

钱莉,滕杰,胡津革. 2015. “14. 4. 23”河西走廊特强沙尘暴演变过程特征分析. 气象, 41(6):745-754.

# “14. 4. 23”河西走廊特强沙尘暴 演变过程特征分析<sup>\*</sup>

钱莉<sup>1,2</sup> 滕杰<sup>2</sup> 胡津革<sup>2</sup>

1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点(开放)实验室, 甘肃 730020  
2 甘肃省武威市气象局, 武威 733000

**提 要:** 利用常规气象观测资料和 ECMWF 数值预报产品,对 2014 年 4 月 23 日甘肃河西走廊发生的特强沙尘暴过程形成和减弱原因进行天气动力学诊断分析,结果表明:500 hPa 乌拉尔山脊前不稳定槽强烈发展,极地强冷空气向南爆发是这次特强沙尘暴产生的大尺度触发系统,地面冷锋所带来的强风是产生特强沙尘暴的主要原因。特强沙尘暴在河西走廊中西部增强的原因:700~850 hPa 河西走廊近乎中性的温度层结,加上强冷平流和低空急流,有利于锋生和动量下传;地面冷锋强变压、变温梯度及日变化促使沙尘暴在河西西部爆发性发展。河西走廊中西部低空强上升运动有利于增大近地面沙尘浓度;强烈的温度差动平流和垂直风切变,加大了热力和动力不稳定。特强沙尘暴在河西走廊东部减弱的原因:造成特强沙尘暴的天气系统在河西东部北行减弱及河西走廊狭管效应地形环境消失;午夜日变化造成锋消;前期持续阴雨天气,使疏松裸露的地表土壤和沙漠形成一层板结层,增加起沙难度。

**关键词:** 特强沙尘暴, 发生机制, 诊断分析, 物理量特征

**中图分类号:** P458                      **文献标志码:** A                      **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 06. 009

## Characteristic Analysis of the “2014. 4. 23” Strong Sandstorm’s Evolution Process in Hexi Corridor

QIAN Li<sup>1,2</sup> TENG Jie<sup>2</sup> HU Jing<sup>2</sup>

1 Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster in Gansu Province,  
Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction, CMA, Lanzhou 730020  
2 Wuwei Meteorological Office of Gansu, Wuwei 733000

**Abstract:** Based on conventional observation data and ECMWF numerical forecast products, dynamic diagnostic analysis was carried out to find out the causes for the formation and weakening of sandstorms that happened in the Hexi Corridor of Gansu Province on 23 April 2014. The results showed that unstable trough develops strongly in front of the ridge of Mountain Ural at 500 hPa, steering strong cold air from the North Pole to move southward quickly, which is the large-scale system leading to the sandstorm. And strong storms accompanying the surface cold front is the main cause for the outbreak of the severe sandstorm. The reason why the strong sandstorm gets enhanced in the Midwest of the Hexi Corridor is that nearly neutral temperature stratification in 700—850 hPa coupled with strong cold temperature advection and low-level jet of Hexi Corridor is conducive to the frontogenesis and downstream of momentum. The strong pressure gradient, temperature gradient and daily variation before and after the cold front causes explosive development of sandstorm in the eastern part of Hexi Corridor. In addition, the strong upward

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41275118)资助  
2014 年 7 月 31 日收稿; 2015 年 3 月 4 日收修定稿  
第一作者:钱莉,主要从事天气气候研究工作. Email:wwqxjql@163. com

motion of low altitude near the Midwest of Hexi Corridor is in favor of increasing dust concentration. Strong differential temperature advection and vertical wind shear enhance thermal and dynamic instability. The reason why strong sandstorm weakens in eastern part of the Hexi Corridor is that the main weather system resulting in the strong sandstorm weakens and moves northerly, and the narrow tube effect disappears in the eastern part of Hexi Corridor. Besides, the diurnal change of temperature and pressure gradients at midnight lead to frontolysis. Even the rainy weather continues in the early stage so that the exposed surface soil becomes loose and deserts form a compacted layer to increase the difficulty of raising sand.

**Key words:** severe sandstorm, occurrence mechanism, diagnostic analysis, physical characteristics

## 引 言

春季干旱少雨是我国北方地区的一大气候特征,春季也是沙尘暴的多发季节,持续干暖的气候造成了土质疏松,具备了沙尘暴的物质基础。张强等(2011)研究发现,春季西北干旱区沙漠戈壁地表对太阳辐射加热相应快速而剧烈,大气边界层自由对流运动十分活跃,可以诱发高达 4000 m 左右的深厚对流边界层,强自由对流活动和深厚对流边界层在天气尺度冷锋强迫作用下,容易激发出特强沙尘暴天气过程,这从西北干旱区特强沙尘暴 1 年中多发生在 4 月底至 5 月初的快速升温期及一天中多发生在加热最强的下午时段就能充分说明。国内对于沙尘暴的研究论文最早见于徐国昌等(1979)对甘肃省 1977 年 4 月 22 日的一次特强沙尘暴的分析,“93.5.5”强黑风暴发生以来,沙尘暴的研究已经引起了国内外研究人员的关注,王式功等(2000)介绍沙尘暴研究进展,方宗义等(1997)介绍了中国沙尘暴研究进展;董安祥等(2003)研究了强和特强沙尘暴的变化趋势,认为近 46 年来强和特强沙尘暴总趋势减少,但从 20 世纪 90 年代末期起,强和特强沙尘暴有急剧增多的趋势;张强等(2005)研究了大气强对流对特强沙尘暴(黑风)形成的作用,从物理上系统解释了特强沙尘暴天气的沙尘壁特征;徐国昌(2008)研究认为沙尘暴不仅是大气运动的被动产物,反过来也可以影响大气运动,形成正或负反馈,正反馈使沙尘暴强度增强,负反馈使沙尘暴强度减弱;胡隐樵等(1996a)研究了 1993 年 5 月 5 日特强沙尘暴和干飚线的形成和发展机制,建立了干飚线发展的物理模型;汤绪等(2004)研究了河西走廊春季强沙尘暴与低空急流的关系,揭示了在东亚中纬度高空维持纬向强急流锋区的情况下,极易造成甘肃河西走廊春季强沙尘暴的低空急流产生,而低空

急流的位置及强度又可作为沙尘暴强度及沙尘暴发生和影响区的预报指标。目前,针对一些典型特强沙尘暴的天气特征分析已经不少(王劲松等,2004;岳虎等,2003;赵庆云等,2012;王伏村等,2012;钱莉等,2009;张亚妮等,2013),对沙尘暴的成因和对策研究也逐步开始(钱莉等,2010;王克丽等,2002;王式功等,1995;胡隐樵等,1996b;姜学恭等,2014),但研究大多关注于促使沙尘暴爆发性发展的原因,对特强沙尘暴过程的强度会在何时何地增强或减弱的研究较少。

2014 年 4 月 23 日发生的区域性大风、特强沙尘暴天气,影响范围广、强度大,造成甘肃省直接经济损失达 5716 万元(樊利强等,2014)。这次特强沙尘暴是通过什么机制形成?又为什么会在河西走廊西部加强、在河西走廊东部减弱?文本选取特强沙尘暴爆发前后亚欧范围内探空、地面观测、ECMWF 数值预报产品以及物理量场资料,空间范围选取影响河西走廊的天气系统( $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ),从天气学条件及物理量场诊断等方面进行深入分析,总结其发生规律,寻求沙尘暴预报预警业务应用的参考依据,为提高同类沙尘暴天气预报能力提供参考。

## 1 天气实况和要素变化

从 22 日 20 时至 24 日 20 时逐 3 h 地面自动站观测资料可见,本次沙尘天气起源于南疆盆地、内蒙古西部和甘肃河西走廊西部,主要影响区域为新疆、甘肃中西部、内蒙古大部、青海西北部、宁夏、陕西北部以及山西北部。沙尘暴强度在甘肃河西走廊中西部达到最强盛(图 1)。其中,河西走廊中、西部 12 站点出现沙尘暴,肃北、瓜州、玉门、金塔、鼎新和高台 6 个站点出现强沙尘暴,敦煌出现特强沙尘暴,最小能见度仅 20 m。

从敦煌 23 日 00:00—20:00 逐小时地面自动站观测资料(图 2)可见, 23 日 00:00—14:00 气压持续下降, 14:00 降为一天中的最低值 874.2 hPa, 之后气压开始迅速升高, 18:00 气压值升为 884.8 hPa, 14:00—18:00 4 h 气压涌升了 10.6 hPa; 气温的变化与气压相反, 13:00 气温升至当日的最高值 26.8℃, 之后 14:00—15:00 气温缓慢下降, 15:00 气温降至 24℃后迅速下降, 到 19:00 气温降至 6.4℃, 14:00—18:00 4 h 气温下降了 17.8℃; 风速从 00:00—13:00 均维持在 1~4 m·s<sup>-1</sup>, 14:00 后风速开始骤然增大, 14:00 增大到 8.1 m·s<sup>-1</sup>, 15:00 增大到 10.0 m·s<sup>-1</sup>, 13:58 敦煌出现特强沙尘暴, 15:03 极大风速达到一日最大, 为 20.8 m·s<sup>-1</sup>。由此可见, 这次特强沙尘暴过程爆发伴随有气压涌升、气温骤降和风速骤然增大的现象。气压开始涌升、风速骤然增大时间与特强沙尘暴爆发同步, 而气温开始骤降时间要滞后 1 h。

与历史上灾情严重的 2010 年 4 月 24 日黑风的气象要素变化比较(钱莉等, 2011), “10. 4. 24”黑风  $\Delta p_4$  最大值为 9.9 hPa,  $-\Delta t_4$  最大值为 12.9℃, 极大风速为 28.0 m·s<sup>-1</sup>, 最小能见度为 0。这两次过

程均存在强的  $+\Delta p_4$ 、 $-\Delta t_4$  和极大风速值。但“14. 4. 23”过程降温幅度更大, 极大风速和沙尘暴强度不及“10. 4. 24”黑风。

## 2 特强沙尘暴发生发展的环流形势特征

### 2.1 500 hPa 环流形势演变特征

分析 500 hPa 环流形势图发现, 这次特强沙尘暴天气过程是寒潮以西北路径向南爆发所致, 沙尘暴出现在高空槽前, 为较典型的低槽型沙尘暴。4 月 22 日 20 时(图略)东亚地区为两脊一槽型, 两脊分别在乌拉尔山、贝加尔湖, 一槽位于中亚的巴尔喀什湖一带, 环流经向度大。高空槽为东北—西南走向, 高空槽区狭窄深厚, 槽前后冷暖平流强盛, 槽后为强劲的偏北气流, 有利于低槽向南发展加深, 处在槽前的新疆西北部首先出现大风天气。23 日 08 时(图 3a)原位于巴尔喀什湖附近的低槽分为南北两个槽。北槽移速快, 南槽移速慢, 当北槽移到贝加尔湖附近时, 南槽则移到新疆西北部。南槽槽前等高线疏散, 并配合有闭合冷温度中心, 槽线附近  $\Delta H_{24}$  北正南负的配置,  $\Delta H_{24}$  达 +43 dagpm, 槽后脊前强劲的北风急流, 引导冷空气向南爆发, 新疆中东部和南疆首先出现大风沙尘暴。23 日 20 时(图 3b)原位于新疆西北部的高空低压槽进一步东移南压发展为低涡, 其中心移到乌鲁木齐附近, 出现闭合低压中心和冷温度中心, 槽线前后  $\Delta H_{24}$  达 +46 dagpm, 说明此低压槽进一步发展加深, 河西中西部出现大风特强沙尘暴。由于低压槽中侵入冷平流, 气旋曲率加大, 预示未来此低涡加深。24 日 08 时低涡中心移到哈密附近, 出现两根闭合等值线, 低压槽中心与冷温度中心近于重合, 预示着低涡将减弱。河西走廊东部 24 日 02 时左右出现扬沙、浮尘天气。

造成本次寒潮引发区域性特强沙尘暴过程的影响系统为乌拉尔山脊前不稳定低槽发展东南下, 不断将极地的干冷空气输送到低压槽中, 槽线前后北正南负的大  $\Delta H_{24}$  有利于强冷空气快速南下, 疏散槽的结构使低槽加深, 槽前锋区加强, 加大变高、温度梯度, 使垂直上升运动加强, 从而为区域性强沙尘暴的形成提供了大尺度环流场条件。

### 2.2 700 hPa 环流形势演变特征

在 2014 年 4 月 22 日 20 时 700 hPa 高空图上

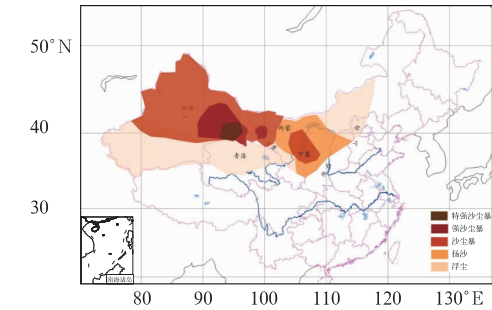


图 1 2014 年 4 月 23—24 日沙尘分布图  
Fig. 1 Intensity distribution of sandstorm in 23—24 April 2014

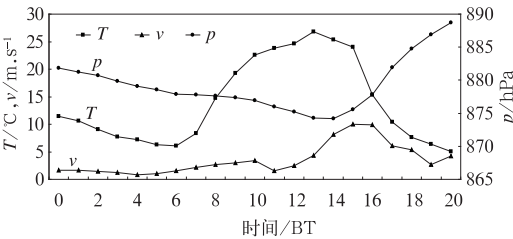


图 2 2014 年 4 月 23 日 00—20 时敦煌  
气压、气温和风速变化  
Fig. 2 Pressure, temperature and wind speed curves of Dunhuang AWS from 00:00—20:00 BT 23 April 2014

(图略),巴尔喀什湖附近为一不稳定低槽,温度槽落后于高度槽,锋区位于新疆乌鲁木齐附近,锋区附近等温线密集,等高线与等温线交角接近  $60^{\circ}$ ,说明冷平流较强。23 日 08 时(图 4a)原位于巴尔喀什湖的低压槽,其前部分裂冷空气南下,冷空气前锋移至哈密附近,槽前等温线更加密集,酒泉与乌鲁木齐温差达  $18^{\circ}\text{C}$ ,锋区加强,槽后等高线与等温线近于垂直,冷平流加大,促使温度梯度加大,利于锋生,并在河西走廊中部诱发暖性切变线。23 日 20 时(图 4b)低

压槽加强南压,槽线位置移到哈密附近,并出现了闭合中心,冷空气前锋已移到酒泉附近,酒泉与乌鲁木齐的温差已达  $22^{\circ}\text{C}$ ,锋区更加密集,青藏高原到河西走廊东部出现暖性切变,为河西走廊沙尘暴的爆发提供了热力不稳定能量积累,当高层有干冷空气侵入,有利于静力不稳定能量爆发。

由此可见,低层槽后强冷平流,促使地面冷锋锋生,低槽与切变线叠加加大了近地面层的热力和动力不稳定。

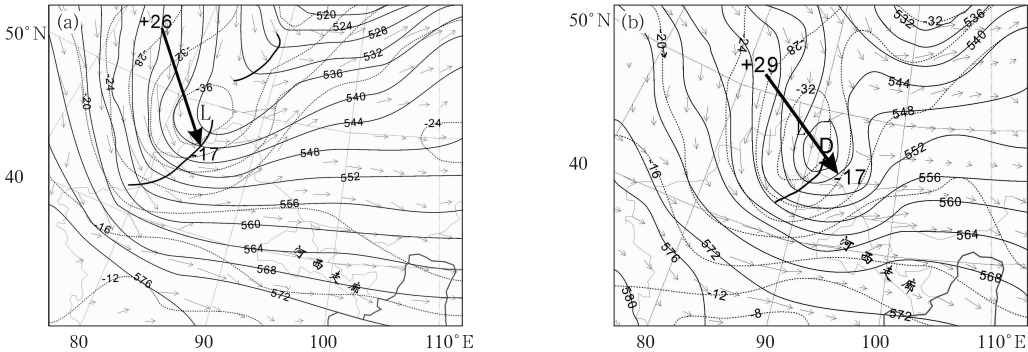


图 3 2014 年 4 月 23 日 08 时(a)和 20 时(b)500 hPa 环流形势图  
Fig. 3 500 hPa circulation map at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 23 April 2014

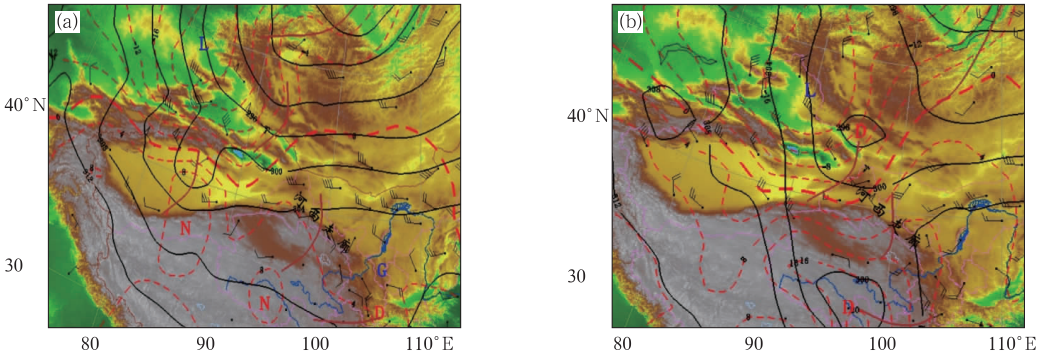


图 4 2014 年 4 月 23 日 08 时(a)和 20 时(b)700 hPa 环流形势图  
Fig. 4 700 hPa circulation map at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 23 April 2014

2.3 冷锋强变压梯度加大沙尘暴强度

分析 23 日 11 时至 24 日 02 时地面图冷锋移动路径及冷锋前后  $\Delta p_3$ 、 $\Delta t_3$  梯度、及热低压中心值(表 1),发现 23 日 11 时地面锋面到达新疆哈密时,冷锋前后的  $\Delta p_3$  和  $\Delta t_3$  分别达到  $+9.7\text{ hPa}$  和  $8^{\circ}\text{C}$ ,冷锋前热低压中心值为  $999.8\text{ hPa}$ ;14 时冷锋进入河西走廊西部前沿的野马街到敦煌一带,卫星云图显示(图 5),其冷锋北部(内蒙古西部—野马街)锋面云带滞后,在锋面与云带之间存在分布均匀的浅

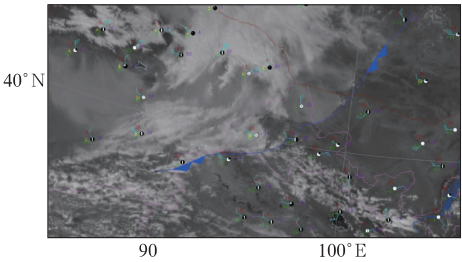


图 5 2014 年 4 月 23 日 14 时高分辨率云图与地面观测叠加图  
Fig. 5 Overlay chart of high resolution satellite and surface observation at 14:00 BT 23 April 2014



色沙尘区,冷锋南部敦煌附近有对流云团生成,说明此处存在较强的上升运动,14 时地面图冷锋前后的  $\Delta p_3$  和  $\Delta t_3$  分别达到 +9.6 hPa 和 11℃,锋前热低压中心值下降到 998.6 hPa,说明,冷锋进入河西走廊后明显加强;17 时到达玉门时,冷锋前后的  $\Delta p_3$  和  $\Delta t_3$  到达最大值,分别为 10.8 hPa 和 15℃,冷锋前热低压中心值下降到最小,其值为 997.0 hPa,地面冷锋达到最强盛阶段;20 时冷锋移到张掖,地面冷锋开始减弱,冷锋前后的  $\Delta p_3$  和  $\Delta t_3$  分别为 8.6 hPa 和 9.0℃,热低压中心值升为 1000.1 hPa;23 时冷锋移到山丹,冷锋前后的  $\Delta p_3$  和  $\Delta t_3$  分别减小为 6.3 hPa 和 8.0℃,热低压中心值升为 1001.0 hPa;24 日 02 时地面冷锋移到河西走廊东部的民勤时,

冷锋前后的  $\Delta p_3$  和  $\Delta t_3$  分别减小为 4.9 hPa 和 6.0℃,热低压中心值升为 1002.1 hPa。由此可以看出,地面冷锋进入河西走廊后,在河西中西部加强,东部减弱。白肇烨等(1986)研究发现,在特强沙尘暴锋面附近,气压梯度及温度梯度均比一般冷锋强得多, $\Delta p_3(\Delta t_3)$  梯度一般  $\geq 10$  hPa(℃)。这次区域性特强沙尘暴过程,当 14—17 时  $\Delta p_3(\Delta t_3)$  梯度  $\geq 10$  hPa(℃)时,河西走廊西部的大多数站点出现了特强沙尘暴或强沙尘暴。沙尘暴进入河西走廊后突然加强的原因是锋生、热力作用、地形狭管作用和午后气温、气压日变化加大了变温、变压梯度,使锋面附近的变压梯度及温度梯度加大,导致偏差风加大,从而加大了沙尘暴强度。

表 1 2014 年 4 月 23—24 日强沙尘暴地面冷锋前后要素变化

Table 1 Changes of meteorological elements before and after severe sandstorm surface cold front in 23—24 April 2014					
时间	冷锋位置	冷锋前后最大 $\Delta t_3/^\circ\text{C}$	冷锋前后最大 $\Delta p_3/\text{hPa}$	热低压中心强度/hPa	天气现象
23 日 11 时	哈密	8	9.7	999.8	沙尘暴
23 日 14 时	敦煌	11	9.6	998.6	特强沙尘暴
23 日 17 时	玉门	15	10.8	997.0	强沙尘暴
23 日 20 时	张掖	9	8.6	1000.1	沙尘暴
23 日 23 时	山丹	8	6.3	1001.0	沙尘暴
24 日 02 时	民勤	6	4.9	1002.1	扬沙

3 环境物理量场的特征

3.1 动力条件

3.1.1 特强沙尘暴的强上升运动

分析特强沙尘暴出现时 4 月 23 日 20 时河西走廊(92°~106°E)的散度垂直剖面图(图 6),发现最大辐合、辐散中心出现在玉门附近,700 hPa 强度达到  $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ;最大辐散中心在 300 hPa,强度达到  $2.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,无辐散层出现在 350 hPa,且高层辐散大于低层辐合,抽吸作用明显。此时河西西部出现区域性强沙尘暴,玉门最小能见度仅 300 m,说明河西走廊西部强沙尘暴出现时低空辐合、高空辐散有利于上升运动发展。

利用 4 月 23 日 14—23 时 ECMWF 数值预报产品,进一步分析了河西走廊中西部各地沙尘暴出现时段内的垂直速度( $w$ )的垂直分布,发现 23 日 14 时敦煌沙尘暴出现时,敦煌(94°E)附近从 850~200 hPa 整层均为上升运动,最大上升运动中心出现在 700 hPa, $w$  为  $2.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7a);17 时玉

门、金塔、鼎新(96°E)出现强沙尘暴时,850~200 hPa 整层均为上升运动,最大上升运动中心出现在 700 hPa, $w$  为  $3.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7b);20 时高台(100°E)出现沙尘暴时,400 hPa 以下均为上升运动,最大上升运动中心出现在 700 hPa, $w$  为  $2.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7c);23 时张掖(101°E)出现沙尘暴时,300 hPa 以下均为上升运动,最大上升运动中心分别出现在 700 和 500 hPa, $w$  分别为 3.13 和  $3.97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7d)。由此可以看出,沙尘暴爆发地上空

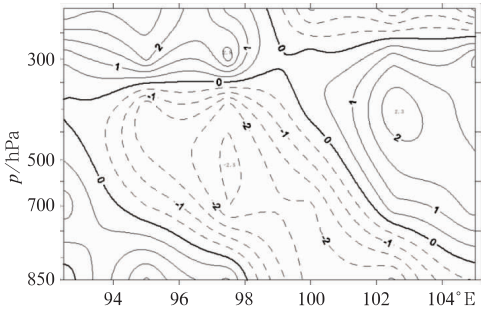


图 6 2014 年 4 月 23 日 20 时散度垂直剖面图  
(沿 39.5°N 做剖面,单位:10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)

Fig. 6 Vertical cross section of divergence along 39.5°N at 20:00 BT 23 April 2014 (unit: 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)

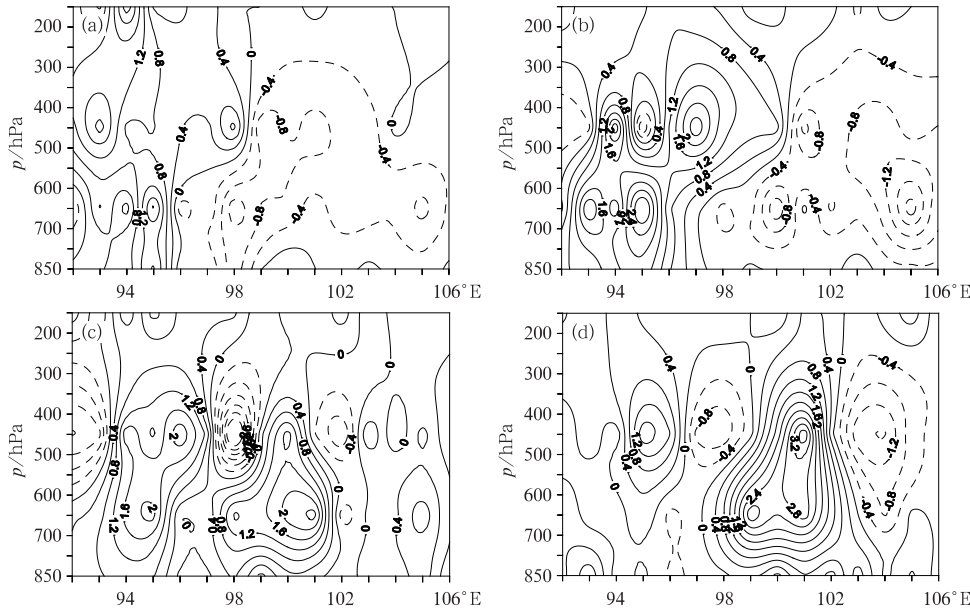


图 7 2014 年 4 月 23 日 14 时(a)、17 时(b)、20 时(c)和 23 时(d)

沿 39.5°N 的  $w$  垂直剖面图(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 The  $w$  cross section along 39.5°N at 14:00 BT (a), 17:00 BT (b), 20:00 BT (c), 23:00 BT (d) 23 April 2014 (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

400 hPa 以下均存在深厚的上升运动,且最强上升运动区出现在 700~500 hPa。

低层辐合、高层辐散的抽吸效应有利于垂直环流的发展,强烈的上升运动为沙尘暴的发生、发展提供了动力条件。上升运动在 700 hPa 达到最强,有利于近地面层沙尘的聚集和扬起,增加近地面的沙尘浓度,形成强沙尘暴。

3.1.2 水平螺旋度与特强沙尘暴

螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力特性的物理量,它是风速度矢和涡度矢点积的体积分。它的重要性在于它比涡度包含了更多辐散风效应,更能体现大气的运动状况,它的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度,是一个诊断和预报对流灾害天气发生发展过程相当有用的物理量。Woodall(1990)提出了风暴相对螺旋度的概念,认为只有相对于风暴的螺旋度才真正对风暴维持和发展有实际意义。风暴相对螺旋度其表达式中水平风速为相对于风暴的风速。从量级上看(至少在风暴初期)风暴相对水平螺旋度比垂直螺旋度大,较大程度上决定了总螺旋度的情况。通常人们计算的风暴相对螺旋度实质上是忽略垂直运动水平分布不均下的风暴相对水平螺旋度。计算公式如下:

$$he = \int_0^h (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}_h dz$$

式中, $\mathbf{V}$  为环境风; $\mathbf{C}=(C_x, C_y)$  为风暴移动速度; $\boldsymbol{\omega}_h$  为水平涡度; $h$  为气层厚度; $he$  为风暴相对水平螺旋度,单位为  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。由于垂直速度的水平切变小于水平速度的垂直切变,所以  $\boldsymbol{\omega}_h$  主要取决于风的垂直切变。

沙尘暴研究表明(陶建红等,2004;李岩瑛等,2012),低槽型沙尘暴多发生在水平螺旋度负值区的下游方,当出现  $he \leq -200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  中心时,未来 24 h 内该区下游将有沙尘暴天气出现;当有  $he \leq -600 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  中心时,未来 6 h 内该区下游将有能见度  $< 500 \text{ m}$  的强沙尘暴天气出现。螺旋度的负值越大,对应沙尘暴的强度越强。利用常规探空资料 400 hPa 至地面五层流场客观分析格点资料计算 2014 年 4 月 22 日 20 时至 24 日 08 时(图 8)的  $he$ ,发现 23 日 08 时在白塔山附近有一个  $-614.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  的负值中心;23 日 20 时负值中心位置东南移到张掖附近,强度减弱到  $-395.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ;24 日 08 时负值中心已北上到蒙古国中部,负值中心强度加大到  $-1262.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。由水平螺旋度的动态变化可以看出,23 日 08—20 时水平螺旋度负值中心的下游新疆东部和河西走廊西部均出现强沙尘暴或特强沙尘暴;23 日 20 时水平螺旋度负值中心减小,但其强度值小于沙尘暴发生的临界值  $-200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,

其下游河西中部出现沙尘暴、东部出现扬沙浮尘。24 日 08 时负值中心增大,其影响区域移到内蒙古和华北地区。

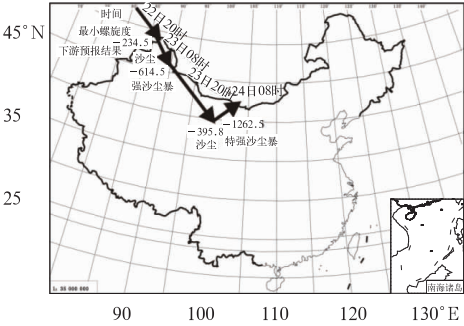


图 8 2014 年 4 月 22 日 20 时至 24 日 08 时  
水平螺旋度负值中心移动路径  
Fig. 8 Moving path of negative value center  
of horizontal helicity from 20:00 BT 22  
to 08:00 BT 24 April 2014

3.2 稳定度条件

3.2.1 温度差动平流

温度差动平流是引起对流性不稳定局地变化的原因之一。

$$\Delta(-\mathbf{v} \cdot \nabla T)_{500-700} > 0$$

不利于不稳定度加强

$$\Delta(-\mathbf{v} \cdot \nabla T)_{500-700} = 0$$

中性

$$\Delta(-\mathbf{v} \cdot \nabla T)_{500-700} < 0$$

有利于不稳定度加强

$$\Delta(-\mathbf{v} \cdot \nabla T)_{500-700} < 0$$

表示某地区低层有暖平流、高层为冷平流,有利于不稳定层结的建立(章国材等,2007;孙永刚等,2014)。分析 23 日 20 时 500~700 hPa 的温度差动平流(图 9),发现河西走廊中部存在 $-6 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的温度差动平流负值中心。河西走廊均为负值控制,且等值线密集,说明河西走廊中西部存在较强的热力不稳定,有利于沙尘暴的爆发。

3.2.2 探空大气层结状态分析

$T\text{-}\ln p$  图可以表示大气温、压、湿的垂直分布。利用敦煌站 4 月 23 日 08 时探空资料,将近地面温度和露点温度用 14 时代替,制作 4 月 23 日 08 时修正后的  $T\text{-}\ln p$  图(图 10),发现近地面层为西南风  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,500 hPa 转为偏西风  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,说明存在较强的水平风垂直切变;850~250 hPa 风向随高度顺时针旋转,有暖平流;250 hPa 以上风向随高度逆时针旋转,有冷平流,满足潜在热力不稳定条件。550 hPa 以下  $t-t_d > 15^{\circ}\text{C}$ ,表明低层水汽条件差,从

地面到 500 hPa 温度廓线近于干绝热,既有利于西风槽强迫下强上升气流发展,也有利于动量下传。 $CAPE$  值达  $13 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,并结合图 10 中温度廓线形态,表明地面至 500 hPa 大气处于近中性层结,只有非常微弱的静力不稳定和相应的对流有效位能。

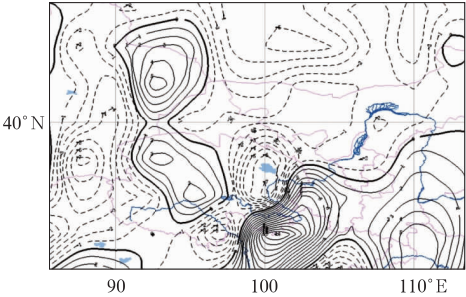


图 9 2014 年 4 月 23 日 20 时 500~700 hPa  
温度差动平流图(单位:  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
Fig. 9 500—700 hPa temperature differential  
advection at 20:00 BT 23 April 2014 (unit:  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )

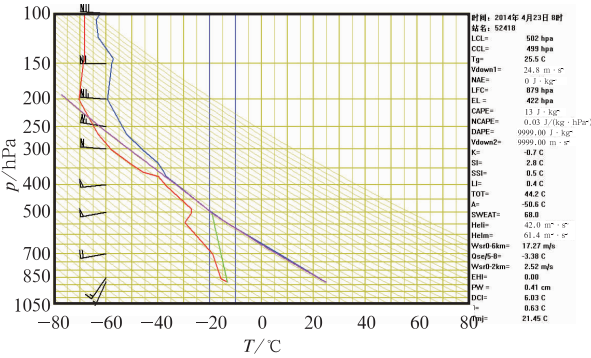


图 10 2014 年 4 月 23 日 08 时  
敦煌探空大气层结状态图  
Fig. 10 Atmospheric stratification map of  
Dunhuang Station at 08:00 BT on 23 April 2014

由此可见,沙尘暴爆发前近中性层结、加上较强的水平风垂直切变和上冷下暖的热力不稳定条件,为沙尘暴爆发提供了较强的潜在动力和热力不稳定条件。

3.2.3 3 次特强沙尘暴过程的对比分析

本次过程与历史上灾情严重的 1993 年 5 月 5 日和 2010 年 4 月 24 日特强沙尘暴过程相比,造成这 3 次特强沙尘暴的天气类型均为低槽型沙尘暴,此类沙尘暴来势迅猛,破坏力大。这 3 次特强沙尘暴过程低槽前后高空风速大,有很强的变高、变温梯度;地面配合有冷锋,冷锋前后  $\Delta p_3$  变压差大;冷锋前有中尺度热低压(表 2)。出现的季节为 4 月下旬



至 5 月上旬,此时春夏过度,地面无植被覆盖,升温剧烈,冷空气移来增大变压梯度,易形成强风。特强沙尘暴出现的时间均在午后到傍晚。

这 3 次特强沙尘暴过程进入新疆后,冷温度中心较强,中心值均 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ ,槽前后 $\Delta H_{24} \geq 27$  dagpm、地面冷锋前后最大 $\Delta p_3 \geq 9$  hPa(岳虎等,2003;

赵庆云等,2012;钱莉等,2011;胡隐樵等,1996a)。但 2014 年 4 月 23 日的这次过程冷温度中心强度、地面冷锋前后最大 $\Delta p_3$ 均强于其他两个过程。因此,这次天气过程除大风、沙尘暴外,还伴随寒潮强降温、霜冻,而其他 2 次过程未达到寒潮降温标准。

表 2 区域性沙尘暴历史个例 500 hPa 系统强度比较

Table 2 Comparison of 500 hPa intensities of weather systems of regional strong sandstorm cases in history

过程时间	天气类型	冷中心温度/ $^{\circ}\text{C}$	低压中心值/dagpm	槽前后 $\Delta H_{24}$ /dagpm	冷锋前后 $\Delta p_3$ /hPa
1993. 5. 5	低槽型	-32	540	42	9. 0
2010. 4. 24	低槽型	-33	549	27	9. 7
2014. 4. 23	低槽型	-37	541	46	10. 8

4 强沙尘暴减弱的原因分析

与历史上灾情严重的 1993 年 5 月 5 日和 2010 年 4 月 24 日特强沙尘暴过程相比,本次过程冷空气强度、槽前后变高梯度、地面冷锋前后变压梯度均为最强。河西走廊东部东、西、北三面被腾格里沙漠和巴丹吉林大沙漠包围,民勤县又为沙尘暴的四大源地之一,具备了丰富的沙源。那么为什么强沙尘暴过程移到河西走廊东部会减小为扬沙?

4.1 影响系统北移变性

4.1.1 地面冷锋

分析 2014 年 4 月 22 日 20 时至 24 日 08 时地面冷锋和正 $\Delta p_3$ 中心移动路径(图 11),发现强冷空气以西北路径从新疆北部进入我国后,先向南移动,翻过天山后,向东南方向移动,到达河西走廊中部后折向东北方向移到蒙古国中部。冷锋前后 $\Delta p_3$ 在新

疆—河西走廊西部强度均 $>9$  hPa;冷锋到达河西走廊中部 $\Delta p_3$ 为 8.6 hPa,强度有所减弱;冷锋到达河西走廊东部 $\Delta p_3$ 为 4.7 hPa,强度明显减弱。

由此可见,这次特强沙尘暴过程,在河西走廊西部南压加强,河西走廊中部转向,河西走廊东部北上减弱。

4.1.2 低空急流

利用 ECMWF 数值预报产品隔 3 h 的 850 hPa 全风速资料,分析 2014 年 4 月 23 日 14 时至 24 日 05 时低空急流核中心值的变化特征(图 12),23 日 14—20 时沿着河西走廊向东南方向移动;23 日 20 时至 24 日 08 时折向东北方向,移到蒙古国中部。强度变化为:14 时在敦煌附近达到最大值 $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,敦煌出现特强沙尘暴;17—23 时急流中心维持在 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,河西走廊中西部出现强沙尘暴或沙尘暴;24 日 02—08 时急流中心减弱为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,河西走廊东部出现扬沙和浮尘天气。低空急流在河西走廊东部减弱的原因除了与天气系统北上

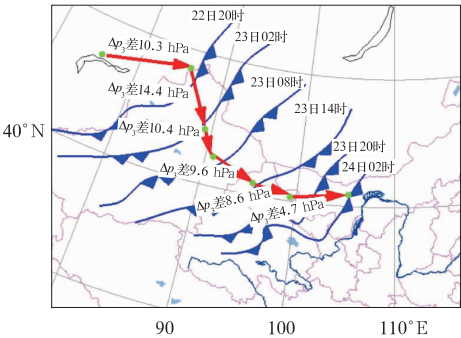


图 11 2014 年 4 月 23—24 日地面冷锋及 $\Delta p_3$ 中心移动路径

Fig. 11 Moving path of the  $\Delta p_3$  center and surface cold front in 23–24 April 2014

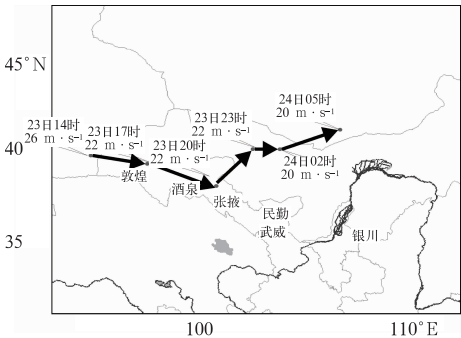


图 12 2014 年 4 月 23—24 日 850 hPa 低空急流中心移动路径

Fig. 12 Moving path of low-level jet center at 850 hPa in 23–24 April 2014



减弱外,与河西走廊地形狭管效应消失空气流动减速有关。

#### 4.1.3 垂直速度

利用 ECMWF 数值预报产品隔 3 h 的 700 hPa 垂直速度资料,沿  $39.5^{\circ}\text{N}$  做剖面,分析 2014 年 4 月 23 日 08 时至 24 日 08 时 ( $92^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ ) 垂直速度的变化规律(图 13),发现垂直速度存在 2 个上升运动中心,一个 17 时出现在敦煌附近,为  $1.62\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 一个 22 时出现在山丹附近,为  $2.59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;冷锋影响河西走廊东部的时间为 24 日 01—08 时,这个时段  $w<0$ ,说明低层为下沉气流控制,不利于沙尘暴的扬起。

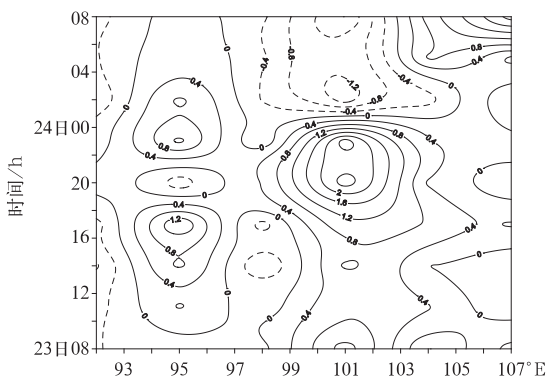


图 13 2014 年 4 月 23—24 日 700 hPa 垂直速度剖面图(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 13 Vertical speed cross section at 700 hPa in 23—24 April 2014 (unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### 4.2 夜间变压变温梯度抑制沙尘暴

一天中气温、气压存在明显的日变化。日出后由于吸收的太阳辐射能逐渐增加,温度逐渐升高,到午后气温达到一天的最大值;夜间地表放射长波辐射,经过一整夜的辐射冷却,温度越来越低,日出前气温达到一天中最低值;气压的变化与气温相反。因此,气温、气压日变化对沙尘暴的强度影响很大,当地面冷锋午后到傍晚过境,气温处于上升阶段,日变化将加大冷锋前后变温、变压梯度,有利于沙尘暴爆发;反之,夜间到凌晨冷锋过境,气温处于下降阶段,将减小冷锋前后变温、变压梯度,不利于沙尘暴爆发。由表 2 可以看出,23 日 17 时冷锋影响玉门时,其冷锋前后  $\Delta t_3$ 、 $\Delta p_3$  分别达到最大  $15.0^{\circ}\text{C}$  和  $10.8\text{ hPa}$ ;入夜后  $\Delta t_3$ 、 $\Delta p_3$  明显减小,24 日 02 时冷锋影响民勤时,其冷锋前后  $\Delta t_3$ 、 $\Delta p_3$  分别减小为  $6.0^{\circ}\text{C}$  和  $4.9\text{ hPa}$ 。由此可以看出,沙尘暴过程移到河

西走廊东部时,气温和气压的日变化抑制了沙尘暴的发生。

#### 4.3 前期连阴雨阻止起沙

4 月 15—21 日河西走廊东部出现了连续 7 天的连阴雨天气,累计降水量为  $6.7\sim 81.4\text{ mm}$ ,持续的降雨增加了地表水分,使疏松裸露的地表土壤和沙漠形成一层板结层,提高了土壤抵御风蚀能力,限制土壤和沙粒的颗粒运动,增加起沙难度,抑制了沙尘暴天气的发生。

### 5 结 论

(1) 500 hPa 乌拉尔山脊前不稳定槽强烈发展,环流经向度加大,使极地强冷空气向南爆发是这次特强沙尘暴产生的大尺度触发系统,地面冷锋所带来的强风引发了特强沙尘暴。

(2) 特强沙尘暴在河西走廊中西部加强的原因:850~700 hPa 河西走廊近乎中性的温度层结,加上强冷平流和强低空北风急流,有利于锋生和动量下传,低层辐合、高空辐散的抽吸效应产生的强烈上升运动为沙尘暴的发生、发展提供了动力条件;上升运动在 700 hPa 达到最强,有利于增加近地面的沙尘浓度;强温度差动平流负值中心和风的垂直切变为沙尘暴发展提供了热力和动力不稳定条件。

(3) 特强沙尘暴在河西走廊东部减弱的原因:天气系统主力北行减弱及河西走廊地形狭管效应消失空气流动减速有关;日变化造成冷锋锋消;前期阴雨天气,使疏松裸露的地表土壤和沙漠形成一层板结层,增加起沙难度。

#### 参考文献

- 白肇烨,徐国昌.1986.中国西北天气.北京:气象出版社,438-441.
- 董安祥,白虎志,陆登荣,等.2003.河西走廊强和特强沙尘暴变化趋势的初步研究.高原气象,22(4):422-425.
- 樊利强,张涛,孙瑾.2014.2014 年 4 月大气环流和天气分析.气象,40(7):898-904.
- 方宗义,朱福康,等.1997.中国沙尘暴研究.北京:气象出版社,1-10.
- 胡隐樵,光田宁.1996a.强沙尘暴微气象特征和局地触发机制.大气科学,21(5):1582-1589.
- 胡隐樵,光田宁.1996b.强沙尘暴发展与干飚线—黑风暴形成机理的分析.高原气象,15(2):178-185.
- 姜学恭,陈受钧,云静波.2014.基于 CALIPSO 资料的沙尘暴过程沙尘垂直结构特征分析.气象,40(3):269-279.
- 李岩瑛,张强.2012.水平螺旋度在沙尘暴预报中的应用.气象学报,

70(1):144-154.

钱莉,李岩瑛,杨永龙,等. 2010. 河西走廊东部强沙尘暴分布特征及飏线天气引发强沙尘暴特例分析. 干旱区地理, 33(1):29-36.

钱莉,杨金虎,杨晓玲,等. 2011. 河西走廊东部“2010. 4. 24”黑风成因分析. 高原气象, 30(6):1653-1660.

钱莉,杨永龙,殷玉春,等. 2009. 一次飏线引发的大风强沙尘暴诊断分析. 气象, 35(3):42-48.

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. 气象, 40(11):1302-1307.

汤绪,俞亚勋,李耀辉,等. 2004. 甘肃河西走廊春季强沙尘暴与低空急流. 高原气象, 23(6):840-846.

陶建红,王劲松,冯建英. 2004. 螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用. 中国沙漠, 24(1):83-87.

王伏村,许东蓓,王宝鉴,等. 2012. 河西走廊一次强沙尘暴的热力动力特征分析. 气象, 38(8):950-959.

王劲松,李耀辉,康风琴,等. 2004. “4. 12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析. 高原气象, 23(1):89-96.

王克丽,江灏,吴虹. 2002. 2001 年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构分析. 高原气象, 21(3):303-308.

王式功,董光荣. 2000. 沙尘暴研究的进展. 中国沙漠, 20(4):349-356.

王式功,杨得宝,金炯,等. 1995. 我国西北地区黑风暴的成因和对策. 中国沙漠, 15(1):19-20.

徐国昌. 2008. 强沙尘暴天气过程中的若干问题思考. 干旱气象, 26(2):9-11.

徐国昌,陈敏莲. 1979. 吴国雄. 甘肃省“4. 22”特大沙暴分析. 气象学报, 37(4):26-35.

岳虎,王锡稳,李耀辉,等. 2003. 甘肃强沙尘暴个例分析研究. 北京:气象出版社, 237-240.

章国材,矫梅燕,李延香,等. 2007. 现代天气预报技术和方法. 北京:气象出版社, 114-126.

张强,黄荣辉,王胜. 2011. 浅论西北干旱区路面过程和大气边界层对区域天气气候的特殊作用. 干旱气象, 29(2):133-136.

张强,王胜. 2005. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应. 中国沙漠, 25(5):675-681.

张亚妮,张碧辉,宗志平,等. 2013. 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. 气象, 39(7):911-922.

赵庆云,张武,吕萍,等. 2012. 河西走廊“2010. 04. 24”特强沙尘暴特征分析. 高原气象, 31(3):688-696.

Woodall G R. 1990. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm-relative environmental helicity. Preprint, 16th Conference on Severe Local Storm, 311-315.