其停留时间越短,对环境威胁越大, C_f 值计算公式见式(9)^[5]:

$$C_f = (F_1 + F_2 + F_3)/R \quad (9)$$

式中符号意义见表2。

表6给出了不同屋面积尘 C_f 计算结果。可以

发现,Pb、Zn和Cu的 C_f 值较高,分别为4.65~11.75、3.67~14.57和3.13~6.66,说明上述3种重金属可移动态量远高于残留态,在环境中停留时间短,移动能力强,易于对生态安全造成威胁,其中金属屋面积尘中Zn的 C_f 值最大(14.57),加之其RAC值亦最大,说明金属屋面积尘Zn的环境危害需特别关注。对比发现,重金属Mn、Cr、Sb、Co和Sr的 C_f 值相对较小,而Ni和Ba的 C_f 值最小,分别为0.32~0.53和0.09~0.37,说明Ni和Ba停留时间最长,其环境威胁相对较小。

4种屋面10种重金属 C_f 均值排序为:金属屋面(4.04)>瓷砖屋面(2.77)>沥青屋面(2.22)>混凝土屋面(1.73),说明金属屋面积尘重金属在环境中停留时间明显低于其它3种屋面,其环境威胁更高。

表6 屋面积尘重金属 C_f 值

Table 6 The C_f values of heavy metals in roof dust

项目	Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
瓷砖屋面	0.96	0.80	0.13	6.34	0.99	0.56	11.75	0.17	1.21	4.83
混凝土屋面	0.36	1.23	0.15	3.13	1.25	0.47	4.65	0.29	2.05	3.67
金属屋面	0.70	0.74	3.98	6.77	0.94	0.70	9.03	2.47	0.52	14.57
沥青屋面	0.14	1.50	0.24	3.37	1.55	0.79	6.80	1.43	0.39	5.98
均值	0.54	1.07	1.12	4.90	1.18	0.63	8.06	1.09	1.04	7.26

2.4 屋面积尘重金属健康风险评价

2.4.1 重金属非致癌风险评价

不同材料屋面积尘重金属非致癌风险(hazard index, HI)如图3所示。可以发现,4种屋面积尘10种重金属对儿童的HI值均明显高于成人,说明儿童更易受到重金属威胁。4种屋面重金属对儿童和成人的HI值均呈现:金属屋面>瓷砖屋面>沥青屋面>混凝土屋面,其中金属屋面积尘对儿童和成人的HI均值分别为7.23E-01、1.27E-01,远超过其它3种屋面,说明金属屋面是该区域非致癌风险控制的关键。

研究区域重金属对成人HI值表现为Pb>Cr>Sb>Zn>Mn>Cu>Ba>Ni>Co>Sr,其中Pb(2.48E-01)和Cr(1.56E-01)表现较高的HI值,而Co(5.57E-04)和Sr(1.05E-04)HI值最低,Li等^[2]在城市道路积尘重金属研究中也发现了类似规律。上述所有重金属的HI值均小于1,表明各重金属元素对成人安全不构成威胁。

研究区域重金属对儿童HI值排序与成人相同,但其HI值明显高于成人。对比发现,重金属Pb对儿童的HI值最高,已超过安全限值1,达到1.86E+00,说明重金属Pb是该区域屋面积尘非致癌风险首

要控制污染物。研究显示,儿童对Pb的高吸收速率会导致儿童尚未发育完全的神经系统更易受到Pb的伤害^[33],目前,中国相当部分儿童正遭受重金属Pb的危害,部分西部工业城市血铅超标儿童超过84%^[10],而较早研究表明,本研究区域所在城市在当时超过三分之二儿童血铅超标^[34]。上述分析显示该区域屋面积尘Pb对儿童的非致癌风险已超过安全限值,说明该区域儿童可能面临重金属Pb的非致癌风险。

2.4.2 重金属Cr、Co和Ni致癌风险评价

研究表明上述10种重金属中Cr、Co和Ni具有潜在致癌风险^[9]。表7给出了4种材料屋面积尘重金属元素Cr、Co和Ni致癌风险(cancer risk, CR)计算结果。可以发现,4种屋面积尘重金属的CR值排序为金属屋面>瓷砖屋面>沥青屋面>混凝土屋面。与非致癌风险类似,金属屋面积尘的致癌风险明显高于其它3种屋面,这进一步突出了金属屋面积尘控制的重要意义。

4种屋面积尘单种重金属CR值均表现为Cr>Co>Ni,其中重金属元素Cr的CR值远高于Co和Ni。比较发现,3种重金属元素的CR值均小于致癌

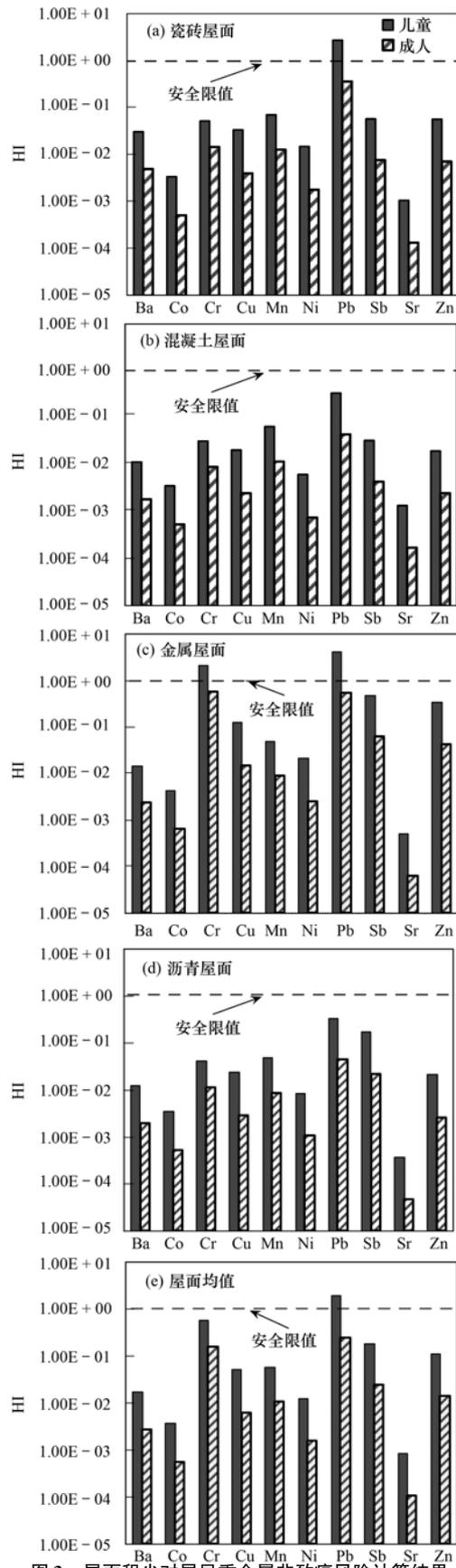


图3 屋面积尘对居民重金属非致癌风险计算结果

Fig. 3 Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals in roof dust for human health

表7 Cr、Co 和 Ni 致癌风险指数值

Table 7 Carcinogenic risk values of Cr, Co and Ni

项目	Cr	Co	Ni
瓷砖屋面	4.40E-08	4.65E-09	1.90E-09
混凝土屋面	2.76E-08	4.96E-09	8.06E-10
金属屋面	1.79E-06	5.92E-09	2.69E-09
沥青屋面	3.46E-08	4.76E-09	1.11E-09
均值	4.75E-07	5.07E-09	1.63E-09

风险阈值($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$),说明屋面积尘对人体不存在致癌风险.但是金属屋面 Cr 的 CR 值为 $1.79E-06$,已接近致癌风险阈值.当过量 Cr 在人体内累积会导致胃癌与肺癌的发生率显著提高^[10],上述 Cr 的 CR 值表明,对当地居民而言,金属屋面 Cr 的威胁值得关注.

综合重金属非致癌风险与致癌风险分析结果可知,金属屋面积尘中 Pb 和 Cr 对当地居民健康的威胁最大.为使屋面具有金属光泽,屋面表层油漆中常添加可移动态比例很高的 Pb 和 Cr 等重金属^[31],华南地区高频率酸雨、高含量盐分(靠海)等特点加剧了油漆的腐蚀、脱落,并形成细密的屋面积尘,可能威胁居民的健康.在我国经济发展过程中,很多工业区及城中村出现了大量简易的金属屋面建筑,长远来看,其重金属健康风险需要引起足够重视.

综合考虑城市环境中室内灰尘、汽车尾气、道路积尘等因素,附近居民尤其是儿童所面临的健康风险会进一步增高.基于此,必须采取相关控制措施保障当地居民健康,如开展详细的健康调查,尤其是针对儿童,明确 Pb、Cr 危害现状并开展相应治疗;定期进行屋面清洁除尘;合理的建筑选材和城市规划,是解决此类问题的有效途径.

3 结论

(1) 不同材料屋面积尘重金属含量差异较大,金属屋面积尘重金属含量明显高于其他 3 类屋面.对比表明,屋面积尘重金属含量明显高于道路积尘.

(2) 重金属形态分析表明,同一重金属在 4 种屋面积尘中形态分布规律基本相似,不同重金属之间形态分布差异很大.其中,Zn 的酸溶态比例明显高于其他重金属,Pb 和 Cu 主要以可氧化态存在,其余重金属均以较稳定的残渣态为主;屋面积尘重金属可移动态比例表现为 $Pb > Zn > Cu \gg Mn > Co \gg Sr > Sb > Ni > Ba > Cr$.

(3) 环境风险评估表明,4 种屋面积尘 C_f 值均处于 10% ~ 30% 之间,表现为中度活性风险;金属

屋面积尘 RAC 值明显高于其他 3 类屋面,金属屋面积尘重金属在环境中停留时间最短。

(4) 健康风险评估表明,屋面积尘重金属对成人与儿童非致癌风险均表现为: $Pb > Cr > Sb > Zn > Mn > Cu > Ba > Ni > Co > Sr$,其对成人风险均小于限值,不构成威胁,但 Pb 对儿童的风险高于限值,形成威胁;积尘中 Cr,Co 和 Ni 低于致癌风险阈值,对人体无致癌风险。

参考文献:

- [1] Mendez C B, Klenzendorf J B, Afshar B R, *et al.* The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater[J]. *Water Research*, 2011, **45**(5): 2049-2059.
- [2] Li H M, Qian X, Hu W, *et al.* Chemical speciation and human health risk of trace metals in urban street dusts from a metropolitan city, Nanjing, SE China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 212-221.
- [3] Van Metre P C, Mahler B J. The contribution of particles washed from rooftops to contaminant loading to urban streams [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(10): 1727-1741.
- [4] 欧浪波,胡丹,黄晔,等. 北京城区屋面径流中 PAHs 的初期冲刷效应[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2896-2903.
- [5] Jamali M K, Kazi T G, Afridi H I, *et al.* Speciation of heavy metals in untreated domestic wastewater sludge by time saving BCR sequential extraction method[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2007, **42**(5): 649-659.
- [6] 柏建坤,李潮流,康世昌,等. 雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3346-3351.
- [7] 李萍,薛粟尹,王胜利,等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1021-1028.
- [8] 臧飞,王胜利,南忠仁,等. 工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 497-506.
- [9] 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.
- [10] Shi G T, Chen Z L, Bi C J, *et al.* A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(3): 764-771.
- [11] 郭金婷,周俊,胡蓓蓓,等. 天津城市公园灰尘重金属污染健康风险评估[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(2): 415-420.
- [12] Li H W, Chen Z L, Wang J, *et al.* Research of spatial variability of heavy metal pollution of dust in Shanghai urban area based on the GIS[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(5): 803-809.
- [13] Sutherland R A, Tack F M G, Ziegler A D. Road-deposited sediments in an urban environment: A first look at sequentially extracted element loads in grain size fractions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **225-226**: 54-62.
- [14] Valotto G, Quaranta A, Guella G, *et al.* IBIL analysis of road dust samples from San Bernardo tunnel[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, **117**: 459-464.
- [15] 吴绽蕾,周俊,胡蓓蓓,等. 天津公园灰尘与土壤重金属污染特征[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(4): 1030-1037.
- [16] Egodawatta P, Ziyath A M, Goonetilleke A. Characterising metal build-up on urban road surfaces[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **176**: 87-91.
- [17] Hemgren L, Goonetilleke A, Ayoko G A. Analysis of heavy metals in road-deposited sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, **571**(2): 270-278.
- [18] Liu A, Liu L, Li D Z, *et al.* Characterizing heavy metal build-up on urban road surfaces: Implication for stormwater reuse [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **515-516**: 20-29.
- [19] Acosta J A, Faz A, Kalbitz K, *et al.* Partitioning of heavy metals over different chemical fraction in street dust of Murcia (Spain) as a basis for risk assessment [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **144**: 298-305.
- [20] USPEA (United States Environmental Protection Agency). Soil Screening Guidance: Technical Background Document [M]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996. 1-447.
- [21] Kartal Ş, Aydn Z, Tokaltoğlu Ş. Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **132**(1): 80-89.
- [22] Nemati K, Bakar N K A, Abas M R, *et al.* Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**(1): 402-410.
- [23] Quan S X, Yan B, Lei C, *et al.* Distribution of heavy metal pollution in sediments from an acid leaching site of e-waste[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **499**: 349-355.
- [24] 陈秀端,卢新卫,杨光,等. 西安市区表层土壤重金属风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2012, **25**(2): 41-46.
- [25] Duzgoren-Aydn N S, Wong C S C, Aydn A, *et al.* Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, **28**(4): 375-391.
- [26] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [27] Sutherland R A, Tolosa C A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **110**(3): 483-495.
- [28] Feng X D, Dang Z, Huang W L, *et al.* Chemical speciation of fine particle bound trace metals [J]. *International Journal of*

- Environmental Science & Technology, 2009, **6**(3): 337-346.
- [29] 冯素萍, 张玉玲. 降尘中重金属的形态及其在模拟酸雨下的溶出规律[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 40-44.
- [30] Davidson C M, Thomas R P, McVey S E, *et al.* Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments[J]. Analytica Chimica Acta, 1994, **291**(3): 277-286.
- [31] 陈尧根, 谢灵杨. 涂料中重金属元素的危害及检测方法的概述[J]. 福建分析测试, 2005, **14**(3): 2247-2248.
- [32] Zhao S, Feng C H, Wang D X, *et al.* Salinity increases the mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the sediments of Yangtze Estuary: Relative role of sediments' properties and metal speciation[J]. Chemosphere, 2013, **91**(7): 977-984.
- [33] Lingard J J N, Agus E L, Young D T, *et al.* Observations of urban airborne particle number concentrations during rush-hour conditions: analysis of the number based size distributions and modal parameters [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2006, **8**(12): 1203-1218.
- [34] Washam C. Lead challenges China's children[J]. Environmental Health Perspectives, 2002, **110**(10): A567-A568.
-

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2014年9月26日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2013年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2013年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分76.6,排名第一,总被引频次6941,影响因子1.266.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2013年度《环境科学》综合评价总分76.6,在被统计的33种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggyery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行