

遵义市 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价

张 勇^{1,2}, 陈荣祥^{1,2}, 保玉心^{1,2}, 陈 卓³

- (1. 遵义医科大学分析测试中心, 贵州 遵义 563000;
2. 遵义市理化分析测试工程技术研究中心, 贵州 遵义 563000;
3. 贵州师范大学化学与材料科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 为了解遵义市 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及健康风险, 于 2018 年 6 月至 2019 年 5 月采集了遵义市 2 个采样点共 120 个 PM_{2.5} 样品, 利用电感耦合等离子体质谱仪测定样品中 Zn、Pb、Mn、Cu、V、Cr、As、Cd、Ni 和 Co 10 种重金属含量, 并采用富集因子法、美国环保局人体暴露模型讨论了颗粒物中重金属的来源和健康风险。结果表明, 遵义市 PM_{2.5} 中重金属污染处于国内中等水平, Cr 严重超标; 多数元素呈现出冬季>春季>秋季>夏季的季节变化特征; PM_{2.5} 中重金属可能主要来源于燃煤、机动车尾气及工业源等人为排放源; Mn 对成年人、儿童均产生较高的非致癌健康风险, Cr 对人体有明显的致癌健康风险, 应引起相关部门的重视。

关键词: PM_{2.5}; 重金属; 污染特征; 健康风险评价; 遵义市

中图分类号: X513

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.06.030

Health Risk Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals from PM_{2.5} in Zunyi

ZHANG Yong^{1,2}, CHEN Rongxiang^{1,2}, BAO Yuxin^{1,2}, CHEN Zhuo³

- (1. Analytical and Testing Center, Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China;
2. Research Center for Physical and Chemical Analysis and Testing Engineering Technology, Zunyi 563000, China;
3. College of Chemistry and Material Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: To investigate the pollution characteristics and health risk of heavy metals from PM_{2.5} in Zunyi, 120 PM_{2.5} samples were collected at two sampling sites from June 2018 to May 2019. The contents of ten heavy metals (including Zn, Pb, Mn, Cu, V, Cr, As, Cd, Ni and Co) were tested by ICP-MS. The Enrichment Factor method and the US EPA's human exposure model were used to analyze the pollutant sources and evaluate the human health risk. The results indicated that the concentrations of heavy metals from PM_{2.5} were in the moderate level, and Cr was seriously polluted. The concentrations of the main pollutants exhibited an obviously seasonal variation, which was Winter > Spring > Autumn > Summer. The heavy metals mainly came from the vehicle emission, coal combustion and industrial emissions. There was a great non-cancer risk with a high concentration of Mn for the adults and children. Cr appeared the obvious cancer-risk for the human. Consequently, relevant departments of the government should pay attention to this situation.

Keywords: PM_{2.5}; Heavy Metal; Pollution Characteristics; Health Risk Assessment; Zunyi

CLC number: X513

PM_{2.5}(空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$)粒径小, 比表面积大, 易富集空气中有毒有害物质, 对人体健康具有严重的危害性^[1-2]。作为 PM_{2.5} 中的重要无机成分, 重金属可以通过呼吸作用随颗粒物进入人体肺部并沉积, 对人体健康产生极大危害, 研究

表明, Pb 会导致神经和血液系统的疾病, 导致婴幼儿的认知能力障碍^[3], As、Cr、Cd、Ni 和 Co 等重金属对人体有致畸、致癌、致突变等毒害作用^[4-5]。因此, 研究 PM_{2.5} 中重金属具有重要意义。

近年来, 国内对 PM_{2.5} 中重金属的污染特征、

收稿日期: 2020-04-02

基金项目: 贵州省科技计划基金(黔科合基础[2018]1111); 遵义市科技计划项目(遵市科合社字(2017)10号); 遵义医科大学硕士启动资金(F-901)

作者简介: 张 勇(1988-), 男, 硕士、实验师。研究方向: 大气污染防治。E-mail: 787484866@qq.com

引用格式: 张 勇, 陈荣祥, 保玉心, 等. 遵义市 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 179-184.

来源及健康风险进行了大量的研究^[6-7],但这些研究主要集中在一些大城市(特别是省会城市),对级别较低的城市研究较少。遵义市为西南典型的喀斯特山区城市(三线城市),煤炭资源丰富,能源结构主要以燃煤为主,随着经济的快速增长和城市化进程加快,机动车保有量迅速增加,面临着较为严重的大气污染问题。目前,针对遵义市颗粒物中重金属污染特征的相关研究较为鲜见,仅孙哲等^[8]研究了遵义市 PM₁₀ 中重金属污染特征,而对 PM_{2.5} 中重金属的研究尚未开展。因此,本研究通过采集遵义市大气 PM_{2.5} 样品,分析样品中含量较高、毒性较大的重金属的污染特征及健康风险,以期对遵义市大气环境污染问题的研究提供一定数据支撑及理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在遵义市设置 2 个采样点位:遵义医科大学大连路校区(市区)和新蒲大学城(郊区)。市区采样点周围有医院、居民区、交通发达,在一定程度上能反应市区污染情况,郊区采样点周围没有高楼遮挡,无局部污染源。采样器放置于教学楼楼顶,距离地面高度约 15 m。

本研究采样时段为 2018 年 6 月至 2019 年 5 月,按月采集样品,市区每月采集 6 个样品,郊区每月采集 5 个样品。每个样品采样时间 24 h(当日 9:00 至次日 9:00),除去天气及仪器故障原因的样品,共获有效样品 120 个,市区和郊区分别为 65 个,55 个。采样设备为武汉天虹中流量 TH-150A (100 L/min)采样器,采样滤膜为石英滤膜(whatman, $\Phi=90$ mm)。2018 年 6~8 月代表夏季、2018 年 9~11 月代表秋季、2018 年 12 月至 2019 年 2 月代表冬季、2019 年 3~5 月代表春季。

1.2 样品分析

取 1/4 样品滤膜剪碎后放入聚四氟乙烯消解罐中,加入亚沸过的 HNO₃ 1.5 mL 和 0.5 mL HF,于 170 °C 高压密闭消解 16 h,冷却后将消解液蒸干,再加入 0.3 mL HNO₃、0.2 mL 20 ng/mL Rh 内标溶液及 0.1 mL 超纯水进行二次消解并定容。采用电感耦合等离子体质谱仪(PQ-MS Elite jena)对样品中 Zn、Pb、Mn、Cu、V、Cr、As、Cd、Ni 和 Co 10 种重金属进行分析,其中,Zn、Pb、Mn、Cu 和 V 属于

非致癌重金属,Cr、As、Cd、Ni 和 Co 属于致癌重金属。

1.3 健康风险评价

利用美国环保局建议的健康风险评价模型,对儿童、成年人(成年男性、女性)进行重金属的风险评价。研究表明,大气环境中污染物主要以呼吸途径进入到人体^[9],因此,本研究主要考虑经呼吸暴露对人体造成的健康风险。暴露剂量计算见式(1)。

$$\text{ADD/LADD} = \frac{c \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式(1)中:ADD/LADD 分别为非致癌物质日均暴露剂量、致癌物质终身日均暴露剂量,mg/(kg·d);c 为重金属浓度,mg/m³;IR 为呼吸速率,m³/d;EF 为暴露频率,d/a;ED 为暴露年限,a;BW 为体重,kg;AT 为平均暴露时间,d,相关暴露参数采用文献^[10]中经过本土化的推荐值。

根据 LADD 及 ADD 暴露剂量值,分别使用终生增量致癌风险(ILCR)、危险系数(HQ)对 PM_{2.5} 样品中的重金属进行致癌和非致癌健康风险评估,ILCR 和 HQ 的计算见式(2~3)。

$$\text{ILCR} = \text{LADD} \times \text{SF} \quad (2)$$

$$\text{HQ} = \text{ADD}/\text{RfD} \quad (3)$$

式(2~3)中:SF 为致癌斜率系数,(kg·d)/mg;RfD 为参考剂量,mg/(kg·d),本文所研究重金属的 SF 和 RfD 见表 1。当 ILCR 风险值在 10⁻⁶~10⁻⁴ 范围时,认为该重金属不具备致癌风险,当 HQ>1 时,认为存在非致癌风险;当 HQ≤1 时,风险很小或忽略不计^[10]。

表 1 重金属经呼吸途径进入人体的 SF 及 RfD 值

致癌重金属	SF/(kg·d)·mg ⁻¹	非致癌重金属	RfD/mg·(kg·d) ⁻¹
Cr	42.00	Zn	3.00×10 ⁻¹
Ni	0.84	Mn	1.43×10 ⁻⁵
As	15.10	Pb	3.50×10 ⁻³
Cd	8.40	Cu	4.00×10 ⁻²
Co	9.80	V	7.00×10 ⁻³

注:SF为致癌斜率系数;RfD为参考剂量。

1.4 质量控制和质量保证

为除去石英滤膜中有机质等杂质的干扰,采样前将滤膜放置于马弗炉中灼烧(4 h, 450 °C),然后放入干燥器内冷却并称重,置于自封袋保存备用。采样过程中,每月清洗一次切割头和校准一次仪器

采样流量。重金属测定后均进行空白校正, 消除实验误差。为了保证仪器的稳定性, 每 15 个样品做 1 套标样, 重新绘制标准曲线。采用 GSS-7 土壤标准物质进行全程质量控制, 各元素的回收率均在允许范围内。

2 结果与讨论

2.1 重金属浓度水平

研究期间遵义市 PM_{2.5} 质量浓度均值为(47.6±19.3) μg/m³, 低于我国现行《环境空气质量标准: GB3095—2012》二级日均浓度限值 75 μg/m³。

大连路、新蒲大学城采样点重金属总质量浓度分别为 545.61 ng/m³ 和 357.96 ng/m³, 分别占 2 采样点 PM_{2.5} 浓度的 1.10% 和 0.79%, 可见, 大连路采样点颗粒物中重金属污染水平较新蒲大学城采样点严重。大连路采样点位于市区, 人口多、交通密度大和汽车尾气污染严重, 且高楼密集不利于污染物的扩散稀释, 同时市区范围内存在一定数量的工厂, 包括遵义钛厂、贵州钢绳厂和遵义碱厂等, 其中

遵义钛厂为国内最大、唯一的全流程海绵钛生产企业, 这应是大连路站采样点污染较重的原因; 新蒲大学城位于郊区, 属于文教区, 交通密度小, 地势开阔, 有利于污染物的扩散稀释, 因此污染程度较轻。

PM_{2.5} 中 Zn、Pb、Mn、Cu、Cr、As、Cd、Ni、V 和 Co 的平均质量浓度分别为: 213.25、78.50、64.43、49.46、38.32、2.92、2.05、1.23、1.11 和 0.54 ng/m³ 见表 2, 各元素浓度总和占 PM_{2.5} 质量浓度的 0.95%。其中 As、Cd、Pb 未超过《环境空气质量标准: GB3095—2012》的标准限值, 由于 Cr 中毒为 Cr⁶⁺引起, 利用 Cr⁶⁺占总铬比为 0.13^[11], 因此, Cr 元素实际超标 200 倍。其原因一方面可能是土壤扬尘对其贡献较大, 遵义市 A 层土壤中 Cr(95.9 mg/kg) 背景值较高; 另一方面是大气环境中 Cr 的来源与冶金、电镀和颜料等工业有关, 目前贵州省的工业布局主要集中在贵阳和遵义等城市, 且遵义市工业主要以冶金、电镀、有色金属和电子为主, 因此, 从工业布局来看, 遵义市存在 Cr 的工业污染源, Cr 污染主要来源于工业污染。

表 2 遵义市 PM_{2.5} 中重金属浓度

ng·m⁻³

元素	大连路 (n=65)			新蒲大学城 (n=55)			遵义市 (n=120)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
Zn	137.83	412.00	253.41	105.63	320.45	173.09	105.63	452.00	213.25
Pb	32.92	373.07	104.55	13.34	168.29	52.45	13.34	373.07	78.50
Mn	20.86	289.08	77.22	14.22	128.55	51.63	14.22	289.08	64.43
Cu	19.93	148.96	54.41	15.44	98.95	44.51	15.44	148.96	49.46
Cr	24.65	90.56	45.12	12.22	81.08	31.52	12.22	90.56	38.32
Ni	1.09	15.74	4.31	0.33	5.65	1.52	0.33	1.09	2.92
As	0.89	5.64	2.55	0.58	4.20	1.54	0.58	5.64	2.05
Cd	0.66	2.86	1.68	0.28	1.51	0.78	0.28	2.86	1.23
V	0.62	3.39	1.73	0.21	1.05	0.48	0.21	3.39	1.11
Co	0.33	0.96	0.63	0.17	0.82	0.44	0.17	0.96	0.54
元素总浓度	239.78	1342.26	545.61	162.42	810.55	357.96	162.42	1367.61	451.81

《环境空气质量标准: GB3095—2012》中只给出了部分重金属的限值, 为进一步了解遵义市 PM_{2.5} 中重金属的污染程度, 本文将研究数据和已报道的国内其他城市重金属数据进行了比较, 见表 3。

表 3 可知, 遵义市 PM_{2.5} 中重金属总浓度低于北京、天津和郑州等大城市, 高于厦门市, 表明遵义市 PM_{2.5} 中重金属的污染程度处于国内中等水平。

但遵义市 PM_{2.5} 中 Cr 元素的浓度较高, 仅次于黄石市, 是厦门市的 5 倍, 因此, 遵义市 PM_{2.5} 中重金属 Cr 的污染应引起重视。

2.2 重金属季节变化特征

将 2 个采样点不同季节重金属浓度求平均值, 得到遵义市 PM_{2.5} 中重金属季节分布, 见图 1。

图 1 可见, 各元素浓度主要呈现冬季>春季>秋

季>夏季,冬、春季污染较重,夏、秋季污染较轻,与研究期间 PM_{2.5} 质量浓度变化趋势一致,呈现出明显的季节变化特征,这主要与遵义市气候特征及污染源排放有关^[18]。遵义市属亚热带湿润季风气候,冬季低温少雨,大气边界层稳定,易形成逆温天气,不利于污染物的扩散稀释,且冬季煤燃烧等人为活

动增多,导致污染物浓度增加;另一方面,近年来,遵义市城市扩张较快,新蒲新区建设,使裸露地表增加,春季容易刮起地面扬尘以及春耕秸秆燃烧均可导致污染物的累积;而夏季降雨充沛,降水对颗粒物有明显的清除作用,并且夏季大气边界层较高,有利于污染物扩散稀释。

表 3 不同城市 PM_{2.5} 中重金属的含量

城市	t/a	Zn	Pb	Mn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	V	Co
北京 ^[12]	2011~2012	331.3	212.6	85.9	45.1	9.04	-	17.10	-	4.90	-
天津 ^[13]	2011	1144.0	101.0	130.0	64.0	23.00	-	3.00	1.00	-	5.00
郑州 ^[14]	2017	209.8	100.0	157.0	29.2	11.70	8.80	17.70	16.10	7.80	3.80
黄石 ^[15]	2015	256.4	129.6	33.4	52.8	62.40	4.07	34.40	3.41	2.79	-
厦门 ^[16]	2014	220.0	72.3	29.4	26.0	7.50	5.37	-	10.20	10.90	-
南昌 ^[17]	2013	279.0	106.0	43.0	19.0	20.00	150.00	10.00	5.00	9.00	4.00
本研究	2018~2019	213.3	78.5	64.4	49.5	38.30	2.92	2.05	1.23	1.11	0.54

注: -表示未检测。

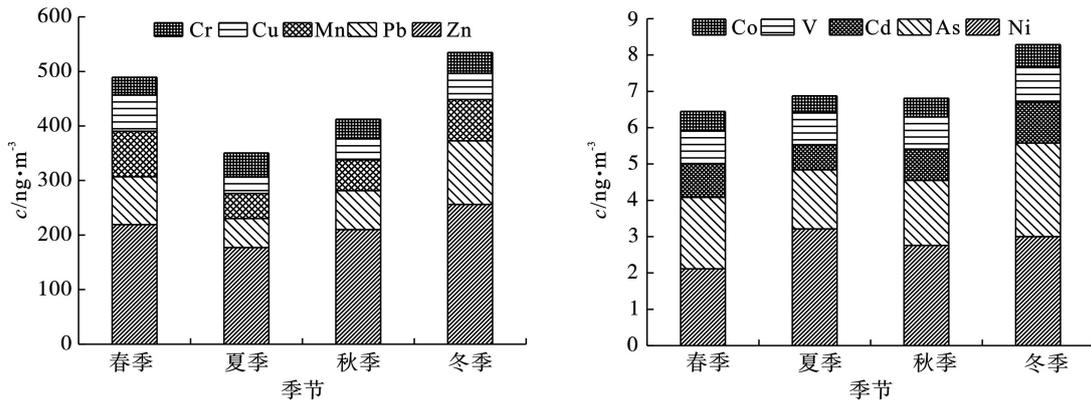


图 1 遵义市 PM_{2.5} 中重金属质量浓度的季节分布

从元素组分来看, Cr 和 Ni 具有相同的季节变化特征,夏季>冬季>秋季>春季,夏季平均浓度最高,且与研究期间颗粒物峰值出现的时间明显不同,因此可推断,夏季有某种特殊的污染源对大气环境中 Cr 和 Ni 的浓度贡献显著。V 和 Co 的季节变化不明显,说明大气环境中 V 和 Co 的来源稳定。

2.3 富集规律

富集因子(EF)用于表征颗粒物中元素相对于地壳元素的富集程度,进而判断元素的来源^[19],其计算见式(4)。

$$EF = (C_i/C_r)_{\text{颗粒物}} / (C_i/C_r)_{\text{地壳}} \quad (4)$$

式(4)中: C_i 为元素质量浓度, C_r 为参比元素质量浓度, Al 和 Ti 是常用的参比元素,考虑到贵州省铝矿资源丰富且有大型铝厂,因此选用 Ti 作为参

比元素,以贵州省 A 层土壤元素背景值作为背景浓度^[20]。若 EF<10, 通常认为该元素没有富集;若 EF>10, 认为该元素被富集且主要来源于人为源^[19]。遵义市 PM_{2.5} 中重金属的富集情况,见图 2。

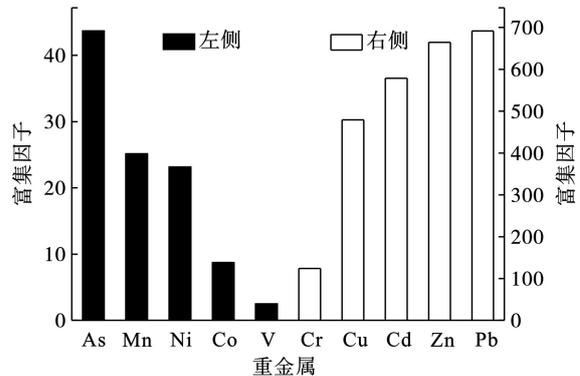


图 2 遵义市 PM_{2.5} 中重金属的富集因子

图 2 可见, V 和 Co 的富集因子分别为 2.5 和

8.7, 表明这 2 种元素在 PM_{2.5} 中没有富集, Ni、Mn、As、Cr、Cu、Cd、Zn 和 Pb 的富集因子范围为 23.2 ~ 691.3, 其中 Cr、Cu、Cd、Zn 和 Pb 的 EF_S 均 >100, 表明这些元素受到明显的人为污染。研究表明, 颗粒物中 Pb 主要来源于燃煤和机动车排放^[21]; Zn 主要来源于机动车尾气的排放及工业排放^[22]; Cd 主要来源于工业过程中产生的废气、燃煤及垃圾燃烧^[23]; Cu 主要来源于冶金和燃油^[22]。因此, 遵义市

PM_{2.5} 中重金属的污染可能主要来源于燃煤、机动车尾气以及工业排放等人为排放源。

2.4 健康风险评价

根据公式(1)~(3)计算得遵义市大气颗粒物 PM_{2.5} 经呼吸途径对成年人和儿童的健康风险评价数据见表 4, 由于忽略皮肤、消化道和手口接触途径产生的健康风险, 表 4 中健康风险值比实际偏小。

表 4 遵义市 PM_{2.5} 中重金属致癌和非致癌健康风险值

项目	重金属	大连路			新蒲大学城		
		成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
ILCR	Cr	2.36×10 ⁻⁴	2.03×10 ⁻⁴	5.19×10 ⁻⁵	1.65×10 ⁻⁴	1.42×10 ⁻⁴	3.63×10 ⁻⁵
	Ni	4.51×10 ⁻⁷	3.88×10 ⁻⁷	9.92×10 ⁻⁸	1.59×10 ⁻⁷	1.37×10 ⁻⁷	3.50×10 ⁻⁸
	As	4.80×10 ⁻⁶	4.12×10 ⁻⁶	1.05×10 ⁻⁶	2.90×10 ⁻⁶	2.49×10 ⁻⁶	6.37×10 ⁻⁷
	Cd	1.76×10 ⁻⁶	1.51×10 ⁻⁶	3.87×10 ⁻⁷	8.17×10 ⁻⁷	7.01×10 ⁻⁷	1.80×10 ⁻⁷
	Co	7.70×10 ⁻⁷	6.61×10 ⁻⁷	1.67×10 ⁻⁷	5.38×10 ⁻⁷	4.62×10 ⁻⁷	1.18×10 ⁻⁷
HQ	Zn	2.46×10 ⁻⁴	2.11×10 ⁻⁴	2.70×10 ⁻⁴	1.68×10 ⁻⁴	1.44×10 ⁻⁴	1.84×10 ⁻⁴
	Mn	1.57	1.35	1.73	1.26	1.08	1.38
	Pb	8.69×10 ⁻³	7.46×10 ⁻³	9.55×10 ⁻³	4.36×10 ⁻³	3.74×10 ⁻³	4.79×10 ⁻³
	Cu	3.96×10 ⁻⁴	3.40×10 ⁻⁴	4.35×10 ⁻⁴	3.24×10 ⁻⁴	2.78×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻⁴
	V	7.19×10 ⁻⁵	6.17×10 ⁻⁵	7.90×10 ⁻⁵	1.99×10 ⁻⁵	1.71×10 ⁻⁵	2.19×10 ⁻⁵

表 4 可知, 重金属的致癌风险表现为成年男性 > 成年女性 > 儿童; 非致癌风险为儿童 > 成年男性 > 成年女性, 与国内其他研究结论^[24-25] 一致。成年男性致癌风险较高可能与男性户外活动时间较多, 更易受到重金属影响有关; 而儿童非致癌风险较高可能与儿童免疫力较差, 对污染物更为敏感有关。对于 5 种致癌重金属, 两采样点的致癌健康风险均表现为 Cr > As > Cd > Co > Ni, 其中 Cr 对成年男性及女性的 ILCR 值均超过阈值 10⁻⁴, 表明遵义市 PM_{2.5} 中 Cr 污染对人体存在明显的致癌风险, As 和 Cd 的 ILCR 值在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴ 范围内, 其余元素的 ILCR 值 < 10⁻⁶, 无致癌风险。对于 5 种非致癌重金属, Mn 对成年男性、女性和儿童的 HQ 值均 > 1, 表明遵义市 PM_{2.5} 中 Mn 对不同年龄段人群存在非致癌风险。研究表明, 长期接触 Mn 会引起类似帕金森综合症的神经症状^[26], 而 Mn 主要来源为土壤扬尘和交通污染, 目前遵义市城市化建设加快, 新蒲新区建设和棚户区改造使得裸露地表增加, 导致扬尘污染加重, 因此, 要加强对扬尘污染和交通污染的控制。

其余元素 HQ 值均 < 1, 表明对人体健康风险可忽略。

从不同采样点来看, 大连路采样点重金属的致癌风险、非致癌风险均高于新蒲大学城采样点, 与遵义市 PM_{2.5} 中重金属浓度的空间变化特征一致, 说明重金属的浓度水平对其健康风险起主导作用。

3 结论

1) 遵义市 PM_{2.5} 中重金属污染处于国内中等水平, 大连路采样点污染较新蒲大学城采样点更为严重。As、Cd、Pb 年均浓度未超过《环境空气质量标准: GB3095—2012》的标准限值, 利用六价铬占总铬比的 0.13, 可知遵义市颗粒物中 Cr 浓度严重超标。

2) 遵义市 PM_{2.5} 中各元素浓度主要呈现冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的季节变化特征, 与研究期间 PM_{2.5} 质量浓度变化趋势一致, 主要与遵义市气候条件及污染源排放有关。

3) 富集因子分析表明, 遵义市 PM_{2.5} 中人为源元素为 Ni、Mn、As、Cr、Cu、Cd、Zn 和 Pb, 其污染

可能主要来自于燃煤、机动车尾气以及工业排放等人为排放源。

4) 健康风险评价结果显示, 对于致癌元素, Cr 对成年男性、女性存在明显的致癌风险, 其污染应当引起重视; 对于非致癌元素, Mn 对不同年龄段人群存在较高的非致癌风险, 其余元素非致癌风险可忽略。

参考文献

- [1] POPE III C A, EZZATI M, DOCKERYD W. Fine particulate air pollution and life expectancies in the United States: the role of influential observations[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2013, 63(2): 129 - 132.
- [2] HU D, JIANG J. PM_{2.5} pollution and risk for lung cancer: A rising issue in China[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2014, 5(8): 731.
- [3] GARZA A, VEGA R, SOTO E. Cellular mechanisms of lead neurotoxicity[J]. *Medical Science Monitor*, 2006, 12(3): RA57 - RA65.
- [4] ZAHRA N, KALIM I. Perilous effects of heavy metals contamination on human health[J]. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 2017, 18(1): 1 - 17.
- [5] AMIN S N S M, AZID A, SANI M S A, et al. Heavy metals in the air: Analysis using Instrument, air pollution and human health-a review[J]. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2018, 14(4): 490 - 494.
- [6] WANG F, ZHOU Y, MENG D, et al. Heavy metal characteristics and health risk assessment of PM_{2.5} in three residential homes during winter in Nanjing, China[J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 339 - 348.
- [7] CHENG Z, CHEN L J, Li H H, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 619-620: 621 - 629.
- [8] 孙哲, 李金娟, 郭兴强, 等. 遵义市 PM₁₀ 中元素污染特征、来源及生态风险评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2014, 26(3): 25 - 29.
- [9] 王永晓, 曹红英, 邓雅佳, 等. 大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(9): 3575 - 3584.
- [10] 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 等. 某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(4): 1238 - 1244.
- [11] DAI T G, LUO Y H, LIANG K. Contents and form of heavy metal in PM₁₀ of different diameters[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 38(4): 87 - 91.
- [12] 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011—2012 北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析[J]. *环境科学*, 2017, 38(10): 4054 - 5060.
- [13] 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.
- [14] 何瑞东, 张铁舜, 陈永阳, 等. 郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4774 - 4782.
- [15] 虎彩娇, 成海容, 李锦伦, 等. 黄石市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中元素特征及重金属生态风险评价[J]. *环境化学*, 2018, 37(1): 138 - 145.
- [16] 庄马展. 厦门大气 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评估[J]. *环境化学*, 2016, 35(8): 1723 - 1732.
- [17] 林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 等. 南昌市秋季大气 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.
- [18] 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 北京市大气颗粒物中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度及其化学组分的特征分析[J]. *环境化学*, 2008, 27(1): 117 - 118.
- [19] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241 - 265.
- [20] 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. 1990.329 - 490.
- [21] WANG J, HU Z, CHEN Y, et al. Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 68: 221 - 229.
- [22] 闫广轩, 张朴真, 王晨, 等. 郑州市采暖期与非采暖期中重金属来源及潜在健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(8): 2811 - 2820.
- [23] 胡菁, 杨成阁, 郭军, 等. 贵阳市秋、冬季大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征[J]. *环境化学*, 2014, 33(3): 530 - 531.
- [24] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM_{2.5} 中有毒重金属污染特征及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(7): 2225 - 2232.
- [25] 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 等. 北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(3): 997 - 1003.
- [26] 唐茉莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(8): 2006 - 2015.