

王悦,衣娜娜,姜学恭,等.基于多源观测数据的强沙尘天气过程诊断[J].中国沙漠,2024,44(6):195-206.

基于多源观测数据的强沙尘天气过程诊断

王悦¹,衣娜娜²,姜学恭³,宁贵财¹,苏练¹,夏海云¹

(1.南京信息工程大学 大气物理学院,江苏 南京 210044; 2.内蒙古自治区人工影响天气中心,内蒙古 呼和浩特 010000; 3.内蒙古自治区气象台,内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 利用激光雷达垂直观测、大气污染和气象常规观测、卫星观测及再分析等多源数据,结合后向轨迹模拟和天气学诊断等方法分析了2023年3月21—23日发生在中国北方地区的一次强沙尘过程结构特征并探究了其演变机制。结果表明:此次事件在蒙古气旋的影响下自西北向东南地区扩散,途经巴彦淖尔市—呼和浩特市—张家口市,最终抵达北京市。期间,北京市PM₁₀浓度峰值1 667 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,显著小于其邻近上风向张家口市的峰值浓度(9 993 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。沙尘越过张家口后受燕山阻挡,浓度显著衰减,后向轨迹结果表明,受气旋前部西南气流作用,部分沙尘离开张家口后沿东北路径传输至东北。沙尘事件垂直结构表明,北京上空沙尘传输高度可达6 000 m,且对流层垂直运动呈三明治结构,即近地面~920 hPa下沉、920~700 hPa上升、650~450 hPa下沉。上述三明治结构不利于沙尘在北京地区沉降,是北京沙尘浓度偏低的关键原因。沙尘事件时间演变特征表明,北京雷达数据反演后向散射系数快速升高后缓慢降低,同时PM_{2.5}/PM₁₀比值从0.73降至0.18。

关键词: 沙尘路径; 垂直结构; 北京市; 气象因子; 激光雷达

文章编号: 1000-694X(2024)06-195-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00075

中图分类号: P457

文献标志码: A

0 引言

沙尘天气是具有显著灾害性的极端天气,会大幅增加空气中粗颗粒物含量^[1-2],能见度急剧下降,严重危害空气质量,影响交通安全和气候等^[3-5]。对沙尘天气的监测与分析研究一直是大气、生态环境等领域的重要课题。陈洪武等^[6]基于1961—2001年塔里木盆地及周边地区43个监测站点的数据资料,研究了当地强沙尘暴天气过程的时空变化规律及其成因。Lu等^[7]结合了CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)卫星监测数据与HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模式,探讨了华中地区气溶胶的三维输送特征。Attiya等^[8]利用CALIPSO气溶胶层产品数据,分析了2021年6月撒哈拉沙尘暴的特征。Peng等^[9]使用无人机探测分析了2014年8—12月杭州西部海拔<1 km的垂直方向上颗粒物的分布特点。上述研究从多源探测手段

角度对沙尘气溶胶进行了深入剖析,并表明极轨卫星、无人机在沙尘连续性和垂直空间结构探测上均有一定的局限性。激光雷达观测可实现对气体、颗粒物、气溶胶垂直结构的连续观测,被广泛应用于污染、降雨、风切变、边界层高度、气体探测、风能等领域^[10-17]。因此,将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。

华北平原地区人口密集,经济发达,西起太行山和伏牛山,东至黄海、渤海和山东丘陵,北靠燕山,南至大别山区一线与长江流域分界。每年3—5月是该地区沙尘暴频发的主要时段^[18]。北京作为华北平原北部的中心城市,是沙尘自西向东和自北向南传输的必经之地,每年春季常受沙尘天气影响,给经济发展和居民生活带来了极大的困扰,严重威胁人体健康^[19]。北京易受春季沙尘天气影响,尽管近年来的大气污染有所缓解,但防控和治理形势仍然严峻。以PM_{2.5}、PM₁₀等大气污染物为代表的

收稿日期:2024-04-26; 改回日期:2024-08-28

资助项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS04026)

作者简介:王悦(2000—),女,宁夏灵武人,硕士研究生,研究方向为激光雷达遥感与应用。E-mail: 202212050001@nuist.edu.cn

通信作者:衣娜娜(E-mail: yinndongzhl@163.com);夏海云(E-mail: 003333@nuist.edu.cn)

大气污染问题仍然是北京在当前及未来一段时间内面临的主要挑战。

2023年3月19—23日,中国经历了当年最强、影响最广的强沙尘暴天气过程;此过程受影响土地面积约达362万 km^2 ,受影响人口约5.6亿^[20]。在这次强沙尘事件中,外来沙尘在强西北风的作用下于3月22日输送至北京地区,导致北京市出现了 PM_{10} 浓度异常升高、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值骤然降低的情况,污染气体浓度也发生了显著变化,空气质量达到了严重污染级别,严重影响市民的出行和生活。以往关于沙尘事件时空演变规律及其机制的研究,大多利用常规观测资料、卫星遥感数据或者数值模拟的手段^[21-28],且更多地侧重于沙尘事件水平空间演变的特点及机制^[29-30],而有关沙尘事件垂直结构特征及其变化机制仍不清楚,亟待探究。

本研究基于北京市激光雷达的垂直探测资料,综合利用地面气象和大气污染物观测、卫星遥感观测以及ERA5(ECMWF Reanalysis v5)和MERRA-2(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2)再分析等多源资料,重点剖析此次强沙尘过程的垂直结构及其演变特征;并结合后向轨迹模拟和天气学诊断分析等技术手段,从天气系统的高低空配置以及沙尘水平输送和垂直沉降等角度,探究沙尘事件垂直结构演变的机制,以期当地沙尘事件提供新认识。

1 数据和方法

1.1 数据来源

逐小时气象资料来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的第五代大气再分析数据集(ERA5),包括经向风、纬向风、垂直风、10 m阵风风速、海平面气压、位势高度、温度。

MERRA-2 (<https://goldsmr4.ges-disc.eosdis.nasa.gov/data/MERRA2>)是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的气溶胶数据产品。该产品已被学者大量用于沙尘气溶胶的研究中^[31-34],这也为研究沙尘气溶胶的时空变化特征提供了基础。本研究使用的数据包括水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 、时间分辨率为1 h的沙尘气溶胶柱质量密度(Dust Column Mass Density, DCMD),沙尘气溶胶光学厚度(Dust

Extinction Aerosol Optical Thickness 550 nm, DAOD),气溶胶光学厚度(Total Aerosol Extinction Aerosol Optical Thickness 550 nm, AOD)数据和水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 、时间分辨率为3 h的Dust Mixing Ratio数据。用DAOD/AOD的值表示沙尘气溶胶在气溶胶类型中的占比。

2023年3月21—23日逐小时 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据以及污染气体浓度数据来自中国环境监测总站,可通过<http://quotsoft.net/air/>下载;绘制Skew T-lnP图所用温度、压强、湿度以及风向风速数据来源于美国怀俄明大学(<http://weather.uwyo.edu/>);北京逐小时温度、地面气压、相对湿度、风速、风向数据来自羲和能源大数据平台。

CALIPSO卫星是由NASA及法国国家空间研究中心(National Centre for Space Studies, CNES)在1998年开始联合研发的气象极轨卫星,可以提供自2006年以来全球云和气溶胶的垂直廓线资料。CALIPSO卫星的L2 VFM(Vertical Feature Mask)产品根据激光的后向散射和消光信息,将激光通过的各高度层分类为云或气溶胶。VFM垂直剖面图中可见大量气溶胶分布。

本研究使用了相干多普勒测风激光雷达(Coherent Doppler wind lidar, CDWL)垂直探测数据,以下简称“雷达”,布设于北京海淀区软件研究所($39^\circ 58' 47.18''\text{N}$, $116^\circ 20' 13.66''\text{E}$)。雷达采用人眼安全的 $1.5 \mu\text{m}$ 波长,激光发射脉冲能量 $150 \mu\text{J}$,雷达的脉冲重复频率10 kHz,望远镜口径70 mm,时间分辨率1 s,空间分辨率30 m,最大探测距离15 km(表1)。雷达采用VAD扫描模式,周期约为2 min。本研究中所用雷达数据产品包括垂直速度和后向

表1 相干多普勒测风激光雷达参数
Table 1 Key parameters of the CDWL

| 参数 | 值 |
|--------|--------------------------|
| 波长 | $1.5 \mu\text{m}$ |
| 脉冲能量 | $150 \mu\text{J}$ |
| 望远镜口径 | 70 mm |
| 脉冲重复频率 | 10 kHz |
| 时间分辨率 | 1 s |
| 空间分辨率 | 30 m |
| 最大探测距离 | 15 km |
| 方位角 | $0^\circ \sim 360^\circ$ |
| 俯仰角 | $0^\circ \sim 90^\circ$ |

散射系数。

1.2 HYSPLIT 模式

混合单粒子拉格朗日积分轨道(HYSPLIT)模型是由美国国家海洋和大气管理局的空气资源实验室和澳大利亚气象局在过去20年间联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。该模型已经被广泛地应用于多种污染物各个地区的传输和扩散研究中。本研究采用HYSPLIT模型(<https://www.ready.noaa.gov/index.php>)追踪了2023年3月22日北京和传输下风向城市济南发生的沙尘天气后向轨迹。沙尘污染输送及潜在源区分析所用的气象资料为美国国家环境预报中心(The National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的全球资料同化系统(Global Forecast System, GDAS)数据,时间分辨率为6 h,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

2 沙尘过程时空演变

2.1 沙尘事件的大气环流背景

2023年3月21日500 hPa高空槽位于蒙古国西部,此后迅速东移并加深,蒙古国西南部及内蒙古西部等地的高空气流由暖平流转变为强烈的冷平流,强风为沙尘在沙源地产生和向远处传输提供了动力条件(图1)。同时地面蒙古气旋,向东南移动发展,逐渐逼近中国内蒙古地区。22日01:00,气旋后部西北风带来的沙尘造成张家口 PM_{10} 浓度接近 $10\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。随着高空槽持续东移,22日06:00在蒙古国东部至内蒙古东北部形成切断低压,等压线密集程度增强,北京市的 PM_{10} 浓度上升至约 $1\,700\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,一些监测站 PM_{10} 浓度甚至超过 $2\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较6 h前增加了近10倍。同时,蒙古气旋向东北方向继续移动,影响范围扩大,14:00冷锋延伸至山东,山东地区出现强风和沙尘暴,济南市17:00的 PM_{10} 浓度达到 $4\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,地面阵风风速达 $4.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 沙尘事件的时空演变

21日14:30,沙尘主要分布在蒙古国南部、中国内蒙古以及东北地区,DAOD/AOD较高,数值接近1,DCMD高值超过 $0.003\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。22日,沙尘气溶胶含量减少,DCMD数值下降(图2)。环境监测站 PM_{10} 浓度的水平时空分布显示 PM_{10} 浓度自西北向

东南逐渐扩散(图3)。21日15:00, PM_{10} 浓度高值区集中在甘肃、宁夏、内蒙古西部等地区,中国东北和中南地区基本未受到沙尘影响, PM_{10} 浓度小于 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;22日06:00,影响范围进一步扩大,内蒙古大部分、河北、山西、北京等地区 PM_{10} 浓度达到或超过 $1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,沙尘已经影响到北京,北京 PM_{10} 浓度超过 $1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;22日18:00,沙尘已经扩散至东南地区、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山东等地, PM_{10} 浓度超过 $1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图4为沙尘天气途经城市 PM_{10} 小时浓度变化曲线。内蒙古巴彦淖尔市和呼和浩特市 PM_{10} 浓度在3月21日20:00和23:00先后达到 $2\,546\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2\,271\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。随着沙尘向东南方向移动,张家口市在22日00:00 PM_{10} 浓度迅速增至 $8\,169\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相比前一小时增加近 $8\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,且在01:00 PM_{10} 浓度达到峰值 $9\,993\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。本次沙尘过程主要起源于蒙古国南部和新疆南部^[20],张家口市不仅受到新疆远程沙尘传输的影响,还受到蒙古国沙尘传输的影响,因此张家口市的 PM_{10} 浓度远大于巴彦淖尔市与呼和浩特市的 PM_{10} 浓度峰值。北京市在3月22日06:00 PM_{10} 浓度增至最高 $1\,667\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,不足张家口市浓度峰值的20%。22日17:00济南市 PM_{10} 浓度峰值达到 $4\,095\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是北京市 PM_{10} 浓度峰值的两倍。

图5为CALIPSO卫星于2023年3月22日04:32探测到的气溶胶垂直分布。内蒙古和蒙古国南部地区(37.20°N — 45°N 、 108.0°E — 110.4°E)在离地面1~7.8 km高度存在明显的沙尘气溶胶。这一气溶胶分布与当地 PM_{10} 观测高值区的位置吻合,表明该区域已经受到较强的沙尘天气影响,且沙尘气溶胶可垂直输送至对流层中高层,有利于沙尘气溶胶向下风向地区传输。此次沙尘事件在向东传输过程中,张家口市近地面沙尘浓度达到峰值, PM_{10} 高达 $9\,993\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;而紧邻张家口的北京市近地面沙尘浓度不足张家口市的20%, PM_{10} 浓度仅为 $1\,667\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;位于北京市下风向的济南市近地面沙尘浓度是北京市沙尘浓度峰值的两倍, PM_{10} 浓度高达 $4\,095\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3 沙尘过程对北京市空气质量影响机制

3.1 北京市近地面大气污染物变化特征

沙尘影响前后,北京市颗粒物以及污染气体浓

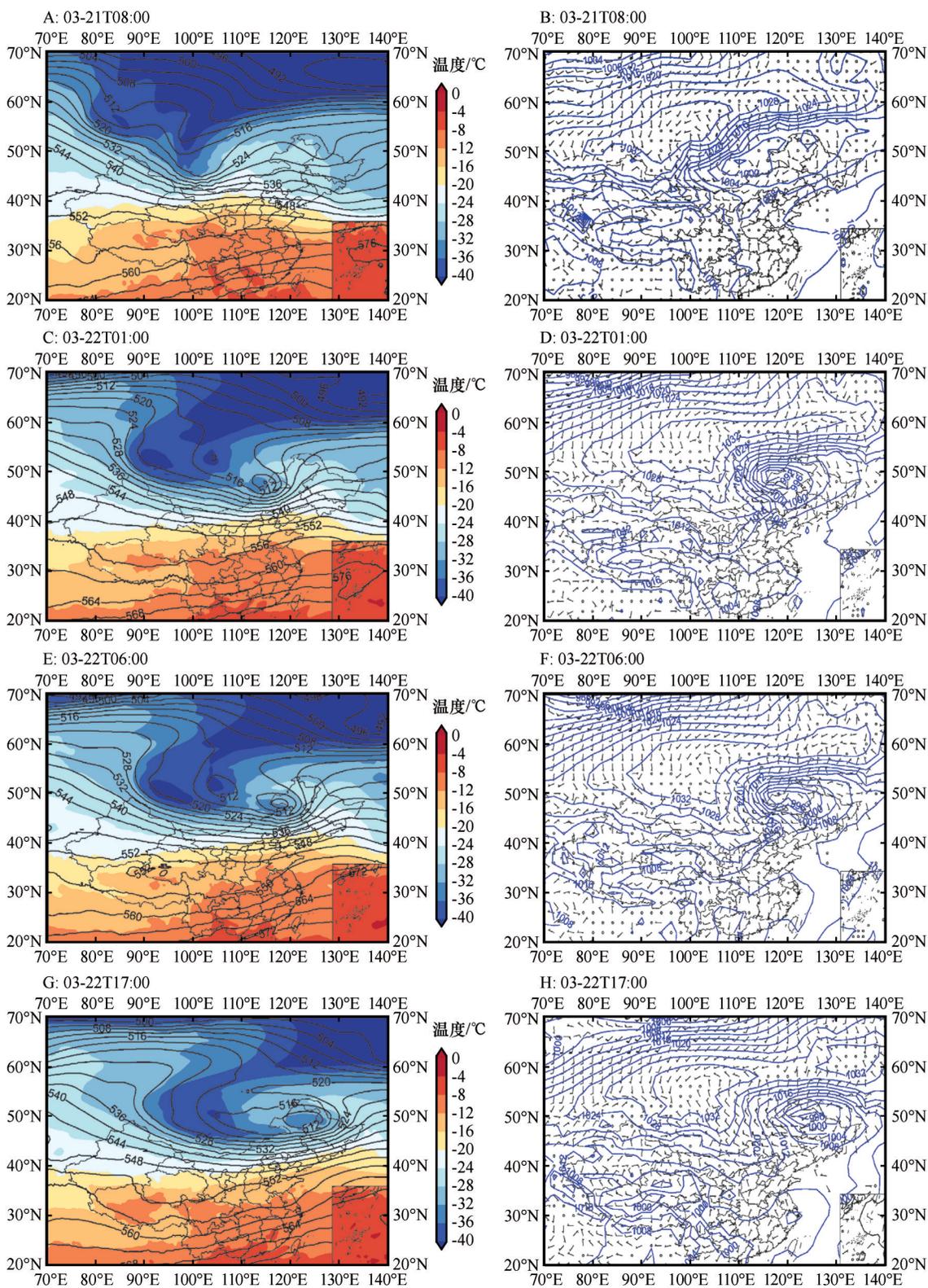


图1 2023年3月21日08:00(A,B)、3月22日01:00(C,D)、3月22日06:00(E,F)、3月22日17:00(G,H)

500 hPa温度(阴影;单位:°C;A,C,E,G)、500 hPa位势高度(等值线;单位:gpm;A,C,E,G)和
海平面气压场(等值线;B,D,F,H)、10 m阵风风羽(风羽,单位:m·s⁻¹;B,D,F,H)

Fig.1 500 hPa temperature (shading; units: °C; A, C, E, G), 500 hPa geopotential height (contours; units: gpm; A, C, E, G), sea level pressure (contours; B, D, F, H), 10 m gust wind plume (B, D, F, H; unit: m·s⁻¹) at 08:00 BJT on 21(A, B), 01:00 BJT on 22(C, D), 06:00 BJT on 22 (E, F) and 17:00 BJT on 22(G, H), March 2023

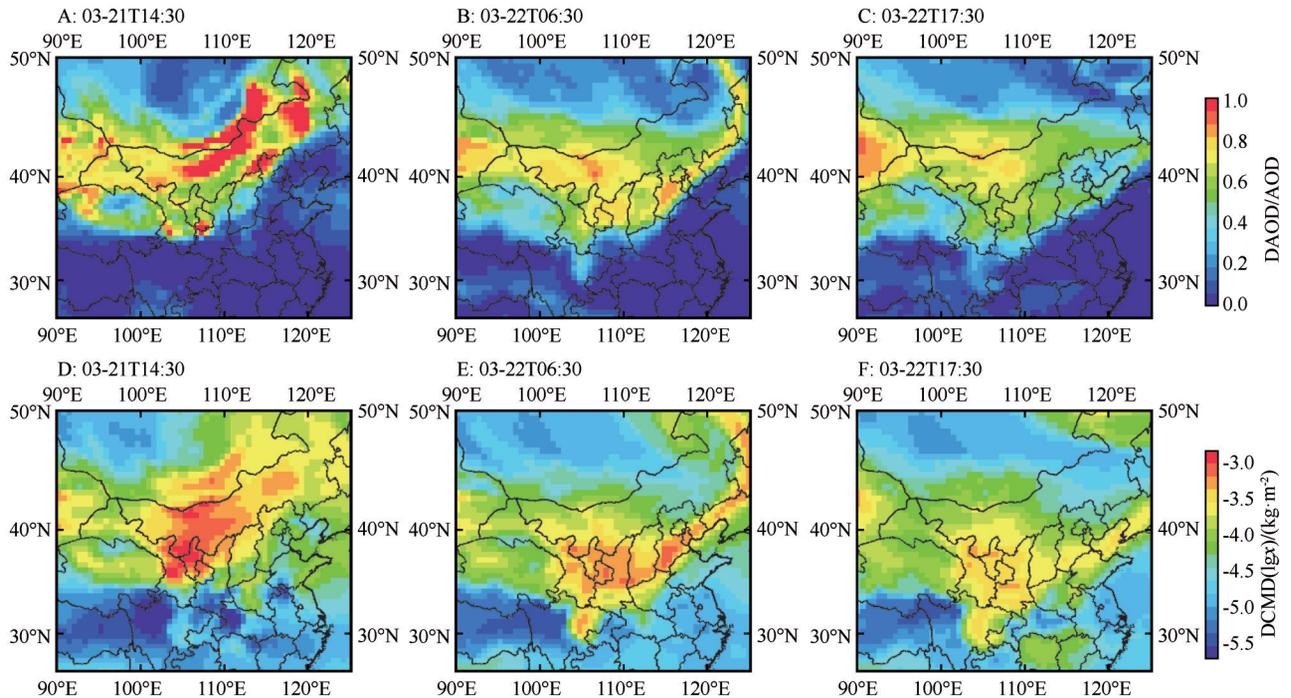


图2 2023年3月21日14:30(A,D),22日06:30(B,E),22日17:30的(C,F)沙尘天气DAOD/AOD时空分布和DCMD时空分布

Fig.2 Spatial distribution of the typical dust storm occurred for multi-source datasets (DAOD/AOD, DCMD) at (A, D) 14:30 BJT on 21 March, (B, E) 06:30 BJT and (C, F) 17:30 BJT on 22, March 2023

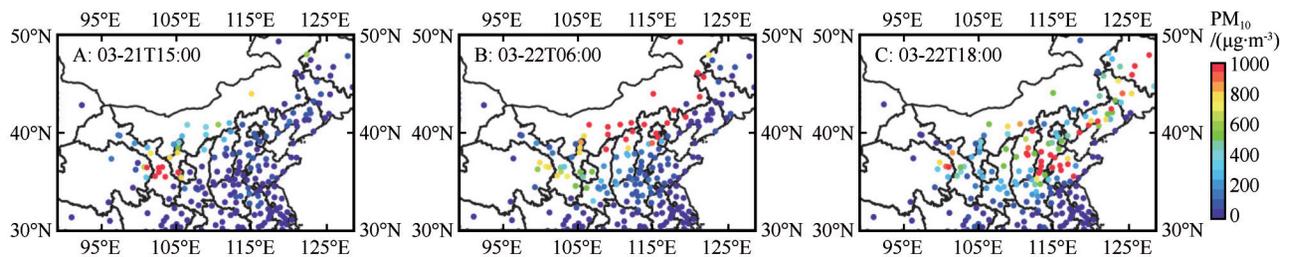


图3 2023年3月21日15:00(A),22日06:00(B),22日18:00(C)的PM₁₀浓度时空分布

Fig.3 Spatial distribution of the typical dust storm occurred for PM₁₀ concentration at (A) 15:00 BJT on 21 March, (B) 06:00 BJT and (C) 18:00 BJT on 22, March 2023

度出现明显变化(图6)。PM₁₀小时浓度呈现快速升高后缓慢降低的变化趋势,从22日03:00的200 μg·m⁻³上升至06:00的1 667 μg·m⁻³,19:00回落至285 μg·m⁻³。PM_{2.5}小时浓度与PM₁₀小时浓度的时间演变趋势一致。Fang等^[35]指出沙尘影响前后,PM_{2.5}/PM₁₀比值差可高达60%。在沙尘影响期间,颗粒物浓度通常表现为PM₁₀浓度快速上升,同时PM_{2.5}/PM₁₀比值明显下降。此次沙尘影响期间,北京市PM_{2.5}和PM₁₀小时浓度以及PM_{2.5}/PM₁₀比值的变化趋势与受沙尘影响的颗粒物变化特征相似。PM_{2.5}/PM₁₀比值呈现断崖式下降,从22日01:00的0.73降至09:00最低值0.18。受到沙尘影响后,气态污染物浓度呈现下降趋势,CO和NO₂浓度呈现明显下降的

趋势,而O₃浓度略下降。由激光雷达反演的垂直速度和后向散射系数垂直分布(图7)可知,在22日02:20时,北京市上空下沉速度开始增大,下沉气流增强,沙尘沉降至北京市地面,后向散射系数明显增大,PM₁₀浓度开始上升;06:00下沉运动减弱并逐渐转为上升运动,沙尘浓度开始下降,后向散射系数开始减小,PM₁₀浓度开始降低,直至22:00 PM₁₀浓度降至200 μg·m⁻³以下。

3.2 沙尘影响期间北京市探空廓线

北京市位于华北平原的西北端,燕山位于北京市北部,山体呈东西走向,长约300 km,海拔达2 116 m^[36]。根据北京站的探空 Skew T-lnP 数据(图8),对流层

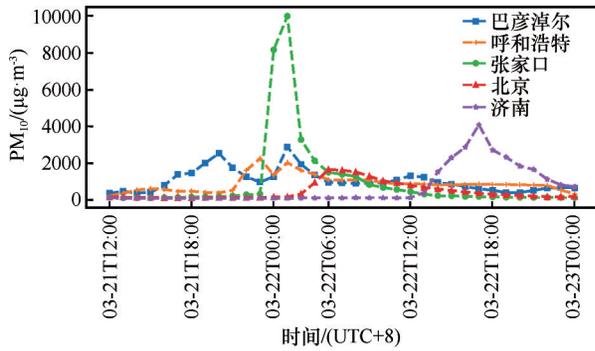


图4 2023年3月21日12:00—2023年3月23日00:00沙尘途经城市PM₁₀浓度逐小时变化(3月22日02:00和05:00的值缺测)

Fig.4 Hourly variation characteristics of PM₁₀ concentration during sand and dust pollution weather events in cities along the route of dust pollution weather event from 12:00 BJT 21 to 00:00 BJT 23, March 2023 (Missing values at 02:00 and 05:00 on March 22)

气温随高度下降。然而当冷空气携带着沙尘下山时,温度升高,增温时也伴随西北风增大。在沙尘来临前,地面处于低气压,相对湿度均值达到60%,当沙尘来临时,地面气压明显增大,风向由西南风转西北风,且风速开始增大,相对湿度开始降低,且在06:00相对湿度达到最低,这时PM₁₀浓度最大。而当沙尘逐渐移出北京市,风向由西北风转为偏北风,相对湿度呈增大趋势。在沙尘天气影响期间,北京市地面气压增大,相对湿度明显降低,日最高温度降低,表明本次沙尘过程主要受到上风向地区干燥冷空气的影响。为探究沙尘突破对流层浮力下沉到地面的过程,本研究使用ERA5数据对北京市风场(*u, v*)的变化结合地面PM₁₀浓度的变化进行分析,可以看出在沙尘影响期间空中的西北风增大时间先于地面大风,西北风逐渐向下传导。

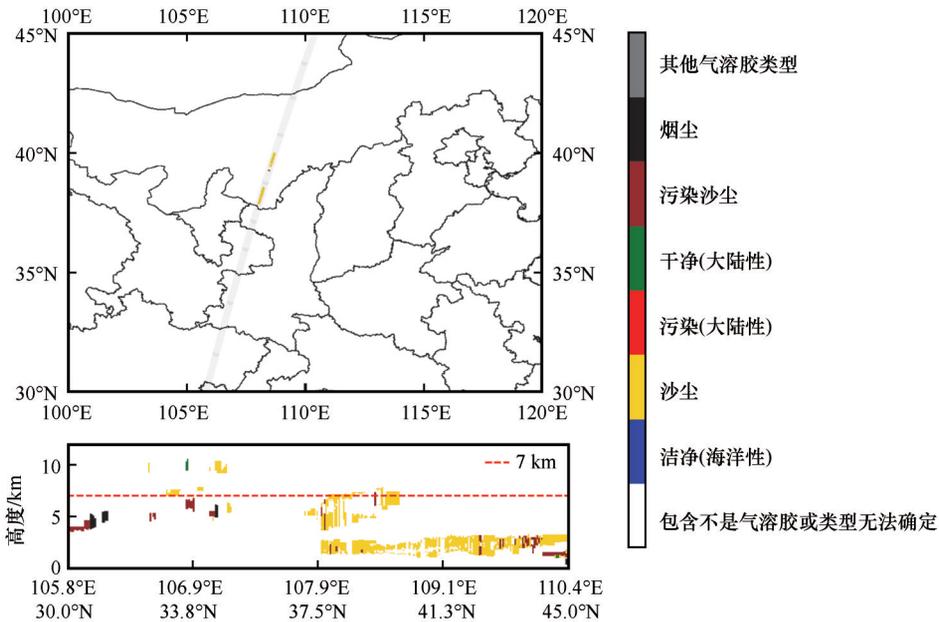


图5 CALIPSO卫星在2023年3月22日04:32观测的气溶胶类型(卫星运行轨迹:灰色阴影)

Fig.5 The type of aerosol observed by CALIPSO satellite at 04:32 BJT on 22, March 2023 (Satellite trajectory: grey shading)

3.3 北京市沙尘来源及路径

上风向传至北京的沙尘并没有完全降落于北京,而是继续传输至下风向地区;下风向城市济南的PM₁₀浓度峰值达到北京PM₁₀浓度峰值的两倍(图4)。首先以北京市为模拟受点,模拟起始高度分别设定为500 m(路径1)、2 000 m(路径2)和4 000 m(路径3),从22日06:00开始进行10 h气团后向轨迹追踪;

以济南市为模拟受点,模拟起始高度分别设定为500 m(路径4)、2 000 m(路径5)和4 000 m(路径6),从22日17:00开始进行24 h气团后向轨迹追踪。结果显示,本次传至北京市的沙尘主要有3条传输路径,均经过上风向西北地区传输至北京市,主要的沙尘源地为蒙古国以及中国西北地区的荒漠化地区(图9)。本次传至北京的沙尘轨迹传输高度可达6 000 m。沙尘在移动过程中经过巴彦淖尔、呼和

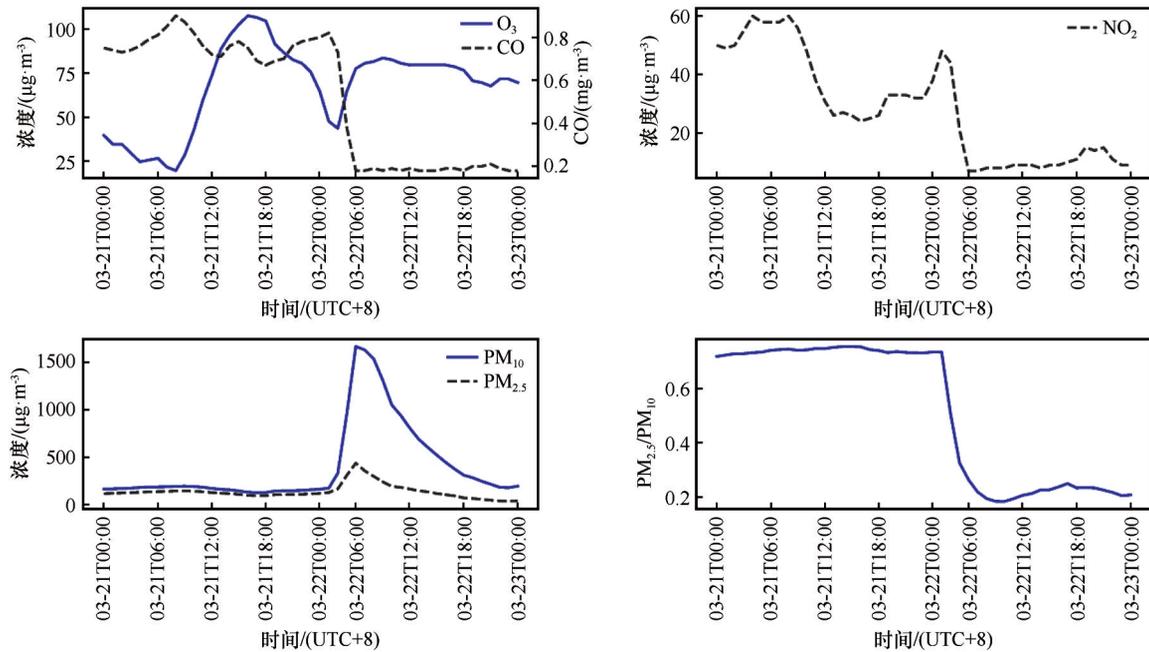


图 6 沙尘影响前后北京市颗粒物浓度、比例与气态污染物浓度时间变化(3月22日 02:00和05:00的值缺失)

Fig.6 Time series of particle concentration, proportion and gaseous pollutant concentration in Beijing City before and after the impact of dust (Missing values at 02:00 and 05:00 on March 22)

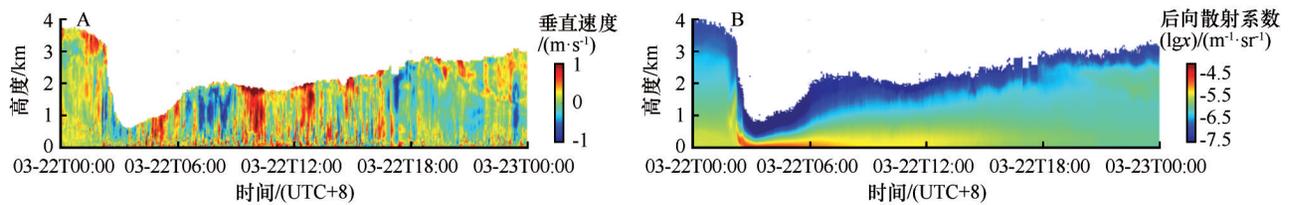


图 7 沙尘影响前后激光雷达反演垂直速度剖面(A)与后向散射系数剖面(B)

Fig.7 Vertical profiles of vertical velocity (A), backscattering coefficient (B) by lidar before and after the impact of dust

浩特、张家口等市到达北京,然后继续向下风向地区如济南市传输。气团路径1对北京市沙尘浓度影响最大,其次为气团路径3,气团路径2对北京市沙尘浓度贡献最少。将济南市作为起始点进行气团后向轨迹追踪,发现气团路径4对济南市颗粒物浓度影响最大。

北京市气团后向轨迹路径1上沿途城市监测点的PM₁₀浓度整体大于路径2和路径3沿途城市PM₁₀的浓度,结合 Dust Mixing Ratio 的浓度分布可以确定气团路径1对北京市沙尘浓度影响最大,且路径1上的沙尘浓度相较路径2和路径3是最高的。济南市气团后向轨迹上的城市PM₁₀浓度分布,可以看到气团路径4和路径5对济南市沙尘浓度产生影响,气团路径6几乎对济南市沙尘没有贡献。

此前的研究表明,风速的变化对大气污染物扩散和沉降有显著影响,对污染过程的严重程度和持续时间也起到关键作用^[37]。

3月21日至22日,沙尘污染席卷了巴彦淖尔市、呼和浩特市、张家口市、北京市和济南市(图10)。在巴彦淖尔市,21日15:00—17:00,750 hPa气压层以下的上升气流卷起了本地沙尘,使PM₁₀浓度显著增加。18:00开始,850~750 hPa气压层出现下沉气流,导致高空沙尘快速沉降,PM₁₀浓度持续上升;21日23:00—22日01:00,700 hPa气压层以上的强下沉气流加强了沉降作用进而影响了沙尘传输,进一步加剧了PM₁₀浓度的增加。呼和浩特市在沙尘来袭前,低空强烈上升气流导致本地沙尘扬起,PM₁₀浓度增加;21:00开始,强烈下沉气流影响使高空沙尘部分沉降至地面,继续加剧了污染。张家口市的情况略有不同,在21日23:00前,450 hPa气压层以下主要为上升气流,PM₁₀浓度基本保持不变;23:00强下沉气流开始出现并促进了沙尘沉降,PM₁₀浓度急剧增加,表明沙尘主要来自高空输送并快速

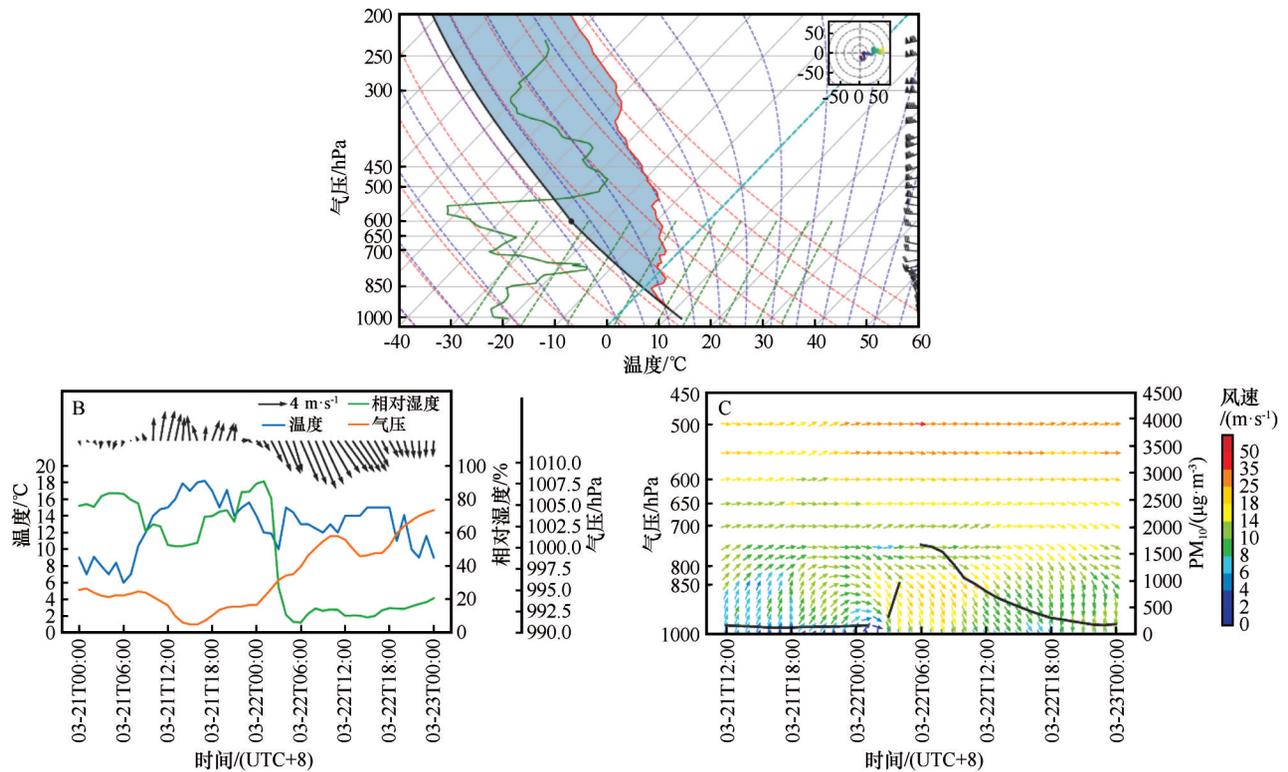


图8 北京市(A)2023年3月22日08:00探空曲线,(B)21日00:00—23日00:00风速、风向、温度、相对湿度、地面气压时间变化,(C)21日12:00—23日00:00 PM_{10} 和风电场(u, v)时间变化(3月22日02:00和05:00的 PM_{10} 值缺失)

Fig.8 (A) The Skew T-lnP diagram of Beijing Sounding Station at 08:00 BJT on 22, March 2023, (B) Time series of wind speed, wind direction, temperature, relative humidity, ground pressure in Beijing City from 00:00 BJT 21 to 00:00 BJT 23, March 2023, (C) The temporal changes of PM_{10} and wind field (u, v) during sand and dust pollution weather events in cities along the route of dust pollution weather event from 12:00 BJT 21 to 00:00 BJT 23, March 2023 (Missing PM_{10} values at 02:00 and 05:00 on March 22)

沉降至地面,引发了重污染事件;22日01:00开始, PM_{10} 浓度下降,沙尘向下风向传输。北京市作为张家口市沙尘传输的紧邻下风向地区,22日03:00开始,低空出现下沉气流, PM_{10} 浓度增加;04:00—11:00,920 hPa以下为下沉气流,而920~700 hPa为强上升气流,700 hPa以上为下沉气流,对流层风场呈三明治结构导致高空输送的沙尘难以沉降,致使部分低空沙尘沉降至北京市地面,大部分沙尘仍然通过高空气流继续传输。在济南市,当 PM_{10} 浓度上升时,750 hPa气压层以下主要为下沉气流,导致高空的沙尘在济南市沉降,济南市的 PM_{10} 浓度峰值是北京市的两倍,污染程度更为严重。综上可知,沙尘过境期间,北京市上空对流层低层下沉—上升—下沉三明治的风场结构可能是导致北京市地面沙尘浓度显著低于其上风向地区张家口市和下风向地区济南市的关键原因。

4 结果与讨论

沙尘天气发生时,空气质量急剧下降、能见度降低,会给源地及下风向地区的生态环境和人类生活造成巨大损失^[38-43],以往的研究多关于沙尘天气的时空变化特征、强沙尘暴天气过程的大尺度系统及对应物理量的分析^[44-45],对沙尘事件垂直结构特征及其变化机制亟需深入探究。本研究综合利用激光雷达垂直观测、大气污染和气象常规观测、卫星观测以及再分析等多源数据,结合后向轨迹模拟和天气学诊断分析等方法对2023年3月21—23日发生在中国北方地区的一次强沙尘过程的水平以及垂直结构特征进行了分析并对其演变机制进行了探究。

此次沙尘过程的主要影响系统为蒙古气旋,沙尘随气旋自西向东扩散,影响了北京、巴彦淖尔、呼和浩特、张家口、济南等诸多城市。沙尘影响北京

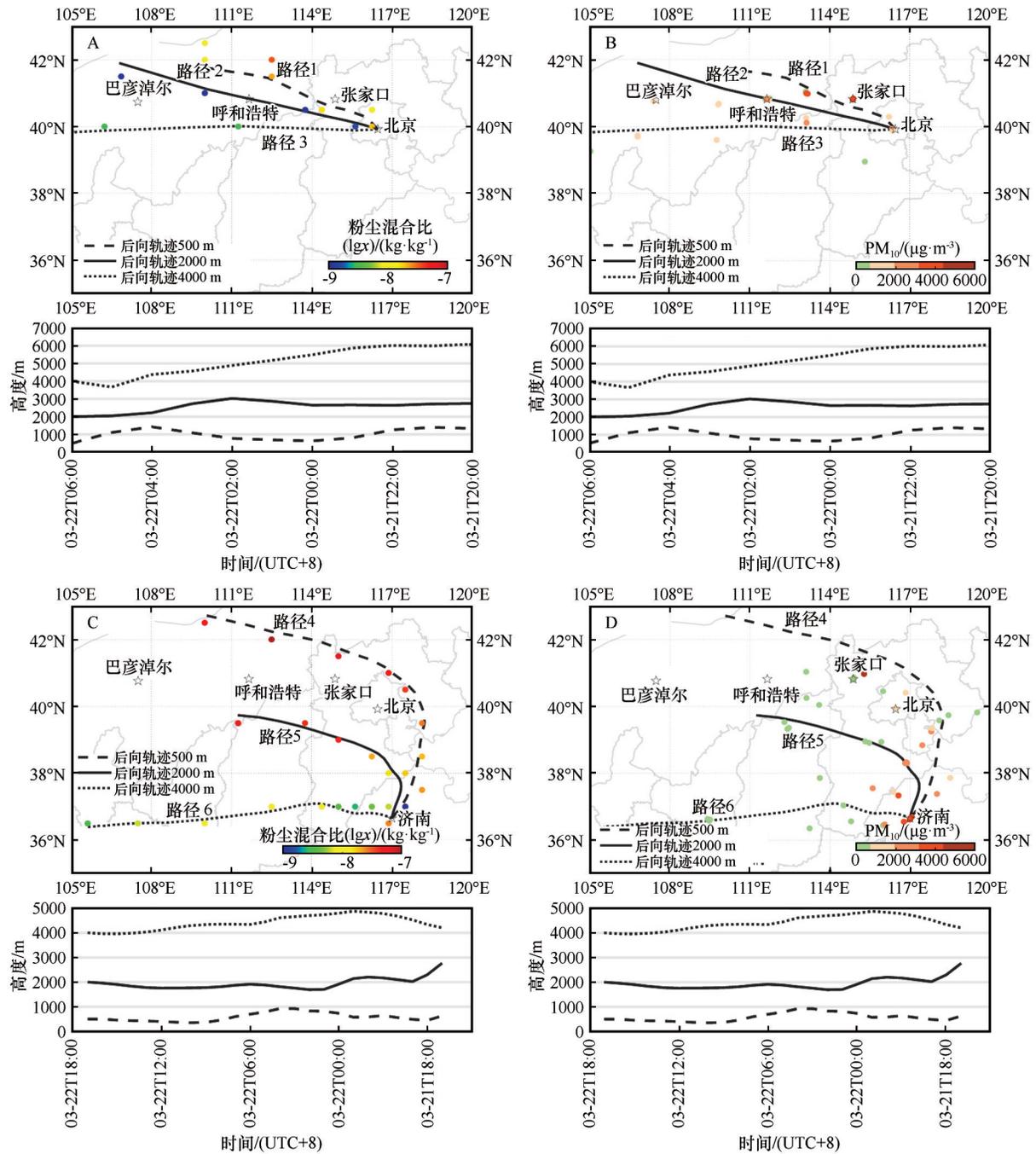


图9 沙尘天气后向轨迹。A,C图中轨迹上MERRA2 Dust Mixing Ratio浓度分布;B,D轨迹上地面PM₁₀的浓度分布。
虚线为500 m气团路径,实线为2 000 m气团路径,点线为4 000 m气团路径

Fig.9 Backward trajectory during dust pollution weather events. (A, C) spatial distribution of MERRA-2 Dust Mixing Ratio; (B, D) spatial distribution of ground PM₁₀ concentration along the route of dust pollution weather event, respectively. The dashed line is the 500 m air mass path, the dashed line is the 2 000 m air mass path, and the dash dot line is the 4 000 m air mass path

期间,北京雷达探测的下沉速度明显增大,下沉气流增强,水平风向出现明显转变,PM₁₀浓度变大,PM_{2.5}/PM₁₀比值从0.73降至0.18,其他污染物如O₃、CO、NO₂浓度也呈下降趋势,PM₁₀浓度和雷达反演的后向散射系数的变化呈现出随时间快速升高后

缓慢降低的趋势,地面气压增大,日最高温度降低,相对湿度降低,空中西北风的增强明显早于地面大风,西北大风逐渐向下传导。

北京的沙尘天气一直是国内外科学家研究的重点^[46-48],然而目前关于燕山地形对北京沙尘浓度

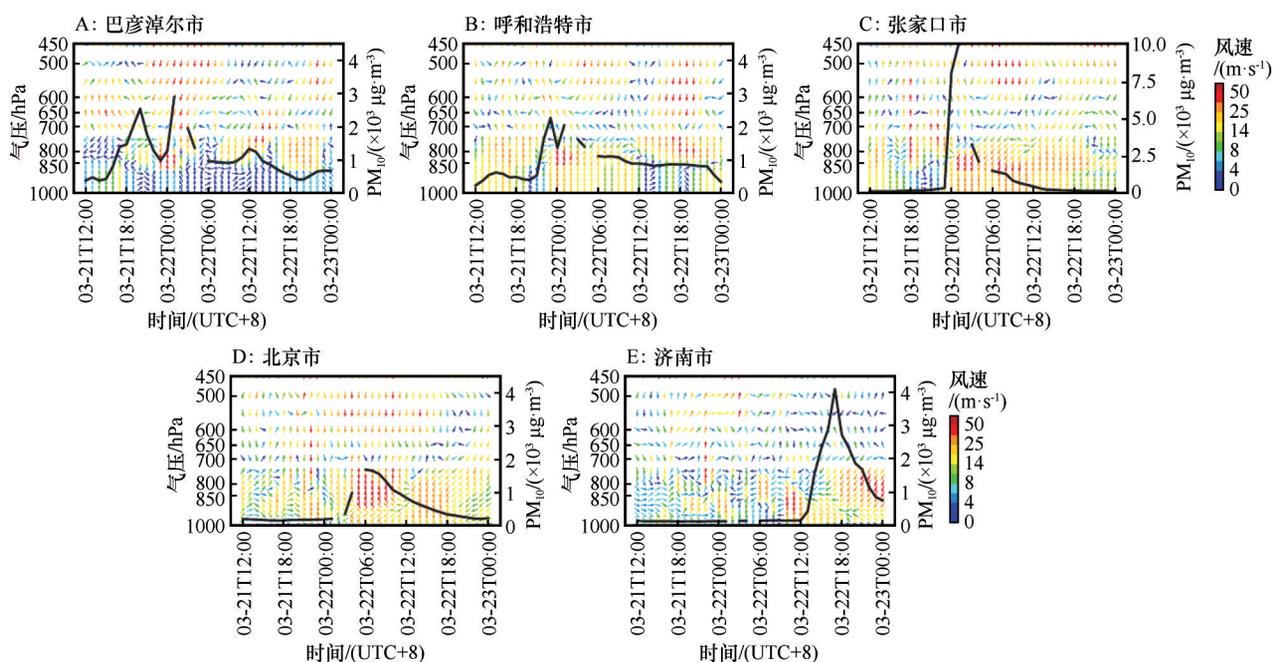


图10 2023年3月21日12:00—2023年3月23日00:00沙尘途经城市 PM_{10} 和 wind field ($v, w \times (-50)$) 时间变化 (3月22日02:00和05:00的 PM_{10} 值缺失)

Fig.10 The temporal changes of PM_{10} and wind field ($v, w \times (-50)$) during sand and dust pollution weather events in cities along the route of dust pollution weather event from 12:00 BJT 21 to 00:00 BJT 23, March 2023 (Missing PM_{10} values at 02:00 and 05:00 on March 22)

影响的研究较少,唐杨等^[19]对北京降尘量开展了为期一年的连续观测,得出沙尘会受到燕山山脉的阻挡使得北京降尘量变少。本研究通过对沙尘传输路径结合风场以及 PM_{10} 浓度的变化分析发现燕山对于北京沙尘的阻挡作用。此次沙尘过程中,北京市 PM_{10} 浓度峰值达到 $1\ 667\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,显著小于邻近上风向张家口市的浓度峰值 $9\ 993\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,沙尘强度显著减弱,原因首先是沙尘越过张家口后受到燕山山脉的阻挡作用,其次根据后向轨迹结果,离开张家口的沙尘有部分受到气旋前部西南风的影响北上传输至东北地区以及河北省东北部。沙尘垂直结构表明,北京市上空沙尘传输高度可达近 $6\ 000\ \text{m}$,且对流层风场呈现出 $1\ 000\sim 920\ \text{hPa}$ 下沉、 $920\sim 700\ \text{hPa}$ 上升、 $650\sim 450\ \text{hPa}$ 下沉的结构,不利于沙尘的沉降,这也是北京市沙尘浓度降低、济南市沙尘浓度大于北京市沙尘浓度的关键原因。

本研究仅利用多源观测以及再分析等多源数据,结合后向轨迹模拟和天气学诊断分析等方法分析探究了此次强沙尘过程以及其演变机制,北京作为受沙尘影响严重的超大城市,关于燕山地形对于北京市沙尘事件中沙尘浓度的定量改善贡献仍有待进一步说明。因此,仍需要在未来的研究中考虑

利用数值模拟并结合多源数据深入探究燕山对北京市沙尘的影响与作用机制,以期为北京沙尘天气的预警和精细化管控提供指导。

参考文献:

- [1] 魏巍,孙萌,王明丽.沙尘天气对青岛市空气质量的影响分析[J].科学技术创新,2019(17):54-55.
- [2] 邱海杰,周佳,周辉,等.2018年沙尘天气对随州空气质量的影响分析[J].环境科学与技术,2019,42(增刊1):159-162.
- [3] 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(5):51-55.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 陈洪武,王旭,马禹.塔里木盆地局地性和区域性强沙尘暴天气过程研究[J].中国沙漠,2003,23(5):533-538.
- [7] Lu X, Mao F Y, Pan Z X, et al. Three-dimensional physical and optical characteristics of aerosols over central China from long-term CALIPSO and HYSPLIT data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 314-321.
- [8] Attiya A A, Jones B G. An extensive dust storm impact on air

- quality on 22 November 2018 in Sydney, Australia, using satellite remote sensing and ground data[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(6): 432–439.
- [9] Peng Z R, Wang D S, Wang Z Y, et al. A study of vertical distribution patterns of PM_{2.5} concentrations based on ambient monitoring with unmanned aerial vehicles; a case in Hangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 357–369.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Wei T W, Xia H Y, Hu J J, et al. Simultaneous wind and rainfall detection by power spectrum analysis using a VAD scanning coherent Doppler lidar[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31235–31245.
- [13] Xia H Y, Chen Y X, Yuan J L, et al. Windshear detection in rain using a 30 km Radius Coherent Doppler Wind Lidar at mega airport in plateau[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(5): 924–935.
- [14] 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.
- [15] Yu S F, Zhang Z, Xia H Y, et al. Photon-counting distributed free-space spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 212–220.
- [16] Zhai X C, Wu S H, Liu B Y. Doppler lidar investigation of wind turbine wake characteristics and atmospheric turbulence under different surface roughness[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): A515–A529.
- [17] Yuan J L, Wu Y B, Xia H Y, et al. Real-time synchronous 3-D detection of air pollution and wind using a Solo Coherent Doppler Wind Lidar [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2809–2817.
- [18] 吴占华, 任国玉. 我国北方区域沙尘天气的时间特征分析[J]. *气象科技*, 2007, 35(1): 96–100.
- [19] 唐杨, 徐志方, 韩贵琳. 北京及其北部地区大气降尘时空分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(2): 115–119.
- [20] 马俊. 北方今春为何风沙有点多[N/OL]. *环球时报*, 2023-03-24(3).
- [21] 徐文帅, 张大伟, 李云婷, 等. 北京两次沙尘污染过程中 PM_{2.5} 浓度变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(1): 78–86.
- [22] Filonchyk M. Characteristics of the severe March 2021 gobi desert dust storm and its impact on air pollution in China[J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 132219.
- [23] Hammer M S, Martin R V, Li C, et al. Insight into global trends in aerosol composition from 2005 to 2015 inferred from the OMI ultraviolet aerosol index [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(11): 8097–8112.
- [24] Farooqui M, West J, Shankar U, et al. Assessment of dust emissions model and PM₁₀ in the United Arab Emirates during dust storms using the CMAQ-WRF Modeling System [C]//American Geophysical Union, Fall Meeting, 2013, abstract id. A41G-0138.
- [25] 霍文, 智协飞, 杨莲梅, 等. 沙漠气象若干问题研究进展[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(3): 469–480.
- [26] Rizza U, Barnaba F, Miglietta M, et al. WRF-Chem model simulations of a dust outbreak over the central Mediterranean and comparison with multi-sensor desert dust observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(1): 93–115.
- [27] Chen S Y, Zhao D, Huang J P, et al. Mongolia contributed more than 42% of the dust concentrations in northern China in March and April 2023 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40: 1549–1557.
- [28] 陈思宇, 黄建平, 李景鑫, 等. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙尘起沙、传输和沉降的对比研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(8): 939–957.
- [29] 顿耀权, 罗万银, 邵梅, 等. 干旱区内陆湖盆沙尘水平通量及粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(6): 166–175.
- [30] 秦豪君, 杨晓军, 马莉, 等. 2000–2020年中国西北地区区域性沙尘暴特征及成因[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(6): 53–64.
- [31] Sun E W, Xu X F, Che H Z, et al. Variation in MERRA-2 aerosol optical depth and absorption aerosol optical depth over China from 1980 to 2017[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, 186: 8–19.
- [32] Gueymard C A, Yang D Z. Worldwide validation of CAMS and MERRA-2 reanalysis aerosol optical depth products using 15 years of AERONET observations [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 225: 117216.
- [33] Yao W R, Che H Z, Gui K, et al. Can MERRA-2 reanalysis data reproduce the three-dimensional evolution characteristics of a typical dust process in East Asia? a case study of the dust event in May 2017[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 902–911.
- [34] Rui W Y, Ke G, Ya Q Wang, et al. Identifying the dominant local factors of 2000–2019 changes in dust loading over East Asia [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 777: 146064.
- [35] Fang G C, Chang C N, Wu Y S, et al. Concentration of atmospheric particulates during a dust storm period in central Taiwan, Taichung [J]. *Science of The Total Environment*, 2002, 287(1/2): 141–145.
- [36] 林威. 你不可不知的2500条地理常识[M]. 内蒙古呼伦贝尔: 内蒙古文化出版社, 2011: 306.
- [37] Lyu Y L, Qu Z Q, Liu L Y, et al. Characterization of dustfall in rural and urban sites during three dust storms in northern China, 2010[J]. *Aeolian Research*, 2017, 28: 29–37.
- [38] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 349–356.
- [39] Chan Y C, Mctainsh G, Leys J, et al. Influence of the 23 October 2002 dust storm on the air quality of four Australian cities

- [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2005, 164: 329–348.
- [40] Liu C M, Young C Y, Lee Y C. Influence of Asian dust storms on air quality in Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3): 884–897.
- [41] 陈跃浩, 高庆先, 高文康, 等. 沙尘天气对大气环境质量影响的量化研究[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(4): 364–369.
- [42] 杨青, 杨莲梅, 张广兴, 等. 能见度与空气质量的关系研究[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2): 278–282.
- [43] 孙兆彬, 安兴琴, 崔蕊莹, 等. 北京地区颗粒物健康效应研究: 沙尘天气、非沙尘天气下颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)对心血管疾病入院人次的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8): 2536–2544.
- [44] 袁瑞瑞, 王建英, 张卫红, 等. 不同路径冷空气导致的宁夏沙尘重污染天气特征及传输规律[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(1): 209–217.
- [45] 盛慧, 颜为军, 孟鑫鑫, 等. 一次典型沙尘过程对我国热带地区空气质量影响分析[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(2): 310–319.
- [46] Xie S, Qi Y Z L, Tang X. Characteristics of air pollution in Beijing during sand-dust storm periods[J]. *Water Air & Soil Pollution: Focus*, 2005, 5(3): 217–229.
- [47] 魏巍, 皮冬勤, 晏平仲, 等. 2017年春季华北地区一次典型沙尘重污染天气过程研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1699–1707.
- [48] 陈辉, 赵琳娜, 赵鲁强, 等. 沙尘天气过程对北京空气质量的影响[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6): 609–614.

Diagnosis of severe dust weather process based on multi-source observational data

Wang Yue¹, Yi Nana², Jiang Xuegong³, Ning Guicai¹, Su Lian¹, Xia Haiyun¹

(1. *School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*; 2. *Inner Mongolia Weather Modification Center, Hohhot 010000, China*; 3. *Inner Mongolia Meteorological Observatory, Hohhot 010000, China*)

Abstract: Study utilized multi-source data including vertical observations from lidar, conventional atmospheric pollution, meteorological observations, satellite observations, and reanalysis data, combined with backward trajectory simulations and weather diagnostic analyses to investigate the structural characteristics and evolution mechanisms of a severe dust event occurring in northern China from March 21st to 23rd, 2023. The results indicate that under the influence of Mongolian cyclones, the event spread from northwest to southeast, passing through Bayannur City, Hohhot City, and Zhangjiakou City before reaching Beijing. During this period, the peak PM₁₀ concentration in Beijing reached 1 667 μg·m⁻³, significantly lower than the peak concentration in its upstream neighbor, Zhangjiakou City (9 993 μg·m⁻³). The reasons for this can be attributed to the significant attenuation of dust concentration after passing through Zhangjiakou due to the obstruction of the Yan Mountains. Furthermore, backward trajectory results indicate that some dust particles were transported northeastward after leaving Zhangjiakou, influenced by the southwest airflow ahead of the cyclone's front. The vertical structure of the dust event shows that dust transport heights over Beijing can reach 6 000 m. The vertical movement of the troposphere is a sandwich-like structure, characterized by subsidence from near the surface to 920 hPa, ascent from 920 hPa to 700 hPa, and subsidence again from 650 hPa to 450 hPa. This sandwich-like structure is not conducive to dust settling in Beijing area, which is the key reasons for the low dust concentration in Beijing. The temporal evolution of the dust event indicates a rapid increase followed by a slow decrease in the backscattering coefficient derived from Beijing lidar data, while the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio decreased from 0.73 to 0.18.

Key words: dust trajectory; vertical distribution; Beijing City; meteorological factors; lidar