

窦建虎,高山,刘一玮,等. 基于多源观测资料的西安一次罕见沙尘天气分析[J]. 陕西气象, 2026(2): 30-36.

文章编号: 1006-4354(2026)02-0030-07

基于多源观测资料的西安一次罕见沙尘天气分析

窦建虎¹,高山^{1,2},刘一玮^{1,2},孙涛¹,曹梅^{1,2}

(1. 西安市气象局,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)

摘要:利用西安泾河国家基本气象站气溶胶激光雷达数据、地基微波辐射计数据、颗粒物观测数据以及地面气象要素数据,分析了2024年2月17—19日西安地区一次罕见沙尘天气过程特征及其气象成因。结果表明:(1)此次沙尘天气可分为沙尘发生前期、增长期、维持期、清除期4个阶段,沙尘过程维持阶段PM₁₀质量浓度峰值达到2 838.5 μg/m³,PM_{2.5}质量浓度峰值达到608.2 μg/m³,PM_{2.5}质量浓度(C_{PM_{2.5}})与PM₁₀质量浓度(C_{PM₁₀})之比(C_{PM_{2.5}}/C_{PM₁₀})在0.2~0.5之间,污染物主要以PM₁₀为主。沙尘维持阶段,地面气压升高,相对湿度下降至30.0%以下,定时风速在2.0 m/s以上,有利于沙尘的输送。(2)气溶胶激光雷达退偏比垂直分布与地面C_{PM₁₀}变化关系显著。退偏比可提前预测地面C_{PM₁₀}变化,其大值区高度下降、范围扩展时地面C_{PM₁₀}升高。(3)沙尘前期,1 500 m高度以下存在明显的逆温现象,深厚的逆温层阻碍了垂直运动的发展,使高空的沙尘不能尘降至地面。沙尘持续阶段,1 000 m以下气温较前期明显减小,1 500 m以下相对湿度维持较低水平直至沙尘过程结束。

关键词:西安;多源资料;沙尘

中图分类号: P445.4

文献标识码: A

沙尘天气是指沙粒、尘土悬浮在空气中,导致空气出现浑浊、能见度显著降低的天气现象。沙尘天气严重影响环境空气质量、交通安全,并对人体健康、生态系统等造成一定危害^[1-3]。我国的沙尘天气多发生于北方干旱地区,西安地处黄土高原和秦岭山脉之间的渭河冲积平原,是西北沙尘的主要过境和影响区域,冬春季盛行的偏北风易将北方沙漠区和黄土区地表的颗粒物输送至西安上空形成沙尘天气^[4]。目前已有学者从不同角度、使用不同方法研究了西安沙尘污染。Shen等^[5]和Li等^[6]分析了西安市在沙尘污染期间大气颗粒物中的化学组分;胡元洁等^[7]在全面分析西安市大气污染物时空特征基础上探讨了不同沙尘源对西安市空气质量影响程度的差异;郑溟

等^[8]基于K-means聚类方法的沙尘天气识别技术,实现了对符合沙尘天气特征监测数据的快速识别;王潇等^[9]利用CALIPSO卫星激光雷达数据初步得到了污染过程不同阶段气溶胶垂直分布特征和主要气溶胶类型;金丽娜等^[10]利用MODIS气溶胶产品得到了气溶胶光学厚度的月、季、年时空变化特征。

以往研究中对西安地区沙尘天气的分析主要基于单一手段,且研究对象多为轻到中度污染天气,结合多源监测产品分析西安重度沙尘污染天气过程的研究甚少。2024年2月17—19日,西安地区出现了罕见严重沙尘天气。根据陕西省空气质量发布系统显示,空气质量由2月17日的二级“良”快速恶化至18—19日的六级“严重污染”。

收稿日期: 2025-06-12

作者简介: 窦建虎(1980—),男,汉族,陕西扶风人,学士,工程师,主要从事综合气象探测研究工作。

通信作者: 曹梅(1979—),女,汉族,陕西米脂人,硕士,副研级工程师,主要从事综合气象探测研究工作。

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(2022G-24);国家自然科学基金项目(42427804)

此次过程是西安地区近二十年来出现最严重的一次沙尘过程,对人们的身体健康造成了严重影响,引发公众广泛关注。本文以西安泾河国家基本气象站探测设备为例,利用气溶胶激光雷达、地基微波辐射计、颗粒物观测以及地面气象观测等多源观测数据,分析此次沙尘天气过程中大气环流形势、地面气象要素及光学特征垂直结构的演变特征,以为西安地区沙尘天气监测、预报及重污染天气防治提供参考和依据。

1 资料与方法

逐小时颗粒物 $C_{PM_{2.5}}$ 、 $C_{PM_{10}}$ 数据以及对应的风速、相对湿度、气压资料均来自西安泾河国家基本气象站(以下简称泾河站)观测站点日常监测数据。 $C_{PM_{2.5}}$ 、 $C_{PM_{10}}$ 观测设备采用 β 射线法原理,结合动态湿度控制系统(DHS)及动态数字滤波技术,实现对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 全天候连续自动监测。

MWP967KV 型地基多通道微波辐射计由中国兵器工业集团北方天穹信息技术有限公司研制,是一种被动式微波遥感设备,可以反演不同高度的气温、相对湿度、水汽密度和液态水含量等长时间序列瞬时数据,有效弥补了常规探空资料空间分辨率不高、时间不连续的缺点^[11],可辅助反映气象条件与重污染之间的关系^[12]。地基微波辐射计的探测高度为 0~10 km,时间分辨率 2.0 min,垂直分辨率在 0~500 m 为 25 m,500 m~2.0 km 为 50 m,2.0~10.0 km 为 250 m。

气溶胶激光雷达由西安理工大学研制,可实现对气溶胶垂直结构的连续观测,最大探测高度可达 10.0 km,分辨率为 30 m,数据采集每 2.0 min 一组,100 m 以下为该设备的探测盲区。退偏比是气溶胶激光雷达观测的重要参量,它是后向散射信号的垂直偏振通道强度与平行偏振通道散射强度之比,可以反映气溶胶粒子的不规则程度,有效区分球形与非球形颗粒。一般来说形状规则的气溶胶粒子和水云退偏比接近于 0;而粒子形状越不规则,越接近于 1,表示粒子的非球形特征越明显。沙尘大多为粗颗粒不规则粒子,一般认为沙尘的退偏比在 0.1~0.4 之间^[13]。

2 沙尘天气过程分析

2.1 大气环流形势分析

2024 年 2 月 17 日 20:00 500 hPa 高度场上,欧亚大陆整体呈“两脊一槽”形势,乌拉尔山为高压脊,脊前贝加尔湖有深厚的低压槽,槽前锋区强烈,伴随冷涡中心强度达 $-48.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大风速达 56.0 m/s。冷涡前部等温线密集,10 个纬距内分布有 9 条等温线,冷平流强,槽前槽后温差达 $40.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有强斜压性和斜压不稳定特征。18 日 05:00,地面冷高压中心位于新疆北部,其前部东段冷锋已抵达陕西省西北部,强锋区和强风区位置呈东北—西南向,冷锋后的西北风将上游大范围的沙尘输送至陕西省,18 日 08:00 低槽位于陕北—陇南一带,槽后大风携带沙尘向东南推进,18 日 09:00 起影响西安市出现扬沙或浮尘天气。

18 日 20:00—19 日 20:00,700 hPa 西南急流发展,与偏东北气流在关中地区交汇形成切变,切变线附近辐合上升,不利于高空沙尘沉降,同时 19 日白天低槽后偏东北气流导致沙尘回流,与秦岭地形阻挡作用叠加,导致沙尘天气在西安地区持续时间长、消散缓慢。19 日 20:00 偏东气流增强,将西安地区上空沙尘向西扩散,逐渐消散。

2.2 实况分析

2.2.1 气溶胶质量浓度与能见度变化特征 2 月 18—19 日,沙尘天气影响西安,从西安泾河站观测到的 $PM_{2.5}$ 质量浓度($C_{PM_{2.5}}$)、 PM_{10} 质量浓度($C_{PM_{10}}$)及 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 PM_{10} 质量浓度比值($C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$)(图 1)来看,此次沙尘天气可分为沙尘天气前期、增长期、持续期、清除期 4 个阶段。

2 月 17 日 00:00—2 月 18 日 09:00 $C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$ 在 0.4~1.0 间,其小时平均值为 0.8,该时段是以 $PM_{2.5}$ 颗粒物为主的轻至中度污染, $C_{PM_{2.5}}$ 峰值为 $118.1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, $C_{PM_{10}}$ 峰值为 $139.2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,能见度在 7 500 m 以上,本时段为沙尘天气的前期阶段。

2 月 18 日 10:00 $C_{PM_{2.5}}$ 、 $C_{PM_{10}}$ 由 9:00 的 $103.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $128.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 迅速升高至 $131.3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $342.2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, $C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$ 由 0.8 陡降至 0.4。随后, $C_{PM_{2.5}}$ 和 $C_{PM_{10}}$ 迅速升高, $C_{PM_{10}}$ 升幅远大于 $C_{PM_{2.5}}$ 升幅,水平能见度由 09:00 的 7 500 m 下降至 10:00 的 5 700 m,表示沙尘天气开始,并进入增长阶段。

之后, $C_{PM_{10}}$ 快速增长, 2月18日13:00 $C_{PM_{10}}$ 达到全天峰值 $2\ 838.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, $C_{PM_{2.5}}$ 同时出现次高峰值 $582.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 水平能见度下降至 $1\ 700\ \text{m}$ 。18日13:00—18:00 $C_{PM_{10}}$ 均维持在 $2\ 000.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, $C_{PM_{2.5}}$ 维持在 $550.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 16:00 $C_{PM_{2.5}}$ 达到此次过程最高峰值 $608.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。随后 $C_{PM_{2.5}}$ 和 $C_{PM_{10}}$ 开始缓慢下降, 19:00—00:00 颗粒物质量浓度仍处在高值, $C_{PM_{10}}$ 维持在 $1\ 000.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, $C_{PM_{2.5}}$ 维持在 $300.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。00:00 前的时段也可视为沙尘的维持阶段。18日10:00—19日

23:00 $C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$ 在 $0.2\sim 0.5$ 之间, 小时平均值为 0.3 , 污染物主要以 PM_{10} 为主。

19日00:00—19日11:00 颗粒物质量浓度呈现持续下降趋势, $C_{PM_{10}}$ 在 $500.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上下, 但水平能见度仍在 $7\ 500\ \text{m}$ 以下。进入沙尘清除阶段, 19日12:00—23:00 $C_{PM_{2.5}}$ 和 $C_{PM_{10}}$ 整体呈快速下降趋势, 但期间存在明显波动。 $C_{PM_{2.5}}$ 变化相对平缓, 20日00:00 $C_{PM_{2.5}}$ 和 $C_{PM_{10}}$ 分别由19日23:00的 $122.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $255.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 骤降至 $46.1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $117.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 污染过程结束。

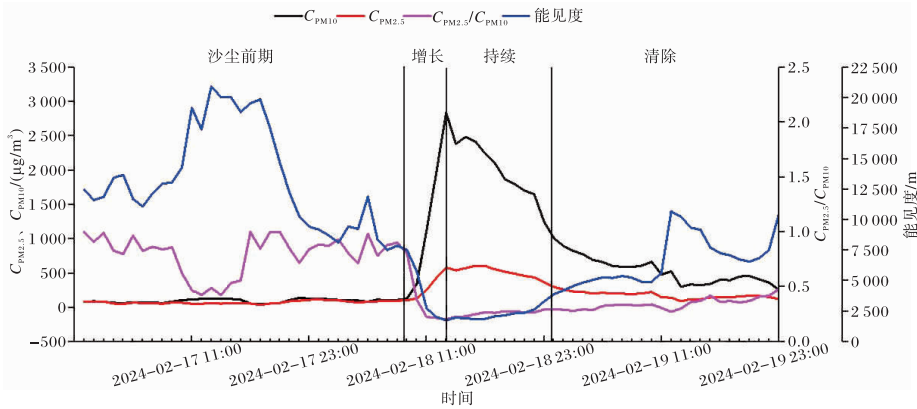


图1 2024-02-17T00—20T00 西安水平能见度, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度 ($C_{PM_{2.5}}$ 、 $C_{PM_{10}}$) 及其比值 ($C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$) 变化特征

2.2.2 常规气象要素变化特征 图2为2024年2月17日00:00—20日00:00 定时风速、相对湿度和气压随时间变化特征。常规气象要素的变化可对应沙尘前期阶段和沙尘增长阶段颗粒物浓度的变化。17日00:00—18日09:00 的沙尘前期阶段, 气压平均值为 $956.4\ \text{hPa}$, 定时风速仅 $1.5\ \text{m/s}$, 平均相对湿度 61.0% , 有利于颗粒物的积累。17

日18:00 开始气压逐渐升高, 冷空气开始南下。18日11:00 相对湿度由09:00的 66.0% 降至 38.0% , 进入沙尘增长阶段, 沙尘整个影响过程中小时相对湿度均在 30.0% 以下。18日01:00 开始, 定时风速逐渐增大, 08:00 增大到 $3.3\ \text{m/s}$, 瞬间极大风速达到 $6.0\ \text{m/s}$, 直至19日04:00 定时风速均在 $2.0\ \text{m/s}$ 以上。19日05:00—19日10:00

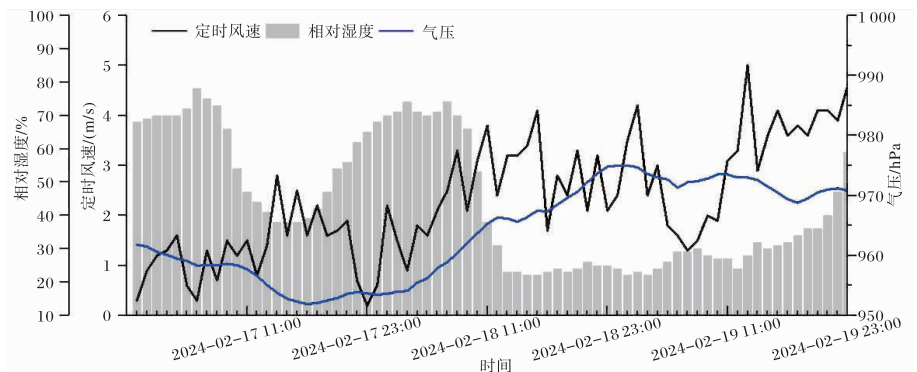


图2 2024-02-17T00—20T00 西安定时风速、相对湿度和气压随时间变化特征

风速短暂减小至 $1.3 \sim 1.9 \text{ m/s}$, 期间 $C_{\text{PM}_{2.5}}$ 和 $C_{\text{PM}_{10}}$ 出现波动, 19 日 10:00—19 日 18:00 风速再次增大, 有利于颗粒物的扩散, 污染过程趋于结束。

2.3 气溶胶激光雷达探测分析

近年来, 气溶胶激光雷达已被广泛应用于污染、边界层高度、气体探测、风能等领域^[14-16]。气溶胶激光雷达探测技术应用至沙尘事件的研究可加深对沙尘气溶胶垂直结构演变规律的认识。消光系数的高值中心和退偏比的高低值分界线可以较好地表征出高空沙尘粒子的沉降变化, 对预测 $C_{\text{PM}_{10}}$ 变化具有一定可行性^[17]。图 3 为 2 月 18 日 00:00—20 日 22:00 气溶胶激光雷达退偏比垂直分布及与 $C_{\text{PM}_{10}}$ 对比图。沙尘过程期间, 激光雷达产品显示西安市大气中出现了非常明显的气溶胶层, 并且在垂直方向有明显的波动。在 2 月 18 日 07:00 前的沙尘前期阶段, 整层大气退偏比小于 0.1, $C_{\text{PM}_{10}}$ 处在低值水平。从 06:54 分开始, 在高空 $1\,300 \sim 1\,500 \text{ m}$ 处退偏比开始增大至 0.2, 表明沙尘的前部有移到西安上空的迹象。07:20 退偏比大于 0.2 的高度降低至 $1\,150 \sim 1\,350 \text{ m}$ 。07:30—08:25 在 $370 \sim 750 \text{ m}$ 高空处退偏比超过 0.3, 表明此时沙尘已位于西安上空, 但此时段地面 $C_{\text{PM}_{10}}$ 仍处于低值。09:30 后退偏比大于 0.3 的区域在 $260 \sim 760 \text{ m}$

之间, 表明沙尘进一步尘降扩展, 退偏比大于 0.2 的高度已贴近地面, 近地面大量存在的沙尘气溶胶导致地面 $C_{\text{PM}_{10}}$ 迅速升高, 10:00 $C_{\text{PM}_{10}}$ 质量浓度升高至 $342.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 出现污染天气。从以上分析可见, 激光雷达反演的退偏比可以提前约 3 h 预测沙尘过程 $C_{\text{PM}_{10}}$ 变化。

18 日 10:00—12:00, $300 \sim 760 \text{ m}$ 高度处出现退偏比大于 0.35 的大值区, 反映出此时段沙尘气溶胶含量大幅增加, 13:00 地面 $C_{\text{PM}_{10}}$ 达到 $2\,838.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 峰值, 地面污染进一步加重并持续, 但此时高空退偏比却出现了明显降低, 表明高空沙尘在逐渐向近地面沉降。

18 日 17:00 后, 西安 $320 \sim 700 \text{ m}$ 高空再次出现退偏比大于 0.35 的高值区, 大于 0.2 的区域高度也有所升高, 到达 $1\,000 \text{ m}$ 以上。一方面, 可能是北方的沙尘再次输送至西安; 另一方面, 也可能是沙尘回流影响, 需要后期结合风场做系统深入的分析。18 日 19:00 后, 地面 $C_{\text{PM}_{10}}$ 逐渐降低至 $2\,000.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。高空退偏比大于 0.35 的高值区一直持续至 19 日 01:00, 此时地面 $C_{\text{PM}_{10}}$ 快速降低, 到 19 日 01:00 已降至 $1\,000.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。此时段地面风速增大, 加快了洁净空气的输送速度, 地面 $C_{\text{PM}_{10}}$ 进一步降低, 直至沙尘天气结束。

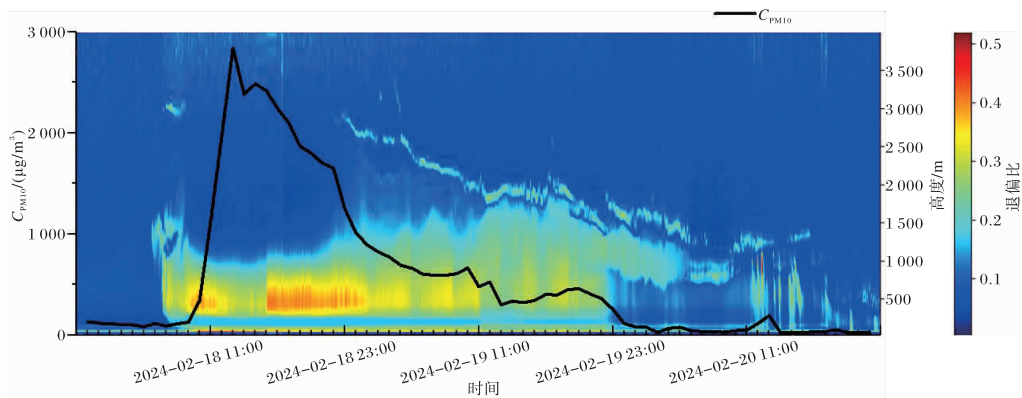


图 3 2024-02-18T00—20T22 PM_{10} 质量浓度 ($C_{\text{PM}_{10}}$, 黑线) 及退偏比 (色斑) 垂直分布特征

因 $C_{\text{PM}_{10}}$ 设备不输出 10 min 数据, 为进一步验证气溶胶激光雷达高空退偏比对沙尘天气的预测性, 选取逐 10 min 能见度与逐 10 min 退偏比进行相关性分析。图 4 是 2 月 18 日 06:00—19 日 00:00 逐 10 min 能见度与不同高度退偏比的关系, 其中

200 m 为 $100 \sim 200 \text{ m}$ 的平均值, 400 m 为 $300 \sim 400 \text{ m}$ 的平均值、600 m 为 $500 \sim 600 \text{ m}$ 的平均值, 以次类推。图 4 中红框所圈出的是不同高度退偏比的峰值, 06:40 开始从低到高红框圈出峰值高度依次为 $1\,400 \text{ m}$ 、 $1\,200 \text{ m}$ 、 800 m 、 600 m , 蓝框为逐

10 min 能见度开始急剧下降的时间,从 10:00 起能见度开始迅速下降至 5 000 m 以下,此时间正好对应高空 100~200 m 处退偏比的上升时段。对逐 10 min 能见度与不同高度退偏比进行 Pearson 相关性,分析结果见表 1。由表 1 可知,逐 10 min 能见度与低层退偏比有明显负相关关系,且高度越

低,与退偏比的负相关性越大。但 800 m 以上,能见度与退偏比的负相关关系消失,甚至出现正相关。结果表明,气溶胶激光雷达高空 800 m 以上的退偏比可提前 2~3 h 预测出沙尘天气的到来,高空 200 m 以下的退偏比与能见度可建立较高的负相关关系。

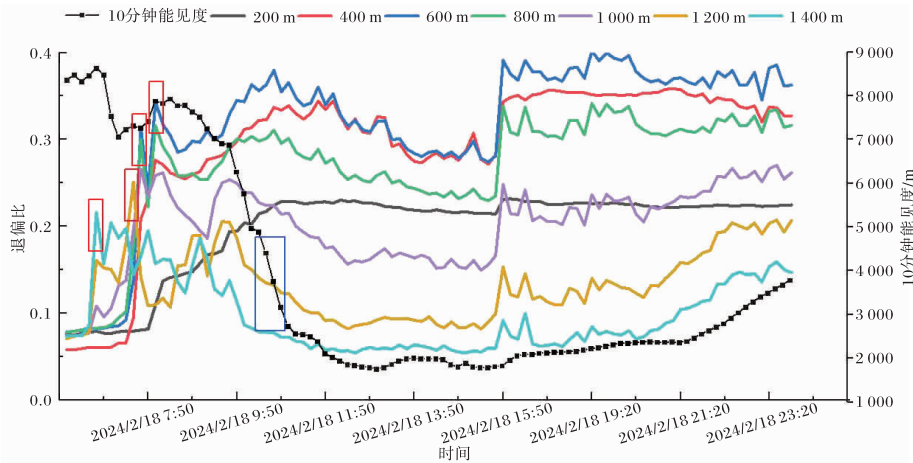


图4 2024-02-18T06—19T00 逐 10 min 能见度与不同高度退偏比的关系(红色方框表示不同高度退偏比峰值;蓝色方框表示能见度快速下降阶段)

表 1 逐 10 min 能见度与不同高度退偏比 Pearson 相关性

高度/m	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0	600.0	700.0	800.0	900.0	1 000.0	1 100.0	1 200.0	1 300.0
相关性	-0.94	-0.64	-0.74	-0.61	-0.56	-0.53	-0.48	-0.39	-0.14	0.22	0.45	0.59	0.69

2.4 地基微波辐射计探测分析

为了解本次罕见沙尘天气大气边界层内温湿垂直结构特征,利用地基微波辐射计温度和相对湿度廓线垂直分布时间序列(图 5)进行分析。在沙尘前期阶段,2月17日 00:00—17日 09:00,近地面相对湿度超过 55.0%,选取 0、500、1 000、1 500、2 000 m 高度的温度小时平均值加以分析。由图可知,0 m 高度气温均小于 1 500 m 以下气温,此时段 0 m 与 1 500 m 气温小时平均值差值 2.9 °C,存在明显逆温现象(图中阴影部分),2月17日 10:00—20:00 2 000 m 以下气温明显升至 10.0 °C 以上,相对湿度小于 50.0%,期间低层 0 m 和 500 m 气温逐渐升高,逆温减弱并短暂消失,此时未出现明显颗粒物超标。17日 20:00—18日 08:00,相对湿度逐渐增大并超过 60.0%,有利于污染物逐渐累积,地面气温下降,0 m 高度气温再次低于 500~1 500 m

气温,出现逆温现象(图中阴影部分),深厚的逆温层阻碍了垂直运行的发展,虽然从气溶胶激光雷达上可观察到 8日 07:00 高空已有沙尘侵入,但由于近地面的逆温,沙尘未下降到地面。18日 10:00 后逆温消散,垂直运动开始旺盛,高空的沙尘迅速尘降至地面,导致此时 $C_{PM_{10}}$ 增长,此时正好与图 1 中分析的 $C_{PM_{10}}$ 迅速增长的时间吻合。

在沙尘初期阶段,受冷空气影响,0 °C 高度由 2 000 m 逐渐下降至 1 000 m 以下,1 000 m 以下气温较前期明显减小。18日 13:00,1 000、2 000 m 相对湿度分别由 18日 07:00 的 67.9%、72.3% 下降至 42.6% 和 18.3%,对应颗粒物质量浓度峰值阶段。至 18日 20:00 相对湿度维持较低水平,随后 1 000 m 以上相对湿度波动上升,0~500 m 相对湿度持续低于 30.0%,沙尘天气爆发后,北方干冷空气造成湿度显著降低^[18]。

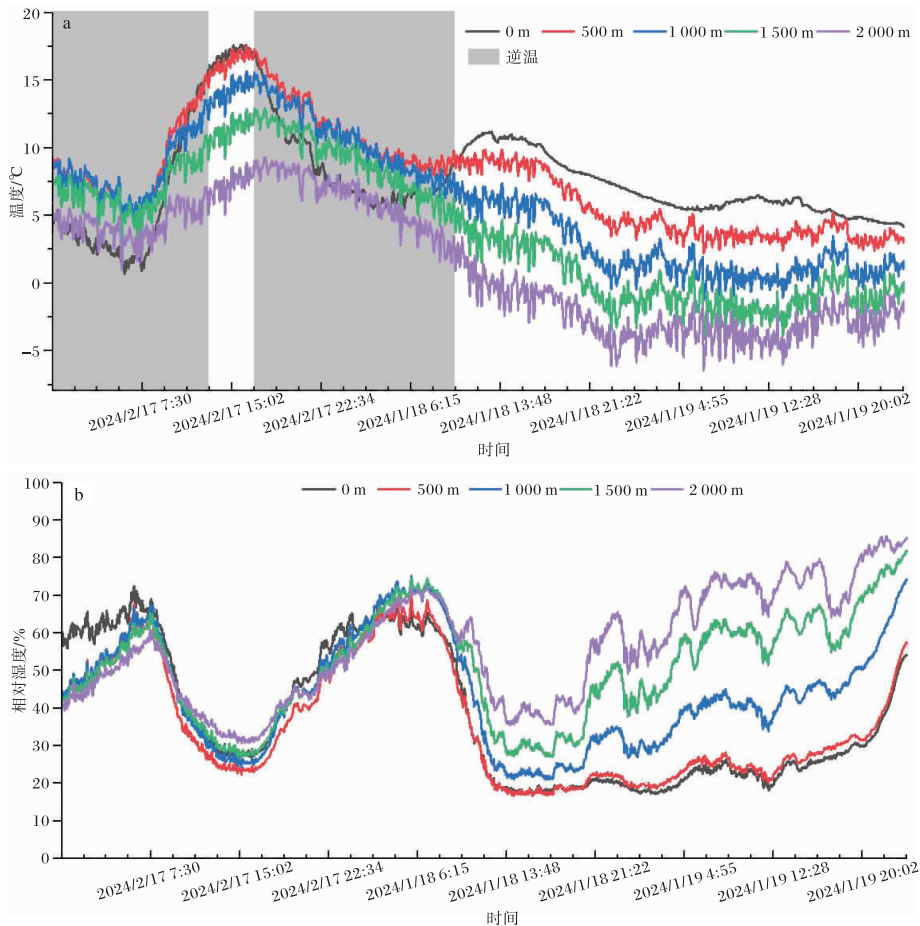


图5 2024-02-17T00—20T00 西安不同高度气温(a 阴影部分为逆温)和相对湿度(b)时间序列图

3 结论

(1)此次沙尘天气可分为沙尘天气前期、增长期、维持期、清除期4个阶段,沙尘过程维持阶段 $C_{PM_{10}}$ 峰值达到 $2\ 838.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, $C_{PM_{2.5}}$ 峰值达到 $608.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,为泾河站有气溶胶观测资料以来的最高值。 $C_{PM_{2.5}}/C_{PM_{10}}$ 在 $0.2\sim 0.5$ 之间,小时平均值为 0.3 ,污染物主要以 PM_{10} 为主。沙尘到达本地后,气压不断升高,相对湿度迅速下降,并维持在 30.0% 以下,定时风速在 $2.0\ \text{m}/\text{s}$ 以上,有利于沙尘的输送。

(2)在沙尘过程中,气溶胶激光雷达退偏比垂直分布与地面 $C_{PM_{10}}$ 变化具有明显的对应关系。沙尘前期退偏比小,地面 $C_{PM_{10}}$ 低。随着退偏比大值区高度下降、范围扩展,地面 $C_{PM_{10}}$ 升高并达到峰值。午后沙尘降至地面,高空退偏比降低,地面污染维持。后期高空退偏比高值区重现且高度上

升,一方面可能是北方的沙尘再次输送至西安,另一方面也可能是沙尘回流影响,需要后期结合风场做深入的分析。此时段伴随地面风速增大,地面 $C_{PM_{10}}$ 出现快速下降趋势,表明激光雷达反演的退偏比可提前预测沙尘过程中地面 $C_{PM_{10}}$ 的变化。

(3)地基微波辐射计探测数据分析发现,在沙尘前期, $1\ 500\ \text{m}$ 以下存在明显的逆温现象,并持续数小时。在沙尘持续阶段, $0\ ^\circ\text{C}$ 高度由 $2\ 000\ \text{m}$ 逐渐下降至 $1\ 000\ \text{m}$ 以下, $1\ 000\ \text{m}$ 以下气温较前期明显减小, $C_{PM_{10}}$ 剧烈升高时段伴随整层大气相对湿度骤降, $1\ 500\ \text{m}$ 以下相对湿度维持较低水平直至沙尘过程结束。

参考文献:

- [1] 廖乾邑,罗彬,杜云松,等. 北方沙尘对四川盆地环境空气质量影响和特征分析[J]. 中国环境监测,

- 2016,32(6):51-55.
- [2] 马雁军,刘宁微,洪也,等. 2011年春季辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物和空气质量的影响[J]. 环境科学学报,2012,32(5):1160-1167.
- [3] WANG J Y, SU S X, YIN Z L, et al. Quantitatively assessing the contributions of dust aerosols to direct radiative forcing based on remote sensing and numerical simulation [J]. Remote Sensing, 2022, 14(3):660-668.
- [4] 滕跃,王万瑞,贺皓,等. 陕西一次强沙尘暴过程诊断与分析[J]. 中国沙漠,2008,28(4):770-776.
- [5] SHEN Z X, CAO J J, ARIMOTO R, et al. Ionic composition of TSP and PM_{2.5} during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China[J]. Atmospheric Environment,2009,43(18):2911-2918.
- [6] LI X X, CAO J J, CHOW J, et al. Chemical characteristics of carbonaceous aerosols during dust storms over Xi'an in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2008,25:847-855.
- [7] 胡元洁,蒋楠. 沙尘天气对西安市环境空气质量的影响[J]. 中国沙漠,2020,40(6):53-60.
- [8] 郑溟,薛惠锋,李养养,等. 基于K-means聚类的沙尘天气快速识别技术研究[J]. 中国环境监测,2020(5):130-137.
- [9] 王潇,曹念文,黄婧婷,等. 西安市一次霾过程中气溶胶垂直分布特征及气象要素影响[J]. 环境科学研究,2018,31(9):1519-1526.
- [10] 金丽娜,李雄飞,李军. 关中地区 PM₁₀ 质量浓度及 MODIS 气溶胶光学厚度时空特征分析[J]. 干旱气象,2018,36(1):110-116.
- [11] TAN H B, MAO J T, CHEN H H, et al. A study of a retrieval method for temperature and humidity profiles from microwave radiometer observation based on principal component analysis and stepwise regression[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2011,28(3):378-389.
- [12] 王楠,高宇星,屈垚,等. 基于多源数据的西安大气重污染过程案例分析[J]. 环境科学,2023,44(10):5382-5391.
- [13] 谢娜,徐栋夫. 成都地区重浮尘天气过程多源观测分析[J]. 中国环境监测,2025,41(1):53-65.
- [14] SONG M Q, WANG Y, MAMTIMIN A, et al. Applicability assessment of coherent Doppler Wind LiDAR for monitoring during dusty weather at the northern edge of the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing,2022,14(20):5264-5273.
- [15] WANG L, QIANG W, XIA H Y, et al. Robust solution for boundary layer height detections with coherent Doppler wind lidar[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2021,38(11):1920-1928.
- [16] ZHANG S, HUANG Z W, LI M S, et al. Vertical structure of dust aerosols observed by a ground-based Raman Lidar with polarization capabilities in the center of the Taklimakan Desert[J]. Remote Sensing,2022,14(10):2461-2470.
- [17] 郝巨飞,袁雷武,李芷霞,等. 激光雷达和微波辐射计对邢台市一次沙尘天气的探测分析[J]. 高原气象,2018,37(4):1110-1119.
- [18] 胡泽勇,黄荣辉,卫国安,等. 2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J]. 大气科学,2002,26(1):1-8.