

周成,王宁,杨学斌,等. 德州一次沙尘天气过程成因及气溶胶粒子的输送路径分析[J].海洋气象学报,2018,38(3): 128-136.

Zhou Cheng, Wang Ning, Yang Xuebin, et al. Analysis on the cause of a sand and dust weather process and transportation pathways of aerosol particles in Dezhou [J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(3): 128-136. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.015. (in Chinese)

## 德州一次沙尘天气过程成因及气溶胶粒子的输送路径分析

周成,王宁,杨学斌,张园园

(德州市气象局,山东 德州 253000)

**摘要:** 利用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料分析了 2017 年 5 月 4 日浮尘和 5 月 5 日扬沙天气的成因。结果表明:3 日 20 时—4 日 08 时,蒙古气旋在有利的环流背景下迅速发展,配合冷锋在内蒙古中部和东部形成大范围的强沙尘天气;4 日 20 时—5 日 08 时沙尘通过高空气流输送到华北地区,在自身沉降和较强下沉气流的共同作用下,迅速沉降形成华北地区大范围的浮尘天气;5 日 08—14 时由于西北路冷空气影响,横槽转竖,冷锋加速南下,将大量沙源地的沙尘输送到德州造成扬沙天气。通过 HYSPLIT 模式对本次过程中气团后向轨迹的模拟,证实以上两个阶段沙尘天气过程中的输送方式及路径。通过分析影响系统、物理量和气象要素发现,蒙古国、我国内蒙古中部沙源地天气系统强度、位置的变化直接影响沙尘天气的类型,高层气流变化与沙尘天气的类型有很好的对应关系。

**关键词:** 沙尘天气;  $PM_{10}$ ; 冷锋; 物理量; 气团后向轨迹

**中图分类号:** P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)03-0128-09

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.015

## Analysis on the cause of a sand and dust weather process and transportation pathways of aerosol particles in Dezhou

ZHOU Cheng, WANG Ning, YANG Xuebin, ZHANG Yuanyuan

(Dezhou Meteorological Bureau, Dezhou 253000, China)

**Abstract** Utilizing the NCEP ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) reanalysis data, the causes of the floating dust on 4 and the blowing sand weather on 5 May 2017 are analyzed. It shows that the Mongolia cyclone, which rapidly developed under favorable circulations background, together with the cold front, resulted in a wide range of strong sand and dust weather in the middle and east of the Inner Mongolia Autonomous Region from 20:00 on 3 to 08:00 on 4 May. Through the upper air current, the dust was transported to North China from 20:00 on 4 to 08:00 on 5 May. The dustfall and strong downward flow led to a wide range of floating dust weather in North China. Influenced by northwestern cold air, the transversal trough was converted into a vertical one, the cold front speeded up southward, and the sand and dust were transported to Dezhou and hit there from 08:00 to 14:00 on 5 May. Based on the simulation results of backward trajectory of air mass using HYSPLIT model, the transportation modes and pathways of these two kinds of sand and dust weather were clearly verified. Through the analysis of synoptic systems, physical quantities

收稿日期:2018-02-27; 修订日期:2018-04-02

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-040);山东省气象局青年基金项目(2017SDQN19);德州市气象局重点课题(2015dzqzxd05)

作者简介:周成,男,工程师,主要从事短期天气预报工作,zhoucheng\_999@126.com。

通信作者:杨学斌,男,正高级工程师,主要从事短期天气预报和业务管理工作,yxb\_5@163.com。

and meteorological factors, the changes of intensity and position of synoptic systems in Mongolia and the central Inner Mongolia Autonomous Region were found to directly affect the types of the sand and dust weather. The change of upper air current was well correspondent to the types of the sand and dust weather.

**Key words** sand and dust weather;  $PM_{10}$ ; cold front; physical quantity; backward trajectory of air mass

## 引言

沙尘天气主要指沙尘暴、扬沙、浮尘,其中沙尘暴和扬沙都是本地或上游沙源地沙尘被大风吹起影响周边及下游地区,使能见度显著下降;而浮尘是由远处沙尘经上层气流传输而来或其他沙尘天气出现后未下沉的细粒悬浮在空中<sup>[1]</sup>。德州市处于东亚沙尘暴多发区域(35~45°N)的下风方向<sup>[2]</sup>,易发生沙尘天气。石慧兰等<sup>[3]</sup>统计了1954—2005年近52 a德州沙尘天气发生频次变化,得出沙尘天气呈明显减少趋势的气候特征。胡雪红等<sup>[4]</sup>研究表明,春季和初夏是德州沙尘暴天气的高发时段,具有明显的日变化。由于沙尘天气对交通运输及人们健康有重要影响,科技人员对一些典型沙尘天气个例的成因及预报思路有不少研究。康丽泰和陈思宇<sup>[5]</sup>对一次沙尘天气起沙和传输进行数值模拟,得出沙尘过境时表现为大风、降温、锋后剧烈正变压, $PM_{10}$ 先升后降,利用HYSPLIT模式模拟前后向轨迹追踪沙源地验证沙尘传输路径。张亚妮等<sup>[6]</sup>通过分析北京沙尘个例指出,深厚的层结不稳定是沙尘天气能影响到下游地区的重要条件,为远距离输送造成的沙尘天气个例提供分析思路。尹晓惠等<sup>[7]</sup>通过统计多年沙尘天气资料得出,北京地区沙源主要为内蒙古及中蒙边境地区,沙源地降水和沙尘天气成显著负相关。郝玉峰等<sup>[8]</sup>通过对沙尘天气过程近地层气象要素演变特征分析发现,风速在沙尘暴及扬沙发生发展过程中均较大,浮尘较小,同时沙尘天气后期能见度和风速变化与 $PM_{10}$ 浓度趋势不一致。

2017年5月4—5日德州出现了沙尘天气, $PM_{10}$ 浓度最大为 $1\ 415\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,极大风速达 $17.9\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,此次沙尘天气影响严重,给人们出行带来不便。该沙尘天气漏报,主要原因是本市非沙源地,由外来沙源远距离输送造成,预报员对此类沙尘天气预报预警能力不足。本文通过对此次沙尘天气过程的天气形势、气象要素以及起沙和传输的动力机制等进行分析,研究沙尘天气的成因、沙尘输送

路径等,为提高本地沙尘天气的预报预警能力提供参考。

## 1 资料与方法

沙尘资料取自地面观测资料,天气形势及物理量采用NCEP  $1^\circ\times 1^\circ$ 再分析资料, $PM_{10}$ 浓度资料来自德州市环境监测站,逐小时地面气象要素资料取自德州市一般观测站,本文所用时间统一为北京时。

利用GrADS绘制天气形势及物理量场,分析环流及相关物理量特征。利用地面观测资料标定沙尘暴、扬沙和浮尘天气,分析本次沙尘天气的发展过程和影响范围。选取 $PM_{10}$ 和逐小时地面气象要素资料分析本次沙尘天气特征,通过HYSPLIT模式进行气团后向轨迹分析,验证沙尘远距离输送路径。

## 2 环流特征

沙尘天气过程主要包括起沙、输送和沉降。历史研究表明,冷锋和蒙古气旋是导致我国北方地区产生沙尘天气的主要影响系统<sup>[9-11]</sup>,而大风、沙源地和不稳定大气层结是产生沙尘天气的基本条件<sup>[12]</sup>。德州此次沙尘天气过程分为浮尘(4日08时—5日08时)和扬沙(5日08—14时)两个阶段,下面通过分析环流特征来探讨沙尘天气发生的具体原因。

3日08时500 hPa蒙古国西部有一宽广疏散槽,温度槽落后于高度槽,冷中心达 $-40\ ^\circ\text{C}$ ,槽后有急流( $V_{\text{max}} > 40\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),冷平流强,有利于低槽维持、加强(图略)。

低槽发展使槽前正涡度平流加强、暖平流加强,在有利的环流背景下,位于蒙古国东部地区的蒙古气旋生成,气旋附近925 hPa假相当位温达330 K,不稳定能量较强有利于起沙。新疆东部有一强度为1 032 hPa的冷高压。

3日20时500 hPa高空槽位于贝加尔湖—甘肃中部,温度槽仍落后于高度槽, $-40\ ^\circ\text{C}$ 的冷中心维持(图1a),低槽缓慢东移并继续发展,新疆北部横槽生成并加强;因热力、动力(涡度)因素的共同作用,蒙古气旋前移并加深发展,此时气旋分裂为两个低

压中心(图 2a),其中蒙古国东部低压中心气压值为 995 hPa,并位于高空槽前的正涡度平流区,低层辐合、高层辐散,有利于上升运动,此时新疆东部冷高压已东移至甘肃—宁夏一带,强度为 1 020 hPa,高低压中心相差 25 hPa,低压中心附近 925 hPa 假相当位温降为 290 K,说明有高空锋区过境,干冷空气

补充南下,地面风力加大,整体形势利于起沙,因此低压中心西南部(蒙古国西部—我国内蒙古中东部)形成大范围沙尘天气,沙尘暴主要出现在蒙古国境内以及我国内蒙古的中东部地区,扬沙天气主要出现在我国内蒙古中部。

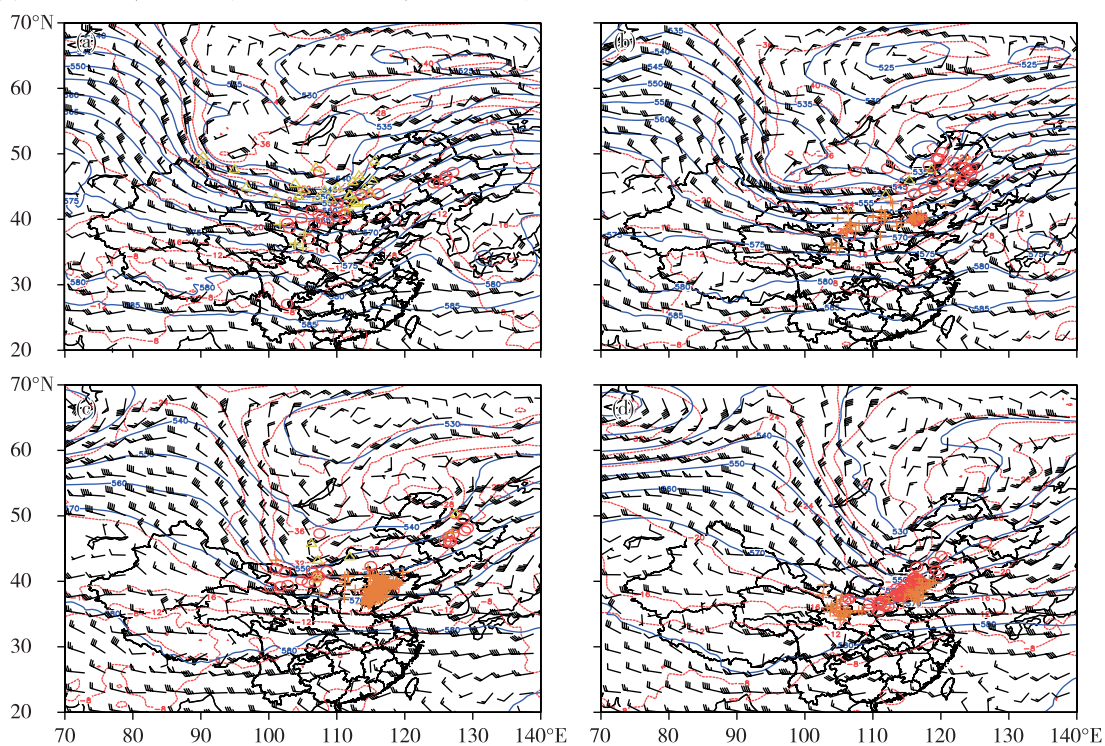


图 1 500 hPa 高空形势和沙尘天气图(a.3日 20时, b.4日 08时, c.4日 20时, d.5日 08时; 蓝线:等高线,单位:dagpm;红线:等温线,单位:℃;○:扬沙;+:浮尘;△:沙尘暴)

Fig.1 Synoptic charts at 500 hPa superimposed on the sand and dust weather (a. 20:00 on 3, b. 08:00 on 4, c. 20:00 on 4, d. 08:00 on 5 May; isohypse in blue line, units: dagpm; isotherm in red line, units: °C; ○: blowing sand; +: floating dust; △: sand and dust storm)

4日08时高空槽发展闭合为低涡,新疆北部横槽开始转竖南下,蒙古气旋继续东移进入我国东北地区(图 1b),蒙古国东部低压减弱,新疆北部冷高压补充南下,气压差为 42 hPa,此时冷锋还未南压,我国境内主要受气旋附近大风( $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )影响(图 2b),在内蒙古东部和东北地区出现大范围扬沙天气,同时因高空西北气流输送,沙尘已影响到华北北部地区,造成浮尘天气。

4日20时横槽加深并转竖南下(图 1c),新疆北部冷高压快速南下,中心气压值为 1 027.5 hPa,冷锋已到达内蒙古中部地区,冷锋过境之处风力达  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在内蒙古中部和东部造成大范围扬沙天气(图 2c),并受高空偏西气流影响,沙尘向下游输送,在华北中南部地区沉降,造成严重的浮尘天气。由于槽后冷平流较强,冷空气不断向南输送,蒙古

国东部低压西北部 925 hPa 假相当位温降为 280 K,这类环流形势往往会形成一次强冷空气入侵过程,可能伴随有大风、沙尘暴和扬沙天气<sup>[13]</sup>。

5日08时横槽转竖后东移至蒙古国东部—我国华北西部一带(图 1d),此时高度槽与温度槽重合,低槽强度达最强,对应冷高压继续东移南压,中心值仍大于 1 032 hPa,冷锋南下到甘肃南部—华北南部一带,沿线出现大范围扬沙天气,德州处于冷锋前部,仍为浮尘天气(图 2d),随后冷锋过境造成大风、扬沙天气。5日14时之后大风持续,此时蒙古气旋已移出我国,蒙古国东部低压进入我国东北,德州上游的蒙古国—我国内蒙古中东部一带未出现沙尘天气,同时德州附近没有沙源,受大风的清洁作用,德州此次沙尘天气结束。

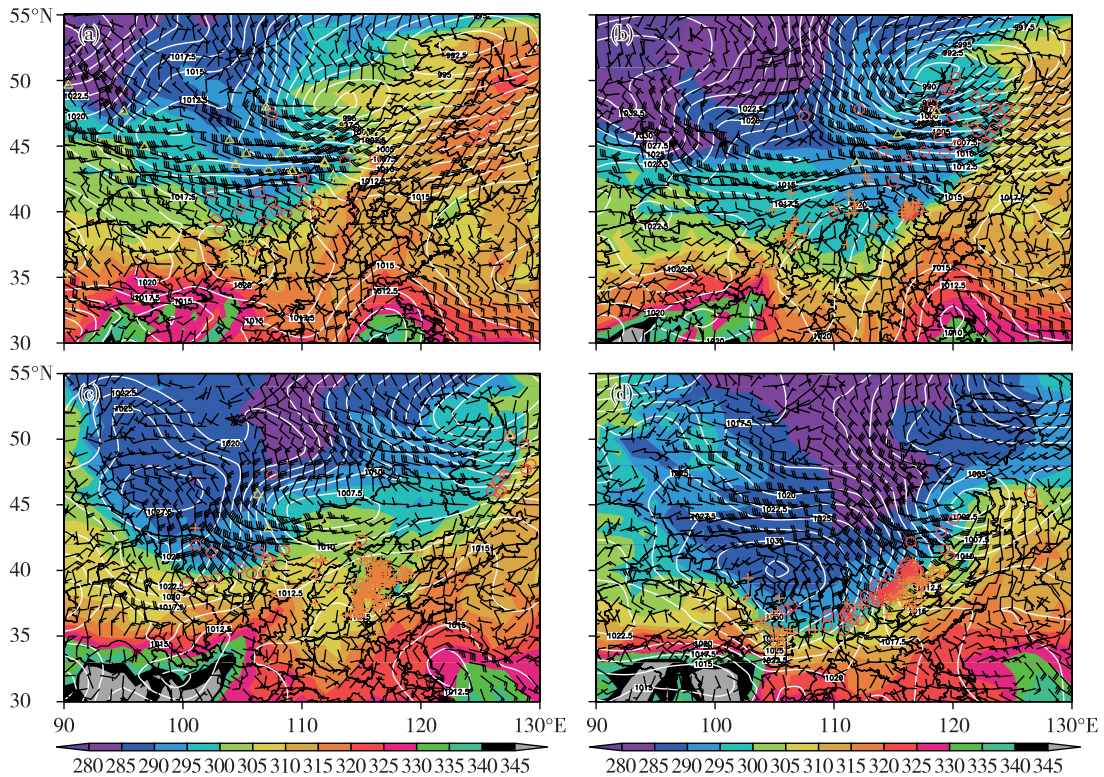


图2 地面形势、925 hPa 假相当位温及沙尘天气图(a. 3日20时,b. 4日08时,c. 4日20时,d. 5日08时; 白线:气压,单位:hPa; 填色:假相当位温,单位:K; ○:扬沙; +:浮尘; △:沙尘暴)

Fig.2 Surface synoptic charts superimposed on pseudo-equivalent potential temperature at 925 hPa and the sand and dust weather (a. 20:00 on 3, b. 08:00 on 4, c. 20:00 on 4, d. 08:00 on 5 May; atmospheric pressure in white line, units: hPa; pseudo-equivalent potential temperature in colored, units: K; ○: blowing sand; +: floating dust; △: sand and dust storm)

### 3 物理量场分析

#### 3.1 高空等风速场

高空风的变化引导低层风改变也是影响沙尘天气的重要因素<sup>[14]</sup>。通过分析3日20时高空各层等风速场发现,200 hPa 高空急流中心强度达  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3a),500 hPa 达  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),中心位于强沙尘天气上方,此时低层风速大值区范围迅速减小,我国内蒙古中部到蒙古国中部 200~850 hPa 风速切变达  $30 \sim 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),为强位势不稳定区域,有利于起沙形成强沙尘天气。

4日08—20时高空急流东移减弱,扬沙和浮尘区域200 hPa 风速分别为  $40 \sim 55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和  $35 \sim 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,500 hPa 风速分别为  $35 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和  $20 \sim 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),分析各层等风速场发现,扬沙的高空风速明显大于浮尘的高空风速,并且浮尘区域内垂直风切变较小(图略),同时浮尘天气上游(蒙古国、我国内蒙古中部和东部地区)3日20时—4日20时都出现过沙尘天气(图3a、b)。

5日08时200 hPa 高空急流加强,中心位于内蒙古西部到华北西部( $V_{\text{max}} > 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )(图3c)。500 hPa 槽后急流( $V_{\text{max}} > 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )位于贝加尔湖西部到内蒙古中部地区(图3d),华北北部处在下风方向的急流出口区,风速迅速减小,在高层辐合形成质量堆积、气柱压缩,使得地面气压增加、气压梯度加强,同时由于动量下传影响,华北西部高层风速较大(500 hPa  $V_{\text{max}} > 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),受梯度风、变压风和动量下传共同影响,地面西北风迅速增大,当大风区经过沙源地时造成扬沙天气,并伴随冷锋东移南压影响华北到陕西关中一带。

#### 3.2 涡度、湿度与垂直运动场

3日20时蒙古气旋分裂为两个低压中心,分别位于( $53^\circ\text{N}, 124^\circ\text{E}$ )和( $48^\circ\text{N}, 114^\circ\text{E}$ ),后者南部、西南部出现大范围的沙尘暴天气,因此沿  $114^\circ\text{E}$  作涡度和垂直速度( $\omega$ )剖面图(图4a), $45 \sim 50^\circ\text{N}$  之间整层为正涡度,最大正涡度中心在 750~850 hPa 之间,为  $15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。正涡度两侧为负涡度,这类补偿性分布有利于涡旋系统维持<sup>[15]</sup>,同时垂直上升运动

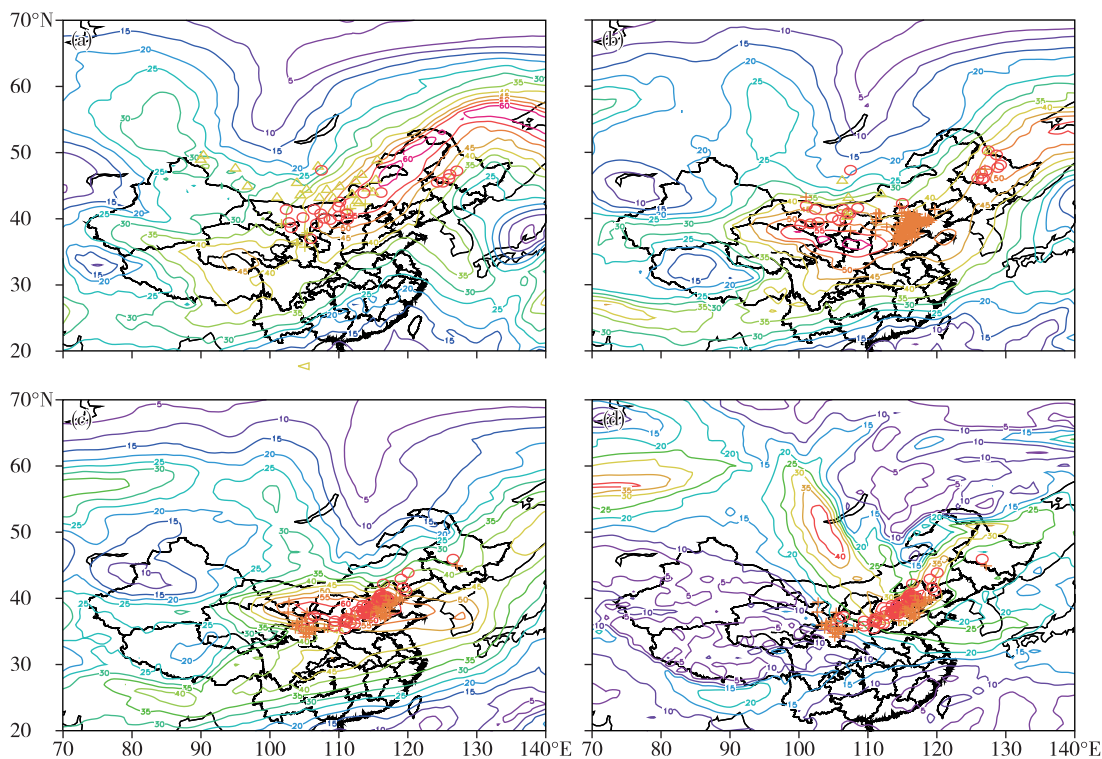


图3 3日20时(a)、4日20时(b)、5日08时(c)200 hPa和5日08时500 hPa(d)等风速线及沙尘天气图(彩色线:等风速线,单位: $m \cdot s^{-1}$ ;○:扬沙;+:浮尘;△:沙尘暴)

Fig.3 Upper wind speed superimposed on the sand and dust weather ( a. 20:00 on 3 at 200 hPa, b. 20:00 on 4 at 200 hPa, c. 08:00 on 5 at 200 hPa, d. 08:00 on 5 May at 500 hPa; isotach in colored line, units:  $m \cdot s^{-1}$ ; ○: blowing sand; +: floating dust; △: sand and dust storm)

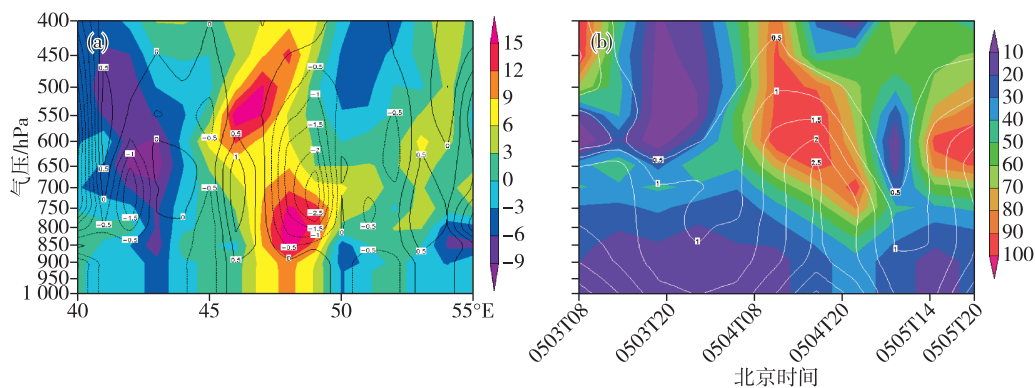


图4 3日20时沿114°E涡度和垂直速度剖面图(a;填色:涡度,单位: $10^{-5} s^{-1}$ ;黑线:垂直速度,单位: $10^{-2} hPa \cdot s^{-1}$ )及3日08时—5日20时43°N,112°E相对湿度和比湿廓线图(b;填色:相对湿度,单位:%;白线:比湿,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )

Fig.4 Cross-section diagram of vorticity and vertical velocity along 114°E at 20:00 on 3 May ( a; vorticity in colored, units:  $10^{-5} s^{-1}$ ; vertical velocity in black line, units:  $10^{-2} hPa \cdot s^{-1}$ ) and profile of relative humidity and specific humidity from 08:00 on 3 to 20:00 on 5 May at 43°N, 112°E ( b; relative humidity in colored, units: %; specific humidity in white line, units:  $g \cdot kg^{-1}$ )

区对应正涡度区上部,中心值为 $-2.5 \times 10^{-2} hPa \cdot s^{-1}$ ,正涡度中心南部为弱下沉运动区,中心值为 $1 \times 10^{-3} hPa \cdot s^{-1}$ ,有利于沙尘被吹起而出现沙尘天气,并通过上升气流卷入高层,伴随高空气流将

沙尘输送到下游地区。

由于蒙古国东南部地区是沙尘暴发生的主要区域,因此作43°N,112°E相对湿度(RH)和比湿廓线图(图4b),3日20时相对湿度在500 hPa以下小

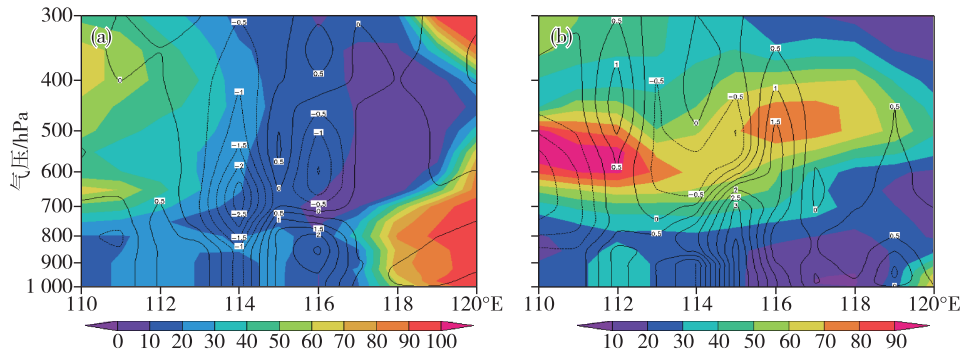


图5 5月4日08时(a)、20时(b)沿40°N相对湿度和垂直速度剖面图(填色:相对湿度,单位:%;黑线:垂直速度场,单位: $10^{-2}$  hPa·s $^{-1}$ )

Fig.5 Relative humidity and vertical velocity along 40°N (a. 08:00, b. 20:00 on 4 May; relative humidity in colored, units: %; vertical velocity in black line, units:  $10^{-2}$  hPa·s $^{-1}$ )

于50%,850 hPa以下小于20%,比湿小于 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,空气干燥有利于起沙,3日20时沙尘爆发,3日20时—4日08时高层相对湿度维持较小值,850 hPa以下仍然小于20%,此时比湿也维持较低值,说明整层大气湿度非常小,空气十分干燥,有利于沙尘暴的维持以及沙尘向高空输送,4日08时之后从高层开始整层相对湿度迅速增大,同时比湿也迅速增大,最大为 $2.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,说明整层湿度增加,不利于起沙,该地区沙尘天气减弱,华北西北部地区沙尘天气开始加强。

4日08时和20时沿40°N做相对湿度和垂直速度剖面图,分析发现在华北地区(114~116°E)出现较强下沉运动(最大值为 $3.5\times 10^{-2}$  hPa·s $^{-1}$ ),有利于随高空气流输送来的沙尘在此处沉降<sup>[6]</sup>,从整层相对湿度来看,华北地区(114~116°E)4日08时整层相对湿度都小于30%,700 hPa小于10%(图5a),空气干燥有利于沙尘悬浮,配合较强的下沉运动(850 hPa附近中心值 $2.5\times 10^{-2}$  hPa·s $^{-1}$ ),有利于沙尘向近地面输送;4日20时700 hPa以下相对湿度仍小于30%,近地面相对湿度小于20%(图5b),下沉运动增大(850 hPa附近中心值 $3.5\times 10^{-2}$  hPa·s $^{-1}$ ),利于浮尘天气维持。

### 3.3 德州站气象要素特征分析

沙尘天气相关的重要气象要素有风速、能见度(VIS)、相对湿度(RH)<sup>[16]</sup>。通过分析其相关气象要素(图6)发现,德州站4日00—08时为NNW风,极大风速 $<3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,RH $>90\%$ ,VIS $<5\text{ km}$ ,PM<sub>10</sub>浓度小于 $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,出现了轻雾;4日08时—5日10时能见度总体变化较小,先缓慢下降再逐渐增加,风向由NW转为SW,相对湿度迅速减小到

30%~60%之间,受高空气流输送、下沉气流、自身干沉降等作用,外来沙尘在华北南部地区沉降,PM<sub>10</sub>浓度迅速增加至 $1\text{ }000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,极值高达 $1\text{ }350\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,如此大的PM<sub>10</sub>浓度体现了沙尘天气的影响强度之重<sup>[17]</sup>,高PM<sub>10</sub>浓度维持到5日00时,极大风速在 $2\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,达不到扬沙的风速等级,综合分析再次证明德州出现浮尘天气;5日00—09时受自身沉降作用浮尘天气减弱,但受混合层高度日变化影响,夜间并不利于PM<sub>10</sub>扩散<sup>[18]</sup>,同时风力仍然较小,极大风速在 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,综合扩散条件有利于浮尘天气维持;5日10—14时风向由SW转为NW,冷锋南下极大风速增大到 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,受干冷空气影响,相对湿度迅速减小到20%以下,同时冷锋带来的沙尘使得PM<sub>10</sub>浓度迅速增大,最大值已经超过 $1\text{ }400\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,能见度再次下降,综合分析证明,德州由浮尘转为扬沙天气;14时之后受污染物日变化影响<sup>[19]</sup>,同时由于冷空气的清除作用<sup>[20]</sup>,伴随沙尘天气的大风使PM<sub>10</sub>浓度迅速下降,能见度增大(VIS $>15\text{ km}$ ),沙尘天气结束。

## 4 气团后向轨迹分析

HYSPLIT模型是由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<sup>[21]</sup>。本研究选取5日00时和14时两个时刻,利用HYSPLIT模型模拟了200 m、1 000 m、1 500 m、3 000 m和5 000 m高度过去48 h的气团轨迹(图7a、b)。

通过分析5日00时后向轨迹模拟结果可以看出,3 000 m以下气团高度随时间变化较小,轨迹长度

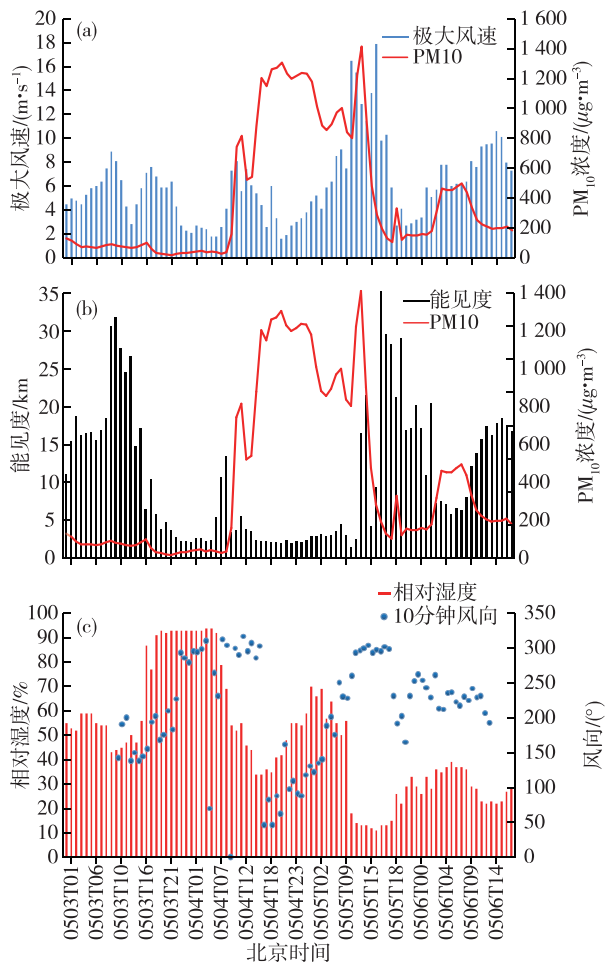


图6 极大风速和  $PM_{10}$  浓度 (a; 极大风速, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ ;  $PM_{10}$  浓度, 单位:  $\mu g \cdot m^{-3}$ )、能见度和  $PM_{10}$  浓度 (b; 能见度, 单位: km;  $PM_{10}$  浓度, 单位:  $\mu g \cdot m^{-3}$ )、风向和相对湿度 (c; 风向, 单位:  $^{\circ}$ ; 相对湿度, 单位: %)

Fig.6 Extreme instantaneous wind speed and  $PM_{10}$  concentration (a; extreme instantaneous wind speed, units:  $m \cdot s^{-1}$ ;  $PM_{10}$  concentration, units:  $\mu g \cdot m^{-3}$ ); visibility and  $PM_{10}$  concentration (b; visibility, units: km;  $PM_{10}$  concentration, units:  $\mu g \cdot m^{-3}$ ); wind direction and relative humidity (c; wind direction, units:  $^{\circ}$ ; relative humidity, units: %)

短,说明低层风场较弱<sup>[22]</sup>,且没有来自其他高度的气团,主要是城市附近气团;在3 000 m以上轨迹长度变长,方向为西北偏西气流(图7a),从时次图(图7c)来看,5日00时德州的 backward 轨迹空间分布先由1 000 m扩散到4 000 m,再缓慢下降到3 000 m高度,而扩散到3 000 m以上的沙尘气溶胶可以进行超远距离的输送<sup>[23]</sup>。结合  $PM_{10}$  浓度变化特征分析,表明此次沙源主要来自于高空气流输送,沙源地主要在新疆、内蒙

古中部、甘肃、宁夏境内,与天气形势分析中低槽环流形势相一致,同时结合地面资料分析发现,这是一次蒙古气旋配合西路冷空气的混合型沙尘天气移动过程,证实混合型移动路径主要是偏东方向<sup>[24]</sup>,结合高空环流说明此次浮尘天气是通过高空偏西气流输送沙尘在华北地区沉降产生。

5日14时后向模拟结果显示,各层均为西北气流,都是高层气团,沙源主要在蒙古国、我国内蒙古中部,与横槽转竖后东移南下的位置对应(图7b、c)。结合地面资料分析,表明这是一次独立西北路冷空气的沙尘移动过程,而纯冷锋型沙尘天气主要朝东南方向移动<sup>[24]</sup>,冷锋东移南下后造成华北大部分地区的扬沙天气。

通过叠加对应时次的  $PM_{10}$  数据,根据《环境空气质量标准 GB 3095-2012》2级标准( $PM_{10}$ 日浓度大于  $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 为  $PM_{10}$ 不达标)<sup>[25]</sup>,通过不达标轨迹(图7d)发现, $PM_{10}$ 主要来源为蒙古国、我国内蒙古中西部地区,而影响华北春季沙尘天气的主要气团就是来自上述干旱并且沙漠化严重的地区<sup>[26]</sup>,间接验证了此前沙尘输送路径的分析。

## 5 结论

1)此次德州的沙尘天气是在沙尘天气频发季节、有利环流背景下出现的,主要影响系统有高空槽、蒙古气旋、地面冷锋。过程分为两部分,分别出现了浮尘和扬沙天气。浮尘天气主要由蒙古气旋和冷锋配合造成地面大风,同时高空槽前正涡度平流、气旋周边热力不稳定条件、湿度条件的共同作用使上游起沙,并通过高空气流向东输送,最后在较为干燥的大气条件下通过自身重力和较强的下沉运动在华北地区沉降造成。扬沙天气是由横槽发展、转竖,地面冷空气堆积爆发后造成地面大风,将沙源地沙尘吹起并伴随冷锋向华北输送造成。

2)可通过分析上游沙源地蒙古气旋、地面冷锋位置及强度变化趋势判断起沙。在沙尘天气易发季节,蒙古气旋、地面冷锋经过沙源地,达到最有利的起沙条件。沙源地大气干燥时有利于起沙,同时当沙尘暴爆发时比湿将明显下降,沙尘天气结束时整层大气湿度会明显上升。高空风速变化对于沙尘天气出现有重要指示意义,浮尘天气对应弱高空风速区域,而扬沙和沙尘暴对应强高空风速区域。500 hPa 槽后急流出口区为气柱质量堆积区域,地面气压梯度加大,易形成大风,有利于起沙,在垂直风切变较大的区域也容易起沙。

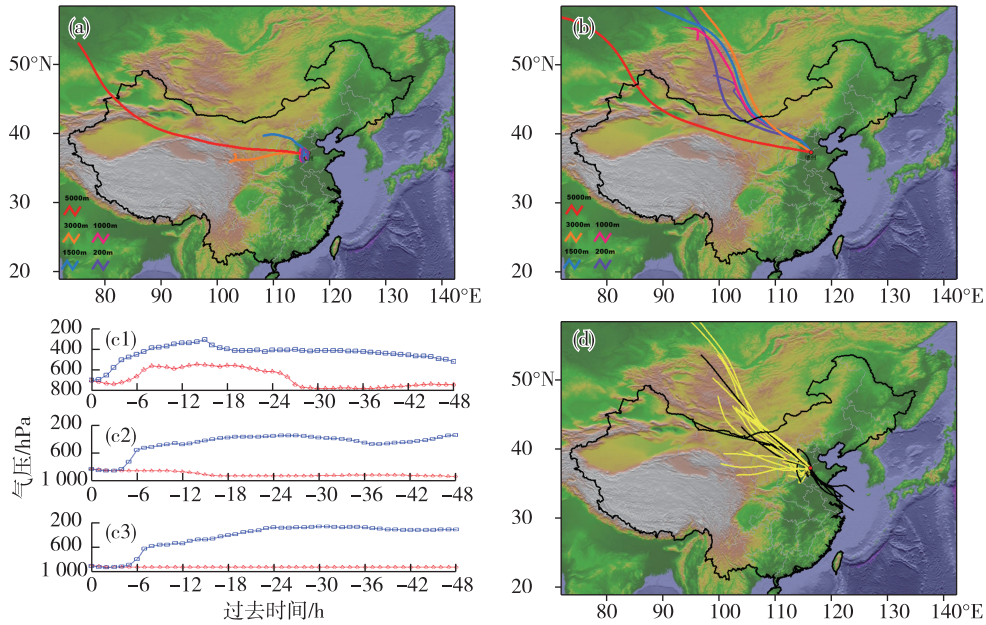


图7 5日00时(a)、14时(b)HYSPLIT模式计算不同高度48h气团后向轨迹(轨迹高度:图例)和3000m、1000m、200m气团高度时间变化(c1-c3;红线:5日00时起始,蓝线:5日14时起始)以及3日08时—7日00时6h间隔主要PM<sub>10</sub>轨迹图(d;黄色:PM<sub>10</sub>浓度>150 μg·m<sup>-3</sup>的轨迹)

Fig.7 Backward trajectory of air mass at different heights over the past 48 hours by HYSPLIT model (a. 00:00, b. 14:00 on 5 May; height of trajectory: legend); temporal variation of height of air mass at 3000 m, 1000 m, and 200 m (c1-c3; red line: from 00:00, blue line: from 14:00 on 5 May); trajectories of dense PM<sub>10</sub> at intervals of 6 h from 08:00 on 3 to 00:00 on 7 May (d; trajectory of PM<sub>10</sub> concentration above 150 μg·m<sup>-3</sup> in yellow)

3)通过分析高空槽的位置、强度判断沙尘的远距离输送。当上游起沙的位置处于高空槽上风方向,则下风方向地区有可能出现沙尘天气。判断具体沉降位置可分析垂直速度、相对湿度场,当下风方向有较强的下沉气流并且相对湿度较小时,该地区将可能出现较强的沙尘天气。

4)判断浮尘和扬沙可通过风速、相对湿度、风向、PM<sub>10</sub>浓度、VIS等要素。浮尘天气特点是风力小、PM<sub>10</sub>浓度大、能见度低、对风向没有要求,而扬沙天气特点为风力大、相对湿度小、能见度低、PM<sub>10</sub>迅速增大,一般为北或西北风。

5)利用HYSPLIT模式计算的气团后向轨迹间接验证沙尘的传输路径,可初步判断沙尘天气的种类。

参考文献:

[1] 杨欣,陈义珍,刘厚凤,等.北京春季一次沙尘气溶胶污染过程观测[J].中国环境科学,2017,37(1):87-94.  
 [2] 庞华基,盛立芳,丁锋,等.东亚沙尘暴研究进展及问题[C]//中国气象学会.中国气象学会2006年年会论文集.北京:中国气象学会,2006:297-304.  
 [3] 石慧兰,王新堂,邵志勇,等.鲁西北52年日照变化特

征及原因[J].气象,2007,33(2):93-97.  
 [4] 胡雪红,张优勤,杨学斌.德州市沙尘暴天气统计特征[J].山东气象,2007,27(2):16-18.  
 [5] 康丽泰,陈思宇.中国北方一次沙尘天气过程的数值模拟[J].中国沙漠,2017,37(2):321-331.  
 [6] 张亚妮,张碧辉,宗志平,等.影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析[J].气象,2013,39(7):911-922.  
 [7] 尹晓惠,时少英,张明英,等.北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析[J].高原气象,2007,26(5):1039-1044.  
 [8] 郝玉峰,施占军,相栋.典型沙尘天气过程近地层气象要素演变特征[J].气象科技,2014,42(4):671-677.  
 [9] 高庆先,李令军,张运刚,等.我国春季沙尘暴研究[J].中国环境科学,2000,20(6):495-500.  
 [10] 云静波,姜学恭,孟雪峰,等.冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程若干统计特征的对比分析[J].高原气象,2013,32(2):423-434.  
 [11] 宗志平,张恒德,马杰.2009年4月下旬蒙古气旋型大范围沙尘暴天气过程的诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(1):1-9.  
 [12] 尹晓惠.我国沙尘天气研究的最新进展与展望[J].中国沙漠,2009,29(4):728-733.  
 [13] 何爱兵,郑玲,石秀云.格尔木地区一次沙尘天气过程



- 分析[J].青海气象,2015(2):17-21.
- [14] 李雪,刘晓东.中国北方春季沙尘暴活动与高空西风急流变化的联系[J].高原气象,2015,34(5):1292-1300.
- [15] 王汝佛.我国北方春季两次典型沙尘暴过程研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [16] 邱玉珺,牛生杰,邹学勇,等.沙尘天气频率与相关气象因子的关系[J].高原气象,2008,27(3):637-643.
- [17] 王占山,李云婷,李倩,等.基于大气超级站观测的2017年5月北京市沙尘天气过程分析[J].中国环境监测,2017,33(5):28-34.
- [18] 时晓曦,魏晓敏,毕玮,等.青岛混合层高度变化特征及与空气污染的关系[J].山东气象,2016,36(4):1-6.
- [19] 康桂红,孙兴池,韩永清,等.山东省大气污染时空分布特征分析[J].山东气象,2016,36(1):13-17.
- [20] 方修琦,李令军,谢云.沙尘天气过境前后北京大气污染物质量浓度的变化[J].北京师范大学学报(自然科学版),2003,39(3):407-411.
- [21] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT\_4 modeling system [R]. Silver Spring, Maryland: NOAA Technical Memorandum ERL ARL-244,1997.
- [22] 刘娜,余晔,陈晋北,等.兰州春季沙尘过程 PM<sub>10</sub> 输送路径及其潜在源区[J].大气科学学报,2012,35(4):477-486.
- [23] 周旭,张镭,郭琪,等.强沙尘暴的数值模拟及 PM<sub>10</sub> 浓度的时空变化分析[J].中国环境科学,2017,37(1):1-12.
- [24] 柳丹,张武,陈艳,等.基于卫星遥感的中国西北地区沙尘天气发生机理及传输路径分析[J].中国沙漠,2014,34(6):1605-1616.
- [25] 马梁臣,刘海峰,王宁,等.2011年长春市一次持续浮尘天气成因分析[J].气象与环境学报,2013,29(6):24-30.
- [26] 陈焯鑫.利用 MODIS 卫星资料研究中国典型污染地区气溶胶类型及其来源[D].南京:南京信息工程大学,2014.