

李美琪,范俊红,周爽,等,2026. 京津冀地区一次罕见持续 6 天的沙尘天气维持机制分析[J]. 气象,52(2):190-203. Li M Q, Fan J H, Zhou S, et al,2026. Mechanism analysis of a rare sand-dust weather process for 6 days in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Meteor Mon,52(2):190-203(in Chinese).

京津冀地区一次罕见持续 6 天的沙尘天气维持机制分析^{*}

李美琪^{1,2,3} 范俊红^{1,2,3} 周 爽³ 周 朔³ 高泽田³ 岳艳霞⁴

1 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,河北雄安新区 071800

2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021

3 河北省气象服务中心,石家庄 050021

4 石家庄市气象局,石家庄 050081

提 要: 2023 年 4 月 9—15 日,京津冀地区出现一次罕见的持续 6 d 的沙尘天气。利用常规气象资料、再分析资料、风廓线雷达和激光雷达等新型探测资料,对此次京津冀沙尘天气的特征与维持机制进行分析。结果显示:受蒙古气旋、两次冷锋及偏南气流的持续影响,此次沙尘天气过程长时间维持。蒙古气旋阶段,在蒙古国南部起沙后,沙尘随气旋上升经 700 hPa 急流轴通道传输,主要通过干沉降作用形成近地面扬沙或浮尘天气;冷锋阶段,广泛的沙源地及地面冷锋过境引起地面风速迅速增大,使大量沙尘上升后沿对流层低层急流传输至京津冀,并随冷锋后下沉气流迅速传输至地面;偏南气流阶段,受长江中下游回流沙源影响,在地面高压后部偏南气流作用下持续向北输送沙尘,传输高度较低,主要通过干沉降在地面形成扬沙或浮尘天气。处于不同系统影响下的沙尘特征各异:蒙古气旋阶段沙尘影响较弱,但上边界高度较高;冷锋阶段沙尘浓度高、能见度低,冷锋过境 2 h 后出现沙尘暴,并维持 2 h,在冷锋过境 13 h 后出现洁净空气;偏南气流阶段沙尘持续时间较长,但强度最弱。此次沙尘天气过程,本地湍流耗散率增大早于沙尘浓度增大 3 h,对沙尘暴监测和预报有很好的指示意义。研究结果对沙尘天气预报具有参考意义。

关键词: 京津冀地区,沙尘天气,蒙古气旋,维持机制

中图分类号: P458, X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.123101

Mechanism Analysis of a Rare Sand-Dust Weather Process for 6 Days in Beijing-Tianjin-Hebei Region

LI Meiqi^{1,2,3} FAN Junhong^{1,2,3} ZHOU Shuang³ ZHOU Shuo³ GAO Zetian³ YUE Yanxia⁴

1 CMA Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Hebei, Xiong'an New Area 071800

2 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

3 Hebei Meteorological Service Center, Shijiazhuang 050021

4 Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081

Abstract: From 9 to 15 April 2023, a rare sand-dust weather event lasted for 6 days in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. Utilizing conventional meteorological data, reanalysis data, and data obtained by new detection methods such as wind-profiling radar and lidar, this study analyzes the characteristics and maintenance mechanisms of the sand-dust weather in Beijing-Tianjin-Hebei Region. The results show that this sand-dust

* 河北省气象局科研开发项目(23ky13)和河北省重点研发计划项目(23375401D)共同资助

2024 年 7 月 18 日收稿; 2025 年 9 月 18 日收修定稿

第一作者:李美琪,主要从事专业气象服务. E-mail:495443950@qq.com

通讯作者:范俊红,主要从事天气预报技术研究. E-mail:378307267@qq.com

weather event was caused by the influence of a Mongolian cyclone, two cold fronts, and a persistent southwesterly flow. During the Mongolian cyclone phase, the sand originated from southern Mongolia was lifted and transported along the 700 hPa jet stream axis, forming near-surface blowing sand or floating dust through dry deposition. In the cold front phase, extensive dust sources and the passage of a surface cold front caused a rapid increase in surface wind speed, lifting large amounts of sand and dust, which then traveled to Beijing-Tianjin-Hebei Region along the low-level jet in the troposphere and was rapidly transported to the surface with the descending airflow behind the cold front. During the southerly airflow phase, influenced by the return of sand sources from the middle and lower reaches of the Yangtze River, sand-dust was continuously transported northward under the action of the southerly airflow behind the surface high pressure system, reaching relatively low altitudes and forming mainly blowing sand or floating dust through dry deposition on the surface. Characteristics of the sand and dust varied under the influence of different systems. During the Mongolian cyclone phase, the sand had a weaker impact but a higher upper boundary height; during the cold front phase, the sand-dust concentrations were high and the visibility was low. Then, a sandstorm occurred after the cold front's passage and lasted for two hours, followed by clean air thirteen hours later; during the southerly airflow phase, the sand-dust lasted longer but was the weakest in intensity. During this sand-dust weather, the local turbulent dissipation rate increased three hours before the sand-dust concentration increased, which has good indicative significance for dust monitoring and forecasting. The above analysis results have a good reference value for future dust weather forecasting.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei Region, sand-dust weather, Mongolian cyclone, maintenance mechanism

引言

沙尘天气是风将地面尘土、沙粒卷入空中,使空气浑浊、能见度降低的一种天气现象。京津冀地区地处华北平原,位于北方半干旱风蚀沙漠化区的外围,经常受到沙尘天气的侵袭,对京津冀的经济、交通运输、旅游及生态环境均造成严重影响。彭路(2020)、张迎新等(2021)、李岩瑛等(2022)、Mu et al(2023)等从不同角度对沙尘天气开展相关研究,为沙尘天气的成因研究及预报提供了重要依据。

沙尘天气的形成离不开沙源、强风和热力条件三大要素(胡隐樵和光田宁,1997)。沙源地植被覆盖率与沙尘暴日数存在负相关关系,地表裸露增加使得细小土壤颗粒在强风作用下被卷入大气,形成沙尘成分(顾卫等,2002)。针对京津冀地区,境外沙源地主要分布在蒙古国中南部戈壁地($42^{\circ}\sim48^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim110^{\circ}\text{E}$; Yin et al, 2022),境内沙源地则主要分布在内蒙古中西部、河套以西及河北北部的沙漠、戈壁、沙地(Ye and Zheng, 2023; 张志刚和陈万隆, 2003; 尹晓惠等, 2007; 侯奇奇等, 2022);另外,偏北大风携带沙尘东移南下,将其远距离输送至华东、华

南地区,而春季的偏南大风会造成沙尘的向北回流输送,致使沙尘天气再现(安林昌等,2018; 吴兑等,2011)。沙漠和沙地的上空,白天净辐射大,强烈不稳定的热力层结在大、中尺度天气系统的上升运动激发下持续释放,促使大量沙尘被卷起向上输送并随系统移运(牛生杰和章澄昌,2002)。大尺度的强冷空气、中尺度的干飑线和小尺度的局地热力不稳定,是沙尘暴形成的主要动力条件(张钛仁等,2012)。同时,湍流动力作用配合干燥的土壤和大气环境,有利于沙源地区地表大量沙尘粒子释放至大气(张强和王胜,2005; 张艺萌等,2022)。

对于京津冀地区而言,蒙古气旋和冷锋是产生沙尘天气的主要天气系统(张璐等,2022; 刘景涛等,2004),蒙古气旋及其后部冷高压间的斜压强度会影响沙尘的起沙、输送过程(Li et al, 2022; 尹志聪等,2023),沙源地及其沿途沙尘随系统向下游输送,冷锋锋后强冷空气入侵、气旋发展和不稳定大气层结均可促进大范围沙尘天气的产生(贺哲,2012),高低空急流的形成有利于沙尘传输(范俊红等,2009; 彭舒龄等,2019),感热加热通过增强湍流运动有利于沙尘动量传送(王伏村等,2012; 孙永刚等,2014),次级环流可促进高动量下传及沙尘沉降并增

强近地面大风,有利于沙尘天气的维持发展。

以往的沙尘天气研究多集中于沙源地、环流背景场、传输路径和动力及热力条件等,而较少对持续期长的沙尘天气过程的发展特征和形成机制进行研究。2023 年 4 月 9—15 日,京津冀地区出现一次罕见的持续时间长达 6 d 的沙尘天气,这次沙尘天气过程先后影响我国华北、东北、华中、华东地区,其影响范围广、持续时间长、局地出现沙尘暴,是一次长时间持续的沙尘天气,过程具有受多个系统影响且后期出现自南向北回流传输的特点。本文利用气溶胶激光雷达、风廓线雷达等新型探测资料,常规气象观测资料,PM₁₀ 监测数据,ERA5 再分析数据等,研究本次长持续期沙尘过程在不同系统影响下的时空演变特征与维持机制,归纳提炼具有预报指示意义的物理量特征值,加深对沙尘天气边界层内气象要素垂直分布和动力条件的认识,丰富沙尘天气预报经验,有助于提升沙尘天气预报预警服务水平和行业服务能力。

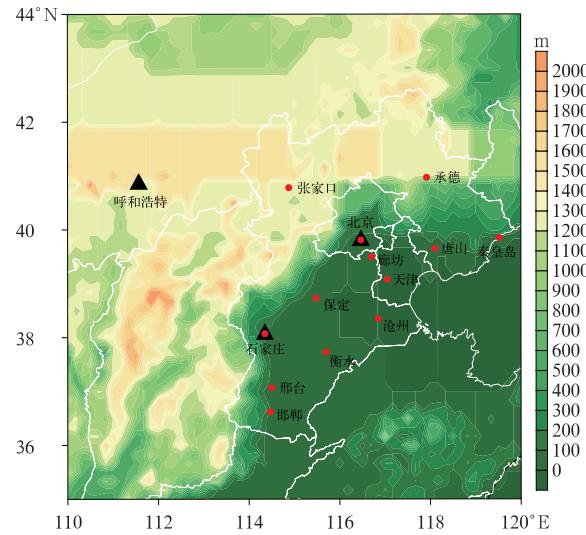
1 研究区域与数据

1.1 研究区域

京津冀地区位于华北平原北部,地形复杂,北靠燕山与坝上高原、西倚太行山,整体地势西北高东南低。自北向南依次选取京津冀 13 个地(市)的国家级气象观测站(以下简称国家站)进行沙尘天气描述,选取受沙尘影响较大的 3 个典型代表国家站(张家口站、北京站、石家庄站,图 1)进行分析,并且与距离沙源地更近的国家站(呼和浩特站)进行比较分析。张家口站海拔为 772.8 m,位于京津冀西北部坝上高原,受沙尘影响最大;北京站海拔为 32.8 m,位于京津冀北部平原地区;石家庄站海拔为 89.3 m,位于京津冀南部平原地区;呼和浩特站海拔为 1153.5 m,位于阴山山脉,属于京津冀地区沙尘上游站点。北京站、石家庄站和呼和浩特站均配备气溶胶激光雷达、风廓线雷达等探测设备,有利于分析沙尘天气。

1.2 数 据

能见度、风、气压数据来源于京津冀地区 13 个国家站地面观测资料。PM₁₀ 浓度数据来源于空气质量监测数据。背景场数据及相关物理量采用欧洲



注:黑色三角为配备气溶胶激光雷达站点。

图 1 京津冀及其上游地形(填色)和观测站(红色圆点)

Fig. 1 Terrain (colored) of the Beijing-Tianjin-Hebei Region and its upstream areas with observation stations (red dot)

中期天气预报中心的 ERA5 再分析数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为逐小时。地面气压场数据为 MICAPS 的常规高空观测数据。激光雷达是快速捕获气溶胶传输特征和垂直分布的有效工具,可得到精细化的沙尘时空分布及输送特征(樊璠等,2013;桂海林等,2021),其产品包括大气气溶胶消光系数、退偏振比以及边界层高度等。本文所用风场资料为北京站、石家庄站、呼和浩特站 30 min 平均风场产品。风廓线雷达是探测不同高度的大气风场、垂直风速、信噪比等信息的遥感设备,可用于研究沙尘天气边界层内气象要素的垂直变化和湍流特征(刘超等,2018;2019),其产品包括径向、功率谱及风场数据,其中风场数据产品又分为实时、30 min 及 1 h 平均数据,本文应用风廓线小时平均风产品。本文所用的 HYSPLIT 后向轨迹模型气象资料来自美国国家环境预报中心的 GDAS 全球同化产品。

2 沙尘天气特征

2.1 沙尘天气概述

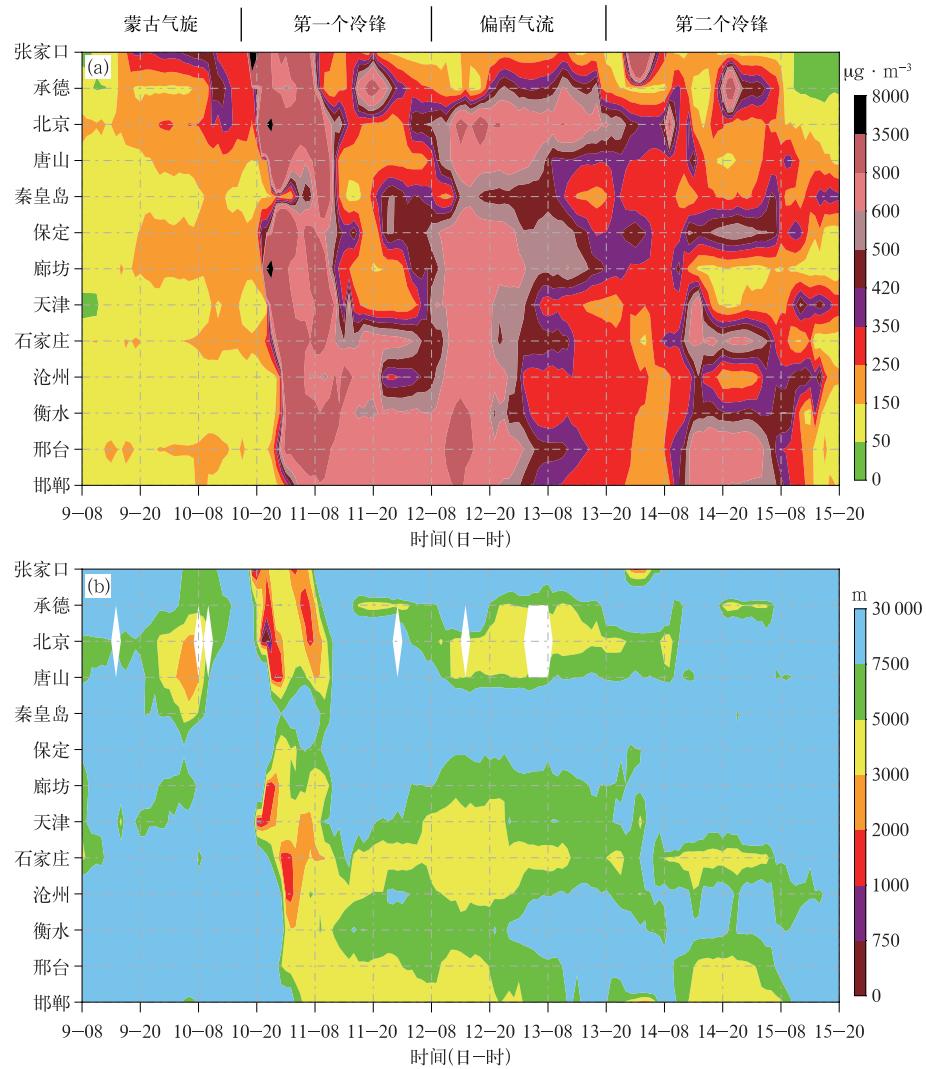
近年,京津冀地区沙尘天气频发,大部分持续时间为 1~3 d,少数可维持 4~5 d,如 2021 年 3 月

14—18日、2023年3月19—24日(杨晓军等,2021)。本文选取一次长持续期沙尘个例进行分析,2023年4月9—15日,京津冀出现一次罕见持续时间长达6 d的沙尘天气,其中张家口、北京等局地出现沙尘暴,最低能见度降至382 m,10日22时(北京时,下同)出现在北京南苑,PM₁₀质量浓度最大达7299 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,10日19时出现在张家口。图2为此次过程京津冀13个地(市)国家站的PM₁₀浓度和能见度演变,根据影响系统将沙尘天气分为四个阶段:9日08时至10日18时为蒙古气旋阶段,主要影响北部地区,强度最弱,仅出现扬沙天气,持续时间最短;10日18时至12日08时为第一个冷锋阶段,沙尘天气自北向南逐渐扩展,强度最强,河北北部和北京等地局地出现沙尘暴;12日08时至13日20时为偏南气流阶段,除坝上地区以外自南向北扩展,强度较弱,出现扬沙和浮尘,持续时间较长;13日20时至15日20时为第二个冷锋阶段,沙尘天气范围偏西,强度比第一个冷锋过境时弱,南部地区扬沙或浮尘持续时间较长。

段,沙尘天气自北向南逐渐扩展,强度最强,河北北部和北京等地局地出现沙尘暴;12日08时至13日20时为偏南气流阶段,除坝上地区以外自南向北扩展,强度较弱,出现扬沙和浮尘,持续时间较长;13日20时至15日20时为第二个冷锋阶段,沙尘天气范围偏西,强度比第一个冷锋过境时弱,南部地区扬沙或浮尘持续时间较长。

2.2 单站沙尘时序及低空特征

为了更细致地了解沙尘演变特征,利用张家口站、北京站、石家庄站单站PM₁₀浓度和风、能见度等要素演变(表1和图3),以及北京站、石家庄站气溶



注:图b中空白表示数据缺测。

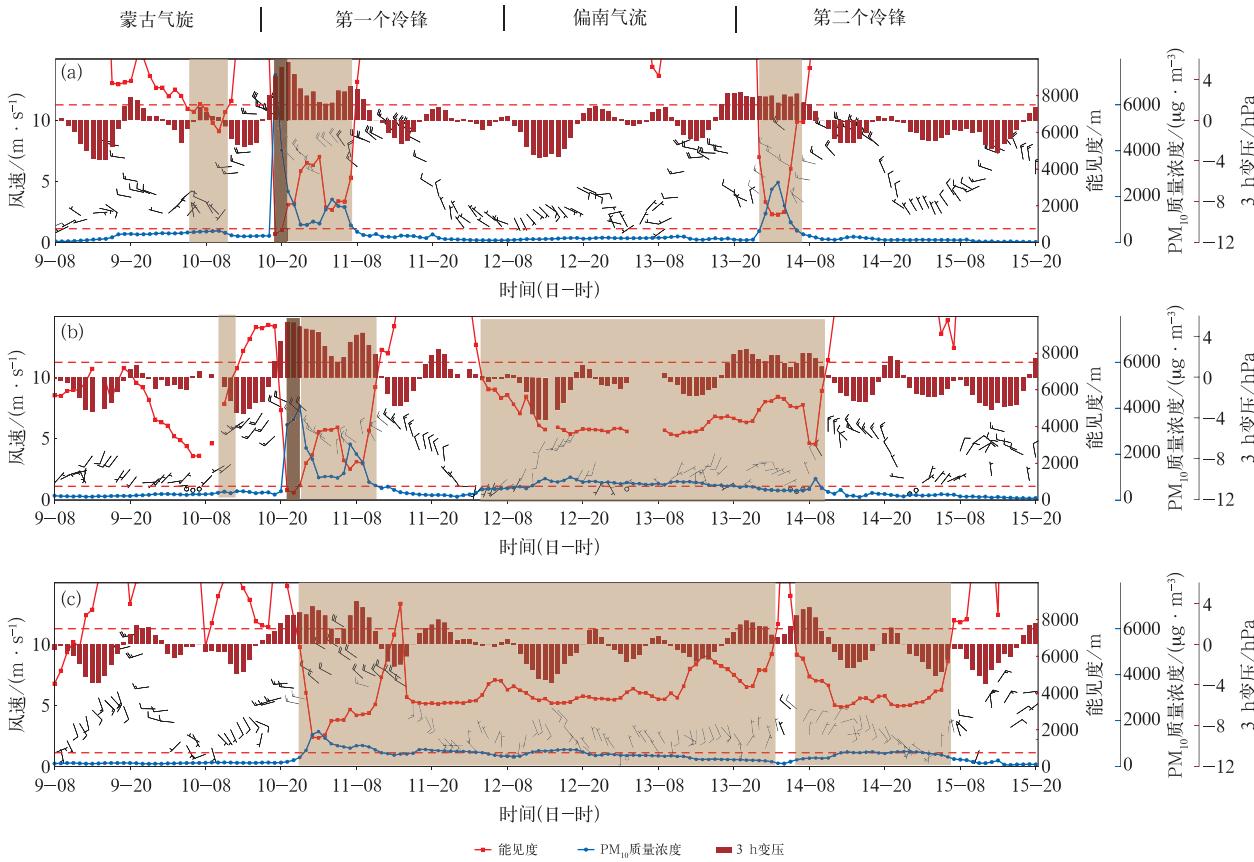
图2 2023年4月9日08时至15日20时京津冀地区13个国家站的
(a)PM₁₀质量浓度和(b)最小能见度

Fig. 2 (a) PM₁₀ mass concentration and (b) minimum visibility at 13 national stations in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 08:00 BT 9 to 20:00 BT 15 April 2023

表 1 2023 年 4 月 9—15 日不同阶段张家口、北京、石家庄沙尘特征

Table 1 Sand-dust characteristics in Zhangjiakou, Beijing and Shijiazhuang at different stages from 9 to 15 April 2023

阶段	站点	沙源地	最低能见度/m	最大 PM ₁₀ 质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	沙尘维持时间/h	3 h 变压/hPa	转为洁净空气时长/h	PM ₁₀ 质量浓度最大增长速率/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)	能见度最大下降速率/(m·h ⁻¹)
蒙古气旋	张家口	蒙古国戈壁, 我国乌兰布和沙漠、浑善达克沙地	6061	507.4	6	2.4	6	129	8400
	北京		2391	383.6	3	1.2	3	83	1100
	石家庄	/	/	/	/	/	/	/	/
第一个冷锋	张家口	蒙古国戈壁, 我国浑善达克沙地	454	7299	13	5.7	13	7012	9600
	北京	沙地、库布齐沙漠、乌兰布和沙漠	412	4079	20	5.4	15	2891	4500
	石家庄	毛乌素沙地	1557	1524	32	4.2	/	690	2400
偏南气流	张家口	/	/	/	/	/	/	/	/
	北京	南方回流沙源	3516	998.6	30	2.3	/	139	800
	石家庄		3449	741	36	1.4	/	97.6	200
第二个冷锋	张家口	蒙古国戈壁, 我国浑善达克沙地	1520	2620	8	2.7	8	1056	13 300
	北京		3044	931	15	2.8	14	449.5	200
	石家庄		3235	656	25	3.6	25	119	600



注:棕色阴影表示出现扬沙、浮尘,深棕色阴影表示出现沙尘暴,上、下红色虚线分别表示能见度 7500 m 和 750 m。

图 3 2023 年 4 月 9 日 08 时至 15 日 20 时 (a) 张家口站, (b) 北京站, (c) 石家庄站的能见度、PM₁₀ 质量浓度、3 h 变压、最大风速和风向(风羽)

Fig. 3 Visibility, PM₁₀ mass concentration, 3 h pressure change, and maximum wind speed and direction (barb) at (a) Zhangjiakou, (b) Beijing, and (c) Shijiazhuang stations from 08:00 BT 9 to 20:00 BT 15 April 2023

胶雷达消光指数(图 4a, 4c)及不同阶段雷达特征(表 2)研究沙尘空中特征及其与地面沙尘的对应关系。从总体特征来看,4 月 9 日 08 时至 15 日 20

时,张家口、北京、石家庄沙尘天气分别维持了 27、68、93 h,其中张家口和北京均在冷锋过境 3 h 后出现沙尘暴,并维持 2 h。

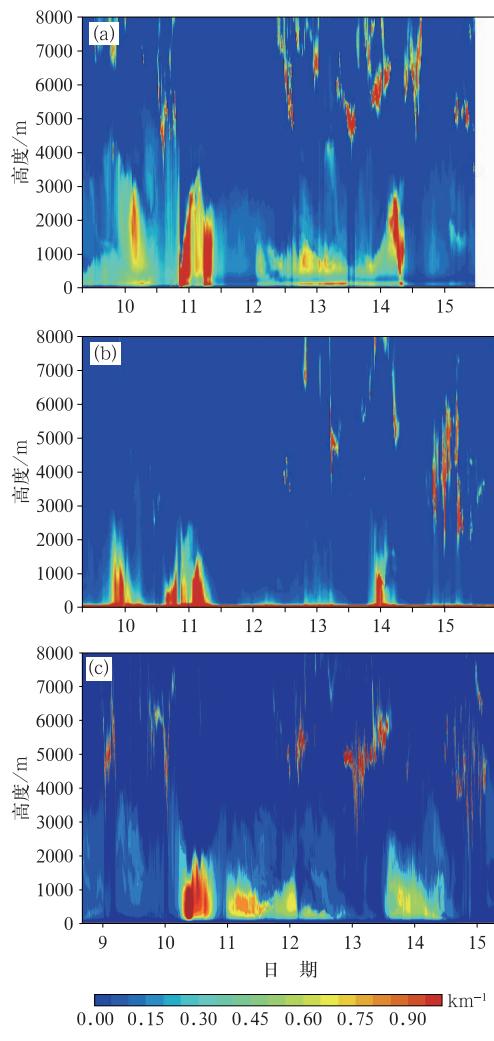


图4 2023年4月9—15日(a)北京站,(b)呼和浩特站,(c)石家庄站的气溶胶激光雷达消光系数

Fig. 4 Aerosol lidar extinction coefficient at (a) Beijing, (b) Hohhot, and (c) Shijiazhuang stations from 9 to 15 April 2023

蒙古气旋阶段,沙尘强度较弱,消光系数最大达 0.80 km^{-1} ,沙尘上边界高度达本次沙尘过程最大

高度(4000 m)。张家口站、北京站最低能见度分别降至6000 m和2400 m,最大PM₁₀质量浓度分别上升至 $507.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $383.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,且分别维持6 h和3 h后转为洁净空气。第一个冷锋阶段,3个站先后出现PM₁₀浓度骤增、能见度骤降、风力急剧增大的现象,PM₁₀质量浓度均都达到整个沙尘过程中的最高值,张家口站最大达 $7299\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。10日20时冷锋过境,受锋后下沉气流影响,北京站上边界高度降至800 m,下边界接地,消光系数达 1.0 km^{-1} 。10日21—22时北京站地面出现沙尘暴,能见度降至412 m,PM₁₀质量浓度增长至 $4079\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,维持4 h后消光系数减小。石家庄站位置偏南,时间偏后,11日00—03时消光系数达 1.0 km^{-1} ,上边界层高度由3000 m降至1200 m,地面出现扬沙,能见度降至1500 m,PM₁₀质量浓度增长至 $1524\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在此阶段,张家口站、北京站沙尘分别维持了13 h和15 h后转为洁净空气。偏南气流阶段,北京站和石家庄站的消光系数高值区维持时间较长,均达30 h,但强度较弱,最强分别仅达 0.75 km^{-1} 和 0.80 km^{-1} ,上边界高度为1500 m,近地面PM₁₀质量浓度维持在 $500\sim1000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,能见度维持在 $3000\sim5000\text{ m}$ 。第二个冷锋阶段,受上游沙尘输送和锋前上升气流影响,北京站和石家庄站上边界高度分别升高至3000 m和2500 m,消光系数分别增强至 1.0 km^{-1} 和 0.70 km^{-1} ,均较第一个冷锋阶段稍弱,14日06时受锋后下沉气流影响出现沉降型输送,下边界降低但未接地,沙尘距离地面更近,沙尘干沉降速度更快,09时和13时2个站地面PM₁₀浓度升高至最大。随后冷锋携带沙源减少,输送洁净空气,沙尘天气结束。综上可见,3个站均出现了长达6 d的沙尘天气,相较于一般短时沙尘天气,长持续期的沙尘天气受不同系统影响时,出现消光系数增长或维持、沙尘上边界变化、能见度降低及PM₁₀

表2 2023年4月9—15日不同阶段北京站、石家庄站的气溶胶雷达特征

Table 2 Aerosol radar characteristics at different stages over Beijing and

Shijiazhuang stations from 9 to 15 April 2023

阶段	消光系数/ km^{-1}		最强位置厚度/m		消光系数 0.40 km^{-1} 及以上持续时间/h		上边界高度/m	
	北京	石家庄	北京	石家庄	北京	石家庄	北京	石家庄
蒙古气旋	0.80	/	2000	/	8	/	4000	/
第一个冷锋	1.0	1.0	3000	1200	14	14	3500	2500
偏南气流	0.75	0.80	1000	600	30	30	1500	1500
第二个冷锋	1.0	0.70	1500	600	10	30	3000	2500

浓度增长的现象,沙尘转为洁净空气的时间更长。其中张家口和北京的沙尘天气受蒙古气旋影响,于 9 日夜间开始,而石家庄偏南,其沙尘天气受第一个冷锋影响后于 10 日夜间开始,但北京和石家庄受偏南气流影响较多,沙尘维持时间更长。

在整个沙尘过程中,第一个冷锋和第二个冷锋阶段能见度下降速率与 PM_{10} 浓度增长速率最大。第一个冷锋过后 3 个国家站的 3 h 变压大于第二个冷锋,第一个冷锋过后 3 个国家站最大 3 h 变压分别为 5.7、5.4、4.2 hPa,而第二个冷锋过后则分别为 2.7、2.8、3.6 hPa。表明第一个冷锋带来的冷空气更强,且冷空气经过沙源地时为午后,湍流作用强,经过的沙源地更多,带来的沙尘更多;而第二个冷锋强度较弱,带来的沙尘较少,之后的洁净空气起到清除作用。

选取距离沙源地更近的呼和浩特站(图 4b)与北京站做对比,呼和浩特站低空沙尘最强时上边界层高度为 1500 m,而北京则达到 3000 m,由于呼和浩特距沙源更近,以本地起沙为主,高度更低,近地面沙尘浓度更大;而北京以传输为主,沙尘受气旋上扬输送,因此高度较高,上空夹卷沙尘经沉降后落入地面,近地面浓度较低。

3 沙尘天气长时间维持的原因

2023 年 3 月和 4 月沙尘过程发生频率明显增加,沙源主要来自蒙古国,2 月下旬蒙古高原气温上升,导致沙漠地区地表温度偏干、偏暖,为蒙古沙尘源地的风蚀和起沙提供了有利条件(Chen et al, 2023)。对流层低层缺乏向沙尘源地的水汽输送,使得 2023 年冬、春季降水显著偏少,达 1980 年以来历史同期最低(尹志聪等,2023)。3 月内蒙古中部及华北等地降水偏少,气温偏高 1~4℃。4 月 9—15 日无有效降水,加之中国北方地区地表土壤已基本解冻,大部分未被积雪覆盖,气象和地表均为京津冀地区沙尘天气的发生和发展创造了良好条件。

3.1 起沙过程

图 5 显示,蒙古气旋阶段(图 5a,5b),500 hPa 蒙古国为疏散槽并将发展加深,槽前正涡度平流使蒙古气旋发展,气压梯度增大加大了地面风速,且 500 hPa 急流轴穿过京津冀北部,最大风速超过 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高空动量下传有利于地面风速增大至

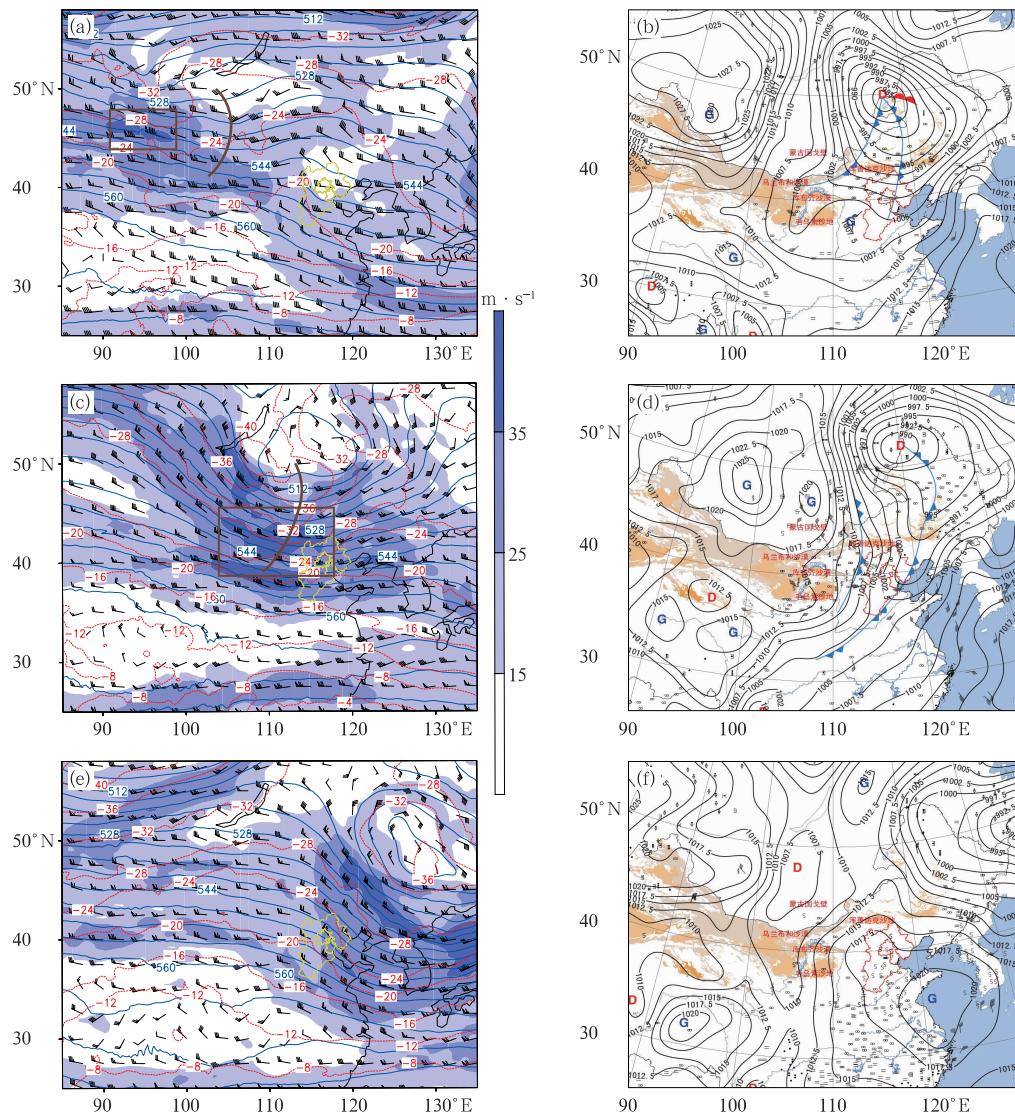
$12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,在蒙古国戈壁以及我国的乌兰布和沙漠、浑善达克沙地起沙。由于蒙古气旋位置偏北,随气旋东移影响京津冀北部,出现扬沙天气。第一个冷锋阶段(图 5c,5d),500 hPa 高空槽东移加深为低涡,槽线从低涡中心伸展到河北南部,影响范围广,低涡南部急流轴中心风速增大至 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,槽前正涡度平流使地面气旋发展,槽后冷平流使地面高压发展,冷锋后气压梯度使地面风速增大,高空急流的动量下传使地面风速进一步增大,有利于沙源地起沙。地面冷锋自西北向东南经过蒙古国戈壁,我国的乌兰布和沙漠、浑善达克沙地、库布齐沙漠、毛乌素沙地,地面风速大,经过的沙源范围广、起沙量大,随着地面冷锋移至京津冀地区,使京津冀北部出现沙尘暴,其他地区出现扬沙天气。偏南气流阶段(图 5e,5f),京津冀 500 hPa 受槽后强西北气流控制,地面在黄海为高压中心,随西北气流输送至长江中下游地区的沙尘天气,在地面高压后部偏南气流作用下,向京津冀输送沙尘,出现回流沙尘天气。第二个冷锋阶段(图略),500 hPa 在内蒙古中部出现浅槽,对应地面为冷锋,冷锋经过蒙古国戈壁和我国浑善达克沙地起沙并向南输送,较第一个冷锋阶段起沙量小,造成京津冀中西部扬沙天气。受蒙古气旋、冷锋及南下长江中下游的含沙尘气团回流输送共同影响,本次沙尘天气过程维持长达 6 d 之久。

3.2 本地扬沙条件

边界层扬沙主要依靠湍流作用,而边界层以上扬沙主要依靠上升运动。湍流耗散率是表征湍流强度的重要参数,其值越大表明湍流越强,根据苏轼鹏和王华(2019)的研究:

$$\epsilon = bN\sigma^2 \quad (1)$$

式中: ϵ 为湍流耗散率(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$); N 为布维频率(单位: $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); σ 为谱宽(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); b 为无量纲常数,取 0.6 或 0.5。利用风廓线雷达资料计算了张北、北京、石家庄的本地湍流耗散率随时间的变化(图 6,以对数形式表示),在湍流厚度方面,石家庄 > 北京 > 张北,其中张北近地面(500 m 以下)的湍流耗散率最大,达 $10^{-1.8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。在 4 个阶段中, PM_{10} 浓度开始增大之前,本地湍流耗散率有明显增大,尤其是张北和北京沙尘暴出现前 3 h 湍流耗散率出现短时增大,对沙尘天气有很好的指示意义;在偏南气流阶段,湍流耗散率明显增大,有利于扬沙。



注:图a,c中棕色粗线为高空槽,棕色细线所示区域为急流轴;黄色(或红色)实线所示区域为京津冀;图b,d,f中黄色阴影表示沙漠、沙地,D、G分别代表低压和高压中心,蓝色三角线为冷锋。

图5 2023年4月(a,b)9日05时,(c,d)10日20时,(e,f)12日08时的(a,c,e)500 hPa位势高度(蓝色实线,单位:dagpm)、温度(红色虚线,单位:℃)、风场(风羽和填色)和(b,d,f)地面气压场(单位:hPa)

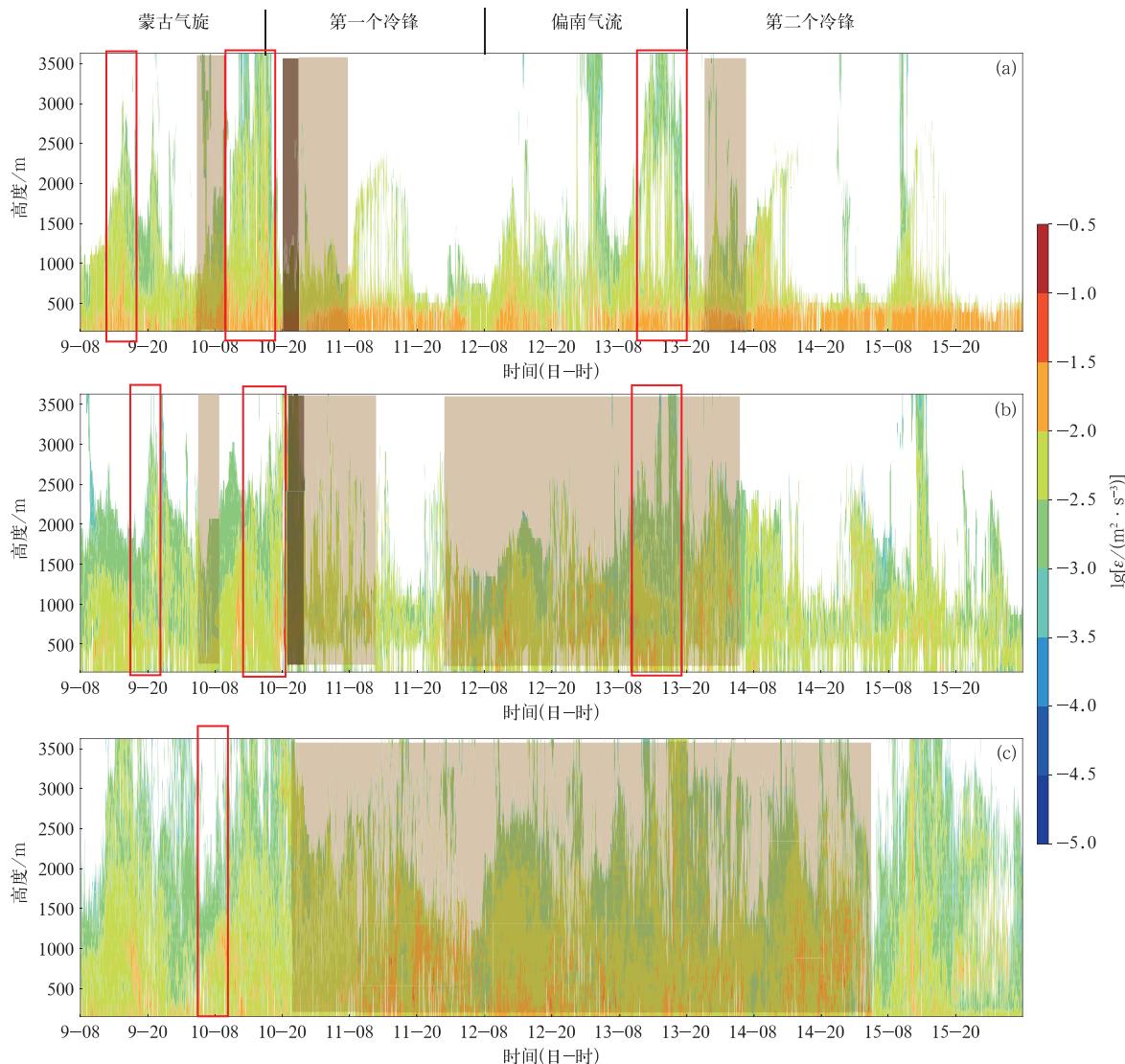
Fig.5 (a, c, e) The 500 hPa geopotential height (blue solid line, unit: dagpm), temperature (red dashed line, unit: $^{\circ}\text{C}$), wind field (barb and colored), and (b, d, f) surface pressure field (unit: hPa) at (a, b) 05:00 BT 9, (c, d) 20:00 BT 10, and (e, f) 08:00 BT 12 April 2023

3.3 沙尘输送

为了解蒙古气旋、冷锋、偏南气流的沙尘来源路径,利用HYSPLIT模式对关键时间点进行后向轨迹分析。分别选取北京站近地面20 m和3个系统对应高度(2000、1000、800 m),及石家庄站近地面20 m和后2个阶段对应高度(800 m、500 m)做24 h

后向轨迹分析,时间为4月10日04时(蒙古气旋阶段)、22时(第一个冷锋阶段),以及12日18时(偏南气流阶段)。

后向轨迹(图7)和低层风场(图8)表明,在蒙古气旋阶段(图7a,7b),2000 m的气团主要来自蒙古国南部,之后途经我国乌兰布和沙漠、浑善达克沙地等沙源地进入北京上空,气团原始位置在3000 m



注:红色方框为湍流耗散率和厚度明显增大时段,棕色阴影表示
出现扬沙、浮尘,深棕色阴影表示出现沙尘暴。

图 6 2023 年 4 月 9 日 08 时至 16 日 08 时(a)张北,(b)北京,(c)石家庄的湍流耗散率

Fig. 6 Turbulent dissipation rate for (a) Zhangbei, (b) Beijing and
(c) Shijiazhuang from 08:00 BT 9 to 08:00 BT 16 April 2023

以上的上空,这与 700 hPa 上空出现 $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 急流轴(图 8a)的位置十分吻合,而 20 m 的气团主要来源于乌兰布和沙漠。在冷锋阶段,北京(图 7c, 7d)1000 m 和 20 m 的气团均从蒙古国戈壁由第一个冷锋造成地面起沙,输送过程中因上升运动分别升高到 2500 m 和 1500 m 附近,随后因锋后下沉气流沉降至边界层。而石家庄(图 7e, 7f)沙尘输送通道偏南,仅经过我国沙源地,在 112°E 由冷锋起沙上升后随西北气流输送,下沉移入石家庄,其高度仅在

近地面层。由图 8b 可见,10 日 20 时 850 hPa 蒙古国东部存在一个低涡,低涡中心向西南配合冷切变,对应地面冷锋,使蒙古国南部戈壁起沙,之后沿低涡底部 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流带输送至京津冀。在偏南气流阶段,北京站(图 7g, 7h)和石家庄站(图 7i, 7j)近地面沙尘均源于偏南气流,回流沙源地位于湖北北部,偏南气流沙尘输送的高度较低,基本在 1500 m 以下,12 日 08 时 850 hPa(图 8c)显示湖北北部至河北存在风速 $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风速带。

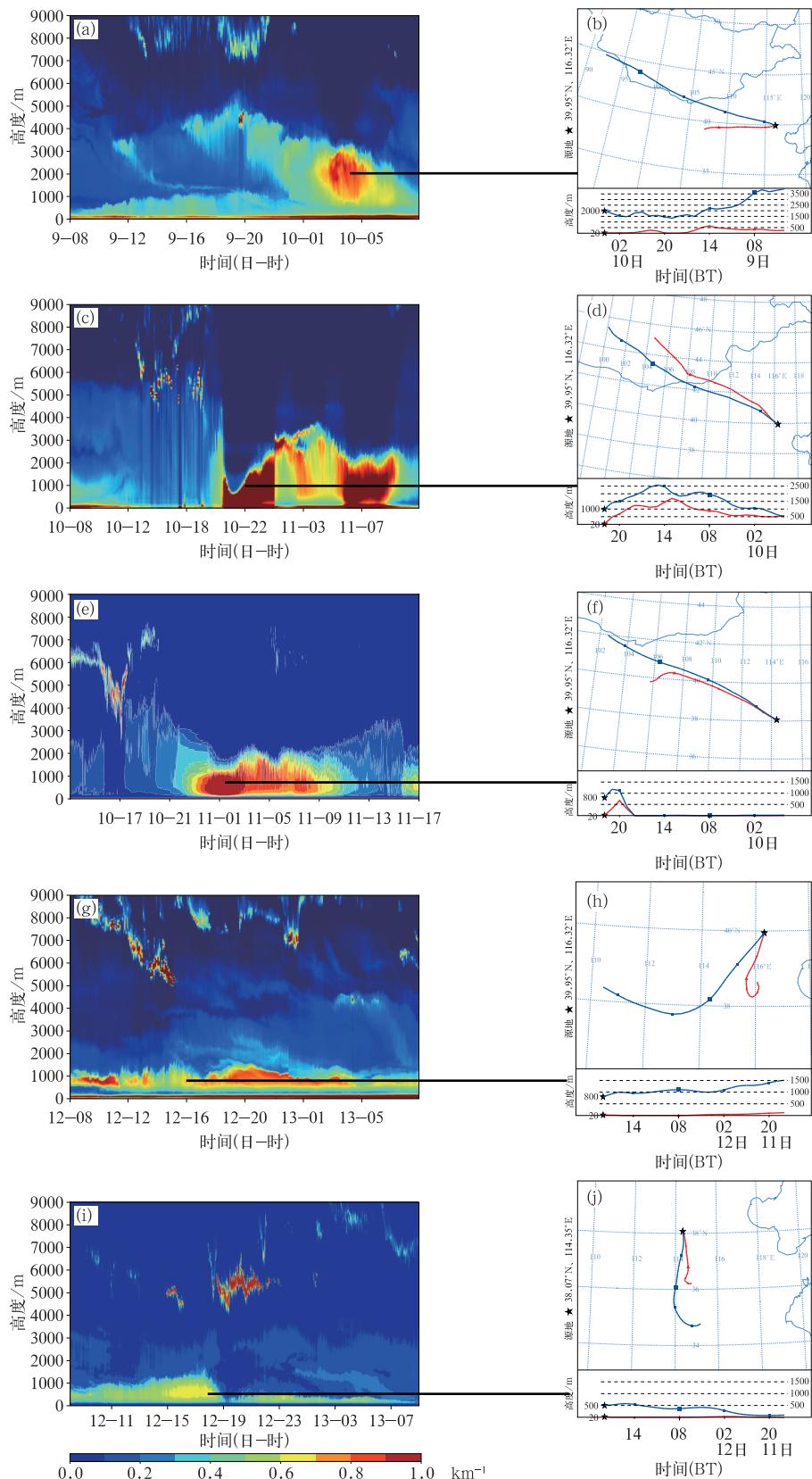
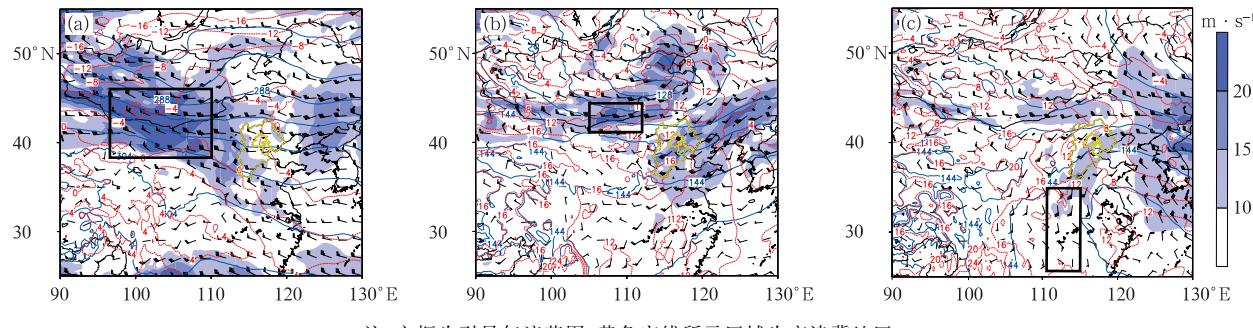


图 7 2023年4月(a,b)10日04时北京站,(c,d)10日22时北京站,(e,f)10日22时石家庄站,(g,h)12日18时北京站,(i,j)12日18时石家庄站的(a,c,e,g,i)气溶胶激光雷达消光系数和(b,d,f,h,j)24 h后向散射轨迹

Fig. 7 (a, c, e, g, i) Aerosol lidar extinction coefficient and (b, d, f, h, j) 24 h backward scattering trajectory at (a, b) 04:00 BT 10 at Beijing Station, (c, d) 22:00 BT 10 at Beijing Station, (e, f) 22:00 BT 10 at Shijiazhuang Station, (g, h) 18:00 BT 12 at Beijing Station, and (i, j) 18:00 BT 12 at Shijiazhuang Station in April 2023



注:方框为引导气流范围;黄色实线所示区域为京津冀地区。

图 8 2023 年 4 月 (a) 9 日 08 时 700 hPa, (b) 10 日 20 时 850 hPa, (c) 12 日 08 时 850 hPa 的位势高度(蓝色实线, 单位: dagpm)、温度(红色实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场(风羽和填色)

Fig. 8 Geopotential height (blue solid line, unit: dagpm), temperature (red solid line, unit: $^{\circ}\text{C}$), and wind field (barb and colored) at (a) 08:00 BT 9 at 700 hPa, (b) 20:00 BT 10 at 850 hPa, and (c) 08:00 BT 12 at 850 hPa in April 2023

3.4 沙尘沉降

结合气溶胶激光雷达资料演变(图 7), 利用 ERA5 逐小时和风廓线雷达逐 30 min 资料分别计

算风场和垂直速度, 重点分析受蒙古气旋和冷锋 2 个系统所影响的北京上空沙尘沉降特征, 图中填色反映下沉运动。在蒙古气旋阶段, 4 月 9 日 21 时(图 9a), 下沉中心位于 800 hPa, 达 $-0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

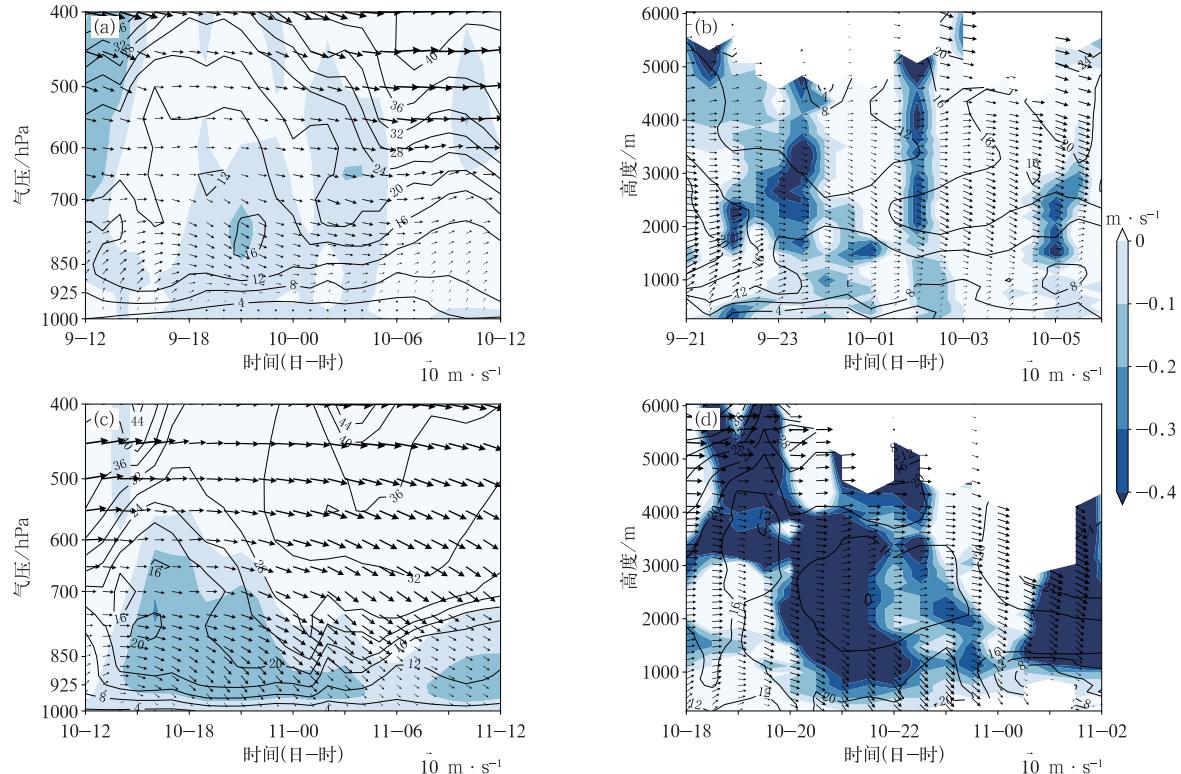


图 9 2023 年 4 月 (a) 9 日 12 时至 10 日 12 时, (b) 9 日 21 时至 10 日 06 时, (c) 10 日 12 时至 11 日 12 时, (d) 10 日 18 时至 11 日 02 时北京站垂直速度(填色)和风场(风矢和等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的高度-时间演变
(a, c) ERA5, (b, d) 风廓线雷达

Fig. 9 Height-time evolutions of vertical velocity (colored) and wind field (vector and contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at Beijing Station from (a) 12:00 BT 9 to 12:00 BT 10, (b) 21:00 BT 9 to 06:00 BT 10, (c) 12:00 BT 10 to 12:00 BT 11 and (d) 18:00 BT 10 to 02:00 BT 11 April 2023
(a, c) ERA5, (b, d) wind-profiling radar

2 h 内大风速带从 650 hPa 的 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 800 hPa 的 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对应气溶胶激光雷达显示北京上空 0~5000 m 消光系数逐渐升至 0.60 km^{-1} , 且上边界高度下降至 4000 m。10 日 03 时, 下沉中心位于 650 hPa, 上游输送的沙尘不接地, 沉降沙尘量小, 近地面主要为浮尘天气。风廓线雷达显示垂直速度最大达 $-0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9b), 且 9 日 21 时 2500 m 高度显示有 $18 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风速带输送沙尘。

在第一个冷锋阶段, 10 日 20—23 时和 11 日 06—09 时消光系数均达到 1.0 km^{-1} (图 7c), 上边界从 1500 m 和 3000 m 分别降至 1000 m 和 2000 m。10 日 15 时至 11 日 03 时(图 9c)为明显的冷空气下沉运动, 下沉中心位于 700 hPa 附近, 中心达 $-0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大风速带在 1 h 内从 700 hPa 的 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下传至 750 hPa 的 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。下沉运动使上游输送的沙尘更快地下传到近地面, 近地层干沉降沙量骤然增加, PM_{10} 质量浓度升至 $4078 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 能见度降至 412 m, 北京出现沙尘暴。大风速带随着下沉气流向下延伸, 伴随动量下传, 地面风速加大, 1000 hPa 附近达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。11 日 06—09 时, 受副冷锋影响, 其上游再次转为下沉运动, 且经过的沙源地少, 因此携带的沙源在输送过程中因干沉降一直出现损失, 由副冷锋输送至北京的沙尘量已远不如冷锋的含沙量, 虽然 700 hPa 以下有弱下沉运动相配合, PM_{10} 质量浓度达到 $2435 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 能见度降至 1600 m, 但仅出现扬沙天气。风廓线雷达显示的下沉运动较 ERA5 更强(图 9d), 下沉中心速度达 $-3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 10 日 19 时, 下沉中心位于 3000 m 以上, 此高度存在 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风速带, 10 日 21—22 时, 下沉运动中心降至近地面以上, 此时近地面大风速带为 $20 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在蒙古气旋阶段, 下沉运动主要发生在 2000~3000 m 的低空, 垂直速度最大达 $-0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大风速带在 2 h 内从 650 hPa 的 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 动量下传至 800 hPa 的 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 未传至地面, 近地面风速相对较小($4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); 而在冷锋阶段, 下沉运动中心从 3000 m 降至近地面, 垂直速度最大达 $-3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大风速带的动量下传在 1 h 内从 700 hPa 的 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 750 hPa 的 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且风廓线雷达显示地面风速可达 $20 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明下沉运动将大风速带传至地面。冷锋阶段的下沉运动更强, 大风速带传送的高度更低, 速度更快且风速更大。由风廓线雷达资料反演的垂直速度和风场, 较 ERA5 资料可更明显地表现出下沉运动及大

风速带。

4 结论和讨论

2023 年 4 月 9—15 日, 京津冀地区受多个系统影响出现一次罕见持续时间长达 6 d 的沙尘天气, 其中张家口和北京出现沙尘暴。

本次沙尘天气分为蒙古气旋、第一个冷锋、偏南气流、第二个冷锋四个阶段。蒙古气旋阶段仅影响京津冀北部, 强度较弱, 消光系数最大达 0.80 km^{-1} , PM_{10} 质量浓度最大为 $507.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最低能见度为 2400 m, 但上边界高度最高达 4000 m, 维持 3~6 h 后转为洁净空气。在冷锋阶段, 京津冀地区出现 PM_{10} 浓度骤增、能见度骤降的现象, 最大 PM_{10} 质量浓度达 $7299 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最低能见度达 412 m, 消光系数最大达 1.0 km^{-1} , 北京站和石家庄站沙尘厚度由 3000 m 分别降至 800 m 和 1200 m; 在偏南气流阶段, 京津冀中南部消光系数高值区持续时间最长达 30 h, 最大达 0.8 km^{-1} , 厚度为 1500 m, PM_{10} 质量浓度维持在 $500 \sim 1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 能见度维持在 3000~5000 m。

(2) 在蒙古气旋和冷锋作用下, 气压梯度使地面风速增大, 高空急流的动量下传使地面风速进一步增大, 沙源地构成起沙条件; 边界层湍流作用和系统性上升运动有利于沙尘扬起, 中低层急流带有利于沙尘输送, 在京津冀冷锋过境时下沉运动有利于沙尘沉降, 形成沙尘暴或扬沙天气。受蒙古气旋、冷锋及南下长江中下游的含沙空气团回流输送共同影响, 本次沙尘天气过程维持长达 6 d 之久。

(3) 在蒙古气旋阶段, 沙源地位置偏北, 沙尘通过 700 hPa 急流轴通道进行传输, 在京津冀上空 2000~3000 m 的高度下沉, 垂直速度最大达 $-0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但其动量下传未接地, 因而沙尘的沉降主要靠干沉降作用, 所以近地面表现为浮尘天气。冷锋阶段沙尘经历沙源地多, 起沙量高, 沙尘上升至 850 hPa, 大风速带自 4000 m 的 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下传至地面的 $20 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直速度最大达 $-3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 下沉运动使上游输送的沙尘更快地下传到近地面, 近地层干沉降沙量骤然增加, 导致近地面出现沙尘暴。在偏南气流阶段, 受南下长江中下游的含沙空气团回流输送影响, 在地面高压作用下持续向北输送沙尘, 输送高度较低, 基本在 1500 m 以下, 干沉降作用使得近地面形成扬沙或浮尘天气。

(4) 由本次沙尘天气总结出一些沙尘特征与预

报指标:冷锋过境一般 3 h 后出现沙尘暴,PM₁₀质量浓度最大增长率为 7012 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$,能见度下降率最大达 13300 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$,沙尘暴持续时间为 2 h,配合 3 h 变压达到 5.7 hPa,13 h 后出现洁净空气。风廓线资料较 ERA5 资料可更细致地显示沙尘输送带的垂直速度、急流和地面大风,在沙尘浓度增加时,本地湍流耗散率提前 3 h 增大,对沙尘暴监测和预报有很好的指示意义。

另外,本文着重分析 2023 年 4 月 9—15 日一次长持续期沙尘的发展特征及其维持机制,但由于仅针对一次特定沙尘事件开展分析,所得结论的普遍性和适用性有限。因此,为了进一步提升沙尘天气预报的准确性和精细化水平,未来的研究亟需纳入更多样化的沙尘天气个例,通过扩大样本量和对比分析提高沙尘天气预报的准确性。

参考文献

- 安林昌,张恒德,桂海林,等,2018. 2015 年春季华北黄淮等地一次沙尘天气过程分析[J]. 气象,44(1):180-188. An L C, Zhang H D, Gui H L, et al, 2018. Analysis of a sand and dust weather process affecting North China and Huanghuai in spring 2015 [J]. Meteor Mon, 44(1):180-188(in Chinese).
- 樊璠,陈义珍,陆建刚,等,2013. 北京春季强沙尘过程前后的激光雷达观测[J]. 环境科学研究,26(11):1155-1161. Fan F, Chen Y Z, Lu J G, et al, 2013. Lidar detection of a sand-dust process at Beijing in spring[J]. Res Environ Sci, 26(11):1155-1161(in Chinese).
- 范俊红,郭树军,李宗涛,2009. 河北省中南部一次沙尘暴的动力条件分析[J]. 高原气象,28(4):795-802. Fan J H, Guo S J, Li Z T, 2009. Analysis on dynamic condition of a sandstorm process in central and southern Hebei Province[J]. Plateau Meteor, 28(4):795-802(in Chinese).
- 顾卫,蔡雪鹏,谢锋,等,2002. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨——以内蒙古中西部地区为例[J]. 地球科学进展,17(2):273-277. Gu W, Cai X P, Xie F, et al, 2002. Study on relationship between vegetation cover and distribution of days of sandstorm-taking central and western Inner Mongolia for example[J]. Adv Earth Sci, 17(2):273-277(in Chinese).
- 桂海林,秦贺,赵培涛,等,2021. 2018 年春季北京一次沙尘天气边界层特征及来源分析[J]. 气象与环境学报,37(4):18-25. Gui H L, Qin H, Zhao P T, et al, 2021. Characteristics of atmospheric boundary layer and sources of a sand-dust event during spring 2018 in Beijing[J]. J Meteor Environ, 37(4):18-25(in Chinese).
- 贺哲,2012. 2006 年 3 月末河南一次沙尘暴过程的天气成因分析[J]. 气象,38(8):932-942. He Z, 2012. The synoptic causation analysis of a sandstorm over Henan Province at the end of March 2006[J]. Meteor Mon, 38(8):932-942(in Chinese).
- 侯奇奇,耿雪莹,杨帅,等,2022. 1960—2020 年河北省沙尘强度时空演变特征及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境,36(12):72-80. Hou Q Q, Geng X Y, Yang S, et al, 2022. Multiscale analysis of sand dust intensity and its influencing factors in Hebei Province from 1960 to 2020[J]. J Arid Land Resour Environ, 36(12):72-80(in Chinese).
- 胡隐樵,光田宁,1997. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J]. 大气科学,21(5):581-589. Hu Y Q, Mitsuta Y, 1997. Micrometeorological characteristics and local triggering mechanism of strong dust storm[J]. Chin J Atmos Sci, 21(5):581-589(in Chinese).
- 李岩瑛,张春燕,张爱萍,等,2022. 河西走廊春季沙尘暴大气边界层垂直结构特征[J]. 气象,48(9):1171-1185. Li Y Y, Zhang C Y, Zhang A P, et al, 2022. Vertical structure characteristics of atmospheric boundary layer in spring sandstorm over Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 48(9):1171-1185(in Chinese).
- 刘超,花丛,张恒德,等,2019. 基于风廓线雷达的北京春季一次“先霾后沙”空气污染过程分析[J]. 中国沙漠,39(5):88-96. Liu C, Hua C, Zhang H D, et al, 2019. Analysis of a haze-dust air pollution process in spring of Beijing based on wind profiler radar[J]. J Desert Res, 39(5):88-96(in Chinese).
- 刘超,张碧辉,花丛,等,2018. 风廓线雷达在北京地区一次强沙尘天气分析中的应用[J]. 中国环境科学,38(5):1663-1669. Liu C, Zhang B H, Hua C, et al, 2018. Application of wind profiler radar in a strong sand dust weather analysis in Beijing[J]. China Environ Sci, 38(5):1663-1669(in Chinese).
- 刘景涛,钱正安,姜学恭,等,2004. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J]. 高原气象,23(4):540-547. Liu J T, Qian Z A, Jiang X G, et al, 2004. A study on weather types of super severe dust storms in North China[J]. Plateau Meteor, 23(4):540-547 (in Chinese).
- 牛生杰,章澄昌,2002. 贺兰山地区沙尘暴沙尘起动和垂直输送物理因子的综合研究[J]. 气象学报,60(2):194-204. Niu S J, Zhang C C, 2002. Comprehensive researches on sand particle uptake and vertical transport of sandstorms in Helan Mountain Area [J]. Acta Meteor Sin, 60(2):194-204(in Chinese).
- 彭路,2020. 西北地区不同季节沙尘天气的数值模拟与沙尘气溶胶的输送及来源[D]. 兰州:兰州大学. Peng L, 2020. Numerical simulation of dust weather, and the transportation and sources of dust aerosol in different seasons in Northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 彭舒龄,周树道,卫克晶,等,2019. 京津冀地区一次强沙尘天气过程的成因及特征[J]. 大气科学学报,42(6):926-935. Peng S L, Zhou S D, Wei K J, et al, 2019. Causes and characteristics of a dust weather process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Trans Atmos Sci, 42(6):926-935(in Chinese).
- 苏轼鹏,王华,2019. 风廓线雷达结合 RASS 反演湍流耗散率的方法[J]. 海洋开发与管理,36(6):69-73. Su S P, Wang H, 2019. The theory of wind profile radar and RASS inverting turbulence dissipation rate[J]. Ocean Dev Manage, 36(6):69-73(in Chinese).
- 孙永刚,孟雪峰,荀学义,等,2014. 温度平流在沙尘暴和大风天气预报中的差异分析[J]. 气象,40(11):1302-1307. Sun Y G, Meng X F, Xun X Y, et al, 2014. Difference analysis of temperature advection in severe sandstorm and strong wind prediction[J]. Meteor Mon, 40(11):1302-1307(in Chinese).
- 王伏村,许东蓓,王宝鉴,等,2012. 河西走廊一次特强沙尘暴的热力动力特征分析[J]. 气象,38(8):950-959. Wang F C, Xu D B,

- Wang B J, et al, 2012. Diagnostic analysis of thermal and dynamical characteristics of a heavy dust storm in Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 38(8): 950-959(in Chinese).
- 吴兑,吴晨,李菲,等,2011.粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析[J].中国环境科学,31(4):540-545. Wu D, Wu S, Li F, et al, 2011. Air pollution episode in southern China due to the long range transport of coarse particle aerosol[J]. China Environ Sci, 31(4): 540-545(in Chinese).
- 杨晓军,张强,叶培龙,等,2021.中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J].中国沙漠,41(3):245-255. Yang X J, Zhang Q, Ye P L, et al, 2021. Characteristics and causes of persistent sand-dust weather in mid-March 2021 over northern China[J]. J Desert Res, 41(3):245-255(in Chinese).
- 尹晓惠,时少英,张明英,等,2007.北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析[J].高原气象,26(5):1039-1044. Yin X H, Shi S Y, Zhang M Y, et al, 2007. Change characteristic of Beijing dust weather and its sand-dust source areas[J]. Plateau Meteor, 26 (5):1039-1044(in Chinese).
- 尹志聪,霍芊伊,麻晓晴,等,2023.触发2023年春季中国北方沙尘暴的沙源累积和天气扰动机制[J].大气科学学报,46(3):321-331. Yin Z C, Huo Q Y, Ma X Q, et al, 2023. Mechanisms of dust source accumulation and synoptic disturbance triggering the 2023 spring sandstorm in northern China[J]. Trans Atmos Sci, 46(3):321-331(in Chinese).
- 张璐,宋桂英,范凡,等,2022.2021年3月14—16日中国北方地区沙尘暴天气过程诊断及沙尘污染输送分析[J].环境科学学报,42(9):351-363. Zhang L, Song G Y, Fan F, et al, 2022. Diagnosis of sandstorm weather process and analysis of sand pollution transportation in northern China from 14th to 16th, March 2021 [J]. Acta Sci Circumst, 42(9):351-363(in Chinese).
- 张强,王胜,2005.论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J].中国沙漠,25(5):675-681. Zhang Q, Wang S, 2005. On physical characteristics of heavy dust storm and its climatic effect[J]. J Desert Res, 25(5):675-681(in Chinese).
- 张钛仁,张明伟,蒋建莹,2012.近60年北京地区沙尘天气变化及路径分析[J].高原气象,31(2):487-491. Zhang T R, Zhang M W, Jiang J Y, 2012. Analysis on sand-dust weather change and transportation path in Beijing Region in the past 60 years[J]. Plateau Meteor, 31(2):487-491(in Chinese).
- 张艺萌,李晓岚,张宏升,等,2022.2020年春季中国北方一次扬沙天气过程微气象学与沙尘输送特征[J].气象与环境学报,38(4):19-26. Zhang Y M, Li X L, Zhang H S, et al, 2022. Micrometeorological characteristics and dust transport during a blowing sand event in the spring of 2020 over northern China[J]. J Meteor Environ, 38(4):19-26(in Chinese).
- 张迎新,李林,曹晓冲,等,2021.京津冀地区一次持续时间较长浮尘天气的分析[J].沙漠与绿洲气象,15(4):123-129. Zhang Y X, Li L, Cao X C, et al, 2021. Analysis of a persistent floating dust event occurring over the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Desert Oasis Meteor, 15(4):123-129(in Chinese).
- 张志刚,陈万隆,2003.影响北京沙尘源地的气候特征与北京沙尘天气分析[J].环境科学研究,16(2):6-9. Zhang Z G, Chen W L, 2003. Climate character affecting Beijing's dust sources and analysis of the dust weather in Beijing[J]. Environ Sci Res, 16 (2):6-9(in Chinese).
- Chen S Y, Zhao D, Huang J P, et al, 2023. Mongolia contributed more than 42% of the dust concentrations in northern China in March and April 2023[J]. Adv Atmos Sci, 40(9):1549-1557.
- Li J D, Hao X, Liao H, et al, 2022. Predominant type of dust storms that influences air quality over northern China and future projections[J]. Earth's Future, 10(6):e2022EF002649.
- Mu F F, Luiz E W, Fiedler S, 2023. On the dynamics and air-quality impact of the exceptional East Asian dust outbreak in mid-March 2021[J]. Atmos Res, 292:106846.
- Ye Q, Zheng X S, 2023. Distribution, transport, and impact on air quality of two typical dust events in China in 2021[J]. Atmosphere, 14(3):432.
- Yin Z C, Wan Y, Zhang Y J, et al, 2022. Why super sandstorm 2021 in North China? [J]. Natl Sci Rev, 9(3):nwab165.

(本文责编:何晓欢)