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 1 尹志聪1*, 霍芊伊1, 麻晓晴1, 张艺佳1, 马小会2**, 王会军1 2 3 ① 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/大气科学学 4 院, 江苏 南京 210044; 5 北京市气象台,北京 100089 (\mathfrak{D}) 6 7 *联系人,E-mail:vinzhc@nuist.edu.cn 8 **联系人、E-mail:salinamxh@sohu.com 9 10 国家自然科学基金资助项目(42088101) 11 2023年3一4月,我国共出现10次沙尘天气过程,其中3月19-24日和4月9-13日的沙尘过程分别达到强 12 摘要 沙尘暴和沙尘暴等级,给人群健康、生态环境和交通运输带来了严重不利影响。后冬至前春的欧亚大气环流异常 13 呈纬向带状分布,导致沙源地的地表气温以及土壤温度持续偏暖、降水整体偏少、蒸散发效应显著。疏松的沙源 14 为春季沙尘天气提供了丰富的物质基础。触发3月19-24日和4月9-13日沙尘暴过程的天气扰动系统都是蒙古气 15 旋,但两次蒙古气旋及其与后部冷高压的配置存在差异,这也直接造成两次沙尘暴过程在强度、路径和持续时间 16 上的差别。此外,本文也从气候累积效应和天气扰动机制两个方面分析了沙尘事件的研究重点,并侧重讨论了开 17 展沙尘次季节-季节以及年代际预测的必要性和关键点。 18 19 关键词 沙尘暴;沙源地;蒙古气旋; PM10;极端气候 20 21 沙尘暴是一种常见的春季极端天气气候事件。给我国北方地区的国民经济和人民生命财产带来了严重的损失 和极大的危害(Yin et al., 2023a)。沙尘暴发生时,狂风裹挟着沙石,所过之处沙石和浮尘弥漫, PM10浓度显著 22 升高(Krasnov et al., 2016)。例如, 2021年3月15日的华北超级沙尘暴就导致乌兰察布市PM10浓度"爆表"(>9 23 985 µg·m⁻³), 北京市PM₁₀浓度也超过7 000 µg·m⁻³(Yin et al., 2022)。PM₁₀属于可吸入颗粒物,并且可能含有 24 各种有毒化学物质和病菌等,容易引起呼吸系统和眼科疾病(Tobias et al., 2019)。同时,沙尘暴会造成能见度 25 显著降低(Gui et al., 2022)。导致飞机不能正常起落,高铁和汽车停运等。此外,沙尘暴频发意味着沙源地土 26 壤损蚀,也会导致沙尘路径上的农业和畜牧产能下降(Ahmadzai et al., 2023)。 27 影响我国的沙尘源地主要为北方干旱和半干旱地区的沙地、沙漠以及干涸湖床(霍文等,2019)。比如,塔 28 29 克拉玛干和蒙古戈壁沙漠的沙石经由地面强风扰动卷入空中,可经由西风急流长距离传输到中国东部(Huang et al., 2008)。近年来沙源地正在发生显著变化, 沙源地的植被覆盖、土壤湿度和疏松程度等都直接影响触发沙尘 30 暴的物质条件(Tai et al., 2021)。上述要素贡献了2010—2017年间东亚沙尘活动减少这一现象的54%(Wu et al., 31 2022)。值得注意的是,沙源的形成需要前期气候累积效应,这也为沙尘活动提供了一定的气候可预测性(Ji and 32 33 Fan, 2019)。2020/2021年前冬,蒙古国周边沙源地的气温和土壤温度持续偏低(1979年以来最低),而后冬气 温和土壤温度持续偏高(1979年以来最高),快速的土壤墒情转换导致春季土质极为疏松(Yin et al., 2023b)。 34 同时,整个冬季沙源地降水偏少,土壤干化,导致植被覆盖很差。有利的气候效应累积到2021年春季,给沙尘暴 35

36 提供了极为有利的沙源条件(Yin et al., 2022)。
 37 沙小王与的程度受到沙源焦况和王与找动程度的

37 沙尘天气的强度受到沙源情况和天气扰动强度的共同影响(叶笃正等,2000)。起沙、传输和沉降等过程均 与天气尺度的大气扰动密切相关(Gong et al., 2006; Wang and Fang, 2006)。与沙尘天气密切联系的天气系统 38 39 类型包括蒙古气旋与冷锋混合型、纯干冷锋型和蒙古冷高压型等(刘景涛等,2004)。对于影响华北和东北等地 的沙尘,蒙古气旋及其后部冷高压是关注的重点,二者之间的配置决定了两个系统之间的斜压强度,从而影响起 40 沙、输送过程(Zhao and Zhao, 2006; Li et al., 2022)。蒙古气旋可以带来强阵风和不稳定热力条件,进而扰动 41 42 疏松地表,并通过上升运动将地面沙尘卷入1000 m以上的高空(Uno et al., 2008)。同时,蒙古气旋与其后方高 压系统之间的强气压梯度会导致强劲的偏北大风,将空中悬浮的沙尘向下游传输。蒙古气旋的移动速度和方向是 43 44 沙尘传输路径的主控因子,也是沙尘天气预报的重点(Takemi and Seino, 2005)。在沙尘传输过程中,西风角动 45 量下传可以显著加速沙尘粒子的沉降,并增强近地面大风,在距离沙源地几百、甚至数千公里的地方形成一次沙 46 尘天气(彭舒龄等,2019)。沙尘天气一般持续时间比较短,但当蒙古气旋移速缓慢时也会导致沙尘天气的维持 (姜学恭和沈建国, 2006)。在沙尘天气过程后期,偏南风的出现也有可能引起沙尘回流(徐文帅等, 2014)。 47 沙尘活动的长期变化非常复杂,既包括年际、年代际分量,也受到全球变暖的显著影响(康杜娟和王会军, 48

49 2005; Zhu et al., 2008)。1966—1979年和2000—2014年,我国北方春季沙尘频次偏多,但1980—1990年的沙尘
50 频次显著降低(Fan et al., 2018)。2010—2017年,东亚沙尘活动减少,但强沙尘暴仍时有发生(如2006年)。
51 消失十几年的超级沙尘暴在2021年重现华北,引发人们关于"我国沙尘是否进入了新的活跃期"的思考,但随后
52 沙尘活动在2022年春季又有所减弱(https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202303/t20230324_5396394)。2023
53 年春季,我国发生了多次大范围强沙尘天气过程(图1),再次加深了社会各界的困惑和担忧。因此,本文将解
54 析触发2023年春季中国北方沙尘暴的沙源累积和天气扰动机制,旨在及时解答政府部门和公众高度关注的科学问
55 题,也有利于深化对沙尘暴这一极端事件及其机制的科学认识。

56 1 数据与方法

2023年3月1日至4月30日逐小时PM10浓度数据来自中国环境监测总站,可通过https://quotsoft.net/air/公开下载。 57 58 退偏振比由北京南郊观象台激光雷达观测,该数据可以表征沙尘的垂直分布情况。1980—2023年的逐小时气象数 59 据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的第五代大气再分析数据集(ERA5: Hersbach et al., 2023),包括海 平面气压、10m阵风风速、降水、地表温度和蒸发,以及多层位势高度、相对湿度、温度、经向和纬向风以及土 60 壤温度数据(空间分辨率为1°×1°)。K指数通过(T850-T500)+T4850-(T700-T4700)计算得出,其中T850、T700和T500分别 61 62 为850、700和500 hPa的温度, T_{d850}和T_{d700}分别为850和700 hPa露点温度,并通过850和700 hPa温度与相对湿度计 算得出。2023年归一化植被指数(NDVI)来自美国国家海洋大气局(NOAA)国家环境信息中心,空间分辨率 63 为0.1°×0.1°(Vermote et al., 2019)。2020年全球地表覆盖数据来自GlobeLand30(Jun et al., 2014),数据空间 64 分辨率为30米。 65

66 本文采用HYSPLIT模型(https://www.ready.noaa.gov/index.php)追踪了2023年3月22日北京和哈尔滨以及4月
67 10日和11日北京和南京发生的沙尘天气后向轨迹。该模型使用移动的参考系来进行对流和扩散计算,使用的是拉
68 格朗日方法的一种混合方法(Stein et al., 2015)。蒙古气旋强度及路径是根据气旋的天气学定义计算得来(寿绍
69 文,2022)。蒙古气旋定义为:在90°~160°E、40°~60°N区域内,气旋中心海平面气压不高于1010 hPa并且低于
70 其周围8个格点的海平面气压值,且以气旋中心为圆心的5×5个网格范围内平均气压梯度大于等于0.55 hPa/(100
71 km)。蒙古气旋强度定义为蒙古气旋中心最低气压值,气旋移动路径定义为气旋中心最低气压位置的变化路径。

72 2 2023年春季沙尘特征

73 2023年3—4月,我国共出现10次沙尘天气过程,频次是近10年同期最高的(图1)。其中,3月我国集中发生
74 沙尘天气过程4次,3月19—24日的过程达到强沙尘暴等级,影响范围超过480万平方公里;4月发生了6次沙尘天
75 气过程,4月9—13日的沙尘暴影响面积超过450万平方公里。相对于2021年3月14—17日的超级沙尘暴,2023年的
76 两次沙尘暴强度稍弱,但持续时间更长、影响范围更大,给人民生活、交通运输和生态环境带来了严重的威胁。



77

82

 ⁷⁸ 图1 2023年3月1日—4月30日乌兰察布、哈尔滨、北京、南京、杭州和福州观测的日最高PM₁₀浓度(单位:μg·m⁻³),
 79 黄色阴影为两次沙尘暴过程

Fig.1 Daily maximum observed PM₁₀ concentration (units:µg·m⁻³) at Ulanqab, Harbin, Beijing, Nanjing, Hangzhou and
 Fuzhou from 1 March to 30 April in 2023. The yellow shadings represent two sandstorm processes



83 经度
 84 图2 2023年3月19日—3月24日(a)和4月9日—4月13日(b)观测的最高PM₁₀浓度(单位: μg·m⁻³)
 85 Fig.2 The maximum observed PM₁₀ concentration (units:ug·m⁻³) during (a) 19 March to 24 March and (b)

86

87

3月19—24日,强沙尘暴过程的传输高度在1 500~2 000 m(图3a),经乌兰察布市(22日00—12时,北京时
间,下同; PM₁₀>500 μg·m⁻³),影响北京(22日03—18时)和哈尔滨(22日10—23时,图4a),向南最远推进到
长三角地区(23日18时—24日0时,图略)。此次强沙尘暴的传输路径偏北,从华北到东北大片地区的PM₁₀浓度
超过1 000 μg·m⁻³,部分站点PM₁₀浓度超过3 000 μg·m⁻³(图2a)。尤其是给我国东北地区带去了大量的沙尘气溶
胶,导致哈尔滨的PM₁₀浓度超过3 600 μg·m⁻³(图1)。同时,北京和南京的PM₁₀浓度也分别达到了2 180和680 μg·m⁻³
以上,能见度急剧下降。

优先出版稿

Fig.2 The maximum observed PM₁₀ concentration (units:µg·m⁻³) during (a) 19 March to 24 March and (b) 9 April to 13 April in 2023



97	Fig.3	Depolarization rati	io probed by I	Beijing Nanjia	o laser rada	r from (a) 21	Marc	h 20:00 BST to 23 March 08:00 BST
98	•	and (b) 10 April 10):00 to 13 Apr	il 23:00 in 202	23	ΙΥΊ		
99								

100 虽然,4月10日乌兰察布的PM₁₀浓度比3月20日高,超过7000μg·m⁻³,但沙尘粒子在向下游传播后导致的沙
101 尘暴强度却弱于3月19—24日的天气过程(图1)。4月09—13日,沙尘粒子的传输高度在3000m左右(图3b),
102 经北京(10日20时—11日12时)向南传输影响南京(11日17时—12日06时,图4b)、杭州(12日00—09时)和福
103 州(13日00时左右),并于12日下午回流到北京(图略)。此次沙尘暴过程对北京的影响累计持续了70多小时,
104 给首都生产生活带来了严重不利影响。沙尘经过超长距离的传输向南经南京(PM₁₀=1658μg·m⁻³),到达福州
105 (PM₁₀=440μg·m⁻³)。同时,4月10—12日期间哈尔滨的PM₁₀浓度也持续超过500μg·m⁻³,表明此次沙尘暴对东北
106 地区依然有强烈且持续的影响(图1、图2b)。



- 107 108 图4 2023年春季两次沙尘暴过程的HYSPLIT后向轨迹(红线),分别以3月22日06时北京、3月22日17时哈尔滨 109 (a)和4月10日21时北京、4月11日20时南京(b)为起点向后追踪36 h;阴影为2020年土地覆盖类型(灰色 110 为裸地)
 - 111Fig.4The 36-hour backward trajectory of the dust with terminus in (a) Beijing at 22 March 2023 06:00 BST, Harbin at11222 March 2023 17:00 BST, and (b) Beijing at 10 April 2023 21:00 BST, Nanjing at 11 April 2023 20:00 BST (red113line).These trajectories are based on the HYSPLIT model.The shadings are the land cover type in 2020 (the grey114represents bare ground)

116 3 沙源条件

115

117 从卫星观测和HYSPLIT后向轨迹追踪都可以发现蒙古国周边裸露的戈壁沙漠是2023年两次沙尘暴过程的主
118 要沙源地(图4)。虽然戈壁沙漠及周边沙地常年存在,但沙源地的植被覆盖、土壤湿度和沙土疏松程度等存在
119 显著的年际变化,直接影响到起沙的难易程度和效率(Zou and Zhai, 2004)。前期沙源地持续的高温和干旱气
120 候有利于沙源的形成(Yin et al., 2022)。当蒙古国周边的沙地积累了大量干燥松散的沙状物质后,一遇大风,
121 沙尘就会随风而起,极易产生沙尘或沙尘暴(如2021年春季)。

2023年2月至3月上旬蒙古国附近的地表气温持续偏暖,尤其是3月上旬持续偏暖8 ℃以上。虽然3月19—23日 122 123 的大陆冷高压给沙源地带来了一次降温,但并不能有效改变地表偏暖的状态(图5a)。持续偏暖的大气加热了地 表以下30 cm的土壤温度,引起土壤快速失墒,接近两个月的累积效应导致春季的土质变得极为疏松。值得注意 124 125 的是,2023年2—3月的大气2m气温和土壤温度均是1980年以来的第二高,仅次于发生超级沙尘暴的2021年(图 5b)。2022年11月,沙源地的降水接近常年气候态。从2022年12月至2023年3月,沙源地的降水都处于偏少状态, 126 且偏少程度随时间而加重。2023年3月的降水已经较1980—2023年同期平均偏少接近50%(图5d),并且达到了1980 127 年以来历史同期的最低值。同时,因为温度持续偏暖,沙源地2—3月的水分蒸发持续偏强(图5e)。降水偏少与 128 129 蒸发偏强产生的叠加效应显著,导致地表基本无积雪覆盖,致使土壤干化、开裂,阻碍了植被返青和生长(Jia et 130 al., 2011)。沙源地冬春季持续偏暖和偏干的气候条件造成2023年3月较差的植被覆盖状况,大部分区域的归一

131 化植被指数均低于0.1(图5c),呈现出多岩石和沙子的贫瘠条件(John and David, 2000)。因此,2022年冬春

132 季的气候累积效应使得原本就裸露的地表产生了大量干燥松散的沙砾,为沙尘暴的发生提供了极为有利的沙源条133 件。



143Fig.5(a) Daily surface air temperature anomalies (bars; unit:°C) from 1 February to 31 March in 2023 relative to the144mean of 1980—2023, and daily variation in 2023 (black) and 1980—2023 mean (blue).(b) Anomalies of145February—March surface air temperature and soil temperature (unit:°C; underground depth:0—7cm, 7—28 cm)146during 1980 to 2023.(c) The NDVI in March 2023 (unit:1).(d) Monthly precipitation anomalies (bars; unit:mm) in147November 2022 to March 2023 relative to the mean of 19780—2023, and monthly variation in 2022/23 (black)148and 1979/80—2022/23 mean (blue).(e) Daily evaporation anomalies (bars; unit:mm of water equivalent) from 1149February to 31 March in 2023 relative to the mean of 1980—2023, and daily variation in 2023 (black) and1501980—2023 mean (blue).The dust source area is 43°—48°N, 100°—110°E

沙源地的气候条件显著受到大尺度大气环流的调控。2023年2—3月的大气环流异常总体呈纬向分布,与2021 年后冬的大气环流分布相似。东亚极锋急流增强、而副热带急流减弱(Luo and Zhang, 2015),共同导致西伯利 亚高压和东亚大槽的减弱,中高纬大气的经向度减弱(图6a),也就意味着东亚冬季风偏弱,不利于冷空气南下。 北极地区的500 hPa位势高度负距平呈带状分布,乌拉尔山高压减弱;副热带至中纬度地区则为位势高度正异常分 布,冷空气被限制在极地。蒙古国周边受到从西北太平洋延伸至东亚地区的高压控制(图6a),不仅冷空气难以 到达,而且短波辐射加强,导致沙源地的地表气温以及土壤温度持续偏暖(图5a)。此外,对流层低层的高压异 常位于阿留申群岛至日本岛,呈东北-西南走向,不仅导致阿留申低压偏弱,而且驱动太平洋的水汽通道远离内陆 地区。同时,来自北冰洋的冷空气和水汽输送也被中心位于巴伦支海-喀拉海的低压异常所切断,在蒙古国上空形





 162
 图6
 2023年2—3月200 hPa纬向风(阴影;单位:m·s⁻¹)、500 hPa位势高度(等值线;单位:gpm; a)、850 hPa

 163
 风(箭头;单位:m·s⁻¹)以及海平面气压(阴影,单位:hPa; b)的距平(相对于1980—2023年的气候态),

 164
 绿框为沙源地的位置

Fig.6 Anomalies of (a) 200 hPa zonal wind (shading; unit:m·s⁻¹), 500 hPa geopotential height (contours; unit:gpm), (b)
 850 hPa wind (vector; unit:m·s⁻¹) and sea level pressure (shading; unit:Pa) during February—March in 2023
 relative to the mean of 1980—2023. The green box represents the location of dust source area

168 169 4 天气扰动机制→→ /+→ LLI ↓ ↓ 二 千吉

161

触发3月19—24日强沙尘暴天气过程的蒙古气旋强度强,且与后部冷高压配合形成了超过52 hPa的气压差。同 170 时,沙源地上方高低空温差达到30℃以上,不稳定抬升作用强劲。大风的卷扬作用以及大气热力不稳定抬升作用 171 导致大量沙尘被卷向空中。3月22日00时,蒙古气旋中心气压下降到988 hPa,其后方伴随着强盛的冷高压(1035 172 173 hPa)。显著的气压梯度及西风动量下传造成乌兰察布市出现7级的地面偏北阵风, PM10浓度超过6 600 µg·m⁻³(图 7a)。随着蒙古气旋进一步东移,强烈的偏北风裹挟着沙尘粒子向华北地区输送(图4a)。到达北京上空时,沙 174 尘的传输高度在1500—2000米。3月22日6时,在动量下传的助力下,北京上空的稳定边界层被打破(图3a)。伴 175 随着20 m·s⁻¹左右的偏北大风,沙尘沉降到地面,导致北京PM10浓度爆发性增长至2200 ug·m⁻³左右,较6小时之前 176 增加了近10倍(图7b)。随着蒙古气旋向东北方向移动,强沙尘暴于3月22日上午开始侵袭我国东北地区。3月22 177 日16时,哈尔滨市的10 m阵风达15 m·s⁻¹左右, PM₁₀浓度达到3650 µg·m⁻³(图7c)。 178

虽然同样由蒙古气旋触发,但4月9—13日沙尘暴过程与3月的强沙尘暴存在显著不同。4月9—13日,蒙古气 179 旋的强度更强,在4月10日21时蒙古气旋中心气压下降到983 hPa,接近2021年3月15日超级沙尘暴过程。但是,蒙 180 古气旋后部的冷高压强度较弱(1030hPa左右),造成高低压之间气压梯度较小,从而导致偏北风较弱(图8a)。 181 182 超过30 ℃的高低空温差表明不稳定抬升作用较强,结合地面大风扰动作用,可以有效起沙,并向下游传输(图4b)。 4月10日凌晨,沙尘气团已经由蒙古气旋传输到达北京上空。北京本地持续的上升运动导致沙尘气溶胶一直悬浮 183 184 在3000米左右的高空(图3b)。直到4月10日夜间,较强的下沉运动才将沙尘粒子沉降到北京地面,导致PM10浓 度急速攀升到2000 μg·m⁻³以上。同时,4月10日21时,北京市的10 m阵风达到6级。同时,蒙古气旋也将沙尘气溶 185 186 胶传输到东北地区,4月10—12日期间哈尔滨的PM10浓度持续偏高(图8b)。北京和哈尔滨的10m阵风和PM10浓 度均较3月19—24日过程低,说明强冷高压与蒙古气旋的有效配置对沙尘天气的强度有重要影响。 187

4月9—13日的蒙古气旋冷锋更加狭长,锋后偏北风可以将沙尘气溶胶输送到更低的纬度(图8c、d)。4月11
 日18时,南京市的PM₁₀浓度达到本次过程的极值,超过1 600 μg·m⁻³,同时也是2023年3月以来南京市PM₁₀浓度的
 最高值(图1)。在弱冷空气的作用下,沙尘粒子进一步向南漂移,于4月12日夜间到达福州市(最高PM₁₀浓度为

440 μg·m⁻³)。可以非常清楚的发现,4月12日夜间有一个反气旋性环流位于东海且维持,其后部偏南风影响华南
到华北大片区域(图8d)。在偏南风的作用下,沙尘粒子开始向北回流,导致中国东部PM₁₀浓度持续偏高。在北
京1000 m以下的空中,有一个新的沙尘层出现并持续超过48 h(图3b)。4月13日凌晨,北京市PM₁₀浓度回升到
780 μg·m⁻³以上。锋面气旋和偏南风回流的综合作用导致此次沙尘过程持续时间超长。以北京为例,3月强沙尘暴
的影响时间为15 h左右,而4月沙尘暴过程的锋面气旋影响时间接近18 h,回流影响时间接近58 h(图1)。超过70
h黄沙漫天的环境给居民的心理和生理健康造成了巨大危害。



988 996 1004 1012 1020 1028 1036

- 198 图7 2023年3月22日00时(a)、3月22日06时(b)、3月22日16时(c)的海平面气压(阴影;单位:hPa)、500
 199 hPa位势高度(等值线;单位:gpm)、850 hPa风场(箭头;单位:m·s⁻¹)、K指数大于0的区域(白点)。
 200 蒙古气旋强度(单位:hPa)和乌兰察布、北京、哈尔滨的观测PM₁₀浓度(柱形;单位:μg·m⁻³)和10 m阵
 201 风风速(单位:m·s⁻¹)也标记于图中
- Fig.7 500 hPa geopotential height (contours; units:gpm), 850 hPa wind (vector; units:m·s⁻¹), sea level pressure (shading; units:hPa), K index (white dots; >0) at Ulanqab, Beijing and Harbin, at (a) 00:00 BST, (b) 06:00 BST and (c) 16:00 BST on 22 March in 2023.Mongolian cyclone intensity (units:hPa) and observed PM₁₀ concentration (bars; units:µg·m⁻³) and 10 m gust wind speed (unit:m·s⁻¹) are also indicated
 - 8

197



- 207
 988
 996
 1004
 1012
 1028
 1036

 208
 图8
 2023年4月10日21时(a)、4月11日8时(b)、4月11日18时(c)、4月13日00时(d)的海平面气压(阴影;

 209
 单位: hPa)、500 hPa位势高度(等值线; 单位: gpm)、850 hPa风场(箭头; 单位: m·s⁻¹)、K指数大于

 210
 0的区域(白点)。蒙古气旋强度(单位: hPa)和北京、哈尔滨、南京、福州的观测PM₁₀浓度(柱形,单

 211
 位: μg·m⁻³)和10 m阵风风速(单位: m·s⁻¹)也标记于图中
- Fig.8 500 hPa geopotential height (contours; units:gpm), 850 hPa wind (vector; units:m·s⁻¹), sea level pressure (shading; units:hPa), K index (white dots; >0) at Ulançab, Beijing and Harbin, at (a) 00:00 BST, (b) 06:00 BST and (c) 16:00 BST on 22 March in 2023. Mongolian cyclone intensity (units:hPa) and observed PM₁₀ concentration (bars; units:µg·m⁻³) and 10 m gust wind speed (unit:m·s⁻¹) are also indicated.

217 5 结论与讨论

218 2023年2—3月欧亚大陆上空的大气环流异常呈纬向带状分布,西伯利亚高压和东亚大槽偏弱,蒙古国周边受 高压异常控制,导致沙源地的地表气温以及土壤温度持续偏暖(1980年以来的第二高)。此外,对流层低层也缺 219 220 乏向沙源地的水汽输送,从而使得2023年冬春季的降水显著偏少(1980年以来历史同期最低)。冬春季持续偏暖 221 和偏干的气候条件造成2023年2—3月沙源地产生了大量干燥松散的沙砾,为沙尘暴的发生提供了极为有利的沙源 222 条件。沙尘天气的起沙、传输和沉降等过程均与天气扰动密切相关。触发3月19—24日和4月9—13日沙尘暴过程 的天气扰动系统都是蒙古气旋,但两次蒙古气旋及其与后部冷高压的配置存在差异,这也直接造成两次沙尘暴过 223 224 程在强度、路径和持续时间上的差别。3月19—24日的沙尘过程达到强沙尘暴等级,造成北京和哈尔滨的PM₁₀浓 度先后超过2 000和3 600 μg·m-3; 4月9—13日的沙尘暴不仅影响了东北和华北地区,还造成长江以南杭州和福州 225 226 等城市的PM₁₀浓度显著升高。4月18—21日,中国北方也出现了强沙尘暴,但其影响范围明显偏西,本文未展开 讨论。 2.2.7

228 全球变暖的背景下,极端天气气候事件表现出持续性、群发性、复合性和破纪录等新特点(Yin et al., 2023)。 沙尘暴也是一种常发于春季的极端事件,最近几年沙尘的年际差异明显变大,如2021年春季华北发生了超级沙尘 229 230 暴,2022年的沙尘天气明显减弱(吴进等,2023),但2023年的沙尘又变得很强。因此,有必要针对沙尘相关的 天气气候机制开展研究。气候尺度研究的关键点包括前期的多尺度海-陆-气相互作用、北极海冰以及青藏高原等 231 232 地球系统内部因子对沙源条件和蒙古气旋频次的协同影响、相对贡献及其途径和过程。天气尺度研究则应聚焦于 一周以内的蒙古气旋和上下游配置,及其起沙、传输和沉降等动力过程,也应包括沙尘发生时天气-化学双向反馈、 233 234 空气质量和健康生态影响等(图9)。在沙尘的天气预报中,CMA-CUACE/Dust等沙尘暴数值预报业务系统可以 提前一周预报东亚区域的沙尘浓度分布、传输路径等,并向决策部门和社会公众提供服务(http://www.asdf-bj.net/)。 235

236 但是,提前1—3个月的沙尘气候预测依然是国际难题(Ji and Fan, 2019;董莹等, 2021; Wang et al., 2022)。
237 目前,关于沙尘的气候研究大多数关注其频次的变化,气候机制的解释也侧重于对蒙古气旋频次的影响。当前对
238 于沙源条件的变化及其机制和人类活动影响研究的重视程度还不够,这在一定程度上制约了沙尘事件的次季节239 季节预测水平。因此,构建综合考虑沙源条件和蒙古气旋变化的气候预测模型是值得关注的科学问题,也紧扣国
240 家防灾减灾的重大需求。此外,2021年和2023年的严重沙尘暴也提出了一个科学问题,也就是"沙尘事件是否进入了新的活跃期?"。对这个问题的回答,需要开展沙尘变化的年代际机制和预测研究,也在一定程度上涉及到
242 沙尘趋势的未来变化预估等。



- 286 Climate, 28(22): 9013-9028. doi: 10.1175/jcli-d-15-0160.1. 287 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 288 S D, Wei K J, et al., 2019. Causes and characteristics of a dust weather process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Trans 289 Atmos Sci,42(6):926-935.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180428001.(in Chinese). 290 寿绍文,2002.天气学分析[M].北京:气象出版社:97-120. Shou S W,2022.Synoptic analysis[M].Beijing:China Meteorological 291 Press:97-120.(in Chinese). 292 Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al., 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bull Amer 293 Meteor Soc,96(12):2059-2077.doi:10.1175/bams-d-14-00110.1. 294 Tai A P K, Ma P H L, Chan Y C, et al., 2021. Impacts of climate and land cover variability and trends on springtime East Asian dust emis-295 sion over 1982—2010:a modeling study [J]. Atmos Environ, 254:118348. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118348. 296 Takemi T.Seino N.2005.Dust storms and cyclone tracks over the arid regions in East Asia in spring [J]. J Geophys Res At-297 mos,110(D18):D18S11.doi:10.1029/2004JD004698. 298 Tobias A,Karanasiou A,Amato F,et al.,2019.Health effects of desert dust and sand storms [J].Environ Epidemi-299 ol.3:396.doi:10.1097/01.ee9.0000610424.75648.58. 300 Uno I, Yumimoto K, Shimizu A, et al., 2008.3D structure of Asian dust transport revealed by CALIPSO lidar and a 4DVAR dust model 301 [J] .Geophys Res Lett, 35(6): L06803. doi:10.1029/2007GL032329. 302 Vermote E,2019[2023/4/26].NOAA Climate Data Record (CDR) of AVHRR Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Version 303 5[DB].NOAA National Centers for Environmental Information.doi:10.7289/V5ZG6QH9. 304 Wang H J,Dai Y J,Yang S,et al.,2022.Predicting climate anomalies:a real challenge [J] .Atmos Ocean Sci 305 Lett,15(1):100115.doi:10.1016/j.aosl.2021.100115. 306 Wang W,Fang Z Y,2006.Numerical simulation and synoptic analysis of dust emission and transport in East Asia [J]. Glob Planet 307 Change,52(1/2/3/4):57-70.doi:10.1016/j.gloplacha.2006.02.004. 308 Wu C L,Lin Z H,Shao Y P,et al.,2022.Drivers of recent decline in dust activity over East Asia [J] .Nat Com-309 mun,13:7105.doi:10.1038/s41467-022-34823-3. 吴进,李琛,朱晓婉,等, 2023.2021 年和 2022 年春季中国北方地区沙尘天气异同[J].大气科学学报. Wu J,Li C,Zhu X W,et 310 311 al.,2023. Analysis of differences of sand dust weather in North China in spring 2021 and 2022[J]. Trans Atmos Sci. 312 徐文帅,李云婷,孙瑞雯,等,2014.典型沙尘回流天气过程对北京市空气质量影响的特征分析[J].环境科学学报,34(2):297-302. Xu 313 W S,Li Y T,Sun R W,et al.,2014. Impact characteristics of a typical dust backflow weather on the air quality in Beijing [J]. Acta Sci Circumstantiae,34(2):297-302.(in Chinese). 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等,2000.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,55(5):513-521. Ye D Z,Chou J F,Liu J 314 315 316 Y,et al.,2000.Causes of sand-stormy weather in Northern China and contral measures [1]. Acta Geogr Sin,55(5):513-521.(in 317 Chinese). 318 M K,et al.,2023.Climate Yin C,Zhou В T,Duan increasingly fierce China Z extremes become in 319 [J] .Innov,4(2):100406.doi:10.1016/j.xinn.2023.100406. 2021 320 Z C,Wan Y,Zhang Y J,et al.,2022.Why super China? [J].Natl Sci North Yin sandstorm 321 Rev,9(3):nwab165.doi:10.1093/nsr/nwab165. 322 Yin Z C,Zhang Y J,Zhou B T,et al.,2023.Subseasonal variability and the "Arctic warming-Eurasia cooling" trend [J] .Sci 323 Bull,68(5):528-535.doi:10.1016/j.scib.2023.02.009. 324 Zhao L N, Zhao S X, 2006. Diagnosis and simulation of a rapidly developing cyclone related to a severe dust storm in East Asia [J]. Glob 325 Planet Change, 52(1/2/3/4):105-120.doi:10.1016/j.gloplacha.2006.02.003. 326 Zhu C W, Wang B, Qian W H, 2008. Why do dust storms decrease in Northern China concurrently with the recent global warming? 327 [J] .Geophys Res Lett, 35(18):L18702.doi:10.1029/2008GL034886. 328 Zou X K,Zhai P M,2004.Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over Northern China [J] .J Geophys Res 329 Atmos,109(D3):D03104.doi:10.1029/2003JD003913. 330 Mechanisms of dust source accumulation and synoptic disturbance triggering 331 the 2023 spring sandstorm in Northern China 332 333 YIN Zhicong¹, HUO Qianyi¹, MA Xiaoqing¹, ZHANG Yijia¹, MA Xiaohui², WANG Huijun¹ 334 ¹Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters /Key Laboratory of Meteorological 335 Disasters, Ministry of Education /School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technolo-
- 336 *gy*,*Nanjing* 210044,*China*;
- 337 ²Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100089
- 338

From March to April in 2023, 9 dust weather processes occurred in China. The processes from 19 to 24 March and from 9 to 13 April reached the level of strong sandstorm and sandstorm respectively, bringing adverse impacts on population health, ecological environment and transportation. The anomalous Eurasian atmospheric circulations showed a zonal distribution from the late winter to early spring, the Siberian high and the East Asian trough were weak, and the area around Mongolia was controlled by the high pressure anomaly, which resulted in the continuous warm surface air temperature and soil temperature in the dust source area (the second highest since 1980). In addition, the lower troposphere also lacked water vapor transporting to the 345 sand source, resulting in significantly less precipitation in the winter and spring of 2023 (the lowest in history since 1980). The 346 continuous warm and dry climate conditions in winter and spring resulted in a large number of dry and loose gravel in the dust 347 source area from February to March in 2023, which provided extremely favorable dust source conditions for the occurrence of 348 sandstorms. The synoptic disturbance systems that triggered the sandstorms in March 19-24 and April 9-13 were both Mon-349 golian cyclones. However, the two Mongolian cyclones and their configuration with the rear cold high were different, which 350 directly caused the differences in the intensity, path and duration of the two sandstorms. From 19 to 24 March, the dust process 351 reached the level of strong sandstorm, causing PM₁₀ concentrations in Beijing and Harbin to exceed 2000 and 3600 μ g·m⁻³ re-352 spectively. The sandstorm from 9 to 13 April not only affected Northeast and North China, but also caused a significant increase 353 in PM_{10} concentration in cities south of the Yangtze River, such as Hangzhou and Fuzhou. Moreover, the research emphases of 354 dust events from the aspects of climate cumulative effect and synoptic disturbance mechanism are analyzed, and the necessity 355 and key points of conducting subseasonal-seasonal and interdecadal prediction of dust events are discussed. Furthermore, severe 356 sandstorms in 2021 and 2023 also raise the scientific question, "Have dust events entered a new period of activity?". To answer 357 this question, it is necessary to study the interdecadal mechanism and prediction of dust change, and also to predict the future 358 change of dust event trend to a certain extent.

359

360 sandstorm; dust source area; Mongolian cyclone; PM₁₀; extreme climate

- 361
- 362
- 363
- 364

(责任编辑:张福颖)

大气科学学报 优先出版稿