

铜陵市冬春季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中元素特征及来源分析

张红¹, 黄勇^{2,3}, 宋浩冉⁴, 陈凝¹, 王儒威⁴, 梅建鸣⁵

(1.安徽省环境科学研究院, 合肥 230071; 2.安徽省气象科学研究所 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031; 3.寿县国家气候观象台, 安徽 淮南 232200; 4.中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026; 5.铜陵市环境监测中心站, 安徽 铜陵 244000)

摘要: **目的** 了解铜陵市颗粒物中的元素特征和主要来源。**方法** 选择2014年冬季和春季的部分时段, 在铜陵市国家环境空气监测站——新民污水处理厂(工业区)采集PM₁₀和PM_{2.5}样品, 使用X射线荧光光谱(XRF)法进行元素的定量测试。采样期间, 冬季的空气质量以良和中、轻度污染为主; 春季以中度和重度污染天气为主, 采样期间出现了明显的重污染。**结果** PM_{2.5}和PM₁₀中S和Si元素的浓度均比其余元素高, P和Cu元素的浓度远低于其余元素。空气污染的指数越高, Fe、Mg、Al、Si则更易富集在PM₁₀上, 而K、Cu、Na、Cl、S元素更易富集在PM_{2.5}上, Ca和P这两种元素在PM₁₀和PM_{2.5}上的富集程度相当。空气颗粒物中, 富集最多的元素是K, 其次为Fe和Mg; 元素Cu、K、Cl在PM₁₀中的富集程度要高于PM_{2.5}。**结论** 扬尘(包括地面扬尘和建筑尘)是PM₁₀的最大来源, 其次是开采矿山和燃烧生物质, 燃煤、炼铜等工业企业排放贡献最小; 对于PM_{2.5}而言, 最大的来源是风沙、扬尘和开采矿山, 其次是燃煤、燃烧生物质和其他的工业企业排放, 炼铜的贡献最小。

关键词: 大气颗粒物; 元素; AQI

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.015

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0092-07

Characteristics and Sources of Elements in PM₁₀ and PM_{2.5} during Spring and Winter in Tongling City

ZHANG Hong¹, HUANG Yong^{2,3}, SONG Hao-ran⁴, CHEN Ning¹, WANG Ru-wei⁴, MEI Jian-ming⁵

(1. Anhui Institute of Environment Science, Hefei 230071, China; 2. Anhui Key Lab of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Anhui Meteorology Institute, Hefei 230031, China; 3. Shouxian National Climate Observatory, Huainan 232200, China; 4. USTC Department of Earth and Space Science, Hefei 230026, China; 5. Tongling Environment Observatory, Tongling 244000, China)

ABSTRACT: **Objective** To understand the characteristics and main sources of elements in particulate matters in Tongling City. **Methods** PM₁₀ and PM_{2.5} were collected at the National Ambient Air Automatic Monitoring Station-Tongling Xinmin Sewage Treatment Plant (industrial zone) during the winter (January 25 to February 13) and spring (May 16-27) of 2014 to carry out quantitative test on the elements with XRF. During the sampling period, the air quality was mainly at level II or III in the winter, and level IV or V in the spring. There was apparent heavy pollution. **Results** Compared with the other elements, the concentra-

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-06-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC021900, 2016YFC0201600); 安徽省重点研究和开发计划(1804a0802196)

作者简介: 张红(1977—), 女, 河南上蔡人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染形成机理和防治技术。

tions of S and Si in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} were higher, and the concentrations of P and Cu were much lower. With the different air quality index, the higher the air quality index was, the more concentrated elements were detected in a unit volume. K, Cl, Na, Cu and S were more likely to be enriched on $\text{PM}_{2.5}$, while Fe, Al, Mg and Si were more likely to be enriched on PM_{10} . The enrichment of Ca and P in the $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} were basically the same. The highest enriched element was K, followed by Mg and Fe, and the enrichment factors of K, Cl and Cu in PM_{10} were higher than those in $\text{PM}_{2.5}$. **Conclusion** The dust (including ground dust and building dust) has the largest contribution to PM_{10} , followed by mining and biomass burning, then coal combustion, copper smelting and other industrial enterprise emissions. While the largest contribution to $\text{PM}_{2.5}$ was mainly brought by soil dust, construction dust, road dust and mining, followed by coal combustion, biomass burning and other industrial enterprises emissions, then copper smelting enterprise emissions.

KEY WORDS: atmospheric particulate matter; element; AQI

大气颗粒物是指漂浮在空气中的微小粒子,根据颗粒物尺度的大小,可以分为可吸入颗粒物(PM_{10})和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)。因大气颗粒物来源的不同,从而使得不同城市之间的大气颗粒物的元素质量浓度水平存在着较大不同^[1]。已有研究表明,根据来源的不同,大气颗粒物中的元素可分为三种:地壳元素、污染元素、双重元素。其中,Al、Si、Ti、Fe、Ca等地壳元素主要分布在尺度较大的可吸入颗粒物中,而Pb、Zn、Cd、Ni、V、As、Cu等污染元素,则主要分布在大气细颗粒物之中^[2-3]。此外,颗粒物中元素的来源还可以分为:交通排放、燃料燃烧、冶金工业以及废弃物焚烧等^[3-5]。

铜陵市位于长江中游,是长三角地区中一个主要矿业城市。铜陵市区建设有开采矿石、冶炼金属、能源化工等多种排放大气污染物的工业项目。国内外学者围绕着铜陵市土壤中的重金属元素特征及其健康风险开展了较多的研究^[6-8],而对于大气颗

粒物中的元素特征和主要来源还没有开展过深入全面的研究,仅仅是对大气降尘中污染元素(主要针对重金属)进行了来源解析。结果表明,冶金和采矿是其主要污染来源,其次是燃煤、交通和土壤扬尘等^[9]。

文中围绕着铜陵这个安徽省典型矿业城市的大气颗粒物(PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)进行元素含量测试与分析,了解元素的赋存特征和来源。

1 采样与测试

在铜陵市国家环境空气监测站(新民污水处理厂)设置采样点($30^{\circ}56'29''\text{N}$, $117^{\circ}46'50''\text{E}$),进行颗粒物的采样。该测点地处铜陵市工业区,距离该站点 3 km 范围分布着冶炼厂、钢铁厂、磷化工等大型工矿加工企业,具有工业区代表性。研究区及样品采集位置如图 1 所示。

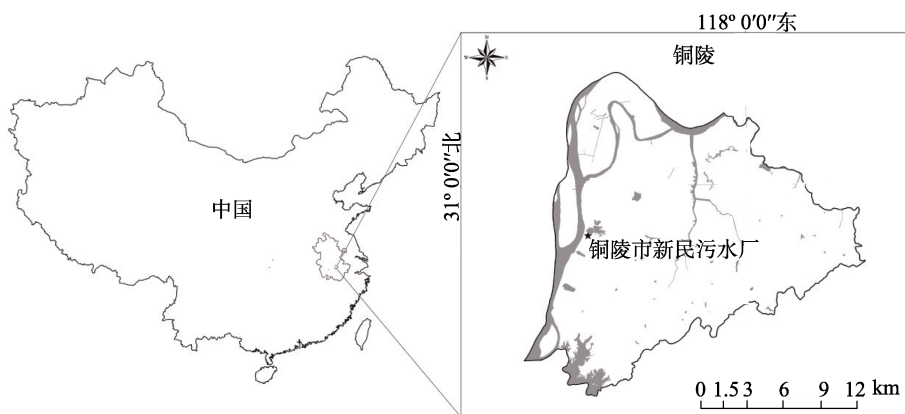


图 1 研究区及采样点位置

使用中等体积空气取样器(TH150C,武汉天虹有限公司,流量为 100 L/min,采样滤膜使用(Germany)90 直径有机滤膜),在 2014 年冬季 1 月 25 日—2 月 13 日和春季 5 月 16 日—27 日采样。冬季采集 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 滤膜各 7 张,春季采集 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 滤膜各 10 张。采样膜在平衡箱(温度为 25°C ,

相对湿度为 50%)平衡 24 h 后,使用感量为 0.1 mg 的分析天平进行称量。

采用日本 SHIMADZU 公司的 XRF-1800 仪器,使用 X 射线荧光光谱(XRF)法,对颗粒物样品中的无机元素(S、Si、Ca、Al、K、Fe、Na、Cl、Mg、P、Cu 等)进行检测。检测元素范围:4Be~92U;检

测浓度范围： 10^{-6} ~100%；最小分析微区：直径250 μm 。样品的元素测试过程中，平行带入标样和空白样品，指标测试精度在 $\pm 5\%$ 以内。

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化特征

通过对采样前后滤膜的称量，得到采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度（见表1和图2）。采样期间，冬季 PM_{10} 平均浓度为 $121.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标率为 28.6%； $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标率为 57.1%。春季 PM_{10} 平均浓度为 $189 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标率为 80.0%； $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标率为 90.0%。可以看出，采样期间春季 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显高于冬季。

采用颗粒物空气质量分指数来进行污染程度的划分。从计算结果来看，冬季采样期间以良和中轻度污染天气为主，而春季以中度和重度污染天气为主，期间有明显的重污染过程。考虑到5、6月份是南方省份上半年主要的秸秆焚烧期^[10]，秸秆焚烧引起的空气污染，是本次春季采样期间5月浓度升高的主要原因之一。

表1 采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
	日期	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	污染程度
冬季	1月25日	273	223	严重污染
	1月26日	82	71	良
	1月27日	119	82	轻度污染
	2月4日	75	53	良
	2月10日	67	51	良
	2月12日	157	126	中度污染
	2月13日	79	59	良
	平均值	121.7	95.0	
春季	5月16日	138	89	轻度污染
	5月17日	175	151	重度污染
	5月18日	192	136	中度污染
	5月19日	93	74	良
	5月20日	205	179	重度污染
	5月21日	296	202	重度污染
	5月22日	199	155	重度污染
	5月25日	129	113	中度污染
	5月26日	166	114	轻度污染
	5月27日	292	185	中度污染
	平均值	189	140	

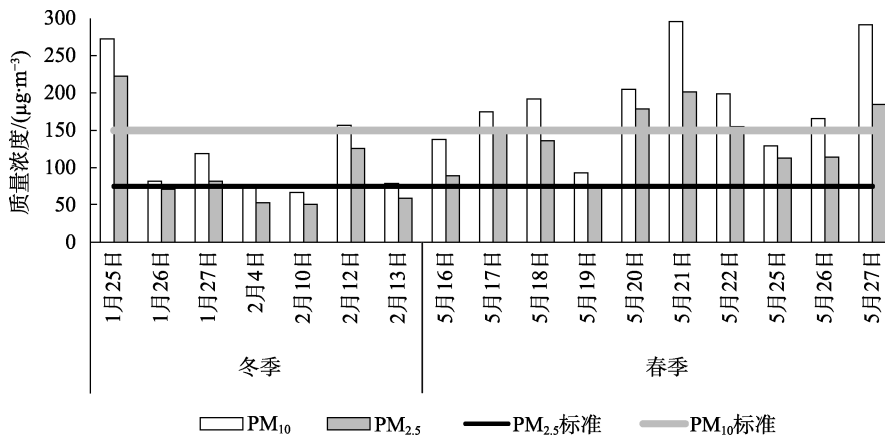


图2 采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分布

2.2 颗粒物的元素含量特征

统计采样期间，冬季和春季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 中各种元素（Si、Ca、Al、K、Fe、Na、Cl、Mg、P、Cu）的质量浓度如图3所示。冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素的平均质量浓度顺序为：S > Si > Ca > Al > K > Fe > Na > Cl > Mg > P > Cu； PM_{10} 中元素的平均质量浓度顺序为：S > Si > Ca > K > Al > Na > Fe > Cl > Mg > P > Cu。春季 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素的平均质量浓度顺序为：S > Si > K > Al > Ca > Na > Cl > Fe > Mg > P > Cu； PM_{10} 中元素的平均质量浓度顺序为：S > Si > Ca > Al > K > Cl > Fe > Na > Mg > P > Cu。采样期内，不管是 $\text{PM}_{2.5}$ 还是 PM_{10} ，S 元素的浓度均高于其他元素，其次为 Si 元素。春季

$\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中，S 元素的平均质量分别为 $(6.23 \pm 2.39) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(7.97 \pm 2.122.39) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中，S 元素的平均质量分别为 $(4.10 \pm 4.49) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(8.34 \pm 5.70) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。春季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中，Si 元素平均质量分别为 $(2.36 \pm 0.89) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(4.78 \pm 2.25) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，是冬季 Si 元素含量的 1.24 倍和 1.6 倍。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中，P 和 Cu 元素的质量浓度远低于其余元素，Fe、Cl、Mg、Na 等元素的含量均处于同一水平，质量浓度差异不大。

铜陵 $\text{PM}_{2.5}$ 中，各元素质量浓度与国内其他城市对比的研究结果见表2^[11-17]。可以看出：1）Fe、K、Al、Cu 元素的质量浓度与南昌相当，而 Mg 元素的质量浓度要低于南昌（南昌超过铜陵的 2.7 倍）；2）

Si、Fe、Cu、Ca 元素的质量浓度与福州相当，但是 Al 元素的质量浓度要高于福州（超过 1.68 倍）；3）太原和兰州各元素的质量浓度整体上比铜陵高，太原的 Al 元素质量浓度超过铜陵 4.34 倍，兰州的 Cl 元素质量浓度超过铜陵 15.2 倍，而铜陵的 S 元素质量浓度则超过兰州 1.53 倍。

铜陵 PM₁₀ 中，各元素的质量浓度与国内其他城

市对比的研究结果见表 3^[18-21]。对比分析结果表明，除 Si、Ca、Mg 元素的质量浓度与山西忻州相当外，其余元素的含量均比北京、天津和抚顺含量低。北京冬季 PM₁₀ 中，Na 元素的含量是铜陵的 12.7 倍，Mg 元素含量是铜陵的 31 倍。相对于北京、天津和抚顺来说，铜陵 PM₁₀ 中多个元素的浓度均处于较低水平。

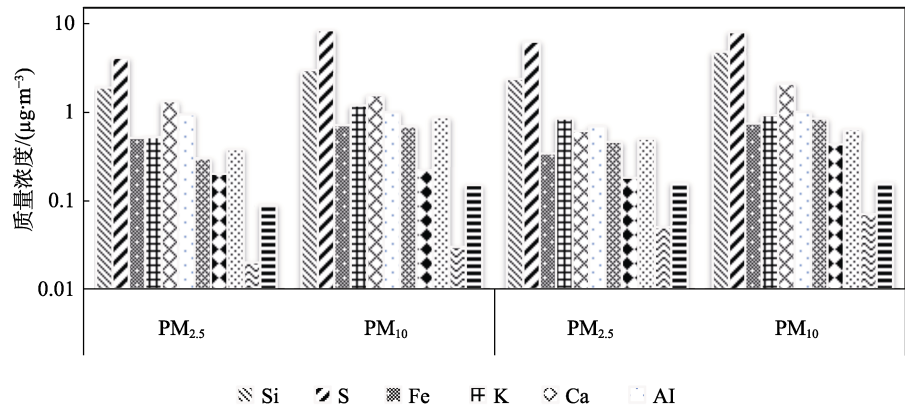


图 3 铜陵市冬季和春季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 元素浓度

表 2 PM _{2.5} 及其元素浓度与其他城市比较									μg/m ³	
	铜陵			南昌	太原	北京	香港九龙塘	厦门	福州	兰州
	冬季	春季	平均值							
Si	1.89±1.20	2.36±0.89	2.17±1.01	—	6.301	—	—	0.51	1.86	—
S	4.10±4.49	6.23±2.39	5.35±3.40	—	—	—	—	—	—	3.506
Fe	0.51±0.49	0.34±0.08	0.41±0.31	0.571	1.53	0.741	0.401	0.25	0.66	2.039
K	0.52±0.45	0.84±0.26	0.71±0.37	0.734	0.788	1.701	—	—	—	1.451
Ca	1.32±1.14	0.61±0.32	0.90±0.80	—	0.13	0.458	0.224	0.12	0.8	2.757
Al	0.94±0.81	0.69±0.31	0.79±0.55	0.74	3.431	0.177	0.215	0.28	0.47	1.226
Cl	0.30±0.31	0.46±0.21	0.39±0.26	—	—	—	—	—	—	5.92
Mg	0.20±0.22	0.18±0.06	0.18±0.14	0.537	0.127	0.165	0.062	—	—	0.726
Na	0.38±0.37	0.50±0.15	0.45±0.26	—	0.76	4.971	—	—	—	1.174
Cu	0.02±0.01	0.05±0.03	0.04±0.03	0.019	0.058	0.052	0.054	0.026	0.18	0.022
P	0.09±0.10	0.16±0.12	0.13±0.11	—	—	—	—	—	—	—

表 3 PM ₁₀ 元素组分质量浓度统计									μg/m ³	
	铜陵			北京		辽宁抚顺	天津	山西忻州		
	冬季	春季	平均值	冬季	春季					
Si	2.97±2.23	4.78±2.25	4.03±2.35	—	—	—	—	5.25		
S	8.34±5.70	7.97±2.12	8.12±3.76	—	—	—	—	—		
Fe	0.71±0.79	0.74±0.30	0.73±0.52	5.701	4.10	1.721	4.033	1.46		
K	1.18±0.87	0.92±0.34	1.12±0.58	4.935	2.51	0.608	—	—		
Ca	1.55±1.08	2.09±1.24	1.87±1.18	8.215	7.49	3.953	4.901	2.485		
Al	1.00±0.76	1.00±0.62	1.00±0.74	8.205	7.55	4.454	1.295	5.061		
Cl	0.69±0.55	0.84±0.41	0.78±0.46	—	—	—	—	—		
Mg	0.22±0.21	0.43±0.17	0.35±0.22	6.856	7.22	0.743	0.931	0.365		
Na	0.87±0.83	0.64±0.11	0.73±0.51	11.804	5.84	1.591	1.159	1.009		
Cu	0.03±0.02	0.07±0.04	0.06±0.04	0.531	0.16	0.038	0.015	0.214		
P	0.15±0.15	0.16±0.11	0.17±0.12	0.355	0.69	—	—	—		

2.3 不同空气质量等级的元素含量特征

不同空气质量等级时, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中各元素含量的统计结果如图 4 所示。从统计结果来看, 重度以上污染期间, 颗粒物各元素的质量浓度均最高; 且随着空气质量的改善而逐步降低。不论空气质量为何种等级, S 和 Si 元素的质量浓度均要高于其余元素。PM_{2.5} 中 S 元素平均质量浓度为(8.78±2.87) μg/m³, 是空气质量为良时的 2.99 倍, 是轻度污染的 2.29 倍, 是中度污染的 1.68 倍; PM₁₀ 中 S 元素的平均质量为(9.14±4.41) μg/m³, 是空气质量为良时的 1.98 倍, 是轻度污染的 2.39 倍。PM_{2.5} 中 Si 元素的平均质量浓度为(2.57±0.96) μg/m³, 是空气质量为良时的 1.74 倍, 是轻度污染的 1.27 倍, 是中度污染的 1.08 倍; PM₁₀

中 Si 元素平均质量浓度为(5.89±2.74) μg/m³, 是空气质量为良时的 2.49 倍, 是轻度污染的 1.54 倍, 是中度污染的 1.49 倍。

计算重度污染时, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素的质量浓度与空气质量为良时相应元素浓度的比值见表 4。可以看出, 重度污染时, S 元素在 PM_{2.5} 中的含量是空气质量为良时的 2.99 倍, PM₁₀ 中含量是空气质量为良时的 1.98 倍; PM_{2.5} 中 Si 元素含量是空气质量为良时的 1.74 倍, PM₁₀ 中 Si 含量是空气质量为良时的 2.49 倍。S 元素更容易在 PM_{2.5} 中富集, 而 Si 元素则更容易在 PM₁₀ 中富集。K、Cl、Na、Cu 元素和 S 元素一样更容易富集在 PM_{2.5} 上, 而 Fe、Al、Mg 元素和 Si 一样更容易富集在 PM₁₀ 上, 此外, Ca 和 P 元素在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 上的富集程度相当。

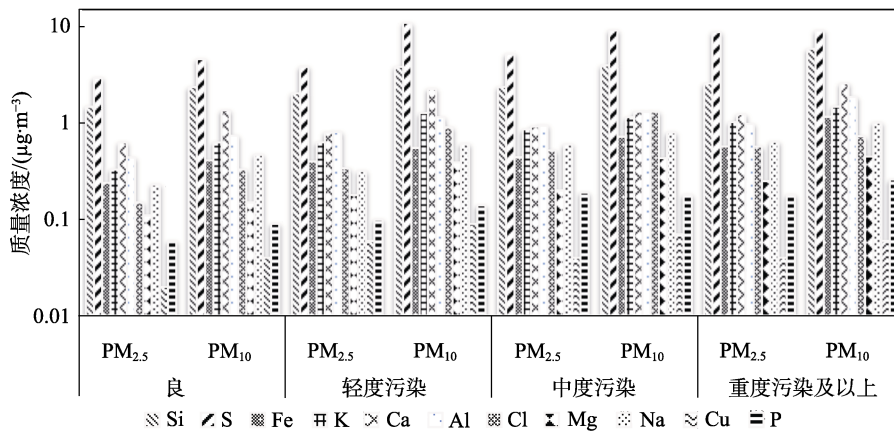


图 4 不同空气质量指数下 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 元素含量

表 4 空气重度污染时元素浓度含量与空气良时元素浓度含量比值

	Si	S	Fe	K	Ca	Al	Cl	Mg	Na	Cu	P
PM _{2.5}	1.74	2.99	2.38	3.09	1.95	2.23	3.80	2.27	2.78	2.00	3.00
PM ₁₀	2.49	1.98	2.83	2.35	1.90	2.53	2.21	3.00	2.15	1.50	2.89

2.4 颗粒物中元素来源分析

国内外研究学者通过对大气颗粒物来源的研究, 总结区分出各种污染源的标识物^[9, 23-29], 结果见表 5。

表 5 各类污染源的标识物

排放源类型	特征标识物
地面扬尘	Si、Al、Ca、Mg、Na、Fe、Mn
建筑尘	Ca
燃油和机动车排放	Cu、S、Cl
燃煤尘	S、Cl
冶金化工	Fe、Ca、Cu
生物质燃烧	K

为分析 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中金属元素的来源, 利用 SPSS (14.0) 软件对金属元素的质量浓度数据进行最

大方差旋转因子分析, 得到 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 主成分分析结果, 见表 6。可以看出, 影响铜陵市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的来源主要有 3 组, 累积方差贡献率分别达到 82.697%和 88.706%。

对于 PM₁₀ 而言, 主成分 1 对应的特征值最大, 方差贡献率为 44.537%, 各元素中, Si、Al、Mg 地壳元素的相关系数较高, 均大于 0.8, 其中 Si 和 Al 元素相关系数高达 0.9。根据各类污染源的标识物可以看出, 主因子 1 主要来自地面扬尘和建筑尘等污染源。主成分 2 的方差贡献率为 23.773%, Fe、K、Ca、Cl、Cu 等元素相关系数较好。铜陵市为典型矿山城市, 具有铜矿和硫铁矿的开采以及有色金属的冶炼加工。矿山开采过程中会向大气中释放大量的地壳元素 Ca、Fe, 而冶金降尘中的 Cu 元素含量显著高于交通尘和燃煤尘^[9]。此外, K 元素为生物质燃烧的特征标识元素, 采样期间是南方省份上半年主要秸秆焚

表 6 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 最大方差旋转因子分析结果

	PM ₁₀			PM _{2.5}		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
Si	0.933	0.200	0.229	0.918	0.336	-0.053
S	0.225	-0.116	0.824	0.206	0.917	-0.154
Fe	0.352	0.859	-0.226	0.819	0.216	0.474
K	0.182	0.805	0.296	0.269	0.808	0.294
Ca	0.593	0.699	-0.154	0.861	-0.021	0.487
Al	0.927	0.198	0.254	0.929	0.307	-0.074
Cl	-0.262	0.610	0.590	0.068	0.896	0.352
Mg	0.848	0.269	0.160	0.920	0.219	-0.238
Na	0.093	0.019	0.924	0.176	0.916	-0.100
Cu	0.204	0.785	-0.056	-0.011	0.015	0.944
P	0.275	0.038	0.823	0.233	0.694	-0.093

烧期^[10]，重污染过程受秸秆焚烧影响较大。因此，可认为主因子 2 可能来自矿山开采和生物质燃烧。主成分 3 的方差贡献率为 14.386%，该主成分中 S、Na、P 元素相关系数较好。考虑到 S 元素是燃煤尘的标识性元素，炼铜过程中也会产生释放大量含 S 元素的物质，而 P 元素则与磷化肥企业的排放有关。因此，认为主因子 3 可能来自燃煤、炼铜及其企业排放。

对于 PM_{2.5} 来说，主成分 1 的方差贡献率为 53.296%，各元素中，Si、Fe、Ca、Mg、Al 等地壳元素的相关系数较高均大于 0.8，其中 Si、Mg 和 Al 元素的相关系数高达 0.9。主因子 1 来自地面扬尘、建筑尘以及矿山开采等污染源。主成分 2 的方差贡献率为 21.108%，该主成分中 S、K、Cl、Na、P 元素的相关系数较好，主因子 2 可能来自燃煤、生物质燃烧及其工业企业排放。主因子 3 的方差贡献率为 14.302%，该主成分中仅与 Cu 元素的相关系数较好，铜陵市以铜冶炼著称。因此，主因子 3 主要来自铜冶炼。

以上分析表明，铜陵市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的主要来源存在差异：PM₁₀ 最大的来源是建筑施工扬尘和道路扬尘，其次是燃烧生物质和开采矿山，最后是燃煤、冶炼铜以及工业企业的排放；PM_{2.5} 最大的来源是建筑施工扬尘、道路扬尘、土壤风沙以及矿山开采，其次是燃煤、燃烧生物质及工业企业的排放，最后是铜冶炼过程中的排放。

3 结论

通过对铜陵市冬季和春季大气颗粒物 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中的元素浓度进行分析，研究 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 这两种不同粒径颗粒物中元素的特征规律以及主要来源。结果表明：

1) 采样期间，冬季 PM₁₀ 的平均质量浓度为 121.7 μg/m³，超标率为 28.6%；PM_{2.5} 的平均质量浓

度为 95 μg/m³，超标率为 57.1%。春季 PM₁₀ 的平均质量浓度为 189 μg/m³，超标率为 80.0%；PM_{2.5} 的平均质量浓度为 140 μg/m³，超标率为 90.0%。春季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度要明显高于冬季。冬季采样期间以良和中轻度污染天气为主，而春季以中度污染和重度污染天气为主，其中在春季采样期内出现了明显的重污染天气过程。

2) PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中，S 和 Si 元素的质量浓度均高于其他元素。春季 PM_{2.5} 中，S 元素的平均质量浓度为(6.23±2.39) μg/m³，是冬季的 1.5 倍；春季 PM_{2.5} 中，Si 元素平均质量浓度为(2.36±0.89) μg/m³，是冬季的 1.24 倍。春季 PM₁₀ 中，Si 元素平均质量浓度为(4.78±2.25) μg/m³，是冬季的 1.6 倍。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 P 和 Cu 元素浓度远低于其余元素浓度。Fe、Cl、Mg、Na 元素含量均处于同一水平，质量浓度相差不大。

3) 元素质量浓度随着空气质量指数的降低而降低。不论空气质量为何种等级，S 和 Si 元素的质量浓度均高于其余元素。重度以上污染时，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中，S 元素的平均质量浓度分别为(8.78±2.87) μg/m³ 和(9.14±4.41) μg/m³，是空气质量为良时的 2.99 倍和 1.98 倍；Si 元素平均质量浓度分别为(2.57±0.96) μg/m³ 和(5.89±2.74) μg/m³，是空气质量为良时的 1.74 倍和 2.49 倍。

4) S、Cl、K、Na、Cu 元素更容易富集在 PM_{2.5} 上，而 Si、Fe、Al 和 Mg 元素更容易富集在 PM₁₀ 上。Ca 和 P 元素在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 上的富集程度相当。

5) 铜陵市大气颗粒物中富集程度最高的是 K 元素，其次是 Mg 和 Fe 元素。Cl、K、Cu 元素在 PM₁₀ 中的富集程度高于在 PM_{2.5}，其他元素则相差不大。

6) 铜陵 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的主要来源存在差异。PM_{2.5} 最大的来源是建筑施工扬尘、道路扬尘、土壤风沙以及矿山开采，其次是燃煤、燃烧生物质及工业企业的

排放。PM₁₀最大的来源是建筑施工扬尘和道路扬尘，其次是燃烧生物质和开采矿山。

参考文献:

- [1] 汪浪, 杨海龙, 李晓燕. 中国部分省会城市 PM_{2.5} 中重金属水平及影响因素分析[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 72-83.
- [2] BALACHANDRAN S, MEENA B R, KHILLARE P S. Particle Size Distribution and Its Elemental Composition in the Ambient Air of Delhi[J]. Environment International, 2000, 26(1): 49-54.
- [3] MAENHAUT W, SCHWARZ J, CAFMEYER J, et al. Aerosol Chemical Mass Closure during the EUROT-AC-2 AEROSOL Intercomparison 2000[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 2002, 189(1): 233-237.
- [4] GAO Y, NELSON E D, FIELD M P, et al. Characterization of Atmospheric Trace Elements on PM(2.5) Particulate Matter over the New York-New Jersey Harbor Estuary[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(6): 1077-1086.
- [5] 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.
- [6] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2261-2270.
- [7] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 88-96.
- [8] 叶文玲, 陈增, 徐晓燕. 铜陵铜尾矿库优势植物对重金属富集特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 11-14.
- [9] 李湘凌, 周涛发, 殷汉琴, 等. 基于层次聚类法和主成分分析法的铜陵市大气降尘污染元素来源解析研究[J]. 地质论评, 2010, 56(2): 283-288.
- [10] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109-1118.
- [11] 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.
- [12] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4431-4438.
- [13] 王秦, 陈曦, 何公理, 等. 北京市城区冬季雾霾天气 PM_{2.5} 中元素特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1441-1445.
- [14] JIANG S Y N, YANG F H, CHAN K L, et al. Water Solubility of Metals in Coarse PM and PM_{2.5} in Typical Urban Environment in Hongkong[J]. Atmospheric Pollution Research, 2014, 5(2): 236-244.
- [15] 庄马展. 厦门大气 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.
- [16] XU L L, CHEN X Q, CHEN J S, et al. Seasonal Variations and Chemical Compositions of PM_{2.5} Aerosol in the Urban Area of Fuzhou, China[J]. Atmospheric Research, 2012, 104: 264-272.
- [17] 王新, 裴燕, 陈红, 等. 兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1619-1628.
- [18] 景慧敏. 北京可吸入颗粒物中元素地球化学特征与健康风险评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [19] 王嘉珺, 赵雪艳, 姬亚芹, 等. 抚顺市 PM₁₀ 中元素分布特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2012, 28(4): 107-113.
- [20] 董海燕, 古金霞, 姜伟, 等. 天津市颗粒物中元素化学特征及来源[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(1): 25-28.
- [21] 刘凤娟, 彭林, 牟玲, 等. 忻州市市区大气颗粒物中的元素组成特征[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 313-320.
- [22] 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: 39.
- [23] AL-MOMANI I F. Trace Elements in Atmospheric Precipitation at Northern Jordan Measured by ICP-MS: Acidity and Possible Sources[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(32): 4507-4515.
- [24] HOSIOKANGAS J, RUUSKANEN J, PEKKANEN J. Effects of Soil Dust Episodes and Mixed Fuel Sources on Source Apportionment of PM₁₀ Particles in Kuopio, Finland[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(23): 3821-3829.
- [25] MOULI P C, MOHAN S V, BALARAM V, et al. A Study on Trace Elemental Composition of Atmospheric Aerosols at a Semi-arid Urban Site Using ICP-MS Technique[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(1): 136-146.
- [26] OKUDA T, KATSUNO M, NAOI D, et al. Trends in Hazardous Trace Metal Concentrations in Aerosols Collected in Beijing, China from 2001 to 2006[J]. Chemosphere, 2008, 72(6): 917-924.
- [27] 谢骅, 黄世鸿, 李如祥, 等. 我国若干地区总悬浮颗粒物和沉积尘来源解析[J]. 气象科学, 1999, 19(1): 26-32.
- [28] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气 PM_{2.5} 中微量元素浓度变化特征与来源[J]. 环境科学, 2003, 24(6): 33-37.
- [29] 杨忠平. 长春市城市重金属污染的生态地球化学特征及其来源解析[D]. 长春: 吉林大学, 2008.