

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II)和 Ni(II)的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

云南5城市道路扬尘PM_{2.5}中重金属含量表征及健康风险

韩新宇¹, 郭晋源¹, 史建武^{2*}, 李定霜¹, 王怡明², 宁平²

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

摘要: 为研究云南城市道路扬尘PM_{2.5}中重金属含量、来源和其健康风险, 分别在昆明、保山、文山、昭通和玉溪这5个典型城市区域采集道路扬尘样品, 使用颗粒物再悬浮技术将尘样悬浮并采集PM_{2.5}, 利用ICP-MS检测PM_{2.5}中铬(Cr)、锰(Mn)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)和铅(Pb)等8种重金属。结果表明, 5城市道路扬尘Cr、Ni、Cu、Zn和Pb含量均严重超过云南土壤背景值; 富集因子表明, 云南5城市道路扬尘PM_{2.5}中重金属多数表现为中度富集和强烈富集, 受人为活动影响较大。相关性分析和主成分分析结果表明, 云南省不同类型城市道路扬尘PM_{2.5}中重金属均受土壤源和交通源影响; 其余来源差异性较大: 昆明受钢铁冶炼源影响、保山和玉溪受有色金属冶炼源影响、昭通受燃煤源影响。健康风险分析表明: 昆明、玉溪和昭通的道路扬尘PM_{2.5}中Cr、Pb和As存在儿童非致癌风险, 昆明市的Cr还存在终身致癌风险。

关键词: 道路扬尘; 重金属; 云南; 健康风险; PM_{2.5}

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3463-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202207173

Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM_{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province

HAN Xin-yu¹, GUO Jin-yuan¹, SHI Jian-wu^{2*}, LI Ding-shuang¹, WANG Yi-ming², NING Ping²

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

Abstract: In order to study the contents, sources, and health risk of PM_{2.5} in road fugitive dust in Yunnan, road fugitive dust samples were collected from five typical cities including Kunming, Baoshan, Wenshan, Zhaotong, and Yuxi. Particulate matter resuspension technology was used to levitate the dust samples and collect PM_{2.5}. Eight heavy metals including chromium (Cr), manganese (Mn), nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), selenium (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) in PM_{2.5} were detected using ICP-MS. The results showed that the contents of Cr, Ni, Cu, Zn, and Pb in road fugitive dust seriously exceeded the background values of Yunnan soil. The enrichment factors showed that most of the heavy metals in PM_{2.5} of road fugitive dust in the five cities of Yunnan were moderately enriched and strongly enriched, which were greatly influenced by human activities. The results of correlation analysis and principal component analysis showed that the heavy metals in PM_{2.5} of road fugitive dust in Yunnan were all affected by soil and traffic sources. The other sources varied greatly in different cities: Kunming was affected by iron and steel melting sources, Baoshan and Yuxi were affected by non-ferrous metal smelting sources, and Zhaotong was affected by coal sources. Health risk analysis showed that Cr, Pb, and As in road fugitive dust PM_{2.5} had non-carcinogenic risk in children in Kunming, Yuxi, and Zhaotong, respectively, and Cr in Kunming also had a lifetime carcinogenic risk.

Key words: road fugitive dust; heavy metals; Yunnan; health risk; PM_{2.5}

扬尘是大气颗粒物的重要来源之一^[1-3]。随着中国经济的迅速发展, 工业活动和城市道路建设较为活跃, 道路扬尘污染问题逐渐凸显^[4-7]。道路扬尘作为道路环境向大气环境迁移的媒介之一, 存在多种有害物质, 是人类健康危害的潜在来源。在道路扬尘相关的各种污染物中, 重金属由于具有不可生物降解的性质和较长的停留期在城市地区受到广泛关注^[8]。在起尘过程中, 重金属往往是一种高于本底浓度的迁移过程^[9,10], 道路扬尘也通过扩散和沉积, 逐渐成为城市生态系统中重金属污染物的源^[11-13]。扬尘中的重金属可通过多种途径进入人体, 长期接触重金属的人群易引发贫血、中毒、癌症、肺细胞损伤和其他呼吸疾病^[14-16], 存在较大的健康风险。目前, 道路扬尘重金属研究主要集中在与人群密切接触的城市^[17], 如中国苏州^[18]、中国东营^[19]、中

国天津^[20]、波兰 Lublin^[21]和孟加拉 Dhaka^[22]等城市, 重点研究了城市道路扬尘重金属含量特征、来源识别和健康风险。不同地理环境的扬尘源的化学特征不同^[23], 对于道路扬尘中重金属的含量特征和风险评价等相关研究多集中于中国东部、北部和西北部地区^[24-26]。云南省位于中国西南高原地区, 素有“有色金属王国”之称, 采矿和有色金属冶炼活动频繁, 且云南城市均处于特殊的“坝子”地形, 导致城区人口密集, 道路车流密度大; 道路扬尘容易向周边环境释放潜在有害元素(Zn、Pb和Cd等), 对

收稿日期: 2022-07-17; 修订日期: 2022-08-25

基金项目: 云南省国家可持续发展示范区科技专项(202104AC100001-A14); 国家自然科学基金项目(21966016); 国家重点研发计划项目(2019YFC0214405)

作者简介: 韩新宇(1979~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气污染成因分析及颗粒物来源解析, E-mail: xinyuhan@foxmail.com

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

人群健康造成更大且更广的影响^[27]. 目前,有关云南地区道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属的研究鲜见报道^[10,17]. 因此,本文从道路扬尘重金属含量出发,对昆明、保山、文山、玉溪和昭通这 5 座城市的道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属含量、来源和健康风险开展研究,以期对云南高原城市道路扬尘防治和改善类似区域的环境空气质量提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

昆明市 ($102^{\circ}10' \sim 103^{\circ}40'E$, $24^{\circ}23' \sim 26^{\circ}22'N$)、保山市 ($98^{\circ}25' \sim 100^{\circ}02'E$, $24^{\circ}08' \sim 25^{\circ}51'N$)、文山市 ($103^{\circ}35' \sim 106^{\circ}12'E$, $22^{\circ}40' \sim 24^{\circ}48'N$)、玉溪市 ($101^{\circ}16' \sim 103^{\circ}09'E$, $23^{\circ}19' \sim 24^{\circ}53'N$)和昭通市 ($102^{\circ}52' \sim 105^{\circ}19'E$, $26^{\circ}55' \sim 28^{\circ}36'N$)位于中国西南高原,均隶属云南省. 云南属低纬度高原山地季风气候,四季温差小,干湿季分明^[28]. 云南大部地区在旱季(11月至次年4月)受西南干暖流影响,天气晴朗温暖,降水量少^[29]. 在云南降水丰富的雨季(5~10月),来自印度洋的西南季风气流和来自北太平洋的东南季风气流占优势^[30]. 昆明是云南省省会,也是云南主要的工业基地之一,形成了以钢铁制造、化学原料、化学品制造和烟草制品等为主的综合性工业体系. 保山是滇西的政治、经济和文化中心,被誉为“滇西粮仓”,以钢铁、矿业采选和精制茶产业为主. 文山是典型的岩溶石山区,工业上以三七、烟草和金属冶炼加工等行业为主. 玉溪是云南主要的重工业城市,矿业采选、钢铁制造加工和磷化工生产等行业较为发达. 昭通褐煤储量居云南省首位,煤炭开采、洗选业较为发达.

1.2 样品采集和处理

本研究参考《防治城市扬尘污染技术规范》^[31]采集了云南 5 城市道路扬尘样品. 城市道路根据其所在路段不同,可分为支路、快速路、主干道和次干道. 支路和快速路较短,主干道和次干道较长. 以路名为单位进行城市道路扬尘的采集. 路面需干燥 3~7 d,在代表性路段采用清扫方式进行样品采集,对每条路每隔 2.5 km 采集一个样品,每个样品至少需要 3 个子样品混合,且每个采样点的尘样质量不少于 500 g. 每个城市采集不少于 5 条代表性道路的尘样. 采样点信息和地理位置如表 1 和图 1 所示.

采样前,滤膜置于 60°C 的烘箱中烘烤 2 h 以去除滤膜上的杂质,之后将滤膜置于恒湿和恒温的环境中平衡 24 h 后再进行称重以供采样使用. 在样品处理时,应先除去样品中砂石、树叶等杂物,并在通风、避光和室温条件下自然晾干;其次,采用 150 目

的不锈钢筛进行分类筛选;随后通过再悬浮技术将过筛的尘样采集至直径为 47 mm 的 Teflon 膜上,最终得到 $\text{PM}_{2.5}$ 样品.

表 1 云南 5 城市道路扬尘采集点信息

Table 1 Information of road fugitive dust collection sites in five cities of Yunnan

城市	样品数量	采样道路名称	城市海拔高度/m
昆明	13	环城西路和东风东路等	1 891
保山	6	正阳北路和正阳南路等	1 800
文山	8	平文公路和河西路等	1 260
玉溪	12	红塔大道和西河路等	1 630
昭通	12	国学路和昭通大道等	1 685

1.3 样品分析和质量保证

首先,将一半滤膜样品剪碎置于锥形瓶中,加入少量去离子水润湿,再加入 15 mL HNO_3 和 5 mL HClO_4 ,用电炉加热消解并将温度控制在 100°C 以下,当瓶内剩余液体约为 3 mL 时,冷却锥形瓶,加入去离子水,过滤残渣并定容至 15 mL^[32]. 随后,采用美国 Agilent 公司的 Agilent7500a 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 Cr、Ni、Mn、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等重金属. 另一半滤膜样品按碱熔法^[33]消散后采用美国 PerkinElmer 公司的 Optima7000DV 型电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定铝(Al)元素进行富集因子计算. 每 10 个样品执行为一个重复样品分析,重金属含量的相对误差均小于 10%. 采用空白膜加标准样品进行加标回收分析,GBW 07407 (GSS-7) 为加标物质,回收率均在 90%~110% 内. 空白实验中,每 10 个样品执行一个空白分析,空白分析中重金属含量值均低于 2 倍方法检出限. 空白样品均值均在样品分析最终数据中扣除^[23].

2 数据分析

2.1 富集因子法

富集因子法(EF)是用来评价和判断环境中污染物来源的一种有效方法,也是识别元素污染来源的重要指标^[34]. 其公式如下:

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

式中, EF_i 为道路扬尘中测量元素 i 的富集因子; C_i 和 C_n 分别为样品中测量 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. 本研究使用 Al 作为参比元素,选用中国土壤元素背景值中的云南省表层(A层)土壤背景值作为各重金属背景值^[35]. 若 $EF \leq 10$,则主要受自然源和轻微人为源影响;若 $EF > 10$,则受一定程度的人为源影响,且 EF 越大,说明人类活动对该元素污染程度越大^[36].

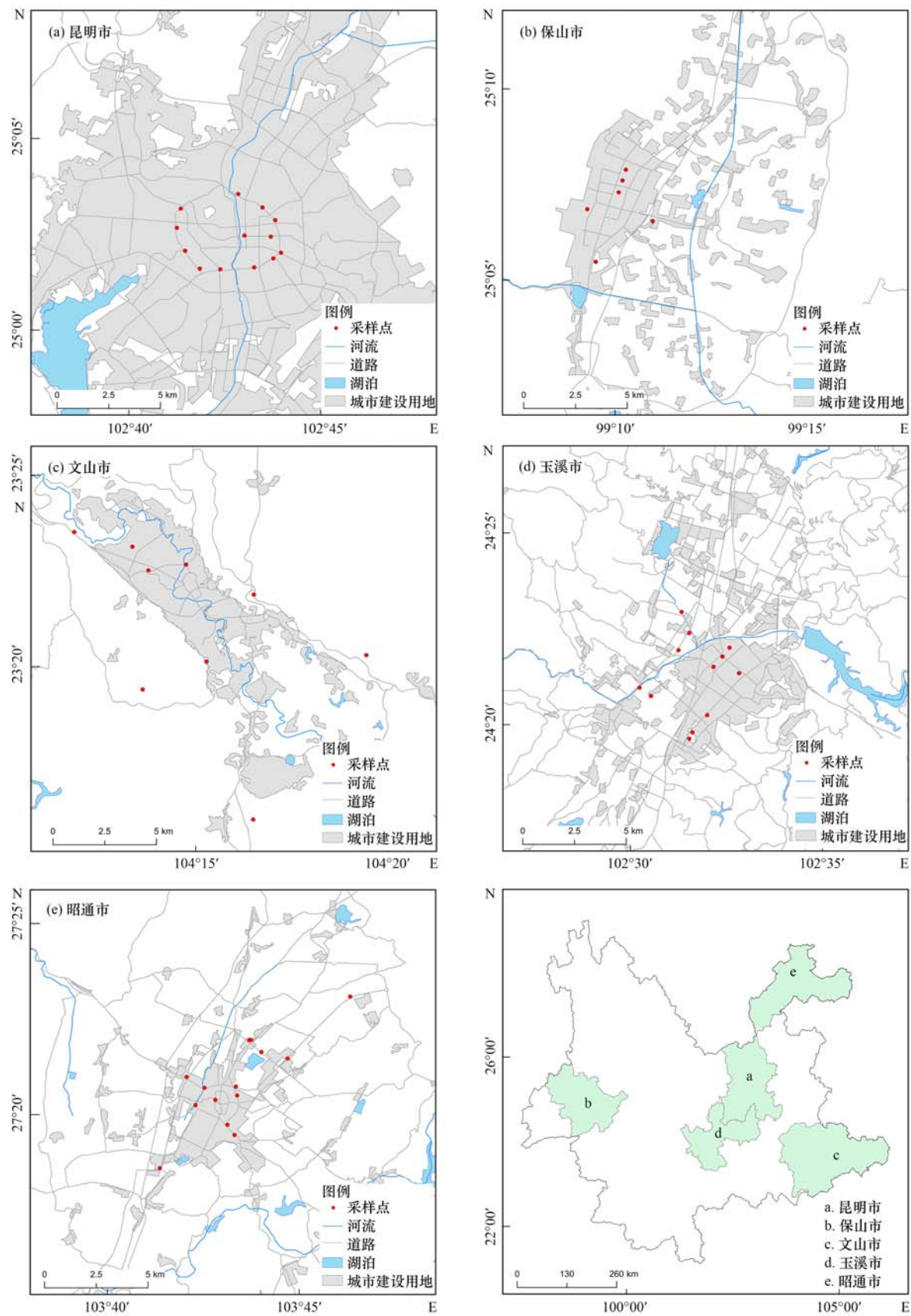


图 1 云南 5 城市城区道路扬尘采样路段位置 and 空间分布

Fig. 1 Locations and spatial distributions of the sampling sites for road fugitive dust in five cities of Yunnan

2.2 相关性分析法

相关性反映的是随机变量之间线性关系,用于衡量变量之间的关联度.元素之间的相关性越高,其

来自同一源的可能性越大.因此,元素间的相关性可以反映其是否具有同源性,从而判断其来源.本研究采用 Pearson 相关系数(r)以反映重金属间的相关

性,使用 SPSS 软件进行 Pearson 相关性分析.当 $P < 0.05$ 时,认为重金属间存在显著相关.同时,当 r 为正数时,认为变量间为正相关;当 r 为负数时,认为变量间为负相关;当 $r = 0$ 时,变量间无相关性. r 可分为高度相关($0.7 \leq |r| < 1$)、中度相关($0.5 \leq |r| < 0.7$)和低度相关($|r| < 0.5$)^[37].为保证数据和分析的准确性,不对样品数量少于重金属数量的城市数据进行分析,故不对保山市的数据进行来源分析.

2.3 主成分分析法

为了确定重金属的来源,本研究采用主成分分析法进行多元统计分析.主成分分析可以分析数据集的相互关系并生成替代参数,其核心是利用降维的思想,压缩变量维数,将几个相互关联的变量组成一类,减少了自变量的数量,使其更易于分析^[38].本文利用 SPSS 24.0 对重金属含量数据进行 KMO 和 Bartlett 检验,经验证 $KMO > 0.5$, $Bartlett < 0.05$,表明本研究数据适合进行因子分析.基于主成分方法,采用 Kaiser 标准化的正交旋转法并采用最大方差法对因子载荷矩阵进行正交旋转.根据重金属含量特征值的方差累计贡献率,截取特征值大于 1 的因子,进一步探讨重金属的来源^[39].

2.4 健康风险评价方法

道路扬尘中的有害元素通过摄食、呼吸吸入和

皮肤接触这 3 种途径进入人体,美国环保署 (USEPA)提供的健康风险评价模型可对道路扬尘中重金属的 3 种暴露途径进行评价.本研究中,8 种重金属 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 属于非致癌物质,同时,Cr、Ni、As 和 Cd 还属于致癌物质.本研究仅对儿童和成人两个群体进行评价,3 种途径日均暴露量的计算公式如下:

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

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

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

式中, D_{ing} 、 D_{inh} 和 D_{dermal} 分别为摄食、呼吸吸入和皮肤接触的日均暴露剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; C 为重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$; 其余参数见表 2.

目前 EPA 中仅有呼吸吸入的致癌风险参数,因此本研究只考虑儿童 (child) 和成人 (adult) 的呼吸吸入的致癌风险,其终身日均暴露量 (LADD) 计算公式为:

$$LADD = \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \times \frac{C \times EF}{PEF \times AT} \quad (5)$$

表 2 重金属暴露量参数^[40]

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	d·a ⁻¹	暴露频率	180	180
AT(非致癌)	d	平均作用时间	365 × ED	365 × ED
AT(致癌)	d	平均作用时间	365 × 70	365 × 70
IngR	mg·d ⁻¹	摄食灰尘量	200	100
InhR	mg·d ⁻¹	呼吸摄入量	5	20
PEF	m ³ ·kg ⁻¹	颗粒物排放因子	1.32 × 10 ⁹	1.32 × 10 ⁹
SL	mg·(cm ³ ·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	无量纲	吸入因子	0.001	0.001

重金属的非致癌总风险值 (HI) 和终身致癌总风险值 (R_T) 计算公式如下:

$$HI = \sum_i^m \sum_j^n HQ_{ij} = \sum_i^m \sum_j^n \frac{D_{ij}}{RFD_{ij}} \quad (6)$$

$$R_T = \sum_i^m R_i = \sum_i^m LADD_i \times SF_i \quad (7)$$

式中, HQ_{ij} 为重金属 i 在 j 途径的非致癌风险值; R_i 为重金属 i 的致癌风险值; RFD_{ij} 为重金属 i 在 j 途

径暴露的参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; SF 为致癌斜率因子, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, 具体参数见表 3. 若 $HI < 1.00E + 00$, 则表示非致癌风险较小或可以忽略; 若 $HI \geq 1.00E + 00$, 则表示存在非致癌风险, 且 HI 值的增大会导致非致癌风险变高; 当 $R_T < 1.00E - 06$ 时, 认为致癌风险较低; 当 R_T 介于 $1.00E - 06 \sim 1.00E - 04$ 时, 认为存在一定致癌风险, 需引起重视; 当 $R_T \geq 1.00E - 04$ 时, 认为致癌风险较高, 需进行致癌

风险防控.

表 3 重金属参考剂量和致癌斜率因子^[41]/mg·(kg·d)⁻¹

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

重金属	RFD			SF
	摄食	呼吸吸入	皮肤接触	
Cr	3.00E-03	2.86E-05	6.00E-05	42
Mn	4.60E-02	1.43E-05	1.84E-03	— ¹⁾
Ni	2.00E-02	2.06E-02	5.40E-03	0.84
Cu	4.00E-02	4.02E-02	1.20E-02	—
Zn	3.00E-01	3.00E-01	6.00E-02	—
As	3.00E-04	3.01E-04	1.23E-04	15.1
Cd	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-05	6.3
Pb	3.50E-03	3.52E-03	5.25E-04	—

1) “—”表示没有相关数据

3 结果与讨论

3.1 重金属含量水平特征

如表 4 所示,昆明、保山、文山、玉溪和昭通 PM_{2.5} 中 8 种重金属的总量分别为 1 694.41、1 865.69、2 332.06、3 986.69 和 2 293.68 mg·kg⁻¹. 除昆明市的 Mn、As、Cd 和昭通市的 Mn 没有超过云南土壤背景值外,其余重金属值均严重超过云南土壤背景值.从研究区域总体上来看,云南省道路扬

尘 PM_{2.5} 中 Mn、Ni 和 Pb 的含量平均值要高于中国苏州和波兰 Dhaka 等国内外城市.

玉溪道路扬尘 PM_{2.5} 中 Pb 含量显著高于表 4 中其他城市,Zn 和 Cd 的含量也相对较高.玉溪市周边有色金属冶炼工业发达,冶炼尘中含有大量的 Pb、Zn 和 Cd 元素^[42],对玉溪道路扬尘 PM_{2.5} 中各重金属可能有重要贡献.昆明道路扬尘 PM_{2.5} 中 Cr 和 Ni 含量较高,两种重金属含量分别占云南省 5 城市 Cr 和 Ni 总含量的 44.5% 和 20.96%,Cr 的含量远高于云南其他 4 城市,亦高于苏州^[18]、东营^[19]、Lublin^[21] 和 Dhaka^[22] 等城市的报道,说明昆明市道路扬尘 Cr 和 Ni 受到相对较重的重金属污染.昭通市道路扬尘 PM_{2.5} 中各重金属的含量约为云南省土壤背景值的 3.33 ~ 98.21 倍,这可能与昭通当地燃煤活动有关,而燃煤活动会产生潜在的有毒重金属元素,如 Cr、Ni、As 和 Cd 等^[43].文山市和保山市道路扬尘 PM_{2.5} 中 Cu 和 Zn 含量较高,可能与当地道路车辆密度大和机动车数量急剧增多有关.此外,保山、文山和玉溪的 Mn 与其他城市相比含量较高,这可能与不同地区的地质条件差异有关,因为 Mn 通常源于地壳物质^[44].

表 4 道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 4 Heavy metals in PM_{2.5} from road fugitive dust/mg·kg⁻¹

重 金 属	含量(平均值±标准差)					含量平均值					
	昆明	保山	文山	玉溪	昭通	Lublin ^[21]	天津 ^[20]	苏州 ^[18]	东营 ^[19]	Dhaka ^[22]	云南土壤背景值 ^[35]
Cr	754.09±111.37	84.02±5.30	109.35±65.37	138.09±53.70	284.68±109.48	46.40	—	167.95	122.50	144.30	65.20
Mn	321.66±498.58	720.50±86.62	777.75±266.66	1 387.27±518.37	469.16±108.27	—	630.00	482.30	475.90	261.50	626.00
Ni	112.90±160.92	51.36±3.33	52.04±18.47	188.25±186.56	141.51±66.66	—	82.00	62.28	76.60	37.00	42.50
Cu	66.07±12.26	574.37±77.13	830.36±563.65	153.80±48.76	323.52±260.15	81.60	626.00	205.80	238.70	49.70	46.30
Zn	386.20±584.82	334.07±116.05	423.63±137.01	650.32±228.02	743.41±383.18	241.10	811.00	672.85	415.90	239.20	89.70
As	3.18±1.74	28.06±8.28	36.52±40.27	29.21±14.02	61.55±46.45	—	—	32.93	28.30	8.10	18.40
Cd	0.01±0.01	0.88±0.23	2.46±0.92	10.96±8.09	21.41±13.73	5.10	2.40	2.03	2.00	11.60	0.218
Pb	50.30±98.18	72.43±15.16	99.95±26.47	1 428.79±1 019.52	248.44±72.24	44.10	131.00	7.00	59.8	19.00	40.60
Al	6 833.00± 2 454.00	58 695.00± 10 102.00	61 315.00± 14 213.00	81 426.00± 12 522.00	47 238.00± 13 502.00	—	—	—	—	—	88 100.00

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

由图 2 可知,各城市道路扬尘中 Mn 和 As 的 EF < 10,为轻度富集,主要受自然源影响.部分城市的 Ni(昆明)、Cu(昆明、保山、文山、昭通)、Zn(昆明、昭通)、Pb(昆明、玉溪、昭通)和 Cd(文山、玉溪)的 EF 在 10 ~ 100 之间,表现为中度富集,表明主要受人为干扰.Cr 和 Cd 分别在昆明市和昭通市道路扬尘中的 EF > 100,达到强烈富集等级,受到强烈的人为污染.Cr 主要来自于金属冶炼,冶炼过程中 Cr 蒸气以氧化物形式沉积在大气颗粒物表

面^[45],昆明市 Cr 含量水平为其他 4 座城市的 2.68 ~ 8.98 倍,结合富集因子表明,昆明市重金属污染主要受到工业源影响.昭通市 Cd 含量水平高于其他 4 座城市,Cd 是燃煤的主要产物之一^[46];昭通市 As 虽表现为轻微富集,但其元素含量水平为其他 4 座城市的 1.69 ~ 19.36 倍,As 为燃煤的标志性元素^[47],结合元素含量水平和富集因子表明,昭通市重金属污染主要受到燃煤源影响.

3.2.2 相关性分析

元素间的相关性可以反映其是否具有同源性,将富集因子和相关性结合分析可以反映元素之间是

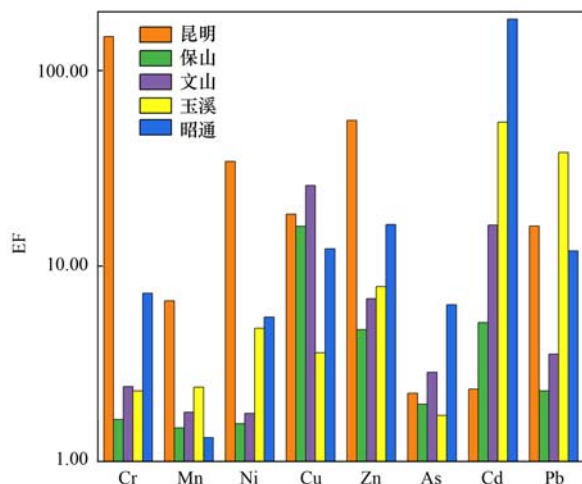


图2 5城市道路扬尘PM_{2.5}中重金属富集因子

Fig. 2 Enrichment factors of heavy metals in PM_{2.5} from road fugitive dust of five cities

否同质,使用SPSS软件(24.0)进行重金属之间的相关性分析。

由图3可知,在昆明道路扬尘PM_{2.5}中,Cr-Ni、Mn-Ni、Mn-Cu、Mn-Zn、Mn-Pb、Ni-Pb、Ni-Cu、Pb-Cu和Zn-Pb呈现出显著相关,表明昆明道路扬尘PM_{2.5}中的重金属存在多种人为来源。昆明道路扬尘PM_{2.5}中Mn的EF低于10,且Mn通常源于地壳物质^[48],因此Mn主要源于土壤源。Cr常与金属冶炼和不锈钢制造等生产过程有关^[49];Ni被广泛用于钢铁制造业^[50],且Cr和Ni是钢铁制造加工的标志组分,故Cr和Ni主要与钢铁制造加工有关^[51]。昆明年均钢铁产量约为1400万t,全省最高。Zn不仅存在于汽车尾气中,也作为轮胎磨损的标志元素;Cu作为刹车片磨损的标志性元素;Pb作为燃油或燃煤飞灰的典型元素;Ni主要作为柴油车废气和燃油燃烧的标志物;故昆明道路扬尘中的Ni、Cu、Zn和Pb与机动车污染物排放和磨损有关^[52,53]。因此,昆明道路扬尘PM_{2.5}中的重金属主要受土壤源、钢铁冶炼源和交通源影响。

文山道路扬尘PM_{2.5}中Cr、Mn、Ni、Zn、As和Pb的EF在1~10之间,Cu和Cd的EF在10~100之间。Cr-Ni、Cr-As、Mn-Zn、Mn-Cd、Mn-Pb、Ni-As、Zn-Cd、Zn-Pb和Cd-Pb呈现出显著相关性。文山石漠化程度是云南省最严重的地区之一,石漠化土地面积达646967.7hm²,且Cr、Ni和As在云南地区常具有典型的母岩继承性^[38];Cu、Zn、Cd和Pb是铅锌冶炼区的典型污染重金属^[54,55];Zn、Cu和Pb是机动车污染的特征元素^[34],主要与燃油燃烧、机动车抗氧化剂、轮胎摩擦、润滑油使用和刹车片磨损有关^[52,53]。因此,文山市道路扬尘PM_{2.5}中的重金属主要受土壤源、有色金属冶炼源和交通源

影响。

玉溪道路扬尘PM_{2.5}中Cd-Pb之间呈现出显著正相关,Cd和Pb的EF在10~100之间;Cr、Ni、Mn、Zn、Cu和As之间呈显著正相关,Cr、Ni、Mn、Zn、Cu和As的EF在1~10之间。Cd和Pb主要源于有色金属冶炼等活动^[56];Cr、Ni、Mn和As在云南地区常具有典型的母岩继承性^[38];Cu、Mn、Zn和As之间的相关性系数大于0.85,有研究指出As和Mn在一定程度上来源于土壤^[57],由于大气降尘使得土壤颗粒物与汽车尾气尘混合形成二次污染的交通尘,且Cu和Zn是机动车污染的典型元素^[34]。因此,玉溪市道路扬尘PM_{2.5}中的重金属主要受土壤源、有色金属冶炼源和轻微的交通源影响。

昭通道路扬尘PM_{2.5}中Cr、Mn、Ni和As的EF在1~10之间,Cu、Zn和Pb的EF在10~100之间,Cd的EF大于100。As和Cd与其它元素之间无显著相关性,Pb-Zn和Pb-Cu之间 $r > 0.6$,具有一定的相关性,而Cr、Mn和Ni之间呈显著正相关,表明Cr、Mn和Ni与具有同源性。昭通地处地球化学异常带,而Cr、Ni、Mn和Cu在该地具有典型的成土母岩继承性^[38]。富集因子分析也显示这些重金属主要受土壤源影响,而在燃煤活动中也会产生Cr、Ni和Cd等重金属^[43]。有研究指出人为排放到空气中的Cd主要来自燃煤、金属冶炼、水泥生产和磷肥生产等^[46],而矿冶加工和褐煤化工是昭通的七大支柱产业之一,且居民用煤也占一定比例,昭通市2019年居民能源消耗量(以标准煤计)为106.9万t,占总能源消耗的13.85%^[58]。Cu、Zn和Pb作为机动车污染的特征元素^[34,52,53],与交通污染有关。因此,昭通市道路扬尘PM_{2.5}中的重金属主要受土壤源、燃煤源和交通源影响。

3.2.3 主成分分析

为了进一步判断不同城市道路扬尘中重金属的来源,对不同城市重金属含量进行主成分来源解析^[59]。由于Mn和As在各城市中的富集因子数均小于10,主要受自然源影响,故仅对Cr、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb进行主成分分析。将云南4城市PM_{2.5}中含有的重金属通过软件SPSS 24.0进行主成分分析,正交旋转后得到成分矩阵(见表5)。

昆明市道路扬尘PM_{2.5}中重金属解析获得2个主成分,累计方差为87.368%。因子1解释方差为55.068%,重金属载荷数较高的为Ni、Cu、Zn和Pb,EF在10~100之间,表现为中度富集,结合相关性分析判断,因子1为交通源^[52,53]。因子2解释方差为32.300%,重金属载荷数较高的为Cr和Cd,Cd的EF在1~10之间,表现为轻度富集,主要来源于

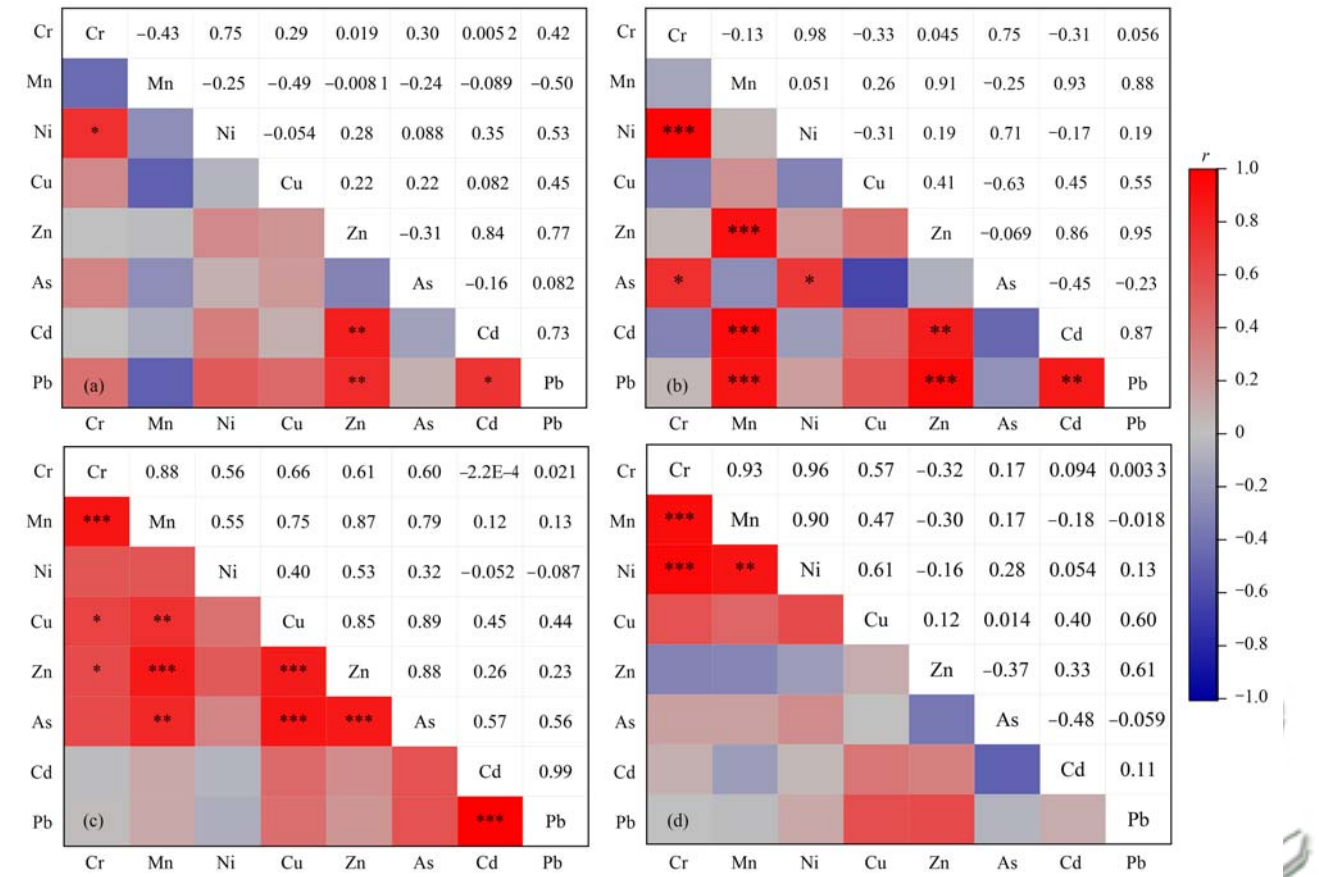


表 5 云南 4 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属主成分分析¹⁾

Table 5 Principal analysis of PM_{2.5} heavy metals in road fugitive dust of four cities in Yunnan

重金属	昆明		文山		玉溪		昭通	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
Cr	0.141	0.940	-0.076	0.981	0.864	-0.045	0.853	-0.476
Ni	0.858	0.492	0.061	0.993	0.772	-0.182	0.886	-0.360
Cu	0.960	-0.024	0.609	-0.402	0.812	0.462	0.434	0.565
Zn	0.733	-0.306	0.955	0.153	0.865	0.255	0.043	0.890
Cd	-0.374	0.761	0.916	-0.208	0.052	0.986	0.847	0.235
Pb	0.974	-0.139	0.986	0.134	0.036	0.986	0.440	0.735
特征值	3.312	1.938	3.125	2.162	3.067	1.945	2.608	1.811
解释方差/%	55.068	32.300	52.250	36.033	51.120	32.410	49.471	31.323
累计方差/%	55.068	87.368	52.250	88.283	51.120	83.531	49.471	80.794
KMO/Bartlett	0.526/0.000		0.559/0.000		0.506/0.000		0.503/0.000	
(KMO > 0.50, Bartlett < 0.05)								

1) 保山市样品数量较少, 未做主成分分析研究

土壤源; Cr 的 EF 超过 100, 表现为强烈富集. Cr 主要与钢铁冶炼有关^[49]. 结合相关性分析和富集因子值表明, 因子 2 为土壤源和钢铁冶炼源.

文山市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属解析获得 2 个主成分, 累计方差为 88.283%. 因子 1 解释方差为 52.250%, 重金属载荷数较高的为 Zn、Cu、Cd 和 Pb, Cu 和 Cd 的 EF 在 10~100 之间, 表现为中度富

集, Zn 和 Pb 的 EF 在 1~10 之间表现为轻度富集. 结合相关性分析和富集因子值表明, 因子 1 为有色金属冶炼源和交通源. 因子 2 解释方差为 36.033%, 重金属载荷数较高的为 Cr 和 Ni, EF 在 1~10 之间, 表现为轻度富集, 结合富集因子值和相关性分析, 因子 2 为土壤源.

玉溪市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属解析获得 2 个

主成分,累计方差为 83.531%.因子 1 解释方差为 51.120%,重金属载荷数较高的为 Cr、Cu 和 Zn,EF 在 1~10 之间,表现为轻微富集,故因子 1 为土壤源.因子 2 解释方差为 32.410%,重金属载荷数较高的为 Cd 和 Pb,EF 在 10~100 之间,表现为中度富集. Cd 和 Pb 与玉溪有色金属冶炼活动有关,有色金属冶炼尘中常含有大量的 Cd 和 Pb 等重金属元素^[60].结合相关性分析和富集因子值表明,因子 2 为有色金属冶炼源.

昭通市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属解析获得 2 个主成分,累计方差为 80.794%.因子 1 解释方差为 49.471%,重金属载荷数较高的为 Cr、Ni 和 Cd,Cr 和 Ni 的 EF 在 1~10 之间,而 Cd 的 EF 超过 100,结合相关性分析和富集因子值表明,因子 1 为土壤源和燃煤源.因子 2 解释方差为 31.323%,重金属载荷数较高的为 Zn 和 Pb,EF 在 10~100 之间,表现为中度富集.结合相关性分析和富集因子值表明,因子 2 为交通源.

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.从中可知,3 种儿童非致癌风险的暴露途径表现为:摄食>皮肤接触>呼吸吸入,不同城市 HQ_{ing} 占 HI 的 57.1%~96.5%,说明儿童非致癌风险的主要暴露途径是摄食.而 3 种成人非致癌风险的暴露途径表现为:皮肤接触>摄食>呼吸吸入,不同城市 HQ_{dermal} 占 HI 的 33.1%~64.4%,说明成人重金

属非致癌风险的主要暴露途径是皮肤接触.这一结果和已有研究的结论一致^[61].

各城市重金属的非致癌风险总值大小顺序为:玉溪>昆明>昭通>文山>保山.昆明、保山、文山、玉溪和昭通道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属儿童非致癌总风险值(HI)分别为 3.36E+00、1.22E+00、1.59E+00、4.14E+00 和 2.93E+00.5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属儿童非致癌总风险值(HI)均超过 1.00E+00.昆明市、玉溪市和昭通市的 Cr、Pb 和 As 对儿童具有明显的非致癌风险,上述这 3 种重金属在摄入途径中存在非致癌风险,而昆明市的 Cr 在皮肤接触途径中也存在非致癌风险.对成年人来说,昆明、保山、文山、玉溪和昭通 8 种重金属的 HI 分别为:5.62E-01、1.95E-01、2.57E-01、6.42E-01 和 5.31E-01.儿童重金属的 HI 分别是成人的 5.98、6.26、6.19、6.45 和 5.52 倍.对于重金属的非致癌风险,5 城市儿童非致癌风险均高于成人,故儿童对道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属的敏感性更高,儿童通过摄食摄入大量灰尘,更易接触到重金属,因此重金属对这一群体造成的影响更大,应加强 5 城市对儿童的道路扬尘风险防护.

除此之外,各城市的其余重金属非致癌风险值均小于 1,说明对人体无明显非致癌风险,主要原因在于城市道路由于禁止运输矿石、矿渣等车辆进入,重金属含量小,风险值低. Mn、Cu 和 As 的非致癌风险值都大于 1.00E-02,其非致癌风险水平并不显著,但不能忽视其长期暴露的风险^[62].

表 6 PM_{2.5} 中重金属非致癌风险(儿童)

Table 6 Non-carcinogenic risk of heavy metals in PM_{2.5} (child)

城市	项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
昆明	HQ _{ing}	1.65E+00	4.60E-02	3.71E-02	1.18E-02	8.20E-03	6.98E-02	5.20E-05	9.46E-02
	HQ _{inh}	3.30E-03	2.81E-03	7.06E-07	2.07E-07	1.61E-07	1.33E-06	9.84E-10	1.80E-06
	HQ _{dermal}	1.40E+00	1.94E-02	2.32E-03	6.11E-04	7.15E-04	2.87E-03	1.46E-05	1.06E-02
	HI	3.05E+00	6.82E-02	3.94E-02	1.18E-02	8.92E-03	7.27E-02	6.66E-05	1.05E-01
保山	HQ _{ing}	1.82E-01	1.02E-01	1.69E-02	1.02E-01	6.97E-03	6.17E-01	5.71E-03	1.36E-01
	HQ _{inh}	3.60E-04	6.27E-03	3.20E-07	1.79E-06	1.37E-07	1.16E-05	1.08E-07	2.58E-06
	HQ _{dermal}	2.55E-02	7.23E-03	1.75E-04	8.83E-04	1.01E-04	4.20E-03	1.60E-03	2.53E-03
	HI	2.08E-01	1.15E-01	1.71E-02	1.03E-01	7.07E-03	6.21E-01	7.31E-03	1.39E-01
文山	HQ _{ing}	2.40E-01	1.10E-01	1.71E-02	1.48E-01	9.00E-03	8.00E-01	1.61E-02	1.88E-01
	HQ _{inh}	4.76E-04	6.77E-03	3.24E-07	2.59E-06	1.76E-07	1.52E-05	3.06E-07	3.56E-06
	HQ _{dermal}	3.36E-02	7.78E-03	1.77E-04	1.27E-03	1.30E-04	5.47E-03	1.52E-03	3.50E-03
	HI	2.74E-01	1.24E-01	1.73E-02	1.49E-01	9.13E-03	8.06E-01	1.76E-02	1.92E-01
玉溪	HQ _{ing}	3.03E-01	1.96E-01	6.19E-02	2.73E-02	1.38E-02	6.40E-01	7.21E-02	2.68E+00
	HQ _{inh}	6.01E-04	1.21E-02	1.17E-06	4.79E-07	2.70E-07	1.20E-05	1.36E-06	5.08E-05
	HQ _{dermal}	4.24E-02	1.39E-02	6.42E-04	2.78E-04	2.00E-04	4.37E-03	2.02E-02	5.01E-02
	HI	3.46E-01	2.22E-01	6.25E-02	2.76E-02	1.40E-02	6.44E-01	9.23E-02	2.73E+00
昭通	HQ _{ing}	6.24E-01	6.62E-02	4.65E-02	5.75E-02	1.58E-02	1.35E+00	1.41E-01	4.67E-01
	HQ _{inh}	1.24E-03	4.09E-03	8.81E-07	8.10E-07	3.09E-07	2.55E-05	2.67E-06	8.84E-06
	HQ _{dermal}	8.74E-02	4.19E-03	4.82E-04	5.84E-04	2.28E-04	9.21E-03	3.94E-02	8.71E-03
	HI	7.13E-01	7.45E-02	4.70E-02	5.81E-02	1.60E-02	1.36E+00	1.80E-01	4.76E-01

表 7 PM_{2.5} 中重金属非致癌风险 (成人)
Table 7 Non-carcinogenic risk of heavy metals in PM_{2.5} (adult)

城市	项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
昆明	HQ _{ing}	1.77E-01	4.87E-03	3.98E-03	2.25E-04	8.78E-04	3.47E-03	5.57E-06	1.01E-02
	HQ _{inh}	2.82E-03	2.41E-03	6.04E-07	3.16E-08	1.38E-07	1.13E-06	8.43E-10	1.54E-06
	HQ _{dermal}	3.53E-01	4.91E-03	7.90E-05	5.88E-04	1.81E-04	6.77E-04	2.22E-05	2.69E-03
	HI	5.30E-01	1.22E-02	6.14E-04	8.13E-04	1.06E-03	4.15E-03	2.78E-05	1.28E-02
保山	HQ _{ing}	1.95E-02	1.09E-02	1.81E-03	1.09E-02	7.48E-04	6.59E-02	6.12E-04	1.46E-02
	HQ _{inh}	3.11E-04	5.39E-03	2.75E-07	1.54E-06	1.17E-07	1.00E-05	9.29E-08	2.21E-06
	HQ _{dermal}	3.89E-02	1.10E-02	2.67E-04	1.58E-03	1.54E-04	6.41E-03	2.44E-03	3.88E-03
	HI	5.87E-02	2.73E-02	2.08E-03	1.25E-02	9.02E-04	7.23E-02	3.05E-03	1.85E-02
文山	HQ _{ing}	2.57E-02	1.18E-02	1.83E-03	1.58E-02	9.63E-04	8.58E-02	1.73E-03	2.01E-02
	HQ _{inh}	4.09E-04	5.82E-03	2.79E-07	2.22E-06	1.51E-07	1.30E-05	2.63E-07	3.06E-06
	HQ _{dermal}	5.12E-02	1.19E-02	2.71E-04	2.29E-03	1.98E-04	8.34E-03	6.90E-03	5.35E-03
	HI	7.73E-02	2.95E-02	2.10E-03	1.81E-02	1.16E-03	9.42E-02	8.63E-03	2.55E-02
玉溪	HQ _{ing}	3.25E-02	2.10E-02	6.64E-03	2.93E-03	1.40E-03	6.87E-02	7.73E-03	2.88E-01
	HQ _{inh}	5.17E-04	1.04E-02	1.01E-06	4.11E-07	2.32E-07	1.04E-05	1.17E-06	4.37E-05
	HQ _{dermal}	6.47E-02	2.12E-02	9.80E-04	4.24E-04	3.04E-04	6.67E-03	3.08E-02	7.65E-02
	HI	9.77E-02	5.26E-02	7.62E-03	3.35E-03	1.70E-03	7.54E-02	3.85E-02	3.65E-01
昭通	HQ _{ing}	6.69E-02	7.08E-03	4.99E-03	6.16E-03	1.69E-03	1.45E-01	1.51E-02	5.00E-02
	HQ _{inh}	1.07E-03	3.51E-03	7.57E-07	8.64E-07	2.65E-07	2.20E-05	2.29E-06	7.60E-06
	HQ _{dermal}	1.33E-01	7.17E-03	7.36E-04	8.91E-04	3.48E-04	1.41E-02	6.02E-02	1.33E-02
	HI	2.01E-01	1.78E-02	5.73E-03	7.05E-03	2.04E-03	1.59E-01	7.53E-02	6.33E-02

3.3.2 致癌风险评价

表 8 为 5 城市道路扬尘中 Cr、Ni、As 和 Cd 的终身致癌暴露剂量和终身致癌风险值。昆明的 Cr 超过致癌风险阈值 (1.00E-06), 存在一定的致癌风险。其余 4 座城市重金属值均低于 1.00E-06, 表明存在较低的致癌风险。在 4 种重金属中, 各城市的致

癌风险总体表现为: 昭通 > 玉溪 > 文山 > 保山 > 昆明。各城市道路扬尘中 Cr 的终身致癌总风险值在 R 中占比最高, 分别占 R 的 99.34% (昆明)、88.23% (保山)、88.21% (文山)、89.54% (玉溪) 和 90.95% (昭通)。因此道路扬尘的 PM_{2.5} 中的 Cr 通过吸入具有较高的致癌风险, 应引起更多关注。

表 8 道路扬尘中重金属的终身致癌暴露剂量和终身致癌风险值

Table 8 Lifetime exposure doses and lifetime carcinogenic risk values of heavy metals of road fugitive dust in the five cities

城市	项目	Cr	Ni	As	Cd	总计
昆明	LADD/mg·(kg·d) ⁻¹	3.57E-08	5.34E-09	1.50E-10	3.74E-13	4.10E-08
	R	1.50E-06	4.49E-09	2.27E-09	2.39E-12	1.51E-06
保山	LADD/mg·(kg·d) ⁻¹	3.93E-09	2.43E-09	1.33E-09	4.11E-11	7.73E-09
	R	1.65E-07	2.04E-09	2.01E-08	2.63E-10	1.87E-07
文山	LADD/mg·(kg·d) ⁻¹	5.17E-09	2.46E-09	1.73E-09	1.16E-10	9.48E-09
	R	2.17E-07	2.07E-09	2.61E-08	7.42E-10	2.46E-07
玉溪	LADD/mg·(kg·d) ⁻¹	6.53E-09	8.90E-09	1.38E-09	5.18E-10	1.73E-08
	R	2.74E-07	7.48E-09	2.08E-08	3.32E-09	3.06E-07
昭通	LADD/mg·(kg·d) ⁻¹	1.46E-08	7.25E-09	3.16E-09	1.10E-09	2.61E-08
	R	6.13E-07	6.09E-09	4.77E-08	6.91E-09	6.74E-07

4 结论

(1) 云南 5 城市道路扬尘重金属总量远高于国内外其他研究城市, 昆明、保山、文山、玉溪和昭通道扬尘 PM_{2.5} 中 8 种重金属的含量之和分别为 1 694.41、1 865.69、2 332.06、3 986.69 和 2 293.68 mg·kg⁻¹。各城市 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 等重金属含量较高, 远超云南土壤背景值。

(2) 富集因子表明, 昭通市的 Cd 和昆明市的 Cr 在道路扬尘 PM_{2.5} 中受强烈的人为活动影响。昆

明市的 Ni、Cu、Zn 和 Pb, 保山市的 Cu, 文山市的 Cu 和 Cd, 玉溪市的 Cd 和 Pb, 昭通市的 Cu、Zn 和 Pb 在道路扬尘 PM_{2.5} 中受一定程度的人为源影响。

(3) 相关性分析和主成分分析表明, 云南 5 城市均受土壤源和交通源影响; 不同类型城市道路扬尘来源具有较大的差异性; 昆明市受钢铁冶炼源影响, 文山和玉溪市受有色金属冶炼源影响, 昭通市受燃煤源影响。

(4) 健康风险评价分析, 昆明、玉溪和昭通地区的 Cr、Pb 和 As 为道路扬尘中主要的儿童非致癌

风险源,且昆明地区的 Cr 既存在终身致癌风险也存在儿童非致癌风险,3 种元素多为工业活动和道路交通的产物,应加强云南地区工业源和交通源的防治。

参考文献:

- [1] Liu J W, Chen Y J, Chao S H, *et al.* Emission control priority of PM_{2.5}-bound heavy metals in different seasons; a comprehensive analysis from health risk perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 20-30.
- [2] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季 PM_{2.5} 化学组分污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 76-85.
Wu M, Wu D, Xia J R, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} chemical components in Chengdu in winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 76-85.
- [3] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4813-4824.
Zhang J F, Jiang N, Duan S G, *et al.* Seasonal chemical composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4813-4824.
- [4] 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.
- [5] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bio-accessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [6] 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), doi: 10.3390/ijerph16142625.
- [7] 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.
- [8] Bisht L, Gupta V, Singh A, *et al.* Heavy metal concentration and its distribution analysis in urban road dust: A case study from most populated city of Indian state of Uttarakhand[J]. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 2022, **40**, doi: 10.1016/j.sste.2021.100470.
- [9] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchemical Journal*, 2010, **94**(2): 99-107.
- [10] 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 等. 昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 180-188.
Pang X C, Han X Y, Shi J W, *et al.* Pollution characteristics and health risk of heavy metals in fugitive dust Around Zhaotong city[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 180-188.
- [11] Ho K F, Wu K C, Niu X Y, *et al.* Contributions of local pollution emissions to particle bioreactivity in downwind cities in China during Asian dust periods[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 675-683.
- [12] Pan Y P, Tian S L, Li X R, *et al.* Trace elements in particulate matter from metropolitan regions of Northern China: Sources, concentrations and size distributions[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **537**: 9-22.
- [13] Han Q, Wang M S, Cao J L, *et al.* Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110157.
- [14] 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.
- [15] Kim J, Park J, Hwang W. 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), doi: 10.3390/ijerph13080820.
- [16] 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.
- [17] 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3547-3555.
Feng Y Y, Shi J W, Zhong Y Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dust from non-ferrous smelting parks[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3547-3555.
- [18] Wu F Q, Kong S F, Yan Q, *et al.* Sub-type source profiles of fine particles for fugitive dust and accumulative health risks of heavy metals: a case study in a fast-developing city of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(14): 16554-16573.
- [19] 孔少飞. 大气污染源排放颗粒物组成、有害组分风险评价及清单构建研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
Kong S F. Study on the chemical composition, risk assessment and emission inventory establishment for hazardous components in particulate matter from atmospheric pollution sources [D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- [20] 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.
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.
- [21] 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), doi: 10.1007/s12665-018-7969-2.
- [22] 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.
- [23] Chow J C, Watson J G, Houck J E, *et al.* A laboratory resuspension chamber to measure fugitive dust size distributions and chemical compositions [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(21): 3463-3481.
- [24] Zhang R, Cao J J, Tang Y R, *et al.* Elemental profiles and signatures of fugitive dusts from Chinese deserts[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 1121-1129.
- [25] Cao J J, Chow J C, Watson J G, *et al.* Size-differentiated source profiles for fugitive dust in the Chinese Loess Plateau [J].

- Atmospheric Environment, 2008, **42**(10): 2261-2275.
- [26] 张启钧, 吴琳, 张衍杰, 等. 隧道环境 PM_{2.5} 携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.
- [27] 李雅. 基于土壤发生分类的云南省土壤重金属空间分异及污染评估[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- Li Y. Spatial distribution and pollution assessment of soil heavy metals in Yunnan Province based on soil genetic classification [D]. Kunming: Yunnan University, 2019.
- [28] Yang K, Teng M F, Luo Y, *et al.* Human activities and the natural environment have induced changes in the PM_{2.5} concentrations in Yunnan Province, China, over the past 19 years [J]. Environmental Pollution, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114878.
- [29] Guo W, Zhang Z Y, Zheng N J, *et al.* Chemical characterization and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} from a plateau city of Kunming at different seasons[J]. Atmospheric research, 2020, **234**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104687.
- [30] 云南省统计局. 云南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [31] 国家环保总局. 防治城市扬尘污染技术规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [32] 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.
- 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.
- [33] HJ777-2015, 空气和废气 颗粒物中金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法[S].
- HJ777-2015, Ambient air and waste gas from stationary sources emission-determination of metal elements in ambient particle matter-inductively coupled plasma optical emission spectrometry [S].
- [34] Wang H B, Qiao B Q, Zhang L M, *et al.* Characteristics and sources of trace elements in PM_{2.5} in two megacities in Sichuan Basin of southwest China[J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 1577-1586.
- [35] 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.
- [36] Zhou S Z, Yuan Q, Li W J, *et al.* Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: spatial variations, sources, and health implications[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(1): 205-213.
- [37] 王伟. 南京市大气 PM_{2.5} 中重金属元素时空分布、来源及健康风险评价[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- Wang W. Spatial-temporal variation, sources and risk assessment of heavy metals in ambient PM_{2.5} of Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017.
- [38] 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.
- [39] 王乔林, 宋云涛, 王成文, 等. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3693-3703.
- Wang Q L, Song Y T, Wang C W, *et al.* Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in western Yunnan [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3693-3703.
- [40] Peng J, Zhang S, Han Y, *et al.* Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2022, **816**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151632.
- [41] US EPA. Integrated Risk Information System (IRIS) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/>, 2022-01-01.
- [42] Long Z J, Zhu H, Bing H J, *et al.* Contamination, sources and health risk of heavy metals in soil and dust from different functional areas in an industrial city of Panzhihua City, southwest China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126638.
- [43] Hao Y F, Luo B, Simayi M, *et al.* Spatiotemporal patterns of PM_{2.5} elemental composition over China and associated health risks[J]. Environmental Pollution, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114910.
- [44] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 432-441.
- Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of southern Ningxia based on PMF model[J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 432-441.
- [45] Lv W W, Wang Y X, Querol X, *et al.* Geochemical and statistical analysis of trace metals in atmospheric particulates in Wuhan, central China[J]. Environmental Geology, 2006, **51**(1): 121-132.
- [46] Shao X, Cheng H G, Li Q, *et al.* Anthropogenic atmospheric emissions of cadmium in China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **79**: 155-160.
- [47] Yan Q, Kong S F, Yan Y Y, *et al.* Emission and spatialized health risks for trace elements from domestic coal burning in China[J]. Environment International, 2022, **158**, doi: 10.1016/J.ENVINT.2021.107001.
- [48] 刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 等. 新乡市大气 PM_{2.5} 携带金属元素季节分布, 来源特征与健康风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4140-4150.
- Liu H J, Jia M K, Liu Y L, *et al.* Seasonal variation, source identification, and health risk of PM_{2.5}-bound metals in Xinxiang [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4140-4150.
- [49] 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 等. 基于 PMF 模型的 PM_{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5276-5287.
- Deng L L, Zhang K S, Yin Z Y, *et al.* Characterization of metal pollution of regional atmospheric PM_{2.5} and its source based on the PMF model[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5276-5287.
- [50] Wang Q, Bi X H, Wu J H, *et al.* Heavy metals in urban ambient PM₁₀ and soil background in eight cities around China [J]. Environmental monitoring and assessment, 2013, **185**(2): 1473-1482.
- [51] Liu Y Y, Xing J, Wang S X, *et al.* Source-specific speciation profiles of PM_{2.5} for heavy metals and their anthropogenic emissions in China[J]. Environmental Pollution, 2018, **239**: 544-553.
- [52] 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.
- [53] 翟诗婷, 王申博, 张栋, 等. 郑州市典型污染过程 PM₁ 中重

- 金属浓度、来源及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1180-1189.
- Zhai S T, Wang S B, Zhang D, *et al.* Concentration, source, and health risk assessment of PM₁ heavy metals in typical pollution processes in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1180-1189.
- [54] Xie J J, Yuan C G, Xie J, *et al.* Comparison of arsenic fractions and health risks in PM_{2.5} before and after coal-gas replacement[J]. Environmental Pollution, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113881.
- [55] 张富贵, 彭敏, 贺灵, 等. 贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2081-2093.
- Zhang F G, Peng M, He L, *et al.* Sources identification, ecological risk assessment, and controlling factors of potentially toxic elements in typical lead-zinc mine area, Guizhou province, Southwest China[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2081-2093.
- [56] Zhou X T, Strezov V, Jiang Y J, *et al.* Contamination identification, source apportionment and health risk assessment of trace elements at different fractions of atmospheric particles at iron and steelmaking areas in China[J]. PLoS One, 2020, **15**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0230983.
- [57] 黄文, 王胜利. 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 597-607.
- Huang W, Wang S L. Distribution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric deposition during heating and non-heating period in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 597-607.
- [58] 云南省统计局. 2020 年云南统计年鉴[EB/OL]. http://www.yn.gov.cn/sjfb/tjnj_2/202103/t20210326_219312.html, 2020-11-25.
- [59] Taiwo A M, Harrison R M, Shi Z B. A review of receptor modelling of industrially emitted particulate matter[J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 109-120.
- [60] 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**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109604.
- [61] 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.
- [62] 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

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)