

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评估

冯于耀¹, 史建武^{1*}, 钟曜谦¹, 韩新宇², 封银川¹, 任亮¹

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为研究有色冶炼工业园区周边道路扬尘中重金属污染特征及其健康风险, 在云南省蒙自地区采集了城市道路、有色冶炼工业园区道路以及隧道尘样品, 通过再悬浮设备将尘样悬浮至 Teflon 滤膜上获得 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 样品, 并利用 ICP-MS 分析了 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 这 8 种重金属的含量。结果表明, 在 PM_{2.5} 中重金属的平均含量高于 PM₁₀。Pb、Cd、As 和 Zn 在 3 种道路扬尘中平均含量最高, 且在不同道路扬尘中平均含量差异表现为: 隧道 > 工业园区道路 > 城市道路。隧道扬尘中 Pb 和 As 的平均含量高于其它重金属, 在 PM_{2.5} 中达到 92 338.3 mg·kg⁻¹ 和 12 457.7 mg·kg⁻¹; 工业园区道路扬尘中 Pb 和 Zn 的平均含量最高, 在 PM_{2.5} 中分别是 4 381.7 mg·kg⁻¹ 和 4 685.0 mg·kg⁻¹; 城市道路平均含量最高的重金属是 Zn 和 Pb, 在 PM_{2.5} 中为 1 952.6 mg·kg⁻¹ 和 1 944.8 mg·kg⁻¹, 3 种道路扬尘中 Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 平均含量均高于云南省土壤背景值。富集因子分析和主成分分析结果显示: Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 在 3 种道路上均有明显富集, 受到有色冶炼工业和交通源的显著影响; 而 Cr、Mn 和 Ni 在 3 种道路上富集不明显, 未受到明显的人为源影响。健康风险评估结果表明, 摄食是主要的暴露途径; 儿童的非致癌风险高于成人。在 PM_{2.5} 道路扬尘中所含有的 As、Cd 和 Pb 都会对成人和儿童造成非致癌风险, 在 PM₁₀ 工业园区道路和隧道扬尘中的 As、Cd 和 Pb 对人体有非致癌风险, 城市道路中的 As 仅对儿童有非致癌风险。此外, 隧道中的 As 具有致癌风险。

关键词: 重金属; 有色冶炼工业; 道路扬尘; 富集因子; 健康风险评估

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3547-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911084

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks

FENG Yu-yao¹, SHI Jian-wu^{1*}, ZHONG Yao-qian¹, HAN Xin-yu², FENG Yin-chuan¹, REN Liang¹

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to explore the pollution characteristics and health risks of heavy metals in dust from roads around non-ferrous smelting activities in different regions, dust samples from urban roads, non-ferrous smelting industry park roads, and tunnel roads were collected from the Mengzi area of Yunnan Province. The dust samples were suspended on Teflon filters by re-suspension equipment to obtain PM_{2.5} and PM₁₀ samples. Eight heavy metals (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb) were analyzed by ICP-MS. The results showed that the average content of the total heavy metals in PM_{2.5} was higher than that in PM₁₀. The average contents of Pb, Cd, As, and Zn were highest in all three types of road dust, and the difference in the total average content in different types of road dust was ranked as: tunnel roads > non-ferrous smelting industrial park roads > urban roads. The average contents of Pb and As in PM_{2.5} from the tunnel road dust were higher than other heavy metals, and reached up to 92 338.3 mg·kg⁻¹ and 12 457.7 mg·kg⁻¹, respectively. The average contents of Pb and Zn in PM_{2.5} from the industrial park road dust were the highest of all heavy metals (4 381.7 mg·kg⁻¹ and 4 685.0 mg·kg⁻¹, respectively). The average content of Zn and Pb in PM_{2.5} were the highest of all the heavy metals in the urban road dust (1 952.6 mg·kg⁻¹ and 1 944.8 mg·kg⁻¹, respectively). The average contents of Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the different types of road dust were all higher than their background values in Yunnan Province. The results of the enrichment factor analysis and principal component analysis indicated that Cu, Zn, As, Cd, and Pb were obviously enriched in all three types of road dust, which were significantly affected by the non-ferrous smelting industry and traffic sources. In contrast, Cr, Mn, and Ni were not obviously enriched in the three types of road dust and were less affected by anthropogenic sources. The results of the health risk assessment testified that ingestion was the main exposure route, and that the children's non-carcinogenic risk was higher than that of adults. In PM_{2.5}, As, Cd, and Pb in all types of road dust were associated with non-carcinogenic risks for adults and children. In PM₁₀, As, Cd, and Pb in dust from the non-ferrous smelting industry park roads and tunnel roads had non-carcinogenic risks for humans. As in PM₁₀ from the urban road dust was associated with a non-carcinogenic risk for children, whereas As in dust from the tunnel roads had carcinogenic risks.

Key words: heavy metals; non-ferrous smelting industry; road dust; enrichment factor; health risk assessment

随着我国经济的迅猛发展, 城市道路建设和工业活动极其活跃, 道路扬尘重金属污染问题逐渐突出, 受到国内外学者的广泛关注^[1-4]。道路扬尘中的重金属物质进入大气环境可引起人体中毒、致癌、贫

收稿日期: 2019-11-11; 修订日期: 2020-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(21667014, 21966016, 21567012)

作者简介: 冯于耀(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染物防治, E-mail: 153163467@qq.com

* 通信作者, E-mail: shijianwu2000@sina.com

血、肺细胞损伤和其他呼吸疾病^[5-7],存在较大的健康风险.由于人类活动强度不同,城市不同区域道路扬尘中重金属含量特征具有较高的空间差异性.目前,对道路扬尘重金属研究主要集中在与人群密切接触的城市道路尘,如孟加拉 Dhaka^[8]、中国苏州^[9]、波兰 Lublin^[10]、中国天津^[11]、中国葫芦岛^[12]和中国黄石^[13]等城市开展的研究工作,重点阐述了城市道路扬尘重金属含量特征、来源及健康风险.但有关有色冶炼等工业活动对不同区域道路扬尘影响的研究成果较少^[14,15],本研究针对蒙自地区道路扬尘中重金属的来源和分布,分析不同区域道路扬尘受铅锌冶炼工业的影响程度以及人群的重金属暴露风险.

蒙自地区位于我国西南高原,是典型的富铅、锌矿产区,冶炼活动十分频繁,排放了大量富含有害重金属的烟尘和矿渣,对周边环境有较大影响^[16].本文选取蒙自地区3种不同类型道路(城市道路、工业园区道路和隧道)扬尘样品,通过再悬浮设备制备PM₁₀和PM_{2.5}样品,分析了铬(Cr)、锰(Mn)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)和铅(Pb)这8种重金属在道路扬尘中的含量、来源及健康风险,以期为保护和改善该地区人群健康提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

本研究依据《防治城市扬尘污染技术规范》(HJ/T 393)于2017年8月采集蒙自地区道路扬尘,采样点分布如图1所示.本研究共采集了3类道路扬尘,包括城市道路尘、有色冶炼工业园区道路尘和隧道尘样品.城市道路尘选择位于蒙自主城区的银河路、凤凰路和锦华路,采样路段均禁止大型矿车和渣土车行驶,距离蒙自工业园区约14 km,距离沙甸工业园区约25 km,每条路各采集3个质量约500 g的样品,共获得9个城市道路尘样品.有色冶炼工业园区道路尘选取位于蒙自工业园区和沙甸工业园区的红河大道和冲哨坡路,园区内主要为有色金属冶炼厂,企业数量多,通行的车辆以大型矿车和渣土车为主,两条工业园区道路均分路段各采集6个样品,共获得12个样品.隧道尘样品选取连接蒙自市和个旧市的主要通道(锡都隧道),该隧道建成后大大缩短了个旧市产矿区到蒙自工业园区的距离,双向总长6.9 km,成为了当地主要的冶炼工业运输交通要道,既有小型车又有运输金属矿的各类货车,隧道样品共采集3个样品.采样前路面干燥且7 d无降雨,用毛刷收集道路积尘,隧道采样点采集隧道道路、紧急

停车带、横洞以及配电柜顶部等长期积累的扬尘.样品采集后带回实验室去除砂石枝叶等杂物,在通风、室温和避光的条件下自然晾干,然后用150目的不锈钢筛进行筛分,通过再悬浮系统将样品采集于Teflon滤膜上,获取PM_{2.5}和PM₁₀样品各24个.本研究采用了南开大学研制的NK-ZXF再悬浮采样器进行采样,每个尘样品的采集时间为1 min,采样流量为20 L·min⁻¹,所用滤膜为直径47 mm的Teflon膜(MK360,瑞典Munktell公司).采样前,将空白滤膜置于烘箱中,在60℃温度下烘2 h,以去除滤膜中杂质和挥发分,减少对称重和分析结果的影响.采样前后滤膜置于温度为(25±1)℃、相对湿度为(30±5)%的恒温恒湿环境中平衡24 h,用精度为1.0×10⁻⁵ g的电子天平称重(EX125ZH,美国OHAUS公司).



图1 蒙自地区道路扬尘采样点示意图

Fig. 1 Sampling points for road dust in the Mengzi area

1.2 样品分析及质量保证与控制

将滤膜样品剪碎放在锥形瓶中,加入去离子水润湿,向其中加入15 mL分析纯的HNO₃和5 mL HClO₄,在电炉上加热,温度控制在100℃以下进行样品消解,当酸剩余约3 mL时,冷却锥形瓶,加入去离子水,过滤残渣并定容至15 mL^[17],然后利用美国安捷伦公司的7500a型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb等重金属.按照每10个样品执行一个重复样品分析,数据结果的相对误差均小于10%.加标回收分析采用空白膜加标准样品进行分析,加标物质为GBW07407(GSS-7),回收率均在90%~110%范围内.空白试验中,每10个样品执行一个方法空白分析,目标重金属物质的空白分析值均低于二倍方法检出限.样品分析最终数据均扣除了空白样品均值.

2 数据分析方法

2.1 富集因子法

富集因子法(EF)自 1974 年由 Zoller 等^[18]提出后被广泛用于识别元素来源,是评价环境中元素污染来源的重要方法和有效指标.富集因子计算公式如下:

$$EF_i = \frac{(C_i/C_n)_{\text{样品}}}{(B_i/B_n)_{\text{背景}}} \tag{1}$$

式中, EF_i 为道路扬尘样品中测量元素 i 的富集因子; C_i 和 C_n 分别是样品中测量元素 i 和参比元素 n 的含量; B_i 和 B_n 分别为土壤背景值中测量元素 i 和参比元素 n 的含量.富集因子分析中,一般选取受人类活动影响小且化学性质比较稳定的 Al、Ti、Fe 和 Si 等元素作为参比元素,其中 Al 的分析精度较高,使用最广泛^[19],因此本研究使用 Al 作为参比元素,背景值选取云南省 A 层(表层)土壤中元素含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).根据富集因子值的大小可将富集程度分成 5 个级别,富集因子的值越大,说明污染程度越高,人类活动对该元素造成的影响越大(如表 1).

2.2 健康风险评价方法

本研究基于美国环保署(EPA)提供的健康风险评估模型对道路扬尘中重金属进行健康风险评估,研究对象分别为儿童和成人两个群体.人体通过摄食、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种途径暴露于道路扬尘中,暴露途径的日均暴露量的计算如公式(2)~

表 1 富集因子分级^[20]

Table 1 Classes of enrichment factors		
污染级别	EF 值	富集程度
I	$EF < 1$	无富集
	$1 \leq EF < 2$	轻微富集
II	$2 \leq EF < 5$	中度富集
III	$5 \leq EF < 20$	显著富集
IV	$20 \leq EF < 40$	强烈富集
V	$EF \geq 40$	极强富集

(4):

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

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

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

目前该模型中致癌风险只有呼吸吸入途径参数,因此本研究只考虑呼吸途径的致癌风险.其终身日均暴露量(LADD)计算如公式(5)所示:

$$LADD = \frac{C \times EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \times ED_{\text{child}}}{BW_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \times ED_{\text{adult}}}{BW_{\text{adult}}} \right) \tag{5}$$

式中, D_{ing} 、 D_{inh} 和 D_{dermal} 分别表示摄食、呼吸吸入和皮肤接触的日均暴露量 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; C 表示重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.参数及含义如表 2 所示.

表 2 重金属暴露量参数^[21]

Table 2 Exposure parameters of heavy metals				
参数	单位	含义	儿童取值	成人取值
ED	a	暴露年限	6	24
BW	kg	平均体重	15	70
EF	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	暴露频率	180	180
AT(非致癌)	d	平均作用时间	$365 \times \text{ED}$	$365 \times \text{ED}$
AT(致癌)	d	平均作用时间	365×70	365×70
IngR	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	摄食灰尘量	200	100
InhR	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	呼吸摄入量	5	20
PEF	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	颗粒物排放因子	1.32×10^9	1.32×10^9
SL	$\text{mg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{d})^{-1}$	皮肤附着因子	0.2	0.7
SA	cm^2	暴露的皮肤面积	2 800	5 700
ABS	/	吸入因子	0.001	0.001

根据有无致癌性将污染物分为致癌物和非致癌物,本研究中 Mn、Cu、Zn 和 Pb 属于非致癌物;Cr、Ni、Cd 和 As 属于致癌物.重金属的非致癌风险商(HQ)、非致癌总风险(HI)和致癌风险(R)计算公式如下:

$$HI = \sum HQ_i = \sum \frac{D}{RFD} \tag{6}$$

$$R = LADD \times SF \tag{7}$$

式中,RFD 为各重金属的参考剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$;SF 为致癌斜率因子, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,具体参数如表 3 所示.若 HI 小于 1,则表示非致癌风险较小或可以忽略;若 HI 大于或等于 1,则表示存在非致癌风险,且风险随着 HI 值的增大而加强; R 代表重金属的致癌风险,当 R 介于 $1.00\text{E}-6 \sim 1.00\text{E}-4$ 时,则需

表 3 重金属参考剂量和致癌斜率因子¹⁾/mg·(kg·d)⁻¹

Table 3 Reference doses and slope factors of heavy metals/mg·(kg·d)⁻¹

重金属	RFD			SF (致癌斜率因子)
	摄食	呼吸吸入	皮肤接触	
Cr	3.00E-03	2.86E-05	6.00E-05	42
Mn	4.66E-02	1.43E-05	1.84E-03	—
Ni	2.00E-02	2.00E-02	5.40E-03	0.84
Cu	3.70E-02	4.00E-02	1.20E-02	—
Zn	3.10E-01	3.00E-01	6.00E-02	—
As	3.00E-04	3.00E-04	1.23E-04	15.1
Cd	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-05	6.4
Pb	3.50E-03	3.50E-03	5.25E-04	—

1) “—”表示没有相关数据

要进行风险管理.

3 结果与讨论

3.1 重金属污染特征

3.1.1 重金属含量水平特征

如表 4 所示,给出了蒙自地区的城市道路、工业园区道路和隧道尘中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的重金属含量统计数据,Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 含量的变化范围分别为 14.0 ~ 78.4、115.4 ~ 331.9、5.1 ~ 21.4、60.7 ~ 288.9、578.4 ~ 5 054.7、85.1 ~ 12 457.7、89.2 ~ 2 587.1 和 407.1 ~ 92 338.3 mg·kg⁻¹,平均值分别为 38.4、184.3、10.1、125.5、2 732.4、3 902.7、882.0 和 25 724.9 mg·kg⁻¹,表现为 Pb > As > Zn > Cd > Mn > Cu > Cr > Ni. PM_{2.5} 中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 平均含量分别为 48.0、242.6、13.5、166.8、3 897.4、4 488.4、1 078.9 和 32 888.3 mg·kg⁻¹,分别是 PM₁₀ 中这 8 种重金属的 1.7、1.9、2.0、2.0、2.5、1.4、1.6 和 1.8 倍,表现出重金属易于富集在细颗粒物的特性.除 Mn、Cr 和 Ni

外,Pb、As、Zn、Cd 和 Cu 的含量水平分别高于云南省土壤背景值的 633.6、212.1、30.5、4 045.6 和 2.7 倍,且 Pb、As、Zn、Cd 和 Cu 的含量水平远高于中国苏州、中国天津(Cu 除外)、中国葫芦岛(Zn 和 Cu 除外)、中国黄石(Cu 除外)、孟加拉 Dhaka 和波兰 Lublin 等国内外研究城市,表明该地区道路尘中 Pb、As、Zn、Cd 和 Cu 受到人为活动的影响严重,可能与本地区密集的有色冶炼工业活动有关.

3.1.2 重金属空间分布特征

从表 4 可知,蒙自地区 3 种类型道路尘(城市道路、工业园区道路和隧道)中重金属含量有较大差异,这与道路尘重金属的来源及人类活动的强度、方式等因素有关^[22].本研究中 Pb、As、Zn、Cd 和 Cu 等重金属在工业园区道路尘中含量分别是城市道路尘(PM_{2.5}/PM₁₀)的 2.3/4.5、2.3/2.2、2.4/2.0、1.9/2.6 和 2.2 倍/1.4 倍,且城市道路尘中 Pb、As、Zn、Cd 和 Cu 等重金属含量相比中国苏州、孟加拉 Dhaka 和波兰 Lublin 等国内外研究城市,也处于最高含量水平.这与本研究工业园区中大量铅、锌等有色冶炼工业活动排放重金属密切相关.

Pb、As、Zn 和 Cd 在隧道尘中的含量明显高于城市道路和工业园区道路尘,尤其是隧道 PM_{2.5} 中 Pb 含量达到 92 338.3 mg·kg⁻¹,PM₁₀ 中 Pb 含量达到 53 441.3 mg·kg⁻¹,含量远超过中国苏州、中国天津、中国葫芦岛、中国黄石、孟加拉 Dhaka 和波兰 Lublin 等国内外研究城市,而隧道中 Cu 及 Cr、Mn 和 Ni 等重金属含量相比则处于最低水平.这 8 种重金属两种极端含量水平差异,一方面受密集铅、锌矿石渣车等常年洒落在隧道内积累,形成高含量的 Pb、As、Zn 和 Cd 特征;另一方面,密闭的隧道也阻隔了土壤尘的沉积,导致 Cu、Cr、Mn 和 Ni 低含量特征.

表 4 不同城市道路扬尘中重金属含量比较¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 4 Comparison of heavy metals contents in road dust among different cities/mg·kg⁻¹

研究城市		Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
蒙自地区	城市道路	50.6	280.4	12.7	130.0	1 952.6	305.2	227.5	1 944.8
	PM _{2.5} 工业园区道路	78.4	331.9	21.4	288.9	4 685.0	702.3	422.2	4 381.7
	隧道	15.1	115.4	6.4	81.6	5 054.7	12 457.7	2 587.1	92 338.3
	城市道路	41.6	117.3	7.5	80.6	578.4	85.1	89.2	407.1
	PM ₁₀ 工业园区道路	30.5	139.1	7.3	110.9	1 147.7	189.6	228.9	1 836.0
	隧道	14.0	121.5	5.1	60.7	2 975.7	9 676.1	1 736.8	53 441.3
其他地区	孟加拉 Dhaka 市 ^[8]	144.3	261.5	37.0	49.7	239.2	8.1	11.6	19.0
	中国苏州市 ^[9]	112.9	410.3	—	27.5	225.3	—	—	45.2
	波兰 Lublin 市 ^[10]	86.4	—	—	81.6	241.1	—	5.1	44.1
	中国天津市 ^[11]	—	630.0	82.0	626.0	811.0	—	2.4	131.0
	中国葫芦岛市 ^[12]	—	—	—	264.0	5 271.0	—	72.84	533.0
	中国黄石市 ^[13]	216.3	—	—	3 564.2	1 054.4	—	37.4	662.9
中国云南土壤背景值 ^[23]		65.2	626.0	42.5	46.3	89.7	18.4	0.218	40.6

1) “—”表示没有相关数据

3.2 重金属来源分析

3.2.1 富集因子法

图2给出了3种道路尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中重金属的富集因子值对比。可以看出,在 $PM_{2.5}$ 上重金属的富集程度总体大于 PM_{10} ,颗粒物的粒径越小,重金属富集因子越高,表明细颗粒物更易受到人为源的影响^[20]; $PM_{2.5}$ 中Cr、Mn和Ni在3种道路扬尘中的富集因子均小于1(Cr在工业园区道路扬尘中小于2),说明这3种重金属主要来自于土壤源^[24,25]; Cu在 $PM_{2.5}$ 中的富集因子处于2~10之间,受到一定的人为源影响;城市道路扬尘中的Zn、As和Pb富集因子在5~40之间,受到明显的人为干扰;隧道和工业园区道路扬尘中的Zn、As、Cd和Pb达到强烈富集及以上等级,人类活动对其造成强烈的影响。

在 PM_{10} 中Cr、Mn和Ni均无富集,说明该重金属来自于地壳物质;3种道路扬尘中的Cu的富集因子在1~2之间,表明其受到轻微的人为源影响;Zn、As以及Pb在城市道路和工业园区道路扬尘中的富集程度介于中度富集和显著富集之间,在隧道扬尘中则属于极强富集;Cd在3种道路中的富集因子均大于40,代表该元素受人为污染极其严重。蒙自地区以铅锌冶炼工业为主,筛选后的矿石、砂石以及矿渣中仍然含有大量的Zn、As、Cd和Pb等重金属,砂石废料在运输过程中存在掉落的情况,同时冶炼过程中产生的粉尘沉降到道路,导致重金属大量富集在工业园区道路扬尘中。道路所在区域不同,重金属的富集因子也有明显的差别,工业园区道路和城市道路相比,受到有色金属冶炼活动的影响更为显著。

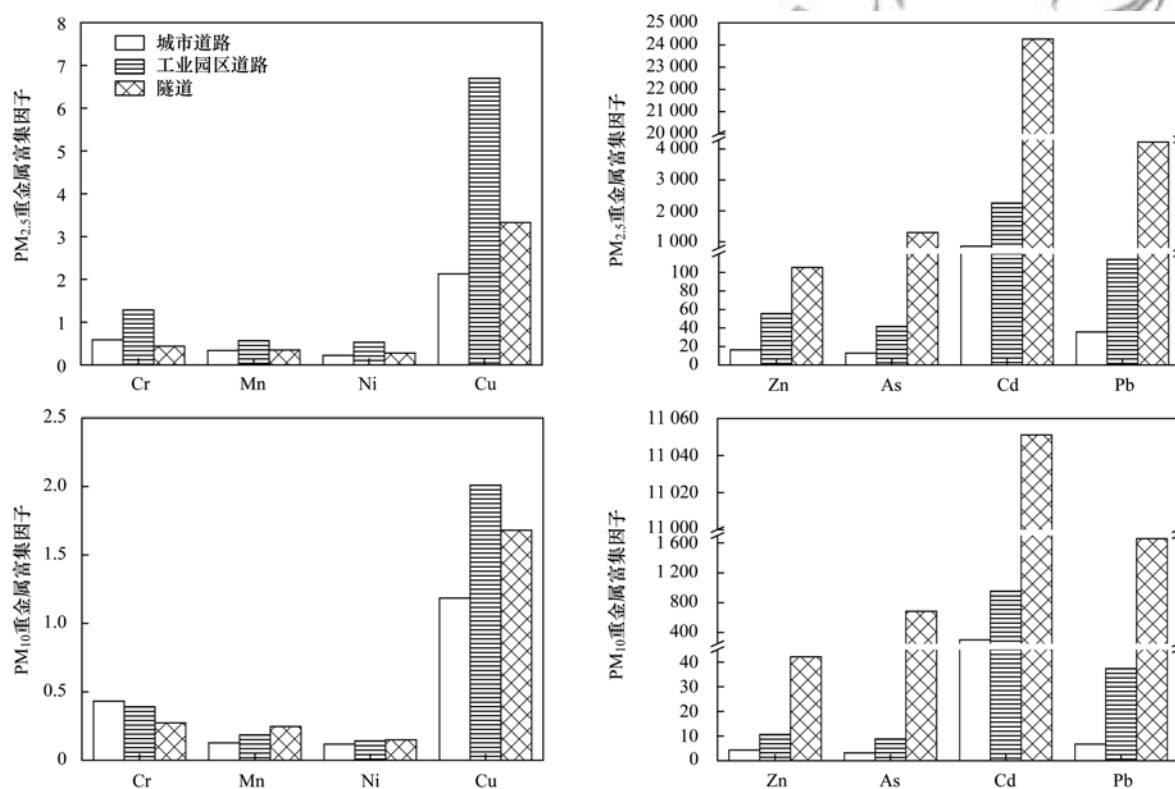


图2 3种道路扬尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中重金属富集因子

Fig. 2 Enrichment factors of heavy metals in $PM_{2.5}$ and PM_{10} from three types of road dust

3.2.2 主成分分析

为了进一步分析道路扬尘中重金属的来源,本研究利用主成分分析进行重金属来源识别。主成分分析是利用降维的思想,压缩变量维数,分析多个变量之间的关系,将几个密切的变量归为同一类,同一类变量为一个因子,达到用较少的几个因子反映大量原始数据信息的目的^[26]。将3种道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 载带的重金属通过软件SPSS 24.0进行主成分分析,正交旋转后得到成分矩阵(见表5),

$PM_{2.5}$ 解析获得2个主要成分,累积解释方差为95.55%。因子1解释方差为53.17%,负载系数较高的重金属为Cr、Mn、Ni、Cu和Zn,因Cr、Mn和Ni的富集因子小,主要受土壤源的影响,Cu作为刹车片磨损的标识元素,Zn不仅作为轮胎磨损的标识元素,也存在于机动车排放的尾气中^[27~29],因此因子1代表土壤源和交通源;因子2解释方差为42.38%,Zn、As、Cd和Pb的系数较高,富集因子均表现为强烈富集,主要受到有色金属冶炼影

响^[13,14,26,29]. PM_{10} 累积解释方差达到 86.64%, 因子 1 解释方差为 48.40%, Zn、As、Cd 和 Pb 的负载系数高, 受人为源影响显著, 代表冶金源. 因子 2 解释方差为 38.24%, 负载因子以 Cr、Mn、Ni 和 Cu 为主, 代表土壤源.

表 5 3 种道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中重金属主成分分析¹⁾

Table 5 Principal component analysis of heavy metals in $PM_{2.5}$ and PM_{10} of three types of road dust

重金属	$PM_{2.5}$		PM_{10}	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
Cr	0.893	-0.308	-0.145	0.916
Mn	0.989	-0.010	0.016	0.687
Ni	0.974	-0.191	-0.084	0.871
Cu	0.964	-0.118	0.031	0.923
Zn	0.711	0.649	0.957	0.277
As	-0.239	0.959	0.981	-0.170
Cd	-0.053	0.969	0.994	-0.101
Pb	-0.180	0.983	0.998	-0.146
解释方差/%	53.17	42.38	48.40	38.24
累计方差/%	53.17	95.55	48.40	86.64
来源	土壤源和交通源		冶金源	土壤源

1) 黑体字表示高于 0.650 的值

3.3 健康风险评价

3.3.1 非致癌风险评价

通过计算道路扬尘中重金属非致癌风险值得到

表 6 和表 7. 可知, $PM_{2.5}$ 中重金属的非致癌风险大于 PM_{10} , 由于 $PM_{2.5}$ 比表面积大, 更易富集重金属, 因此表现出更高的非致癌风险^[7]. 儿童更易通过摄食途径摄入大量灰尘, 从而受到重金属的危害, 因此重金属对该群体造成的影响更大^[30]; 摄食是道路扬尘中重金属对人体造成影响的最主要途径, 而呼吸吸入途径的非致癌风险最低, 这一结果和其他学者的研究结论一致^[31~33]. 在 3 种道路 $PM_{2.5}$ 中, As、Cd 和 Pb 的非致癌风险值均大于 $1.00E+00$, 表明 3 种重金属对儿童和成人都具有非致癌风险. 在 PM_{10} 中, 工业园区道路和隧道扬尘中 As、Cd 和 Pb 对两个群体具有非致癌风险, 此外城市道路扬尘中的 As 对儿童的非致癌风险值达到 $1.88E+00$, 表现出明显的非致癌风险. 两种粒径中的 As、Cd 和 Pb 在不同区域道路中非致癌风险值大小为: 隧道 > 工业园区道路 > 城市道路, 且 As 的非致癌风险值远高于其它重金属, 在隧道中最高为 $2.75E+02$, 高于阈值两个量级. 隧道中有较多的运矿车和渣土车通行, 掉落在隧道内的石渣由于隧道本身相对封闭的条件, 且没有进行清洁处理, 导致 3 种重金属在隧道扬尘中不断累积, 重金属含量高于其它道路扬尘, 从而造成隧道扬尘中重金属的非致癌风险最大; 工业园区道路上

表 6 $PM_{2.5}$ 中重金属非致癌风险

Table 6 Non-carcinogenic risk of heavy metals in $PM_{2.5}$

	类型	项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
儿童	城市道路	HQ _{ing}	1.11E-01	3.96E-02	4.17E-03	2.31E-02	4.14E-02	6.69E+00	1.50E+00	3.65E+00
		HQ _{inh}	2.14E-04	2.37E-03	7.66E-08	3.93E-07	7.87E-07	1.19E-04	2.75E-05	6.72E-05
		HQ _{dermal}	1.55E-02	2.81E-03	4.32E-05	1.99E-04	5.99E-04	4.57E-02	4.19E-01	6.82E-02
		HI	1.27E-01	4.47E-02	4.21E-03	2.33E-02	4.20E-02	6.73E+00	1.91E+00	3.72E+00
	工业园区道路	HQ _{ing}	1.72E-01	4.68E-02	7.02E-03	5.13E-02	9.94E-02	1.54E+01	2.78E+00	8.23E+00
		HQ _{inh}	3.31E-04	2.81E-03	1.29E-07	8.73E-07	1.89E-06	2.74E-04	5.10E-05	1.51E-04
		HQ _{dermal}	2.40E-02	3.32E-03	7.28E-05	4.43E-04	1.44E-03	1.05E-01	7.77E-01	1.54E-01
		HI	1.96E-01	5.30E-02	7.10E-03	5.18E-02	1.01E-01	1.55E+01	3.55E+00	8.39E+00
	隧道	HQ _{ing}	3.31E-02	1.63E-02	2.09E-03	1.45E-02	1.07E-01	2.73E+02	1.70E+01	1.73E+02
		HQ _{inh}	6.39E-05	9.76E-04	3.85E-08	2.47E-07	2.04E-06	4.86E-03	3.13E-04	3.19E-03
		HQ _{dermal}	4.64E-03	1.15E-03	2.17E-05	1.25E-04	1.55E-03	1.86E+00	4.76E+00	3.24E+00
		HI	3.79E-02	1.84E-02	2.12E-03	1.46E-02	1.09E-01	2.75E+02	2.18E+01	1.77E+02
成人	城市道路	HQ _{ing}	5.55E-02	1.98E-02	2.08E-03	1.16E-02	2.07E-02	3.34E+00	7.48E-01	1.83E+00
		HQ _{inh}	1.83E-04	2.03E-03	6.57E-08	3.37E-07	6.74E-07	1.02E-04	2.36E-05	5.76E-05
		HQ _{dermal}	2.37E-02	4.28E-03	6.60E-05	3.05E-04	9.15E-04	6.97E-02	6.39E-01	1.04E-01
		HI	7.94E-02	2.61E-02	2.15E-03	1.19E-02	2.16E-02	3.41E+00	1.39E+00	1.93E+00
	工业园区道路	HQ _{ing}	8.59E-02	2.34E-02	3.51E-03	2.57E-02	4.97E-02	7.70E+00	1.39E+00	4.12E+00
		HQ _{inh}	2.84E-04	2.40E-03	1.11E-07	7.48E-07	1.62E-06	2.35E-04	4.37E-05	1.30E-04
		HQ _{dermal}	3.67E-02	5.07E-03	1.11E-04	6.77E-04	2.19E-03	1.60E-01	1.19E+00	2.35E-01
		HI	1.23E-01	3.09E-02	3.62E-03	2.63E-02	5.19E-02	7.86E+00	2.57E+00	4.35E+00
	隧道	HQ _{ing}	1.66E-02	8.14E-03	1.05E-03	7.25E-03	5.36E-02	1.37E+02	8.51E+00	8.67E+01
		HQ _{inh}	5.48E-05	8.36E-04	3.30E-08	2.11E-07	1.75E-06	4.16E-03	2.68E-04	2.73E-03
		HQ _{dermal}	7.09E-03	1.76E-03	3.31E-05	1.91E-04	2.37E-03	2.85E+00	7.27E+00	4.94E+00
		HI	2.37E-02	1.07E-02	1.08E-03	7.44E-03	5.60E-02	1.39E+02	1.58E+01	9.17E+01

表 7 PM_{10} 中重金属非致癌风险
Table 7 Non-carcinogenic risk of heavy metals in PM_{10}

	类型	项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
儿童	城市道路	HQ _{ing}	9.11E-02	1.66E-02	2.45E-03	1.43E-02	1.23E-02	1.87E+00	5.86E-01	7.65E-01
		HQ _{inh}	2.86E-05	1.43E-05	2.00E-02	4.00E-02	3.00E-01	3.32E-05	1.00E-03	3.50E-03
		HQ _{dermal}	1.27E-02	1.17E-03	2.54E-05	1.24E-04	1.77E-04	1.27E-02	1.64E-01	1.43E-02
		HI	1.04E-01	1.77E-02	2.25E-02	5.45E-02	3.12E-01	1.88E+00	7.51E-01	7.83E-01
	工业园区道路	HQ _{ing}	6.68E-02	1.96E-02	2.40E-03	1.97E-02	2.43E-02	4.16E+00	1.51E+00	3.45E+00
		HQ _{inh}	1.29E-04	1.18E-03	4.41E-08	3.35E-07	4.62E-07	7.39E-05	2.77E-05	6.34E-05
		HQ _{dermal}	9.35E-03	1.39E-03	2.49E-05	1.70E-04	3.52E-04	2.84E-02	4.21E-01	6.44E-02
		HI	7.62E-02	2.22E-02	2.43E-03	1.99E-02	2.47E-02	4.18E+00	1.93E+00	3.51E+00
	隧道	HQ _{ing}	3.06E-02	1.71E-02	1.66E-03	1.08E-02	6.31E-02	2.12E+02	1.14E+01	1.00E+02
		HQ _{inh}	5.90E-05	1.03E-03	3.06E-08	1.84E-07	1.20E-06	3.77E-03	2.10E-04	1.85E-03
		HQ _{dermal}	4.29E-03	1.22E-03	1.73E-05	9.32E-05	9.13E-04	1.45E+00	3.20E+00	1.87E+00
		HI	3.50E-02	1.94E-02	1.68E-03	1.09E-02	6.40E-02	2.14E+02	1.46E+01	1.02E+02
成人	城市道路	HQ _{ing}	4.55E-02	8.28E-03	1.22E-03	7.16E-03	6.13E-03	9.33E-01	2.93E-01	3.82E-01
		HQ _{inh}	1.51E-04	8.50E-04	3.86E-08	2.09E-07	2.00E-07	2.84E-05	9.24E-06	1.21E-05
		HQ _{dermal}	1.95E-02	1.79E-03	3.88E-05	1.89E-04	2.71E-04	1.94E-02	2.51E-01	2.18E-02
		HI	6.52E-02	1.09E-02	1.26E-03	7.35E-03	6.41E-03	9.52E-01	5.44E-01	4.04E-01
	工业园区道路	HQ _{ing}	3.34E-02	9.81E-03	1.20E-03	9.85E-03	1.22E-02	2.08E+00	7.53E-01	1.72E+00
		HQ _{inh}	1.10E-04	1.01E-03	3.78E-08	2.87E-07	3.96E-07	6.34E-05	2.37E-05	5.43E-05
		HQ _{dermal}	1.43E-02	2.12E-03	3.80E-05	2.60E-04	5.38E-04	4.33E-02	6.44E-01	9.83E-02
		HI	4.78E-02	1.29E-02	1.24E-03	1.01E-02	1.27E-02	2.12E+00	1.40E+00	1.82E+00
	隧道	HQ _{ing}	1.53E-02	8.57E-03	8.32E-04	5.40E-03	3.16E-02	1.06E+02	5.71E+00	5.02E+01
		HQ _{inh}	5.06E-05	8.80E-04	2.62E-08	1.57E-07	1.03E-06	3.23E-03	1.80E-04	1.58E-03
		HQ _{dermal}	6.54E-03	1.86E-03	2.63E-05	1.42E-04	1.39E-03	2.21E+00	4.88E+00	2.86E+00
		HI	2.19E-02	1.13E-02	8.58E-04	5.54E-03	3.30E-02	1.08E+02	1.06E+01	5.31E+01

由于运输掉落的矿渣在雨水冲刷下流失,导致重金属含量低于隧道,因此风险值较低;城市道路由于禁止运输矿石、矿渣的车辆进入,道路扬尘中重金属含量最小,风险值最低.此外,Cr、Mn、Cu 和 Zn 的非致癌风险值都大于 $1E-02$,虽然未达到非致癌风险,但不能忽视其长期暴露的影响^[34].

3.3.2 致癌风险评价

通过暴露量和致癌斜率因子计算得到的重金属(Cr、Ni、As 和 Cd)致癌风险值如表 8 所示.

可知, $PM_{2.5}$ 中 Cr、Ni、As 和 Cd 的致癌风险总体上大于 PM_{10} ,表明细颗粒物更具有致癌风险.在隧道扬尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的 As 致癌风险值均大于 $1.00E-06$,分别达到 $8.63E-06$ 和 $6.70E-06$,表现出对人体较高的致癌风险,远高于工业园区道路和城市道路中 As 的致癌风险.工业园区道路和城市道路扬尘中 Cr、Ni、As 和 Cd 的致癌风险值在 $2.81E-10 \sim 4.87E-07$ 范围内变化,致癌风险较低.

表 8 3 种道路扬尘中重金属致癌风险
Table 8 Carcinogenic risk of heavy metals in three types of road dust

粒径	道路类型	Cr	Ni	As	Cd
$PM_{2.5}$	城市道路	9.75E-08	4.89E-10	2.11E-07	6.68E-08
	工业园区道路	1.51E-07	8.23E-10	4.87E-07	1.24E-07
	隧道	2.91E-08	2.45E-10	8.63E-06	7.60E-07
PM_{10}	城市道路	8.01E-08	2.87E-10	5.90E-08	2.62E-08
	工业园区道路	5.87E-08	2.81E-10	1.31E-07	6.72E-08
	隧道	2.69E-08	1.95E-10	6.70E-06	5.10E-07

4 结论

(1)蒙自地区 3 种道路扬尘中 Pb、As、Zn、Cd 和 Cu 的含量远高于国内外其他研究城市,且隧道扬尘中重金属的含量明显高于城市道路和工业园区道路

尘,展现出较强的重金属累积特性.

(2)富集因子表明,3 种道路扬尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Pb、Cd、As 和 Zn 达到显著富集及以上等级,Cu 为中度富集.结合主成分分析结果可知,该地区道路扬尘重金属受到有色金属冶炼源影响程度达

42. 38%~48.40%

(3) 风险评价结果表明, 3 种道路扬尘中的 Pb、Cd 和 As 具有非致癌风险且在隧道扬尘中的风险最高, 其次是工业园区道路和城市道路扬尘. 隧道扬尘中的 As 是该地区道路主要的致癌风险源, 需引起重视.

参考文献:

- [1] Hou S N, Zheng N, Tang L, *et al.* Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018[J]. *Environment International*, 2019, **128**: 430-437.
- [2] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [3] Cai K, Li C. Street dust heavy metal pollution source apportionment and sustainable management in a typical city—Shijiazhuang, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(14): 2625.
- [4] Eqani S A M A S, Kanwal A, Bhowmik A K, *et al.* Spatial distribution of dust-bound trace elements in Pakistan and their implications for human exposure[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 213-222.
- [5] Men C, Liu R M, Xu L B, *et al.* Source-specific ecological risk analysis and critical source identification of heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121763.
- [6] Kim J A, Park J H, Hwang W J. Heavy metal distribution in street dust from traditional markets and the human health implications[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13**(8): 820.
- [7] Zheng L G, Tang Q, Fan J M, *et al.* Distribution and health risk assessment of mercury in urban street dust from coal energy dominant Huainan city, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(12): 9316-9322.
- [8] Rahman M S, Khan M D H, Jolly Y N, *et al.* Assessing risk to human health for heavy metal contamination through street dust in the southeast Asian megacity: Dhaka, Bangladesh[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1610-1622.
- [9] Lin M N, Gui H R, Wang Y, *et al.* Pollution characteristics, source apportionment, and health risk of heavy metals in street dust of Suzhou, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(2): 1987-1998.
- [10] Zgłobicki W, Telecka M, Skupiński S, *et al.* Assessment of heavy metal contamination levels of street dust in the city of Lublin, E Poland[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(23): 774.
- [11] 张静, 张衍杰, 方小珍, 等. 道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4071-4076.
- [12] Zhang J, Zhang Y J, Fang X Z, *et al.* Characteristics and health risk assessment of metallic elements in PM_{2.5} fraction of road dust[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4071-4076.
- [13] 徐俊, 宋佳, 刘英, 等. 不同 pH 条件下有色冶炼厂周边道路扬尘及土壤中重金属释放特征[J]. *湖北理工学院学报*, 2018, **34**(2): 19-23.
- [14] Xu J, Song J, Liu Y, *et al.* Release characteristics of heavy metal in road dust and soil around non-ferrous smelters under different pH conditions[J]. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2018, **34**(2): 19-23.
- [15] 钟萍, 张家泉, 占长林, 等. 华中冶金工业走廊表层土壤、道路尘重金属污染特征及健康风险[J]. *环境化学*, 2019, **38**(1): 87-96.
- [16] Zhong P, Zhang J Q, Zhan C L, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risks of topsoil and road dust in central China metallurgical industry corridor[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(1): 87-96.
- [17] Wu T T, Bi X Y, Li Z G, *et al.* Contaminations, sources, and health risks of trace metal(loid)s in street dust of a small city impacted by artisanal Zn smelting activities[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(9): 961.
- [18] Shabbaj I I, Alghamdi M A, Shamy M, *et al.* Risk assessment and implication of human exposure to road dust heavy metals in Jeddah, Saudi Arabia[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(1): 36.
- [19] 王燕, 彭林, 李丽娟, 等. 晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 82-87.
- [20] Wang Y, Peng L, Li L J, *et al.* Chemical compositions and sources apportionment of re-suspended dust in Jincheng[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 82-87.
- [21] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. *Science*, 1974, **183**(4121): 198-200.
- [22] 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 990-996.
- [23] Wang S B, Ji Y Q, Li S L, *et al.* Characteristics of elements in PM_{2.5} and PM₁₀ in road dust fall during spring in Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 990-996.
- [24] 胡月琪, 郭建辉, 张超, 等. 北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3924-3934.
- [25] Hu Y Q, Guo J H, Zhang C, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in road dust in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3924-3934.
- [26] Musa A A, Hamza S M, Kidak R. Street dust heavy metal pollution implication on human health in Nicosia, North Cyprus[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(28): 28993-29002.
- [27] 王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2470-2476.
- [28] Wang L J, Lu X W, Lei K, *et al.* Content, source and speciation of heavy metal elements of street dusts in Baoji city[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2470-2476.
- [29] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [30] 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.
- [31] Bian B, Lin C, Wu H S. Contamination and risk assessment of metals in road-deposited sediments in a medium-sized city of China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **112**: 87-95.

- [26] 刘威杰, 石明明, 程铖, 等. 夏季大气 $PM_{2.5}$ 中元素特征及源解析: 以华中地区平顶山-随州-武汉为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 23-30.
Liu W J, Shi M M, Cheng C, *et al.* Characteristics and sources of elements in $PM_{2.5}$ during summer for three typical cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, central China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 23-30.
- [27] 张启钧, 吴琳, 张衍杰, 等. 隧道环境 $PM_{2.5}$ 载带重金属污染特征与健康风险[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(12): 4706-4712.
Zhang Q J, Wu L, Zhang Y J, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metal in $PM_{2.5}$ in tunnel environment [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(12): 4706-4712.
- [28] Guven E D. Heavy metal contamination in street dusts and soils under different land uses in a major river basin in an urbanized zone of Aegean region, Turkey [J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2019, **17**(2): 917-930.
- [29] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1799-1806.
- [30] Zhang M, Li X P, Yang R, *et al.* Multipotential toxic metals accumulated in urban soil and street dust from Xining City, NW China: spatial occurrences, sources, and health risks [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2019, **76**(2): 308-330.
- [31] Yang S C, Li P, Liu J L, *et al.* Profiles, source identification and health risks of potentially toxic metals in pyrotechnic-related road dust during Chinese New Year [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **184**: 109604.
- [32] 段恒铁, 吴亚涛, 王珏, 等. 北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3060-3065.
Duan H Y, Wu Y T, Wang J, *et al.* Concentrations and health risks of toxic metals in surface dust in kindergartens of Beijing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 3060-3065.
- [33] Zhang J, Wu L, Zhang Y J, *et al.* Elemental composition and risk assessment of heavy metals in the PM_{10} fractions of road dust and roadside soil[J]. Particology, 2019, **44**: 146-152.
- [34] 程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 等. 城市生活垃圾露天焚烧排放 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及其暴露健康风险[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4337-4344.
Cheng K, Ji W W, Hao W W, *et al.* Characteristics of heavy metal pollutants of $PM_{2.5}$ from open burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the associated exposure health risks [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4337-4344.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebirur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LIU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)