

柳州市冬季大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析

何洪¹ 韦帮立¹ 韦嘉¹ 蔡炜²

1. 广西壮族自治区柳州生态环境监测中心, 中国·广西 柳州 545001

2. 杭州谱育科技发展有限公司, 中国·浙江 杭州 311300

摘要: 本文基于 2024–2025 年冬季 (2024 年 12 月至 2025 年 3 月) 采集的柳州市 $PM_{2.5}$ 及化学组分监测数据, 研究柳州市冬季颗粒物 $PM_{2.5}$ 污染特征和来源, 分析了 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子组分和碳组分的污染特征, 采用正定矩阵因子分解法 (PMF) 解析颗粒物来源。结果表明, 采样期间柳州市 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度为 $(45.4 \pm 32.2) \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 主要化学组分是有机物、硫酸盐、硝酸盐和铵盐。硫酸盐、硝酸盐和铵盐主要以 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在。碳组分主要受机动车尾气和燃煤排放影响。PMF 模型解析表明, 柳州冬季 $PM_{2.5}$ 的主要为燃烧源、二次无机盐源、移动源、工业源、烟花燃放源和扬尘源。

关键词: 柳州; $PM_{2.5}$; 来源解析; 水溶性离子; 碳组分

Chemical composition characteristics and traceability analysis of fine particulate matter in winter atmosphere of Liuzhou City

He Hong¹, Wei Bangli¹, Wei Jia¹, Cai Wei²

1. Liuzhou Ecological Environment Monitoring Center, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China Guangxi Liuzhou 545001

2. Hangzhou Puyu Technology Development Co., Ltd., China Zhejiang Hangzhou 311300

Abstract: Based on the monitoring data of $PM_{2.5}$ and its chemical components collected in Liuzhou City during the winter of 2024–2025 (December 2024 to March 2025), this study investigated the pollution characteristics and sources of particulate matter $PM_{2.5}$ in Liuzhou in winter. It analyzed the pollution characteristics of water-soluble ionic components and carbon components in $PM_{2.5}$, and identified the sources of particulate matter using the Positive Matrix Factorization (PMF) method. The results showed that the average mass concentration of $PM_{2.5}$ in Liuzhou during the sampling period was $(45.4 \pm 32.2) \mu g/m^3$, and the main chemical components of $PM_{2.5}$ were organic matter, sulfate, nitrate, and ammonium salt. sulfate, nitrate, and ammonium salt mainly existed in the forms of $(NH_4)_2SO_4$ and NH_4NO_3 . Carbon components were mainly influenced by vehicle exhaust and coal combustion emissions. PMF model analysis revealed that the primary sources of $PM_{2.5}$ in Liuzhou in winter were combustion sources, secondary inorganic salt sources, mobile sources, industrial sources, fireworks discharge sources, and dust sources.

Keywords: Liuzhou; $PM_{2.5}$; Source apportionment; Water-soluble ions; Carbon components

0 引言

大气细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 作为影响我国空气质量的主要污染物, 其粒径小、比表面积大, 可携带重金属、有机物等有害物质长期悬浮于大气中, 不仅对大气能见度产生显著影响, 更会通过呼吸作用侵入人体深层组织, 诱发心血管、呼吸系统等多种疾病, 是威胁公众健康的重要环境风险因子^[1–3]。随着我国“大气十条”“蓝天保卫战”等一系列污染防治政策的深入实施, 京津冀^[4–6]、珠三角^[7–9]、长三角^[10–12]等重点城市环境质量得到显著改善。但冬季仍是我国大气颗粒物污染的高发时段^[13,14], 颗粒物重污染过程多集中于冬季采暖期及冷空气活动薄弱时段^[15,16], 且污染

强度大、持续时间长、影响范围广。冬季颗粒物中二次转化过程活跃, 还存在组分间的协同作用^[17], 产生“1+1>2”的污染放大效应, 使得冬季颗粒物污染的成因解析与管控难度显著增加。当前我国大气颗粒物污染呈现出区域差异性显著、来源与组分复杂的特点, 精准解析不同区域颗粒物的化学组分特征及污染来源, 已成为突破污染防控瓶颈的核心需求。

目前颗粒物溯源研究多采用化学质量平衡受体模式^[18–20]、主成分分析^[13,21–22]、富集因子法^[23,24]等技术方法, 国内外学者研究已明确燃煤、机动车、扬尘、工业排放、生物质燃烧等是我国城市 $PM_{2.5}$ 的主要来源^[14,20,25], 污染来源的区域

差异性显著,燃煤、机动车、扬尘、工业生产等不同污染源的贡献占比因城市发展特征而异,同时二次颗粒物转化机制复杂,针对西南地区中小工业城市冬季颗粒物的专项研究相对薄弱,难以满足差异化污染防治的需求。

柳州市作为广西重要的工业城市,其产业结构以汽车制造、钢铁、化工等为主^[26],同时地处桂中盆地,地形封闭性较强,冬季不利气象条件频发,大气颗粒物污染问题尤为突出。当前针对柳州市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究多聚焦于浓度时空变化与气象条件的相关性分析^[26-28],对其化学组分特征、二次转化机制及污染来源的系统性解析仍有所欠缺。柳州市仍面临着严峻的空气质量改善压力,亟需明确冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的组分构成、关键污染源及贡献占比。本研究聚焦柳州市冬季大气细颗粒物,以明确其化学组分特征及污染来源为核心目标,探究组分间的相关性及二次转化规律,揭示冬季不利气象条件下颗粒物的生成与累积机制;结合受体模型,精准解析燃烧源、工业排放、交通源、扬尘源等不同污染源的贡献比例。以期柳州市冬季大气污染精准防控、多污染物协同治理方案的制定提供科学依据。

1 研究区域、数据与方法

1.1 站点和数据

本研究采样站点在柳州生态环境监测中心,位于柳北区三中路。采样仪器为聚光科技(杭州)股份有限公司的 $\text{PM}_{2.5}$ 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。仪器设定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。

$\text{PM}_{2.5}$ 及化学组分监测工作严格按照《环境空气颗粒物 (PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$) 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 ($\text{PM}_{2.5}$) 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 ($\text{PM}_{2.5}$) 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 ($\text{PM}_{2.5}$) 中无机元素连续自动监测技术规范》(HJ 1329-2023)进行仪器运维与质控工作,完成仪器质量保证和质量控制,开展在线自动连续监测。依据中国环境监测总站发布的《大气颗粒物组分自动监测数据审核技术指南(试行)》开展数据审核,去除无效数据。

1.2 数据处理

依据《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ663-2013)和《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)对 2024 年 12 月至 2025 年 3 月(2024-2025 年冬季)柳州市颗粒物及其化学组分数据进行统计和处理,颗粒物及其化学组分日评价值为 24h 平均值。

颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 组分质量重构中各类化学组分按照直接测定值和转化值进行分类,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将相应组分的浓度测定值进行换算得出。依据《大气颗粒物组分自动监测数据审核技术指南(试行)》建议,有机物浓度为 1.6 倍的有机碳(OC)测定浓度;地壳物质 $=2.2 \times [\text{Al}] + 2.49 \times [\text{Si}] + 1.63 \times [\text{Ca}^{2+}] + 2.42 \times [\text{Fe}] + 1.94 \times [\text{Ti}]$;微量元素为除地壳元素以外的其他元素的浓度之和。

1.3 分析方法

PMF 模型是一种多元因子分析模型,样本数据为长时间序列的化学组分数据集,分析环境空气样本数据中的化学组分数据,利用标识组分将因子识别为不同源,通过多元线性回归定量计算不同源类的贡献。PMF 模型是大气颗粒物来源解析常用的一种受体模型^[17,18]。

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分特征

2024 年 12 月至 2025 年 3 月柳州市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度为 $45.4 \pm 32.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。依据环境空气质量标准(GB 3095-2012《环境空气质量标准》),2024-2025 年冬季柳州市 $\text{PM}_{2.5}$ 超标天为 17 天,其中 14 为轻度污染天,3 天为中度污染天。图 1 为采样期间柳州市颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时序图,2024 年 12 月 20 日、2024 年 12 月 25 日、2024 年 12 月 30 日、2025 年 1 月 1 日、2025 年 1 月 13~14 日、2025 年 1 月 18~24 日、2025 年 1 月 29~30 日、2025 年 2 月 11~12 日 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度超过二级浓度限值($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

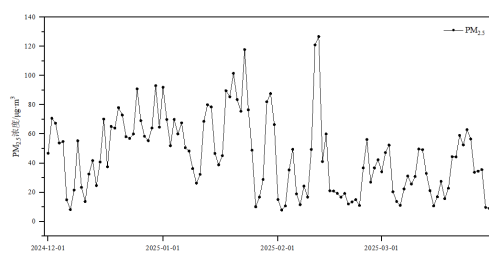


图1 柳州市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时序图

采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子平均浓度为 $12.42 \pm 9.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。水溶性离子组分浓度由大到小为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ (SNA) 是离子组分的主要组分,浓度均值分别达到 $5.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $4.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $3.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2024-2025 年冬季柳州市每月 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 物质的量浓度平均比值均大于 2,2024 年 12 月为 4.11,2025 年 1 月为 3.90,2025 年 2 月为 4.19,2025 年 3 月为 3.24。柳州市大气气溶胶中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 形式结合,为进一

步探究柳州市冬季的 SNA 的存在形式, 将 NH_4^+ 与 $2\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ 物质的量浓度线性拟合, NH_4^+ 和 $2\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ 存在显著相关性 (R^2 大于 0.80), 线性回归方程的斜率为 0.88, 多数点位分布在 1:1 线附近, 说明 SNA 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在, 还会有部分 NH_4^+ 与 Cl^- 结合形成 NH_4Cl [21,29]。

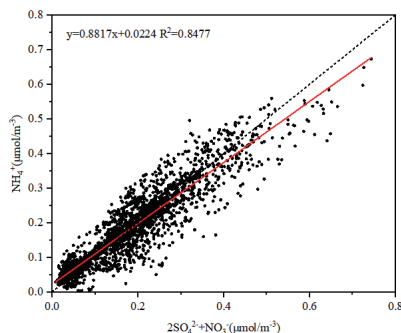


图2 NH_4^+ 和 $2\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ 散点图

采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分平均浓度为 $6.90 \pm 4.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$, OC 浓度为 $6.30 \pm 4.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, EC 浓度为 $0.59 \pm 0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。OC/EC 比值可以用来评估碳质组分来源 [30,31], 研究认为机动车排放的尾气中 OC/EC 范围为 0.8~5.0, 燃煤排放的 OC/EC 范围为 2.5~10.5, 生物质燃烧排放的 OC/EC 范围为 10~16.3。柳州市冬季 OC/EC 比值集中在 4.8~6.8, $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分主要来自机动车尾气和燃煤排放 [32]。

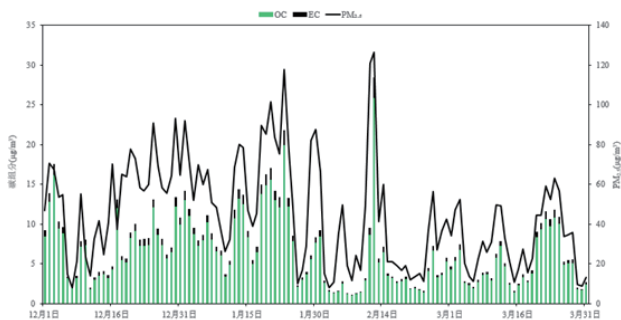


图3 柳州市 $\text{PM}_{2.5}$ 和碳组分浓度时序图

2024-2025 年冬季柳州市冬季柳州市细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 重构的主要组分为: 有机物 (OM)、硝酸盐 (NO_3^-)、硫酸盐 (SO_4^{2-})、铵盐 (NH_4^+)、元素碳 (EC)、氯盐 (Cl^-)、地壳物质和微量元素, 其中有机物为有机碳乘以转化系数得出, 地壳物质以构成地壳物质最主要的化合物 (SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 等) 的相应元素换算得出, 微量元素为除地壳元素以外的其他元素的总和。由图 5 可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 质量重构占比依次为有机物 (34.7%) > 硫酸盐 (18.1%) > 硝酸盐 (17.0%) > 铵盐 (11.5%) > 地壳元素 (8.0%) > 微量元素 (5.9%) > 氯盐 (2.6%) > 元素碳 (2.0%)。

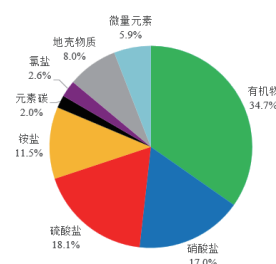


图4 柳州市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量重构占比图

2022 年-2025 年冬季柳州市采样时段颗粒物组分重构数据如图 6 所示, 2022-2023 年冬季 (2022 年 12 月至 2023 年 3 月) 组分重构浓度最高, 比 2023-2024 年冬季 (2023 年 12 月至 2024 年 3 月) 高 34.62%, 比 2024-2025 年冬季高 17.67%。不同组分在各年度的变化趋势并不一致。地壳物质浓度逐年降低, 2022-2023 年冬季地壳物质浓度为 $5.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2024-2025 年冬季降低为 $2.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 表明柳州市对扬尘源的控制成效显著。

组分重构占比最高的有机物在各年度浓度基本稳定, 在 2023-2024 年冬季 ($10.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 最高, 2024-2025 年冬季 ($10.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 最低。硝酸盐、硫酸盐、铵盐和元素碳浓度在各年度变化趋势与整体重构变化趋势一致, 2022-2023 年冬季浓度最高, 2023-2024 年冬季浓度最低。2022-2023 年冬季硝酸盐浓度为 $5.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 比 2023-2024 年冬季高 55.04%, 比, 2024-2025 年冬季高 6.37%。2022-2023 年冬季硫酸盐浓度为 $6.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 比 2023-2024 年冬季高 66.2%, 比 2024-2025 年冬季高 26.52%。2022-2023 年冬季铵盐浓度为 $3.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 比 2023-2024 年冬季高 48.92%, 比 2024-2025 年冬季高 7.38%。2022-2023 年冬季元素碳浓度为 $1.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 比 2023-2024 年冬季高 109.47%, 比 2024-2025 年冬季高 83.67%。二次无机盐 (2022-2023 年冬季 45.36%, 2023-2024 年冬季 38.63%, 2024-2025 年冬季 46.64%) 和有机物 (2022-2023 年冬季 30.13%, 2023-2024 年冬季 41.65%, 2024-2025 年冬季 34.74%) 是柳州市大气颗粒物的主要组分, 冬季的二次无机盐和碳组分主要来源为化石燃料燃烧和机动车尾气 [14,33], 因此柳州市需要持续加强燃煤企业排放管理, 推进新能源车辆布局, 减少污染排放。

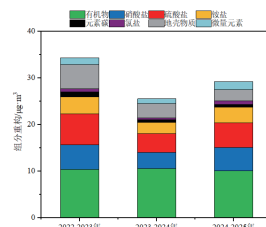


图5 2022-2025 年柳州市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量重构浓度图

2.2 污染过程 PM_{2.5} 特征分析

图7为柳州市一次PM_{2.5}污染过程时离子组分和碳组分浓度时序图, 2025年1月18-24日柳州市PM_{2.5}日均浓度均大于二级浓度限值(75 μg/m³), 其中2025年1月23日PM_{2.5}日均浓度为117.8 μg/m³, 超过三级浓度限值(115 μg/m³)。17日PM_{2.5}浓度存在短时升高过程, 17日6时PM_{2.5}浓度为38 μg/m³, 逐步升高到8时的73 μg/m³, 9时维持在72 μg/m³, 随后颗粒物浓度降低, 在11时恢复到38 μg/m³。期间SO₄²⁻、NH₄⁺、Cl⁻、K⁺、OC和EC浓度显著升高, SO₄²⁻浓度从4.37 μg/m³升高到15.22 μg/m³, 增长比例为248.4%。NH₄⁺浓度从3.51 μg/m³升高到6.64 μg/m³, 增长比例为89.0%。Cl⁻浓度从0.58 μg/m³升高到1.93 μg/m³, 增长比例为234.8%。K⁺浓度从0.89 μg/m³升高到1.81 μg/m³, 增长比例为101.9%。OC浓度从4.91 μg/m³升高到9.09 μg/m³, 增长比例为84.7%。EC浓度从0.45 μg/m³升高到0.96 μg/m³, 增长比例为106.8%。NO₃⁻略有升高, 但并未发生突变。SO₄²⁻、NH₄⁺、Cl⁻、K⁺、OC和EC均为生物质燃烧标识组分, 17日PM_{2.5}浓度升高过程受生物质燃烧影响显著^[34,35]。

18日-23日PM_{2.5}浓度趋势为夜间和上午浓度高, 下午浓度降低的模式。主要组分NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、Cl⁻、K⁺、OC和EC浓度变化规律与颗粒物一致。期间柳州受均压场控制, 等压线稀疏, 气压梯度小, 近地面风速小, 有较强的辐射逆温, 逆温层厚度大, 不利于大气中污染物的扩散和稀释, 导致夜间和上午颗粒物PM_{2.5}累积^[15]。白天随太阳辐射增强, 气温逐步升高, 下午时混合层高度达到最高, 垂直方向扩散能力较强, 颗粒物PM_{2.5}污染得到缓解。24日柳州处于等压线密集区, 水平气压梯度大, 低空风力大, 使得污染物被有效清除。1月18-23日的颗粒物污染过程, 源于为冬季静稳天气下连续多日辐射逆温现象, 逆温辐射致使大气层稳定性显著增强, 大气水平扩散和垂直混合能力大幅减弱, 污染物难以扩散稀释, 进而在近地面持续累积, 使柳州市PM_{2.5}质量浓度持续达到轻度污染等级。

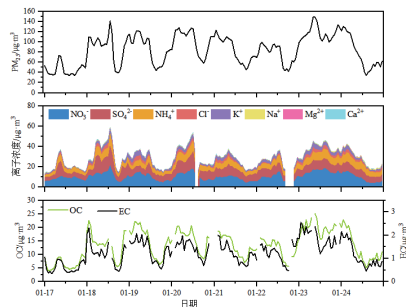
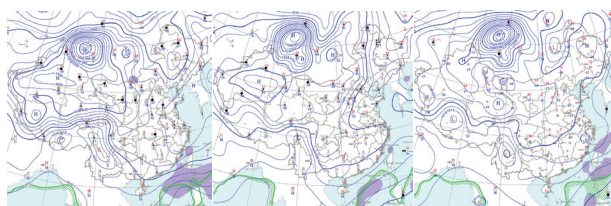
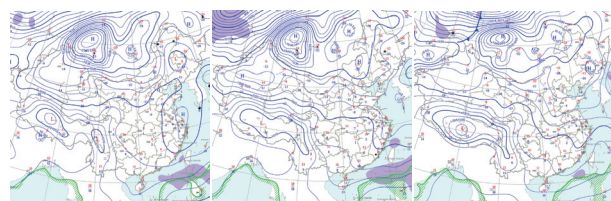


图6 柳州市PM_{2.5}污染时段颗粒物、离子组分和碳组分质量浓度时序图



(a)18 JAN 02BJT (b)19 JAN 02BJT (c)20 JAN 02BJT



(d) 21 JAN 02BJT (e)22 JAN 02BJT (f)23 JAN 02BJT

图7 2025年1月18~23日(a-f)海平面气压

2.3 PM_{2.5} 来源解析

采用正定矩阵因子分析模型(PMF)解析柳州市2024-2025年冬季颗粒物PM_{2.5}的来源, 数据选取了PM_{2.5}和颗粒物组分中的20种组分, 分别为SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、K⁺、Cl⁻、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、OC、EC、Fe、K、Ca、Zn、Pb、Mn、Al、Si、Cu、Na。共解析出6个因子, 因子1中Cl⁻、K⁺和Na贡献率高, 因此判断因子1为烟花燃放源。因子2中NO₃⁻、SO₄²⁻和NH₄⁺占比较高, 表明是二次无机盐源^[19]。因子3中Zn、Pb、Mn和Cu占比较高, 因子3为工业源。因子4中OC、EC和NO₃⁻占比均偏高, 是移动源的示踪物, 因子4为移动源。因子5中OC、EC占比高, 且SO₄²⁻、K⁺和K占比也偏高, 均为燃烧源的示踪物^[20]; 同时源自燃煤企业排放的Fe和Ca占比也较高, 所以判断因子5为燃烧源。因子6中Al、Si、Ca²⁺和Mg²⁺等地壳物质占比较高, 因子6为扬尘源。

图10为PMF源解析得出PM_{2.5}的各来源贡献率, 柳州市2024-2025年冬季颗粒物PM_{2.5}的来源为: 燃烧源(28.2%)、二次无机盐源(22.9%)、移动源(19.7%)、工业源(13.4%)、烟花燃放源(12.4%)和扬尘源(3.4%)。柳州市周边工业区分布有燃煤、炼钢等企业, 农作物种植以粮食和甘蔗为主, 秋冬季为作物收获季节, 秸秆露天焚烧现象频发^[28], 燃烧源因此成为该市冬季大气污染物的首要贡献源。冬季气压是影响柳州市颗粒物浓度的主要气象因素, 以静稳型为主, 大气层结稳定性显著增强, 为逆温层的形成提供了有利条件, 造成污染物的持续累积。在此过程中, 污染物累积易促使硫酸盐、硝酸盐等亲水性颗粒物吸湿膨胀, 导致PM_{2.5}质量浓度升高, 同时二次无机盐源对PM_{2.5}贡献占比较高。春节期间是烟花爆竹燃放的集中时段, 燃放产生的颗粒物浓度短时间内快速升高, 是柳州冬季颗粒物的重要增量来源。综合来看, 柳州市冬

季颗粒物污染呈现为多类污染源叠加不利气象条件的复合型污染特征。

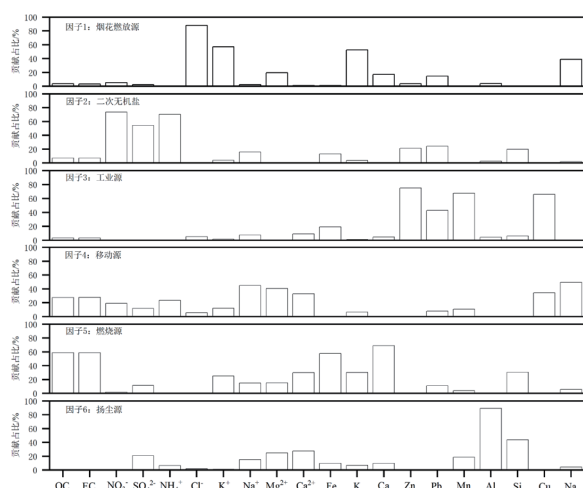


图8 柳州市冬季PM_{2.5}的PMF源谱图

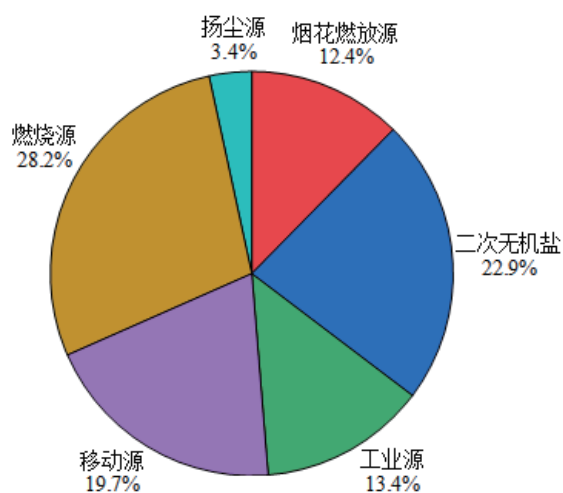


图9 柳州市冬季PM_{2.5}的来源贡献率

3 结语

(1) 2024-2025 年冬季柳州市 PM_{2.5} 平均浓度为 $45.4 \pm 32.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 有 17 天超过 GB 3095-2012《环境空气质量标准》二级限值, 污染时段集中于 1-2 月。有机物、硫酸盐、硝酸盐和铵盐是 2024 年~2025 年冬季柳州市的 PM_{2.5} 主要化学组分。

(2) PM_{2.5} 中水溶性离子平均浓度为 $12.42 \pm 9.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。水溶性离子组分浓度由大到小为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。冬季 SNA 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在, 还有部分存在形式为 NH_4Cl 。

(3) OC/EC 比值范围为 4.8~6.8, 说明柳州市冬季碳组分主要受机动车尾气和燃煤排放影响。

(4) 2022-2023 年冬季柳州市组分重构浓度最高, 2023-2024 年冬季浓度最低。各年度有机物浓度基本稳定,

各年度硝酸盐、硫酸盐、铵盐和元素碳浓度趋势与组分重构趋势一致, 地壳物质浓度逐年降低。

(5) 柳州市一次 PM_{2.5} 污染过程中, 受均压场控制, 近地面等压线稀疏, 有较强的辐射逆温导致大气结构层十分稳定, 形成多日持续污染。24 日经强风净化作用, 污染物被有效清除。冬季 PM_{2.5} 污染易受静稳气象条件影响, 近地层弱风场、冷高压控制等天气形势易导致污染物累积, 形成区域性污染过程。

(6) 通过 PMF 来源解析柳州市冬季 PM_{2.5} 的来源主要有 6 种, 分别为燃烧源、二次无机盐源、移动源、工业源、烟花燃放源和扬尘源。工业区高耗能企业排放及秋冬季秸秆露天焚烧构成的燃烧源, 是冬季大气污染物的首要贡献源; 移动源作为重要补充污染源, 进一步增加了颗粒物污染负荷; 春节期间烟花爆竹集中燃放, 是柳州市颗粒物浓度升高的重要增量来源。柳州冬季颗粒物污染是燃烧源、移动源、工业源等各类污染源排放与冬季不利气象条件共同作用下的污染累积所致, 呈现出明显的复合型特征。

参考文献:

- [1] 徐洪兵, 李梦瑶, 刘家辉等. 大气颗粒物长期暴露与死亡风险之间的关联及影响因素: 系统综述与 Meta 分析[J]. 环境科学研究, 2026,39(1):232-244.
- [2] 大气污染健康防护专家共识编写组. 降低大气细颗粒物健康危害的综合措施专家共识[J]. 环境与职业医学, 2025,42(9):1025-1037,1053.
- [3] Fu P F, Guo X B, Cheung F M H, et al. The association between PM_{2.5} exposure and neurological disorders: a systematic review and meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 1240-1248.
- [4] 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.
- [5] 宋小涵, 燕丽, 刘伟等. 2015~2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 1841-1851.
- [6] 郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东等. 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.
- [7] 陈彦宁, 张金谱, 裴成磊等. 2016-2020 年广州市 PM_{2.5} 时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2022, 42(12): 273-285.
- [8] 何国文, 邓涛, 欧阳珊珊等. 广州地区秋季 PM_{2.5} 和臭氧复合污染的观测研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(6): 250-259.

- [9] 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.
- [10] 周敏. 上海大气 $PM_{2.5}$ 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.
- [11] 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.
- [12] 沈建东, 焦荔, 徐昶等. 杭州市大气细颗粒物粒径来源解析[J]. 中国科学院大学学报, 2014,31(3):367-373.
- [13] 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊等. 2016~2020 年邯郸市冬季 $PM_{2.5}$ 污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6463-6473.
- [14] 林昕, 曹芳, 翟晓瑶等. 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.
- [15] 王跃, 王莉莉, 赵广娜等. 北京冬季 $PM_{2.5}$ 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.
- [16] 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.
- [17] 项妍琨, 曹芳, 张雯淇等. 长三角城郊冬夏 $PM_{2.5}$ 中铵盐的形成过程及来源解析[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6486-6494.
- [18] 李慧, 王涵, 严沁等. 汾渭平原秋冬季 $PM_{2.5}$ 化学组分特征及其来源[J]. 环境科学研究, 2023, 36(3): 449-459.
- [19] 王国祯, 任万辉, 于兴娜等. 沈阳市冬季大气 $PM_{2.5}$ 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.
- [20] 郭景宁, 李小飞, 余锋等. 渭南市冬季 $PM_{2.5}$ 化学组成及来源解析[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6474-6485.
- [21] 孙有昌, 姜楠, 王申博等. 安阳市大气 $PM_{2.5}$ 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.
- [22] 符传博, 唐家翔, 丹利等. 海南岛细颗粒物污染特征、影响因素及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5140-5148.
- [23] 张弼, 王珍, 郭军. 富集因子法分析贵阳市 $PM_{2.5}$ 主要排放源污染元素[J]. 环境科学导刊, 2016, 35(z1): 172-175.
- [24] 张俊美, 陈仕霖, 王乾恒等. 郑州市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 602-610.
- [25] 张剑飞, 姜楠, 段时光等. 郑州市 $PM_{2.5}$ 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4813-4824.
- [26] 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. 环境科学学报, 2020,40(1): 13-26.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Qiao B Q, Chen Y, Tian M, et al. Characterization of watersoluble inorganic ions and their evolution processes during $PM_{2.5}$ pollution episodes in a small city in southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650(2): 2605-2613.
- [30] 郭育红, 辛金元, 王跃思等. 保定市大气颗粒物中含碳组分粒径分布[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 185-192.
- [31] 罗达通, 张敬巧, 刘湛等. 郴州市大气 $PM_{2.5}$ 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.
- [32] 张家营, 刘保双, 毕晓辉等. 天津市区夏季碳气溶胶特征及改进的二次有机碳估算方法[J]. 环境科学研究, 2018, 31(9): 1504-1518.
- [33] 孙佳宾, 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.
- [34] 瞿群, 杨毅红, 宋丹林等. 成都典型秸秆燃烧季节 $PM_{2.5}$ 中化学成分研究[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(4): 439-448.
- [35] 钟方潜, 苏琪骅, 周任君等. 秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(2): 149-161.
- 作者简介: 何洪 (1979.09-), 男, 壮族, 广西来宾, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向: 生态环境监测。