

曹梅,王斌,杨珍,等.雾和霾对西安市大气能见度影响对比分析[J].陕西气象,2026(2):87-96.

文章编号:1006-4354(2026)02-0087-10

# 雾和霾对西安市大气能见度影响对比分析

曹梅<sup>1,2</sup>,王斌<sup>3</sup>,杨珍<sup>1</sup>,孙涛<sup>1</sup>,马凌珊<sup>1</sup>,李博<sup>4</sup>

(1. 西安市气象局大气探测中心,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 陕西省气象局机关服务中心,西安 710014;

4. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

**摘要:**利用西安泾河站 2023 年 11 月 20 日—2024 年 2 月 7 日 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、大气能见度、相对湿度等连续观测数据,结合空气质量和逆温情况,对比分析此时间段内 5 次雾和霾过程差异,为西安市空气污染治理和预防提供依据。结果表明:(1)观测时段内能见度变化范围为 0.27~30.00 km,能见度不足 5.00 km 的比例为 20%;5 次雾和霾过程累计出现时间 180 h,其中霾过程和雾霾复合过程分别占出现时间的 43%和 42%。(2)雾与霾低能见度过程差异显著,霾由气溶胶导致,相对湿度中等,能见度变化平缓;雾过程中水汽起决定作用,能见度变化幅度大。两者发生前风速偏小,大气静稳,霾过程的低空逆温较雾过程明显。(3)雾霾复合过程中能见度变化幅度不大,相对湿度较雾过程小。空气质量指数(air quality index, AQI)均值表现为:雾<雾为主的雾霾复合<以霾为主的雾霾复合<霾;霾过程或以霾为主导的雾霾复合过程低层会出现持续逆温现象,而在雾过程或以雾为主导的雾霾复合过程中,只有短暂的低层逆温出现。

**关键词:**西安市;能见度;雾;霾

**中图分类号:**P472.2

**文献标识码:**A

西安是西北地区经济和文化中心,随着社会经济快速发展,能源消耗迅速增长,在不利的天气条件和特殊地理环境的共同影响下,多种污染物的积累更容易形成大气复合污染,导致能见度下降。研究表明<sup>[1]</sup>,雾和霾不是完全的自然现象,人为导致的气溶胶粒子有利于霾和雾的形成。大气在霾、轻雾、雾天气状况下的 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 质量浓度均与相对湿度有关。高相对湿度、低风速和主导风向不明显以及大气层结稳定是造成霾污染天气的主要气象因素<sup>[2-4]</sup>。大气层结稳定且近地层存在逆温,不利于污染物扩散,逆温层越强、高度越低、则污染物浓度越大,对能见度的影响也越明显<sup>[5-7]</sup>。滑申冰<sup>[8]</sup>等对华北地区重污染过程分析

表明雾霾过程期间,冷空气势力弱,风速较小,低层大气逆温加强。韩仙桃<sup>[9]</sup>等对 2020 年 1 月呼和浩特雾霾偏多现象分析表明静稳的大尺度环流背景是雾霾频发的关键因素,高湿度、逆温强度大、厚度小时会出现重度到严重污染。由此可见,在有利于雾和霾形成的天气条件下,低层的逆温和水汽条件对雾和霾的出现有直接影响<sup>[10-11]</sup>。然而,雾、霾天气影响因素多而复杂,目前关于西安市这两类天气出现时的气象要素特征对比分析研究较少,难以满足目前环境预报预警业务的需求。

2023 年入冬后至 2024 年春是西安市近年冬季雾霾高发期典型时段,多次雾和霾天气过程造成大气能见度降低,给人民生活带来不利影

**收稿日期:**2025-06-01

**作者简介:**曹梅(1979—),女,汉族,陕西米脂人,硕士,副高级工程师,主要从事综合气象探测工作。

**基金项目:**秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2024G-21;2022G-24);西安市气象局 2024—2025 年度自立科研项目重点项目(2024-04);国家自然科学基金项目(42475194)

响。本研究针对此时间段出现的雾和霾过程进行分析,进一步探讨雾和霾天气过程中,污染物和水汽对大气能见度的影响,旨在加深对雾和霾引发的低能见度天气的认识,为雾和霾天气的预报和污染治理提供有益参考。

## 1 观测数据与方法

### 1.1 资料说明

观测数据来源于西安市泾河国家基本气象站(以下简称泾河站,  $108^{\circ}58'E$ ,  $34^{\circ}26'N$ , 海拔 407.6 m),此站点位于西安北郊泾河工业园,站点周围空旷,地势较周围略高,周边 1.00 km 内无明显影响探测环境的高大建筑物,能够较好地代表西安市平均气象状况<sup>[12]</sup>。该研究时间选取为 2023 年 11 月 20 日—2024 年 2 月 7 日,用到的观测要素包括  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、能见度、相对湿度、风速等。以上数据除能见度用分钟数据外,其余数据均取自设备小时正值,能见度分钟数据可用于计算 10 min 滑动能见度,以便快速捕捉能见度的变化,其他要素小时数据可满足分析需求。风速为每小时的定时风速值,即 2 min 的平均风速。垂直方向的温度取自同址的地基微波辐射计; $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  观测使用安徽蓝盾有限公司的颗粒物观测设备;大气能见度观测使用华云升达前向散射能见度仪。微波辐射计为北方天穹生产的 MWP967KV 型多通道地基微波辐射计,时间分辨率为 2 min,微波辐射计反演的温度廓线与探空数据相关性达到 0.99,该设备具体参数及与探空数据差异可详见文献 13。以上所有设备均和泾河观测站同址,无距离差异的影响。

### 1.2 雾与霾判别方法

大气能见度是表征大气透明度的物理量,也是判断视程障碍现象发生的主要依据。在地面气象观测中,将 10 min 滑动能见度作为记录视程障碍的主要依据。地面业务规范中规定:10 min 滑动能见度是指当前分钟前 10 min 平均能见度的滑动平均值<sup>[14]</sup>。根据中国气象局探测中心编著的《地面气象观测业务技术规定实用手册》,一日内正点时次的现在天气现象为霾且持续 6 个(含)以上时次,则当日日数据连续天气现象记“霾”<sup>[15]</sup>,而轻雾或雾出现 1 min 也需要记录。

雾:以中国气象局规定的视程障碍能见度判别雾的标准,选取能见度  $<0.75$  km,相对湿度  $\geq 75.0\%$ ,视程障碍现象判定为“雾”为条件选定<sup>[16]</sup>。

霾:以视程障碍能见度观测数据为准,选取能见度  $<7.50$  km,相对湿度  $<75.0\%$ ,正点小时视程障碍现象判别为“霾”,根据中国气象局规定,正点小时视程障碍现象判别为“霾”并持续 6 h 时判别当日有“霾”<sup>[16]</sup>。

雾霾复合过程:对于能见度  $<7.50$  km 的低能见度天气过程, $PM_{2.5}$  浓度  $>150.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时有霾,相对湿度  $\geq 75.0\%$  时有雾(或轻雾),以上两个条件同时符合,并在视程障碍现象判别早中晚交替出现时判别为雾霾复合影响<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 观测时段内大气能见度变化特征

在不考虑因降水、浮尘、沙尘暴、扬沙造成的特殊低能见度天气状况下,基于持续时间、能见度阈值和污染物水平综合筛选,特别选取和分析了 5 次由雾、霾及雾霾复合影响导致的低能见度过程。表 1 总结了 5 次低能见度过程所对应的平均气象状况,5 次低能见度过程累计出现时间 180 h,其中霾过程和雾霾共存过程分别占出现时间的 43% 和 42%,单纯因雾造成的低能见度天气仅占 15%。由图 1 可知观测期间大气水平能见度波动范围 0.27~30.00 km,在此时段内水平能见度低于 10.00 km 的分钟能见度比例为 50%,不足 5.00 km 的比例为 20%(图 2)。图 3、图 4 记录过程 4,图 5、图 6 和图 7 记录过程 2 和过程 3,图 8、图 9 和图 10 记录过程 1 和过程 5 的气溶胶浓度、相对湿度、水平能见度、风速及垂直方向气象要素的变化情况。

### 2.2 持续性霾过程分析

图 3 是 2024 年 1 月 11 日 22 时—14 日 05 时(过程 4)出现的持续霾天气过程,其中两条虚线内所示的时段为台站设备记录的视程障碍出现时间(下同)。由图 3a 可知, $PM_{2.5}$  浓度在 1 月 10 日 19 时前处于较低水平, $PM_{2.5}$  浓度最低值为  $26.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,从 1 月 10 日 20 时后开始逐渐累积,升至  $100.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以上,最高增至  $254.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $PM_{10}$  浓度最低值为  $46.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,从 1 月 10 日 20 时

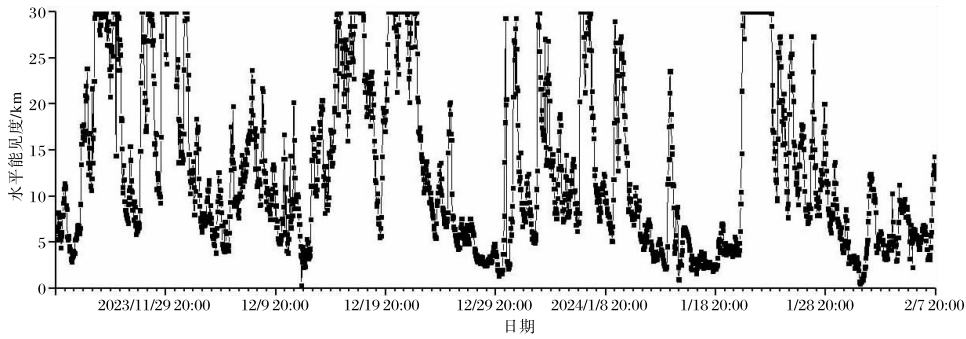


图1 2023年11月20日—2024年2月7日分钟能见度变化

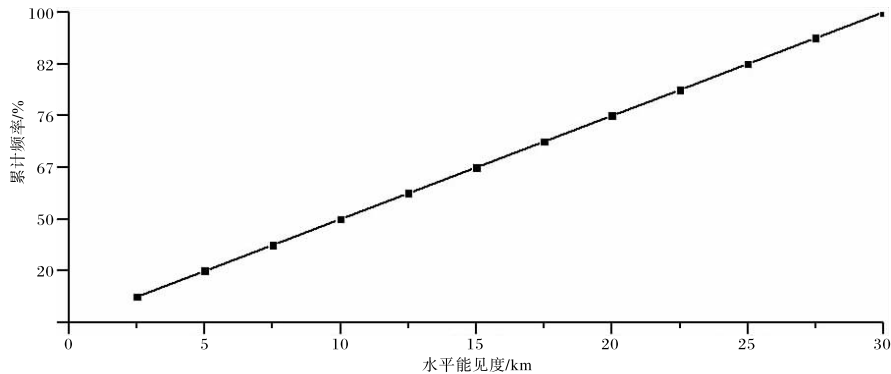


图2 2023年11月20日—2024年2月7日水平能见度频率分布

表1 低能见度过程期间平均气象要素情况

编号	起止时间	主导因素	持续时间 /h	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$\rho(\text{PM}_{10})$ / $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	能见度 /km	相对湿度 /%	空气质量指数 (AQI)
过程1	11月20日21— 21日20时	雾霾复合	24	150.3	176.1	4.67	61.7	155
过程2	12月4日22时— 5日14时	霾	17	158.1	151.2	4.98	63.2	142
过程3	12月11日23— 13日00时	雾	26	64.6	52.0	3.88	89.7	72
过程4	1月11日22时— 14日05时	霾	61	194.1	218.7	4.70	60.8	215
过程5	2月5日8时— 7日11时	雾霾复合	52	111.1	96.0	5.35	75.6	119

后浓度快速上升,最高增至  $362.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (红框所示)。受高浓度气溶胶影响,能见度下降。陕西省空气质量发布系统结果显示,1月11日—14日西安空气质量指数(air quality index, AQI)平均值为215,1月12日为中度污染,1月13日为重度污染。本次过程气溶胶浓度为5次过程中最高,霾特征最为显著。

由图3b可知,霾过程前的40 h风速明显变小,维持在  $1.5 \text{ m/s}$  左右,过程期间平均风速  $1.1 \text{ m/s}$ ,表现出显著的静稳状态。1月10日夜间至凌晨水平能见度在  $25.00 \text{ km}$  以上,1月10日白天迅速下降,从1月11日22时开始水平能见度低于  $6.00 \text{ km}$  并持续61 h,其间最低能见度为  $2.12 \text{ km}$  (蓝框所示),此时间正好对应  $\text{PM}_{2.5}$  浓

度的最高值。11—14日相对湿度较前几日有所增加,但仍维持在75.0%以下,其间污染物不断积累,14日PM<sub>2.5</sub>质量浓度达到最高值时能见度随之降到最低,可见能见度的降低主要是由气溶胶浓度增加造成的霾所致。1月14日10时开始有冷锋过境,定时风速迅速增大到4.0 m/s以上,对污染物起到扩散和清除作用,PM<sub>2.5</sub>浓度下降至38.9 μg/m<sup>3</sup>,水平能见度升高至23.00 km以上。

图4呈现了霾过程中高度4.00 km以下的大气垂直温度特征。由图可知,在霾过程发生前,10日夜间至11日凌晨,大气垂直方向存在弱逆温现象(如黑框圈出所示)。在霾过程发生期间,每日夜间至早晨,在1.50 km以下高度会出现明显且深厚的逆温现象,逆温持续时间较长。大气层结稳定且有逆温出现,地面风速较小,为霾的出现提供了有利条件。

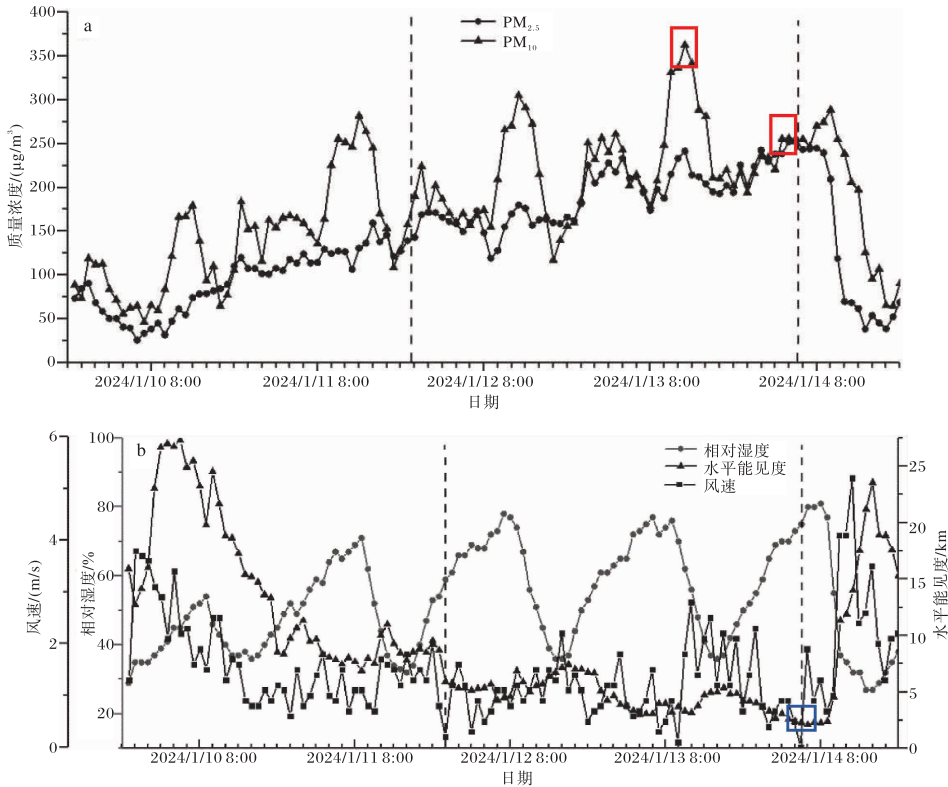


图3 2024年1月11日22时—14日05时过程期间PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>质量浓度(a)以及相对湿度、水平能见度、风速对比(b)(红框为气溶胶浓度最高值;蓝框为能见度最低值)

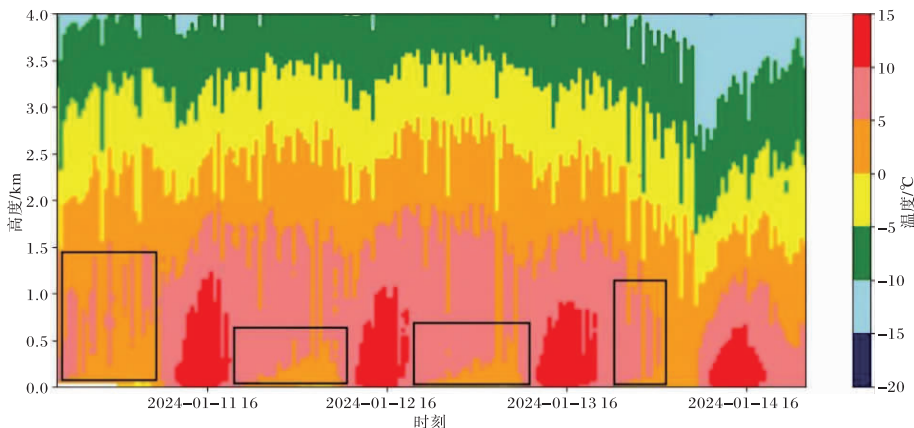


图4 2024年1月11日22时—14日05时过程期间温度垂直变化(黑框中为有逆温)

### 2.3 雾和霾过程特征对比分析

为进一步探讨雾和霾气象要素的差异,将2023年12月4日22时—5日14时的霾过程(过程2)和2023年12月11日23时—13日00时的雾(轻雾)过程(过程3)结合起来进行对比分析,图5和图6分别展示了过程2和过程3期间 $PM_{2.5}$ 浓度、 $PM_{10}$ 浓度及相对湿度、水平能见度对

比情况。由图5a可知,霾过程中 $PM_{2.5}$ 浓度和 $PM_{10}$ 浓度的平均值分别为 $158.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $151.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,AQI平均值142,12月4日中度污染,5日轻度污染。由图5b可知,雾(轻雾)过程中 $PM_{2.5}$ 浓度和 $PM_{10}$ 浓度的平均值分别为 $64.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $52.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。AQI平均值为72,空气质量级别为良。

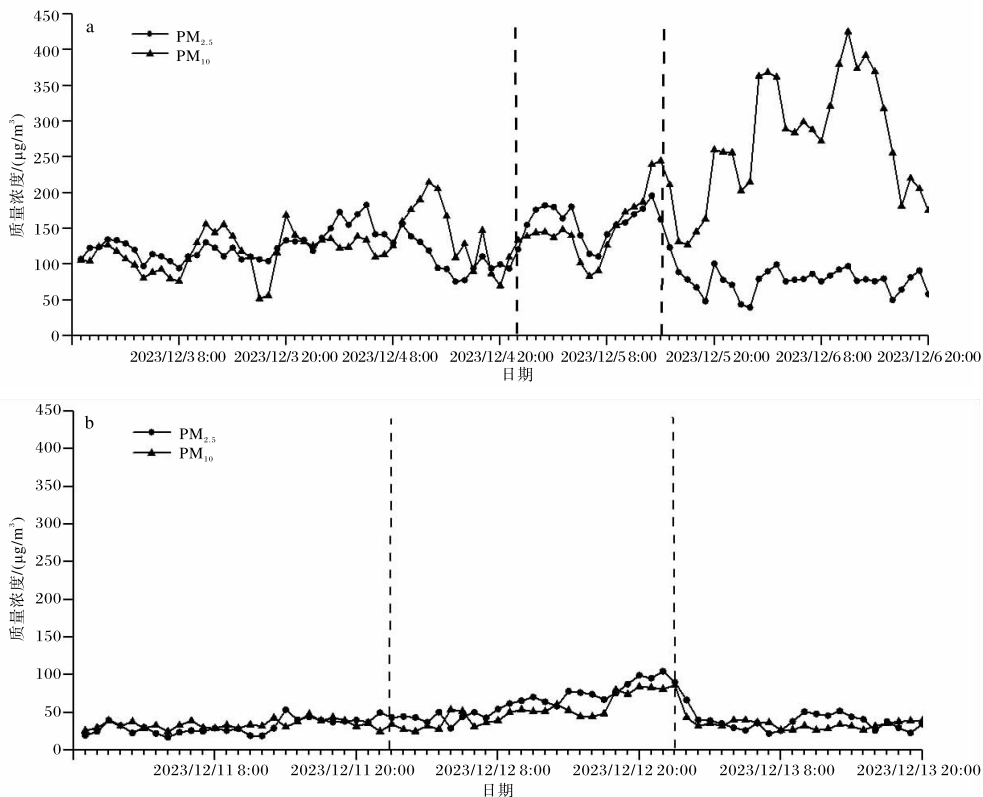


图5 过程2(a)和过程3(b)期间 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 质量浓度对比

从图6a和图6b可知,霾过程中相对湿度平均值为63.2%,水平能见度在3.00~6.00 km之间徘徊。雾(轻雾)过程中相对湿度平均值为89.7%,水平能见度在0.30~7.00 km之间振荡,变化幅度较霾过程大。霾过程发生前的49 h平均风速1.4 m/s,大气处于静稳状态,有利于气溶胶粒子的积累,过程中平均风速1.2 m/s,不利于气溶胶粒子的扩散,过程结束前2 h风速开始增大到2.0 m/s以上,过程结束后的15 h内平均风速3.3 m/s。过程3的雾(轻雾)过程发生前18 h风速开始变小,18 h的平均风速1.1 m/s,过程中平均风速3.2 m/s,因风速较大,本次雾(轻

雾)过程仅持续24 h。

综上所述可知,霾过程主要是由气溶胶粒子造成能见度的降低,相对湿度处在中等水平,最高未超过75.0%,且能见度变化平缓。在雾(轻雾)过程中水汽对能见度的降低起到了主导作用,因水汽的吸湿作用,气溶胶浓度增大,特别是 $PM_{2.5}$ 浓度增大明显,但其量级与霾过程相比仍处于极低水平。雾主要在夜间出现,日出后减弱,在雾(轻雾)过程中,因水汽粒子活跃,能见度跨度大。霾过程和雾(轻雾)在过程发生前地面风速均表现为持续偏小,大气处于静稳状态,为污染物和水汽的积聚创造有利条件。

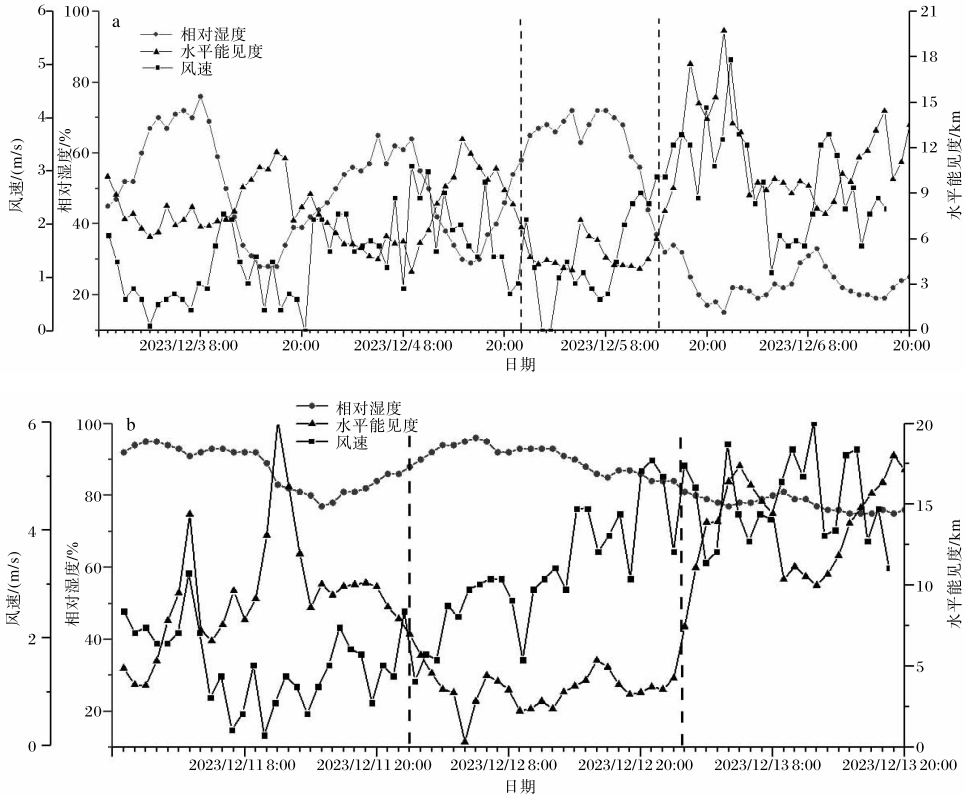


图6 过程2(a)和过程3(b)期间相对湿度、水平能见度、风速对比

图7a和图7b分别为过程2和过程3期间的温度垂直变化特征,对两次过程中高空逆温情况进行对比分析可知,过程2中,从夜间到早晨时段出现了持续的低层逆温现象(如黑框圈出所示)。过程3中只有短暂逆温现象,未观测到显著的逆温。再结合过程4可知,逆温对霾过程的发生起到关键作用。

#### 2.4 雾霾复合过程气象特征分析

选取2023年11月20日21时—21日20时(过程1)和2024年2月5日08时—7日11时(过程5)两次典型的雾霾复合过程进行特征分析,两次过程期间气象要素情况如图8和图9(见第94页)所示。从图8a可知,过程1期间 $PM_{2.5}$ 浓度和 $PM_{10}$ 浓度平均值分别为 $150.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $176.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最高值达到 $189.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $214.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,均出现在21日13时。AQI平均值为155,11月20日为轻度污染,21日为中度污染。从图8b可知,过程期间相对湿度平均值为61.7%,相对湿度范围为39.0%~88.0%,在霾持续的24 h中,相对湿度大于80.0%的时次仅3 h,大于70%的时次7 h,水平能见度范围为

2.90~6.80 km。发生前48 h平均风速1.2 m/s,地面风速小扩散条件差,过程中平均风速1.3 m/s。6—8时相对湿度最高值对应 $PM_{2.5}$ 浓度和 $PM_{10}$ 浓度的次高值,12—16时相对湿度低值区对应此过程气溶胶的最高值区,此次过程特征与上文中过程4接近。因此判断,此次雾霾复合过程的主因是由气溶胶引起的霾过程所致。

过程5期间(图9a,见第94页), $PM_{2.5}$ 浓度和 $PM_{10}$ 浓度平均值分别为 $111.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $96.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最高值为 $167.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $151.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,分别出现在2月7日的6时和3时。AQI平均值为119,2月5—7日均为轻度污染。过程开始前的12 h平均风速1.7 m/s,过程中平均风速仅为1.2 m/s。过程期间相对湿度平均值75.0%,相对湿度范围为55.0%~88.0%,在过程期间的52 h中,相对湿度大于80.0%的时次为20 h,大于70.0%的时次有42 h。水平能见度范围在2.30~7.40 km间变化,水平能见度与相对湿度之间有很好的反相关关系。以上特征与过程3的雾特征极为相似,由此判断,此次过程的主因是以水汽粒子为主,判别为以雾为主导的雾霾复合过程。

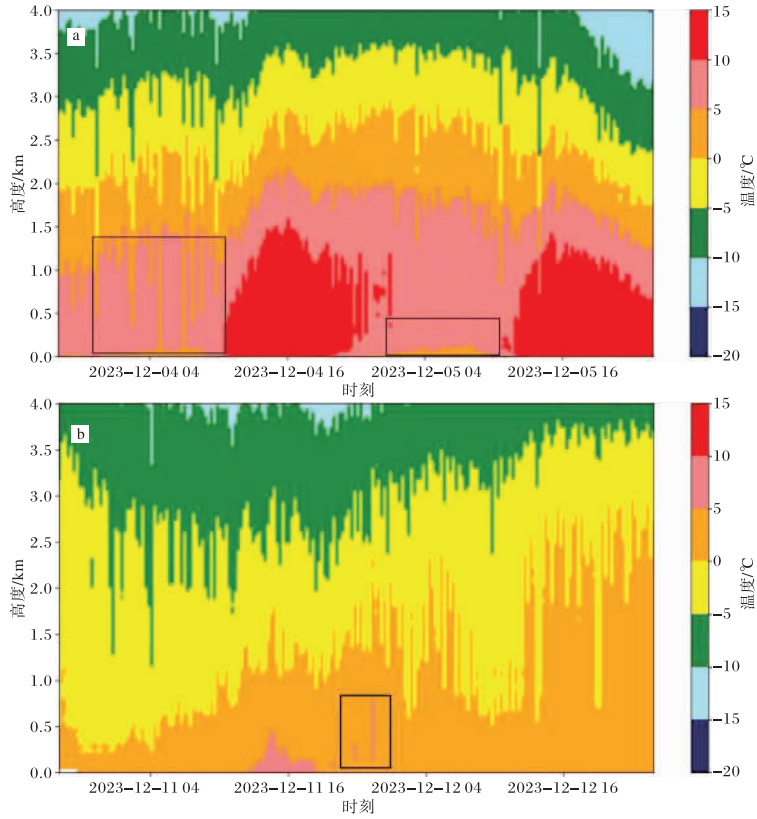


图 7 过程 2(a)和过程 3(b)期间温度垂直变化(黑框中为有逆温)

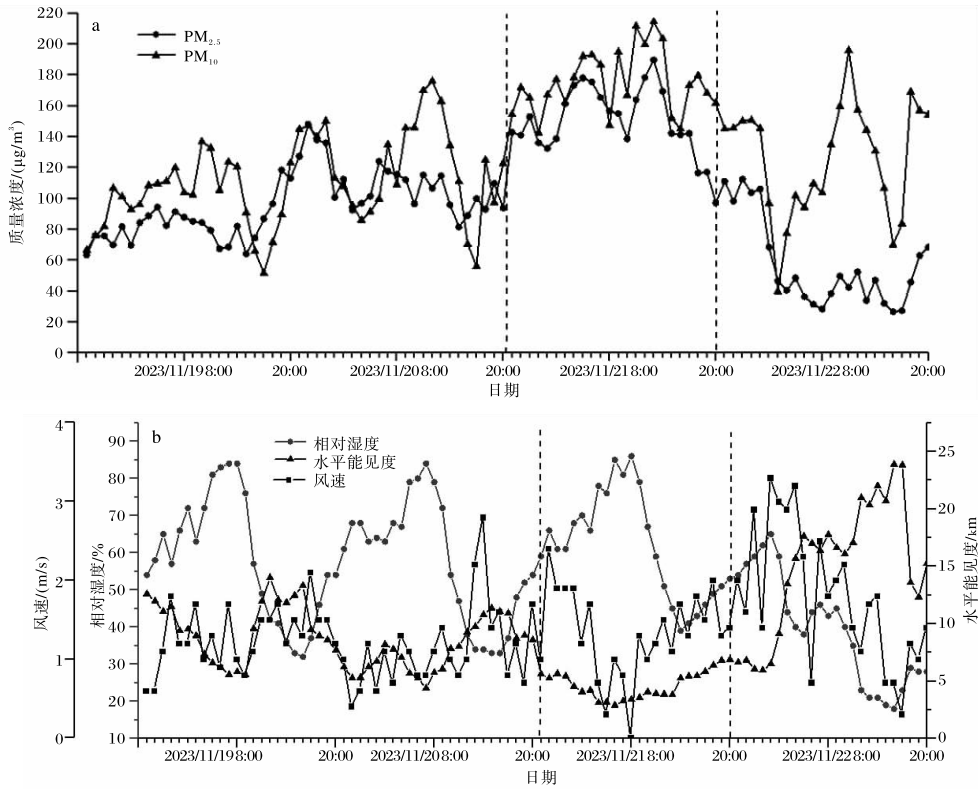


图 8 2023 年 11 月 20 日 21 时—21 日 20 时过程期间  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  质量浓度(a) 以及相对湿度、水平能见度、风速对比(b)

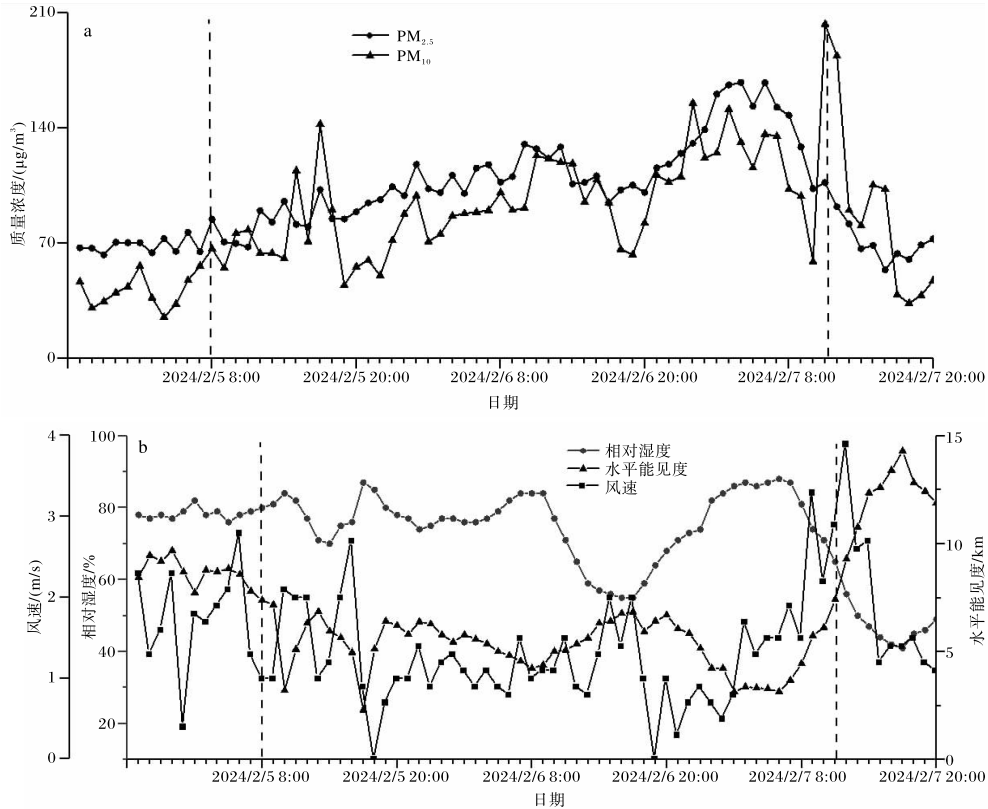


图9 2024年2月5日08时—7日11时过程期间 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 质量浓度(a,文见第92页)以及相对湿度、水平能见度、风速对比(b,文见第92页)

图10a和图10b为两次雾霾复合过程温度垂直变化特征,过程1的夜间至凌晨出现了显著且持续的低层逆温现象,而过程5期间只有短暂的逆温,未有持续性的逆温出现。在5次过程中,持续霾过程或以霾为主导的雾霾复合过程中低层均出现显著且持续的逆温现象,而在雾过程或以雾为主导的雾霾复合过程中,只有短暂的逆温现象,观测不到显著的逆温存在。

### 3 结论

从2023年11月20日—2024年2月7日西安市雾霾高发期时段内选取5次由雾和霾引起的典型低能见度过程,进行雾和霾气象条件对比分析,结论如下。

(1)观测时段内西安市出现多次雾霾导致的低能见度过程,能见度在此时段内变化范围为0.27~30.00 km,低于10.00 km的分钟能见度比例为50%,不足5.00 km的比例为20%。5次低能见度过程累计出现时间180 h,其中霾过程和雾霾共存过程分别占出现时间的43%和42%。

(2)持续霾过程中,能见度的下降主要由气溶胶导致, $PM_{2.5}$ 浓度达到最高值时能见度随之降到最低。霾过程前和过程中定时风速较小,有利于污染物的积累,1.50 km以下低层有显著而持续的逆温现象,为霾的出现提供有利条件。

(3)雾(轻雾)主导的低能见度过程与霾过程差异明显,霾过程主要是由气溶胶粒子造成能见度的降低,相对湿度处在中等水平,且能见度变化平缓。雾(轻雾)过程中水汽对能见度的降低起到了决定性作用,能见度变化幅度大。霾过程和雾(轻雾)过程前地面风速均持续偏小,大气静稳状态有利于污染物和水汽的积聚。

(4)雾霾复合过程导致的低能见度分为由霾主导的复合过程和由雾主导的复合过程,前者气溶胶浓度明显大于后者,后者相对湿度大于前者。AQI均值表现为:雾<以雾为主的雾霾复合<以霾为主的雾霾复合<霾。霾过程或以霾为主导的雾霾复合过程中低层均会出现持续逆温现象,而在雾过程或以雾为主导的雾霾复合过程中,只有

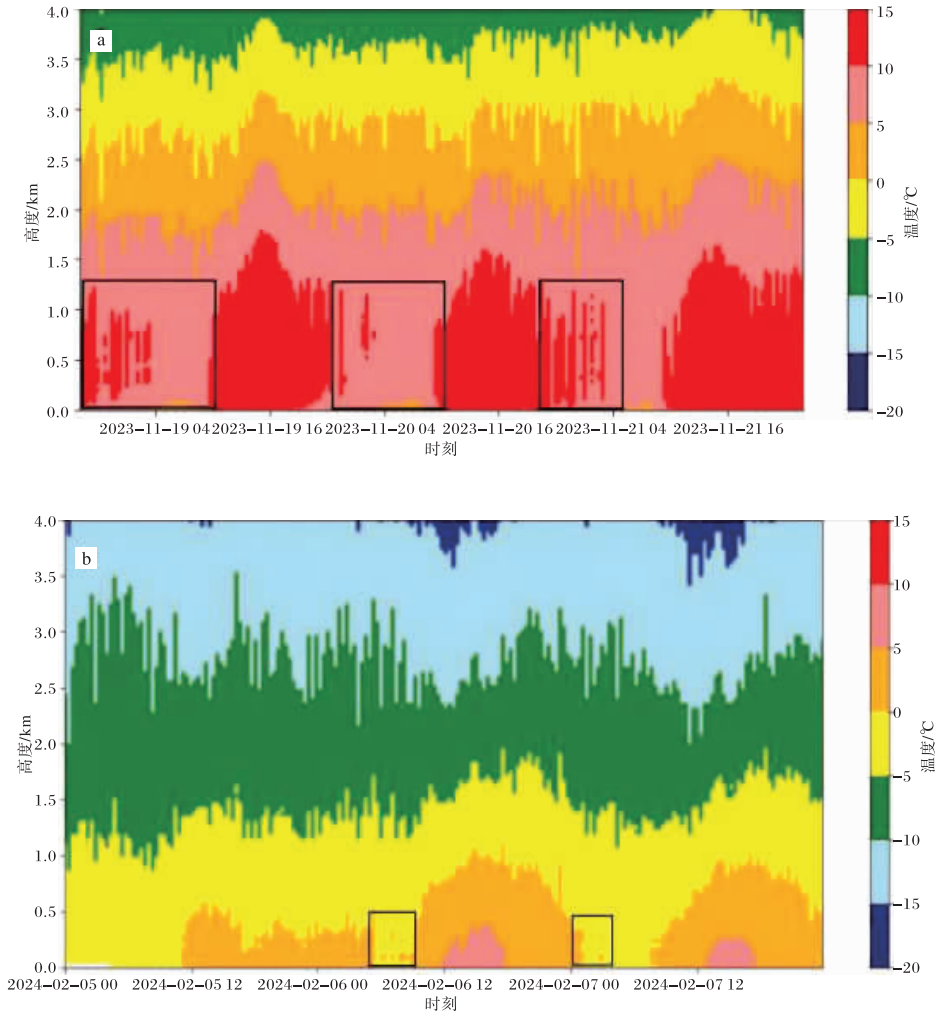


图 10 过程 1(a)和过程 5(b)期间温度垂直变化(黑框中为有逆温)

短暂的逆温现象出现。

#### 参考文献:

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾—霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报,2013,58(13):1178-1187.
- [2] 田小芳,梁栋,孙云. 雾霾天气  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  质量浓度及相对湿度特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,2024,41(5):56-58+62.
- [3] 梁俊宁,高敏,王珊. 西安市一次严重霾污染天气特征及气象条件分析[J]. 环境工程,2016,34(8):104-109.
- [4] 王晓春,吴珂,郁泰立,等. 昆山冬季一次持续性雾霾天气生消过程分析[J]. 环境监测与预警,2023,15(5):36-42.
- [5] 吴珂,包云轩,蔡敏,等. 苏州市一次重霾污染天气过程的数值模拟[J]. 气象科学,2019,39(1):104-116.
- [6] 姚爽,熊秋芬,姜晓飞,等. 北京一次雾霾天气的气象条件和污染物输送特征分析[J]. 气象科学,2024,44(5):928-935.
- [7] 马娜,杨思鹏,王界,等. 京津冀地区一次污染过程的星载-地基激光雷达联合观测分析[J]. 中国环境监测,2019,35(6):147-156.
- [8] 滑申冰,师华定,王堃,等. 2016—2017年冬季华北地区一次重污染过程的气象条件分析[J]. 气象与环境科学,2018,41(4):47-53.
- [9] 韩仙桃,佟彤,姜佳玉,等. 2020年1月呼和浩特市雾霾天气的气象成因分析[J]. 干旱气象,2022,40(2):275-283.
- [10] 李改琴,唐影,王聪,等. 濮阳一次持续性雾霾天气的阶段性特征和维持机制[J]. 气象与环境科学,2022,45(1):65-72.

- [11] 崔雅琴,张佃国,王洪,等. 2015年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析[J]. 大气科学, 2019,43(4):705-718.
- [12] 曹梅,杨珍,王斌. 西安城区与郊区风向风速差异分析[J]. 陕西气象,2016(2):19-23.
- [13] 曹梅,王斌,杨珍,等. 地基微波辐射计与探空数据对比分析[J]. 陕西气象,2021(5):47-54.
- [14] 中国气象局. 地面气象自动观测规范[M]. 北京:气象出版社,2020:23.
- [15] 中国气象局气象探测中心. 地面气象观测业务技术规范实用手册[M]. 北京:气象出版社,2016:14.
- [16] 中国气象局气象探测中心. 地面综合观测业务软件用户操作手册[M]. 北京:气象出版社,2020:295.
- [17] 张立,王玉龙,王媛. 基于地基微波辐射计观测的东营地区低能见度天气指示性分析[J]. 海洋气象学报, 2022,42(2):54-63.