

周宗圣,徐艳丽. 安徽宣城 2024 年元旦前后重污染过程分析[J]. 陕西气象, 2025(3):66-72.

文章编号:1006-4354(2025)03-0066-07

安徽宣城 2024 年元旦前后重污染过程分析

周宗圣¹,徐艳丽²

(1. 宣城市气象局,安徽宣城 242000;2. 合肥中科光博量子科技有限公司,合肥 230088)

摘要:2023 年 12 月 26 日至 2024 年 1 月 2 日宣城市经历了一次持续时间长的重污染过程。基于气溶胶激光雷达垂直廓线数据、测风激光雷达垂直廓线数据、地面空气质量监测数据、气象监测数据,结合 HYSPLIT 模式模拟的后向轨迹数据,研究了气象条件、本地排放、区域污染传输对宣城市空气质量的影响。结果显示,宣城市 PM_{2.5} 质量浓度的升高与偏北方向企业(涉煤/生物质燃料燃烧)排放、机动车尾气排放有关;边界层高度降低(重污染期间边界层高度不足 0.6 km),近地面风速普遍低于 2 m/s,风向多变、高相对湿度以及 0.2 km~0.8 km 范围内多次受污染传输影响等不利气象条件导致污染累积,PM_{2.5} 质量浓度升高。后向轨迹结果表明,东北气流和西南气流影响期间,容易出现 PM_{2.5} 小时重污染天气;权重潜在源贡献因子和加权浓度权重轨迹分析结果显示,偏北方向、东北方向以及东南方向对此次宣城市 PM_{2.5} 污染过程外源输送贡献最大。

关键词:PM_{2.5} 污染过程;气溶胶激光雷达;测风激光雷达;气象条件;后向轨迹

中图分类号:X51

文献标识码:A

随着我国大气污染防治工作稳步推进,空气质量得到一定程度的改善,但是当遇到不利气象条件时,仍会出现重污染天气,其中以细颗粒物 PM_{2.5} (环境空气中动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物)作为首要污染物并且达到重度污染以上的天数频发。PM_{2.5} 来源可分为自然排放源和人为排放源两大类,在城市环境中,机动车尾气排放、煤炭燃烧、工业生产等是 PM_{2.5} 的主要人为排放源。PM_{2.5} 不仅能使大气能见度降低^[1],影响城市交通,给出行安全带来很大的隐患,还可随着人的呼吸进入到肺泡和血液中,诱发各种疾病^[2-3],严重影响人们的身体健康。国内对 PM_{2.5} 的研究多集中在京津冀地区^[4-6]、珠三角地区^[7-9]、长三角地区^[10-11] 以及各省会城市^[12-14] 等,这些研究涵盖了从污染特征到影响因素分析,以及从单一城市到整个区域的广泛研究,为理解和应对 PM_{2.5} 污染问题提供了充分的学术依据。

宣城市作为长三角城市中的一员,位于安徽

省东南部,地势东南高、西北低,易受北部区域污染传输影响。与长三角其他城市相比,国内对宣城市空气中 PM_{2.5} 污染的研究较少,因此十分有必要对该地区 PM_{2.5} 污染成因展开更多详细的研究。2023 年 12 月 26 日至 2024 年 1 月 2 日,宣城市出现了一次持续性重污染过程,其中在 12 月 29 日和 12 月 30 日 PM_{2.5} 质量浓度分别为 $154 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $151 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (超过 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$),空气质量达到了重度污染等级^[15-16]。下面基于气溶胶激光雷达监测数据,结合测风激光雷达监测数据、地面空气质量监测数据、气象监测数据以及 HYSPLIT 后向轨迹数据,对在此期间重污染过程进行详细分析,探讨此次污染天气的形成机制及演变特征,进而为宣城市大气污染防治提供参考依据。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

常规气象监测数据(气温、相对湿度、风向、风

收稿日期:2024-06-25

作者简介:周宗圣(1990—),男,汉族,安徽宣城人,本科,工程师,主要从事灾害性天气预报及其研究。

通信作者:徐艳丽(1990—),女,汉族,安徽亳州人,硕士,工程师,主要从事环境空气质量监测工作。

速)采用宣城市夏渡子站的小时数据,空气质量监测数据($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 SO_2 、 NO_2)采用宣城市四个国控子站各污染物小时质量浓度均值,气象监测数据和空气质量监测数据均来自安徽省环境空气监测管理平台(<http://220.248.245.251:8166/index.html>),数据选取时段为 2023 年 12 月 26 日至 2024 年 1 月 3 日,降雨量数据来自宣城国家气象站;气溶胶激光雷达数据来自宣城市夏渡子站的气溶胶激光雷达(型号为 GBQ L-01),探测的主要物理量为消光系数^[17]、退偏振比^[18]和边界层高度。测风激光雷达数据来自宣城高速大队的测风激光雷达(型号为 GBQ L-05),测量大气风场信息(水平风向、水平风速、垂直气流等)。HYSPLIT 后向轨迹模型使用全球资料同化系统 GDAS(global data assimilation system)的再分析资料,分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,该模型被广泛应用于大气污染物输送研究,是一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型^[19-20]。文中选取的模拟监测点位置为宣城市夏渡子站(30.92°N 、 118.77°E),时间段为 2023 年 12 月 26 日至 2024 年 1 月 2 日,时间间隔 1 h,后向模拟时间为 24 h,选择能较好地反映近地面气团输送特征,且受到下垫面影响较小的 500 m 高度上进行回溯分析,采用欧氏距离聚类分析算法、潜在源贡献因子分析法、浓度权重轨迹分析法计算此次持续污染过程中宣城 24 h 后向轨迹聚类、潜在源分析和浓度权重分析^[21-22]。

2 污染过程实况

2.1 总体情况

2023 年 12 月 26 日至 2024 年 1 月 3 日,宣城市经历了一次持续时间长的重污染过程。从 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度变化曲线(图 1)看,2023 年 12 月 26 日 14 时起受高湿、静稳等不利气象条件以及区域污染物输送影响,宣城市 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度呈现爆发式增长,26 日 20 时开始进入污染期,28 日 11 时开始出现重度污染,至 2024 年 1 月 3 日 05 时本轮污染结束,小时空气质量转为良,期间宣城市出现 52 h 重度污染、57 h 中度污染和 66 h 轻度污染, $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度峰值达到 $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (28 日 14 时)。

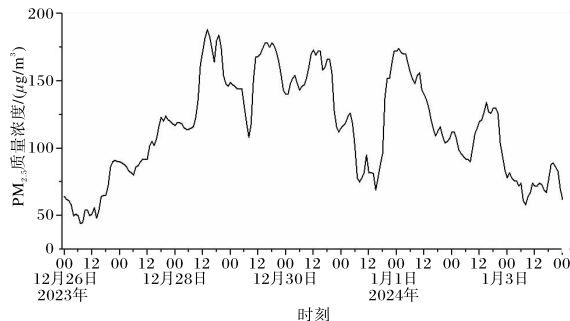


图 1 2023-12-26—2024-01-03 宣城市 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度变化时序图

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布特征

气溶胶激光雷达观测结果(图 2)显示,2023 年 12 月 26 日宣城市边界层较高,消光系数较小(0.1 km^{-1}), $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度整体较低。27 日 12 时起 $0.2 \text{ km} \sim 0.6 \text{ km}$ 范围内出现污染气团,消光系数逐渐增大,受污染气团沉降与本地污染叠加影响, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度迅速升高,于 28 日 14 时达到峰值($188 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。28 日 18 时高空 $0.5 \text{ km} \sim 0.8 \text{ km}$ 范围内出现污染气团,消光系数介于 $0.8 \sim 1.1 \text{ km}^{-1}$,污染呈下降趋势;29 日 12 时至 30 日 09 时 0.4 km 以下消光系数较大(大于 1.0 km^{-1}), $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度维持在较高水平。30 日 12 时至 15 时 $0.2 \text{ km} \sim 0.4 \text{ km}$ 范围内存在污染气团,污染气团在 15 时后逐渐消散,消光系数逐渐降低(1.2 km^{-1} 降低至 0.2 km^{-1}),近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随之呈降低趋势。31 日 00 时至 05 时, $0.2 \text{ km} \sim 0.8 \text{ km}$ 范围内存在高消光污染气团,退偏振比约 0.04,主要为形状规则粒子;05 时后污染气团随边界层抬升逐渐扩散,消光系数逐渐降低(由 0.8 km^{-1} 降低至 0.2 km^{-1}),31 日 00 时起 $0.8 \text{ km} \sim 1.8 \text{ km}$ 范围内退偏振比明显增大(大于 0.15),表明 0.8 km 以上高空出现形状不规则的粒子;31 日 04 时至 18 时近地面退偏振比也明显增大(介于 $0.10 \sim 0.20$),说明近地面也受到形状不规则粒子影响。31 日 10 时起 0.2 km 以上出现污染气团,消光系数逐渐增大(0.6 km^{-1} 增大至 1.9 km^{-1}),18 时至 2024 年 1 月 1 日 10 时高空污染沉降叠加局地污染源排放影响,导致近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度迅速升高。1 日 11 时后近地面高消光气团逐渐抬升扩散, $\text{PM}_{2.5}$

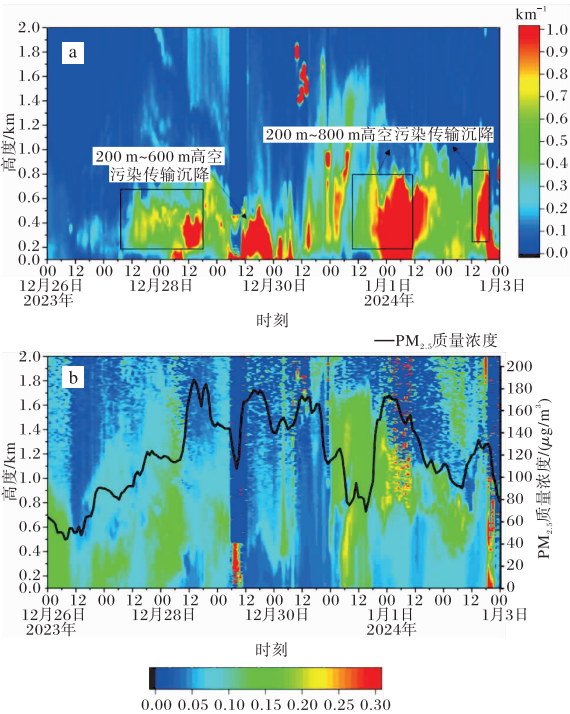


图2 2023-12-26—2024-01-02 宣城市气溶胶激光雷达
时序图(a 消光系数,b 退偏振比叠加 PM_{2.5}质量浓度)

质量浓度逐渐降低。2日13时至19时0.2 km~0.8 km范围内再次出现污染气团,消光系数逐渐增大(0.6 km⁻¹增大至1.8 km⁻¹),退偏振比约0.06,

主要为形状规则的粒子。受此污染气团影响,近地面PM_{2.5}质量浓度再次升高;19时起地面出现降雨过程,PM_{2.5}质量浓度逐渐降低。

3 污染成因分析

3.1 气象条件分析

低风速、高相对湿度、边界层高度降低等是造成重污染天气发生的重要因素^[23-24]。图3为宣城市污染期间PM_{2.5}质量浓度、风向、风速、降雨量、相对湿度、气温、边界层高度时序图。27—28日PM_{2.5}质量浓度出现2次上升过程:第一次出现在27日05时至20时,期间风速为0.5~1.9 m/s,平均风速1.1 m/s,扩散条件较差,十分有利于污染累积;第二次出现在28日06时至20时,风速逐渐增大至2.5 m/s,受偏北方向污染传输影响,PM_{2.5}质量浓度迅速上升,最高达到188 μg/m³(28日14时)。重污染期间(29日和30日),平均相对湿度为88%,风速低于2.0 m/s,平均风速为1.3 m/s,高湿有助于气态污染物的二次转化和PM_{2.5}的吸湿性增长,低风不利于污染扩散,导致PM_{2.5}质量浓度维持在较高水平;30日20时至31日07时风向以偏西风为主,风速相对较大(最大为2.4 m/s),扩散条件有所改善,PM_{2.5}质量浓度

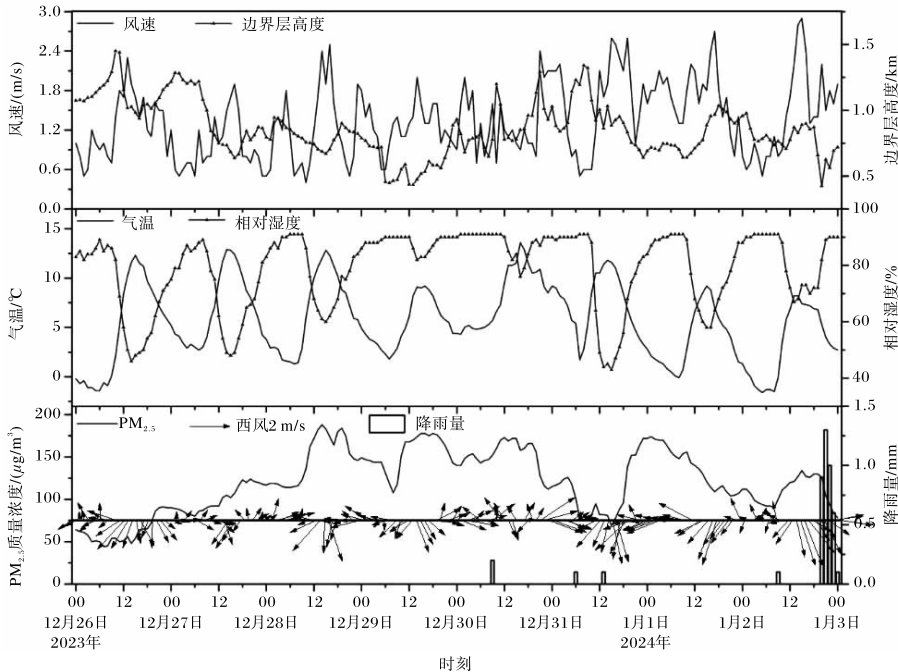


图3 2023-12-26—2024-01-02 宣城市PM_{2.5}质量浓度及主要气象因素时序图

呈现降低趋势。31 日晚间至 2024 年 1 月 1 日凌晨时段相对湿度逐渐增大至 91%，平均风速为 2 m/s，风向以偏东风为主，受偏东风方向污染传输影响， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度再次升高。边界层高度监测结果显示，12 月 27 日 07 时起边界层高度明显降低，重污染期间(29 日和 30 日)，宣城市边界层高度不足 0.6 km，导致大气环境容量进一步降低；31 日边界层高度一度升高至 1.0 km 以上，大气环境容量增大， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度逐渐降低；2024 年 1 月 1 日边界层高度再次低于 1.0 km，平均边界层高度为 0.8 km，大气环境容量较小。1 月 2 日 18 时后出现降雨，最大降雨量 1.3 mm(2 日 21

时)，受降雨冲刷 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度逐渐降低。

测风激光雷达观测结果(图 4)显示，2023 年 12 月 26 日至 2024 年 1 月 2 日，宣城市近地面风向多变(图 4a)，较为典型的如 12 月 29 日凌晨为东北风，中午转为西北风，晚间转为西南风，造成污染气团来回移动，形成滞留；除 28 日 17 时至 29 日 03 时、30 日 17 时至 31 日 06 时、31 日 18 时至 2024 年 1 月 1 日 12 时、1 日 16 时至 1 日 23 时、2 日 14 时至 2 日 20 时 300 m 以下高度风速短暂增大至 5 m/s 左右外，其他时段风速都集中在 2 m/s 以下(图 4b)，且整体以下沉气流为主(图 4c)，非常不利于污染的扩散转移，从而造成 12 月 26 日

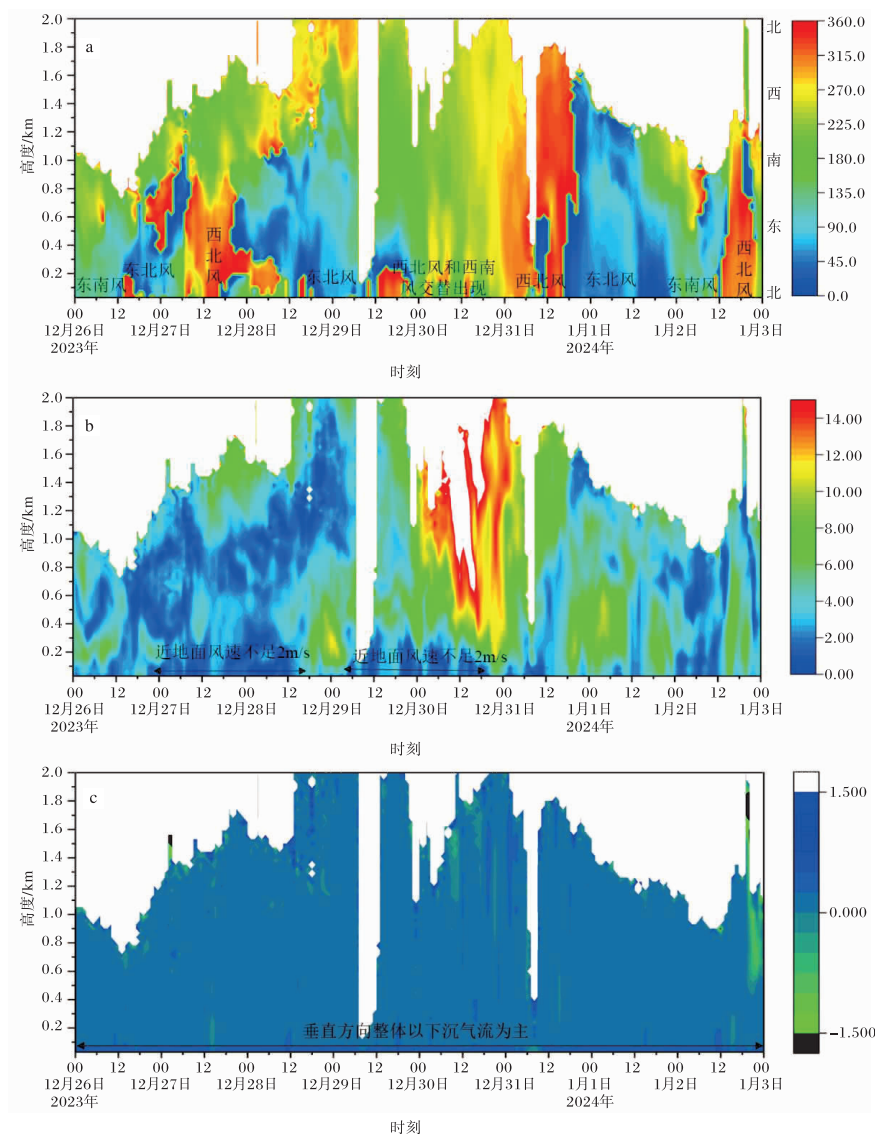


图 4 2023-12-26—2024-01-02 宣城市测风激光雷达观测时序图
(a 水平风向,单位:°;b 水平风速,单位:m/s;c 垂直风速,单位:m/s)

至1月2日期间的污染累积。此外,在12月27日12时至28日18时、12月31日18时至2024年1月1日10时、2024年1月2日10时至19时,0.2 km~0.8 km范围内出现污染气团,对应高度的风向均以西北风或东北风为主,说明高空污染气团来自西北方向或东北方向。

3.2 本地污染源排放影响

从图5来看,PM_{2.5}质量浓度与CO质量浓度变化趋势较为一致,说明这两种污染物来源可能具有同源性。在PM_{2.5}质量浓度升高时段,NO₂质量浓度出现两次明显上升过程(26日15时至27日00时、27日15时至27日19时),并在27至30日维持在较高水平(大于40 μg/m³),SO₂质量浓度也出现几次上升过程。NO₂主要来源为燃煤燃烧和机动车尾气排放,SO₂主要来源为燃煤燃烧^[25-26]。在SO₂或NO₂升高阶段,主导风向均以偏北风为主。根据宣城市周边污染源分布情况来看,宣城主城区北侧4 km左右存在高架源企

业,涉及燃煤锅炉和生物质锅炉;城区北部的昭亭北路,是宣城市区往北通行的唯一主干道,全天大部分时间段车流量较大,且允许大型柴油货车通行,说明PM_{2.5}质量浓度的升高与偏北方向企业(涉煤/生物质燃料燃烧)排放、机动车尾气排放有关。

由PM_{2.5}与PM₁₀小时质量浓度比值($C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$)来看,2023年12月26日00时至2024年1月3日00时 $C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$ 基本大于0.6,说明污染以细颗粒物为主,其中在12月27日11时至31日00时期间 $C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$ 呈波动式升高趋势,表明细颗粒物污染逐渐加剧。污染期间相对湿度较大(43%~91%),重污染期间(12月29日至30日)平均相对湿度达到88%,高相对湿度有利于气态污染物二次转化。研究指出CO有较长的生命周期,是一种较好的一次污染指示物^[27],在PM_{2.5}小时质量浓度升高阶段,PM_{2.5}与CO小时质量浓度比值($C_{PM_{2.5}}/C_{CO}$)也增大,说明PM_{2.5}质量浓度中二次污染物的质量浓度占比提高。

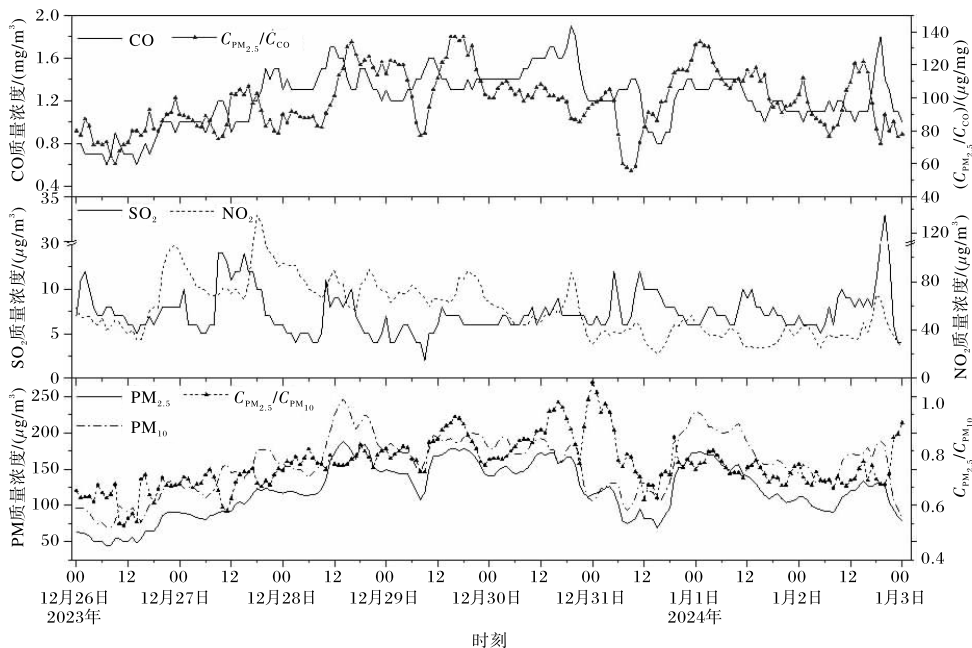


图5 2023-12-26—2024-01-02宣城市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO质量浓度, $C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$, $C_{PM_{2.5}}/C_{CO}$ 时序图

3.3 PM_{2.5}传输路径及潜在源解析

图6为2023年12月26日至2024年1月2日宣城市500 m高度气团24 h后向轨迹。从图6a可以看出,在东北气流和西南气流影响期间,

容易出现PM_{2.5}小时重污染天气。对500 m高度气团24 h后向轨迹进行聚类(图6b),结果显示宣城市气流大体可以分为6个方向,其中东南气流(轨迹3)占比最多(28.13%),气流轨迹最短,为

短距离输送;东北气流(轨迹 5)占比也相对较多(20.83%),气流起源于江苏盐城,途径泰州、常州等地到达宣城,所携带的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均值最高($152 \mu\text{g}/\text{m}^3$),为宣城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要输入气流;西北气流(轨迹 6)占比最少(6.25%),所携带 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均值最低($95 \mu\text{g}/\text{m}^3$),轨迹 6 相对较为清洁。采用潜在源贡献因子分析法分析宣城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染潜在源区(图 6c),结果表明宣城市 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源区(权重潜在源贡献因子值超过 1 的

区域)主要分布在西北方向马鞍山市和县与当涂县、偏北方向南京市高淳区、东北方向宣城市郎溪县以及东南方向湖州市安吉县等地。为进一步确定潜在源区的权重浓度,开展了浓度权重轨迹分析,结果表明(图 6d),加权浓度权重轨迹高值区(大于 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)主要分布在偏北方向马鞍山市与南京市、东北方向溧阳市与郎溪县一带以及东南方向宁国市与安吉县,说明这些区域对宣城市此次 $\text{PM}_{2.5}$ 污染贡献较大。

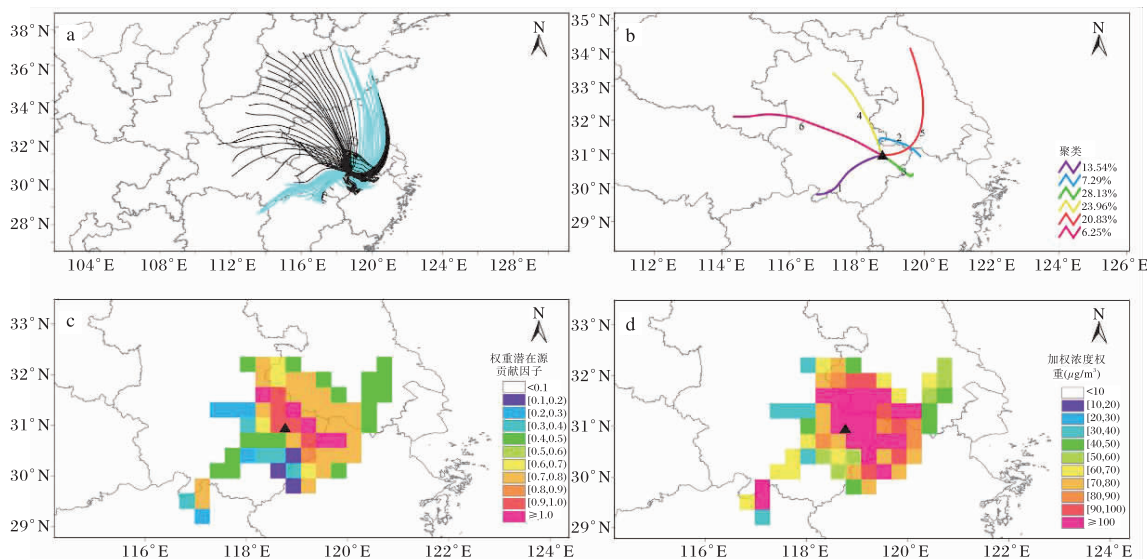


图 6 2023-12-26—2024-01-02 宣城市 500 m 高度气团 24 h 后向轨迹(a;黑线为 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $\leq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 气流轨迹,蓝线为 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 气流轨迹)、后向轨迹聚类分析(b), $\text{PM}_{2.5}$ 权重潜在源贡献因子分析(c)、加权浓度权重轨迹分析(d)(审图号为 GS(2019)1822 号)

4 结论

(1) $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的升高与偏北方向企业(涉煤/生物质燃料燃烧)排放、机动车尾气排放有关。

(2) 不利的气象条件导致污染累积, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度升高。一是 27 日 07 时起边界层高度明显降低,重污染期间(29 日和 30 日),边界层高度不足 0.6 km,导致大气环境容量进一步降低;二是近地面水平风速主要在 2.0 m/s 以下,垂直气流以下沉气流为主,扩散条件较差,十分有利于污染累积;三是风向多变,污染滞留时间较长;四是相对湿度较高,重污染期间平均相对湿度为 88%,容易造成颗粒物的吸湿性增长和气态污染物二次转化;五是 0.2 km~0.8 km 范围内多次受西北或东北方向传输影响出现污染气团,且污染气团

呈现沉降趋势。

(3) 后向轨迹结果表明东北气流和西南气流影响期间,容易出现 $\text{PM}_{2.5}$ 小时重污染天气;后向轨迹聚类分析结果表明东北气流是宣城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要输入气流;权重潜在源贡献因子分析结果显示宣城市的潜在源区(权重潜在源贡献因子值大于 1 的区域)主要分布在西北方向马鞍山市和县与当涂县、偏北方向南京市高淳区、东北方向宣城市郎溪县以及东南方向湖州市安吉县等地;加权浓度权重轨迹分析结果显示加权浓度权重轨迹高值区(大于 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)主要分布在偏北方向马鞍山市与南京市、东北方向溧阳市与郎溪县一带以及东南方向宁国市与安吉县,说明这些区域对此次宣城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程外源输送贡献最大。

参考文献:

- [1] ZHANG R J, WANG M X, XIA X G. Chemical composition of aerosols in winter/spring in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 14 (1): 7-11.
- [2] 李勇, 廖琴, 赵秀阁, 等. $\text{PM}_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1688-1695.
- [3] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1894-1898.
- [4] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 418-427.
- [5] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相互输送特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 4897-4904.
- [6] 刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 $\text{PM}_{2.5}$ / PM_{10} 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析[J]. *环境化学*, 2015, 34(1): 60-69.
- [7] 冯茜丹, 党志, 黄伟林. 广州市秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属的污染水平与化学形态分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(3): 569-575.
- [8] 朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 广州 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(2): 15-21.
- [9] 吴兑, 刘啟汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子 ($\text{PM}_{2.5}$) 污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(11): 2660-2669.
- [10] 包贞, 冯银厂, 焦荔, 等. 杭州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染特征及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2010, 26(2): 44-48.
- [11] 魏玉香, 银燕, 杨卫芬, 等. 南京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及其影响因素分析[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(9): 29-34.
- [12] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1619-1628.
- [13] 杨凌霄. 济南市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征、来源解析及其对能见度的影响[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [14] 王敬, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 乌鲁木齐市重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征与来源解析[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(2): 113-119.
- [15] 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [16] 环境空气质量评价技术规范(试行): HJ 663—2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [17] 李斌, 郑博华, 王红岩, 等. 基于气溶胶激光雷达观测的人工消减雾霾作业效果分析[J]. *气象科技*, 2023, 51(5): 728-737.
- [18] 张帅, 王明, 施奇兵, 等. 2019 年—2020 年秋、冬季淮南市灰霾过程拉曼-米气溶胶雷达观测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(8): 2484-2490.
- [19] 王艳, 柴发合, 刘厚凤, 等. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(1): 22-29.
- [20] 涂小萍, 姚日升, 高爱臻, 等. 浙江北部一次爆发式发展重度大气污染的气象特点和成因[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(5): 1443-1451.
- [21] 张凤, 李振亮. 渝东南典型城区冬季一次罕见的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程及溯源分析[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(5): 95-104.
- [22] 汪蕊, 丁建丽, 马雯, 等. 基于 PSCF 与 CWT 模型的乌鲁木齐市大气颗粒物源区分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(8): 3033-3042.
- [23] ZHENG G J, DUAN F K, SU H, et al. Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(6): 2969-2983.
- [24] 张强, 薛迪, 王爽, 等. 青岛市 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天气演变过程分析[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3623-3635.
- [25] WANG Y, ZHANG G, ZHANG X, et al. The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of $\text{PM}_{2.5}$ and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(16): 2935-2952.
- [26] 王德羿, 王体健, 韩军彩, 等. “2+26”城市大气重污染下 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 92-99.
- [27] 姬艺珍, 郭伟, 胡正华, 等. 太原市 $\text{PM}_{2.5}$ 积累特征及重污染天气成因分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(3): 853-862.