

2017 年深圳市大气 PM_{2.5} 污染状况及其来源解析研究

严宙宁¹, 牟敬锋¹, 严燕¹, 余淑苑², 李斌³

1. 深圳市南山区疾病预防控制中心, 广东 深圳 518054; 2. 深圳市疾病预防控制中心, 广东 深圳 518055;
3. 深圳市龙岗区疾病预防控制中心, 广东 深圳 518172

摘要: **目的** 探讨深圳市大气 PM_{2.5} 污染状况及其污染来源, 为防治空气污染和保护人群健康提供参考依据。 **方法** 于 2017 年 1–12 月每月 10–16 日分别在深圳市南山区和龙岗区各设置一个监测点采集大气 PM_{2.5} 样品, 分析样品 PM_{2.5} 质量浓度及 PM_{2.5} 中多环芳烃、重金属和水溶性离子含量, 采用因子分析法对 PM_{2.5} 污染来源进行分析。 **结果** 研究期间南山区和龙岗区 PM_{2.5} 质量浓度中位数分别为 0.041 mg/m³、0.039 mg/m³ ($Z = -0.141$, $P = 0.888$), 超标率分别为 8.333%、7.143% ($\chi^2 = 5.063$, $P = 0.018$)。因子分析法源解析发现: 多环芳烃污染源为汽车尾气 (南山区和龙岗区贡献率分别为 49.986%、54.226%)、燃煤 (南山区和龙岗区贡献率分别为 16.936%、19.669%) 和工业原料 (南山区和龙岗区贡献率分别为 9.270%、8.353%); 水溶性离子污染源为汽车尾气、工业污染 (贡献率为 58.694%) 和燃煤 (贡献率为 27.751%); 重金属元素污染源为汽车尾气、工业冶金 (南山区和龙岗区贡献率分别为 55.993%、62.004%) 和建筑尘 (南山区和龙岗区贡献率分别为 21.875%、11.051%)。 **结论** 2017 年深圳市大气 PM_{2.5} 污染较轻, 其主要来源于汽车尾气、工业、燃煤尘的复合污染。

关键词: PM_{2.5}; 因子分析; 多环芳烃; 水溶性离子; 重金属

中图分类号: R122.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3110(2019)10-1172-05 **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-3110.2019.10.006

Pollution status and source apportionment of atmospheric particulates (PM_{2.5}) in Shenzhen city

YAN Zhou-ning¹, MOU Jing-feng¹, YAN Yan¹, YU Shu-yuan², LI Bin³

1. Nanshan District Center for Disease Control and Prevention, Shenzhen, Guangdong 518054, China;
2. Shenzhen Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shenzhen, Guangdong 518055, China;
3. Longgang District Center for Disease Control and Prevention, Shenzhen, Guangdong 518172, China

Corresponding author: MOU Jing-feng, E-mail: 30302m@163.com

Abstract: **Objective** To explore the pollution status and source apportionment of PM_{2.5} in Shenzhen city, and to provide a basis for air pollution abatement and health protection. **Methods** PM_{2.5} samples of two monitoring sites in Nanshan district and Longgang district, Shenzhen city were collected on 10th–16th of every month from January to December 2017. PM_{2.5} concentration and the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), heavy metals and water-soluble ions in PM_{2.5} were measured, and the data were processed by factor analysis for the purpose of PM_{2.5} source identification. **Results** The median concentration of PM_{2.5} in Nanshan district and Longgang district was respectively 0.041 mg/m³ and 0.039 mg/m³ ($Z = -0.141$, $P = 0.888$), and the over-standard rates were respectively 8.333% and 7.143% ($\chi^2 = 5.063$, $P = 0.018$). Source apportionment results derived from factor analysis showed that PAHs pollution sources were automobile exhaust (the contribution rates of Nanshan district and Longgang district were respectively 49.986% and 54.226%), coal combustion (the contribution rates of Nanshan district and Longgang district were respectively 16.936% and 19.669%) and industrial raw materials (the contribution rates of Nanshan district and Longgang district were respectively 9.270% and 8.353%). Water-soluble ion pollution sources were automobile exhaust, industrial pollution (the contribution rate was 58.694%) and coal combustion (the contribution rate was 27.751%). Heavy metal pollution sources were automobile exhaust, industrial metallurgy (the contribution rates of Nanshan district and Longgang district were respectively 55.993% and 62.004%) and construction dust (the contribution rates of Nanshan district and Longgang district were respectively 21.875% and 11.051%). **Conclusions** PM_{2.5} pollution in Shenzhen city in 2017 was relatively light, and it was primarily derived from combined sources from automobile exhaust, industrial dusts and coal combustion.

Key words: PM_{2.5}; factor analysis; polycyclic aromatic hydrocarbon; water soluble ion; heavy metal

基金项目: 深圳市科技创新委员会科技计划项目 (项目编号: JCYJ20170306103652632)

作者简介: 严宙宁 (1971–), 男, 本科学历, 副主任医师, 研究方向: 环境流行病学。

通信作者: 牟敬锋, E-mail: 30302m@163.com。

近年来,大气细颗粒物(atmospheric particulates, $PM_{2.5}$)已成为我国城市大气首要污染物。 $PM_{2.5}$ 不仅能影响空气质量和能见度^[1],还人群健康带来负面影响。大气 $PM_{2.5}$ 污染可引起人群呼吸系统、循环系统疾病发病增加^[2],目前 $PM_{2.5}$ 也作为评估疾病负担的一个重要特征指标^[3]。由于 $PM_{2.5}$ 比表面积较大,可吸附大量的有毒有害物质,不同地区的 $PM_{2.5}$ 污染受当地环境和生活状况不同而异^[4-6],因此不同地区大气中 $PM_{2.5}$ 化学成分不尽相同。颗粒物的毒性作用不仅与其浓度有关,颗粒物所含化学组分与健康危害也密切相关^[7],有必要对大气中颗粒物成分进行分析。目前有少数学者^[8-10]在深圳开展大气 $PM_{2.5}$ 成分分析研究,但这些研究中 $PM_{2.5}$ 成分分析指标不全面,因此有必要对深圳地区 $PM_{2.5}$ 成分进行全面分析。本研究对深圳市大气 $PM_{2.5}$ 质量浓度进行监测,并对 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃、重金属和水溶性离子含量进行分析,在此基础上采用因子分析法对 $PM_{2.5}$ 污染来源进行解析,为深圳市有针对性开展环境保护,制定大气污染控制策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 主要监测和检测仪器 武汉天虹大气可吸入颗粒物切割器 $PM_{2.5}-100$ 型、Pall(Art. No. 61664)玻璃纤维滤膜、Whatman QMA(Art. No. 1851-090)石英纤维滤膜、Elan DRCII 型电感耦合等离子体质谱仪、Dionex ICS-2000 型高效液相色谱仪。

1.2 样品采集

1.2.1 采样点设置 根据深圳市空气污染分布特征以及污染类型,选择污染相对较重的原关外和污染较轻的原关内作为监测行政区,龙岗区监测点设置在某机关单位楼顶,南山区监测点设置在某小学楼顶,采样监测高度距地面 10~15 m。

1.2.2 采样时间 时间为 2017 年 1-12 月,每月 10-16 日采样 7 d,每日利用玻璃纤维滤膜和石英纤维滤膜连续采样 24 h。玻璃纤维滤膜用于 $PM_{2.5}$ 质量浓度及多环芳烃成分分析,石英纤维滤膜用于 $PM_{2.5}$ 重金属或水溶性离子成分分析。

1.3 $PM_{2.5}$ 质量浓度分析 本研究中 $PM_{2.5}$ 质量浓度采用 ES-E 型电子天平进行称重分析,根据玻璃纤维滤膜采样前后重量差和采样体积计算而得。

1.4 $PM_{2.5}$ 成分分析

1.4.1 多环芳烃测量 大气 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃采用高效液相色谱法进行测定,包括萘、苊烯、芴、苊、菲、蒽、荧蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽、苯并[g,h,i]芘、茚

并[1,2,3-cd]芘、芘、屈、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽^[10]。

1.4.2 水溶性离子测量 大气 $PM_{2.5}$ 中 4 种无机水溶性离子包括硫酸盐、氯化物、氨盐、硝酸盐采用离子色谱法进行测定^[11]。

1.4.3 重金属测量 本研究参照 SL 394.2-2007^[12]采用电感耦合等离子体质谱法测定金属元素,包括砷、铍、镉、锑、铝、铬、镍、硒、铊、铅、锰。

1.5 统计学分析 本研究利用 SPSS 16.0 软件包,对数据进行整理和统计分析,检验水平=0.05。本文中收集的数据包括 $PM_{2.5}$ 质量浓度、 $PM_{2.5}$ 中多环芳香烃成分、 $PM_{2.5}$ 中重金属成分和 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子成分,经 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验发现,不服从正态分布,采用 M 、 P_{25} 、 P_{75} 进行统计描述,两组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。率的比较采用 χ^2 检验。利用因子分析法对 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃、水溶性离子、重金属进行来源解析,按照特征根大于 1 原则提取公因子,在此基础上对各因子进行来源分析。

2 结果

2.1 大气 $PM_{2.5}$ 质量浓度 2017 年 1-12 月在南山区和龙岗区两个监测点共采集 $PM_{2.5}$ 样品 168 份, $PM_{2.5}$ 质量浓度中位数为 0.040 mg/m^3 ,参照国家日均浓度二级标准限值(75 $\mu g/m^3$)^[12],超标率为 7.738%。南山区和龙岗区两个监测点大气 $PM_{2.5}$ 质量浓度中位数分别为 0.041、0.039 mg/m^3 , $PM_{2.5}$ 质量浓度超标率分别为 8.333%、7.143%,南山区和龙岗区大气 $PM_{2.5}$ 质量浓度 P_{50} 差异无统计学意义($Z=-0.141$, $P=0.888$),两区超标率差异有统计学意义($\chi^2=5.063$, $P=0.018$)。见表 1。

表 1 2017 年深圳市各监测点大气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度及超标情况

监测点	监测 天数	质量浓度(mg/m^3)			超标率 (%)
		P_{25}	P_{50}	P_{75}	
南山区	84	0.024	0.041	0.054	8.333
龙岗区	84	0.022	0.039	0.060	7.143
合计	168	0.022	0.040	0.055	7.738

注:超标率=(超标天数/监测天数)×100%。

2.2 大气 $PM_{2.5}$ 成分分析

2.2.1 多环芳烃检测 南山区和龙岗区大气 $PM_{2.5}$ 中含量最高的多环芳烃是苯并[g,h,i]芘,其中位数分别为 0.110、0.185 ng/m^3 。南山区大气 $PM_{2.5}$ 中苊烯、苊、屈、二苯并[a,h]蒽质量浓度低于龙岗区,南山区大气 $PM_{2.5}$ 中芴、荧蒽质量浓度高于龙岗区,差异有统计学意义($P<0.05$)。见表 2。

表 2 2017 年深圳市各监测点 PM_{2.5} 中多环芳烃检测结果 (ng/m³)

多环芳烃	环数	南山区 (n=84)			龙岗区 (n=84)			Z 值	P 值
		P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅		
萘	2	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	-1.197	0.231
苊烯	2	0.035	0.035	0.090	0.040	0.040	0.160	-5.236	<0.001
芘	2	0.020	0.020	0.025	0.020	0.020	0.020	-2.200	0.028
苊	2	0.025	0.025	0.040	0.030	0.030	0.030	-6.119	0.000
菲	3	0.030	0.030	0.060	0.030	0.030	0.080	-0.842	0.400
蒽	3	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	-1.614	0.106
荧蒽	3	0.025	0.060	0.180	0.030	0.030	0.215	-2.195	0.028
芘	4	0.020	0.050	0.120	0.020	0.020	0.090	-1.896	0.058
屈	4	0.020	0.025	0.030	0.030	0.030	0.050	-7.005	0.000
苯并[a]蒽	4	0.010	0.040	0.100	0.010	0.010	0.100	-1.054	0.292
苯并[b]荧蒽	4	0.020	0.050	0.210	0.020	0.075	0.348	-0.948	0.343
苯并[k]荧蒽	4	0.010	0.020	0.060	0.010	0.015	0.110	-1.099	0.272
苯并[a]芘	5	0.010	0.040	0.120	0.010	0.060	0.258	-1.087	0.277
二苯并[a,h]蒽	5	0.010	0.010	0.070	0.010	0.030	0.140	-2.168	0.030
苯并[g,h,i]芘	5	0.025	0.110	0.250	0.030	0.185	0.668	-1.692	0.091
茚并[1,2,3-cd]芘	6	0.020	0.060	0.160	0.020	0.100	0.320	-1.569	0.117

2.2.2 水溶性离子检测 南山区和龙岗区大气 PM_{2.5} 度在两监测点间差异无统计学意义 (P>0.05)。中水溶性离子质量浓度以硫酸盐居首,其质量浓度中 见表 3。位数分别为 6.250、6.975 μg/m³。水溶性离子质量浓

表 3 2017 年深圳市各监测点 PM_{2.5} 中水溶性离子检测结果 (ug/m³)

种类	南山区 (n=84)			龙岗区 (n=84)			Z 值	P 值
	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅		
硫酸盐	4.513	6.250	8.833	4.288	6.975	9.095	-0.468	0.640
硝酸盐	1.035	2.495	5.250	0.865	2.485	6.353	-0.155	0.876
氯离子	0.223	0.335	0.635	0.200	0.280	0.685	-0.658	0.510
铵盐	0.835	2.355	3.183	0.918	2.260	4.060	-0.271	0.786

2.2.3 重金属元素检测 南山区和龙岗区大气 PM_{2.5} 40.950 ng/m³。南山区大气 PM_{2.5} 中铝、铍、铬、锰、镍质量中铝的质量浓度最高,其中位数分别为 232.85、 浓度高于龙岗区,差异有统计学意义 (P<0.05),见表 4。

表 4 2017 年深圳市各监测点 PM_{2.5} 中重金属元素检测结果 (ng/m³)

种类	南山区 (n=84)			龙岗区 (n=84)			Z 值	P 值
	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅		
锑	0.855	1.790	2.968	0.785	1.980	3.533	-0.720	0.471
铝	101.425	232.850	390.175	22.200	40.950	71.425	-8.702	<0.001
砷	0.908	3.675	6.443	1.250	3.380	7.833	-0.612	0.540
铍	0.006	0.011	0.018	0.003	0.006	0.010	-4.600	<0.001
镉	0.223	0.580	1.045	0.265	0.715	1.440	-1.880	0.060
铬	1.455	2.305	3.593	1.010	1.650	2.400	-3.174	0.002
汞	0.007	0.019	0.032	0.009	0.020	0.037	-0.926	0.354
铅	7.158	18.300	32.800	8.393	21.800	45.775	-1.654	0.098
锰	15.725	21.150	31.600	8.548	14.300	25.075	-3.915	<0.001
镍	1.838	3.655	5.863	1.543	2.430	4.035	-2.500	0.012
硒	0.665	1.320	1.963	0.395	1.175	1.960	-0.565	0.572
铊	0.027	0.120	0.174	0.022	0.107	0.205	-0.271	0.786

2.3 PM_{2.5} 污染源解析 本研究利用因子分析法对深圳市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃、水溶性离子和重金属浓度进行来源分析,按照特征根大于 1 提取多环芳烃、水溶性离子和重金属浓度公因子。

2.3.1 PM_{2.5} 中多环芳烃污染来源分析 本研究发现两个监测点均提取出 3 个公因子,总体方差贡献率在 75% 以上。两监测点 PM_{2.5} 中 16 种多环芳烃公因子因子载荷相似,因子 1 中 4~6 环多环芳烃载荷较高,因子 2 和因子 3 中 2、3 环多环芳烃载荷较高。见表 5。

表 5 深圳市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃因子分析结果

多环芳烃	环数	南山区 (n=84)			龙岗区 (n=84)		
		因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
萘	2	-0.070	0.374	0.450	0.071	0.418	0.761
苊烯	2	0.148	0.249	-0.199	0.535	0.557	-0.250
芘	2	0.105	0.850	-0.246	0.256	0.868	-0.309
苊	2	0.502	0.123	-0.409	0.329	0.464	0.189
菲	3	0.130	0.958	0.105	0.370	0.780	0.378
蒽	3	0.123	0.871	-0.063	0.271	0.877	-0.265
荧蒽	3	0.815	0.159	0.381	0.905	0.062	0.161
芘	4	0.884	0.014	0.298	0.856	-0.164	0.258

续表 5

多环芳烃	环数	南山区(n=84)			龙岗区(n=84)		
		因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
屈	4	0.805	-0.077	0.456	0.869	-0.207	0.265
苯并[a]蒽	4	0.815	-0.080	0.470	0.899	-0.243	0.172
苯并[b]蒽	4	0.965	0.005	-0.060	0.915	0.010	-0.223
苯并[k]蒽	4	0.968	-0.126	-0.114	0.956	-0.215	-0.008
苯并[a]芘	5	0.931	0.000	-0.246	0.875	0.014	-0.255
二苯并[a,h]蒽	5	0.848	-0.098	-0.033	0.851	-0.178	-0.071
苯并[g,h,i]芘	5	0.869	-0.139	-0.340	0.868	-0.245	-0.178
茚并[1,2,3-cd]芘	6	0.841	-0.103	-0.378	0.944	-0.211	-0.078
特征根		7.998	2.709	1.483	8.676	3.147	1.336
方差贡献率		49.986	16.934	9.270	54.226	19.669	8.353
可能来源		汽车尾气 燃煤 工业原料			汽车尾气 燃煤 工业原料		

2.3.2 PM_{2.5}中水溶性离子污染来源分析 由于水溶性离子浓度在两个监测点间差异无统计学意义,因此在进行水溶性离子源解析时将两监测点数据合并一起进行因子分析。本研究对水溶性离子进行因子分析提取出 2 个公因子,总体方差贡献率在 86%以上。因子 1 中硫酸盐、硝酸盐、铵盐载荷较高,总体方差贡献率为 58.694%;因子 2 氯离子载荷较高,总体方差贡献率为 27.751%。见表 6。

表 6 深圳市大气 PM_{2.5}中水溶性离子因子分析结果(n=168)

水溶性离子	因子 1	因子 2
硫酸盐	0.804	-0.393
硝酸盐	0.864	0.264
氯离子	0.232	0.931
铵盐	0.949	-0.135
特征根	2.348	1.110
方差贡献率	58.694	27.751
可能来源	汽车尾气、工业污染 燃煤	

2.3.3 PM_{2.5}中重金属污染来源分析 本研究发现两个监测点均提取出 2 个公因子,总体方差贡献率在 73%以上。两监测点 PM_{2.5}中 12 种重金属公因子因子载荷基本相似,因子 1 中锑、砷、铍、镉、汞、铅、锰、硒、铊载荷较高,因子 2 中镍载荷较高。见表 7。

表 7 深圳市大气 PM_{2.5}中重金属因子分析结果

重金属	南山区(n=84)		龙岗区(n=84)	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
锑	0.835	-0.094	0.731	0.292
铝	0.325	0.750	0.682	0.135
砷	0.882	-0.287	0.888	-0.182
铍	0.695	0.597	0.895	-0.043
镉	0.908	-0.345	0.717	-0.305
铬	0.457	0.639	0.585	0.358
汞	0.815	-0.186	0.833	0.204
铅	0.873	-0.310	0.909	-0.066
锰	0.691	0.604	0.867	0.208
镍	0.191	0.691	-0.010	0.891
硒	0.923	-0.219	0.926	-0.195
铊	0.911	-0.255	0.931	-0.212
特征根	6.719	2.625	7.440	1.326
方差贡献率	55.993	21.875	62.004	11.051
可能来源	汽车尾气、工业冶金 建筑尘		汽车尾气、工业冶金 建筑尘	

3 讨 论

据深圳市生态环境局公布的 2017 年环境状况公报显示,深圳市 2017 年灰霾天数为 22 d^[13],可见深圳市空气质量日益改善。本研究中深圳市 2017 年大气 PM_{2.5}质量浓度中位数为 0.040 mg/m³,低于国家日均二级浓度限值标准^[14],超标率为 7.738%,远低于我国其他城市水平,如北京^[15]、上海^[16]、武汉^[17]、兰州^[18]等。可见深圳市大气 PM_{2.5}污染水平较低,其得益于政府采取的各项治理空气污染的有力措施,如:完善大气环境管理制度政策体系,编制了《深圳市大气环境质量提升计划(2017-2020 年)》;全面深化各项大气污染治理,严格控制机动车污染。

因子分析指研究从变量群中提取共性因子的统计技术。因子分析法用 PM_{2.5}成分质量浓度求解出公因子及因子载荷,公因子往往反映的是不同类型的污染源,因子载荷系数反映污染源与各成分之间的相关关系^[19]。Blifford^[20]最早应用因子分析技术识别大气颗粒物污染源。我国学者^[21]也利用因子分析技术对大气气溶胶污染来源进行识别,源解析得到很好的应用。本文利用因子分析技术对深圳市大气 PM_{2.5}中多环芳烃、重金属和水溶性离子含量进行源解析。

本文对两个监测点多环芳烃进行分析发现,南山区和龙岗区大气 PM_{2.5}中苯并[g,h,i]芘含量最高,中位数分别为 0.110、0.185 ng/m³。采用因子分析对多环芳烃进行源解析发现,无论是在南山区还是在龙岗区公因子和因子载荷大致相同,公因子 1 对 PM_{2.5}方差贡献率 50%左右,特征根 8 左右,可见公因子 1 是深圳市多环芳烃主要污染来源,进一步分析发现 4-6 环载荷系数较高,提示公因子 1 代表汽车尾气,这与南昌^[11]研究结果类似;公因子 2 对 PM_{2.5}方差贡献率 20%左右,特征根 3 左右,2、3 环载荷系数较高,提示公因子 2 代表煤燃烧源,这与南昌^[11]研究结果类似;公因子 3 对 PM_{2.5}方差贡献率 10%左右,特征根为 1.4 左右,萘载荷系数较高,提示公因子 3 代表工业原料来源。根据研究结果推断:深圳市大气多环芳烃来源于汽车尾气排放、煤燃烧排放、工业原料排放等,汽车尾气排放占据 50%左右,这与其他学者^[22]在深圳研究结果一致。其可能与深圳市近年来汽车保有量迅速增长,交通繁忙有关,2017 年深圳市汽车保有量达 321.79 万辆。

对 PM_{2.5}中水溶性离子含量进行因子分析发现,共提取出 2 个公因子,因子 1 对 PM_{2.5}方差贡献率为 58.694%,特征根为 2.348,硫酸盐、硝酸盐和铵盐载荷系数较高。硫酸盐、铵盐、硝酸盐来源属于二次污染

物,大气中的硝酸盐主要是煤、汽油燃烧产生的氮氧化物经氧化反应生成;大气中的硫酸盐主要由工业生产硫化物燃料燃烧、硫酸冶炼工厂排放硫酸;而铵盐主要是通过气体 NH_3 反应生成,由工业废气排放至大气中^[11]。由此提示因子 1 代表汽车尾气、工业污染。因子 2 对 $\text{PM}_{2.5}$ 方差贡献率为 27.751%,特征根为 1.110,氯离子载荷系数较高,氯离子的来源复杂,主要来源有燃煤和工业原料,结合 $\text{PM}_{2.5}$ 监测点情况推断,其可能来源于燃煤燃烧。

对 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属含量进行因子分析发现,两个监测点均提取出 2 个公因子,因子 1 对 $\text{PM}_{2.5}$ 方差贡献率 60%左右,特征根为 7 左右,砷、铍、镉、锑、汞、硒、铊、铅、锰载荷系数较高;因子 2 对 $\text{PM}_{2.5}$ 方差贡献率 20%左右,特征根为 2 左右,镍、铝、铬载荷系数较高。结合徐昶^[23]研究成果确定排放源的标识元素,因子 1 可能代表汽车尾气、工业冶金,这可能与深圳市拥有较高的机动车保有量;因子 2 可能代表建筑尘,这可能与深圳市区正在大规模的修建地铁有关。

目前,在深圳开展大气 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析相关研究还较少,本研究得到的研究结论可为今后深入研究提供参考线索。但是本次研究设计还存在一定局限性,如:设置的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测点不具有代表性;监测时间只设置在每月 10-16 日,代表性有待考证,因此研究得出的研究结论还存在一些不足之处,有待今后进一步深入研究。

参考文献

- [1] 聂敏,任杰,杨光,等. $\text{PM}_{2.5}$ 大气污染对自由空间量子通信性能的影响[J]. 物理学报,2015,64(15):150301.
- [2] Suades-González E, Gascon M, Guxens M, et al. Air pollution and neuropsychological development: a review of the latest evidence [J]. *Endocrinology*, 2015, 156(10):3473-3482.
- [3] Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. *Lancet*, 2017, 389(10082):1907-1918.
- [4] Wang X, Chow JC, Kohl SD, et al. Characterization of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} fugitive dust source profiles in the Athabasca Oil Sands Region [J]. *J Air Waste Manage*, 2015, 65(12):1421-1433.
- [5] Watson JG, Chow JC, Lowenthal DH, et al. $\text{PM}_{2.5}$ source apportionment with organic markers in the Southeastern Aerosol Research and

Characterization (SEARCH) study [J]. *J Air Waste Manage*, 2015, 65(9):1104-1118.

- [6] 杨财平, 明小燕, 杨小波. 宜昌城区霾与非霾天气下 $\text{PM}_{2.5}$ 中 12 种元素污染特征比较 [J]. *实用预防医学*, 2019, 26(2):180-182.
- [7] 赵金镭, 高知义, 宋伟民. 上海市区大气细颗粒物不同成分对血管内皮细胞的氧化损伤 [J]. *环境与职业医学*, 2009, 26(4):353-357, 361.
- [8] 高佳琦. 深圳市大学城大气颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 污染特征分析及源解析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [9] 杜金花, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 深圳市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素的污染和来源特征 [C]//中国环境科学学会. $\text{PM}_{2.5}$ 监测及防治技术高级研讨会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 154-161.
- [10] 李响. 深圳 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成特征及来源解析 [D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [11] 涂宏. 南昌市中心区 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征及其与儿童健康关系的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [12] 中华人民共和国水利部. SL 394. 2-2007 铅镉钒磷等 34 种元素的测定-电感耦合等离子体质谱法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 7-15.
- [13] 深圳市生态环境局. 2017 年深圳市环境状况公报 [R/OL]. [2019-02-12]. <http://www.szhec.gov.cn/xxgk/tjsj/ndhjkzkgb/>.
- [14] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫局. GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 3.
- [15] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 418-427.
- [16] 杨敏娟, 沈惠平, 黄云彪, 等. 上海市浦东新区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染水平及其主要成分的分布特征 [J]. *环境与职业医学*, 2016, 33(11): 1026-1030.
- [17] 黄亚林, 刘超, 曾克峰, 等. 2013-2014 年武汉市 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布特征及其与气象条件的关系 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8): 1330-1335.
- [18] 陈瑞, 李拥军, 杨海霞. 2015 年兰州市大气细颗粒物成分监测 [J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(3): 231-233.
- [19] 李玉武, 刘咸德, 李冰, 等. 绝对主因子分析法解析北京大气颗粒物中铅来源 [J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3310-3318.
- [20] Blifford IH, Meeker GO. A factor analysis model of large scale pollution [J]. *Atmos Environ*, 1967, 1(1): 147-158.
- [21] 胡伟, 魏复盛. 中国 4 城市空气颗粒物元素的因子分析 [J]. *中国环境监测*, 2003, 19(3): 39-41.
- [22] 黄晓锋, 王慧, 宫照恒, 等. 深圳大气 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析与二次有机气溶胶估算 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(4): 723-734.
- [23] 徐昶. 中国特大城市气溶胶的理化特性、来源及其形成机制 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.

收稿日期: 2018-12-25