

元阳县大气颗粒物污染变化规律与潜在来源研究

李维文 李冀康 汤一鸣 李健英 姜凯文

云南省元阳县气象局

DOI:10.32629/eep.v8i9.2884

[摘要] 本文以元阳县为研究区域,通过连续24小时高频监测数据,分析大气颗粒物 $PM_{1.0}$ 和 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征及变化规律。研究表明,颗粒物浓度呈显著日变化特征,夜间湿度升高促进颗粒物二次生成和吸湿增长,白天光化学反应加剧污染累积。 $PM_{2.5}$ 浓度在夜间达到峰值(最高 $294\mu\text{g}/\text{m}^3$),能见度最低降至400米。气象条件中相对湿度与颗粒物浓度呈正相关,低风速条件不利于污染物扩散。污染来源主要为交通排放、工业源和二次转化,建议加强区域联防联控和实施精准减排措施。

[关键词] $PM_{2.5}$; 污染特征; 时空分布; 元阳县; 环境监测

中图分类号: X83 文献标识码: A

Study on the Change Law and Potential Source of Atmospheric Particulate Pollution in Yuanyang County

Weiwen Li Jikang Li Yiming Tang Jianying Li Kaiwen Jiang

YuanYang County Meteorological Bureau, Yunnan Province

[Abstract] Taking Honghe Prefecture as the study area, this study analyzes the spatiotemporal distribution characteristics and variation patterns of atmospheric particulate matter ($PM_{1.0}$) and $PM_{2.5}$ using continuous 24-hour high-frequency monitoring data. The results show that particulate matter concentration exhibits significant diurnal variation. Increased humidity at night promotes secondary formation and hygroscopic growth of particulate matter, while photochemical reactions exacerbate pollution accumulation during the day. $PM_{2.5}$ concentration peaks at night (up to $294\mu\text{g}/\text{m}^3$), with visibility dropping to a minimum of 400 meters. Relative humidity is positively correlated with particulate matter concentration under meteorological conditions, and low wind speeds are unfavorable for pollutant dispersion. The main sources of pollution are traffic emissions, industrial sources, and secondary transformation. It is recommended to strengthen regional joint prevention and control and implement precise emission reduction measures.

[Key words] $PM_{2.5}$; pollution characteristics; spatiotemporal distribution; Honghe Prefecture; environmental monitoring

引言

工业化与城镇化加速背景下,大气颗粒物污染成为区域可持续发展重要制约。元阳县地处云南南部,独特地理气候致大气环境挑战复杂,近年来 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 污染加重,影响空气质量与公众健康。当前该地区缺乏系统性研究,尤其高频监测数据的精细化分析不足。因此,基于连续监测数据深挖颗粒物污染变化规律,识别主因及潜在源,对制定科学防控策略意义重大。

1 元阳县大气颗粒物污染现状分析

1.1 研究区域概况与监测方法

元阳县位于云南省南部,其地理坐标在北纬 $22^{\circ}26' \sim 24^{\circ}45'$ 、东经 $101^{\circ}47' \sim 104^{\circ}16'$ 之间,整个地区总面积达到2212平方公里。这个地区属于亚热带季风气候,年平均气温在 $15\sim 22.6^{\circ}\text{C}$ 的范围,相对湿度较高。当地独特的山地地貌与盆地结

构,对大气污染物的扩散有着重要影响,很容易形成逆温层进而不利于污染物垂直扩散。本次研究运用连续自动监测的方法,监测时间设定为24小时,即从20:01:00至次日20:00:00,每分钟采集一次数据,共获得1440个有效数据点^[1]。监测参数包含 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度以及温度、相对湿度、大气压力、风速、风向、降雨量和能见度等内容。

1.2 颗粒物浓度水平特征分析

通过对24小时连续监测数据进行统计分析,元阳县大气颗粒物污染呈现出显著的浓度分布特征。 $PM_{1.0}$ 质量浓度变化范围为 $63\sim 327\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均浓度约为 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$,已超过国家二级标准限值(日均 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$)。 $PM_{2.5}$ 质量浓度多数时间维持在 $25\sim 74\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内,但在污染高峰时段最高可达 $294\mu\text{g}/\text{m}^3$,远超过国家标准限值。如表1所示,各项污染物与气象参数均表现出

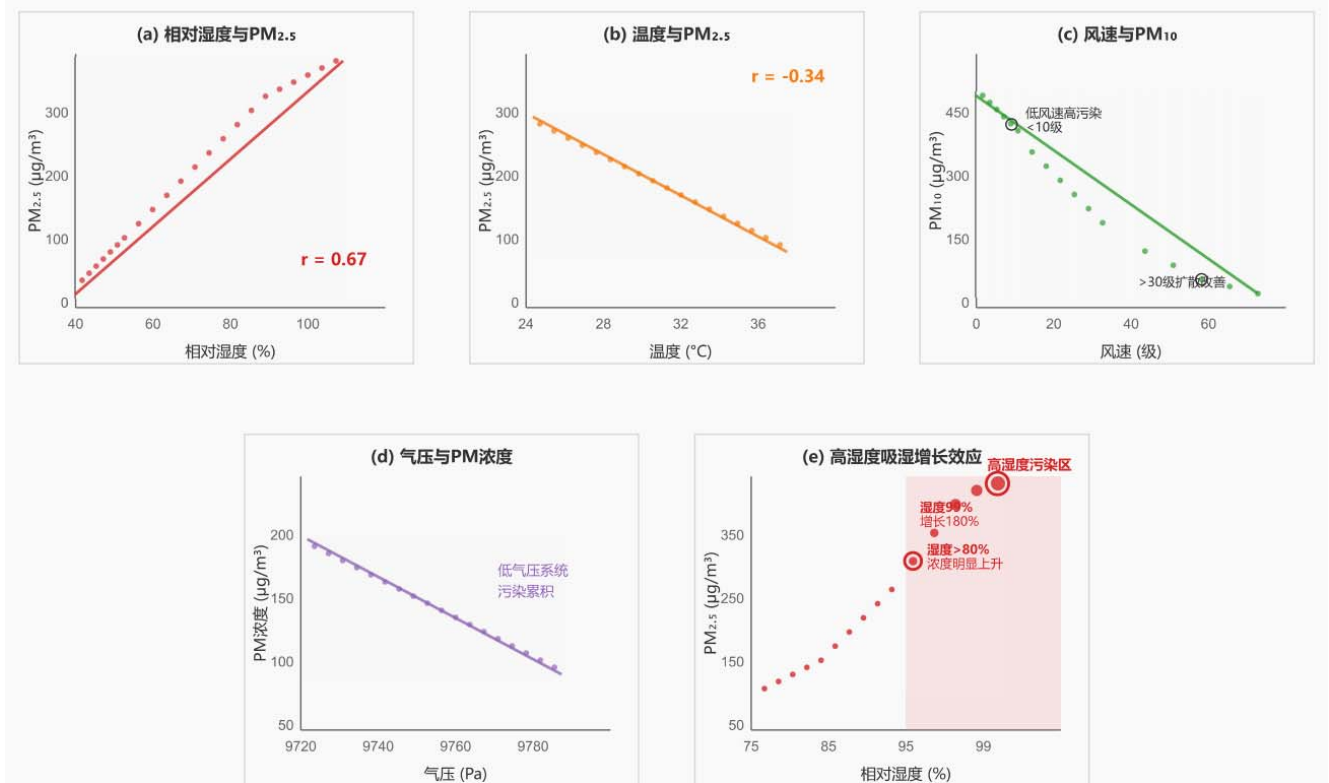


图1 气象要素对颗粒物浓度的影响散点图

较大的时间变异性, PM₁₀和PM_{2.5}的标准差分别为45.2μg/m³和12.8μg/m³, 反映出污染程度波动较为剧烈。PM_{2.5}/PM₁₀质量比例在0.3—0.8之间变化, 平均值为0.52, 表明细颗粒物在总悬浮颗粒物中占重要比例, 二次气溶胶生成较为活跃^[2]。本文将对元阳县近地面大气颗粒物浓度数据进行统计分析, 得到大气颗粒物浓度的日变化、年变化特征; 此外, 运用Pearson相关性分析, 对大气颗粒物浓度与各气象要素(温度、风速、湿度等)的相关性进行研究分析, 并完成图表绘制。本文还计划运用HYSPLIT模型和TrajStat软件对元阳县大气颗粒物的传输路径及潜在来源进行研究。

表1 元阳县大气颗粒物及气象参数统计特征表

参数	最小值	最大值	平均值	标准差	单位
PM ₁₀	63	327	148.6	45.2	μg/m ³
PM _{2.5}	25	294	58.4	12.8	μg/m ³
温度	24	35	29.2	3.1	°C
相对湿度	43	99	71.5	16.7	%
风速	0	49	18.3	12.4	级
气压	9722	9770	9742.8	15.2	Pa

后向轨迹聚类是把大量气团轨迹按不同的移动速度、空间类似度和方向进行分组聚类, 从而得到受体点主导方向上的气团移动路径、来向以及速度; 其分组聚类原则是使组内各轨迹之间的移动速度差异最小, 同时使组间差异最大; 聚类数目采用的是总空间方差法。相关研究团队曾借助HYSPLIT模型的轨迹计算模块, 开发出结合气团轨迹和站点观测数据来分析污染物传输路径和潜在源区的TrajStat开源软件, 实现了后向轨迹聚类、潜在源贡献因子分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)的联合应用。本研究的重难点在于采用TrajStat软件, 基于后向轨迹计算和聚类分析, 运用PSCF、CWT分析法定量分析影响元阳县的不同气流类型和潜在源区。

1.3 空气质量综合评价

根据监测数据计算得出的空气质量指数显示, 在研究时段内, 空气质量等级主要在轻度污染至重度污染之间波动。能见度作为反映空气质量的直观指标, 在观测期间表现出显著波动, 从最佳时的3000米急剧下降至最差时的约400米, 降幅达86.7%。能见度的大幅下降与颗粒物浓度的激增密切相关, 尤其在夜间和凌晨时段, 当PM_{2.5}浓度超过200μg/m³时, 能见度普遍低于1000米, 严重影响交通安全和居民日常生活。对污染超标情况的分析表明, PM₁₀小时均值超标率为65.3%, PM_{2.5}超标率为71.2%, 反映出元阳县面临较为严峻的颗粒物污染压力。

2 大气颗粒物污染时间变化规律

2.1 颗粒物浓度日变化特征

基于24小时完整监测数据的分析,揭示了元阳县大气颗粒物浓度的显著日变化规律。 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度呈典型的双峰分布模式,第一个峰值出现在22:00-02:00时段,第二个峰值在07:00-09:00时段,与交通流量高峰期基本吻合。

夜间污染累积过程表现显著,自21:00起颗粒物浓度持续上升, $PM_{2.5}$ 浓度由初始的 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 逐步攀升至凌晨02:00的峰值 $294 \mu\text{g}/\text{m}^3$,增幅达390%。该现象主要归因于夜间大气边界层高度降低、风速减弱及相对湿度增加,这些因素促进了二次气溶胶的生成。能见度与颗粒物浓度呈显著负相关,当 $PM_{2.5}$ 浓度达到最高值时,能见度降至研究期间最低值400米。白天扩散稀释规律相对较为明显,从上午09:00开始,随着太阳辐射增强和混合层高度上升,颗粒物浓度逐渐下降;在14:00至17:00期间出现浓度最低值, PM_{10} 平均浓度约为 $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 平均浓度约为 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$,较夜间峰值分别下降65%与70%。

2.2 气象因素对颗粒物浓度的影响

气象条件在颗粒物浓度变化过程中起着关键调控作用。温度效应分析表明,在 $28\text{--}34^\circ\text{C}$ 范围内, $PM_{2.5}$ 浓度与温度呈弱负相关($r=-0.34$),高温条件下的垂直对流运动有利于污染物向上传输扩散。湿度影响机制更为复杂且更为重要,如图1所示,相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现显著正相关($r=0.67$)。当相对湿度超过80%时, $PM_{2.5}$ 浓度明显上升,这主要源于高湿度条件下颗粒物的吸湿增长效应以及气相前体物向颗粒相转化的促进作用^[3]。在相对湿度达到99%的极端情况下, $PM_{2.5}$ 浓度较低湿度时段增长约180%。

风速对污染物扩散的作用十分明显。研究期间风速主要维持在低风速状态(0-49级),平均风速仅为18.3级,不利于污染物水平扩散。当风速低于10级时, PM_{10} 浓度普遍超过 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$;风速超过30级时,颗粒物浓度显著下降,扩散条件明显改善。

2.3 降水对颗粒物的清除作用

观测期间出现的偶发降雨(雨量为1-3mm)对颗粒物具有明显的湿沉降清除效果。通过对降雨前后颗粒物浓度进行对比分析发现,即使是轻微降雨(雨量为1mm)也可使 PM_{10} 浓度下降15-25%, $PM_{2.5}$ 浓度下降10-20%。这种清除效率与降雨强度、持续时间及颗粒物粒径分布密切相关。在湿沉降过程中,大颗粒物的清除效率高于细颗粒物,这也解释了降雨后 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值相对上升的现象。降雨的冲刷作用对改善短期空气质量具有积极意义,但降雨结束后污染物浓度常出现反弹,表明控制污染源排放十分重要。

3 大气颗粒物潜在来源识别与防控建议

3.1 污染源解析与贡献率估算

交通源排在早晚通勤高峰时段(也就是07:00-09:00与18:00-20:00)贡献十分显著;通过轨迹聚类分析能够发现,本地机动车排放贡献率大约为30-35%;工业排放源主要涵盖冶金、建材、化工等相关行业,PSCF分析结果显示,工业集中区域对颗粒物浓度的潜在贡献率为25-30%;基于72小时后向轨迹计算以及聚类分析,识别出影响元阳县的主要传输路径,其中东南方向气

流路径占比32%,西南方向路径占比28%,本地及近距离传输占比40%;CWT分析表明,来自东南方向的长距离传输对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献可达20-25%,而西南山区传输主要对粗颗粒物浓度产生影响^[4]。

3.2 颗粒物形成机制分析

基于HYSPLIT轨迹分析及TrajStat软件,元阳县大气颗粒物形成机制包括本地排放、区域传输与二次转化。后向轨迹聚类显示影响气团分四类:东南沿海长距离传输路径(32%),携海洋气团及沿途工业污染物;西南山区路径(28%),以地面扬尘、生物质燃烧颗粒物为主;本地及近距环流路径(40%),含工业粉尘、道路扬尘、机动车尾气等一次源。PSCF表明东南工业集中区对 $PM_{2.5}$ 贡献显著,CWT量化各路径浓度权重。夜间高湿度下二次转化关键,高浓度前体物气团在稳定边界层发生液相氧化,导致 $PM_{2.5}$ 激增^[5]。吸湿增长显著,湿度超75%时颗粒物明显增长,95%以上含盐颗粒物可达干燥态2-3倍。

3.3 污染防控对策与建议

污染源解析建议精准减排:交通源推广新能源车、优结构、限行;工业源强化超低排放改造,提高除尘脱硫脱硝效率,严控VOCs、 NO_x 等二次前体物排放。需建立重污染应急预案,结合夜间污染累积规律,高湿低风速等不利气象时提前启动,采取企业错峰、机动车限行、工地停工等措施。区域联防联控是根本,应建立跨区域协调机制,统一标准、协同减排,加强周边信息共享配合,共应区域重污染。

4 结语

通过对元阳县连续24小时大气颗粒物监测数据的深入分析,揭示了该地区颗粒物污染的时空分布规律和主要影响因素。研究发现颗粒物浓度呈现显著的日变化特征,夜间污染累积明显,气象条件特别是湿度和风速对污染程度具有重要影响。污染源呈现多元化特征,需要采取综合治理措施。研究结果为元阳县大气污染精准防控提供了科学依据,对西南地区类似城市的环境管理具有重要参考价值。

【参考文献】

- [1]刘稳,詹庆明,邱春迪,等.基于精细监测的襄阳冬夏季颗粒物污染时空变化研究[J].环境科学与技术,2023,46(S1):8-18.
- [2]邢建伟,宋金明.中国近海大气颗粒物来源解析研究进展[J].环境化学,2023,42(03):942-962.
- [3]张玉洁,冯俊杰,张武,等.青岛市大气颗粒物污染特征及潜在来源分析[J].高原气象,2023,42(01):244-256.
- [4]韩新宇,卢秀青,钟曜谦,等.云南省有色冶炼集中区春季大气颗粒物污染过程分析[J].云南大学学报(自然科学版),2021,43(01):90-100.
- [5]李宝鑫,任磊,朱雨薇,等.瓦里关本底站大气颗粒物变化特征和来源分析[J].环境化学,2025,44(05):1757-1767.

作者简介:

李维文(2000--),男,汉族,云南昆明人,本科,研究方向:环境科学。