

杨晓军,张强,叶培龙,等.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,2021,41(3):245-255.

中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因

杨晓军¹,张强²,叶培龙^{1,3},秦豪君¹,徐丽丽¹,马莉¹,巩崇水²

(1.兰州中心气象台,甘肃兰州730020;2.中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃兰州730020;3.兰州大学 半干旱气候变化教育部重点实验室/大气科学学院,甘肃兰州730020)

摘要:沙尘天气是多发于中国北方春季的灾害性天气,严重危害农业生产、交通运输、空气质量和人民的生命财产安全,长期受到社会各界的广泛关注。利用多源多尺度数据,采用天气学分析、物理量诊断、轨迹分析等方法对2021年3月中旬西北地区东部一次持续性沙尘重污染天气的成因进行了深入分析。结果表明:(1)受强烈发展的蒙古气旋影响,蒙古国南部及中国内蒙古中西部地区于3月14日首先出现强沙尘暴天气,并将沙尘传输至中国西北、华北、东北一带,西北东部的沙尘天气维持达到5 d。(2)沙尘天气维持期,西北东部中低层以弱上升运动为主,大气层结稳定,且西北东部不断有弱锋生发展,不利于沙尘的沉降;自北向南分布的银川、中卫、兰州3站的垂直螺旋度的波动与污染浓度的变化基本一致;混合层高度较其气候平均值明显偏低,不利于大气湍流发展。(3)此次影响西北东部的沙尘主要由蒙古国输入,近20年中蒙边境、蒙古国南部的植被减少可能是此次沙尘天气的沙源主要来自蒙古国南部的原因。

关键词:中国北方;春季;持续性沙尘;天气过程;成因

文章编号:1000-694X(2021)03-245-11

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00062

中图分类号:X513

文献标志码:A

0 引言

沙尘天气多发于中国北方春季,是极强的灾害性天气。沙尘天气发生时,对工农业生产造成严重的直接危害,由此形成的沙尘气溶胶还通过多种途径对环境、生态、气候和人体健康等多方面造成滞后、持续、长期的间接危害。因此,在生态环境问题日趋突出的今天,沙尘天气成为社会广泛关注的热点问题。

中国北方的沙尘天气活动具有明显的年代际变化特征,20世纪60—70年代波动上升,80—90年代波动减少,2000年之后又急剧上升,且沙尘活动的变化与东亚大气环流的年代际变化和生态环境的变化有关^[1-3]。学者利用地面观测数据、卫星植被指数及数值模拟方法,对2007—2016年东亚地区

沙尘暴的频率和强度进行研究并发现东亚春季沙尘事件的数量和强度总体呈下降趋势^[4],且沙尘天气的出现频次较20世纪明显减少,但在沙尘活动日益减少的背景下,干旱和半干旱区沙尘气溶胶造成的污染对区域生态环境及社会经济活动造成的不利影响也不容忽视。

沙尘暴发生在大气有利的动力、热力结构及下垫面条件下^[5-9],王汝佛等^[10]认为大部分沙尘天气与大气环流的短期变化密切相关,刘景涛等^[11]将中国北方引起沙尘暴的天气系统划分为冷锋型、蒙古气旋与冷锋混合型、蒙古冷高压型及干飚线与冷锋混合型4种类型,而冷锋和气旋型是最为常见的天气尺度系统,气旋型沙尘暴主要出现在气旋冷锋后部^[12]。西北地区东部(简称西北东部)地处干旱、半

收稿日期:2021-05-08;改回日期:2021-05-16

资助项目:中国气象局气象预报业务关键技术发展专项子项目(YBGJXM(2020)4A-06)

作者简介:杨晓军(1980—),男,陕西榆林人,高级工程师,研究方向为天气预报。E-mail:102804685@qq.com

通信作者:张强(E-mail:zhangqiang@cma.gov.cn)

干旱区,生态环境脆弱,降水稀少,同时毗邻中国主要的沙尘源区,在强风天气里容易引起西北东部出现大范围的沙尘天气,导致环境空气质量急剧下降^[13-14],研究者已经对该地区的沙尘天气开展了较多研究。许东蓓等^[15]利用观测资料对2009年4月28—30西北地区出现的区域性沙尘暴进行了天气分析,指出500 hPa高空槽、地面冷锋及热低压是形成此次沙尘暴的主要天气系统,强沙尘暴过程中总螺旋度负值中心与500 hPa低压槽密切相关,且沙尘天气出现在总螺旋度零线附近的等值线密集处。赵庆云等^[16]通过对2010—2020年西北地区最强的一次沙尘天气的研究发现,中西伯利亚—新疆北部的偏北大风速带将高空动量向下传播及地面热低压强烈发展导致的边界层对流不稳定是引起西北地区出现大范围沙尘天气的主要成因。值得关注的是1993年5月5日在河西走廊东部至宁夏西部一带发生了历史罕见的黑风暴天气,王式功等^[17]指出此次过程是在欧亚范围内经纬向环流转换过程中伴随强冷锋过境产生的,动量下传及锋前后变压梯度引起的变压风是造成近地面大风的直接因素,中尺度飚线与锋面相结合加剧了沙尘的强度。此后,多位研究者从黑风暴的物理特性、气候效应、天气分型等方面做了细致的研究^[18-20]。

2021年3月14—18日,受蒙古气旋和冷锋影响,中国北方出现了近10年最强沙尘天气。此次强沙尘暴于3月14日上午起源于蒙古国南部,14日夜间进入中国,先后影响中国华北、东北、西北、江淮等地区,其中,西北东部的沙尘天气一直维持到18日夜间。

以往的研究多集中于沙尘天气的时空变化特征及强沙尘暴天气过程的大尺度系统及对应物理量的分析,而2021年3月中旬的沙尘天气具有维持时间长的特征,且影响范围覆盖了整个中国北方地区。有研究表明在全球气候增暖背景下,近10年来西北东部沙尘天气明显偏少,但降水显著增加,那么此次西北东部的沙尘天气是否已呈现出新的特征?该地区出现持续性沙尘天气的成因是什么?沙尘是否来源于中国的4大沙源区?这些问题均需深入探讨。基于此,本文针对2021年3月中旬西北东部一次持续性沙尘天气的成因进行深入分析,以期为提高该地区持续性沙尘天气的认识提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 数据

1.1.1 空气质量数据

自北向南依次选取西北东部3个典型代表站银川、中卫、兰州站进行分析。 PM_{10} 浓度数据来源于甘肃、宁夏两省区环保部门提供的空气质量监测数据。能见度数据来源于中国气象局地面观测资料^[21-22]。

1.1.2 气象数据

气象实况数据来源于中国气象局高空及地面观测数据;物理量等要素数据选择美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的FNL再分析资料(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)^[23-24],FNL数据空间分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$,时间分辨率为6 h,选取2021年3月13—19日的16个气压层上的温度、湿度、风向、风速、位势高度等数据;HYSPLIT后向轨迹模型所用的气象资料来自NCEP(美国国家环境预报中心)的GDAS全球同化产品^[25-26]。

1.1.3 植被数据

卫星遥感反演的植被数据来自美国国家航空航天局(NASA)地球观测系统(Earth Observing System)计划发布的MODIS植被覆盖产品集(MOD13)。该数据集的空间分辨率约为50 km,时间分辨率为30 d,时间序列为2000—2021年,是目前国际上分辨率最高、时间序列最完整的植被遥感资料。

1.2 方法

1.2.1 锋生函数

为了解此次过程中西北地区锋生锋消的特点,利用假相当位温来表征锋面特征, p 坐标系的锋生函数公式如下:

$$F_G = \frac{d}{dt} |\nabla \theta_{se}| = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{1}{|\nabla \theta_{se}|} \left[\frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d\theta_{se}}{dt} \right) + \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{d\theta_{se}}{dt} \right) \right] \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta_{se}|} (E_{st}^2 + E_{sh}^2)^{\frac{1}{2}} \cos 2\beta = \frac{1}{2} |\nabla \theta_{se}| E \cos 2\beta \quad (3)$$

$$F_3 = -\frac{1}{2} |\nabla \theta_{se}| D \quad (4)$$

$$F_4 = -\frac{1}{|\nabla\theta_{sc}|} \left[\frac{\partial\theta_{sc}}{\partial x} \frac{\partial\omega}{\partial x} + \frac{\partial\theta_{sc}}{\partial y} \frac{\partial\omega}{\partial y} \right] \frac{\partial\theta_{sc}}{\partial p} \quad (5)$$

$$E = (E_{st}^2 + E_{sh}^2)^{\frac{1}{2}} E_{st} = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} E_{sh} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6)$$

$$\beta = \eta - \psi \tan \eta = -\frac{\frac{\partial\theta_{sc}}{\partial x}}{\frac{\partial\theta_{sc}}{\partial y}} \tan 2\psi = \frac{E_{sh}}{E_{st}} \quad (7)$$

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

式中: F_G 为总锋生函数, $F_G > 0$ 代表锋生, $F_G < 0$ 代表锋消。 F_G 由4项组成, F_1 为非绝热项, 量级较小, 一般略去; F_2 为水平变形项, 与等 θ_{sc} 线和变形向量的夹角 β 有关, 变形流场最有利于锋生; F_3 为水平辐合项, 在已有的水平温度梯度情况, 水平辐合产生的水平温度梯度的增加即为锋生; F_4 为倾斜项, 与大气稳定性和垂直速度有关, 当 $\frac{\partial\theta_{sc}}{\partial p} > 0$, 即大气处于稳定时, 当暖气团中下沉运动 $\omega < 0$, 而冷气团中有上升运动 $\omega > 0$, 则锋生, 反之为锋消。

1.2.2 垂直螺旋度

垂直螺旋度是垂直涡度和垂直速度的积, 它的大小反映了垂直方向上旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度。垂直螺旋度反映了两个与天气现象紧密联系的物理量的配合情况, 在一定程度上不仅能反映系统的维持状况, 还能反映系统发展、天气现象的剧烈程度。

通常情况下, 垂直螺旋度在 z 坐标系、 p 坐标系中的计算表达式分别定义为:

$$h_z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) w = \zeta w \quad (9)$$

$$h_p = -\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega = -\zeta \omega \quad (10)$$

式(9)是在 z 坐标系中对垂直螺旋度的直接定义且符合右手准则, 类似地, 式(10) (不含负号部分) 是在 p 坐标系中对垂直螺旋度的直接定义, 式(9)、(10)得到的一般称作局地垂直螺旋度。在实际应用中, 计算局地垂直螺旋度可以得到每一层的垂直螺旋度, 为表征高层到低层垂直螺旋度的天气学意义, 也为计算方便, 定义 p 坐标系中的积分垂直螺旋度为:

$$h_{pi} = -\int \omega \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dp \quad (11)$$

1.2.3 HYSPLIT 后向轨迹模型

HYSPLIT 后向轨迹模型是美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局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的功能, 已经被广泛地应用于多种污染物在多地区的传输和扩散的研究中。

3 结果与分析

3.1 沙尘天气过程及特征

从此次沙尘天气逐日演变特征来看, 2021年3月14日在蒙古国西部首先出现沙尘天气, 之后自西向东开始影响中国北方地区, 沙尘天气面积超过380万 km^2 , 其中, 内蒙古中西部、甘肃西部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部、北京、天津等地出现了沙尘暴, 内蒙古中西部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部、北京等地部分地区还出现了强沙尘暴, 西北地区大部沙尘天气从15日一直持续至19日(图1)。北方多地 PM_{10} 峰值浓度超过5000 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 沙尘天气造成多地空气严重污染, 部分地区出现航班取消或延误、高速公路临时管制、列车晚点等情况, 内蒙古、宁夏、甘肃、新疆等地部分地区农作物受灾和农业设施受损, 内蒙古包头因沙尘天气紧急停课。

通常沙尘天气爆发前期降水偏少、气温偏高, 干燥裸露的地表为大范围沙尘天气的发生提供了丰富的沙尘源^[27-28]。国家气候中心的数据显示自2021年1月至3月上旬中国北方大部及蒙古国南部平均气温较常年同期偏高1—2 $^{\circ}\text{C}$, 降水也异常偏少, 特别是2021年3月上旬西北地区大部、内蒙古中西部、蒙古国西南部平均气温较同期偏高4—6 $^{\circ}\text{C}$, 非常有利于沙尘天气的发生。

近20年西北地区降水呈显著增加趋势, 生态环境状况得到持续改善^[29], 中国从2001年开始实施退耕还草还林政策, 使中国境内的部分沙源区得到了有效治理, 这可能是中国北方地区近20年沙尘天气显著减少的原因之一。从图2可以看出, 与22年前(2000年2月)相比, 2021年2月西北地区大部、内蒙古西部的植被明显增加, 但中蒙边界地区、蒙古国南部地区的植被减少。因此, 在这样的气候背景条件下, 蒙古国及中蒙边界极易出现大范围的沙尘暴

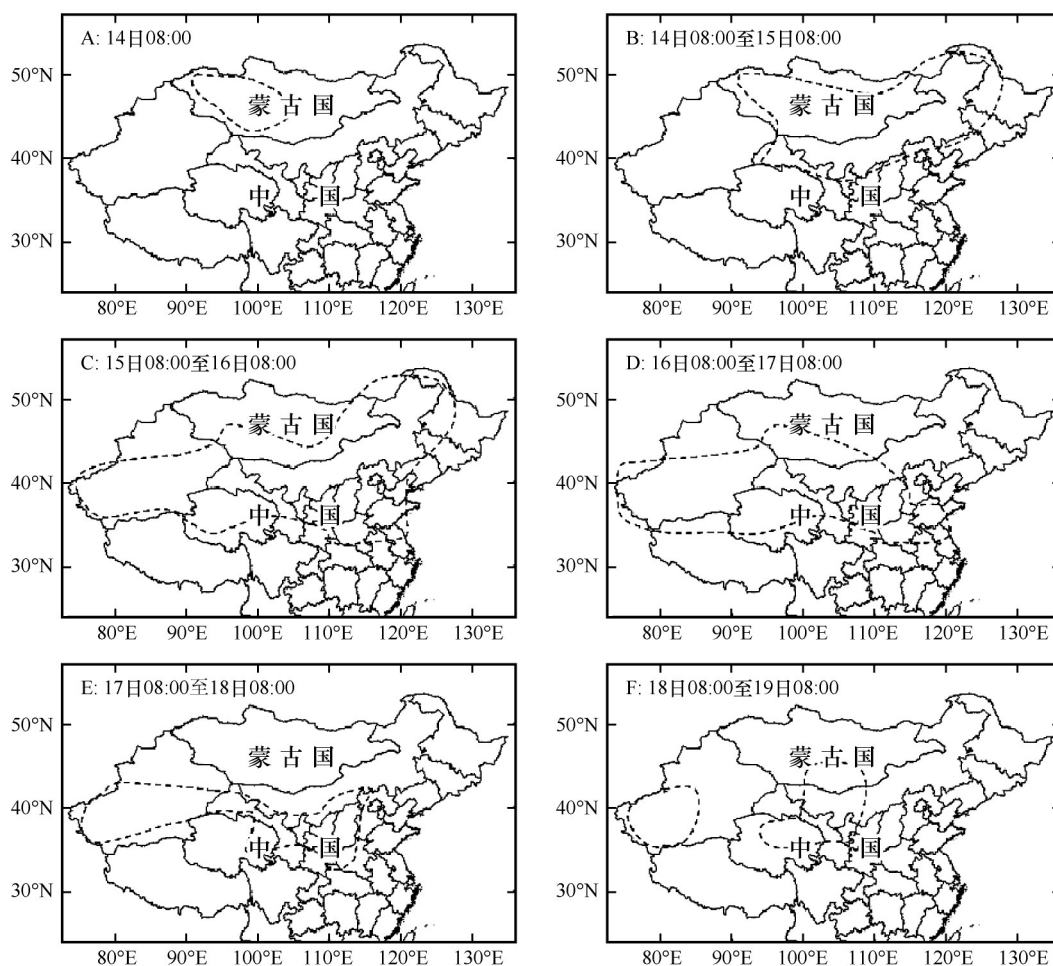


图1 2021年3月14—19日沙尘区域变化

Fig.1 The actual of sand-dust weather on March 14–19, 2021

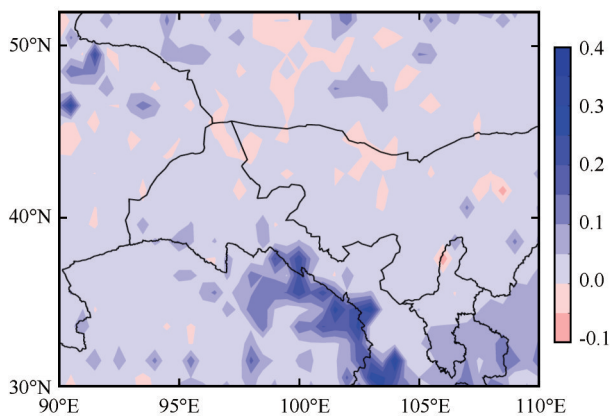


图2 2021年2月MOD13植被指数与2000年2月MOD13植被指数的差值

Fig.2 The difference between the MOD13 vegetation index in February 2021 and the MOD13 vegetation index in February 2000

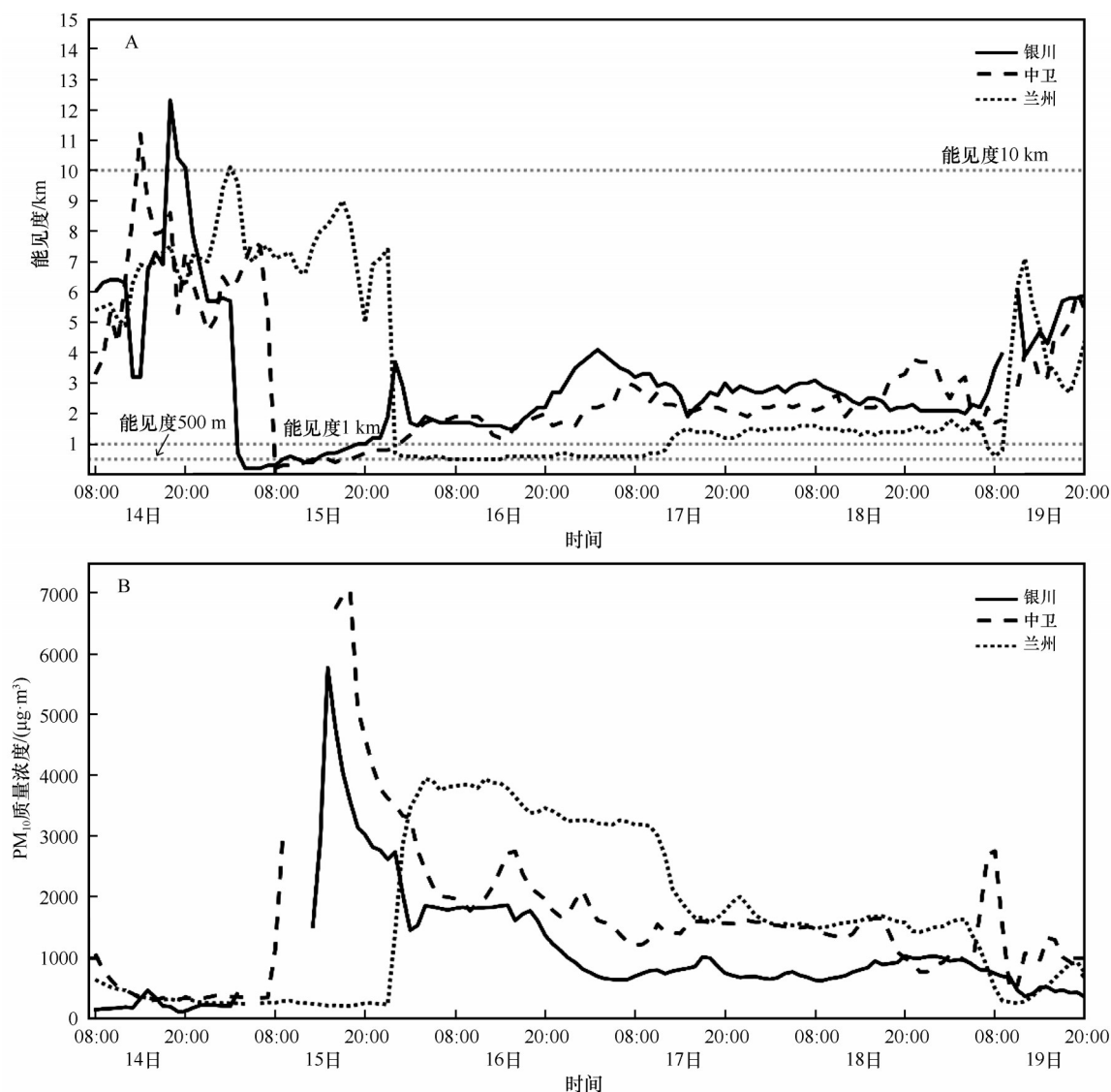
天气。

与中国北方其他地区相比,西北东部(32°—42°N, 100°—110°E)的沙尘天气维持时间长,大部分地区

达到5 d。15日02:00,银川能见度骤降(图3A),从01:00的5 000 m降至700 m,之后继续下降,03:00—05:00能见度达到最低仅200 m;同时,PM₁₀质量浓度急剧上升,在15日14:00最高达到5 776 μg·m⁻³(图3B)。中卫位于银川西南方,受沙尘影响时间略迟,15日07:00能见度由5 200 m骤降至200 m,PM₁₀质量浓度在15日01:00达到7 044 μg·m⁻³。兰州站的能见度于15日23:00由7.4 km骤降至700 m,此后16日06:00—13:00能见度维持在1 000 m以下,最低时达到500 m,在此期间PM₁₀质量浓度于16日04:00达到3 950 μg·m⁻³。总的来看,银川和中卫的沙尘天气于15日凌晨开始,而兰州15日夜间开始,3站均出现了长达5 d的重污染沙尘天气,尤其是兰州市的低能见度(<1 000 m)持续时间长达8 h,18日夜间至19日上午3站沙尘天气逐渐结束。

3.2 天气背景及物理量分析

春季沙尘天气的发生不仅与前期高温少雨的

图3 能见度(A)和 PM_{10} 质量浓度(B)时间变化Fig.3 The time change of visibility (A) and PM_{10} mass concentration (B)

气候条件有关,沙尘爆发前期的天气背景及其物理量的演变也是引发沙尘天气的重要原因。

3.2.1 天气形势演变

沙尘爆发前期,2021年3月13日08:00的500 hPa高空图显示欧亚中纬度环流主要为多波动纬向型,低压中心位于新地岛以东洋面,前期乌山脊崩溃后脊前切断低涡填塞形成的低槽位于巴湖以北,槽前有较强暖平流有利于地面低压发展。同时次地面图显示冷高压位于里海北部,中心气压为1 035.0 hPa,锋前新疆北部至巴湖有弱低压发展,中心气压1 010.0 hPa。14日08:00的500 hPa高空图上,弱新疆脊发展,低槽东移到贝加尔湖西侧至蒙古西部与东移至泰米尔半岛的低压低槽同位相叠加发展,槽后偏北风迅速加大,最大达 $36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,将

极地冷空气向南输送,在贝加尔湖西侧形成 -36°C 的冷中心,槽前暖脊发展,暖平流迅速增强(图4A)。同时次地面图上,冷高压分裂出一个副中心东移至阿尔泰山西侧,中心强度增强至1 044.0 hPa,冷锋位于贝加尔湖-蒙古西部-天山北麓,锋前贝加尔湖东侧至蒙古中北部低压快速发展,中心强度为992.5 hPa, 50°N 锋面附近地面最大气压梯度超过 $0.055 \text{ hPa}\cdot\text{km}^{-1}$,风速加大,蒙古西部开始出现沙尘天气,个别站出现沙尘暴(图4B)。沙尘爆发时,15日08:00时的500 hPa高空图上,新疆脊快速发展,脊线向东北方向倾斜使得低槽断裂,其南支在内蒙古东北部形成切断低压,中心强度达516 gpdm(图4C)。同时次地面图上,冷高压副中心东移至阿尔泰山至贝加尔湖之间,中心强度为1 045.0 hPa,高压前部冷

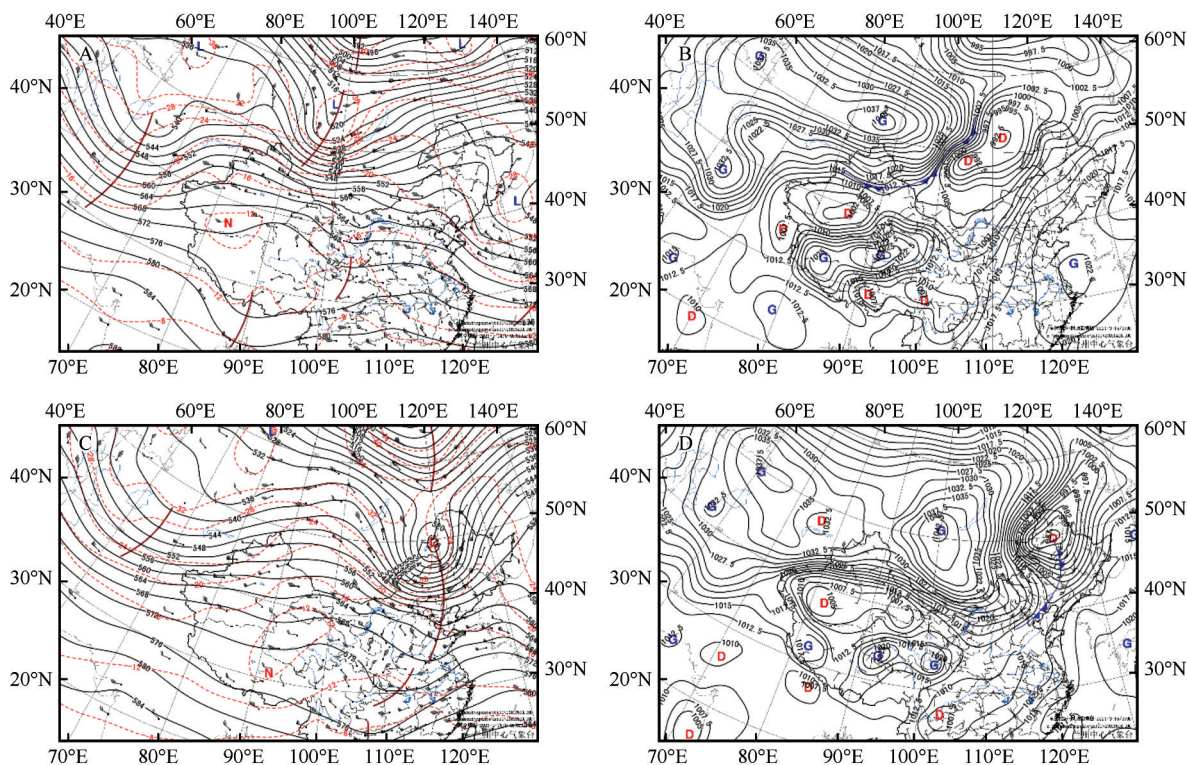


图4 2021年3月14日08:00 500 hPa高空图(A)、地面图(B)和3月15日08:00 500 hPa高空图(C)、地面图(D)

Fig.4 The 500 hPa high-altitude map (A) and ground map (B) at 08:00 on March 14 and the 500 hPa high-altitude map (C) and ground map (D) at 08:00 on March 15, 2021

空气分三路进入中国北方,一路经内蒙古东部进入东北中南部至华北东部,另一路经内蒙古中部进入华北西部至西北地区东部,还有一路经内蒙古西部转向西影响西北地区西部,锋前低压东移至呼伦贝尔市并发展加强为蒙古气旋,中心强度达987.5 hPa,50°N锋面附近最大气压梯度超过 $0.062 \text{ hPa} \cdot \text{km}^{-1}$,冷锋位于呼伦贝尔-华北-河套-河西走廊,锋后出现大范围大风沙尘天气,内蒙古、北京、山西、甘肃等地局部地方出现沙尘暴或强沙尘暴(图4D)。

15日20:00的500 hPa高空图上,威海和巴湖之间的低槽分裂出短波东移至新疆东部;700 hPa高空图上,补充冷空气侵入河西走廊东部。同时次地面图显示,冷高压副中心和蒙古气旋均开始减弱并缓慢东移,冷锋整体南压,受补充冷空气影响,冷锋在甘肃中西部南突,河西地区 PM_{10} 浓度出现回升,沙尘天气开始影响兰州,到后半夜开始沿黄河、湟水河谷进入青海东部。沙尘天气维持期间,中国中高纬处于平直西风环流控制,西北地区大气层结稳定不利于沙尘消散。18日夜间开始到20日,乌山脊发

展,巴湖附近低槽开始东移,引导地面冷高压东移至蒙古西部,冷高压不断分裂弱冷空气南下影响西北地区,西北地区沙尘天气虽然再次出现反弹,但是受降水和吹风影响,本次持续沙尘天气逐渐减弱并结束。

从银川、中卫、兰州3站的时间-高度剖面图可以看出,沙尘天气爆发前银川位于冷锋前低压的底部,在垂直方向上表现为上升运动,15日02:00银川沙尘天气强盛阶段,低层西北风逐渐减弱,整层表现为下沉运动,且低层温度迅速下降(图5A);中卫温度、垂直速度、风场的垂直变化时间略滞后于银川,上升运动出现在15日08:00,同时低层风速增大,与中卫能见度骤降时间也刚好符合(图5B);相比于银川、中卫,兰州沙尘天气开始时上升运动较弱,低层风速没有明显增大,沙尘天气维持阶段垂直方向上的各要素变化较小(图5C)。19日08:00新的冷空气过境,3站整层均转为西北气流,且整层风速明显增大,并存在较强的垂直运动,有较好的大气扩散条件,同时伴有降水产生,沙尘天气逐渐减弱并结束。

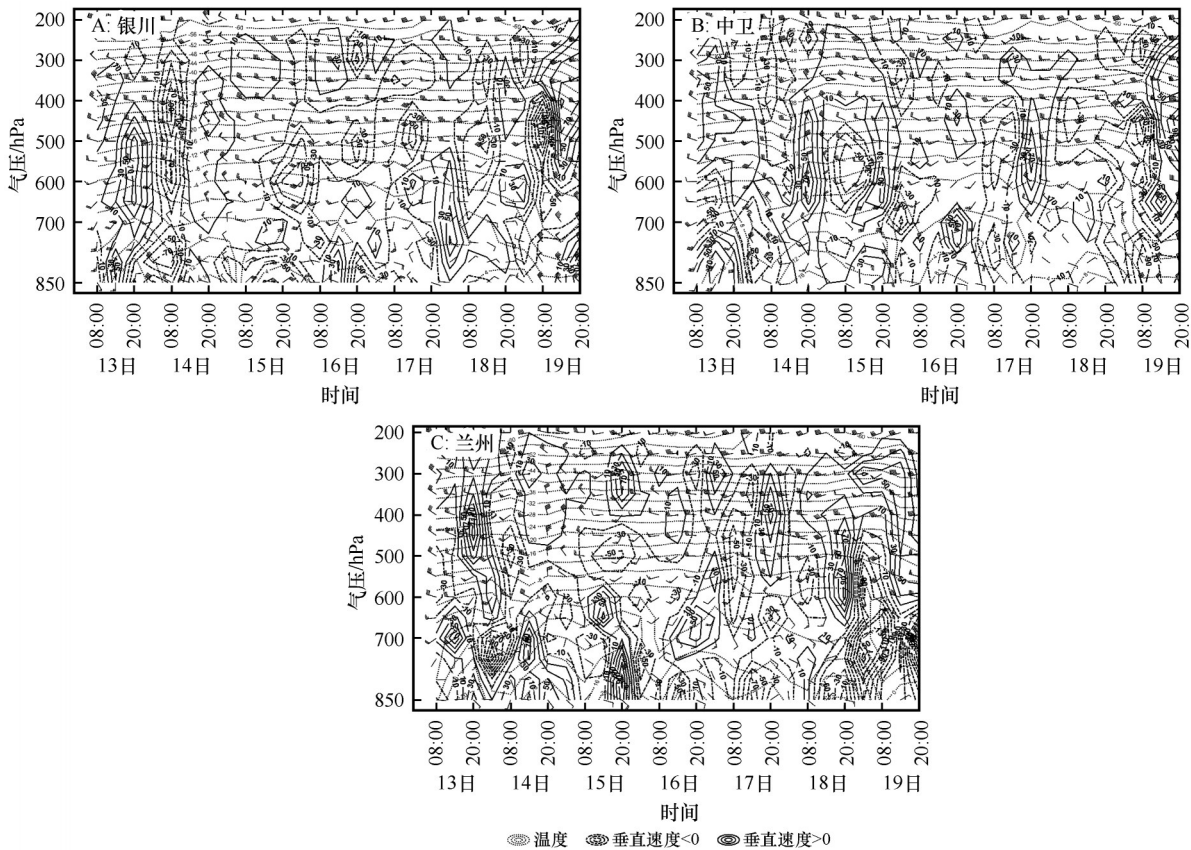


图5 温度、垂直速度、风场的时间-高度剖面

Fig.5 The time-height profile of temperature, vertical velocity and wind field

综上所述,此次沙尘天气过程中,从东北到西南(银川-中卫-兰州)中低层以弱上升运动为主,边界层内风速较小,大气层结趋于稳定,尤其以兰州该特征更为明显,此天气背景不利于沙尘的扩散,导致沙尘天气的长时间维持。

3.2.2 锋生函数

为了解此次沙尘天气锋生及锋消的演变特征,取 104°—106°E(兰州-银川的经度范围)锋生函数的平均值,研究其在 30°—50°N 的时间变化(图 6)。14 日凌晨开始 45°N 附近有强烈的锋生,该区域为蒙古国中西部,锋生中心值为 $90.6\times10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,之后锋生从高纬逐渐向低纬发展。

15 日 08:00 沙尘天气开始前后,银川至中卫有锋生发展,中心值为 $17.7\times10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,该时段银川、中卫的 PM_{10} 质量浓度(能见度)急剧上升(下降,图 3)。15 日 20:00 出现较强锋消,中心值为 $-83.2\times10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,此时银川与中卫的 PM_{10} 质量浓度骤降,能见度略微升高。

16 日 14:00 至 17 日 02:00,银川至兰州又有一次锋生过程,中心位于中卫附近,中心值为 $28.0\times$

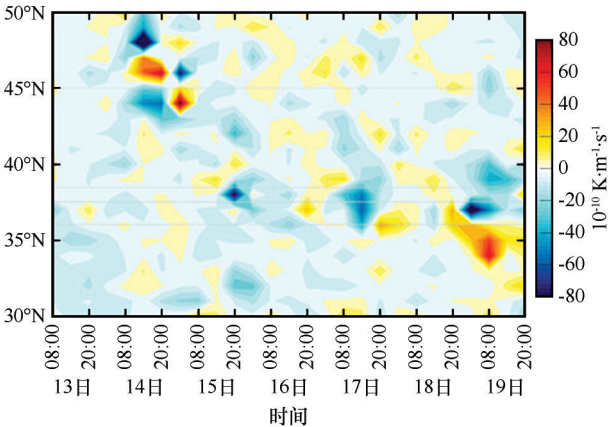


图6 104°—106°E 锋生函数平均值的时间-纬度剖面。灰色虚线代表 45°N、38.47°N(银川纬度)、37.53°N(中卫纬度)、36.04°N(兰州纬度)

Fig.6 The time-latitude profile of mean value of frontogenesis function from 104° to 106° E. The gray dotted line represents 45°N, 38.47°N (Yinchuan latitude), 37.53°N (Zhongwei latitude), 36.04°N (Lanzhou latitude)

$10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从 PM_{10} 质量浓度变化来看,该时段 3 站 PM_{10} 质量浓度的下降速度明显变慢,其中银川与中卫的 PM_{10} 质量浓度略有回升,中卫回升浓度值

较高,从 $1780\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (16日10:00)回升至 $2758\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (16日16:00),之后的锋消过程伴随 PM_{10} 质量浓度再次下降。此外,17日20:00前后兰州附近的一次锋生过程,对应于 PM_{10} 质量浓度的再次波动上升,达到了一个小峰值。18日20:00前后,一次比较明显的锋生过程从北向南逐渐发展加强,中心值达 $72.1\times 10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,银川、中卫、兰州先后出现降水过程。

结合天气实况和上述分析,14日凌晨蒙古国的锋生过程最强,该过程引起蒙古国强沙尘暴天气,之后锋生向低纬度地区发展,银川、中卫、兰州陆续有较弱的锋生过程发展(图6),但锋生过程较弱,且大气扩散条件不佳,加之前期起沙量较大,沙尘天气持续维持较长时间。至18日20:00,一次较强的锋生过程从银川附近逐渐向南发展,该时段西北地区受冷高压不断分裂出的弱冷空气影响,迎来吹风和降水天气,西北地区大部沙尘天气逐渐减弱并结束。

3.2.3 垂直螺旋度

负垂直螺旋度代表负涡度即下沉运动,正垂直螺旋度代表正涡度即上升运动^[15,21]。银川市垂直螺旋度随时间波动变化较小,变化幅度在 -2×10^{-4} — $2\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,14日20:00沙尘重污染天气开始前,垂直螺旋度为正值,15日14:00沙尘天气强盛时期逐渐转为负值,负峰值出现在20:00为 $-1.18\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,之后沙尘天气持续期,基本为较小的负垂直螺旋度至18日02:00沙尘天气逐渐结束转为正值。18日08:00至19日02:00,垂直螺旋度趋近于0,19日08:00—20:00降水过程期间,垂直螺旋度变化剧烈,出现两个正峰值、一个负峰值。相比于银川市,中卫市14日20:00为负垂直螺旋度,15日02:00出现负峰值为 $-1.84\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,15日20:00沙尘天气强盛阶段,垂直螺旋度减小为 $-1.02\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,16日02:00至19日02:00沙尘天气持续阶段,垂直螺旋度均较小,部分时间趋近于0,19日08:00降水过程期间存在正峰值 $1.42\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 。兰州市垂直螺旋度负峰值也出现在15日20:00沙尘天气开始前,此后迅速转为正垂直螺旋度,在沙尘天气持续阶段垂直螺旋度趋近于0,19日08:00和20:00降水过程期间分别出现两个负峰值,负垂直螺旋度分别为 $-4.34\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $-5.27\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ (图7)。

总的来说,银川、中卫、兰州3站 PM_{10} 的最大浓

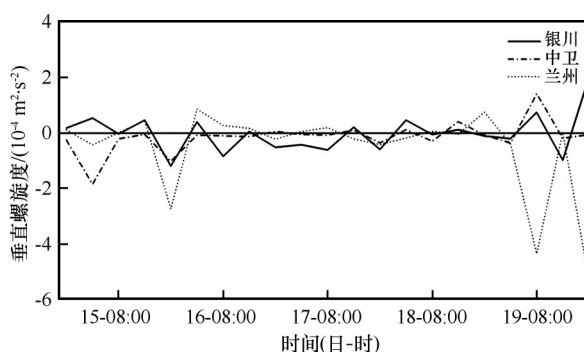


图7 银川、中卫、兰州3站垂直螺旋度时间变化

Fig.7 The time changes of vertical helicity at the three stations of Yinchuan, Zhongwei and Lanzhou

度分别出现在14:00、18:00、23:00,在强浓度出现前后均存在垂直螺旋度的正、负峰值,即垂直螺旋度短时变化幅度较大,表明存在较强的上升和下沉运动,有利于沙尘天气的发生发展。16—18日,北部的银川站垂直螺旋度及其变化幅度相比南侧的中卫、兰州两站更明显,银川站因靠近蒙古国和内蒙古,受到东路冷空气的影响更大,而中卫、兰州两站的大气层结较稳定,19日垂直螺旋度的剧烈变化主要是由于西北路径冷空气过境的降水过程引起的。

从 104°E 线上的垂直螺旋度时间变化也可以看出,14日14:00—20:00在 48°N 附近(蒙古国境内)有一个强的正垂直螺旋度中心,中心值达 $15\times 10^{-3}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,表明有强烈的上升运动发展,有利于起沙,而在其南侧有一个较弱的负垂直螺旋度中心,中心值在 $-5\times 10^{-3}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,表明存在较弱的下沉运动,此时正是蒙古国沙尘暴发生剧烈的时段(图8)。沙尘暴在14日夜间开始影响中国,14日20:00至15日14:00,在 40° — 45°N (蒙古国及内蒙古境内)存在两个较弱的正垂直螺旋度中心,中心值为 $3\times 10^{-3}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 左右,上

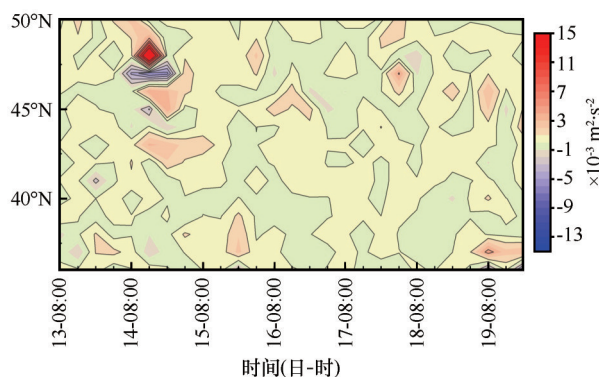


图8 36° — 50°N 在 104°E 的垂直螺旋度时间变化

Fig.8 The time change of vertical helicity from 36°N to 50°N at 104°E

升运动较弱;15日20:00至16日02:00在 36° — 38° N(宁夏、甘肃境内)存在弱正垂直螺旋度中心,中心值为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

整体来看,沙尘暴发展旺盛时段与正垂直螺旋度中心基本吻合,但 42° — 50° N(蒙古国及内蒙古境内)的垂直螺旋度变化幅度较大,即上升和下沉运动的发展更为剧烈,而 36° — 42° N(宁夏、甘肃境内)垂直螺旋度变化较小,大气层结较为稳定,这也是导致西北东部此次沙尘天气有别于中国北方其他地区的原因之一。

3.2.4 混合层高度

混合层高度是太阳辐射使低层大气加热对流而形成的对流混合气层的高度,混合层高度存在日变化特征,通常一天内正午时间的混合层高度是最高的。从图9可以看出,14日20:00至19日02:00银川市混合层高度均在700 m以下,其中15日14:00的混合层高度是5 d中同时段最低仅为320 m,此时银川 PM_{10} 浓度达到最大。19日08:00以后同时段混合层高度明显升高。中卫市混合层高度整体略高于银川市,14日20:00至19日02:00混合层高度均在900 m以下,但其变化趋势以及和 PM_{10} 浓度时间的匹配,与银川市是基本一致的。兰州市混合层高度在15日14:00达到最高为1 453 m,但15日23:00迅速降到300 m,此时 PM_{10} 浓度最高,兰州地区开始出现大范围的沙尘天气。沙尘天气维持期间银川、中卫及兰州市的混合层均较低,不利于大气湍流,使沙粒不易扩散,19日开始出现明显降水,混合层高度逐渐升高。

3.3 沙尘来源

影响兰州近地面的冷空气团主要来自蒙古国

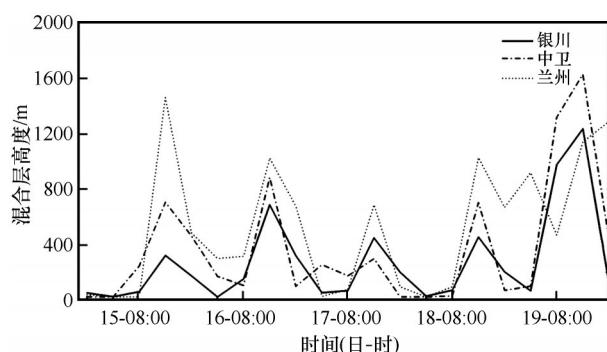


图9 银川、中卫、兰州3站混合层高度时间变化

Fig.9 The time changes of Mixing depth at the three stations of Yinchuan, Zhongwei and Lanzhou

中西部地区,3月14日06:00(UTC)至3月14日12:00(UTC)蒙古国中西部地区出现了大范围的沙尘暴天气,伴随蒙古气旋作用逐渐东移南下,此时冷气团的高度在2 000 m左右;3月15日白天冷空气团的高度明显下降,这与3月15日白天内蒙古中西部、宁夏北部及陕西北部出现大范围的沙尘天气相符合,说明该区域的沙尘来源于蒙古国;至3月15日夜間,宁夏南部、甘肃中东部及陕西中部相继出现沙尘天气,此时的冷空气团主要在近地层,3个层次的气团均一致地说明此次影响兰州乃至西北东部的沙尘主要来自蒙古国(图10)。

4 结论

强烈发展的蒙古气旋东移南压造成2021年3月中旬蒙古国西南部及内蒙古中西部地区的强沙尘暴天气,并将沙尘传输至宁夏、甘肃、陕北一带;后期随着蒙古气旋东移入海,亚欧中高纬处于平直西风环流控制,造成西北东部出现持续性的沙尘重污染天气;18日夜間开始,新疆低压槽发展并快速东移,西北东部出现明显降水,能见度明显好转,污染物沉降,至19日夜間本次持续性沙尘天气趋于结束。

沿冷空气路径自东北向西南的银川、中卫、兰州3站的时间-高度剖面显示中低层以弱辐合上升运动为主,边界层内风速较小,大气层结稳定,尤以兰州最为明显,该天气条件不利于沙尘向的扩散及沉降,导致沙尘重污染天气的长时间维持。

强锋生过程导致蒙古国南部及内蒙古中西部出现沙尘暴天气,之后锋生向低纬度地区发展;在沙尘天气维持期间,西北东部不断有弱锋生过程发展,并伴有冷空气的补充,不利于沙尘的沉降。另外,14日白天垂直螺旋度的强中心也处于蒙古国境内,银川、中卫、兰州3站的垂直螺旋度在沙尘天气爆发前均显著增大;在沙尘天气持续阶段,除银川垂直螺旋度有小幅的波动变化外,中卫、兰州的垂直螺旋度稳定维持。沙尘天气持续时段混合层高度较低,不利于大气湍流发展。

此次沙尘天气100、500、1 000 m层次的冷气团轨迹一致说明此次影响兰州乃至西北东部的沙尘主要来自蒙古国的输入。前期蒙古国及中国北方异常增暖也是导致沙尘爆发的诱因。与22年前相比,现今中国西北地区大部、内蒙古西部的植被明

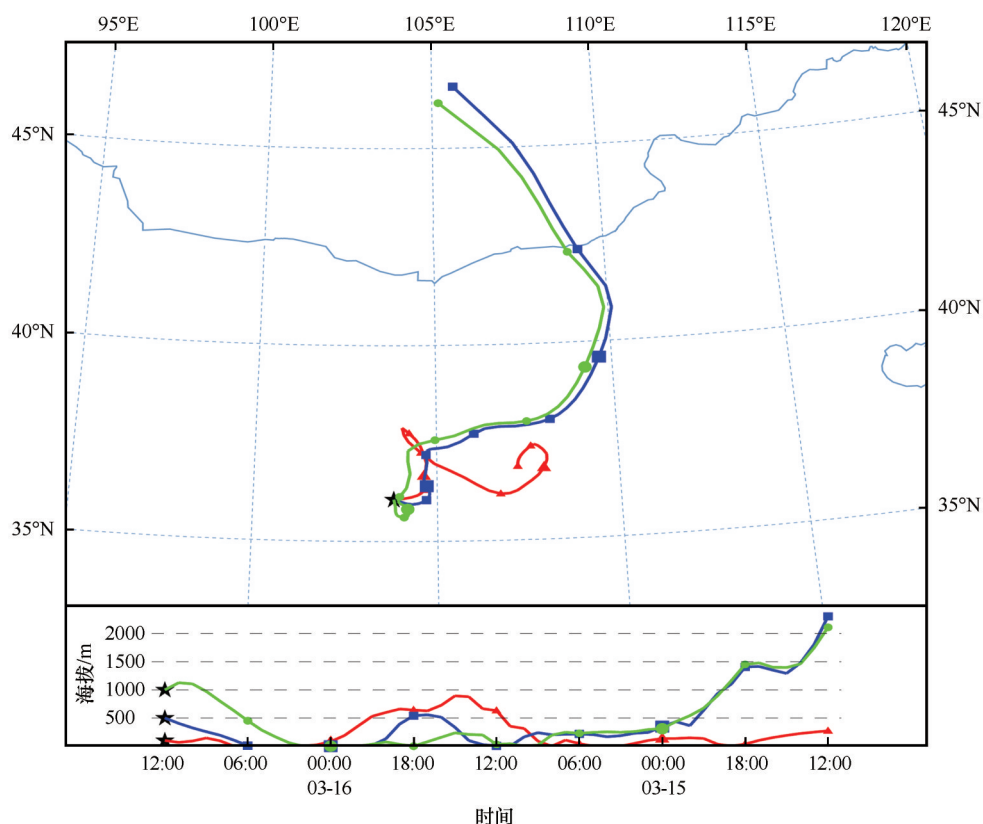


图10 2021年3月16日12:00兰州向后48 h轨迹模拟

Fig.10 Lanzhou 48-hour backward trajectory simulation at 20:00 on March 16, 2021

显增加,但中蒙边界地区、蒙古国南部地区的植被减少,这也是此次沙源主要来自蒙古国西南部的重要原因。

参考文献:

- [1] 钱正安,宋敏红,李万元.近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠,2002,22(2):106-111.
- [2] 全林生,时少英,朱亚芬,等.中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J].地理学报,2001,56(4):477-485.
- [3] 康杜娟,王会军.中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化[J].中国科学:地球科学,2005,35(11):1096-1102.
- [4] Alina B, Yousef N. Statistical analysis of dust storms in the United Arab Emirates [J]. Atmospheric Research, 2020, 231 (1):104669.1-104669.12.
- [5] 张平,杨德保,尚可政,等.2002年春季中国沙尘天气与物理量场的相关分析[J].中国沙漠,2003,23(6):72-77.
- [6] 王建鹏,沈桐立,刘小英,等.西北地区一次沙尘暴过程的诊断分析及地形影响的模拟试验[J].高原气象,2006,25(2):93-101.
- [7] 赵琳娜,赵思雄.一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究[J].大气科学,2004,28(5):83-96.
- [8] 冯鑫媛,王式功,杨德保,等.近几年沙尘天气对中国北方环保重点城市可吸入颗粒物污染的影响[J].中国沙漠,2011,31(3):735-740.
- [9] 郭晓宁,王钰,马秀梅,等.半干旱区一次典型沙尘重污染天气过程分析:以青海东部为例[J].环境科学学报,2021,41(2):343-353.
- [10] 王汝佛,冯强,尚可政.2010年春季中国一次强沙尘暴过程分析[J].干旱区地理,2014,37(1):31-44.
- [11] 刘景涛,钱正安,姜学恭,等.中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J].高原气象,2004,23(4):540-547.
- [12] 姜学恭,沈建国,刘景涛,等.导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究[J].气象学报,2003,61(5):606-620.
- [13] 杨艳萍,王莉娜,杨丽丽,等.兰州市沙尘天气污染特征及潜在源区[J].中国沙漠,2020,40(3):60-66.
- [14] 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.
- [15] 许东蓓,任余龙,李文莉,等.“4.29”中国西北强沙尘暴数值模拟及螺旋度分析[J].高原气象,2011,30(1):115-124.
- [16] 赵庆云,张武,吕萍,等.河西走廊“2010.04.24”特强沙尘暴特征分析[J].高原气象,2012,31(3):688-696.
- [17] 王式功,杨德保,金炯,等.中国西北地区黑风暴的成因和对策[J].中国沙漠,1995,15(1):19-30.
- [18] 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴发展与干飚线:黑风暴形成的一个机理分析[J].高原气象,1996,15(2):49-56.
- [19] 张强,王胜.论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J].中国沙漠,2005,25(5):675-681.
- [20] 张君霞,黄倩,田文寿,等.对流冷池对黑风暴沙尘抬升和传

- 输影响的大涡模拟研究[J].高原气象,2018,37(3):850–862.
- [21] 陶健红,王劲松,冯建英.螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用[J].中国沙漠,2004,24(1):85–89.
- [22] 常兆丰,赵明,韩福贵,等.民勤沙尘暴分布的地理因素及其前期气象特征[J].干旱区地理,2009,32(3):412–417.
- [23] 谢潇,何金海,祁莉.4种再分析资料在中国区域的适用性研究进展[J].气象与环境学报,2011,27(5):58–65.
- [24] Wang X M, Yu X D, Zhu H. The Applicability of NCEP reanalysis data to severe convection environment analysis[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(2): 139–146.
- [25] 罗彪,刘暄.基于后向轨迹模式下的合肥市大气污染源研究[J].中国科学技术大学学报,2019,49(4):321–328.
- [26] Lee C B, Park S J, Kim J C, et al. Comparison of model results for variation and resolution of meteorological field using HY-SPLIT[J]. Journal of Environmental Impact Assessment, 2010, 19(3): 223–230.
- [27] 闵月,李娜,汤浩.2015年春季北疆沿天山一带一次强沙尘暴过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(5):30–37.
- [28] 常兆丰,赵明,韩福贵,等.民勤沙尘暴分布的地理因素及其前期气象特征[J].干旱区地理,2009,32(3):412–417.
- [29] Zhang Q, Yang J H, Wang W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 1–15.

Characteristics and causes of persistent sand-dust weather in mid-March 2021 over Northern China

Yang Xiaojun¹, Zhang Qiang², Ye Peilong^{1,3}, Qin Haojun¹, Xu Lili¹, Ma Li¹, Gong Chongshui²

(1. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China; 2. Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province / CMA Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou Institute of Arid Meteorological, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 3. Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education / College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Sand-dust weather is a kind of disastrous weather frequently occurring in the spring in Northern China, which severely endangers agricultural production, transportation, air quality and the safety of people's lives and properties. It has been widely concerned by all walks of life for a long time. This paper uses multi-source and multi-scale data, synoptic analysis, physical quantity diagnosis, trajectory analysis and other methods to conduct an in-depth analysis of the cause of a continuous heavy dust pollution weather in the eastern part of Northwest China in mid-March 2021. The results show that: (1) Affected by the strong development of Mongolian cyclone, the strong sandstorms weather first appeared in the southern Mongolia and the central and western regions of Inner Mongolia on March 14, and the sand and dust were transported to the northwest, north and northeast of China, and it lasted for up to 5 days in the eastern part of Northwest China. (2) During the maintenance of the sand-dust weather in the eastern part of Northwest China, the middle and low layers are dominated by weak ascending movement, the atmosphere stratification is stable, and the weak frontogenesis process developed continuously, which was not conducive to the sedimentation of sand and dust. The fluctuations in the vertical helicity of the Yinchuan, Zhongwei, and Lanzhou stations distributed from north to south are basically consistent with the variation of dust concentration in these stations in the continuous stage of dust weather. In addition, the height of the mixed layer during the duration of the dust weather is significantly lower than its climatic average, which is not conducive to the development of atmospheric turbulence. (3) The trajectory analysis shows that the sand and dust affecting the eastern part of northwestern China is mainly caused by the import of Mongolia. Nearly 20 years, the vegetation in the border areas between China and Mongolia and southern Mongolia shows a decreasing trend, which may be the main reason that the sand source of this sandstorm is mainly from the south of Mongolia.

Key words: Northern China; Spring; persistent sand and dust; weather process; causes