

吴凯章,刘 明,罗中华,等.大宝山矿区周边大气重金属来源与风险评估 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6270-6280.

Wu K Z, Liu M, Luo Z H, et al. Sources and risk assessment of atmospheric heavy metals in the vicinity of Dabao Mountain mining area [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6270-6280.

大宝山矿区周边大气重金属来源与风险评估

吴凯章^{1,2},刘 明^{2*},罗中华³,陈来国²,蔡立梅¹,王安侯⁴,郑 昱⁵,陆海涛² (1.长江大学资源与环境学院,长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室,湖北 武汉 430100; 2.生态环境部华南环境科学研究所,广东省水与大气污染防治重点实验室,广东 广州 510655; 3.博罗县环境科学研究所,广东 博罗 516199; 4.广东省生态环境监测中心,国家环境保护区域空气质量监测重点实验室,广东 广州 510308; 5.韶关生态环境监测中心站,广东 韶关 512026)

摘要: 为认识大宝山多金属矿区周边大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及潜在生态风险和健康风险,于 2022 年 8 月 20 日~9 月 10 日和 10 月 18 日~11 月 8 日,在翁源县铁龙镇铁龙中学采集和分析了大气 PM_{2.5} 中的 Al、Ti、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl 和 Pb 等 15 种重金属.利用正定因子矩阵(PMF)模型结合相关性分析进行相关重金属的来源解析,并运用潜在生态风险模型、健康风险模型进行风险评价.分析结果显示,大气 PM_{2.5} 中 Al、Zn、Pb 和 Mn 四种金属含量居前 4 位,占已测金属总浓度的 87.8%,平均浓度分别为:112.70,68.53,26.82 和 11.96ng/m³,其余重金属的平均浓度范围为 0.12~7.99ng/m³.不同金属元素季节分布差异与不同风向背景下不同污染源的排放影响有关.大气 PM_{2.5} 中重金属主要有 6 个来源,分别为水泥生产(13.8%)、金属冶炼(24.6%)、扬尘源(13.7%)、污泥处置(19.4%)、交通源(9.4%)和自然源与农业源的复合源(19.1%).生态风险和健康分析评价结果显示,研究区重金属综合生态风险等级为强烈,Cd 属于极强生态风险,Sb 属于强烈生态风险,其余重金属属于轻微生态风险.重金属的总体非致癌风险较低;Cr 致癌风险显著,As 和 Cd 具有一定致癌风险.

关键词: PM_{2.5}; 重金属; 健康风险; PMF 模型; 来源解析

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)12-6270-11

Sources and risk assessment of atmospheric heavy metals in the vicinity of Dabao Mountain mining area. WU Kai-zhang^{1,2}, LIU Ming^{2*}, LUO Zhong-hua³, CHEN Lai-guo², CAI Li-mei¹, WANG An-hou⁴, ZHENG Yu⁵, LU Hai-tao² (1.College of Resources and Environment, Yangtze University, Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment (Yangtze University), Wuhan 430100, China; 2.South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangdong Provincial Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, Guangzhou 510655, China; 3.Boluo Institute of Environmental Science, Boluo 516199, China; 4.State Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring for Environmental Protection, Guangdong Ecological Environment Monitoring Center, Guangzhou 510308; 5.Shaoguan Ecological Environment Monitoring Center Station, Shaoguan 512026, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6270~6280

Abstract: To understand the pollution characteristics and potential ecological and health risks of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} around Dabaoshan polymetallic mining area, PM_{2.5} samples were collected and analyzed for 15 heavy metals including Al, Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Tl and Pb from August 20 to September 10, 2022 and October 18 to November 8, 2022, at Tielong Middle School, Tielong Town, Wengyuan County. The positive matrix factorization (PMF) model was utilized in conjunction with correlation analysis was to identify the source of relevant heavy metals. Additionally, risk assessments were conducted employing both the potential ecological risk model and health risk model. The findings revealed that out of the fifteen metals analyzed in atmospheric PM_{2.5}, Al, Zn, Pb, and Mn exhibited the highest concentrations, collectively accounting for 87.8% of the total measured metal concentration. Their average concentrations were determined as follows: Al (112.70ng/m³), Zn (11.96ng/m³), Pb (68.53ng/m³) and Mn (26.82ng/m³). The remaining heavy metals displayed average concentrations ranging from 0.12ng/m³ to 7.99ng/m³. Variations in seasonal distribution of different metal elements were influenced by the emission from different pollution sources under varying wind directions. Atmospheric PM_{2.5} primarily contains heavy metals originating from six main sources: cement production (13.8%), metal smelting (24.6%), dust sources (13.7%), sludge disposal (19.4%), traffic sources (9.4%), and a composite source of natural sources and agricultural sources (19.1%). The results of the ecological risk and health analysis evaluation showed that the comprehensive ecological risk level of heavy metals in the study area was classified as "strong". Specifically, Cd

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 国家环境保护区域环境空气质量监测重点实验室开放基金资助项目(2022 年度);国家大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG202142)

* 责任作者, 高级工程师, liuming@scies.org

posed an “extremely high” ecological risk, Sb exhibited a “strong” ecological risk, while the remaining heavy metals posed a “slight” ecological risk. The overall non-carcinogenic risk from heavy metals was relatively low. However, Cr presented a significant carcinogenic risk, and both As and Cd carried certain carcinogenic risks.

Key words: PM_{2.5}; heavy metal; health risks; PMF model; source apportionment

PM_{2.5} 是造成我国大气污染的重要污染物,也是有毒有害物质的重要载体,其由于粒径小、比表面积大且易吸附大量有毒物质能够深入肺泡对人体健康造成不利影响^[1-3].重金属是大气 PM_{2.5} 中的重要毒性组分,可经口腔摄入、呼吸吸入和皮肤接触等多种途径进入人体,也可在环境中迁移和转化,残留于植物表面、水体、土壤和大气中,对植物生长和生态环境造成危害^[4-6].

城市地区由于人口和产业集聚,大气 PM_{2.5} 污染问题突出,大气颗粒物和重金属的源解析一直是研究热点^[1,3,7-8].“十三五”期间,为指导各地科学开展大气 PM_{2.5} 防治工作,我国多数城市均开展了大气颗粒物的源解析,城市地区大气颗粒物及重金属污染的来源已经比较清楚.但随着城市地区对污染源管控的加强和道路交通的改善,较多的生产企业转移至矿产资源丰富的落后乡镇地区,该区域面临着矿山开采和工业生产的双重污染与风险.但目前很少有研究关注该类型区域大气重金属污染和健康暴露风险,这不利于全面认识大气重金属污染和暴露风险的空间分布和区域分布特征.一些典型重金属污染区,如金属冶炼区、集中采矿区由于其排放的重金属污染物种类多、浓度高,严重影响到当地的生态环境和人体健康,也逐渐成为人们关注的焦点^[9-11],如广东大宝山多金属矿区曾经发生过严重的土壤和水体重金属污染事件,当时在全国引起巨大反响,部分污染至今依然没有彻底根除,矿区及周边区域被广东省列为重金属污染防控区.依托大宝山丰富的矿产资源,现在矿区及周边相关矿山开采强度依然较大,同时部分水泥生产企业、金属冶炼企业及危废处理企业在周边布局,大气污染物排放强度较大,可能威胁到当地生态环境和人体健康.目前对大宝山及其周边重金属的研究多集中土壤和水体的污染^[12-14],对大气重金属污染的研究还相对较少.在该地区人口相对集中区域开展大气颗粒物中重金属来源解析和风险评估,可以明确多污染源对当地及周边大气重金属的贡献及影响,评估潜在健康风险,筛选出重点关注的重金属元素,为该区域大气重金

属防治重点提供数据支撑,同时对完善我国典型重金属污染防治区大气污染与健康暴露风险数据库提供重要的数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择广东省韶关市翁源县铁龙镇为研究区域,该镇位于韶关市翁源县西部,与韶关市曲江区交界,是距离大宝山矿区最近和人口最密集的区域,矿产资源丰富,是广东省矿产资源开发活动集中区域.采样点位于铁龙学校楼顶(113.69°E,24.50°N),离地高度约23m,距离该镇唯一主干道—X353县道约120m,周边以居民生活区为主,站点周边3km范围内分布有大型水泥厂(含熟料生产和粉磨站)、危废处理处置中心和铁矿业公司,人为污染源较多,与大宝山多金属矿山主体直线距离约5km(图1).

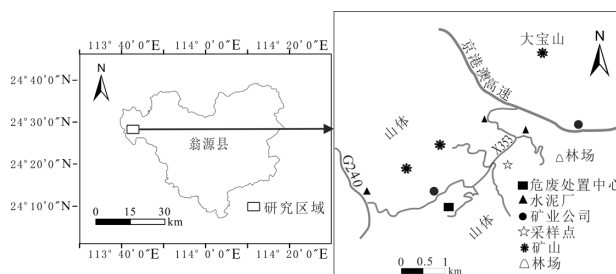


图1 研究区采样点示意

Fig.1 Schematic diagram of the sampling sites in the study area

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集 利用六通道环境空气颗粒物采样器(ZR-3930型,青岛众瑞)进行采样,采样流量设定为16.7L/min.采样膜为特氟龙滤膜(47mm, Whatman),每天采样时长为23h(8:00~次日7:00),每7d采集一个空白样.分夏秋两季采样,采样时间分别为2022年8月20日~2022年9月10日和2022年10月18日~2022年11月8日,采样期间夏季平均气温为27.6℃,以东南风为主,平均风速为1.2m/s;秋季平均气温为20.5℃,主导风向为西南风,平均风速为1.3m/s.采样期间天气以晴朗多云为主,下雨天气占30.2%,以小雨为主.其中10月22日由于天气等不可

抗力因素,样品作废,共计 43 个有效样品.

1.2.2 样品分析 剪取一半特氟龙滤膜样品,放入经过 10%硝酸预处理后的特氟龙消解罐内,加入稀王水 10mL,确保采样面与液面完全接触,预反应 10min,而后将消解罐置于微波消解仪上(MARS, USA)消解.消解温度设定为 200℃,消解时间为 20min.待消解完后,取出消解罐组件,冷却,以超纯水淋洗管壁,加入约 10mL 超纯水,静止 30min 浸提过滤,转移至离心管中并定容至 50mL,使用电感耦合等离子体质谱仪(Nexion 1000)进行测定,测定金属元素包括 Al、Ti、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb 等 15 种.

1.2.3 质量控制与保障 每次采样前需进行流量检查,测试流量与仪器流量相对误差在 5%以内,空白样品低于方法检出限,有证标准物质(ERM-S-510204)各金属元素回收率范围为 72%~113%.

1.2.4 数据分析与处理 PM_{2.5} 和重金属的日均值取采样期间的算术平均值,利用 IBM SPSS statistics 20 软件进行重金属元素的相关性分析,EPA PMF 5.0 软件进行重金属的来源解析.

1.3 正定因子矩阵(PMF)模型源解析

PMF 模型在求解的过程中对因子载荷和因子得分均做非负约束,避免了矩阵分解的结果中出现负值,使得到的源成分谱和源贡献率具有可解释性和明确的物理意义^[15].计算公式为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^n G_{ik} F_{jk} + E_{ij} \quad (1)$$

式中: n 为污染源数量; X_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素的质量浓度; G_{ik} 为 K 源对第 i 个样品的贡献; F_{jk} 为 K 源中第 j 个元素的质量浓度; E_{ij} 为残差矩阵.

目标函数 Q 计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \times \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: Q 为目标函数; n 为样品个数; m 为元素个数; U_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素的不确定度,当元素浓度小于等于检出限(MDL)时,不确定度一般取 MDL 的 5/6,当元素浓度大于检出限时,不确定度计算公式为:

$$U_{ij} = \sqrt{(\delta \times C)^2 + (0.5MDL)^2} \quad (3)$$

式中: δ 为相对偏差,一般取 5%; C 为重金属元素浓度.

1.4 重金属风险评价

1.4.1 潜在生态风险评价 潜在生态风险指数(RI)

法常被用来评价重金属元素对生态系统的潜在风险,以重金属的含量和其对生物的毒性等为前提条件,反映环境中某种重金属的影响和多种重金属的综合影响.通过测定样品中有限数量的重金属含量计算潜在生态风险指数^[16].计算公式如下:

$$E_i = C_i \times \left(\frac{T_i}{C_n} \right) \quad (4)$$

式中: E_i 表示重金属的潜在生态风险系数; T_i 表示重金属 i 的毒性响应系数,其中 Ti、Mn 和 Zn 取 1、Cr 取 2、Cu、Pb 和 Ni 取 5、As 取 10、Mo 取 18、Cd 取 30、Sb 取 40^[6,17]; C_i 代表重金属的实测浓度; C_n 表示对应重金属 i 的背景值,本研究选取广东省 A 层土壤几何平均值为背景值^[18],潜在生态风险分级标准如表 1 所示.

表 1 潜在生态风险分级标准

E_i	RI	等级
<40	<150	轻微
0~40	150~300	中等
80~160	300~600	重度
160~320	>600	强烈
>320	—	极强

注:“—”表示无相关数据.

1.4.2 健康风险评价 大气 PM_{2.5} 中的重金属主要通过口腔摄入、呼吸吸入和皮肤接触等 3 种途径进入人体,从而对人体健康造成危害^[19].本研究采用美国环保署(USEPA)推荐的暴露模型,综合 US EPA 《Exposure Factors Handbook》^[20]和生态环境部《中国人群暴露参数手册》^[20],同时参考郑永立的研究成果^[23].对研究区 PM_{2.5} 中重金属经呼吸吸入途径对人体造成的健康风险进行评估,计算公式如下:

$$ADD = \frac{C \times InhR \times ED \times EF}{AT \times BW} \quad (5)$$

式中:ADD 为经呼吸暴露某种化合物的剂量 mg/(kg·d); C 为重金属元素的实测浓度,ng/m³;InhR 为呼吸速率,m³/d;EF 为暴露频率,d/a;ED 为暴露持续时间, a;BW 为体重, kg;AT 为平均暴露时间, d.

使用重金属元素非致癌风险(HQ)和重金属元素致癌风险(ILCR)作为评估重金属致癌风险和非致癌健康风险的衡量指标,HQ 和 ILCR 的计算公式如下:

$$HQ = ADD/RfD \quad (6)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ \tag{7}$$

$$ILCR = ADD \times SF \tag{8}$$

$$TCR = \sum_{i=1}^n ILCR \tag{9}$$

式中:HT 和 TCR 分别为多种重金属的非致癌风险和致癌风险;*RfD* 为参考剂量,mg/(kg·d);*SF* 为呼吸暴露致癌斜率因子,mg/(kg·d);具体取值如表 2 所示.非致癌风险界定标准如下:*HQ*/*HI*<1,非致癌风险较低;*HQ*/*HI*>1,存在非致癌风险.致癌风险界定标准如下:*ILCR*/*TCR*<10⁻⁶,无明显风险;10⁻⁶<*ILCR*/*TCR*<10⁻⁴,存在一定程度的健康风险; *ILCR*/*TCR*>10⁻⁴,存在显著的致癌风险.

表 2 参考剂量和斜率因子取值

Table 2 Reference dose (RfD) and slope factors (SF) values

项目	RfD ^[6]	SF ^[3]
Cr	2.86×10 ⁻⁵	42
Ni	2.00×10 ⁻²	0.84
Cu	4.00×10 ⁻²	—
Zn	3.00×10 ⁻¹	—
As	3.00×10 ⁻⁴	15.1
Cd	1.00×10 ⁻³	6.3
Pb	3.50×10 ⁻³	—

注:“—”表示无相关数据.

2 结果与讨论

2.1 大气 PM_{2.5} 中重金属浓度分布特征

2.1.1 重金属浓度分布 采样期间研究区大气 PM_{2.5} 日均浓度为 25 μg/m³,秋季 PM_{2.5} 日均浓度(29μg/m³)高于夏季(21μg/m³).PM_{2.5} 中重金属的日均总浓度为 250.54ng/m³,各重金属浓度从大到小排序依次为:Al、Zn、Pb、Mn、As、Cu、Cr、Ti、

Sn、Sb、Cd、Ni、Mo、Ti、Ag(图 2),其中 Al、Zn、Pb 和 Mn 四者浓度之和占所测重金属总量的 87.8%. 平均浓度分别为 :112.70,68.53,26.82 和 11.96ng/m³.与环境空气质量标准(B3095-2012)^[23]比较,As 明显超过了标准值.Al、Ti、Zn、As、Ag、Cd 和 Sb 分别超出广东省土壤背景值的 16.9、9.2、0.9、0.2、0.2、30.6 和 3.3 倍,说明大气沉降作用会对土壤中重金属积累有一定的贡献.与部分工业城市相比(表 3),Cd 分别是沈阳^[2]和上海^[24]的 1.3 倍和 2.3 倍,但低于北京^[1]和成都^[25],Cr 和 As 是贵阳市^[26]的 2.0 和 2.8 倍,Cr、Cd、As 和 Pb 的浓度分别是东莞市^[27]的 1.2、1.7、1.8 和 1.5 倍.与淮南金属矿区^[28]相比,Mn 的浓度相对较低,其余重金属元素浓度相差不大,而广西河池部分有色金属矿区^[29]的重金属浓度相对较高,其中 Pb 的浓度约为本研究的 10 倍,与该矿区以有色金属冶炼为主且铅锌冶炼活动较多有关.

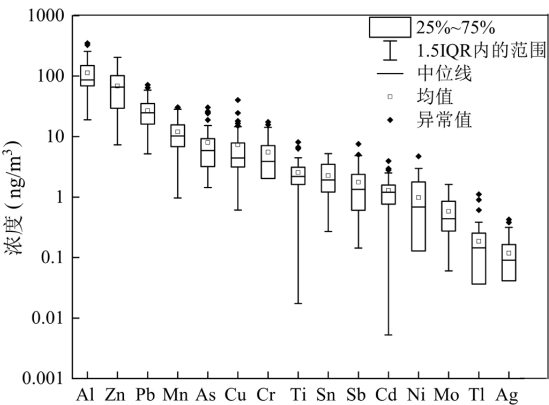


图 2 铁龙镇重金属浓度分布特征
Fig.2 Concentration distribution characteristics of atmospheric heavy metal in Tielong Town

表 3 部分重金属元素与其他污染区重金属浓度比较(ng/m³)

Table 3 Comparison of heavy metal concentrations between certain elements and those in other polluted areas(ng/m³)

Cr	Ti	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	参考文献
5.5	—	12.0	1.0	7.3	68.5	7.8	1.3	26.8	本研究
—	—	—	—	—	—	6	5	500	[24]
10.5	—	44.9	9.5	33.7	236	11.2	2.2	78.6	[1]
6.6	—	36.1	—	9.4	206.4	11.2	1	58.4	[2]
9.3	—	—	—	—	—	67.1	0.56	31.0	[25]
—	56.0	55.9	24.4	48.7	666.6	91.4	3.2	179.9	[26]
2.7	—	34.2	1.3	42.8	82.5	2.8	—	64.2	[27]
4.6	—	19	1.9	11.7	109.8	4.7	0.7	17.9	[28]
—	—	60.04	2.65	10.33	64.96	3.14	0.73	23.15	[29]
29.4	—	28.9	4.7	—	—	58.9	19.1	263.3	[30]

注:“—”表示无相关数据.

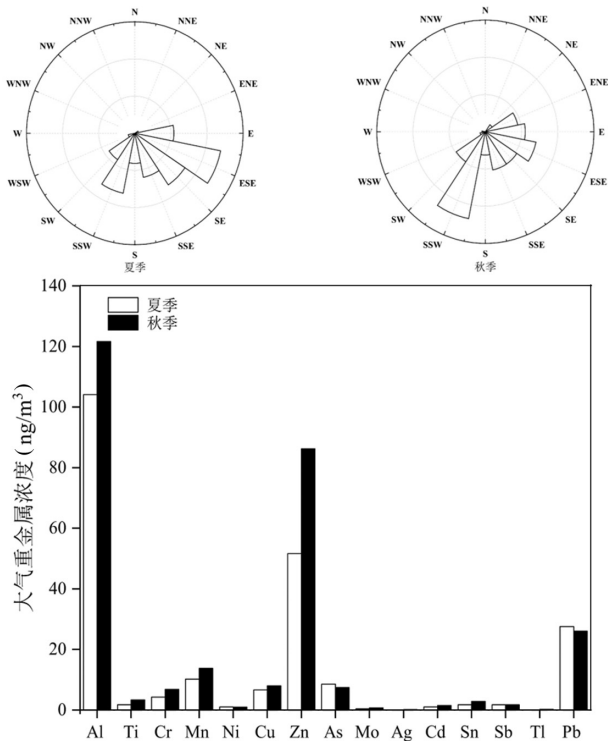


图3 铁龙镇大气重金属的季节分布特征

Fig.3 Seasonal distribution characteristics of atmospheric heavy metal in Tielong Town

2.1.2 重金属浓度季节分布 铁龙镇秋季重金属平均浓度为(281.53±145.3)ng/m³,夏季重金属平均浓度

为(220.96±110.1)ng/m³,秋季约为夏季重金属平均浓度的1.3倍.除As、Sb和Pb外,其他重金属浓度均普遍表现为秋季高于夏季,其中危废焚烧排放的特征元素Ag、Sn和Tl分别高出1.78、1.23和1.24倍,其他元素高出18%~92%.站点的风向监测结果显示,夏季采样期间研究区域主导风向为东南风,其次是西南风,而秋季风向以西南风为主(图3),且存在更高频率的东北风.从污染源分布上看(图1),污染源主要集中在采样点西南与东北方向,如西南面的危废处理中心和金属冶炼厂.因此不同金属元素季节分布差异与不同风向背景下不同污染源的排放影响有关.

2.2 大气PM_{2.5}中重金属来源解析

2.2.1 相关性分析 元素的相关性对识别具体排放源类别具有重要的指示作用,元素之间的相关性越强,说明元素来自同一个源的可能性也越大.从各元素的相关性分析结果来看(表4),多数元素之间均具有较好的相关性($r>0.3, P<0.5$),其中Ti与所有元素均存在相关性,说明该区域大气环境中Ti元素的分布广泛.另外部分元素之间呈现显著相关($r>0.6, P<0.01$),如:Al与Mn、Zn, Ti与Mn、Mo、Ag和Tl, Mn与Zn、Cd和Sn, Zn与Mo、Ag、Cd和Sn, Pb和Sb等,说明上述元素在环境中极大可能存在同一来源.

表4 重金属元素相关性分析结果

Table 4 The results of the correlation analysis of atmospheric heavy metal elements

元素	Al	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Tl	Pb
Al	1														
Ti	0.532**	1													
Cr	0.208	0.487**	1												
Mn	0.687**	0.626**	0.475**	1											
Ni	0.515**	0.426**	0.346*	0.571**	1										
Cu	0.365*	0.463**	0.277	0.502**	0.424**	1									
Zn	0.640**	0.577**	0.436**	0.861**	0.542**	0.589**	1								
As	0.174	0.387*	0.273	0.413**	0.043	0.541**	0.427**	1							
Mo	0.487**	0.666**	0.592**	0.770**	0.468**	0.470**	0.699**	0.393**	1						
Ag	0.307*	0.786**	0.575**	0.515**	0.249	0.461**	0.624**	0.554**	0.691**	1					
Cd	0.479**	0.550**	0.313*	0.736**	0.412**	0.482**	0.793**	0.541**	0.695**	0.566**	1				
Sn	0.566**	0.621**	0.379*	0.734**	0.400**	0.442**	0.698**	0.283	0.648**	0.581**	0.634**	1			
Sb	0.266	0.515**	0.309*	0.467**	0.086	0.550**	0.436**	0.907**	0.430**	0.602**	0.584**	0.381*	1		
Tl	0.141	0.593**	0.294	0.241	0.019	0.227	0.292	0.559**	0.516**	0.788**	0.464**	0.270	0.614**	1	
Pb	0.324*	0.383*	0.023	0.399**	0.222	0.467**	0.315*	0.403**	0.236	0.257	0.462**	0.469**	0.616**	0.225	1

注:*表示P<0.05,**表示P<0.01.加粗字体表示在P<0.01情况下,相关性较强.

2.2.2 PMF 来源解析 利用正定因子矩阵(PMF)模型进行数据处理,得到重金属各因子的元素成分谱(图4),结合相关性分析(表4)对铁龙镇大气重金属

进行来源解析,识别大气PM_{2.5}中重金属的来源.

因子1对Cr、Sb和As贡献居前三位,贡献率分别为58.5%、29.8%和22.4%.Cr是铬工业排放的标

志性重金属元素,而水泥生产过程的各个环节都会不同程度释放出 Cr^[30-31].相关性结果显示,As 和 Sb 显著相关($r=0.907, P<0.01$),其来源具有高度一致性.As 会由燃煤等化石燃料燃烧大量释放,是燃煤的标志性元素^[3,32],大气中的 Sb 主要与煤炭燃烧、工业冶炼和刹车片磨损有关^[33-34],铁龙镇 2km 内分布有大型水泥厂(含熟料生产和粉磨站),粉磨设备中含有 Cr 的研磨体会在粉磨过程中被腐蚀,从而释放到水泥产品中^[30],煅烧是水泥生产的一个重要环节,目前煅烧所采用的燃料以煤炭为主,大量的煤炭燃烧成为 As 和 Sb 的主要来源,因此因子 1 为水泥生产源。

因子 2 对 Mn、Zn、Cd、Sn 和 Pb 的贡献率分别为 37.9%、53.3%、61.1%、31.9%和 30.7%.相关性结果显示,Mn 和 Zn、Cd、Sn、Pb 互相具有一定程度的正相关(相关系数 $r=0.399\sim 0.861, P<0.01$),说明其可能有相同来源.Mn 是钢铁冶炼的示踪元素^[26,35],通常作为合金组分添加到钢铁冶炼中.Zn 与轮胎摩擦有关,是机动车排放的尾气中所含的特征成分,也是金属冶炼的标志性元素^[36-37].Cd 是电镀、金属冶炼、化工等排放的主要金属污染物^[38-39].Pb 可来源于工业生产过程如矿物燃烧、冶金行业等的排放^[1].Sn 能同几乎所有的金属制成合金,故常被用作于金属冶炼的添加金属^[40],因此因子 2 为金属冶炼源。

因子 3 对 Ni 的贡献率最高为 86.5%,对 Cr(23.1%)和 Ti(25.4%)也有少量贡献.Ni 可作为因子 3 的标志性元素.相关性结果显示,Ti 与 Cr、Ni 均具有一定程度正相关($r=0.426, r=0.487, P<0.01$).Ni 的来源多种多样,如刹车、轮胎磨损、燃料和道路磨损等^[19],同时 Ni 也是自然来源的标志性元素,主要来源于成土母质,道路和工业扬尘^[1,41].Cr 可来源于地表扬尘,也可来源于工业活动产生的扬尘^[39].Ti 是造岩元素,也是土壤来源的标志性元素^[42].铁龙镇周边有多个矿山,矿石开采和运输过程会产生大量扬尘,因此因子 3 为扬尘源。

因子 4 对 Tl 的贡献率最高为 81.8%,其次是 Ag 为 43.2%.Tl 可作为因子 4 的标志性元素,工业上 Tl 的主要来源是含铊矿物采选活动、含铊矿石冶炼活动、铊及铊化物的生产活动^[43].铁龙镇附近的危废处理处置中心,具有污泥综合处置车间和焚烧处置车间,Tl 是其烟尘中排放的主要重金属污染物,同时焙

烧渣扬尘和原料矿石破碎粉尘也是 Tl 的来源之一^[44-45].相关性结果显示 Tl 和 Ag 具有较强相关性(相关系数 $r=0.788, P<0.01$),Ag 多来自于化石燃料的燃烧和工业冶金^[46],大宝山多金属矿区含有部分 Ag 矿,在开采加工生产过程中会产生大量含 Ag 的废水和废渣,废渣经焚烧综合处置时 Ag 会随着燃烧的尾气排放到大气环境中,因此因子 4 为污泥处置源。

因子 5 对 Pb 的贡献率为 40.36%,Sb 的贡献率为 29.17%.Pb 主要来源于含铅汽油的燃烧,自 2000 年起国家禁止使用含铅汽油,由此产生的 Pb 排放逐渐减少,但是汽车其它零部件的磨损依然是 Pb 的排放来源,如润滑油及其它腐蚀性物质的燃烧,机动车尾气 and 轮胎的摩擦^[46-47],Sb 被大量使用在刹车片中用作阻燃剂,当汽车刹车时,轮胎与地面摩擦会导致大量的 Sb 元素被释放到大气中^[34,48].相关性结果显示,Sb 和 Pb 具有较强相关性($r=0.616, P<0.01$),可能有相同来源.有研究表明,在民用车辆保有量高且交通拥挤的城市,如北京、上海、西安等地,Sb 和 Pb 这两种元素往往会呈现出更高的浓度^[19,49],采样点位于铁龙镇主干道 X353 县道旁,该县道为铁龙镇唯一主干道,机动车尤其是货车车辆运输频繁,因此因子 5 为交通源。

因子 6 对 Al、Ti、Cu、Mo 和 Sn 的贡献率分别为 39.4%、33.3%、50.4%、27.2 和 34.4%.相关性结果显示,Al 和 Ti 具有一定相关性($r=0.532, P<0.01$).其中 Al 是典型的地壳元素,在地壳中的含量仅次于氧和硅,一般被认为是自然来源^[15].Ti 是土壤的主量元素,主要来源于自然土壤^[42,50].Mo 和 Sn 之间也具有较强相关性($r=0.648, P<0.01$),其来源可能具有一致性.Mo 是植物体必须的微量元素之一,对于农业收成的提高具有重要作用,因此常被用于肥料生产的添加剂^[51].Sn 主要用于制造合金,同时也常被用于生产农药、除草剂和杀虫剂,含 Sn 农用品的过量使用会使 Sn 在土壤中积累,然后经土壤-大气交换进入大气中^[52].Cu 与 Mo、Sn 均具有一定程度的正相关.Cu 主要来源于轮胎磨损、机动车尾气、燃煤和金属冶炼^[53],同时 Cu 作为微量元素也是农药的主要成分,农业投入品的不合理使用会造成土壤中 Cu 的积累,进而释放到大气中^[54].铁龙镇以农业为主要经济来源,拥有农林并举的国营林场—铁龙林场,农药化肥等农业用品使用较多因子 6 为自然和农业复合。

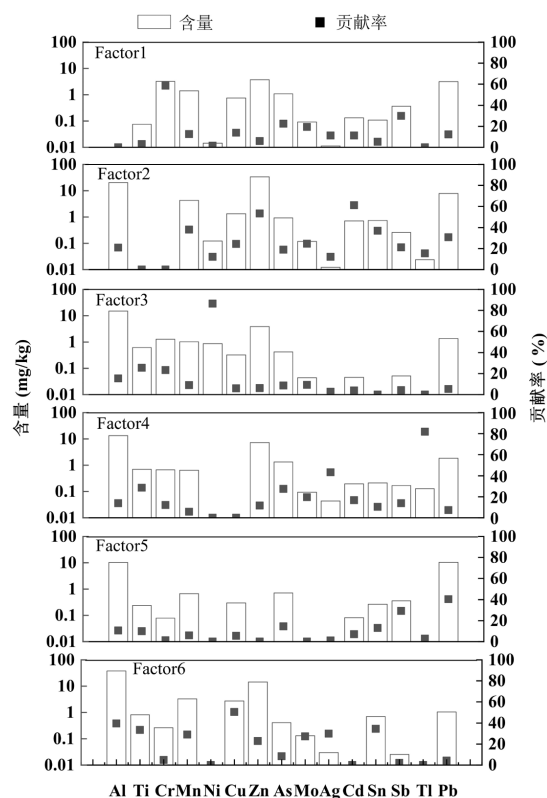


图4 大气重金属 PMF 源解析贡献

Fig.4 Contribution of atmospheric heavy metal by PMF sources apportionment

综上,铁龙镇大气 $PM_{2.5}$ 中重金属的主要来源为金属冶炼(24.6%)、污泥处置(19.4%)、自然和农业复合源(19.1%)、水泥生产(13.8%)、扬尘源(13.7%)和交通源(9.4%)(图 5)。其中金属冶炼、污泥处置源和水泥生产等工业企业源合计占比 63.5%,排放的主要重金属为 Cr、Cd、Pb 和 Tl,对区域大气中重金属污染具有显著贡献。

从不同金属的来源贡献来看(图 4),Pb 主要来源于交通源(40.4%)和金属冶炼(30.6%);Cr 主要来源于水泥生产(58.5%)和扬尘源(23.2%);Cd 主要来源于金属冶炼(61.1%)和污泥处置(16.6%);Ti 主要来源于扬尘(25.4%)和自然源(33.3%);As 主要来源于水泥生产(22.4%)和污泥处置(27.4%);Sn 主要来源于金属冶炼(36.8%)和农业源(34.4%);Sb 主要来源于水泥生产(29.8%)和交通源(29.2%)。Al 和 Ni 分别主要来源于自然源(39.4%)和扬尘(86.5%);Mn 和 Zn 都主要来源于金属冶炼,占比分别为 37.86%和 53.34%;Tl 和 Ag 都主要来源于污泥处置,占比分别为 81.9%和 43.2%;Cu 和 Mo 都主要来源于农业源,占比分别为 50.4%和 27.2%。

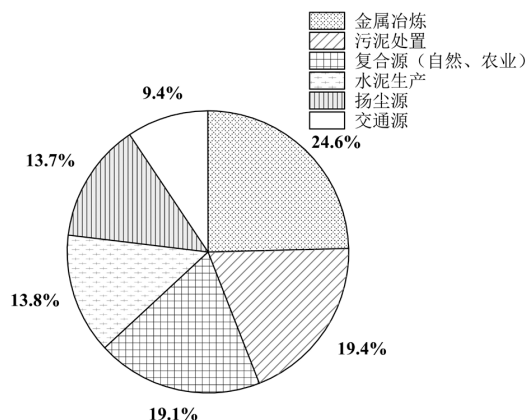


图5 不同来源对大气中重金属贡献率

Fig.5 Contribution rate of heavy metals in the atmosphere from different sources

2.3 重金属污染评价

2.3.1 潜在生态风险评价 采样期间大气 $PM_{2.5}$ 的单因子生态风险和综合生态风险指数如表 5 所示,综合生态风险指数为 1153.09,其对应的潜在生态风险等级为强烈生态风险。Cd 的单因子生态风险指数 E_i 为 946.57(3.83~2874.91),远高于限值 320,对应的生态风险等级为极强,是综合生态风险 RI 的主要贡献者,贡献高达 82.1%。Sb 单因子生态风险指数 E_i 为 172.08,对应的生态风险等级为强烈,贡献率排在第二位(14.9%)。剩余 8 种重金属的 E_i 分别为 As(11.76)>Ti(10.19)>Pb(4.50)>Cu(3.47)>Zn(1.89)>Mo(1.75)>Ni(0.51)>Cr(0.31),均小于最低限值 40,生态风险等级为轻微。总体上铁龙镇 Cd 的生态风险等级最强,Cd 和 Sb 对综合生态风险 RI 的贡献超过 95%。我国部分城市和地区 Cd 的生态风险等级也比较高^[8,27,32],徐静等^[55]研究发现,北京城郊大气 $PM_{2.5}$ 中重金属的生态风险 Cd 的生态风险指数最高,城区和郊区分别为 7976.54 和 7778.72,潜在危害程度均为极强。徐伟嘉等^[27]发现,东莞市大气 $PM_{2.5}$ 中重金属的综合潜在生态风险等级为强烈,其中 Cd 为最大贡献者,其潜在生态风险指数为 612,对总生态风险指数贡献 77.6%。Cd 的生态风险等级较高可能与 Cd 所选的背景标准值(0.041)较低、Cd 的毒性响应系数较大有关。但 Cd 可能对生态环境带来的潜在危害不容忽视。因此在重金属潜在生态风险评价时应重点关注大气 $PM_{2.5}$ 中 Cd 的生态风险^[32-55]。

2.3.2 健康风险评价 研究区 10 种重金属的非致癌风险系数(HQ)和致癌风险系数(ILCR)结果(表 6)显示,总体上研究区重金属的致癌风险显著($2.76 \times$

10^{-4}),非致癌风险较低(3.99×10^{-2}).不同重金属元素对所有人群的总致癌风险(TCR)由大到小排序依次为 Cr(1.77×10^{-4})> 10^{-4} >As(9.26×10^{-5})>Cd(6.26×10^{-6})> 10^{-6} >Ni(6.33×10^{-7}),其中 Cr 对于儿童的致癌风险大于 10^{-4} ,具有显著致癌风险,是致癌风险的主要贡献者,贡献率为 78.11%;对于成人的致癌风险介于 $10^{-4}\sim 10^{-6}$ 之间,具有一定致癌风险.As 和 Cd 对不同人群的致癌风险介于 $10^{-4}\sim 10^{-6}$ 之间,具有一定的致癌风险;Ni 的总致癌风险小于 10^{-6} ,致癌风险较低,可以忽略.重金属的总致癌风险表现为儿童(1.65×10^{-4})高于成人(1.11×10^{-4}),可能与儿童处于生长发育阶段且身体未发育完全,对 PM_{2.5} 中重金属更敏感有关^[56].

不同重金属元素对所有人群的非致癌风险系数(HI)均小于 1,非致癌风险较低,可以忽略.非致癌风险系数(HI)由大到小排序依次为 Cr(2.80×10^{-2})>Mn(5.79×10^{-3})>As(3.87×10^{-3})>Pb(1.11×10^{-3})>Sb(8.54×10^{-4})>Cd(1.88×10^{-4})>Al(4.09×10^{-5})>Zn(3.32×10^{-5})>Cu(2.65×10^{-5})>Ni(7.12×10^{-6}),其中 Cr 与 Ni 的非致癌风险相差 5 个数量级,Cr 是非致癌风险的主要贡献者,贡献率为 84.2%,重金属的非致癌风险均表现为成人(2.91×10^{-2})大于儿童(1.08×10^{-2}),可能与成人户外活动较儿童更多,呼吸量更大有关^[53].结合 Cr 的总致癌风险较高,因此应当重点关注铁龙镇地区大气 PM_{2.5} 中 Cr 对不同人群的健康风险.

表 5 单因子生态风险和综合生态风险指数
Table 5 Single-factor index and comprehensive ecological risk index

元素	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sb	Pb	RI
平均值	10.19	0.31	0.07	0.51	3.47	1.89	11.76	1.75	946.57	172.08	4.5	1153.09
最大值	32.31	0.98	0.19	2.45	19.2	5.64	44.52	4.85	2874.91	738.33	11.99	3735.37
最小值	0.07	0	0.01	0	0.29	0.2	2.11	0.18	3.83	13.96	0.87	21.5

表 6 重金属健康风险评价
Table 6 Assessment of health risks associated with heavy metals

元素	儿童 ILCR	成人 ILCR	TCR	儿童 HQ	成人 HQ	HI
Cr	1.06×10^{-4}	7.14×10^{-5}	1.77×10^{-4}	7.56×10^{-3}	2.04×10^{-2}	2.80×10^{-2}
Al	—	—	—	1.11×10^{-5}	2.98×10^{-5}	4.09×10^{-5}
Mn	—	—	—	1.57×10^{-3}	4.22×10^{-3}	5.79×10^{-3}
Sb	—	—	—	2.31×10^{-4}	6.23×10^{-4}	8.54×10^{-4}
Ni	3.78×10^{-7}	2.55×10^{-7}	6.33×10^{-7}	1.93×10^{-6}	5.19×10^{-6}	7.12×10^{-6}
Cu	—	—	—	7.16×10^{-6}	1.93×10^{-5}	2.65×10^{-5}
Zn	—	—	—	8.97×10^{-6}	2.42×10^{-5}	3.32×10^{-5}
As	5.53×10^{-5}	3.73×10^{-5}	9.26×10^{-5}	1.05×10^{-3}	2.82×10^{-3}	3.87×10^{-3}
Cd	3.74×10^{-6}	2.52×10^{-6}	6.26×10^{-6}	5.08×10^{-5}	1.37×10^{-4}	1.88×10^{-4}
Pb	—	—	—	3.01×10^{-4}	8.11×10^{-4}	1.11×10^{-3}
Total	1.65×10^{-4}	1.11×10^{-4}	2.76×10^{-4}	1.08×10^{-2}	2.91×10^{-2}	3.99×10^{-2}

注:“—”表示无相关数据.

3 结论

3.1 研究区大气重金属平均浓度范围为 0.12~112.7ng/m³,其中 Al、Zn、Pb、Mn 居前 4 位,占已测金属总浓度的 87.8%,Ni、Mo、Tl 和 Ag 居后四位.秋季重金属浓度高于夏季,重金属元素的季节分布特征与不同风向背景下不同污染源排放有关.

3.2 研究区大气重金属主要有 6 个来源,分别为水泥生产(13.8%)、金属冶炼(24.6%)、扬尘源(13.7%)、污

泥处置(19.4%)、交通源(9.4%)、自然和农业的复合源(19.1%),需要重点关注工业源中的金属冶炼和污泥处置,同时关注 Cd、Zn 和 Tl 等重金属的排放.另外有多种来源的 Pb、Sb、Cd 和 Cr 也是关注的重点.

3.3 潜在生态风险结果显示,研究区综合重金属潜在生态风险等级为强烈.各重金属的 E_i 分别为 Cd(946.57)>Sb(172.08)>As(11.76)>Ti(10.19)>Pb(4.50)>Cu(3.47)>Zn(1.89)>Mo(1.75)>Ni(0.51)>Cr(0.31)>Mn(0.07),Cd 对应的生态风险等级为极强,Sb 对应

的生态风险等级为强烈,Cd 和 Sb 是综合生态风险 RI 的主要贡献者,贡献超过 90%,应当重点关注,Cd 主要来源于金属冶炼(61.1%)和污泥处置(16.6%),Sb 主要来源于水泥生产(29.8%)和交通源(29.2%)。

3.4 研究区重金属总致癌风险为 2.76×10^{-4} 。总非致癌风险为 3.99×10^{-2} 。Cr 的总致癌风险大于 10^{-4} ,具有显著致癌风险;As 和 Cd 的总致癌风险介于 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 之间,具有一定的致癌风险;所有重金属的非致癌风险均较低,Cr 在致癌风险和非致癌风险中都是主要贡献者应该重点关注,Cr 主要来源于水泥生产(58.5%)和扬尘源(23.2%)。

参考文献:

- [1] 乔宝文,刘子锐,胡 波,等.北京冬季 $PM_{2.5}$ 中金属元素浓度特征和来源分析 [J]. 环境科学, 2017,38(3):876-883.
Qiao B W, Liu Z R, Hu B, et al. Concentration characteristics and sources of trace metals in $PM_{2.5}$ during winter time in Beijing [J]. Environmental Science, 2017,38(3):876-883.
- [2] 任万辉,李云丹,苏枫枫,等.沈阳市大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评价 [J]. 环境化学, 2021,40(4):1029-1037.
Ren W H, Li Y D, Su Z Z, et al. Pollution characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ in Shenyang [J]. Environmental Chemistry, 2021,40(4):1029-1037.
- [3] 王 伟,孔少飞,刘海彪,等.南京市春节前后大气 $PM_{2.5}$ 中重金属来源及健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2016,36(7): 2186-2195.
Wang W, Kong S F, Liu H B, et al. Sources and risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ around 2014 Spring Festival in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2016,36(7):2186-2195.
- [4] Gao Y, Ji H. Microscopic morphology and seasonal variation of health effect arising from heavy metals in $PM_{2.5}$ and PM_{10} One-year measurement in a densely populated area of urban Beijing [J]. Atmospheric Research, 2018,212:213-226.
- [5] Chang Y, Huang K, Xie M, et al. First long-term and near real-time measurement of trace elements in China's urban atmosphere: temporal variability, source apportionment and precipitation effect [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018,18(16):11793-11812.
- [6] 郭墨霞,耿 红,张晋宏,等.山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析 [J]. 环境科学, 2018,39(3):1004-1013.
Guo Z X, Geng H, Zhang J H, et al. Ecological and health risks of trace heavy metals in atmospheric $PM_{2.5}$ collected in Wuxiang Town, Shanxi Province [J]. Environmental Science, 2018,39(3):1004-1013.
- [7] 沈建东,周玉强,王蕴赞,等.杭州西湖景区 $PM_{2.5}$ 中重金属来源及健康风险评价 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(2):199-203.
Shen J D, Zhou Y Q, Wang Y B, et al. Sources and healthy risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ of West Lake scenic area in Hangzhou [J]. Environmental Pollution And Prevention, 2020,42(2): 199-203.
- [8] 袁 鸾,徐伟嘉,岳珂利,等.广州不同环境空气 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征与风险评价 [J]. 中国环境监测, 2021,37(6):91-100.
Yuan L, Xu W J, Yue D L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of metals in ambient $PM_{2.5}$ in Guangzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2021,37(6):91-100.
- [9] 李剑锋,冯李霄,张遵遵,等.湖南某矿区土壤重金属污染及健康风险评价 [J]. 中国地质, 2023,50(3):897-910.
Li J F, Feng L X, Zhang Z Z, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution in soil of a Mining area in Hunan Province [J]. Geology in China: 2023,50(3):897-910.
- [10] 王昌宇,张素荣,刘继红,等.雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评价 [J]. 中国地质, 2021,48(6):1697-1709.
Wang C Y, Zhang S R, Liu J H, et al. Pollution level and risk assessment of heavy metals in a metal smelting area of Xiong'an New District [J]. Geology in China, 2021,48(6):1697-1709.
- [11] Xu D M, Fu R B, Liu H Q, et al. Current knowledge from heavy metal pollution in Chinese smelter contaminated soils, health risk implications and associated remediation progress in recent decades: A critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,286:124989.
- [12] 王国保,鲁 荔,韦高玲,等.大宝山污灌区水体与土壤重金属污染分析与评价 [J]. 环境科学与技术, 2016,39(S2):444-448.
Wang B G, Lu L, Wei G L, et al. Analysis and evaluation of heavy metal pollution for water and soils in dabaoshan sewage irrigation area [J]. Environmental Science & Technology, 2016,39(S2):444-448.
- [13] 黄 飞,王泽煌,蔡昆争,等.大宝山尾矿库区水体重金属污染特征及生态风险评价 [J]. 环境科学研究, 2016,29(11):1701-1708.
Huang F, Wang Z H, Cai Z K, et al. Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in water of tailing zone in Dabaoshan mine, Guangdong Province, China [J]. Research of Environmental Sciences 2016,29(11):1701-1708.
- [14] 魏洪斌,罗 明,向 垒,等.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 [J]. 环境科学, 2023,44(6):3573-3584.
Wei H B, Luo M, Xiang L, et al. Analysis on the distribution characteristics and influence mechanism of migration and transformation of heavy metals in mining wasteland [J]. Environmental Science, 2023,44(6):3573-3584.
- [15] 魏 青,陈文怡,金麟先,等.枣庄市大气 $PM_{2.5}$ 重金属元素健康风险评价及污染源解析 [J]. 中国粉体技术, 2020,26(6):69-78.
Wei Q, Chen W Y, Jin L X, et al. Health risk assessment and source analysis of heavy metal elements in $PM_{2.5}$ in Zaozhuang city [J]. China Powder Science and Technology, 2020,26(6):69-78.
- [16] 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,等.南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 [J]. 环境科学, 2018,39(7):3118-3125.
Tian C H, Yang R Z, Gu Li Zha E Y L H M, et al. Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing [J]. Environmental Science, 2018,39(7):3118-3125.
- [17] 徐争启,倪师军,虞先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术, 2008,31(2):112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of Heavy Metals Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index [J]. Environmental Science & Technology, 2008,31(2):112-115.
- [18] 国家环境保护局主持,中国环境监测总站主编.中国土壤元素背景值 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:329-483.
Hosted by the National Environmental Protection Administration and edited by the China Environmental Monitoring Station. Background

- values of soil elements in China. [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1999:329-483.
- [19] 李宏艳,赵志新,何秋生,等.山西介休焦化区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属的污染特征、关键毒性组分与来源 [J]. 中国环境科学, 2023,43(4): 1528-1538.
- Li H Y, Zhao Z X, He Q S, et al. Pollution characteristics, key toxic components and sources of $\text{PM}_{2.5}$ bound heavy metals in coking polluted area of Jiexiu, Shanxi [J]. China Environmental Science: 2023, 43(4):1528-1538.
- [20] US EPA. Exposure factors handbook (2011Edition) [R]. Washington: National Center for Environmental Assessment, 2011.
- [21] 生态环境部.中国人群暴露参数手册 [M]. 成人卷.北京:中国环境科学出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection. Chinese Population Exposure Parameter Manual [M]. Adult Volume. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [22] 郑永立,温汉辉,蔡立梅,等.基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评价 [J]. 环境科学, 2023,44(9):5242-5252.
- Zheng Y L, Wen H H, Cai L M, et al. Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model [J]. Environmental Science, 2023,44(9):5242-5252.
- [23] GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S].
- GB 3095-2012 Ambient air quality standards [S].
- [24] 田俊杰,黄成,赵秀阁,等.上海市典型地区环境空气可吸入颗粒物中重金属污染水平及健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2019,39(11):3924-3931.
- Tian J J, Huang C, Zhao X G, et al. Pollution and health risk assessment of heavy metals in the inhalable particulate matter in the typical areas, Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(11): 3924-3931.
- [25] 杨怀金,杨德容,叶芝祥,等.成都西南郊区春季 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 [J]. 环境科学, 2016,37(12):4490-4503.
- Yang H J, Yang D R, Ye Z X, et al. Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in $\text{PM}_{2.5}$ at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring [J]. Environmental Science, 2016,37(12):4490-4503.
- [26] 王显钦,费学海,杨员,等.贵阳市花溪城区 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征、来源及健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2023,43(6): 110-118.
- Wang X Q, Fei X H, Yang Y, et al. Pollution characteristics source apportionment and health risk assessment of heavy metal elements in $\text{PM}_{2.5}$ collected in Huaxi Urban Areas, Guiyang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(6):110-118.
- [27] 徐伟嘉,林满,岳玎利,等.东莞大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素污染特征与生态风险 [J]. 环境科学与技术, 2021,44(S1):155-160.
- Xu W J, Lin M, Yue D L, et al. The Pollution Characteristic and Ecological Risk of Atmospheric Fine-particle-bound Metals in Dongguan [J]. Environmental Science & Technology, 2021,44(S1): 155-160.
- [28] 张松,郑刘根,陈永春,等.淮南矿区道路环境大气颗粒物重金属污染特征及来源解析 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(7):912-916,928.
- Zhang S, Zheng L G, Chen Y C, et al. Characteristics and source apportionment of heavy metals in atmospheric particles at roadside of Huainan mining area [J]. Environmental Pollution And Prevention, 2020,42(7):912-916,928.
- [29] 毕文婕,方小珍,吴建会,等.有色金属矿区 PM_{10} 中重金属的污染特征与来源 [J]. 环境污染与防治, 2017,39(6):640-643.
- Bi W J, Fang X Z, Wu J H, et al. Characteristics and source analysis of PM_{10} heavy metals in non-ferrous mining area [J]. Environmental Pollution And Prevention, 2017,39(6):640-643.
- [30] 刘骥,潘果,覃金凤,等.水泥中水溶性铬(VI)和总铬的主要来源分析 [J]. 水泥技术, 2022,(1):23-26.
- Liu J, Pan G, Qin J F, et al. Investigation on Mainly Sources of Water-soluble Chromium(VI) and the Total Chromium for Cement [J]. Cement Technology, 2022,(1):23-26.
- [31] 朱慧萍,方凤满,林跃胜,等.荻港镇某水泥厂周边不同介质中重金属含量、来源及潜在生态风险分析 [J]. 环境化学, 2017,36(12):2711-2718.
- Zhu H P, Fang F M, Lin Y S, et al. Distribution, source apportionment and potential ecological risk assessment of heavy metals in different environmental media around a cement factory in Digang Town [J]. Environmental Chemistry, 2017,36(12):2711-2718.
- [32] 林晓辉,赵阳,樊孝俊,等.南昌市秋季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素富集特征及来源分析 [J]. 环境科学, 2016,37(1):35-40.
- Lin X H, Zhao Y, Fan X J, et al. Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in $\text{PM}_{2.5}$ in Autumn in Nanchang City [J]. Environmental Science, 2016,37(1):35-40.
- [33] Liang F, Zhang G, Tan M, et al. Lead in children's blood is mainly caused by coal-fired ash after phasing out of leaded gasoline in Shanghai [J]. Environmental science & technology, 2010,44(12): 4760-4765.
- [34] Zhao S, Tian H, Luo L, et al. Temporal variation characteristics and source apportionment of metal elements in $\text{PM}_{2.5}$ in urban Beijing during 2018-2019 [J]. Environmental Pollution, 2021,268:115856.
- [35] Farahani V J, Soleimani E, Pirhadi M, et al. Long-term trends in concentrations and sources of $\text{PM}_{2.5}$ -bound metals and elements in central Los Angeles [J]. Atmospheric Environment, 2021,253:118361.
- [36] Lu X, Pan H, Wang Y. Pollution evaluation and source analysis of heavy metal in roadway dust from a resource-typed industrial city in Northwest China [J]. Atmospheric pollution research, 2017,8(3):587-595.
- [37] Zhao C, Wang Y, Su Z, et al. Respiratory exposure to $\text{PM}_{2.5}$ soluble extract disrupts mucosal barrier function and promotes the development of experimental asthma [J]. Science of The Total Environment, 2020,730:139145.
- [38] 庄马展.厦门大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素特征及重金属健康风险评价 [J]. 环境化学, 2016,35(8):1723-1732.
- Zhuang M Z. Characteristic of elements in $\text{PM}_{2.5}$ and health risk assessment of heavy metals at Xiamen [J]. Environmental Chemistry, 2016,35(8):1723-1732.
- [39] 刘建伟,晁思宏,陈艳姣,等.北京市不同年龄人群 $\text{PM}_{2.5}$ 载带重金属的健康风险 [J]. 中国环境科学, 2018,38(4):1540-1549.
- Liu J W, Chao S H, Chen Y J, et al. Health risk of $\text{PM}_{2.5}$ -bound heavy metals for different age population in Beijing, China [J]. China Environmental Science, 2018,38(4):1540-1549.
- [40] Zhang X, Ma G, Liu M, et al. Removal of residual element tin in the ferrous metallurgy process: A review [J]. Metals, 2019,9(8):834.
- [41] 蔡立梅,马瑾,周永章,等.东莞市农业土壤重金属的空间分布特征

- 及来源解析 [J]. 环境科学, 2008,29(12):3496-3502.
- Cai L M, Mang J, Zhou Y Z, et al. Multivariate Geostatistics and GIS-based Approach to Study the Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Agricultural Soil in the Pearl River Delta, China [J]. Environmental Science, 2008,29(12):3496-3502.
- [42] 李曾曾,王 平,丁文慈,等.2019 年三亚市 $PM_{2.5}$ 微量元素的源解析和健康评价 [J]. 环境化学, 2023,42(7):2282-2291.
- Li Z Z, Wang P, Ding W C, et al. Source analysis and health assessment of $PM_{2.5}$ trace elements in Sanya City in 2019 [J]. Environmental Chemistry, 2023,42(7):2282-2291.
- [43] 曹晓凡.我国工业铊污染产排节点与治理 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2023,(1):131-137.
- Cao X F. Production and Discharge Nodes and Treatment Technologies of Industrial Thallium Pollution in China [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023,(1):131-137.
- [44] 沈伯雄,郭彩霞,吴顺伟,等.焚烧污泥重金属迁移的研究进展 [J]. 电站系统工程, 2008,(1):15-16,40.
- Shen B X, Guo C X, Wu S W, et al. Research Progress of Heavy Trace Metal Migration During the Incineration of Sludge [J]. Power System Engineering, 2008,(1):15-16,40.
- [45] 王春霖,张永波,陈永亨,等.重金属铊在典型排放源周边大气颗粒物中的形态及来源分析 [J]. 环境保护科学, 2016,42(2):114-119.
- Wang C L, Zhang Y B, Chen Y H, et al. Speciation and Source Analysis of Heavy Metal Thallium in Airborne Particles around the Typical Pollution Emission Sources [J]. Environmental Protection Science, 2016,42(2):114-119.
- [46] 姚 青,韩素芹,蔡子颖.天津采暖期大气 $PM_{2.5}$ 中重金属元素污染及其生态风险评价 [J]. 中国环境科学, 2013,33(9):1596-1600.
- Yao Q, Han S Q, Cai Z Y, et al. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in $PM_{2.5}$ during heating season in Tianjin [J]. China Environmental Sciences, 2013,33(9):1596-1600.
- [47] De Silva S, Ball A S, Huynh T, et al. Metal accumulation in roadside soil in Melbourne, Australia: Effect of road age, traffic density and vehicular speed [J]. Environmental Pollution, 2016,208:102-109.
- [48] 杨似玉,闫晓娜,彭 靖,等.郑州市两城区大气 $PM_{2.5}$ 中金属、类金属污染特征及健康风险评估 [J]. 山东大学学报(医学版), 2021,59(12):70-77.
- Yang S Y, Yan X N, Peng J, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of metals and metalloids in $PM_{2.5}$ in two districts of Zhengzhou [J]. Journal of Shandong University (Health Sciences), 2021,59(12):70-77.
- [49] 邱雨荷,王 森,刘婉玉,等.西安市大气 $PM_{2.5}$ 中元素的污染特征及其来源分析 [J]. 环境科学与技术, 2023,46(1):161-170.
- Qiu Y H, Wang S, Liu W Y, et al. Characteristics and Sources of Elements in $PM_{2.5}$ in Xi'an City [J]. Environmental Science & Technology, 2023,46(1):161-170.
- [50] Luo H, Wang Q, Guan Q, et al. Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,422:126878.
- [51] 宋清泉,徐夕博,吴泉源,等.基于 PMF 模型的土壤重金属定量源解析及环境风险评价 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022,45(1):76-83.
- Song Q Q, Xu Y B, Wu Q y, et al. Quantitative Analysis of Environmental Risk of Heavy Metal Sources in Soil Based on PMF Model [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2022,45(1):76-83.
- [52] 杨 宇,周佳俊,郭婷婷,等.基于小流域尺度的矿区农田土壤重金属源解析 [J]. 农业环境科学学报, 2023,42(9):1956-1963.
- Yang Y, Zhou J J, Guo T T, et al. Source analysis of heavy metal pollution in farmland soil in a mining area based on a small watershed scale [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023,42(9):1956-1963.
- [53] 李颖泉,赵保卫,牛武江,等.兰州市主城区大气降尘和表层土壤重金属污染特征与评价 [J]. 安全与环境学报, 2020,20(4):1440-1448.
- Li Y Q, Zhao B W, Niu W J, et al. Special heavy metal pollution features in atmospheric dust - fall and top soil in main urban districts of Lanzhou [J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(4):1440-1448.
- [54] 何 佳,时 迪,王贝贝,等.10 种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2970-2982.
- He J, Shi D, Wang B B, et al. Ecological risk assessment and water quality standard evaluation of 10 typical metals in eight basins in China [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2970-2982.
- [55] 徐 静,李杏茹,张 兰,等.北京城郊 $PM_{2.5}$ 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 [J]. 环境科学, 2019,40(6):2501-2509.
- Xu J, Li X R, Zhang L, et al. Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing [J]. Environmental Science, 2019,40(6):2501-2509.
- [56] 吴庆瑶,张丽娟,丁 平,等.常州某纺织工业园区周边 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中重金属源解析及健康风险评估 [J]. 环境工程技术学报, 2023,13(1):114-121.
- Wu Q Y, Zhang L J, Ding P, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ and PM_{10} around a textile industrial park in Changzhou [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(1):114-121.

作者简介: 吴凯章(1998-),男,江西抚州人,长江大学硕士研究生,研究方向为大气污染防治.1767804157@qq.com.