

2025年湖州市空气质量变化特征及冬季一次典型污染过程分析

鲍孟盈^{1*}, 邱璟怡², 常秉松^{1#}, 尹浩¹

¹浙江省湖州市气象局, 浙江 湖州

²浙江省舟山市气象局, 浙江 舟山

收稿日期: 2026年7月10日; 录用日期: 2026年8月18日; 发布日期: 2026年8月27日

摘要

本研究基于地面气象和空气质量监测数据, 结合多源垂直遥感探测资料, 分析了2025年湖州市空气质量变化特征, 并针对冬季典型污染天气过程, 对其气象成因进行深入探讨。湖州市空气质量呈现显著的季节性变化特征, 臭氧和颗粒物是影响空气质量达标的关键因子, 春末至初秋主要以臭氧为首要污染物, 而秋冬季节则主要受颗粒物影响。分析2025年12月16~19日的一次典型PM_{2.5}污染过程, 结果表明, 弱冷空气配合静稳、高湿及逆温等不利气象条件是此次污染过程形成的关键驱动因子。天气形势分析和垂直遥感探测资料结果显示: 弱冷空气将北方污染物不断输送至湖州, 后受均压场控制, 颗粒物滞留在湖州地区, 在近地面高湿层和逆温层的作用下, 促进了颗粒物的吸湿增长与垂直湍流输送, 导致PM_{2.5}浓度的持续增长。

关键词

空气质量, PM_{2.5}, 湖州市, 垂直遥感探测, 气象成因

Analysis of the Air Quality Variation Characteristics and a Typical Winter Pollution Episode in Huzhou City in 2025

Mengying Bao^{1*}, Jingyi Qiu², Bingsong Chang^{1#}, Hao Yin¹

¹Huzhou Meteorological Bureau, Huzhou Zhejiang

²Zhoushan Meteorological Bureau, Zhoushan Zhejiang

Received: July 10, 2026; accepted: August 18, 2026; published: August 27, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 鲍孟盈, 邱璟怡, 常秉松, 尹浩. 2025年湖州市空气质量变化特征及冬季一次典型污染过程分析[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(8): 1421-1430. DOI: 10.12677/aep.2026.168143

Abstract

Based on ground-based meteorological and air quality monitoring data, combined with multi-source vertical remote sensing observations, the air quality variation characteristics in Huzhou City in 2025 and the meteorological causes of a typical winter pollution episode were analyzed in this study. The air quality in Huzhou exhibited significant seasonal variations, ozone and particulate matters were found to be the key factors affecting air quality. From late spring to early autumn, ozone was the primary pollutant, whereas particulate matters dominated during the autumn and winter seasons. Analysis of a typical PM_{2.5} pollution episode from December 16 to 19, 2025 revealed that weak cold air combined with adverse meteorological conditions, including static stability, high humidity, and temperature inversions, were the key driving factors for this pollution event. The synoptic situation and vertical remote sensing analysis results showed that the polluted air masses were transported from northern regions to Huzhou during the cold air period. Subsequently, under the control of a pressure-equalizing field, the particulate matters accumulated in Huzhou. The hygroscopic growth and vertical turbulent transport of particulate matters were promoted due to the high-humidity in the near-surface layer and the existence of the inversion layer, leading to the continuous increase of the PM_{2.5} concentrations.

Keywords

Air Quality, PM_{2.5}, Huzhou City, Vertical Remote Sensing, Meteorological Causes

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市化进程推进,污染物排放量加大,我国东部地区空气污染事件频发。尤其是冬季,以PM_{2.5}为主的重污染天气对生态系统、人体健康造成显著危害,同时可引发人体呼吸系统阻塞或炎症,严重时甚至导致癌变,引起社会各界的高度关注[1] [2]。PM_{2.5}在大气中的停留时间较长,可通过远距离传输呈现区域性污染特征,影响区域甚至全球大气辐射平衡,导致气候变化[3]。

气象条件是大气污染物累积和重污染过程形成的重要影响因素之一[4]。气象条件可以通过各种机制影响污染物在大气中的传输、扩散和沉降等过程,不利的气象条件会进一步加重污染[5]。王云昕等[6]发现秋冬季节,冷空气南下带来的污染物区域输送,配合冷空气过境后本地静稳大气条件和边界层高度降低,是导致长三角地区冬季重污染天气过程形成的重要机理。浩翔等[7]研究发现高压、低温、静小风是导致杭州冬季典型污染过程的主要气象因素。陆明媚等[8]研究发现长三角地区大气污染物浓度受近地面逆温影响显著,逆温抑制污染物扩散,是空气质量下降的主导驱动因素。

传统的地面监测站点虽能精准捕捉污染物浓度的时空变化,但难以揭示污染物在垂直方向上的输送路径、混合层高度演变以及污染物与气象要素的三维相互作用机制。近年来,风廓线雷达、微波辐射计及激光气溶胶雷达等地基垂直遥感观测技术的发展,为解析重污染过程中大气边界层结构演变及污染物垂直分布特征提供了强有力的手段[9]。蒋永成[10]等研究厦门地区颗粒物污染过程,发现边界层内较厚的弱风层以及低层的风向转变特征,明显抑制了边界层内污染物的扩散。严韬等[11]研究发现强烈的垂直风切变引发湍流,致使大气残留层的高浓度臭氧气团随冷空气大风下沉侵入地面,是导致闽南地区一次夜间臭氧污染过程的重要原因。但目前关于新型垂直遥感观测技术在大气污染中的应用研究仍然较少。

湖州地处长三角腹地,近年来秋冬季频繁发生持续性重污染天气过程。本研究利用多源垂直观测资料,结合地面气象和空气质量监测数据,对湖州地区 2025 年的空气质量变化特征进行分析,并针对 2025 年 12 月 16~19 日出现的一次重污染天气过程的气象成因进行深入探讨。

2. 资料与方法

2.1. 气象与空气质量观测资料

本研究所使用的空气质量观测数据来自中国环境监测总站,数据分辨率为 1 h。本研究采用仁皇山新区国控环保监测站点作为湖州地区代表站,表征湖州空气质量状况。地面气象数据采用浙江省气象局常规地面观测资料,高空气象数据采用 ERA5 再分析资料。

2.2. 垂直遥感探测资料

本研究所使用的垂直遥感探测资料来自浙江省气象局,包括风廓线雷达的逐小时各层风速、风向、垂直风等数据资料,微波辐射计逐小时气温、湿度等垂直廓线数据以及激光气溶胶雷达的气溶胶消光系数垂直廓线数据。

2.3. 静稳指数构建

大气静稳指数(Stable Weather Index, SWI)用于定量评估大气扩散条件,该指数越大,表明大气越稳定,越不利于污染物扩散。静稳天气的判别通常会考虑近地面层温度、气压、风速、湿度、逆温强度等气象要素,静小风的条件通常不利于大气污染物水平输送,较弱的 24 h 变温和变压所对应的天气形势较稳定,在没有较强的天气系统影响背景下较易形成静稳天气。低层高相对湿度有利于污染物的吸湿增长,但湿度过高产生降水不利于雾霾的形成。低层逆温层通常指示大气层结稳定,抑制污染物的垂直输送,利于霾天气的出现[12] [13]。本研究参照国家《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)¹,将 PM_{2.5} 的日平均浓度限值定为 75 μg m⁻³,PM_{2.5} 日均值小于或等于 75 μg m⁻³ 达到国家空气质量二级标准,大于 75 μg m⁻³ 则超标。本研究选取 2 m 相对湿度、日平均 10 m 风速、日平均海平面气压、24 小时变压、24 小时变温和大气温度层结(1000 hPa、925 hPa 与 850 hPa 层温度差)逐日气象要素,统计样本中所有污染日各气象条件在不同阈值范围的分布频率,根据统计结果,将频率分布集中的阈值范围平均划分成多段,将频率分布不集中的阈值范围归为一段,从而剔除极端值的影响。根据气象行业标准《空气污染扩散气象条件等级》(QX/T413-2018)²得到湖州地区影响静稳天气的不同气象因子对应不同阈值范围的分指数,分指数越高,表示该因子在此阈值范围时对静稳天气形成的作用越大。最后将 6 个气象因子的分指数求和,即得到 SWI [12] [14]。

分析全部样本,得到每个气象因子在不同阈值范围内的权重,即静稳天气分指数,该值越大表明污染天气出现概率越高,分指数具体计算方法见式(1)。

$$K_{in} = \frac{\frac{a_{in}}{a_{in} + b_{in}}}{\frac{a}{a + b}} \quad (1)$$

式中, K_{in} 为变量 i 在区间 n 的分指数, a_{in} 和 b_{in} 分别为变量 i 在区间 n 的条件下污染天气和非污染天气出现次数, a 和 b 分别为污染天气和非污染天气出现总次数。湖州市静稳天气指数构建见表 1。

¹<https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhjbh/dqhjlzbz/201203/W020250407403788086276.pdf>

²<http://www.cmastd.cn/standardView.aspx?id=2875>

Table 1. Establishment meteorological parameters, threshold value and sub-indices of stable weather index in Huzhou
表 1. 湖州市静稳天气指数构建所选气象因子、阈值范围及其对应分指数

2 m 相对湿度/%	分指数	10 m 风速/ m s ⁻¹	分指数	海平面气压/ hPa	分指数	24 h 变 压/hPa	分指数	24 h 变温/℃	分指数	逆温层	分指 数
<40	1.04	0~2	1.37	980~990	0.26	<-5	1.41	<-3	0.66	有逆温	1.28
40~50	1.60	2~3	1.28	990~995	0.48	-5~-3	1.49	-3~-2	0.99		
50~60	1.22	3~4	1.16	995~1000	0.75	-3~-1	0.94	-2~-1	0.65		
60~70	0.94	4~5	0.70	1000~1005	1.24	-1~1	0.72	-1~0	1.00		
70~80	1.20	5~6	0.61	1005~1010	1.38	1~3	1.19	0~1	0.87	无逆温	0.90
80~90	0.75	≥6	0.43	1010~1015	1.76	3~5	1.03	1~2	1.18		
≥90	0.60			≥1015	1.09	5~7	0.77	2~3	1.22		
						≥7	0.51	3~4	1.45		
								≥4	1.45		

3. 结果与讨论

3.1. 空气质量变化特征

3.1.1. 首要污染物特征

2025 年湖州整体空气质量以优良等级为主，臭氧(O₃)和颗粒物是影响空气质量的主要驱动因子。PM_{2.5}、PM₁₀ 全年优良率分别为 95.6%和 98.6%，O₃ 虽整体以优良等级为主，但轻度污染天数相对突出(表 2)。从首要污染物占比来看，O₃ 是影响湖州市空气质量达标的主要污染物，同时 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 对湖州市环境空气质量影响较大。2025 年湖州市以 O₃、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 为首要污染物的天数分别为 200 天、53 天和 19 天，其中以 O₃ 和 PM_{2.5} 为首要污染物的天数占比分别达 55%和 15% (表 3)。

Table 2. Statistics of AQI and different pollution levels of PM_{2.5}, PM₁₀ and O₃ in Huzhou in 2025
表 2. 2025 年湖州 AQI 及 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃ 不同污染等级统计

	优	良	轻度污染	中度污染
AQI	69	194	96	4
PM _{2.5}	242	105	15	1
PM ₁₀	207	150	3	2
O ₃	135	148	79	1

Table 3. Statistics on the number of days with primary pollutants in Huzhou in 2025
表 3. 2025 年湖州首要污染物天数统计

首要污染物	天数
O ₃	200
PM _{2.5}	53
PM ₁₀	19
NO ₂	16
NO ₂ , PM _{2.5}	4
PM ₁₀ , PM _{2.5}	2

3.1.2. 季节变化特征

2025 年湖州市空气质量呈现出显著的季节差异(图 1)。O₃ 浓度在春末至初秋(4~9 月)明显偏高, 与 NO₂ 浓度呈反向波动, 体现了光化学污染的典型特征。PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度在秋冬季节显著升高, 峰值分别达到 127 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和 284 $\mu\text{g m}^{-3}$, 出现在 1 月 21 日和 11 月 27 日, 反映出不利扩散条件下的颗粒物累积, 夏季则整体维持在较低水平。AQI 的季节响应在冬季受颗粒物驱动, 在春末至初秋则主要由 O₃ 主导, 轻度及以上污染天主要集中在冬季颗粒物高发期和春夏臭氧污染期。AQI 达“优”天主要出现在夏季(6~8 月), 为 29 天, 秋季(9~11 月)和冬季(12~2 月)达“优”天分别为 17 和 16 天, 主要集中在夏季降水期和秋冬季节冷空气活动时段。

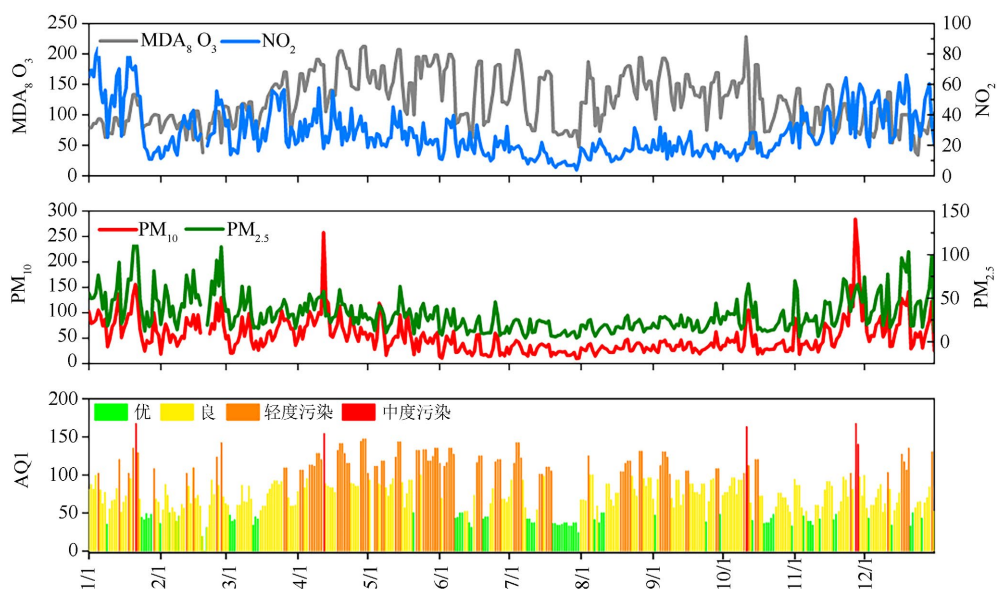


Figure 1. The daily changes of air quality and major pollutants in Huzhou in 2025

图 1. 2025 年湖州空气质量及主要污染物逐日变化

3.2. 污染过程分析

3.2.1. 污染过程

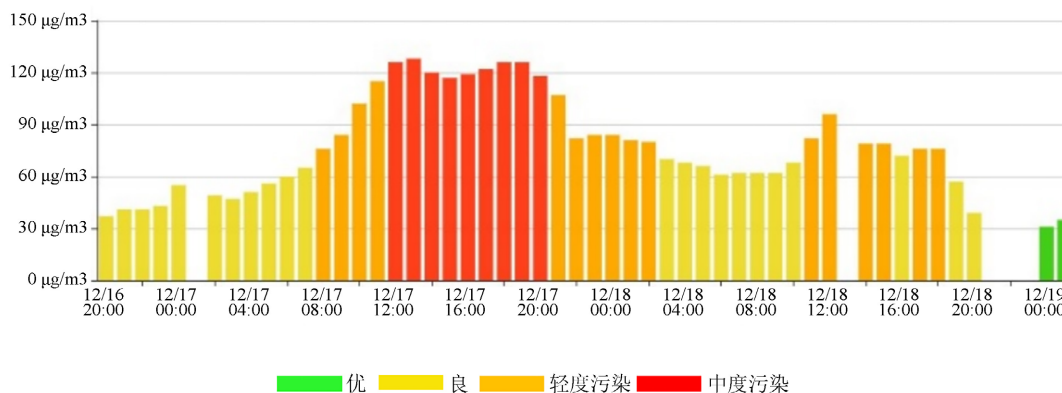


Figure 2. Hourly variation of PM_{2.5} concentration in Huzhou from 20:00 on December 16, 2025 to 08:00 on December 19, 2025

图 2. 2025 年 12 月 16 日 20 时~19 日 08 时湖州 PM_{2.5} 浓度逐小时变化图

2025 年 12 月 16~19 日, 湖州经历了一次典型的冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程(图 2)。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度经历了“累积 - 爆发 - 清除”三个阶段。从 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据中可以看出, 16 日夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈缓慢上升趋势, 17 日 08 时起 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度急剧升高, 17 日 10 至 21 时, $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度持续维持在 $100\ \mu\text{g m}^{-3}$ 以上, 峰值达 $128\ \mu\text{g m}^{-3}$, 出现在 17 日 13 时, 达“中度污染”水平, 20 时以后缓慢下降, 但整体仍然维持在较高水平。18 日白天 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度再次经历上升阶段, 至 19 日凌晨 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 $30\ \mu\text{g m}^{-3}$ 以下, 达到“优”水平。

3.2.2. 天气形势和静稳条件分析

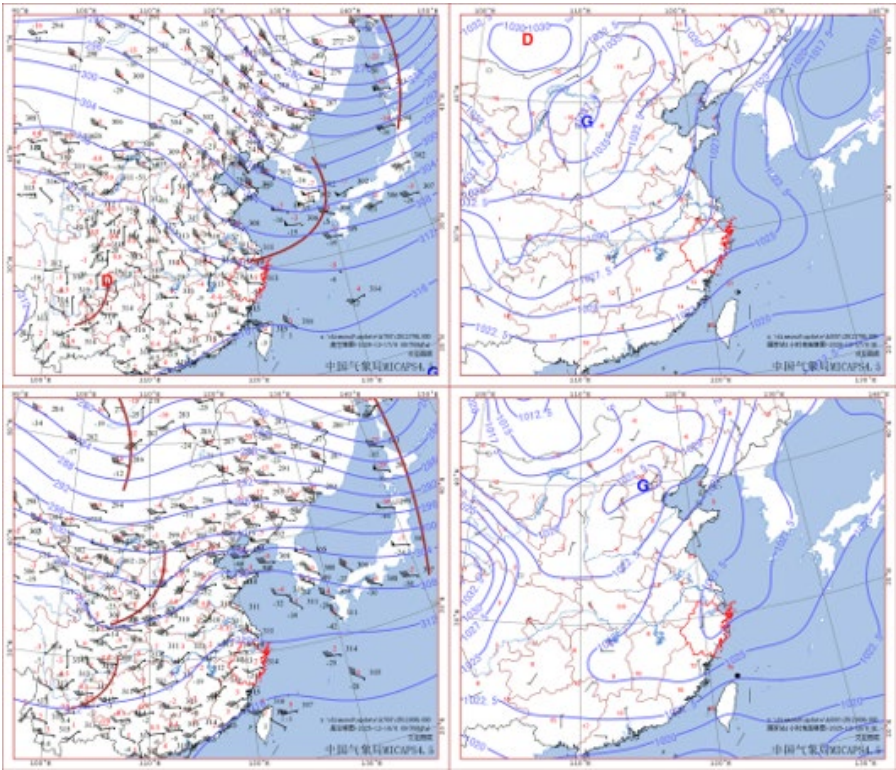


Figure 3. The 700 hPa situation map and ground filling map at 08:00 on December 17th and 08:00 on December 18th, 2025

图 3. 2025 年 12 月 17 日 08 时、18 日 08 时 700 hPa 形势图和地面填图

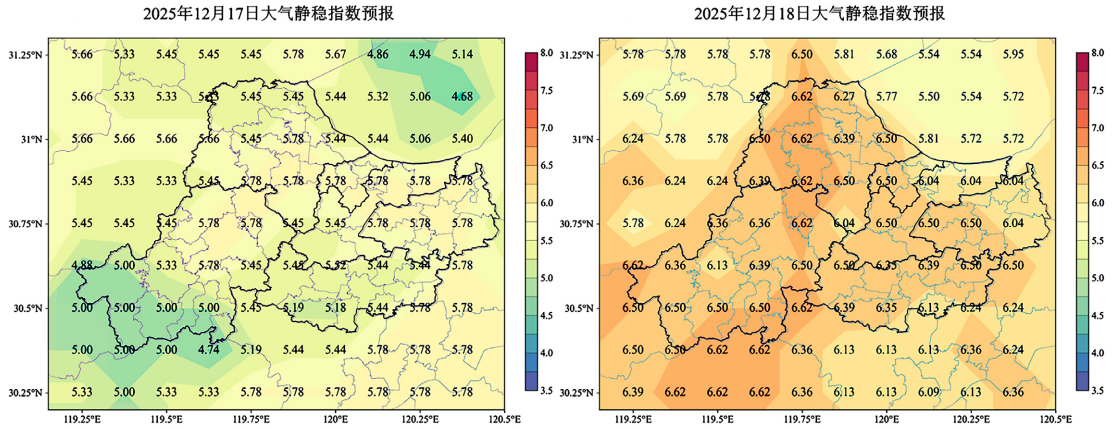


Figure 4. The stability weather index on December 17th and 18th, 2025

图 4. 2025 年 12 月 17 日和 18 日大气静稳指数

17日湖州受弱冷空气影响,近地面以偏北气流为主,气压梯度不强,中层700 hPa存在下滑槽,湖州处于槽后西北气流中,风力较弱,导致冷空气势力整体较弱,将华北冷气团缓慢扩散式输送至本地。18日湖州转高压后部东南气流影响,大气处于均压场,700 hPa转西南气流,处于暖湿气流控制区,气温回升(图3)。通过计算得到大气静稳指数(SWI),结果显示,17日湖州SWI在5.8左右,18日在6.5左右,表明17日空气污染更有可能来自北方污染气团的输送,18日静稳指数增加,大气扩散条件转差,导致颗粒物的滞留和累积增长(图4)[12]。

3.2.3. 风廓线雷达及微波辐射计产品分析

湖州站风廓线雷达产品(图5)显示:受弱冷空气影响,17日近地面为偏北风,受弱冷空气影响,11至16时风速增大至 4 m s^{-1} 以上,有利于北方污染气团向南输送。垂直运动上,12至15时2 km以下以弱上升运动为主,13至15时在1 km处,上升运动达到最强,有利于颗粒物在垂直方向上的湍流输送,此时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到最大。微波辐射计温湿廓线产品(图6)显示:17日11至14时,1 km以下存在高湿层,0~0.5 km相对湿度随高度迅速增大至90%以上,颗粒物吸湿增长效应增强,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度居高不下。高相对湿度条件是长三角秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长的关键气象影响因素,高湿环境下会导致颗粒物吸湿增长效应,同时促进液态粒子转化为二次气溶胶,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度快速上升。已有研究表明,当相对湿度持续高于70%~75%时,气溶胶液态水含量显著上升,气-粒转化效率大幅提高,在静稳、弱扩散条件下极易触发污染爆发[15]。长三角城市观测表明,重污染阶段高湿环境下二次无机离子对 $\text{PM}_{2.5}$ 增长贡献显著,吸湿增长与液相二次转化存在协同放大作用,是局地污染爆发不可忽视的化学机制[16]。

18日近地面转东南风,1 km以上为西南风,2 km以下以上升运动为主,中午11时以后上升运动呈增强趋势。同时,从温湿度垂直廓线来看,17日20时至18日14时850 hPa附近一直存在一层浅薄逆温层,配合近地面高湿层,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 吸湿增长并通过湍流向上输送,并维持在逆温层下,持续累积增长。

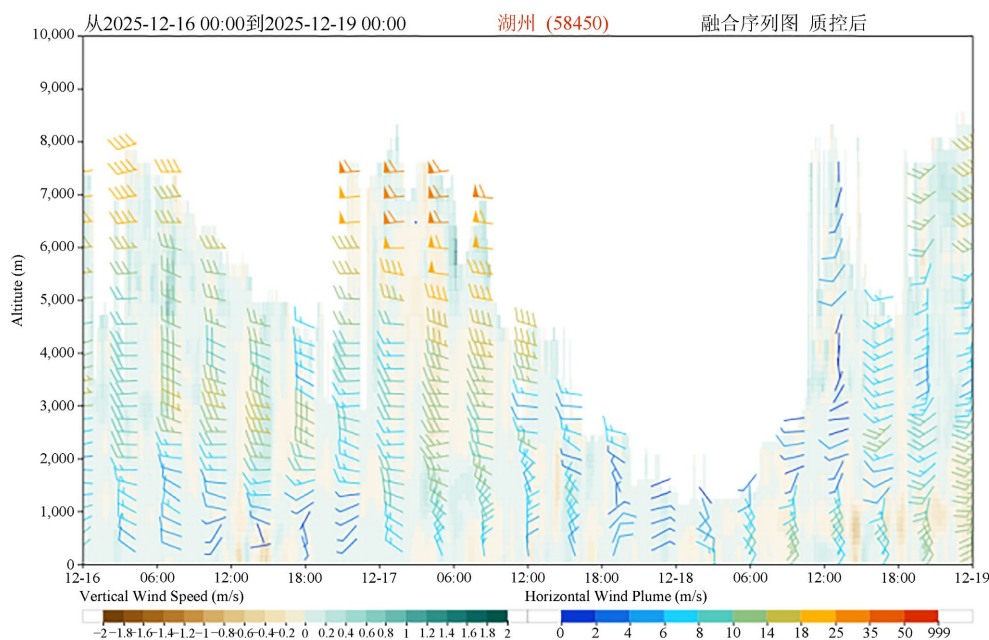


Figure 5. Wind profile radar products in Huzhou
图5. 湖州站风廓线雷达产品

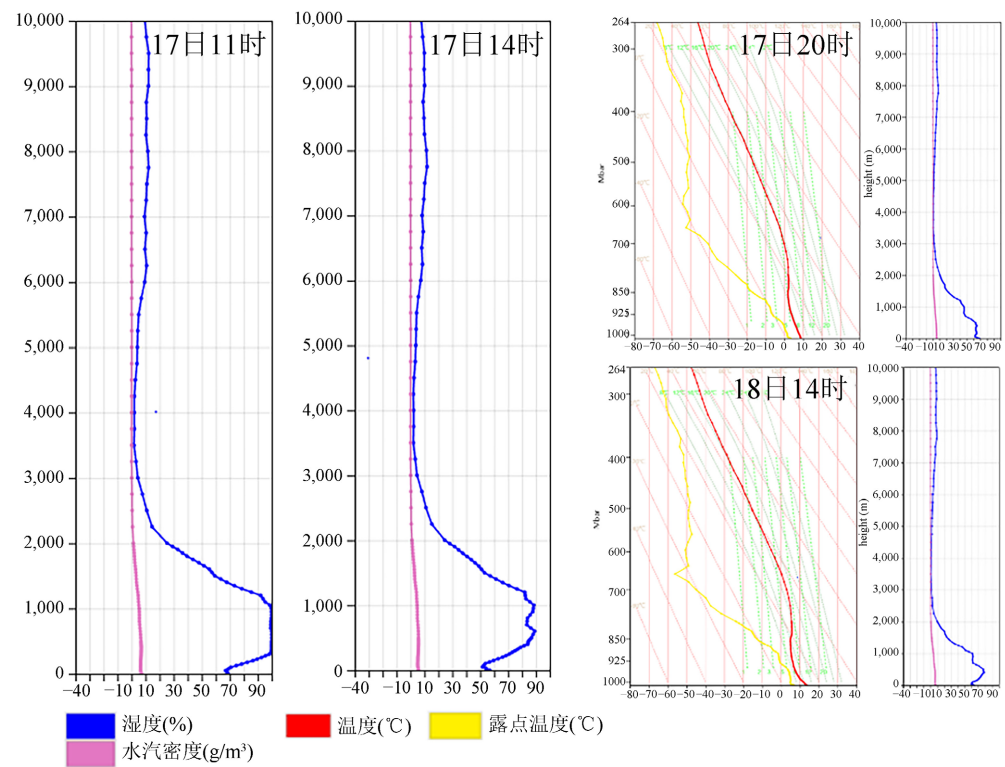


Figure 6. Temperature and humidity profile products from microwave radiometer in Huzhou
图 6. 湖州站微波辐射计温湿廓线产品

3.2.4. 激光气溶胶雷达产品分析

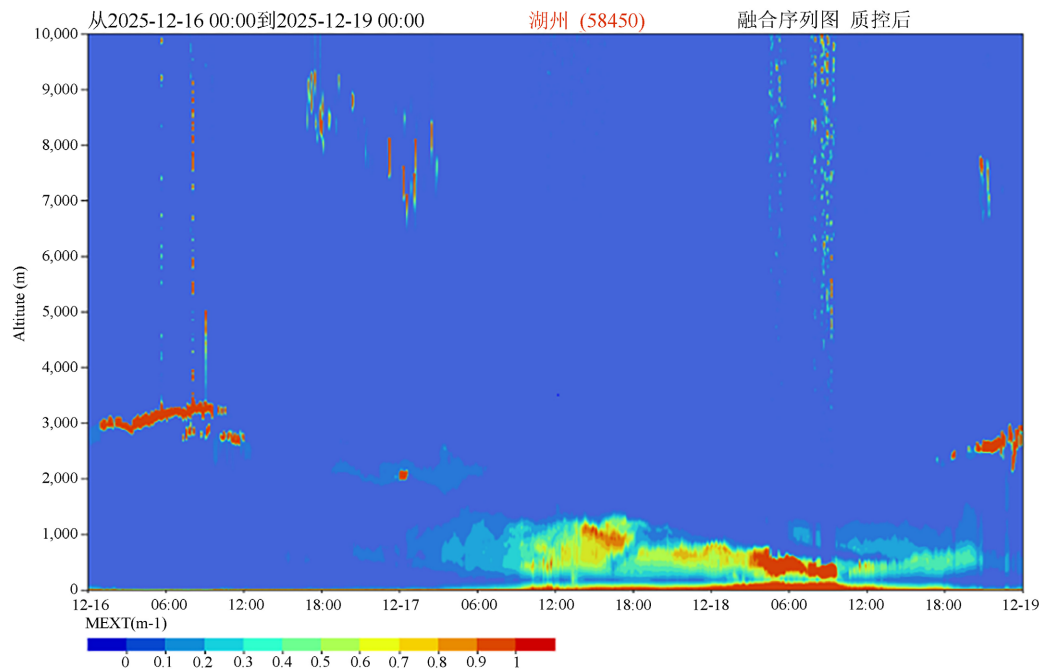


Figure 7. Extinction coefficient of laser aerosol radar in Huzhou
图 7. 湖州站激光气溶胶雷达消光系数

从湖州站激光气溶胶雷达产品(图 7)中可以看出, 17 日凌晨, 2 km 左右出现高浓度气溶胶, 而后在 17 日白天, 向低层扩散, 并维持在 1 km 以下。17 日 6 时至 18 时, 消光系数从 0.2 m^{-1} 上升至 1 m^{-1} , 下午时段气溶胶层达到最高(1.4 km 左右), 说明 17 日细颗粒物污染主要来自北方污染气团输送, 由于 17 日风力较大, 颗粒物到达近地面后又在近地面层通过垂直湍流向上输送至 1 km 处。结合前文垂直廓线可见高湿气层与气溶胶层高度重合, 指示高湿条件下二次气溶胶生成对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度爆发性增长的潜在贡献。

18 日大气静稳, 同时存在逆温层, 不利于污染物的扩散, 气溶胶层维持在更低层的大气中(0.5 km 以下)。

3.3. 湖州市空气污染防控对策讨论

长三角秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染普遍发生在静稳、高湿、低层逆温的气象背景下, 南京、上海、苏州、杭州等地研究表明, 区域污染具有同步爆发特征, 区域输送配合局地不利气象条件, 再叠加本地排放是触发污染爆发增长的关键机制之一[17]-[19]。湖州地处长三角区域, 大气污染成因不仅包括本地静稳天气下的内源积累, 更容易受到北方系统性污染气团南下导致的外源输送影响。两者内外叠加, 是导致湖州地区冬季在冷空气影响下出现持续轻度以上污染天气的主因。因此, 必须制定更具针对性的强化策略。

一是精准应对“内源积累”: 打破本地不利扩散条件。湖州冬季常受均压场、逆温层控制, 大气边界层高度低, 扩散能力差, 因此本地源的减排是抵消扩散能力下降的关键。建议首先实施“削峰”应急减排: 在预测到将持续出现静稳、高湿天气时, 提前启动更严格的本地强化减排措施。逆温最强时段, 对工业企业(特别是 VOC_s 和 NO_x 排放企业)、重型柴油车活动实施特别管控。

二是主动防御“外源输送”: 建立区域协同预报预警机制。冬季北方污染气团随冷空气南下, 是南方冬季突发性污染的“扳机”。必须建立“提前预警、区域联动”的机制。建立跨区域污染传输预警联盟: 与上游省份及城市建立常态化的空气质量预测预报联合会商机制。预警期在可能受影响的区域, 提前加大施工工地、道路保洁抑尘力度, 严控本地扬尘, 避免内外叠加。传输主导时段, 对本地重点排放源采取限产或错峰措施, 以降低本地排放与外来污染的“共振”效应。

4. 结论

(1) 湖州市空气质量具有明显的季节差异, 春夏季节以臭氧污染为主, 秋冬季节以颗粒物污染为主。

(2) 2025 年 12 月 16~19 日湖州经历了一次典型污染过程, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现出明显的“累积-爆发-清除”三个阶段。16 至 17 日以弱冷空气引导的外源输送为主, 18 至 19 日以均压场与逆温层导致的本地累积为主。

(3) 垂直遥感观测资料揭示了 17 日污染物在 1 km 以下的垂直湍流输送与混合过程; 而后 18 日近地面高湿层与 850 hPa 逆温层促进颗粒物吸湿增长, 在近地层累积, 对此次污染过程持续起到了关键作用。

(4) 针对湖州地区冬季污染特征, 应实施“精准应对内源积累”与“主动防御外源输送”并重的管控策略, 通过实施“削峰”应急减排、建立区域协同预报预警机制等措施, 有效缓解重污染天气影响。

致 谢

在此感谢尹浩等对本研究的大纲设计与指导; 邱璟怡、常秉松等对本研究的技术支持。

基金项目

湖州市气象局指令性项目(hzqx202601)。

参考文献

- [1] Guan, Y., Xiao, Y., Chu, C., Zhang, N. and Yu, L. (2022) Trends and Characteristics of Ozone and Nitrogen Dioxide Related Health Impacts in Chinese Cities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **241**, Article 113808. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113808>
- [2] 蔡清楠, 车扬子, 孙凌瑜, 等. 珠三角地区 PM_{2.5} 浓度估算及其健康效应评估[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8977-8990.
- [3] 沈利娟, 李莉, 宋刘明, 等. 长三角地区沿海城市冬季一次持续霾污染过程中 PM_{2.5} 化学组分、来源解析和健康风险评估[J]. 地球与环境, 54(3): 437-450.
- [4] 许丽人, 张硕, 贺婧, 等. 2025. 基于 PM_{2.5} 污染-气象综合指数的中国中东部冬季 PM_{2.5} 污染气象条件分析[J]. 气候与环境研究, 30(5): 578-594.
- [5] 史旭荣, 逐世泽, 易爱华, 等. 全国 2018-2019 年秋冬季气象条件变化对 PM_{2.5} 影响研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 2785-2793.
- [6] 王云昕, 曹钰, 马井会. 长三角地区冬季一次重污染天气过程形成机理分析[J]. 气象科学, 2024, 44(5): 917-927.
- [7] 浩翔, 胡永亮, 张驰, 等. 2019-2020 年杭州市大气污染物特征及冬季一次典型污染过程分析[J]. 环境化学, 2025, 44(11): 4290-4308.
- [8] 陆明媚, 冯鑫媛, 张莹. 中国典型污染区域逆温特征及其对大气污染的影响[J]. 中国环境科学, 2026, 46(6): 2961-2974.
- [9] 茆佳佳, 季承荔, 陶法, 等. 地基遥感垂直观测业务技术及应用综述[J]. 气象科技进展, 2025, 15(2): 28-34.
- [10] 蒋永成, 张晗昀, 张伟, 等. 基于地基遥感资料的厦门市污染边界层特征分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 450-458.
- [11] 严韬, 孟德友, 林伟家等. 闽南地区一次夜间 O₃ 污染过程特征及垂直传输影响[J]. 生态环境学报, 2025, 34(6): 914-921.
- [12] 陈懿妮, 罗玲, 马昊, 等. 杭州市静稳天气指数构建及应用研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4461-4469.
- [13] 李佳, 黄毅, 程杰, 等. 荆州静稳天气综合指数构建及预报应用[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(S1): 55-59.
- [14] 张敏, 蔡子颖, 韩素芹. 天津静稳指数建立及在环境气象预报和评估中的应用[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4453-4460.
- [15] Jia, L., Xu, Y.F. and Duan, M.Z. (2023) Explosive Formation of Secondary Organic Aerosol Due to Aerosol-Fog Interactions. *Science of The Total Environment*, **866**, Article 161338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161338>
- [16] 崔晨, 王玉莹, 张睿, 等. 中国东部不同污染环境中气溶胶吸湿性的差异及其成因[J]. 大气科学学报, 2024, 47(4): 592-603.
- [17] 潘勇, 郑捷, 肖航. 长三角地区典型 PM_{2.5} 污染过程和跨区域传输对宁波污染贡献评估模拟[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 612-622.
- [18] 曹广翰, 曹天慧, 朱绍东, 等. 基于 CMAQ-ISAM 模型的长三角典型城市 PM_{2.5} 来源解析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 803-812.
- [19] 许岳香, 邵雅梅, 王楠, 等. 苏南地区一次冬季典型细颗粒物污染过程精准识别及来源解析: 以苏州高新区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(1): 32-40.