

江淮平原东部城市大气PM_{2.5}组成和污染特征研究

杨广利¹, 吴鑫宇^{1*}, 蔡奕¹, 姜倩倩², 陈诚³

(1. 江苏省淮安环境监测中心, 江苏 淮安 223001; 2. 中科三清科技有限公司, 江苏 南京 210018;

3. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210019)

摘要: 2019年10月—2020年10月在江淮平原东部城市淮安开展持续1 a的PM_{2.5}采样分析, 研究PM_{2.5}的组成和污染特征。结果表明: 淮安市大气PM_{2.5}年均质量浓度为(52.2 ± 27.1) μg/m³, 是国家二级标准(35 μg/m³)的1.5倍, 其中冬季最高, 为(67.5 ± 36.4) μg/m³, 是国家二级标准的1.9倍; PM_{2.5}中的 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-}) = 1.76$, 说明机动车尾气排放对淮安市PM_{2.5}的影响较大; PM_{2.5}中平均 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值为4.1 ± 1.1, 说明淮安市PM_{2.5}受大气二次生成影响明显; Si、Al、Ca等无机元素的质量浓度较高, 表明淮安须加大对扬尘污染的治理力度。

关键词: 细颗粒物; 水溶性离子; 污染特征; 质量重构; 淮安市

中图分类号: X513

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2022)06-0026-05

Study on Composition and Pollution Characteristics of PM_{2.5} in the Atmosphere of Eastern Cities in Jianghuai Plain

YANG Guang-li¹, WU Xin-yu^{1*}, CAI Yi¹, JIANG Qian-qian², CHEN Cheng³

(1. Huaian Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Huaian, Jiangsu 223001, China;

2. 3 Clear Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210018, China;

3. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: From October 2019 to October 2020, PM_{2.5} sampling and analysis was carried out in Huaian, an eastern city in Jianghuai Plain, to study the composition and pollution characteristics of PM_{2.5}. The results showed that the annual average mass concentration of PM_{2.5} in Huaian was (52.2 ± 27.1) μg/m³, 1.5 times of the national secondary standard (35 μg/m³), and the highest concentration was (67.5 ± 36.4) μg/m³ in winter, 1.9 times of the national secondary standard. In PM_{2.5}, $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-}) = 1.76$, indicating that motor vehicle exhaust emissions had a great impact on PM_{2.5} in Huaian. The average value of $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ was 4.1 ± 1.1 in PM_{2.5}, indicating that PM_{2.5} in Huaian was significantly affected by atmospheric secondary generation. The mass concentration of Si, Al, Ca and other inorganic elements was high, indicating that Huaian should strengthen the control of dust pollution.

Key words: PM_{2.5}; Water-soluble ion; Pollution characteristic; Quality reconstruction; Huaian

随着机动车保有量及工业污染物排放量的急剧增长, 空气中的细颗粒物(PM_{2.5})污染日益严重^[1]。PM_{2.5}浓度变化会导致全球气候变化^[2], 危害人类健康^[3]等。鉴于PM_{2.5}日益严峻污染形势, 我国开展了一系列研究, 包括颗粒物浓度及其组成的空间分布^[4]、来源解析^[5]、典型天气过程中颗粒物演变特征^[6]等, 以期更准确地掌握其污染特征。

任万辉等^[5]对沈阳市大气PM_{2.5}进行来源解析发现, PM_{2.5}中重金属主要来源有机动车尾气源、土壤

收稿日期: 2021-02-09; 修订日期: 2022-10-18

基金项目: 江苏省环保科研课题“江苏省PM_{2.5}和臭氧污染协同控制重大专项”基金资助项目(2019023)

作者简介: 杨广利(1967—), 女, 江苏淮安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事环境监测和综合分析工作。

* 通信作者: 吴鑫宇 E-mail: 287435095@qq.com

扬尘源、工业源和燃料燃烧源。刘瑞琪等^[6]在分析北京冬季典型重污染过程中发现,随着污染的发生,水溶性离子在 PM_{2.5} 中的占比由清洁天的 35.6% 快速上升至霾天的 52.0%, 而有机物的占比由清洁天的 34.0% 下降至霾天的 17.4%。有关淮安 PM_{2.5} 研究大多数基于短期、分散的观测分析,只选择某季节的典型月份开展研究,缺乏长期、系统的观测与深入数据。今以淮安市为研究区,在市区选择有代表性的大气环境监测点,于 2019—2020 年开展对 PM_{2.5} 的连续监测,获得 PM_{2.5} 及其组分数据,并以此系统讨论该市 PM_{2.5} 组成、污染特征和变化趋势,以期为进一步开展江淮平原东部区域颗粒物治理工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮安地处江苏省中北部,江淮平原东部,是苏北重要中心城市,处在中国南北分界线“秦岭—淮河”线上,也是长江三角洲北部地区的区域交通枢纽。地理位置范围在 E118°12'00" ~ E119°36'30", N32°43'00" ~ N34°06'00" 之间。淮安处于北亚热带向暖温带过渡地区,气候深受海洋影响,具有四季分明、温暖湿润、季风显著的特点。全市初步形成了以特钢、电子信息和化工新材料 3 大千亿产业为主体的工业体系,同时化工、机械、冶金、纺织、烟草等有一定基础,工业体系丰富。

2019 年 10 月 1 日起在淮安市监测站国控点附近 (E118.99°, N33.61°) 开展大气 PM_{2.5} 手工采样工作。该监测点周边主要为住宅区和商业区,邻近城市主干道健康西路,交通流量较大,人口密集,可作为典型城市监测点的代表。

1.2 样品采集

2019 年 10 月—2020 年 10 月在淮安市开展大气 PM_{2.5} 监测。采样时间为当日的 9:00—次日 8:00 (23 h), 采用赛默飞的 2015i/2025i-D 型小流量大气颗粒物采样器每 3 d 采集 1 次颗粒物样品,共采集 278 个 PM_{2.5} 样品。采样器各通道的流量为 16.7 L/min, 仪器流量检查校准要求误差不超过 ±2%, 每次同步采集空白质检样。根据滤膜特性和实验室分析需要,每组采集 2 个石英滤膜样品和 2 个 Teflon 有机滤膜样品。另外,每月第 1 个采样日采集 3 个全程序空白样品 (包括 2 个石英滤膜和 1 个 Teflon 滤膜), 以及每月加采 1 个 Teflon 有机

滤膜平行样。

1.3 化学分析

颗粒物中的水溶性离子主要包括硝酸根离子 (NO₃⁻)、硫酸根离子 (SO₄²⁻)、铵离子 (NH₄⁺)、氯离子 (Cl⁻)、钾离子 (K⁺)、钙离子 (Ca²⁺)、钠离子 (Na⁺)、镁离子 (Mg²⁺)。采样后的 Teflon 膜采用 Dionex ICS 2000 型离子色谱仪进行离子浓度分析。

将 Teflon 采样膜边缘的塑料压环去除,放入消解罐中,加入体积分数为 5% 的 HNO₃、体积分数 38% 的 HCl 和 HF 的浓酸混合液,置于炉中于 180 °C 微波消解;待消解液冷却后转移至聚乙烯样品瓶中,定容至 100 mL 左右,采用 Agilent 7500 c 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行无机元素浓度分析。样品中有机碳 (OC) 和元素碳 (EC) 含量采用美国沙漠所的 DRI Model 2015 型多波段有机碳/元素碳分析仪分析。

1.4 PM_{2.5} 的质量平衡

PM_{2.5} 来源复杂,尚无法对所有组分进行直接测量。为了解各组分对 PM_{2.5} 的相对贡献,通常采用质量平衡方法,利用已知组分浓度对 PM_{2.5} 进行化学质量重构。选择有机物 (OM)、EC、NH₄⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、K⁺、地壳物质 (Soil)、微量元素 (Trace) 及其他组分 (Other, 未检出或损失组分)^[7] 等 10 种组分进行颗粒物质量重建。其中,OM 和 EC 代表碳质气溶胶,并采用 1.6 作为 OC 向 OM 转化的系数,即 $\rho(\text{OM}) = 1.6 \times \rho(\text{OC})$ ^[8], NH₄⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻ 是主要的二次无机离子 (SNA)。地壳物质的质量浓度通过 Malm 等^[9] 的公式估算:

$$\rho(\text{Soil}) = 2.2 \times \rho(\text{Al}) + 2.49 \times \rho(\text{Si}) + 1.63 \times \rho(\text{Ca}) + 2.42 \times \rho(\text{Fe}) + 1.94 \times \rho(\text{Ti}) \quad (1)$$

微量元素的组分质量浓度采用 Zhang 等^[10] 的推荐公式进行计算:

$$\rho(\text{Trace}) = 1.3 \times \{0.5 \times [\rho(\text{Sr}) + \rho(\text{Ba}) + \rho(\text{Mn}) + \rho(\text{Co}) + \rho(\text{Rb}) + \rho(\text{Ni}) + \rho(\text{V})] + 1.0 \times [\rho(\text{Cu}) + \rho(\text{Zn}) + \rho(\text{Mo}) + \rho(\text{Cd}) + \rho(\text{Sn}) + \rho(\text{Sb}) + \rho(\text{Tl}) + \rho(\text{Pb}) + \rho(\text{As}) + \rho(\text{Se}) + \rho(\text{Ge}) + \rho(\text{Cs}) + \rho(\text{Ga})]\} \quad (2)$$

根据上述 10 类物质对 PM_{2.5} 质量浓度进行重构,通过对比分析重构 PM_{2.5} 与实测 PM_{2.5} 之间的关系,可以判断组分分析数据的有效性。结果表明,采样期间重构 PM_{2.5} 与实测 PM_{2.5} 相关性较好,线性方程为 $y = 0.9285x + 2.7916$, R² 为 0.6155, 斜率

为 0.928 5, 重构 PM_{2.5} 与实测 PM_{2.5} 平均比值为 0.962 8, 表明根据化学物种重构的 10 类物质总体可解释该点位 PM_{2.5} 质量浓度的 96.28%。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 质量浓度水平及季节变化特征

2019 年 10 月—2020 年 10 月, 淮安市 PM_{2.5} 日均值范围为 11.5 μg/m³ ~ 168 μg/m³, 平均值为 (52.2 ± 27.1) μg/m³。以《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 二级标准(日均值 75 μg/m³) 作为评价, 采样期间有 17.8% 的样品 PM_{2.5} 日均值超标, 有 1.5% 的样品 PM_{2.5} 日均值 > 150 μg/m³, 达到重度污染水平, 淮安市 PM_{2.5} 污染形势较为严峻。

图 1 为采样期间淮安大气 PM_{2.5} 质量浓度月变化。按照 3 月—5 月为春季, 6 月—8 月为夏季, 9 月—11 月为秋季, 12 月—次年 2 月为冬季划分四季。淮安市 PM_{2.5} 的季节变化趋势与我国大多数城市冬高夏低、春秋次之的特点相一致^[7]。冬季 PM_{2.5} 质量浓度最高, 为 (67.5 ± 36.4) μg/m³, 其中 2020 年 1 月达到最高值, 为 86.8 μg/m³; 春季和秋季 PM_{2.5} 质量浓度较高, 分别为 (52.4 ± 16.1) μg/m³ 和 (47.4 ± 16.9) μg/m³; 夏季 PM_{2.5} 质量浓度最低, 为 (29.4 ± 11.4) μg/m³。这是由于夏季温度升高, 混合层高度抬升, 有利于颗粒物在垂直方向上的扩散, 反之亦然^[11]。

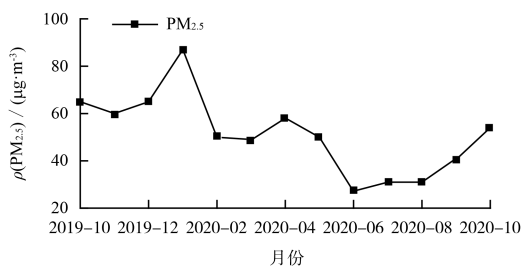


图 1 采样期间淮安大气 PM_{2.5} 质量浓度月变化

Fig. 1 Monthly variation of PM_{2.5} mass concentration in atmosphere of Huaian during sampling period

2.2 PM_{2.5} 质量重构分析

图 2(a) (b) 分别为不同季节淮安大气 PM_{2.5} 化学质量重构各组分质量浓度及其占比。采样期间, 淮安市 PM_{2.5} 中 SNA (NH₄⁺ + SO₄²⁻ + NO₃⁻)、OM、Soil、EC 和 Trace 的占比分别达 47.2%、23.0%、22.2%、3.4% 和 0.8%。SNA 是 PM_{2.5} 中占比最高

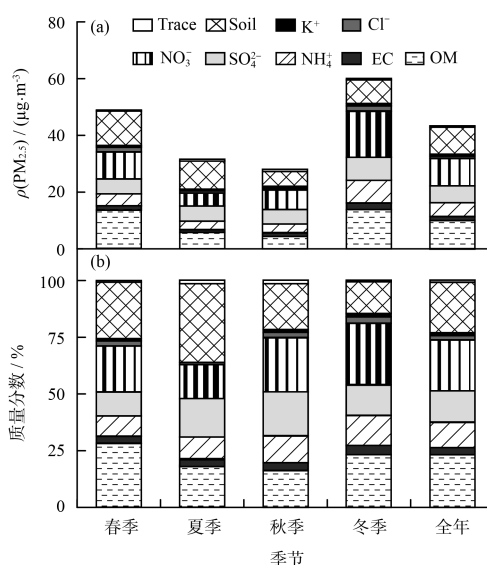


图 2 不同季节淮安大气 PM_{2.5} 化学质量重构各组分质量浓度及其占比

Fig. 2 Mass concentration and its proportion of each component of PM_{2.5} chemical mass reconstruction in atmosphere of Huaian in different seasons

的组分, 特别是秋季和冬季其对 PM_{2.5} 的贡献高达 55.2% 和 53.9%。碳质气溶胶 (OM + EC) 在 PM_{2.5} 中占比达 26.4%, EC 的季节波动不明显, 而 OM 在春季和冬季占比增加至 28.2% 和 23.2%, PM_{2.5} 中的有机物可能来自煤燃烧源、生物质燃烧源等一次排放, 也可能来自挥发性有机物 (VOCs) 的二次反应^[12]。土壤物质也在淮安 PM_{2.5} 中占较大比例, 特别是春季和夏季 Soil 对 PM_{2.5} 的贡献达 25.1% 和 34.4%, 说明扬尘对淮安环境空气的影响较大。

2.3 清洁天与污染天 PM_{2.5} 组分分布特征

将采样期间的大气污染程度分为清洁天和污染天两种情况。表 1 为清洁天和污染天时淮安大气 PM_{2.5} 及其组分的质量浓度分布。由表 1 可知, 清洁天 PM_{2.5} 平均质量浓度为 25.1 μg/m³, 而污染天 PM_{2.5} 平均质量浓度为 53.5 μg/m³, 是清洁天的 2.1 倍。与清洁天相比, 污染天 PM_{2.5} 中除 Trace 外的各组分质量浓度均有不同程度的增加。污染天中 OM、Soil、EC、K⁺ 和 Cl⁻ 质量浓度分别为清洁天的 3.0 倍、3.4 倍、2.4 倍、2.3 倍和 2.4 倍。在单项占比方面, 污染天时 OM 在 PM_{2.5} 中的占比较清洁天时增加了 7.0%, Soil 增加了 9.0%, 这说明在污染天时有有机物和地壳物质的增加对 PM_{2.5} 质量浓度的增加贡献较大。

表 1 清洁天和污染天时淮安大气 PM_{2.5} 及其组分的质量浓度分布 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Table 1 Mass concentration distribution of PM_{2.5} and its components in atmosphere of Huaian on clean and polluted days $\mu\text{g}/\text{m}^3$

天气分类	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	OM	Soil	EC	Trace	K ⁺	Cl ⁻	PM _{2.5}
清洁天	3.3	5.7	5.9	4.4	3.8	0.8	0.4	0.3	0.5	25.1
污染天	5.6	6.2	11.7	13.1	12.9	1.9	0.3	0.7	1.2	53.5

2.4 水溶性离子的变化特征

水溶性离子是 PM_{2.5} 中的重要组分, 淮安大气 PM_{2.5} 中主要水溶性离子的总质量浓度为 $(25.3 \pm 10.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 贡献了 PM_{2.5} 质量浓度的 48.5%。水溶性离子的质量浓度和贡献率冬季最高, 分别为 $(38.0 \pm 12.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 56.3%; 秋季次之, 分别为 $(23.1 \pm 6.0) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 48.7%; 夏季虽然质量浓度最低, 但贡献率较高, 分别为 $(13.8 \pm 3.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 46.9%; 春季质量浓度和贡献率分别为 $(21.9 \pm 3.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 41.8%, 贡献率最低。可见, 采样期间淮安市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子质量浓度冬季最高、夏季最低, 并且两季的贡献率均较高。

各水溶性离子的质量浓度和其在总质量浓度中的占比从高到低依次为: NO₃⁻ ($11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 43.9%) > SO₄²⁻ ($6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 24.9%) > NH₄⁺ ($5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 20.9%) > Cl⁻ ($1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 3.9%) > Ca²⁺ ($0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 2.8%) > K⁺ ($0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 2.0%) > Na⁺ ($0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 1.2%) > Mg²⁺ ($0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 0.4%)。其中, NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 是主要的离子组分, 占总水溶性离子质量浓度的 89.7%。资料显示, 燃煤中 Cl⁻ 的特征值最高, 说明 Cl⁻ 主要来自燃煤; K⁺ 主要来自生物质燃烧和垃圾焚烧^[13], 小部分来自土壤。K⁺ 和 Cl⁻ 占总水溶性离子质量浓度的 5.9%, 说明淮安市环境空气也受到燃烧源的影响。

$\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 可作为移动源和固定源相对重要性的评估, 当 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-}) > 1$ 时, 说明移动源为主要污染源; 当 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-}) < 1$ 时, 说明固定源为主要污染源^[14]。淮安 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-}) = 1.76$, 说明机动车尾气排放对淮安市环境空气质量的影响较大。

2.5 碳组分的变化特征

采样期间, 淮安市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的平均质量浓度分别为 $(6.5 \pm 2.9) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(1.6 \pm 0.8) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 分别贡献了 PM_{2.5} 质量浓度的 12.5% 和 3.1%。EC 质量浓度的季节变化与 PM_{2.5} 相似,

为冬季 ($2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 春季 ($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 秋季 ($1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 夏季 ($0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$); 而 OC 质量浓度季节变化为冬季 ($8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和春季 ($8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 较高, 污染水平大致相当, 夏季 ($3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和秋季 ($2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 较低。

EC 来自含碳原料的不完全燃烧或外源输送, 是一种相对稳定的高聚合混合物, 在大气中不会发生明显的化学反应, 通常被作为一次污染的示踪物, 而 OC 来源包括污染物直接排放的一次有机碳 (POC) 和通过光化学反应生成的二次有机碳 (SOC)。 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 通常反映碳气溶胶污染的转化过程, 当 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC}) > 2.0$ 时, 表明大气中有 SOC 生成, 且比值越大, 说明 SOC 值越高^[15]。有研究表明, 化石燃料燃烧的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值为 4.0, 机动车排放的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值为 1.1^[16], 而居民燃煤和生物质燃烧的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值较高, 分别达 8.5~12.0 和 10.0~16.3^[17]。由于 EC 基本为惰性, $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值也随着 SOC 的形成而增加。采样期间, 各个季节淮安大气 PM_{2.5} 中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值均 > 2.0, 表明当地环境空气受化石燃料燃烧影响较大。夏季 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值为 4.1, 较秋季 (2.8) 和冬季 (3.6) 高, 这可能与湿度较大, 促进 SOC 的生成有关。另外, 夏季较高的温度也加快了 SOC 的生成速率。春季 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 值最高, 为 5.7, 这是由于春季的稳定天气为颗粒物气粒转化提供了充足的停留时间, 加之降水少、湿度和温度较冬天高, 导致了更多 SOA 的生成。

2.6 无机元素的变化特征

文中分析了 19 种无机元素, 包括地壳元素、微量元素和其他元素。地壳元素如 Fe、Ti、Mn 主要来源于土壤扬尘、建筑扬尘和建筑水泥尘^[18]。微量元素主要来自人为源排放, 元素浓度水平虽低, 但对人体健康有很大的危害^[19]。

表 2 为不同季节淮安大气 PM_{2.5} 中无机元素的质量浓度分布。由表 2 可知, 采样期间淮安大气 PM_{2.5} 中平均质量浓度前十的无机元素依次为 Si >

Cl > Ca > K > Fe > Al > Na > Mg > Zn > Ti。Si、K、Al代表土壤扬尘源,城市颗粒物中的Ca主要来自建筑水泥尘^[20],说明淮安市存在扬尘污染现象。Cl可能来源于工业燃煤,Zn可能来源于金属冶炼^[21]。因此,淮安市须加大对扬尘污染的治理力度。

各元素质量浓度的季节性变化主要受气象条件、地形地貌和污染源排放等因素的影响,表现为不同季节元素质量浓度的波动。冬季各元素质量浓度都比较高,可能是由于冬季大气层结构稳定,不利于污染物扩散,且正值燃煤取暖,人为源排放增多,故各元素的质量浓度在冬季升高。

表2 不同季节淮安大气 PM_{2.5}中无机元素的质量浓度分布

Table 2 Mass concentration distribution of inorganic elements in PM _{2.5} in atmosphere of Huaian in different seasons						μg/m ³					
元素	春季	夏季	秋季	冬季	年平均	元素	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
Si	0.61	0.24	0.65	1.45	1.26	Ti	0.07	0.02	0.04	0.04	0.05
Cl	0.88	0.37	0.68	2.05	1.10	Mn	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03
Ca	1.30	0.50	0.88	0.85	0.95	As	—	0.03	0.02	—	0.02
K	0.86	0.22	0.72	0.89	0.74	Se	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
Fe	0.86	0.45	0.71	0.60	0.72	Ba	—	—	0.01	0.03	0.01
Al	0.25	0.13	0.37	0.87	0.71	Cd	—	0.01	—	—	0.01
Na	0.47	0.31	0.71	0.58	0.64	Cr	—	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	—	0.03	0.13	0.27	0.28	Cu	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Zn	0.04	0.08	0.13	0.12	0.09	Sb	—	—	—	0.01	0.01

3 结论

(1) 采样期间,淮安市区大气 PM_{2.5} 平均质量浓度为 (52.2 ± 27.1) μg/m³, PM_{2.5} 超标率达 17.8%, 污染形势较为严峻。PM_{2.5} 季节变化显著, 表现为冬高夏低、春秋次之的特点。

(2) SNA(NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺) 对淮安大气 PM_{2.5} 的贡献最大。与清洁天相比, 污染天 PM_{2.5} 中除 Trace 外, 各组分质量浓度均有不同程度的增加, 有机物和地壳物质的增加对 PM_{2.5} 质量浓度增长的贡献较大。

(3) 淮安大气 PM_{2.5} 中的 ρ(NO₃⁻)/ρ(SO₄²⁻) = 1.76, 说明机动车尾气排放对淮安市环境空气质量的影响较大。PM_{2.5} 中平均 ρ(OC)/ρ(EC) 值为 4.1 ± 1.1, 说明淮安市区存在较为明显的 SOC 污染。Si、Al、Ca 等无机元素的质量浓度较高, 表明淮安须加大对扬尘污染的治理力度。

[参考文献]

[1] FANTKE P, MCKONE T E, TAINIOM, et al. Global effect factors for exposure to fine particulate matter[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(12): 6855–6868.

[2] PIERSON W R, BRACHACZEK W W, GORSE R A, et al. Acid rain and atmospheric chemistry at Allegheny Mountain[J]. Environmental Science and Technology, 1987, 21(7): 679–691.

[3] TIE X X, WU D, BRASSEUR G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China[J].

Atmospheric Environment, 2009, 43(14): 2375–2377.

[4] 欧金萍, 郑刘根, 杨叶. 典型矿业城市大气颗粒物水溶性离子分布特征[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(5): 23–27.

[5] 任万辉, 李云丹, 苏枫枫, 等. 沈阳市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1029–1037.

[6] 刘瑞琪, 贾海鹰. 北京地区气象条件与区域传输对 PM_{2.5} 浓度影响研究[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(5): 16–20.

[7] YANG F, TAN J, ZHAO Q, et al. Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(11): 5207–5219.

[8] TURPIN B J, LIM H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass[J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 35(1): 602–610.

[9] MALM W C, SISLER J F, HUFFMAN D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(D1): 1347–1370.

[10] ZHANG R, JING J, TAO J, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(14): 7053–7074.

[11] 朱育雷, 倪长健, 谭钦文, 等. 基于 logistic 曲线识别混合层高度的新方法[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1670–1676.

[12] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 451–457.

(下转第36页)