

李双双,杜一博,高星星,等. 2021 年春节期间关中地区重霾污染过程气象成因分析[J]. 陕西气象, 2025(2):38-45.

文章编号:1006-4354(2025)02-0038-08

2021 年春节期间关中地区重霾污染过程气象成因分析

李双双^{1,2},杜一博^{1,2},高星星^{1,2},李培荣^{1,2},祁春娟^{1,2},刘 慧^{1,2}

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

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:利用颗粒物质量浓度数据、气象观测数据及 ERA5 再分析数据,对陕西关中地区 2021 年春节期间一次持续性重霾过程的气象成因进行分析。结果表明:此次污染过程关中各地市 PM_{2.5} 质量浓度具有区域同步变化特征,咸阳、西安和渭南严重污染累计小时数均达 20 h 以上;关中地区 500 hPa 上以平直偏西气流为主,无明显冷空气扰动,地面上气压梯度力小,天气形势静稳;霾发展阶段泾河站垂直风场呈 3 层结构,低层较弱的偏东风或静风导致大气扩散能力较差,中层偏南风有利于暖湿水汽输送,高层以偏西风为主,这种风场结构有利于形成平流逆温;持续维持的贴地逆温和低混合层高度是导致重霾污染的重要原因,污染时段的平均逆温高度和逆温强度分别为清洁时段的 2.3 倍和 2.0 倍,而清洁时段的平均混合层高度约为污染时段的 2.5 倍;霾污染的快速有效清除依赖于冷高压加强南下,泾河站的降水及中层偏北风加大和低层转为较强的偏西风均有利于污染物扩散稀释;后向轨迹显示,在西安附近徘徊的污染气团和来自陕南的暖湿气团共同导致了本次重霾污染过程。

关键词:关中;重霾污染;气象条件;大气边界层;污染物来源

中图分类号:X16

文献标识码:A

随着中国经济的高速发展和城市化进程的加快,污染物排放量不断增加,大气环境污染日益严重。研究表明短期内污染源变化不大的情况下,污染物浓度变化主要受气象条件制约^[1-2]。大气边界层作为人类排放大气污染物的主要载体,其结构及变化在大气污染的形成、输送、扩散和清除等过程中起着非常重要的作用^[3-5]。针对不同地区大气污染问题,众多学者开展了广泛深入的研究。蒋伊蓉等^[6]对京津冀地区两次重污染过程分析表明,污染期间 500 hPa 平均风速显著下降,大气停滞系数明显偏高,明确了太行山和燕山对偏西和偏南气流的阻挡加剧了京津冀城市大气污染。李青春等^[7]利用地面加密气象站资料分析了冬季山谷风和海陆风对京津冀大气污染分布的影

响。此外,也有学者对京津冀地区重污染过程的近地面气象要素分布及天气成因进行了分析^[8-10],表明相对湿度高于 60%、平均风速小于 2.0 m/s 是出现重度污染并维持的重要指标,海平面气压的高低压区位置对污染范围有着明显影响,当地面受弱高压场或弱低压场控制时容易出现爆发性重霾污染,而均压场控制则会形成持续污染。针对江苏省霾的变化特征,不同学者分别从年代际、年际、天气尺度研究其影响因素,指出在多霾期,江苏境内高低层正压结构显著,大部地区处于水汽辐散区,污染物输送能力减弱。此外,针对南京地区不同级别污染设立了气象要素的量化指标,为污染等级预报提供参考依据^[11-13]。珠三角地区污染期间边界层结构主要表现为贴地

收稿日期:2024-05-09

作者简介:李双双(1995—),女,汉族,黑龙江绥化人,硕士,助工,主要从事环境气象预报技术研究。

通信作者:刘慧(1989—),女,汉族,山西运城人,博士,高级工程师,从事环境气象预报与评估工作。

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(2022Y-7;2023G-2)

逆温频率高、逆温高度低、大气边界层高度低、边界层通风量小的特征,导致垂直风场对污染物的有效输送能力被显著削弱,贴地层大气中污染较重^[14-16]。

针对关中地区重污染天气过程已有大量研究^[17-20],然而关中盆地地形独特,北邻渭北高原,南依秦岭山脉,西起宝鸡峡,仅在盆地东部和黄河之间形成通风口,西高东低的“喇叭口”状地形下的关中城市群比位于半开放地形中的京津冀,以及沿海平原的长三角和珠三角更容易引发逆温、静风等不利于大气污染物扩散的气象条件^[21]。本文选取了 2021 年春节期间关中地区一次重霾污染过程,利用多种气象观测数据,对其天气形势、大气边界层垂直结构特征及污染来源等进行了详细分析,探讨污染形成、增强、消散的原因,以期研究污染形成机理和提升 PM_{2.5} 质量浓度预报水平提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据介绍

地面常规气象数据(包括气温、相对湿度、能见度、露点温度和风等)来源于国家气象站逐小时观测;逐时 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度($c(\text{PM}_{2.5})$ 、 $c(\text{PM}_{10})$)数据来源于全国空气质量实时发布平台,咸阳、西安、渭南、宝鸡和铜川的站点数分别为 4、13、4、8 和 4 站,市小时值为市区内所有站点的平均值;不同高度的风、相对湿度、垂直速度数据来源于欧洲中期天气预报中心(European center for medium-range weather forecasts)第五代全球气候大气再分析数据 ERA5,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 h;微波辐射计温度剖面数据取自布设在西安泾河国家基准站的地基微波辐射计,探测高度为 0~10 km,时间分辨率为 2 min,垂直分辨率分别为 25 m(0~500 m)、50 m(500 m~2 km)、250 m(2~10 km),该辐射计由中国兵器工业集团北方天穹信息技术(西安)有限公司研制(型号为 MWP967KV),其中小时内数据进行算术平均得到逐时的时间序列数据;研究时段为 2021 年 2 月 8—14 日(农历腊月二十七至正月初三)。以上数据均经过质量控制和检验,准确可靠。

1.2 混合层高度计算方法

大气混合层定义为湍流特征不连续界面以下湍流较充分发展的大气层^[22],湍流特征不连续界面的高度称为混合层高度(mixing layer height, H_{ML}),本文采用罗氏法计算泾河站混合层高度,计算公式如下。

$$H_{\text{ML}} = \frac{121}{6}(6-P)(T-T_d) + \frac{0.169(U_z + 0.257)}{12f \cdot \ln(\frac{z}{z_0})} \quad (1)$$

其中, H_{ML} 为混合层高度(单位为 m), T 和 T_d 分别为 2 m 气温和露点温度(单位为 $^\circ\text{C}$), U_z 为高度 z 处的平均风速(单位为 m/s),文中 z 取值为 10 m。 z_0 为地表粗糙度(单位为 m),一般城市地表粗糙度为 0.8~2.0, f 为地转参数(单位为 s^{-1}), P 为 P-Pasquill 稳定度级别,把太阳高度角、云量和风速分级定量化,将大气稳定度分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定 6 个级别,对应的 P 值依次为 1、2、3、4、5 和 6,由于国家气象站云量数据缺测较多,计算中云量数据选用 ERA5 再分析数据,其他采用国家气象站数据。

1.3 HYSPLIT 模型

HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)是一款用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型,由美国国家海洋大气中心和澳大利亚气象局共同研发,该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的较为完整的输送、扩散和沉降模式。本研究采用美国国家海洋大气中心全球资料同化系统(global data assimilation system, GDAS)数据作为气象初始场,每隔 6 h 一组数据,主要包括气压、温度、相对湿度、风速等气象要素,本文利用 TrajStat 软件^[23]对到达西安的气团的后向轨迹进行模拟和聚类分析。

2 污染天气过程概况

2021 年 2 月 8—14 日陕西关中出現一次轻度污染到严重污染天气过程,此次过程正值春节期间,对人体健康、交通出行及社会经济有着较大影响。图 1 为关中五地市 PM_{2.5} 质量浓度的逐时

演变序列,表 1 为其相关系数,由表 1 可知,关中五地市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关系数为 0.47~0.94,均通过 0.01 显著性水平检验,说明各地市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度具有区域同步变化特征。五地市中,咸阳、渭南和西安污染状况最为严重,三地从 8 日开始污染物逐渐累积增长,9 日出现中度污染($115\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 < c(\text{PM}_{2.5}) \leq 150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),10 日以重度污染($150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 < c(\text{PM}_{2.5}) \leq 250\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)为主, $\text{PM}_{2.5}$ 维持高质量浓度且振荡上扬;11 日夜间咸阳、渭南和西安三地 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度开始爆发式增长,迅速发展至严重污染($c(\text{PM}_{2.5}) > 250\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),这期间正是春节假期燃放烟花爆竹最集中的时段,咸阳于 12 日 03 时达到此次过程 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度峰值($593.5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$);12 日午后污染状况短暂缓解,12 日夜间西安和咸阳再次出现持续性严重污染天气;受冷空气和降水影响,13 日空气质量开始好转,并于午后陆续转为良,重污染天气过程结束。此次过程咸阳严重污染累计小时数长达 45 h,西安和渭南均为 20 h。

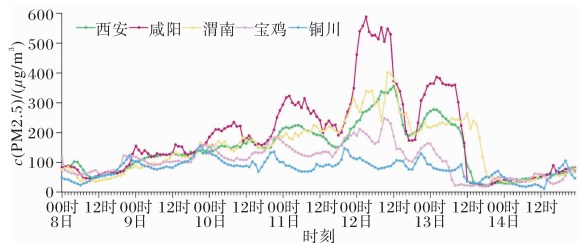


图 1 2021-02-08—14 关中五市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度逐小时变化

表 1 2021-02-08—14 关中五市 $\text{PM}_{2.5}$ 逐小时质量浓度相关系数

城市	西安	咸阳	渭南	宝鸡	铜川
西安	1.00	0.94	0.88	0.78	0.52
咸阳	0.94	1.00	0.86	0.77	0.48
渭南	0.88	0.86	1.00	0.67	0.47
宝鸡	0.78	0.77	0.67	1.00	0.72
铜川	0.52	0.48	0.47	0.72	1.00

3 重霾污染成因分析

3.1 大尺度天气形势分析

大尺度环流形势和局地气象条件对重污染天

气的形成、分布、累积和清除起着显著作用^[24-25]。此次霾开始阶段,500 hPa 上欧亚中高纬地区呈“两槽一脊”环流型,贝加尔湖附近有一宽广的弱高压脊,关中地区受高压脊前西北气流控制,贝加尔湖高压脊缓慢东移加强,形成稳定少动的阻塞环流形势(图 2a),此环流形势维持至 10 日夜间。除 11 日白天 500 hPa 上关中受局地短波槽影响,有弱冷空气扰动外,直至 12 日夜间,关中地区始终处于西北或偏西气流中,无明显冷空气影响,细颗粒物逐渐累积。13 日一浅槽经过陕西(图 2b),静稳天气形势被破坏。从地面形势场来看,9 日 20 时(图 2c)关中地区位于大陆高压底部的均压场内,地面等压线稀疏,气压梯度力小;10 日 20 时关中主要受我国中东部弱高压后部偏东气流控制;12 日 20 时(图 2d)关中基本处于四川盆地到河北一带的低压倒槽区顶部,水平辐合强烈,这种天气形势下关中地区容易出现严重污染天气^[19],且 9—12 日关中一直处于弱气压场控制下,风速小,天气形势静稳,不利于污染物扩散。13 日受冷高压南下影响,关中地区气压梯度力显著增大,地面风速增强,污染物消散,空气质量转好。

3.2 近地面气象要素变化特征

研究表明,除了污染物排放、地形等因素外,近地面气温、相对湿度、降水、风等要素和重污染天气的生消发展关系密切。由于关中五市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有显著的区域同步性,因此选取西安泾河站作为代表站,对其近地面气象要素进行分析(图 3)。8—12 日泾河站 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 逐渐积累,于 12 日上午达到峰值,在此期间地面气压逐步下降,低压辐合系统有利于污染物累积,近地面风速较小且以偏东北风为主,由于关中盆地特殊的喇叭口地形,仅在关中东部有通风口,东北风不易将本地排放的污染物扩散出去,污染物浓度逐渐升高。11 日午后和 12 日午后受短时间冷空气带来的风速增大影响, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 有短暂的下降。13 日午后冷空气主体抵达关中,气温骤降,气压升高,泾河站出现 3 h 持续降水,降水强度在 0.2 mm/h 以上,对颗粒物有明显的湿清除作用,且风向转为偏西风,有利于颗粒物从关中东部通风口扩散,污染物得到有效清除。8—14 日泾河

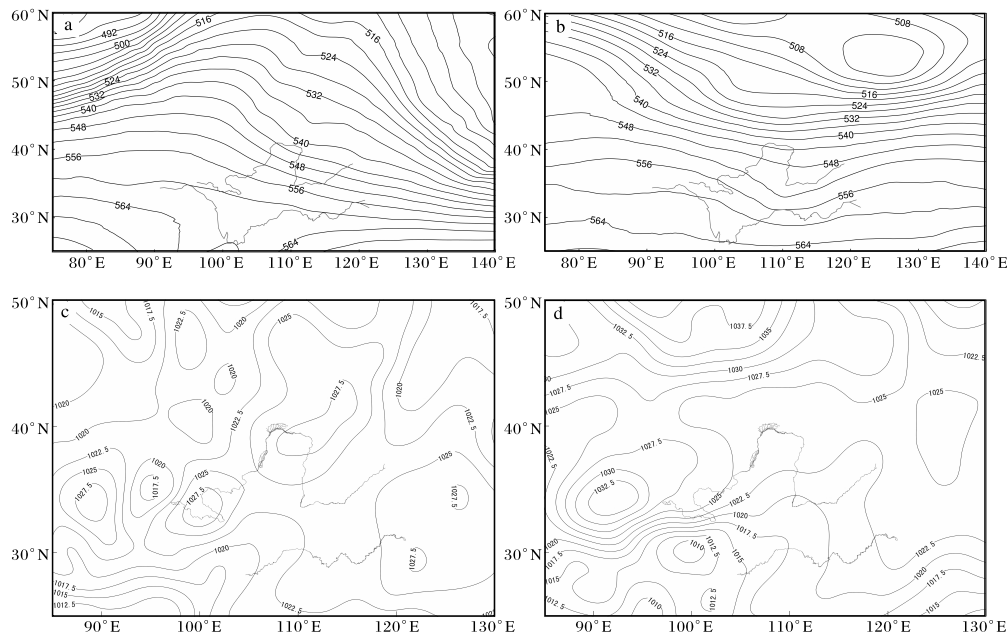


图2 500 hPa 高度场(单位为 dagpm;a 2021-02-09T08,b 2021-02-13T20)和海平面气压场(单位为 hPa;c 2021-02-09 T20,d 2021-02-12T20)(审图号为 GS(2019)3082 号)

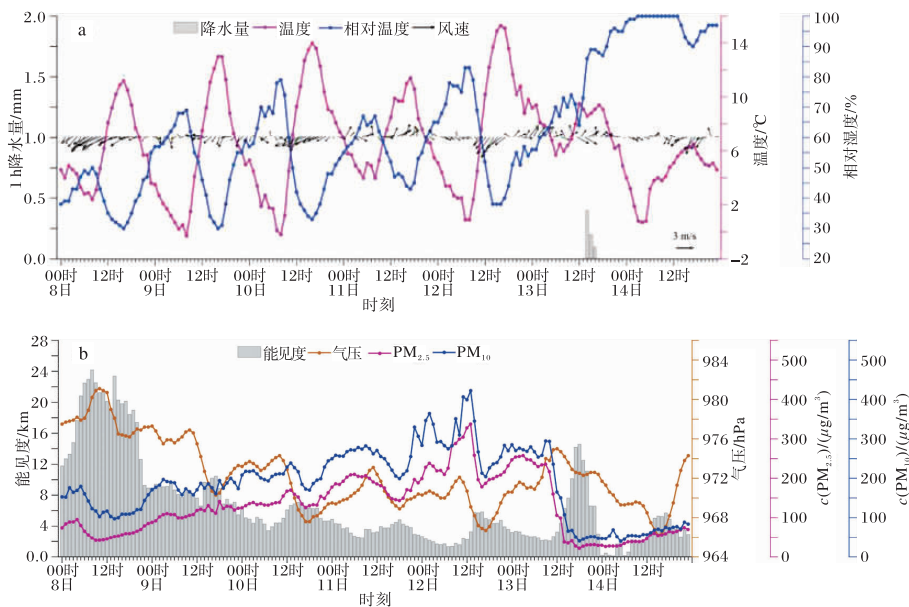


图3 2021-02-08—14 泾河站气温、相对湿度、风、降水量(a),气压、能见度、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度变化(b)

站相对湿度逐渐增加,在降水发生前相对湿度大多在 80 % 以下,相对湿度增加有利于细颗粒物吸湿增长及二次非均相化学反应的转化^[17,26],细颗粒物浓度明显增加,13 日午后相对湿度增至 90 % 以上,为降水提供了较好的水汽条件。由于污染物对光的散射作用,造成能见度显著下降,9—13 日上午能见度均低于 10 km,严重污染阶段能见

度不足 5 km,13 日午后随着污染物扩散稀释,能见度迅速升高。

3.3 大气边界层结构特征

3.3.1 边界层风场特征 基于 ERA5 再分析资料,以距离泾河站最近的格点资料代表泾河站,探讨泾河站相对湿度、风和垂直速度随时间和高度的变化情况。图 4 显示 8—12 日 900 hPa 以下受

偏东风或静风控制,风力总体偏弱,950 hPa 以下最大风速不足 4 m/s,利于本地污染物积累,900~700 hPa 主要受偏南风影响,利于暖湿水汽输送,700 hPa 以上以偏西风为主。整体来看,8—12 日低层偏东风随高度呈顺时针变化,泾河站受暖平流影响,有助于形成较强的平流逆温,导致污染物不易扩散,污染状况逐渐加重,其中,11 日上午风向随高度逆转,泾河站受短暂弱冷空气影响,PM_{2.5} 浓度略有下降,下午低层转为弱东风

或者静风,污染物迅速积累。此外,整个污染过程低层相对湿度除午后略减小外,大多时段较高,利于细颗粒物吸湿增长。13 日午后整层相对湿度显著增加,并伴有明显的上升运动,有利于污染物向上扩散,同时中层偏北风加大,低层转为较强的偏西风,整层风速较 8—12 日明显增强,污染物扩散条件明显转好。14 日整层相对湿度迅速减小,中低层以偏西风为主,空气质量变好。

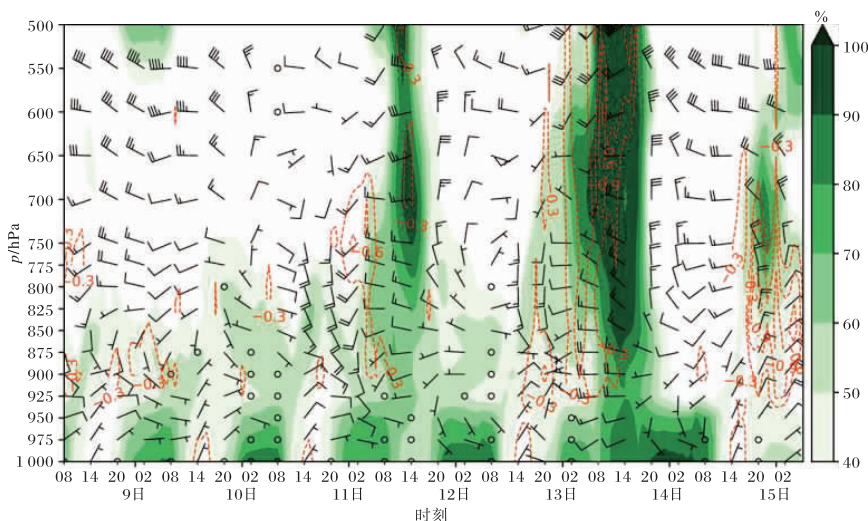


图 4 2021-02-08—14 风、垂直上升速度(红色虚线)和相对湿度(阴影)的时间-高度剖面图

3.3.2 逆温层和混合层高度特征 大气稳定性是大气污染形成、维持和发展的重要影响因素^[7],逆温是其中一个重要标志,混合层高度表征污染物在垂直方向上可以被湍流稀释的范围,混合层高度越高,污染物在垂直方向上可以扩散的范围越高,污染物的浓度就越低^[13,27],因此逆温和混合层高度是影响污染物扩散的两个重要因子。

图 5 给出了此次污染过程中泾河站微波辐射计观测的温度垂直廓线,图 6 为泾河站贴地逆温高度、逆温强度、混合层高度与 PM_{2.5} 质量浓度的逐时演变图。贴地逆温指逆温层底高度为 0 m 的逆温层,逆温强度为逆温层内每 100 m 的温度差。由图 5 可知,8—12 日泾河站出现长时间持续维持的贴地逆温,逆温表现为明显的日变化特征,其中夜间逆温层较高,约为 125~375 m,而白天逆温层高度通常在 75~100 m。混合层高度日最大值维持在 700 m 以下,11 日夜间开始混合层

高度降至 300 m 左右,表明这期间大气层结稳定,抑制了污染物的垂直扩散,加之前期本地污染物循环累积,导致泾河站出现长时间的严重污染天气。其中 11 日凌晨受短暂弱冷空气影响,逆温高度明显减小,大气湍流增强,污染状况略有改善。13 日午后受地面冷高压系统南下影响,整层大气显著降温,逆温层消失,混合层高度迅速抬升至 1 100~1 200 m,近地层大气的垂直交换和热力对流显著增强,污染物在垂直方向上得以稀释扩散,持续的雾霾得以清除。

进一步分析表明,逆温高度越高,逆温强度越强,对应 PM_{2.5} 浓度越高,其相关系数分别为 0.34 和 0.44(均通过 0.01 显著性水平检验),本次过程污染时段($c(\text{PM}_{2.5}) > 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)的平均逆温高度和逆温强度分别为 143 m 和 1.2 °C/100 m,对应清洁时段($c(\text{PM}_{2.5}) \leq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)分别为 62 m 和 0.6 °C/100 m,即污染时段的逆温高度和逆温

强度分别为清洁时段的 2.3 倍和 2.0 倍,说明逆温层的存在会抑制近地层污染物向上扩散,使污染物堆积效应进一步增强,进而加剧空气的污染程度。此外,泾河站混合层高度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓

度的相关系数为 -0.66 ,表现为显著的负相关关系,清洁时段的平均混合层高度(864 m)约为污染时段(344 m)的 2.5 倍,表明混合层高度越低,污染状况越严重。

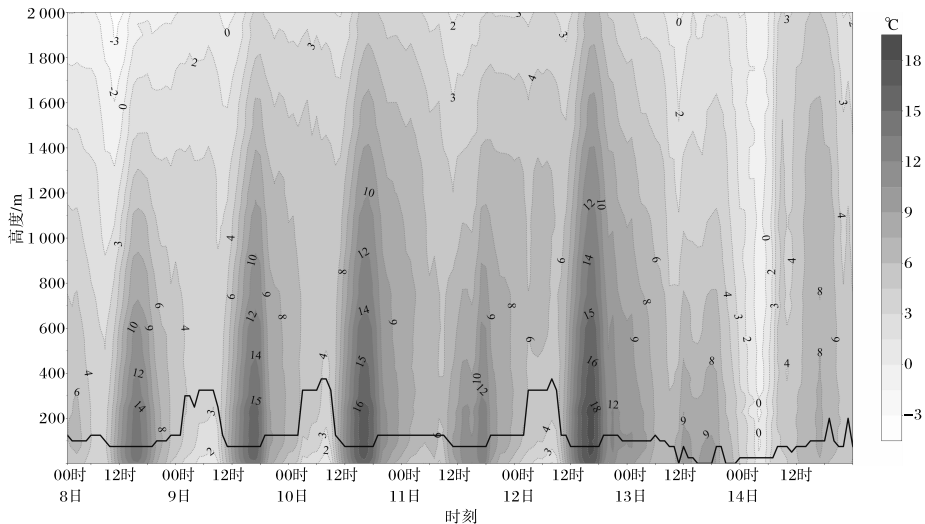


图5 2021-02-08—14 泾河站微波辐射计温度时间-高度变化(黑色实线为贴地逆温高度)

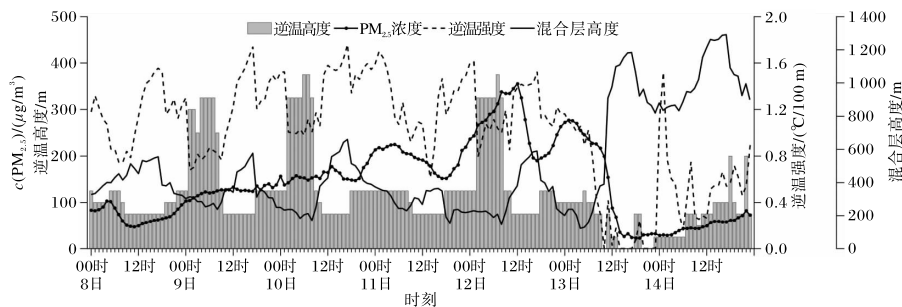


图6 2021-02-08—14 泾河站贴地逆温高度、逆温强度、混合层高度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化

4 污染物来源解析

利用 TrajStat 软件对西安 9 日 14 时—13 日 14 时进行后向轨迹追踪模拟,模拟高度为 500 m,每条轨迹模拟时长为 24 h,时间分辨率为 6 h。图 7a 显示本次污染过程气团主要来源于陕南和关中本地,其中 12 日 02—08 时气团来源于西北路。进一步将气团轨迹进行聚类分析,图 7b 表明轨迹聚类为 3 大类,分别为西北路、西南路、本地徘徊,轨迹条数分别为 3、10、4 条,其中西北路轨迹较长,移速较快,由于上游空气质量较好,该路径对空气污染物的积累影响较小;西南路轨迹条

数最多,来自西南方向的暖湿气团可以增加关中的湿度,有利于颗粒物吸湿增长及二次颗粒物的生成,从而增加颗粒物浓度;本地徘徊路径主要受关中盆地相对封闭的地形影响,空气在流动过程中受到地形阻挡在盆地内徘徊,轨迹较短,移速较慢,有利于污染物积聚。

5 结论

(1)霾发展阶段,500 hPa 上以平直偏西气流为主,无明显冷空气影响,地面上关中一直处于弱气压场控制下,风速小,天气形势静稳,均有利于污染物累积。重霾污染的有效清除依赖于冷高压

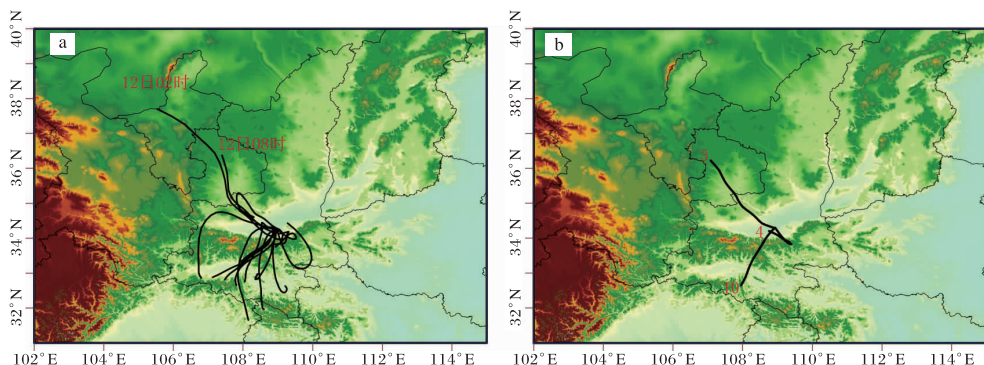


图7 西安 2021-02-09T14—13T14 24 h 气团后向轨迹追踪模拟(a)及聚类分析(b)

(审图号为 GS(2018)1432 号)

南下,气压梯度力增大,风速增强,大气扩散条件好转。

(2)霾发展阶段,泾河站近地面相对湿度较高,地面气压处于降压状态,900 hPa 以下受偏东风或静风控制,不利于污染物扩散,900~700 hPa 以偏南风为主,利于暖湿水汽输送,高层以偏西气流为主,活跃的暖平流有利于形成较强的平流逆温。13 日午后冷空气抵达关中,整层相对湿度显著增加,并伴有明显的上升运动,泾河站的降水及中层偏北风加大和低层转为较强的偏西风均利于污染物扩散稀释。

(3)持续维持的贴地逆温结构和较低的混合层高度抑制了污染物的垂直扩散,是导致重霾污染的重要原因。泾河站 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与贴地逆温高度和逆温强度均表现为显著的正相关,与混合层高度为显著的负相关,污染时段的平均逆温高度和逆温强度分别为清洁时段的 2.3 倍和 2.0 倍,而清洁时段的平均混合层高度约为污染时段的 2.5 倍。

(4)TrajStat 模拟表明,受关中地区特殊地形影响,西安附近的污染气团在盆地内徘徊,且移速缓慢,不易将污染物扩散出去,来自陕南的暖湿气团通过增加关中地区的湿度从而增加颗粒物浓度,二者共同导致泾河站出现重霾污染。

参考文献:

- [1] 徐永清,张弛,王庆祥,等. 城市近地层风特征与污染系数分析[J]. 气象与环境科学,2014, 37(3): 55-59.
- [2] 王跃思,张军科,王莉莉,等. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 388-396.
- [3] 李浩文,张阿思,步巧利,等. 2015 年干季佛山一次重空气污染过程形成机理研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3044-3053.
- [4] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 1-9.
- [5] XU W Y, ZHAO C S, RAN L, et al. Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(9): 4353-4369.
- [6] 蒋伊蓉,朱蓉,朱克云,等. 京津冀地区重污染天气过程的污染气象条件数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2681-2692.
- [7] 李青春,李炬,郑祚芳,等. 冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 513-524.
- [8] 张建忠,李坤玉,王冠岚,等. 京津冀 4 次重度污染过程的气象要素分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 19-25.
- [9] 崔萌,安兴琴,范广洲,等. 北京一次重污染过程的天气成因及来源分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3628-3638.
- [10] 王跃,王莉莉,赵广娜,等. 北京冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 173-184.
- [11] 张蓬勃,姜爱军,孙佳丽,等. 江苏秋季霾的年代际变化特征及其影响因素分析[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 205-212.

- [12] 战杨志豪,谢旻,罗干,等. 2018 年冬季南京重霾污染特征及气象因素分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(11): 4038-4047.
- [13] 戴竹君,高辉,李力,等. 新型探测资料在 2014 年春节污染天气中的应用[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 78-86.
- [14] 吴蒙,罗云,吴兑,等. 佛山地区干季边界层垂直风温结构对空气质量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4458-4466.
- [15] 宋焱,邓涛,吴兑,等. 广州地区典型灰霾过程及不同天气类型下边界层高度研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5): 1381-1391.
- [16] 黄俊,廖碧婷,王春林,等. 新型垂直探测资料在污染天气分析中的应用[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 92-105.
- [17] 李星敏,陈闯,董自鹏,等. 关中颗粒物粒径谱特征及其气象影响因子分析[J]. 气象, 2018, 44(7): 929-935.
- [18] 黄少妮,袁媛,井宇,等. 陕西关中地区冬季一次重霾污染过程及气象条件影响分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 1037-1046.
- [19] 高维英,李明,李茜,等. 关中地区重污染发生和减弱天气类型及气象要素定量特征[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 102-109.
- [20] 刘慧,井宇,黄少妮,等. 陕西关中地区一次霾转沙尘过程的气象条件分析[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(3): 8-15.
- [21] 魏俊涛,杨晓春,杜萌萌,等. 关中地区大气污染特征分析[J]. 陕西气象, 2022(1): 53-58.
- [22] 贺千山,毛节泰,陈家宜,等. 基于激光雷达遥感和参数化模式研究城市混合层的发展机制[J]. 大气科学, 2006, 30(2): 293-306.
- [23] WANG Y Q, ZHANG X Y, DRAXLER R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(8): 938-939.
- [24] 王莉莉,王跃思,王迎红,等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 924-930.
- [25] 杨素英,赵秀勇,刘宁微. 北京秋季一次重污染天气过程的成因分析[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(5): 13-16.
- [26] WANG X, WANG W, YANG L, et al. The secondary formation of inorganic aerosols in the droplet mode through heterogeneous aqueous reactions under haze conditions[J]. Atmospheric Environment, 2012, 63: 68-76.
- [27] ZHANG Q, LI H. A study of the relationship between air pollutants and inversion in the ABL over the city of Lanzhou[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(4): 879-886.