

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018102802

李越洋, 姬亚芹, 张军, 等. 盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 元素污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2019, 38(8): 1891-1898.

LI Yueyang, JI Yaqin, ZHANG Jun, et al. Pollution characteristics and source apportionment of elements in PM_{2.5} during winter in Panjin City[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(8): 1891-1898.

盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 元素污染特征及来源解析

李越洋¹ 姬亚芹^{1*} 张军² 赵静琦¹ 王士宝¹ 张蕾¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津, 300350; 2. 盘锦市环境保护监测站, 盘锦, 124010)

摘要 为研究盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 中元素污染特征及其来源, 于 2017 年 1 月采集盘锦市 3 个点位 PM_{2.5} 样品, 通过富集因子以及因子分析法对盘锦市 PM_{2.5} 中载带的元素进行污染特征分析及来源解析. 结果表明, 盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 日均浓度顺序为开发区>第二中学>文化公园, 日均浓度值超过环境空气质量标准 (GB3095—2012) 二级标准限值 (75 μg·m⁻³) 的天数分别为 9、4、7 d; 各元素浓度平均值由高到低依次为 Al>Ca>Fe>Na>Mg>Zn>Pb>Mn>V>As>Cu>Ni>Cr>Cd, 其中 Al、Ca、Fe、Na、Mg、Zn 和 Pb 元素质量浓度之和占有所有检测元素浓度的 96.85%. 富集因子分析表明, Cd、Zn、Pb、As、Cu 属于极强富集, Ni、V 属于强烈富集, Cr、Ca 和 Mg 属于显著富集, Mn、Na 属于中度富集, Fe 属于轻微富集. 因子分析结果表明, 盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 污染元素主要来源为煤烟尘、道路交通尘、燃油尘和土壤扬尘.

关键词 PM_{2.5}, 元素, 污染特征, 富集因子, 来源解析.

Pollution characteristics and source apportionment of elements in PM_{2.5} during winter in Panjin City

LI Yueyang¹ JI Yaqin^{1*} ZHANG Jun² ZHAO Jingqi¹ WANG Shibao¹ ZHANG Lei¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin, 300350, China;

2. Panjin Environmental Monitoring Center, Panjin, 124010, China)

Abstract: In order to explore the sources and characteristics of elements in PM_{2.5} during winter of Panjin City, PM_{2.5} samples were collected at three monitoring sites in January 2017. Pollution characteristics and source of elements component in PM_{2.5} were analyzed by enrichment factor (EF) and factor analysis (FA). The results showed that the order of PM_{2.5} concentration was Development Area > Secondary Middle School > Cultural Park. There were 9, 4 and 7 days at the three sites respectively in which the 24-hour average mass concentration exceeded the secondary standard limit of the ambient air quality standard (GB3095—2012) (75 μg·m⁻³) during the sampling period. The mass concentrations of elements in PM_{2.5} were, in descending order, Al, Ca, Fe, Na, Mg, Zn, Pb, Mn, V, As, Cu, Ni, Cr, Cd. The proportion of mass concentrations of Al, Ca, Fe, Na, Mg, Zn, Pb accounted for 96.85% of the total determined elements mass concentration. The enrichment factors of Cd, Zn, Pb, As, Cu were extremely high, and Ni and V were very high. The enrichment factors of Cr, Ca, Mg were significant, and Mn, Na were moderate, Fe was slightly. The results of FA showed that the main sources of the pollution elements in PM_{2.5} during winter in Panjin were coal combustion, vehicle exhaust, fuel oil and soil dust.

Keywords: PM_{2.5}, elements, pollution characteristics, enrichment factors, source apportionment.

2018 年 10 月 28 日收稿 (Received: October 28, 2018).

* 通讯联系人, E-mail: jiyaqin@nankai.edu.cn

Corresponding author, E-mail: jiyaqin@nankai.edu.cn

PM_{2.5}(大气细颗粒物)作为我国很多城市的大气首要污染物,影响人体健康^[1-2]、大气能见度^[3-4]等.吸附在大气颗粒物上的金属元素可以通过呼吸等途径进入人体,从而对人体健康造成影响;同时,也能通过干湿沉降进入土壤、水体,进而影响整个生态系统.因此,加强对大气中金属元素的污染水平研究至关重要.

PM_{2.5}主要来源于扬尘、煤烟尘、机动车尾气、生物质燃烧等^[5-8],不同的污染源排放的 PM_{2.5}中金属元素的组成与含量不同.通过开展大气颗粒物来源解析可以了解城市大气颗粒物的主要来源及其组分特征,为制定有效的控制措施服务.大气颗粒物来源解析通常采用的方法包括受体模型法、源清单法和扩散模型模拟法^[9],其中 FA(因子分析)是一种快速、定性分析来源的受体模型法,广泛用于城市大气颗粒物来源解析研究中.乔宝文等^[10]基于 FA 得出北京市冬季 PM_{2.5}中金属元素主要来源于燃煤和生物质燃烧、交通和工业排放以及地面扬尘;胡鸣等^[11]基于 FA 得出上海市冬季 PM_{2.5}主要来源于燃煤、自然尘、燃油以及机动车;陈源等^[12]基于 FA 得出重庆市城区细颗粒物的主要来源是二次粒子、燃煤、建筑/道路扬尘、土壤尘和工业尘.受能源结构、工业结构、地理位置以及气象条件等因素的影响,不同城市 PM_{2.5}中载带的组分特征有所不同,大气污染的特征也存在差异,因此需对各城市开展相应的研究.

盘锦市位于辽宁省中南部,辽河三角洲的中心地带,下辖兴隆台区、双台子区、大洼区和盘山县共三区一县,是我国重要的石化基地,形成了以油气开采为龙头,以石油化工、合成树脂和装备制造等为主的工业体系.根据 2017 年盘锦市环境状况公报显示,2017 年盘锦市 PM_{2.5}浓度年均值超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)的 0.14 倍,在轻度污染及以上的超标天中,以 PM_{2.5}为首要污染物的天数占 42.7%.而北方地区大气颗粒物污染一般冬季较其他季节重.因此,本研究通过采集盘锦市 2017 年 1 月的 PM_{2.5}样品,利用富集因子法分析 Cd、Zn、Pb、As 等 13 种元素的富集特征,利用因子分析初步诊断冬季大气 PM_{2.5}中元素的主要来源,以期为制定盘锦市空气质量改善方案提供依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

本研究采样点位设置于盘锦市开发区(KF)、文化公园(WH)和第二中学(ZX).采样时段为 2017 年 1 月 4 日—1 月 17 日,采样设备为武汉天虹公司的中流量颗粒物采样器,采样滤膜为聚丙烯滤膜(Φ90 mm).采样前使用流量校准仪对采样仪器流量进行校准,采样流量设定为 100 L·min⁻¹,每日上午 8:00—9:00 开始采样;采集 23±1 h,每日在文化公园点位采 1 张空白滤膜用于扣除空白值,采集有效滤膜共 56 张;采样结束后,将滤膜置于-4 ℃冰柜中保存.

1.2 样品分析

使用美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析样品中的 Na、Cr、Cu、V、Zn、Ni、As、Pb、Mn 和 Cd 共 10 种元素,用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES)分析 Al、Mg、Ca 和 Fe 共 4 种元素.

1.3 样品采样和分析的质量控制

采样前将空白聚丙烯滤膜置于 60 ℃烘箱中 2 h,采样前后均将滤膜放入恒温恒湿天平室平衡 3 d,以降低温度、湿度等对称量的影响.采样前后对每张滤膜进行连续称重,直到满足前后两次称量结果差值小于±0.005 mg 为止,取平均值.

样品分析过程中,各元素测定值的相对误差和标准偏差均需小于 5%,以满足分析方法要求;每测定 10 个样品,要进行单点校准和空白测定,所有检测结果均要满足质控要求.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 PM_{2.5}浓度特征

图 1 显示了盘锦市 3 个监测点大气 PM_{2.5}日均质量浓度变化情况.由图 1 可见,3 个监测点位 PM_{2.5}日均浓度变化趋势基本一致,但开发区 PM_{2.5}日均浓度高于另外两个监测点,与开发区工业活动对 PM_{2.5}

排放的影响较大有关. 开发区、文化公园和第二中学冬季 PM_{2.5} 浓度均值分别为 103.86±54.51、69.10±35.26、72.05±37.21 μg·m⁻³. 根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 二级标准日均浓度限值 (75 μg·m⁻³) 可知, 冬季开发区 PM_{2.5} 浓度超标 1.38 倍; 3 个监测点 PM_{2.5} 日均值 14 d 中分别有 9、4、7 d 超标.

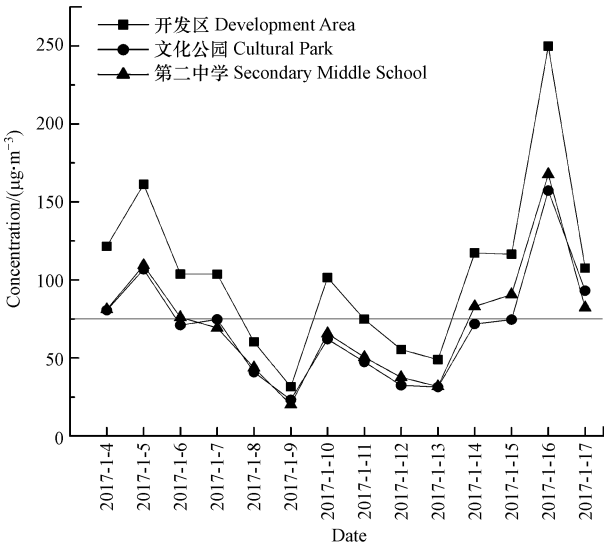


图 1 盘锦市冬季 PM_{2.5} 质量浓度
Fig.1 Concentrations of PM_{2.5} in winter in Panjin

2.2 PM_{2.5} 中元素污染特征

盘锦市冬季 3 个监测点位 PM_{2.5} 中元素浓度特征如图 2 所示. PM_{2.5} 中 Al、Ca、Fe、Na、Mg、Zn、Pb、Mn、V、As、Cu、Ni、Cr、和 Cd 元素全市季均值分别为 393.18、376.71、365.95、345.16、284.78、126.77、39.22、17.12、15.71、9.48、8.36、6.31、4.48、1.38 ng·m⁻³, 其中 Al、Ca、Fe、Na、Mg、Zn 和 Pb 元素质量浓度之和占所有检测元素浓度的 96.85%. Al、Ca、Na、Mg、V、As、Ni 和 Cr 元素在各点位浓度差异较小, 最大值与最小值之比均小于 1.5 倍, 表明冬季盘锦市各点位受上述元素污染的影响程度较为相似. Fe、Zn、Pb、Mn、Cu 和 Cd 元素在各点位之间最大值与最小值之比分别为 1.68、1.73、1.62、1.68、2.45 和 1.55 倍, 均大于 1.5, 差异较大, 且这几种元素最大值均出现在开发区, 开发区包含石油天然气装备制造园和化工产业园两大园区, 交通运输活动频繁, Fe、Zn、Pb、Mn、Cu 和 Cd 均会在工厂企业生产和机动车行驶过程中排放.

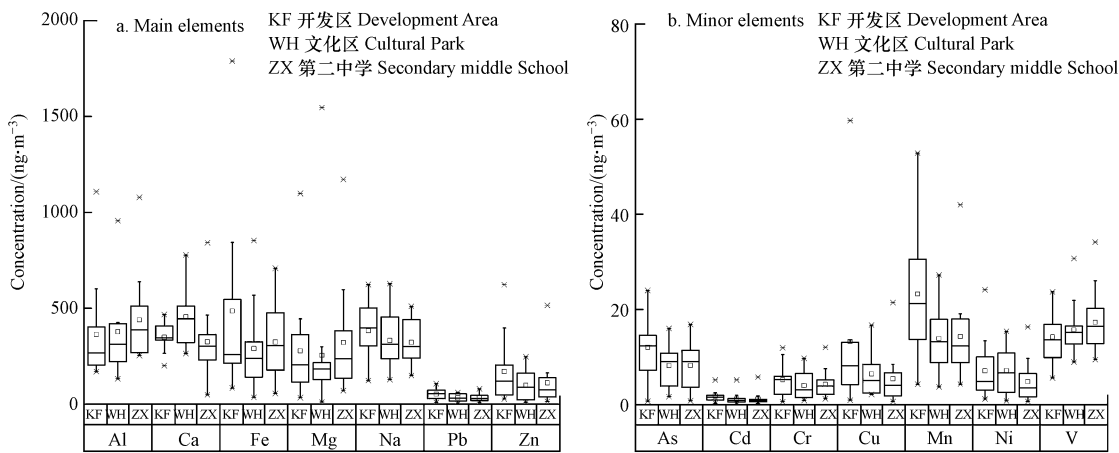


图 2 盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 中元素浓度
Fig.2 Concentrations of elements in PM_{2.5} during winter in Panjin

通过与《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中 Pb、Cd 和 As 元素标准限值(500、5、6 ng·m⁻³)比较,可知 Pb 和 Cd 远低于标准限值,As 元素超标.开发区、文化公园和第二中学冬季 As 季均值分别为 12.02、8.20、8.22 ng·m⁻³,分别超标 2.00、1.37 和 1.37 倍,As 主要来源包括燃煤燃烧与钢铁冶炼等,作为盘锦市冬季主要的污染元素,这与冬季供暖燃煤消耗量大有关.

表 1 为我国部分城市大气 PM_{2.5}中元素含量水平.与其他城市相比,本研究中盘锦市 V 元素浓度较高,其他元素均偏低.V 元素是燃油的标识物^[13],盘锦市以油气开采为龙头,是中国最大的稠油与高凝油生产加工基地,因此 V 元素浓度水平高于其他城市.其余元素含量水平的差异与城市间大气 PM_{2.5}的主要污染源和采样期间各污染源的活动水平有关.

表 1 不同城市大气 PM_{2.5}中元素质量浓度(ng·m⁻³)

Table 1 Concentrations of elements in PM_{2.5} in different cities(ng·m⁻³)

城市 City	采样时间 Sampling date	PM _{2.5} / (μg·m ⁻³)	Al	Ca	Fe	Na	Mg	Zn	Pb	Mn	V	As	Cu	Ni	Cr	Cd
盘锦	2017 年 1 月	81.67	393.18	376.71	365.95	345.16	284.78	126.77	39.22	17.12	15.71	9.48	8.36	6.31	4.48	1.38
兰州 ^[8]	2012 年 12 月	120.5	—	—	—	—	—	497	1056	214	11.96	34.16	69.15	14.19	30.56	8.47
郑州 ^[14]	2013 年 12 月	108	647	2430	807	1010	400	499	136.3	72.5	3.6	—	40.9	3.8	7	5.97
北京 ^[15]	2014 年 1 月	92.0	—	498.3	462.4	—	—	—	49.5	17.8	5.0	11.2	—	9.0	4.3	—
南京 ^[16]	2013 年 12 月	112.6	—	—	—	—	—	182.3	136.3	48.6	7.1	11.1	88.2	7.4	9.3	1.9
北京 ^[17]	2016 年 1 月	70.64	—	—	—	—	—	77.00	45.00	18.54	—	8.00	16.00	1.10	0.73	8.50

2.3 PM_{2.5}中元素来源分析

2.3.1 富集因子分析

富集因子(Enrichment Factor, EF)是用于分析大气颗粒物中元素污染特征和来源的常用方法.通过计算大气颗粒物中不同元素的富集程度,可以判别大气颗粒物中污染元素的自然和人为来源^[17].富集因子的计算公式见式(1).

$$EF = \frac{(C_i/C_r)_{\text{颗粒物}}}{(C_i/C_r)_{\text{土壤}}}$$

(1)

式中, C_i是所研究的第 i 种元素的百分含量; C_r为选定的参比元素的百分含量;下标“颗粒物”为大气细颗粒物中元素的百分含量,下标“土壤”为土壤参考系统中元素的百分含量.根据富集因子的大小,可将元素的富集程度分为 5 个级别,污染级别越高表明受人为因素影响越大,详细分级见表 2.本研究选择 Al 作为参比元素,选取辽宁省 A 层土壤元素背景值中位值作为土壤参考系统中元素的百分含量^[19],利用公式(1)计算得到盘锦市冬季大气 PM_{2.5}中元素的富集因子如表 3 所示.

由表 3 可知,盘锦市冬季大气 PM_{2.5}中元素 Cd、Zn、Pb、As 和 Cu(文化公园和第二中学除外)富集因子均大于 40,属于极强富集,说明主要受到人为源影响.Cd、Zn、Pb、As 和 Cu 元素在不同点位之前的差异较大,点位之间最大值和最小值之比(最值比)均大于 1.5,且最大值均出现在开发区点位,表明开发区受到人为源影响的程度最大.Cd 元素富集因子最高,平均值为 1861.69,工业废气(冶炼、燃煤、石油燃烧、垃圾焚烧、运输等)是大气中 Cd 污染的主要来源^[20].Zn 富集因子平均值为 244.13,其主要来源于燃煤飞灰、机动车尾气排放和橡胶轮胎磨损,也是垃圾废弃物燃烧的标识元素^[21].Pb 富集因子平均值为 218.08,大气中 Pb 的来源广泛,虽然无铅化汽油的广泛使用减弱了机动车尾气排放对大气中 Pb 的影响,但煤炭燃烧和工业冶炼仍是大气中 Pb 的重要来源^[22],有研究^[23]表明汽油无铅化以后,其他来源的贡献率上升.As 富集因子平均值为 121.87,其主要来源于煤炭燃烧^[24],由于冬季供暖,导致煤耗量增加,因此 As 元素的富集程度达到极强富集.Cu 富集因子平均值为 46.30,不同点位之间差异最大,其最值比为 2.59,表明不同点位受到人为源影响的程度明显不同.开发区点位富集程度达到极强富集,而文化公园和第二中学都属于强烈富集.大气颗粒物中 Cu 主要来源于冶金化工和机动车尾气^[16],开发区冶炼尘排放以及重型货车运输频繁,因此开发区 Cu 富集程度大于文化公园和第二中学.

元素 Ni、V 富集因子平均值均在 20—40 之间,属于强烈富集,说明盘锦市冬季大气 PM_{2.5}中 Ni、V 元素主要受人为源影响.Ni、V 都是燃油的标识元素^[25],同时机动车尾气排放也是 Ni 的来源.元素 Cr、Ca

和 Mg 富集因子平均值均在 5—20 之间,属于显著富集.说明人为源对大气中 Cr、Ca 和 Mg 元素的富集具有一定影响.Cr 主要来源于机动车尾气和工业废气排放^[26],Ca 和 Mg 是水泥、石灰的特征元素^[27],受建筑粉尘的影响较大,同时 Mg 还可能受海盐粒子的影响^[28].元素 Mn、Na 富集因子平均值均在 2—5 之间,为中度富集,元素 Fe 富集因子平均值小于 2,属于轻微富集.盘锦市冬季大气 PM_{2.5}中 Cr、Ca、Mg、Mn、Na 和 Fe 元素富集因子平均值均小于 10,说明人为源对其影响很小,主要受自然源影响;Cd、Zn、Pb、As、Cu、Ni 和 V 富集因子平均值大于 10,表明主要受人为源影响^[29].

表 2 富集因子分级表
Table 2 Classes of enrichment factor

EF 值 EF value	富集程度 Enrichment Level	污染级别 Pollution Standard
<2	<1 为无富集,1—2 为轻微富集	1
2—5	中度富集(扰动)	2
5—20	显著富集	3
20—40	强烈富集	4
≥40	极强富集	5

表 3 盘锦市冬季大气 PM_{2.5}中元素富集因子
Table 3 Elements enrichment factors in PM_{2.5} during winter of Panjin

元素 Element	土壤背景值 Background value/%	开发区 Development Area	文化公园 Cultural Park	第二中学 Secondary Middle School	平均值 Average	最大值/最小值 EF _{max} /EF _{min}
Cd	0.84×10 ⁻⁵	2609.97	1608.81	1366.31	1861.69	1.91
Zn	5.91×10 ⁻³	348.56	188.05	195.77	244.13	1.85
Pb	2.07×10 ⁻³	308.21	185.62	160.40	218.08	1.92
As	0.86×10 ⁻³	165.29	108.61	91.70	121.87	1.80
Cu	1.85×10 ⁻³	71.52	39.80	27.59	46.30	2.59
Ni	2.46×10 ⁻³	37.80	34.51	20.45	30.92	1.85
V	8.18×10 ⁻³	23.73	25.74	24.49	24.49	1.08
Cr	5.45×10 ⁻³	11.82	8.22	8.92	9.65	1.44
Ca	0.80	7.22	8.99	5.78	7.33	1.56
Mg	0.77	6.09	4.40	5.22	5.24	1.39
Mn	5.63×10 ⁻²	5.78	3.13	3.04	3.98	1.90
Na	1.48	3.57	2.94	2.57	3.03	1.39
Fe	2.77	2.68	1.39	1.71	1.93	1.94

2.3.2 因子分析

为进一步了解盘锦市冬季大气 PM_{2.5}中元素的主要来源,应用统计软件 SPSS16.0,采用因子分析的方法,对采样期间盘锦市 3 个站点大气 PM_{2.5}载带元素进行分析,其中 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin) 检验值为 0.632(>0.5),巴特利特球形体检验值为 0.000(<0.05),可进行因子分析.通过方差最大旋转法将各元素降成 4 个主要因子,并提取出各因子的特征值,结果如表 4 所示.

表 4 显示因子分析共得到 4 个因子,累计解释总方差的 74.858%.因子 1 解释了总方差的 26.984%,其中 Cu(0.915)、As(0.854)、Pb(0.781)的载荷较大,Cu、As、Pb 是煤炭燃烧的主要产物,故因子 1 代表煤烟尘.因子 2 解释了总方差的 22.315%,其中 Mn(0.815)、Mg(0.777)、Zn(0.759)的载荷较大,Mn、Zn 来源于机动车尾气排放,同时 Zn 也来源于橡胶轮胎磨损,Mg 可能与机动车行驶过程道路起尘有关,所以因子 2 代表道路交通尘.因子 3 解释了总方差的 13.862%,其中 Ni(0.843)、V(0.739)的载荷较大,Ni、V 主要来源于燃油燃烧,因此因子 3 代表燃油尘.因子 4 解释了总方差的 11.697%,其中元素 Al(0.905)的载荷比较大,Al 是地壳中含量最丰富的元素之一,因此因子 4 代表土壤扬尘.可知,盘锦市冬季大气 PM_{2.5}主要来源于煤烟尘、道路交通尘、燃油尘和土壤扬尘.

东北不同城市间冬季大气颗粒物主要来源结果如表 5 所示.可见,东北地区不同城市冬季大气颗粒

物存在相同的污染来源,如煤烟尘、土壤扬尘等,但不同的城市由于能源结构、工业结构等不同,各污染源对大气颗粒物的贡献存在差异.盘锦市石化工业发达,因此燃油尘成为重要的大气颗粒物污染来源.相较于东北其他城市,盘锦市受道路交通尘的影响更大.因此,为改善盘锦市空气质量,首要任务是加大对道路交通扬尘的控制,应加大道路清扫力度,防止道路起尘;加速全面淘汰“黄标车”,提升燃油品质.同时,也需加强对所有工业生产监管力度,敦促其废气达标排放.

表 4 盘锦市冬季 PM_{2.5} 中元素浓度的最大方差旋转因子分析结果

Table 4 Results of rotated component matrix of elements in PM_{2.5} during winter in Panjin

组分 Component	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4
Cu	0.915	-0.070	0.047	-0.030
As	0.854	0.195	0.287	-0.227
Pb	0.781	0.499	0.137	-0.251
Na	0.654	0.396	0.524	-0.070
Cd	0.463	0.113	0.285	-0.347
Mn	0.423	0.815	-0.014	-0.043
Mg	-0.198	0.777	0.142	-0.068
Zn	0.407	0.759	0.099	-0.242
Cr	0.571	0.683	0.190	-0.175
Fe	-0.004	0.541	-0.315	0.200
Ni	0.087	0.123	0.843	-0.198
V	0.454	-0.180	0.739	0.013
Al	-0.155	0.029	0.047	0.905
Ca	-0.098	-0.115	-0.237	0.634
特征值	3.778	3.124	1.941	1.638
方差贡献率/%	26.984	22.315	13.862	11.697
累计方差贡献率/%	26.984	49.299	63.161	74.858

表 5 东北不同城市冬季大气颗粒物主要来源

Table 5 Main sources of atmospheric particulates in different cities in Northeast China in winter

城市 City	颗粒物类型 Size	时间 Period	主要来源 Major sources	文献 Reference
盘锦	PM _{2.5}	2017 年 1 月	煤烟尘、道路交通尘、燃油尘和土壤扬尘	本研究
鞍山	PM _{2.5}	2016 年 1 月	钢铁冶炼、机动车尾气、燃煤、建筑扬尘	[14]
葫芦岛	PM ₁₀	2004 年 1 月	煤烟尘、硫酸盐、土壤风沙尘、建筑水泥尘	[30]
沈阳	PM ₁₀	2002 年 1 月	煤烟尘、城市扬尘、土壤风沙尘、建筑水泥尘	[30]
抚顺	TSP	2002 年 1 月	城市扬尘、有机碳、煤烟尘	[30]
长春	PM ₁₀	2012 年 1 月	土壤风沙尘、道路尘、工业燃煤尘、机动车尾气尘	[31]
哈尔滨	PM _{2.5}	2010 年 10 月	煤烟尘、二次硫酸盐、石化尘	[32]

注:表中主要来源的贡献按由大到小依次排列

Note: The contributions from the main sources in the table are arranged in order of largest to smallest.

3 结论 (Conclusions)

(1) 盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 日均浓度顺序为开发区>第二中学>文化公园,3 个监测点 PM_{2.5} 日均浓度值分别为 103.86、69.10、72.05 μg·m⁻³;PM_{2.5} 日均值 14 d 中分别有 9、4 和 7 d 超标.

(2) 盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 中各元素浓度平均值由高到低依次为 Al>Ca>Fe>Na>Mg>Zn>Pb>Mn>V>As>Cu>Ni>Cr>Cd,其中 Al、Ca、Fe、Na、Mg、Zn 和 Pb 元素质量浓度之和占有检测元素浓度的 96.85%,是大气 PM_{2.5} 主要的载带元素;As 元素浓度超过环境空气质量标准限值(6 ng·m⁻³),是主要的污染元素.

(3) 富集因子分析表明,盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 中,元素 Cd、Zn、Pb、As、Cu 属于极强富集,元素 Ni、V 属于强烈富集,元素 Cr、Ca 和 Mg 属于显著富集,元素 Mn、Na 属于中度富集,元素 Fe 属于轻微富集;Cd、Zn、Pb、As、Cu、Ni 和 V 主要受人为源影响,Cr、Ca、Mn、Mg、Na 和 Fe 主要是自然源影响。

(4) 因子分析结果可知,盘锦市冬季大气 PM_{2.5} 污染元素的主要来源为煤烟尘、道路交通尘、燃油尘和土壤扬尘。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] LI H M, QIAN X, WANG Q G. Heavy metals in atmospheric particulate matter: A comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(23): 13210-13211.
- [3] 边海, 韩素芹, 张裕芬, 等. 天津市大气能见度与颗粒物污染的关系[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(3): 406-410.
BIAN H, HAN S Q, ZHANG Y F, et al. Relationship between atmospheric visibility and particulate matter pollution in Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(3): 406-410(in Chinese).
- [4] 陈义珍, 赵丹, 柴发合, 等. 广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(7): 967-971.
CHEN Y Z, ZHAN D, CHAI F H, et al. Correlation between the atmospheric visibility and aerosol fine particle concentrations in Guangzhou and Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(7): 967-971(in Chinese).
- [5] LIU B S, SONG N, DAI Q L, et al. Chemical composition and source apportionment of ambient PM_{2.5}, during the non-heating period in Taian, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 170: 23-33.
- [6] ZOU B B, HUANG X F, ZHANG B, et al. Source apportionment of PM_{2.5}, pollution in an industrial city in Southern China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(6): 1193-1202.
- [7] LI L L, TAN Q W, ZHANG Y H, et al. Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during persistent extreme haze events in Chengdu, Southwest China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 718-729.
- [8] TAN J H, ZHANG L M, ZHOU X M, et al. Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602: 1743-1752.
- [9] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
TANG X Y, ZHANG Y H, SHAOM. *Atmospheric Environmental Chemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006(in Chinese).
- [10] 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 wintertime in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3): 876-883(in Chinese).
- [11] 胡鸣, 张懿华, 赵倩彪. 上海市冬季 PM_{2.5} 无机元素污染特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(7): 1993-1999.
HU M, ZHANG Y H, ZHAO Q B. Characteristics and sources of inorganic elements in PM_{2.5} during wintertime in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(7): 1993-1999(in Chinese).
- [12] 陈源, 谢绍东, 罗彬, 等. 重庆市主城区大气细颗粒物污染特征与来源解析[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(7): 2420-2430.
CHEN Y, XIE S D, LUO B, et al. Pollution characterization and source apportionment of fine particles in urban Chongqing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(7): 2420-2430(in Chinese).
- [13] WANG Y Q, ZHANG Y, SCHAUER J J, et al. Relative impact of emissions controls and meteorology on air pollution mitigation associated with the Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) conference in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 1467-1476.
- [14] 王媛媛, 路新燕, 刘勇, 等. 郑州市大气 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 829-834.
WANG Y Y, LU X Y, LIU Y, et al. Pollution characteristic of metal elements in PM_{2.5} in the atmosphere of Zhengzhou[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2016, 25(5): 829-834(in Chinese).
- [15] 李铭焯, 秦玮, 杭怡春, 等. 北京昌平某地冬季大气 PM_{2.5} 元素污染特征分析[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(3): 58-63.
LI M X, QIN W, HANG Y C, et al. Study on characteristics of particulate matter based on the characteristic elements in Changping of Beijing[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(3): 58-63(in Chinese).
- [16] 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估[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(in Chinese).
- [17] 许栩楠, 曾立民, 张远航, 等. 北京市怀柔区冬季大气重金属污染状况分析[J]. *环境化学*, 2016, 35(12): 2460-2468.
XU Y N, ZENG L M, ZHANG Y H, et al. The pollution status analysis of atmospheric heavy metal elements during winter in Huairou District of Beijing[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(12): 2460-2468(in Chinese).
- [18] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2006, 39(2):

94-99.

JI Y Q, ZHU T, FENG Y C, et al. Application of the enrichment factor to analyze the pollution of elements in soil dust in China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2006, 39(2):94-99(in Chinese).

- [19] 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.

China National Environmental Monitoring Center. The soil background Value in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990(in Chinese).

- [20] 谭吉华, 段菁春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(2): 145-155.

TAN J H, DUAN J C. Heavy metals in aerosol in China: Pollution, source, and control strategies[J]. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 30(2):145-155(in Chinese).

- [21] 王晴晴, 谭吉华, 马永亮, 等. 佛山市冬季 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1384-1391.

WANG Q Q, TAN J H, MA Y L, et al. Characteristics of heavy metals in PM_{2.5} during winter in Foshan City[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(8): 1384-1391(in Chinese).

- [22] LIANG F, ZHANG G L, TAN M G, 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.

- [23] 王婉, 刘咸德, 赵立蔚, 等. 用同位素方法评估天津市汽油无铅化进程[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 627-630.

WANG W, LIU X D, ZHAO L W, et al. Assessment of the phase-out of leaded gasoline in Tianjin, China using isotope technique[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(6):627-630(in Chinese).

- [24] TIAN H Z, WANG Y, XUE Z G, et al. Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980-2007[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2010, 10(23): 11905-11919.

- [25] VIANA M, KUHLBUSCH T A J, QUEROL X, et al. Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(10):827-849.

- [26] 李佳琦, 吴烨, 宋少洁, 等. 北京道路交通环境亚微米颗粒物元素组成特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1):49-55.

LI J Q, WU Y, SONG S J, et al. Characteristics and source apportionment of elements in submicron particulate matter near an urban freeway in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1):49-55(in Chinese).

- [27] 李伟芳, 白志鹏, 史建武, 等. 天津市环境空气中细粒子的污染特征与来源[J]. 环境科学研究, 2010, 23(4):394-400.

LI W F, BAI Z P, SHI J W, et al. Pollution characteristics and sources of fine particulate matter in ambient air in Tianjin City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(4):394-400(in Chinese).

- [28] LIU B S, LI T K, YANG J M, et al. Source apportionment and a novel approach of estimating regional contributions to ambient PM_{2.5} in Haikou, China.[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223:334-345.

- [29] ZHANG J Z, ZHOU X H, WANG Z, et al. Trace elements in PM_{2.5} in Shangdong Province: Source identification and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 558-577.

- [30] 徐光. 辽宁省三城市大气颗粒物来源解析研究[J]. 中国环境监测, 2007, 23(3):57-61.

XU G. Study on source apportionment for ambient air particulate matter in three cities of Liaoning Province[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(3):57-61(in Chinese).

- [31] 王菊, 刘禹彤, 赵秀敏, 等. 长春市大气环境中 PM₁₀ 二重源解析研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2):288-292.

WANG J, LIU Y T, ZHAO X M, et al. Improved source apportionment of PM₁₀ in atmosphere of Changchun[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2013, 22(2):288-292(in Chinese).

- [32] HUANG L, WANG G. Chemical characteristics and source apportionment of atmospheric particles during heating period in Harbin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(12): 2475-2483.