

# 基于PMF模型的柳州市颗粒物来源与组分季节特征分析

何洪<sup>1</sup> 韦帮立<sup>1</sup> 韦嘉<sup>1</sup> 蔡炜<sup>2</sup>

1 广西壮族自治区柳州生态环境监测中心

2 杭州谱育科技发展有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i2.3089

**[摘要]** 为探究柳州市大气PM<sub>2.5</sub>特征及来源,于2025年全年开展PM<sub>2.5</sub>及其化学组分连续采样,分析化学组分特征,采用正定矩阵因子分解法(PMF)解析其来源构成。结果表明,柳州市PM<sub>2.5</sub>年均浓度为(27.6±20.8) μg/m<sup>3</sup>,季节变化由高到低为:冬季、春季、秋季、夏季。水溶性离子占PM<sub>2.5</sub>的40.29%,各离子浓度顺序为:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>>K<sup>+</sup>>Cl<sup>-</sup>>Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>;春季、夏季和冬季铵盐存在形式主要为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>和NH<sub>4</sub>Cl,秋季主要以(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>的形式存在。OC/EC比值春夏季偏高稳定,秋季波动大。有机物和二次无机气溶胶是PM<sub>2.5</sub>的主要重构组分,柳州市PM<sub>2.5</sub>的主要来源为二次无机盐、燃烧源、移动源、工业源和扬尘源,冬季存在烟花燃放源。

**[关键词]** PM<sub>2.5</sub>; 化学组分; 来源解析; 柳州

中图分类号: F407.7 文献标识码: A

## Seasonal Characteristics Analysis of Particulate Matter Sources and Components in Liuzhou Based on PMF Model

Hong He<sup>1</sup> Bangli Wei<sup>1</sup> Jia Wei<sup>1</sup> Wei Cai<sup>2</sup>

1 Liuzhou Ecological Environment Monitoring Center, Guangxi Zhuang Autonomous Region

2 Hangzhou PuYu Technology Development Co., Ltd.

**[Abstract]** To investigate the characteristics and sources of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Liuzhou, continuous sampling of PM<sub>2.5</sub> and its chemical components was conducted throughout 2025. The characteristics of chemical components were analyzed, and the sources were analyzed by using the Positive Matrix Factorization (PMF). The results showed that the annual average concentration of PM<sub>2.5</sub> in Liuzhou was (27.6±20.8) μg/m<sup>3</sup>, with a seasonal variation in the order of winter > spring > autumn > summer from the highest to the lowest concentration. Water-soluble ions accounted for 40.29% of the mass of PM<sub>2.5</sub>, and the annual average concentrations of the ions followed the sequence of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>>K<sup>+</sup>>Cl<sup>-</sup>>Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>. Ammonium salts mainly existed in the forms of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub>Cl in spring, summer and winter, while in autumn, they were primarily present as (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. The OC/EC ratios were relatively high and stable in spring and winter, whereas they exhibited significant fluctuations in autumn. Organic matter and secondary inorganic aerosols were the dominant reconstructed components of PM<sub>2.5</sub>. The main sources of PM<sub>2.5</sub> in Liuzhou included secondary inorganic salts, combustion sources, mobile sources, industrial sources and dust sources, with an additional contribution from fireworks burning sources in winter.

**[Key words]** PM<sub>2.5</sub>; chemical compositions; source apportionment; Liuzhou

### 1 绪论

大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)作为大气污染的核心污染物之一,是影响环境空气质量达标的关键因子<sup>[1-4]</sup>。会通过呼吸道深入人体,对人体健康构成威胁,还会对生态环境造成负面影响<sup>[4-8]</sup>,是当前大气环境研究的重点方向。PM<sub>2.5</sub>的化学组分组成复杂,主要包含水溶性离子、碳质组分、无机元素等关键组分<sup>[9-10]</sup>,其浓

度水平与时空分布特征直接反映区域产业排放和人类活动的污染规律,而对不同组分的解析更是识别污染贡献源、制定精准防控策略的科学基础。近年来,随着我国“大气十条”“蓝天保卫战”等一系列大气污染防治举措的持续推进,全国重点城市PM<sub>2.5</sub>浓度呈显著下降趋势<sup>[4,9-16]</sup>,但受产业结构、能源结构及气象条件等因素影响,不同城市PM<sub>2.5</sub>污染特征与来源存在差异,

工业城市、城市群、偏远地区的PM<sub>2.5</sub>污染呈现出不同的特点与规律<sup>[17-23]</sup>,开展典型城市PM<sub>2.5</sub>化学组分特征及来源研究具有重要的现实意义。

柳州市作为西南地区重要的工业城市,工业生产、燃煤消耗、机动车行驶等人类活动排放强度较高<sup>[24-27]</sup>,大气颗粒物污染防治面临独特挑战。目前关于柳州市大气PM<sub>2.5</sub>的研究多集中于浓度时空变化及宏观来源分析<sup>[24-25]</sup>,针对PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子、碳质组分等关键化学组分的系统监测与特征解析仍略显欠缺,对各组分的季节变化规律、存在形式及不同源类的定量贡献尚未形成清晰认知。

基于此,本研究利用2025年全年柳州市PM<sub>2.5</sub>及其化学组分24h自动监测数据,分析PM<sub>2.5</sub>及各化学组分的季节变化特征与规律,通过PM<sub>2.5</sub>组分质量重构明确主要组分的贡献占比,结合正定矩阵因子分解法(PMF)解析不同季节PM<sub>2.5</sub>的来源构成及贡献。以期对柳州市大气PM<sub>2.5</sub>污染的防控和治理提供科学的数据支撑与理论依据。

## 2 研究区域与方法

### 2.1 站点和数据

本研究于2025年1月1日至2025年12月31日在柳州生态环境监测中心(24° 19' N, 109° 24' E),使用聚光科技(杭州)股份有限公司的PM<sub>2.5</sub>分析仪BPM-200型,在线碳组分分析仪OCEC-100型,在线离子色谱分析仪WAGA-100型,在线无机元素分析仪AMMS-100型采集PM<sub>2.5</sub>和其化学组分样品。以每小时为单位进行颗粒物及其化学组分进行在线连续自动采集和分析,以3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12月~2月为冬季。

PM<sub>2.5</sub>及化学组分监测工作严格按照《环境空气颗粒物(PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ817-2018)、《环境空气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)中有机碳和元素碳连续自动监测技术规范》(HJ 1327-2023)、《环境空气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)中水溶性离子连续自动监测技术规范》(HJ1328-2023)和《环境空气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)中无机元素连续自动监测技术规范》(HJ 1329-2023)完成仪器质量保证和质量控制。依据《大气颗粒物组分自动监测数据审核技术指南》开展数据审核,去除无效数据。本文PM<sub>2.5</sub>及化学组分浓度数据的日均值、月均值均为根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)规定计算的算术平均值。

### 2.2 研究方法

PM<sub>2.5</sub>组分质量重构中硝酸盐、硫酸盐、铵盐、元素碳、氯盐为直接测定值,有机物、地壳物质和微量元素是相应组分的测定值进行换算得出<sup>[28-29]</sup>。依据《大气颗粒物组分自动监测数据审核技术指南》建议,有机物浓度为1.6倍的有机碳(OC)测定浓度;地壳物质=2.2×[Al]+2.49×[Si]+1.63×[Ca<sup>2+</sup>]+2.42×[Fe]+1.94×[Ti];微量元素为除地壳元素以外的其他元素的浓度之和。

正定矩阵因子分解模型(PMF)是大气颗粒物来源解析的重要方法,分析对象为长时间序列的大气环境空气样本化学组分数据集。通过对环境空气样本中各类化学组分数据进行分析,

标识特征组分实现对不同污染源的因子识别,采用多元线性回归方法,定量各类污染源对大气颗粒物的贡献强度。是大气颗粒物来源解析领域中应用广泛的受体模型之一<sup>[17,30]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 PM<sub>2.5</sub>及化学组分特征

柳州市PM<sub>2.5</sub>年均浓度为(27.6±20.8) μg/m<sup>3</sup>,达到《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)年均二级标准(35 μg/m<sup>3</sup>),PM<sub>2.5</sub>浓度日均值超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)日均二级标准(75 μg/m<sup>3</sup>)天数为14d,超标天主要集中在冬季,共13d,冬季污染天数超标率为22.0%。PM<sub>2.5</sub>浓度的季节变化特征为冬季(46.8±28.1) μg/m<sup>3</sup>>春季(30.0±18.1) μg/m<sup>3</sup>>秋季(18.9±10.2) μg/m<sup>3</sup>>夏季(14.6±5.9) μg/m<sup>3</sup>。根据柳州市污染物与气象的关联研究表明<sup>[24-25]</sup>,春季相对湿度偏低,降水量少,地面灰尘易形成沙尘天气。夏季高温、高湿、多雨,PM<sub>2.5</sub>浓度显著降低。秋季柳州进入作物收获季节,秸秆燃烧导致污染物浓度增高。冬季风速低,降水减少,逆温现象频繁,不利于颗粒物扩散<sup>[31-32]</sup>。

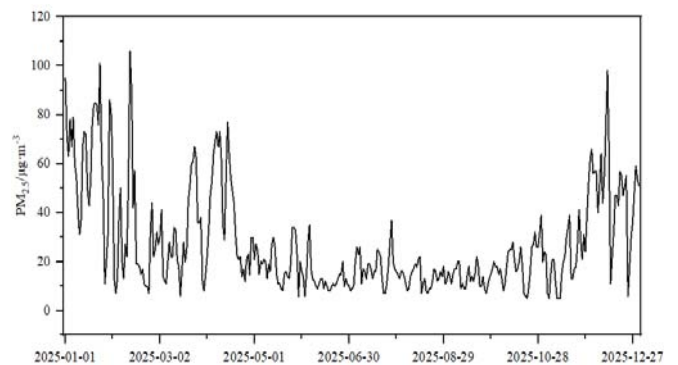


图1 柳州市PM<sub>2.5</sub>浓度变化

柳州市水溶性离子的年均浓度为(11.12±8.33) μg/m<sup>3</sup>,占PM<sub>2.5</sub>的质量分数为40.29%,夏季水溶性离子总量在PM<sub>2.5</sub>占比为43.35%,高于其他季节。水溶性离子的年均浓度由大到小依次为:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>>K<sup>+</sup>>Cl<sup>-</sup>>Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>。水溶性离子总量的季节变化趋势与PM<sub>2.5</sub>的季节变化趋势相同,但不同水溶性离子季节变化趋势不完全一致。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度在春季(5.87 μg/m<sup>3</sup>)最高,其次为冬季(5.64 μg/m<sup>3</sup>),秋季(3.61 μg/m<sup>3</sup>)和夏季(3.32 μg/m<sup>3</sup>),春季湿度和温度适中,SO<sub>2</sub>向SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>转化效率最高,冬季温度低,光照弱,转换效率低,浓度略低于春季<sup>[21]</sup>。冬季NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的浓度(6.16 μg/m<sup>3</sup>)最高,显著高于其他季节,夏季(0.68 μg/m<sup>3</sup>)最低。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的浓度冬季(3.58 μg/m<sup>3</sup>)最高,秋季(1.55 μg/m<sup>3</sup>)最低,这是因为颗粒态的NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>高温时的热稳定性较差,易分解成气态的硝酸和氨<sup>[33]</sup>,导致NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>在夏季和秋季较低。K<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>浓度趋势与PM<sub>2.5</sub>季节浓度变化趋势一致,二者冬季浓度显著高于其他季节,K<sup>+</sup>冬季(1.61 μg/m<sup>3</sup>)浓度是夏季(0.15 μg/m<sup>3</sup>)的11.0倍,Cl<sup>-</sup>冬季(1.05 μg/m<sup>3</sup>)浓度是夏季(0.08 μg/m<sup>3</sup>)的12.8倍。此趋势主要原因为K<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>是生物质燃烧、燃煤的典型示踪离子<sup>[18,21,34]</sup>,冬季燃煤和秸秆焚烧显著增加,同时近地面大气稳定,逆温频繁,污染物易累积,使得PM<sub>2.5</sub>及其水溶性离子(K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>)浓度同步升

高。另外夏季生物质燃烧减少,高温多雨,对污染物稀释作用显著,同时高温促使 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 挥发<sup>[33]</sup>。 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 季节变化特征相同,为春季和冬季高,秋季最低,冬季不利的气象条件导致污染积累,春季降水少、风速大,易形成扬尘导致 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度升高<sup>[34]</sup>。

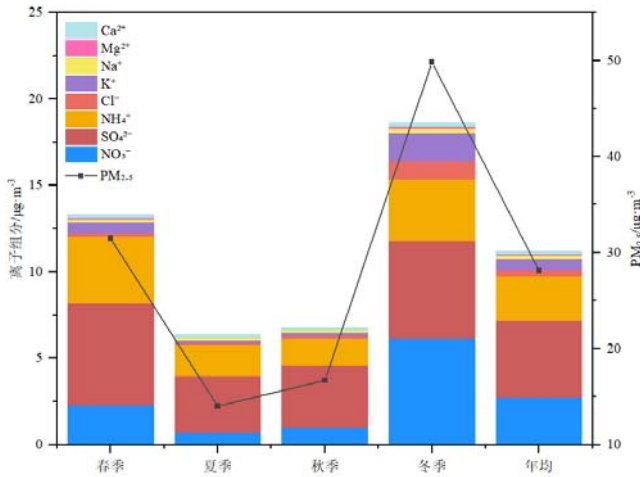


图2 水溶性离子组分季节特征

研究表明大气气溶胶中 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 物质的量浓度的比值大于2时, $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 形式存在。柳州市 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 物质的量浓度平均比值均大于2,春季为2.64,夏季为2.92,秋季为2.28,冬季为3.39,大气气溶胶中 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 结合为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 形式<sup>[19,35]</sup>。绘制 $\text{NH}_4^+$ 与 $2\text{SO}_4^{2-}+\text{NO}_3^-$ 物质的量浓度散点图,研究柳州市各季节的SNA的存在形式,由图3可知,春季和冬季 $\text{NH}_4^+$ 和 $2\text{SO}_4^{2-}+\text{NO}_3^-$ 存在显著相关性( $R^2$ 均大于0.80),春季和夏季线性回归方程的斜率大于1,冬季斜率虽然小于1,但多数点位落在1:1线上方,说明SNA主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 的形式存在,还有部分 $\text{NH}_4^+$ 与 $\text{Cl}^-$ 结合形成 $\text{NH}_4\text{Cl}$ <sup>[20,28]</sup>。秋季线性回归方程的斜率小于1,多数点位落在1:1线下方,说明秋季 $\text{NH}_4^+$ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 的形式存在<sup>[19,35]</sup>。

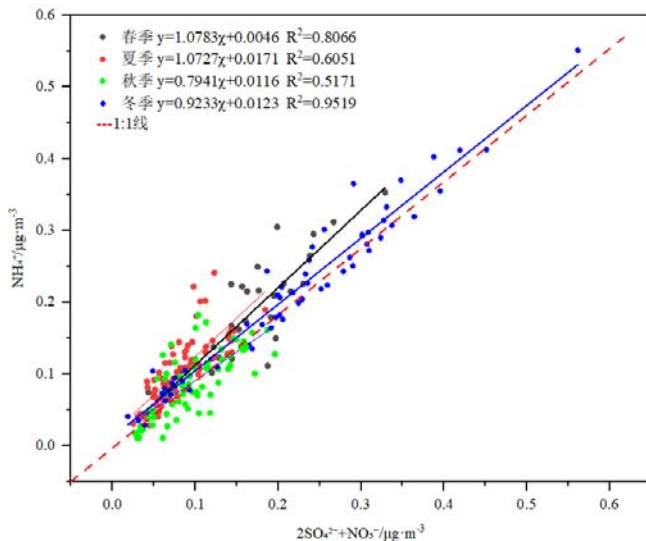


图3  $\text{NH}_4^+$ 和 $2\text{SO}_4^{2-}+\text{NO}_3^-$ 散点图

柳州市OC和EC年均浓度分别为 $(4.48 \pm 3.63) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(0.46 \pm 0.34) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占 $\text{PM}_{2.5}$ 的16.25%和1.65%,OC和EC季节浓度趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势一致。OC/EC常用来分析碳质气溶胶的特征,研究表明,OC/EC为1.0~4.2时表明为柴油和汽油燃烧,为2.5~10.5时表明为煤炭燃烧,16.8~40.0时表明为生物质燃烧<sup>[29,36]</sup>。由不同季节OC/EC分布图可以看出,OC/EC季节差异较大,柳州的工业燃煤排放是OC/EC比值偏高的重要基础,春季和冬季OC/EC比值整体偏高且稳定,这与柳州工业结构和受静稳、逆温天气导致的不利扩散条件有关<sup>[24,31~32]</sup>。秋季比值分布范围广,体现了排放源的复杂性,柳州工业燃煤和机动车排放等一次源排放稳定,也是农作物收获季,秸秆焚烧等生物质燃烧活动频繁,同时气温降低导致光化学反应减弱,二次有机碳生成减少,多重因素导致OC/EC大幅波动。

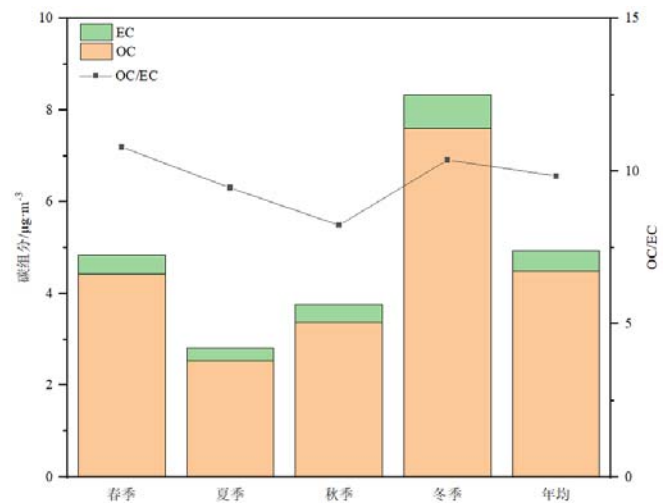


图4 碳组分季节特征

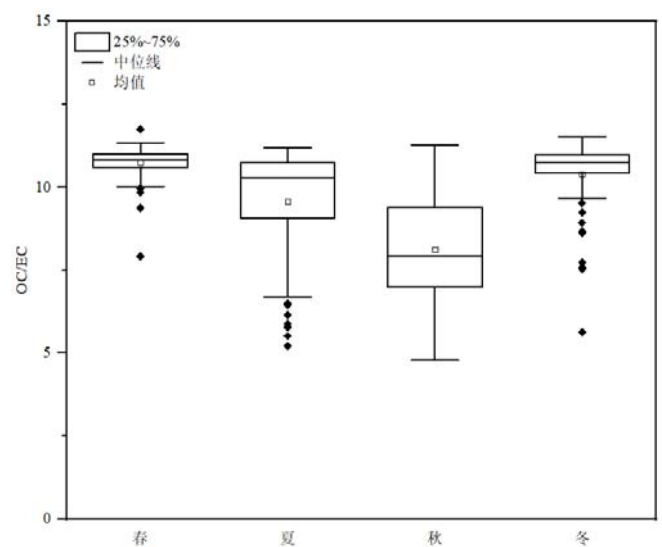


图5 碳组分浓度比值分布图

### 3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量重构及来源解析

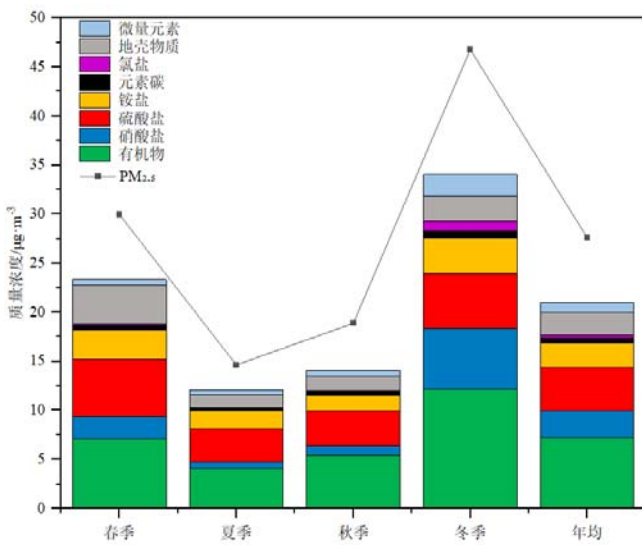


图6 组分重构季节特征

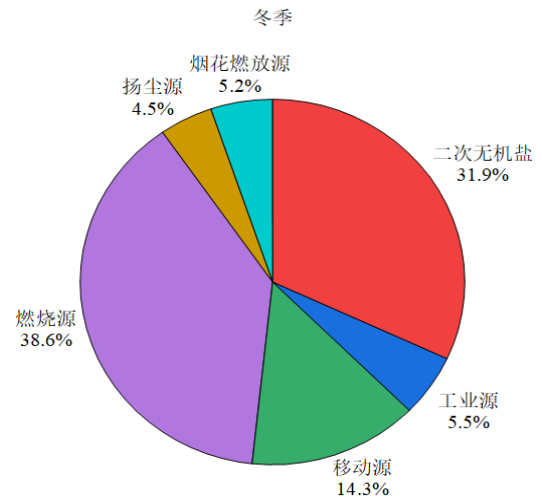
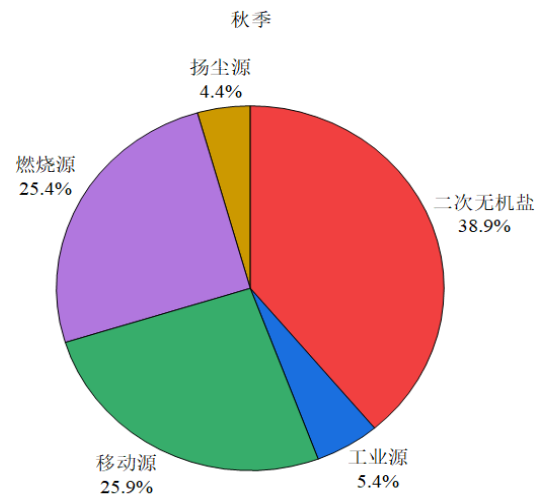


图7 PM<sub>2.5</sub>来源季节特征

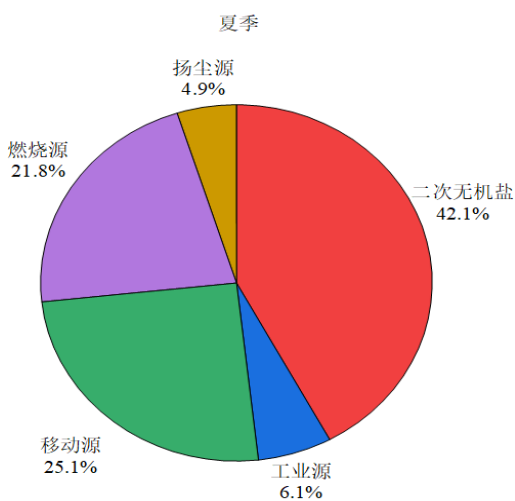
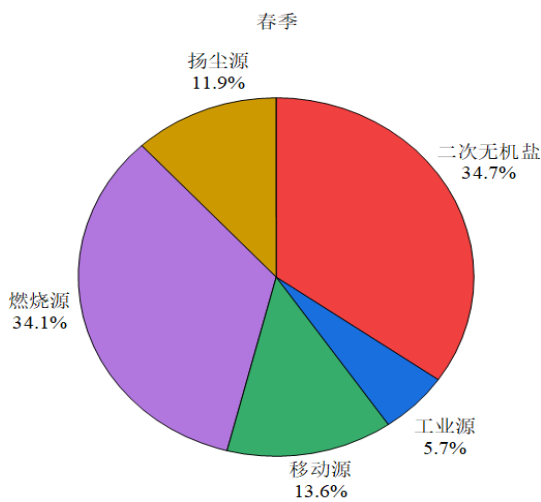


图6为柳州市PM<sub>2.5</sub>不同季节的化学组分重构结果, 有机物是各季节PM<sub>2.5</sub>中占比最高的组分, 尤其在冬季贡献最为突出, 主要来自机动车尾气、生物质燃烧、燃煤等一次源和光化学反应生成的二次有机碳<sup>[17, 29]</sup>。二次无机气溶胶(硫酸盐、硝酸盐、铵盐)是另一类主要组分, 其中硝酸盐在冬季浓度显著升高, 此外冬季氯盐浓度也较高, 这与秸秆焚烧增加和工业燃煤排放相关, 也与低温下颗粒态铵盐热稳定性增强、不易分解有关, 此外冬季逆温频发, 扩散条件不利, 导致污染物在近地面积累; 硫酸盐在春季浓度也较高, 反映了燃煤排放及大气氧化过程的影响<sup>[19]</sup>。元素碳在各季节浓度相对稳定, 冬季略高, 主要受生物质和化石燃料不完全燃烧的影响。地壳物质在春季浓度相对较高, 与春季扬尘天气有关。

PM<sub>2.5</sub>来源中二次无机盐贡献占比在各季节均较高, 表明气态前体物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>等)经大气光化学或非均相反应生成的二次无机气溶胶是柳州PM<sub>2.5</sub>的关键来源<sup>[29, 34]</sup>, 其他来源呈现季节性差异。春季燃烧源也是PM<sub>2.5</sub>主导来源, 由于春季大风天气与地表植被覆盖不足扬尘源为全年最高; 夏季和秋季移动源贡献

提升,与居民出行强度提升相关<sup>[24,37]</sup>,秋季因秸秆焚烧活动燃烧源贡献升高,充沛降水抑制使扬尘源占比降低;冬季燃烧源成为首要来源,新增节日烟花燃放源贡献。

#### 4 结论

(1) 2025年柳州市PM<sub>2.5</sub>年均浓度为(27.6±20.8) μg/m<sup>3</sup>,达国标年均二级标准,日均超标14天,集中在冬季。PM<sub>2.5</sub>浓度呈冬季>春季>秋季>夏季的特征。

(2) 水溶性离子是柳州市PM<sub>2.5</sub>主要化学组分,各离子的年均浓度由大到小依次为:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>>K<sup>+</sup>>Cl<sup>-</sup>>Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>。季节变化差异显著,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>春季最高,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>冬季浓度最高。

(3) 柳州市OC/EC比值春冬季偏高且稳定,秋季波动大,表明秋季排放源的复杂性。

(4) 有机物是柳州市PM<sub>2.5</sub>中最高组分,二次无机气溶胶为另一核心组分。来源解析显示二次无机盐是主要来源,春季扬尘源贡献全年最高,夏季和秋季移动源占比提升,冬季燃烧源为首要来源且增加烟花燃放源贡献,工业源各季节占比相对稳定。

#### [参考文献]

[1] 邵龙义,王文华,幸娇萍,等.大气颗粒物理化特征和影响效应的研究进展及展望[J].地球科学,2018,43(5):1691-1708.

[2] 张玮琦,石应杰,杜晓惠,等.京津冀区域大气环境现状、问题分析与对策建议[J].环境科学研究,2025,38(12):2616-2627.

[3] 林昕,曹芳,翟晓璐,等.中国典型城市冬季大气细颗粒物水溶性离子特征及来源分析[J].生态环境学报,2019,28(2):307-315.

[4] 巫燕园,刘逸凡,汤蓉,等.中国特大城市群PM<sub>2.5</sub>污染及健康负担的时空演变特征[J].南京大学学报(自然科学版),2024,60(1):158-167.

[5] 郝永佩,宋晓伟,朱晓东.京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析[J].环境科学,2023,44(12):6610-6620.

[6] Fu PF, Guo XB, Cheung FMH, et al. The association between PM<sub>2.5</sub> exposure and neurological disorders: a systematic review and meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 1240-1248.

[7] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and arsenic in China: situation, sources and control policies[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74(1): 93-101.

[8] Jerrett M. The death toll from air-pollution sources[J]. Nature, 2015, 525(7569): 330-331.

[9] 刘晟东,史君楠,程勇,等.中国典型城市群PM<sub>2.5</sub>污染特征研究进展[J].环境科学研究,2020,33(2):243-251.

[10] 夏丽,朱彬,王红磊,等.长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性[J].环境科学,2021,42(2):556-563.

[11] 刘莹,和金梅,郭敏,等.我国城市群环境空气颗粒物浓度分布特征研究[J].环境工程技术学报,2024,14(2):407-415.

[12] 薛莲,孙杰,林云,等.深圳冬季霾日的大气污染特征[J].环境科学研究,2011,24(5):506-511.

[13] 何国文,邓涛,欧阳珊珊,等.广州地区秋季PM<sub>2.5</sub>和臭氧复合污染的观测研究[J].环境科学学报,2022,42(6):250-259.

[14] 陈彦宁,张金谱,裴成磊,等.2016-2020年广州市PM<sub>2.5</sub>时空分布特征[J].环境科学学报,2022,42(12):273-285.

[15] 王心培.长三角背景点大气颗粒物中水溶性无机离子污染特征、来源与形成机制[D].上海:华东师范大学,2020.

[16] 周敏.上海大气PM<sub>2.5</sub>来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型[J].环境科学,2020,41(5):1997-2005.

[17] 李慧,王涵,严沁,等.汾渭平原秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分特征及其来源[J].环境科学研究,2023,36(3):449-459.

[18] 王国祯,任万辉,于兴娜,侯思宇,张毓秀.沈阳市冬季大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征及来源解析[J].环境科学,2021,42(1):30-37.

[19] 孙有昌,姜楠,王申博,等.安阳市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子季节特征及来源解析[J].环境科学,2020,41(1):75-81.

[20] 牛红亚,高娜娜,鲍晓磊.2016~2020年邯郸市冬季PM<sub>2.5</sub>污染特征与来源解析[J].环境科学,2023,44(12):6463-6473.

[21] 刘敬琰,胡彦钧,叶招莲,等.常州市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子组分污染特征及来源分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(8):1753-1767.

[22] 毛翔,徐立,韩清,等.武汉市大气PM<sub>2.5</sub>主要水溶性离子的时空污染特征[J].环境卫生学杂志,2019,9(3):235-241.

[23] Jie T, Zhou Y, Yue T, et al. Fine particulate matter pollution characteristics and source apportionment of Changchun atmosphere[J]. Environ Sci Pollut Res, 2022, 29: 12694-12705.

[24] 曾鹏,辛存林,于爽,等.典型西南工业城市柳州市核心区大气污染物时空分布与气象因素研究[J].环境科学学报,2020,40(1):13-26.

[25] 潘润西,陈蓓,莫雨淳,等.广西PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及污染天气类型[J].环境科学研究,2018,31(3):465-474.

[26] 罗意然,韦进毅,郭送军,等.广西典型生物质燃烧气态污染物排放特征[J].农业环境科学学报,2022,41(4):888-897.

[27] 吴星麒,曹芳,洪一航,等.广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响[J].环境科学,2023,44(12):6518-6528.

[28] 黄舍舍,王羽琴,李升苹,等.西安市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的季节变化特征[J].环境科学,2020,41(6):8.

[29] 孙佳侯,董喆,李利萍,等.洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析[J].环境科学,2021,42(12):5624-5632.

[30] 项妍琨,曹芳,张雯淇,等.长三角城郊冬夏PM<sub>2.5</sub>中铵盐的形成过程及来源解析[J].环境科学,2023,44(12):6486-6494.

[31] 王跃,王莉莉,赵广娜,等.北京冬季PM<sub>2.5</sub>重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J].气候与环境研究,2014,19(2):173-184.

[32]刘瑞婷,韩志伟,李嘉伟.北京冬季雾霾事件的气象特征分析[J].气候与环境研究,2014,19(2):164-172.

[33]程渊,吴建会,毕晓辉,等.武汉市大气PM<sub>2.5</sub>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.

[34]郭景宁,李小飞,余锋.渭南市冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成及来源解析[J].环境科学,2023,44(12):6474-6485.

[35]杨萌,刘畅,王笑欢,等.大连市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征及高酸度成因[J].环境科学,2024,45(9):5127-5139.

[36]罗达通,张敬巧,刘湛,等.郴州市大气PM<sub>2.5</sub>碳组分污染特征及其来源分析[J].环境科学研究,2018,31(11):1858-1866.

[37]苗蕾,廖晓农,王迎春.基于长时间序列的北京PM<sub>2.5</sub>浓度日变化及气象条件影响分析[J].环境科学,2016,37(8):2836-2846.

#### 作者简介:

何洪(1979—),男,壮族,广西来宾人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:生态环境监测。