

典型矿业城市大气颗粒物水溶性离子分布特征

欧金萍¹, 郑刘根^{2*}, 杨叶²

(1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽省矿山生态修复工程实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 利用2014年7月和2015年1月在淮南市不同功能区采集的大气颗粒物样品, 分析其水溶性离子时空和粒径分布特征。结果表明: 夏季和冬季粗、细粒子中总水溶性离子质量浓度均值分别为 $(13.45 \pm 4.53) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $(27.81 \pm 17.65) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(12.87 \pm 8.37) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $(85.08 \pm 35.41) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。淮南市大气颗粒物中主要的水溶性离子为 Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 。冬季各功能区 $\text{PM}_{2.5}$ 中总水溶性离子质量浓度普遍高于夏季。大气颗粒物中水溶性离子主要来源于土壤源、工业污染及二次转化, 冬季二次污染源主要以流动源污染为主, 而夏季流动源和固定源污染贡献接近。

关键词: 水溶性离子; $\text{PM}_{2.5}$; $\text{PM}_{2.5-10}$; 粒径分布; 污染源; 淮南市

中图分类号: X513 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2020)05-0023-05

Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Aerosol Particles in A Typical Mining City

OU Jin-ping¹, ZHENG Liu-gen^{2*}, YANG Ye²

(1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;
2. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Anhui Province Engineering Laboratory for Mine Ecological Remediation, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: In this paper, the atmospheric particulate samples were collected from different functional areas in Huainan in July 2014 and January 2015 for analyzing the spatial and temporal distribution characteristics of water-soluble ions and particle size. The results showed that the average mass concentrations of water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5-10}$ and $\text{PM}_{2.5}$ were $(13.45 \pm 4.53) \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $(27.81 \pm 17.65) \mu\text{g}/\text{m}^3$ in summer, $(12.87 \pm 8.37) \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $(85.08 \pm 35.41) \mu\text{g}/\text{m}^3$ in winter, respectively. The main water-soluble ions in atmospheric particulates were Ca^{2+} , NO_3^- and SO_4^{2-} . The mass concentration of total water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ in each functional area in winter was higher than that in summer. Soils, industrial emissions and secondary transformation were the main sources of water-soluble ions in atmospheric particulates. Mobile source was the main secondary pollution source in winter. Mobile source and stationary source had similar contribution in summer.

Key words: Water-soluble ions; $\text{PM}_{2.5}$; $\text{PM}_{2.5-10}$; Particle size distribution; Pollution source; Huainan

大气气溶胶粒子不仅通过直接和间接辐射效应影响全球气候, 还可造成灰霾等现象影响大气的能见度, 且大气颗粒物可通过呼吸等作用进入人体, 对人体健康造成危害^[1-5]。研究表明, $\text{PM}_{2.5}$ 中50%~60%的成分为水溶性离子, 而 PM_{10} 中则占60%~70%^[6]。二次离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)是水溶性离子的主要成分, 其对大气颗粒物的吸湿性和酸度有严重影响, 且具有显著的季节和地区性

差异^[7-10]。

淮南是我国14个大型煤炭基地和6大煤电基

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2020-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41373108, 41702176); 淮北矿业集团有限责任公司科技基金资助项目(HK-2018-1)

作者简介: 欧金萍(1992—), 女, 安徽萧县人, 在读博士研究生, 研究方向为环境地球化学。

* 通信作者: 郑刘根 E-mail: lgzheng@ustc.edu.cn

地之一^[11],属于典型的矿业城市。随着能源消耗增加,汽车尾气、工业烟气排放,以及化石燃料的不完全燃烧,大量水溶性离子附着在颗粒物表面,严重影响区域空气质量和人类健康。目前淮南市大气污染研究主要集中于单一粒径颗粒物化学组分分析^[12-13],缺乏对水溶性离子的时空和粒径分布特征研究。今采集分析淮南市不同功能区大气颗粒物样品,研究其水溶性离子的组成、时空和粒径分布特征,以期对淮南市及典型矿业城市空气污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

综合考虑人口、资源、环境、经济、社会等因素,将淮南市划分为6个功能区,在每个功能区内选择地势宽阔的区域布设1个采样点(见图1),分别为商业区商贸喷泉广场(E117°00',N32°38'),文教区淮南师范学院新区(E116°57',N32°37'),工业区安徽淮化集团有限公司附近(E116°57',N32°38'),居民区淮南煤矿生态环境保护国家工程实验室(E117°02',N32°38'),采矿区谢一矿浅部井(E116°52',N32°36'),对照区山南新区管委会(E117°00',N32°36')。

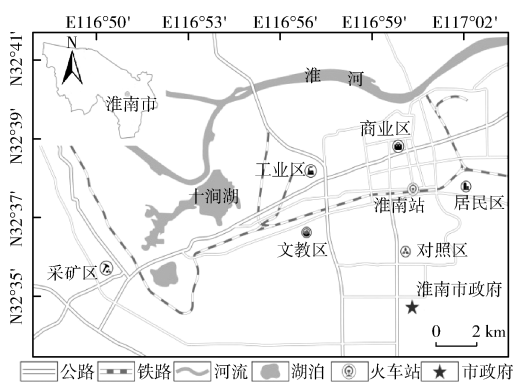


图1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品采集

2014年7月(夏季)和2015年1月(冬季)分别在淮南市6个功能区采集 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 样品。 PM_{10} 采用TH-3150型大气与颗粒物组合采样器采集, $PM_{2.5}$ 采用HY-1000E型智能大气采样器采集,流量均为 $1.05\text{ m}^3/\text{min}$ 。滤膜为石英滤膜,采样前用锡箔纸密封好,放入马弗炉于 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 下加热

处理4 h以去除可能的有机物。每个采样点放置2台仪器,分别采集 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 。6个采样点同时采样,采样时间为每天9:00—17:00,每小时记录1组数据,选择晴天连续采样3 d,采样结束后将石英滤膜样品置于冰箱中避光保存,待分析。

1.3 样品处理分析

分别裁取采集了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品的滤膜1/4、1/16放入离心管中,加入20 mL超纯水,超声震荡1 h,离心机4 000 r/min转速离心10 min,空白滤膜按同样方法处理。浸提液经 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后,使用离子色谱仪(美国戴安公司,ICS-1500型)分析样品中的阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}),使用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES,美国热电公司,IRIS Intrepid II XSP型)分析样品中的阳离子(Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+)。

2 结果与讨论

2.1 淮南市总水溶性离子的质量浓度水平

通常把空气动力学直径 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 作为粗、细粒子的分界,将空气动力学等效直径 $\leq 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子($PM_{2.5}$)称为细粒子, $> 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子($PM_{2.5-10}$)称为粗粒子。淮南市夏、冬两季大气 $PM_{2.5-10}$ 中总水溶性离子质量浓度分别为(13.45 ± 4.53) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和(12.87 ± 8.37) $\mu\text{g}/\text{m}^3$,较为相近;夏、冬两季 $PM_{2.5}$ 中总水溶性离子质量浓度分别为(27.81 ± 17.65) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和(85.08 ± 35.41) $\mu\text{g}/\text{m}^3$,冬季比夏季高2.1倍,且波动较大。与国内其他城市相比,淮南市 $PM_{2.5}$ 中总水溶性离子年均质量浓度($56.44\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)超过合肥市($38.89\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[14]45.1%,且远高于济南市($30.00\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[15]和上海市($14.03\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[16],表明淮南市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染较为严重。

2.2 淮南市水溶性离子粒径分布特征

PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 在夏季和冬季的质量浓度分别为 $98\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $51\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $47\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $194\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $134\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。冬季 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准限值(PM_{10} 为 $150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 为 $75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),空气质量较差。夏、冬两季 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的占比分别为52%和69%。夏季 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 与 PM_{10} 均有较强的相关性(r 分别为0.864、0.899),冬季 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 与 PM_{10} 也呈

显著正相关(r 分别为 0.912、0.907)。这说明夏冬季 PM_{10} 的变化均由粗、细粒子共同决定,夏季粗、细粒子质量浓度相当,而冬季细粒子是 PM_{10} 的主要成分。

表 1 为淮南市夏、冬两季颗粒物中水溶性离子质量浓度及其比值。由表 1 可知,夏季和冬季总水溶性离子质量浓度分别占 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 的 54.5%、28.6% 和 63.5%、21.5%,可见,水溶性离子在细粒子中的占比较在粗粒子中的高,说明水溶性离子大部分存在于细粒子中,而不溶于水的矿物质更多地存在于粗粒子中。从季节变化上看,冬季水溶性离子的质量浓度高于夏季,这是由于冬季多沙尘、雾霾天气,且采暖期燃煤量增加,而且冬季稳定的大气边界层也不利于污染物扩散^[10],造成水溶性离子在近地面大气中累积,如土壤源代表性离子 Ca^{2+} 和二次源代表性离子 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的质量浓度冬季明显高于夏季。从主要离子分布上看,夏、冬季细粒子中的主要水溶性离子均为 NO_3^- 和 SO_4^{2-} ;夏季粗粒子中主要水溶性离子为 Na^+ 和 NO_3^- ,冬季为 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,分别占夏、冬季粗粒子中水溶性离子总和的 64.7%、59.0%。

2.3 水溶性离子的时空分布特征

图 2(a)(b)(c)(d) 分别为淮南市各功能区夏、冬两季 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 中水溶性离子的质量浓度分布。由图 2 可见,淮南市大气颗粒物中主要的水溶性离子为 Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} ,且这 3 种离子在粗、细粒子中的时空分布差异较大。夏季 $PM_{2.5}$ 中总水溶性离子质量浓度由高到低为化工区 > 采矿区 > 商业区 > 文教区 > 居民区 > 对照区。化工区 Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度分别为 $5.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $30.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $17.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$,是对照区($2.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、

$1.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $4.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的 2.8 倍、17.9 倍和 3.5 倍; $PM_{2.5-10}$ 中总水溶性离子质量浓度由高到低为采矿区 > 文教区 > 化工区 > 对照区 > 商业区 > 居民区。采矿区 Na^+ 和 NO_3^- 的质量浓度分别为 $3.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $6.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$,是居民区($0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $3.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的 7.6 倍和 1.9 倍。

冬季各功能区 $PM_{2.5}$ 中总水溶性离子质量浓度普遍高于夏季,由高到低为采矿区 > 化工区 > 文教区 > 商业区 > 居民区 > 对照区。采矿区的 Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度分别为 $14.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $61.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $38.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$,是对照区($7.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $16.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $5.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的 1.9 倍、3.7 倍和 7.2 倍; $PM_{2.5-10}$ 中总水溶性离子质量浓度由高到低为采矿区 > 商业区 > 化工区 > 居民区 > 对照区 > 文教区,采矿区的 Ca^{2+} 质量浓度为 $12.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$,比文教区($1.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 高 6.8 倍。

2.4 水溶性离子的来源解析

为了了解淮南市大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 中水溶性离子的来源,采用主成分分析法(PCA)进行分析,结果见表 2。由表 2 可知,夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子主要受 2 个因子的影响。因子 1 的方差贡献率高达 57.97%,载荷较大的离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 同为自然源,均是土壤中富含的主要元素,主要来自土壤扬尘、建筑扬尘等局地源^[17]。 F^- 与 Cl^- 在 0.05 水平上显著相关,相关性系数为 0.905,即二者同源,其主要来自工业排放。 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要来自二次转化,其前体物 SO_2 、 NO_x 主要来源于化石燃料燃烧和汽车尾气,通常将 NO_3^- 作为交通排放源的指标, SO_4^{2-} 作为燃煤排放的指标, NO_3^-/SO_4^{2-} 比值是否 > 1 常用于辨别颗粒物污染是以流动源(如汽车

表 1 淮南市夏、冬两季颗粒物中水溶性离子质量浓度及其比值

Table 1 Mass Concentration and its ratio of water-soluble ions in PM and in summer and winter in Huainan

水溶性离子	夏季				冬季			
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}/PM_{2.5-10}$ ^①	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}/PM_{2.5-10}$ ^①
Ca^{2+}	5.01	3.48	1.53	2.27	15.09	10.00	5.09	1.96
K^+	0.92	0.29	0.63	0.46	3.17	2.68	0.49	5.47
Mg^{2+}	0.56	0.14	0.42	0.33	0.67	0.48	0.19	2.53
Na^+	3.68	1.29	2.39	0.54	2.18	1.27	0.91	1.40
F^-	0.29	0.03	0.26	0.12	0.74	0.50	0.24	2.08
Cl^-	0.59	0.36	0.23	1.57	12.49	11.31	1.18	9.58
NO_3^-	14.61	8.30	6.31	1.32	39.60	37.33	2.27	16.44
SO_4^{2-}	15.60	13.92	1.68	8.29	24.01	21.51	2.50	8.60
合计	41.26	27.81	13.45	2.07	97.95	85.08	12.87	6.61

① 比值无量纲。

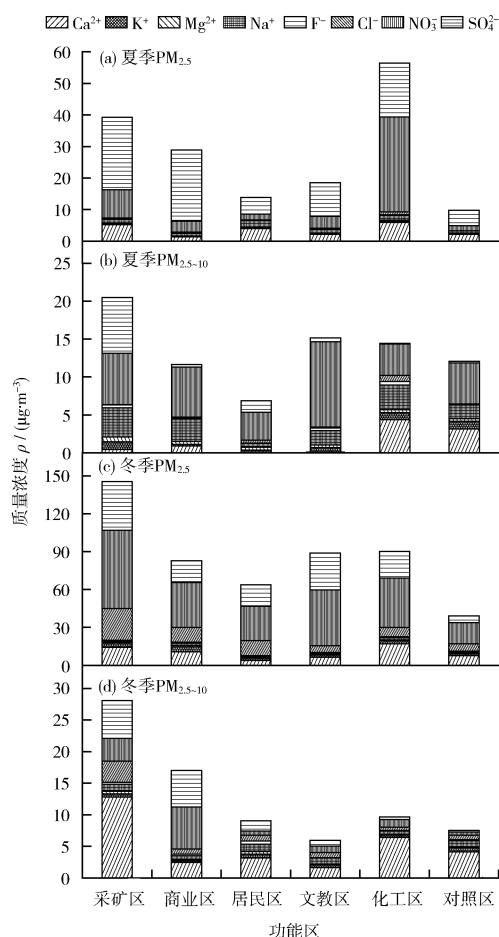


图 2 淮南市各功能区夏冬两季 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 中水溶性离子质量浓度分布

Fig. 2 Distribution of mass concentration of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ in summer and winter in each functional area in Huainan

尾气) 污染为主还是以固定源(如燃煤)污染为主^[18-19]。由表 1 中数据计算得到 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值为 0.596, 说明夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的二次源

污染以固定源污染为主。因子 2 方差贡献率为 23.95%, K^+ 有较高载荷。 K^+ 主要来自生物质的燃烧^[20-21], 这是由于此时正值当地小麦收割, 秸秆燃烧排放大量含 K^+ 污染物, 附着在 $PM_{2.5}$ 上。上述 2 个因子总方差贡献率为 81.92%, 很好地解释了 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的全部来源。

夏季 $PM_{2.5-10}$ 中水溶性离子主要受 3 个因子的影响。因子 1 方差贡献率为 32.87%, Mg^{2+} 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 载荷较大。 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 在 0.01 水平上显著相关, 相关性系数为 0.974, 即二者具有同源性, 均来自土壤。因子 2 方差贡献率为 28.65%, Ca^{2+} 载荷较大, 同样代表土壤源。因子 3 方差贡献率为 25.36%, NO_3^- 载荷较大, 且 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值为 3.76, 说明因子 3 主要受汽车尾气排放的影响。

冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子主要受 2 个因子的影响。因子 1 方差贡献率为 45.13%, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 F^- 载荷较大, 其来源与夏季类似。因子 2 方差贡献率为 35.78%, Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 载荷较大, 且 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值为 1.74, 即因子 2 主要受汽车尾气和工业污染的影响。冬季 $PM_{2.5-10}$ 中水溶性离子主要受 3 个因子的影响。因子 1 的方差贡献率为 33.00%, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 载荷较大, Cl^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均在 0.05 水平上显著相关, 同属土壤源。因子 2 的方差贡献率为 31.37%, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 载荷较大, 二者在 0.05 水平上显著相关, 相关性系数为 0.885, 即同属二次源, 而 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值为 0.908, 说明固定源和排放源对冬季 $PM_{2.5-10}$ 中水溶性离子的贡献相当。因子 3 方差贡献率为 28.59%, F^- 载荷较大, 代表了工业污染的贡献。

表 2 主成分分析因子载荷

Table 2 Factor loading from principal component analysis

项目	夏季 $PM_{2.5}$		夏季 $PM_{2.5-10}$			冬季 $PM_{2.5}$		冬季 $PM_{2.5-10}$		
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 3
Ca^{2+}	0.767	0.437	0.093	0.949	-0.037	0.768	0.380	0.686	0.187	-0.359
K^+	0.134	0.880	0.419	0.404	0.190	0.409	0.372	0.244	-0.362	-0.130
Mg^{2+}	0.980	-0.010	0.745	-0.410	-0.523	0.826	0.277	0.958	-0.193	0.129
Na^+	0.333	0.547	0.873	0.180	0.094	0.974	-0.101	0.375	-0.355	0.157
F^-	0.926	0.197	0.455	0.393	0.390	0.911	-0.127	0.414	-0.226	0.588
Cl^-	0.921	-0.052	-0.088	0.477	-0.293	0.053	0.867	0.890	0.222	-0.366
NO_3^-	0.953	0.196	0.162	-0.449	0.863	0.227	0.934	0.224	0.909	0.264
SO_4^{2-}	0.588	-0.455	0.761	-0.508	-0.374	0.056	0.923	0.343	0.729	0.156
方差贡献率/%	57.97	23.95	32.87	28.65	25.36	45.13	35.78	33.00	31.37	28.59

综上所述,淮南市大气颗粒物中水溶性离子的主要来源为土壤源、工业污染及二次转化。然而,不同季节、不同粒径的颗粒物中水溶性离子的来源具有一定差异,表现在:①冬季 PM_{10} 中 Cl^- 和 F^- 的质量浓度明显高于夏季,且主要赋存于 $PM_{2.5}$ 中,来源于工业废气排放,而冬季 $PM_{2.5-10}$ 中 Cl^- 则主要来源于土壤。②无论是夏季还是冬季,二次源都是淮南市大气颗粒物的主要污染源,而对比冬、夏两季 PM_{10} 中 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值可知,冬季(1.65) > 夏季(0.94),说明冬季二次源污染以汽车尾气排放为主,而夏季汽车尾气和燃煤排放贡献接近。

3 结论

(1) 淮南市冬夏季大气颗粒物中水溶性离子平均值均为细粒子 > 粗粒子,冬季 $PM_{2.5-10}$ 中水溶性离子平均值与夏季相近,而冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子平均值是夏季的3倍以上,污染较为严重。

(2) Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 是主要的水溶性离子。各功能区夏季 $PM_{2.5}$ 中总水溶性离子质量浓度由高到低为化工区 > 采矿区 > 商业区 > 文教区 > 居民区 > 对照区, $PM_{2.5-10}$ 中总水溶性离子质量浓度由高到低为采矿区 > 文教区 > 化工区 > 对照区 > 商业区 > 居民区。冬季各功能区 $PM_{2.5}$ 中总水溶性离子质量浓度普遍高于夏季。

(3) 淮南市大气颗粒物中水溶性离子的主要来源包括土壤源、工业污染及二次转化,土壤源对粗细粒子均有较大贡献。不同季节和不同粒径的颗粒物中水溶性离子的来源具有一定差异。冬季二次污染源主要以汽车尾气排放为主,而夏季汽车尾气和燃煤排放贡献接近。

[参考文献]

[1] 莫招育,杜娟,刘慧琳,等. 桂林市冬季大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染物健康风险评估[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(4): 23-27.

[2] 杨叶,郑刘根,程桦. 淮南市大气颗粒物污染特征研究[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(1):16-20.

[3] LAI S C, ZHAO Y, DING A J, et al. Characterization of $PM_{2.5}$ and the major chemical components during a 1-year campaign in rural Guangzhou, Southern China [J]. Atmospheric Research, 2016,167:208-215.

[4] 梁娟珠,周俊佳. 福州市大气污染空间分布特征分析[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(2):30-34.

[5] 张胜华,黄伊宁,毛文文,等. 上海大气颗粒物中无机离子的

粒径分布及其季节变化[J]. 环境科学学报,2019,39(1): 72-79.

[6] LIN C C, HUANG K L, TSAI J H, et al. Characteristics of water-soluble ions and carbon in fine and coarse particles collected near an open burning site [J]. Atmospheric Environment, 2012, 51: 39-45.

[7] 杨丽丽,冯媛,靳伟,等. 石家庄市大气颗粒物中水溶性无机离子污染特征研究[J]. 环境监测管理与技术,2014,26(6): 17-21.

[8] WANG H L, AN J L, CHENG M T, et al. One year online measurements of water-soluble ions at the industrially polluted town of Nanjing, China: Sources, seasonal and diurnal variations [J]. Chemosphere, 2016, 148:526-536.

[9] HUANG X J, LIU Z R, ZHANG J K, et al. Seasonal variation and secondary formation of size-segregated aerosol water-soluble inorganic ions during pollution episodes in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2016, 168:70-79.

[10] 程渊,吴建会,毕晓辉,等. 武汉市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源[J]. 环境科学学报,2019,39(1):189-196.

[11] 范佳民,郑刘根,姜春露,等. 淮南市城区地表灰尘重金属分布特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报,2014,23(10): 1643-1649.

[12] 郭清彬,程学丰,侯辉,等. 大气 PM_{10} 中多环芳烃的污染特征[J]. 环境化学,2010,29(2):189-194.

[13] 胡煜,郑刘根,程桦,等. 淮南市 $PM_{2.5}$ 中PAHs污染特征及来源分析[J]. 环境监测管理与技术,2016,28(6):33-37.

[14] DENG X L, SHI C E, WU B W, et al. Characteristics of the water-soluble components of aerosol particles in Hefei, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 42:32-40.

[15] 于阳春,董灿,王新峰,等. 济南市秋季大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布研究[J]. 中国环境科学,2011,31(4): 561-567.

[16] 耿彦红,刘卫,单健,等. 上海市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布特征[J]. 中国环境科学,2010,30(12): 1585-1589.

[17] 薛国强,朱彬,王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. 环境科学,2014,35(5):1633-1643.

[18] 曹润芳,闫雨龙,郭利利,等. 太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征[J]. 环境科学,2016,37(6):2034-2040.

[19] 宁伟征,狄世英,刘焕武,等. 邢台市采暖季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析[J]. 环境监测管理与技术,2020, 32(4):61-64.

[20] WANG P, CAO J J, SHEN Z X, et al. Spatial and seasonal variations of $PM_{2.5}$ mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 508:477-487.

[21] 陆晓波,喻义勇,傅寅,等. 秸秆焚烧对空气质量影响特征及判别方法的研究[J]. 环境监测管理与技术,2014,26(4): 17-21.

本栏目编辑 谢咏梅