

李光林,张铁军,任余龙,等.2014年春季甘肃一次特强沙尘暴过程的中尺度模拟及触发机制分析[J].干旱气象,2014,32(6):980-988, [LI Guanglin,ZHANG Tiejun,REN Yulong, et al. Mesoscale Simulation of a Strong Sandstorm Process and Its Triggering Mechanism Analysis on 23 April 2014 in Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(6):980-988], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-06-0980

2014年春季甘肃一次特强沙尘暴过程的中尺度模拟及触发机制分析

李光林¹,张铁军²,任余龙²,王 勇³

(1. 甘肃省敦煌市气象局,甘肃 敦煌 736200;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实验室,甘肃 兰州 730020;3. 兰州中心气象台,甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用实况观测资料以及 NCEP 6 h 再分析资料,基于位涡理论和 WRF 模式,对 2014 年 4 月 23 ~ 24 日甘肃最强的一次沙尘暴过程进行数值模拟及发生机制分析。结果表明:沙尘暴过程出现伴有各气象要素“突变”现象,即风速加大、能见度陡降、PM₁₀浓度陡增、地面气温和气压大幅度下降,模式模拟结果与实况一致,能够准确反映出各要素的强烈变化;此次沙尘暴过程在高空强风带和强锋区及地面冷高压、热低压以及两者过渡地带产生的地面强冷锋共同作用下发生,而河西地形的“狭管效应”对此次沙尘暴起加强作用;高值位涡沿着陡峭的 310 K 等熵面下滑时垂直涡度不断增大,致使垂直正涡度柱造成强烈上升运动,并与下沉运动相互作用,最终导致此次特强沙尘暴的发生。

关键词:中尺度数值模拟;沙尘暴;位涡守恒

文章编号:1006-7639(2014)-06-0980-09 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-06-0980

中图分类号:P445⁺4

文献标识码:A

引 言

鉴于沙尘暴对生态环境以及人类生存环境的重要影响,一些学者对中国西北区域沙尘暴的发生机制进行了一系列的研究^[1-10]。刘树华等^[11]通过对多个个例的研究指出,我国西北地区的沙尘暴天气是由大、中、小3种不同尺度的天气系统相互作用形成的,其中大尺度影响系统包括短波槽、切变线、低涡、锋面气旋,中尺度系统为地面急行冷锋前飚线产生的强烈上升气流及次级环流系统,小尺度系统为强对流天气系统,如雷暴、龙卷、积云单体等天气系统或冷锋前后近地层的小尺度湍流扰动;姜学恭等^[12]研究发现,气旋冷锋是引发沙尘暴的主要因素,地面大风形成主要源于气旋发展和锋后强冷平流,高空动量的有效下传也是重要原因;段海霞等^[13]利用 GRAPES_SDM 沙尘模式对 2011 年一次强沙尘暴天气进行模拟分析,指出高空强纬向风速的加强能够促使中低层形成垂直环流圈,其下沉支

流使高空动量有效下传到近地面,进而在地面形成大风及扬沙和沙尘暴天气,强沙尘暴中心位于此垂直环流圈的下沉支;王汝佛等^[14]利用 NCAR/NCEP 再分析资料,从沙尘暴爆发前后的天气形势、气象要素场的特征以及起沙和传输的动力机制等方面对 2010 年一次沙尘暴过程进行初步分析,指出蒙古气旋强烈发展是引发此次沙尘暴的主要原因。赵庆云等^[15]对 2010 年 4 月 24 日甘肃河西走廊的特强沙尘暴过程进行了分析,得出沙尘区域上空存在一个西风急流中心,而地面热低压的强烈发展增强了沙尘暴的强度。

沙尘暴的发生具有明显的中尺度天气特征,然而目前大气观测网时空分辨率较粗,难以有效捕捉沙尘暴发生时的中尺度信息^[16]。中尺度数值天气预报模式通过对沙尘暴天气过程的模拟,能够输出中小尺度天气系统的要素场信息,为研究沙尘暴的发生机制提供有效途径。2014 年 4 月 23 ~ 24 日甘肃大部出现本年度最强的一次沙尘暴过程,能见度

收稿日期:2014-11-14; 改回日期:2014-12-18

基金项目:沙漠气象基金项目(Sqj2012003)资助

作者简介:李光林(1955-),男,甘肃敦煌人,工程师,主要从事中短期天气预报工作。E-mail:liguanglin2004@163.com

最低不足 20 m,突发性强,具有明显的中尺度天气特征,本文利用 WRF 高分辨中尺度预报模式,结合实况资料,对此次特强沙尘暴过程进行数值模拟,并对其发生机制进行了研究。

1 实况及影响系统

1.1 过程实况

2014 年 4 月 23~24 日甘肃省大部分地方出现强沙尘暴天气过程,共有 12 个测站出现沙尘暴天气,范围从河西的敦煌、酒泉、张掖一直延伸到中部的兰州,其中敦煌出现特强沙尘暴天气,能见度不足 20 m,风速超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且沙尘暴过程经历了 2 个阶段,分别为 13:00~14:00 和 17:00~19:00(表 1),

历时较短,具有明显的中尺度特征。

图 1 是敦煌站观测到的此次特强沙尘暴过程前后 4 月 22 日 00:00 至 25 日 06:00 逐小时 PM_{10} 质量浓度和能见度。可以看出,23 日 03:00 之前, PM_{10} 质量浓度为 $75\sim 200\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明沙尘暴过程爆发前沙尘浓度较小且相对较稳定。23 日 08:00 开始, PM_{10} 质量浓度猛升至 $1\,300\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,能见度下降到 1 km 以下,预示着此次沙尘暴天气过程的开始。14:00, PM_{10} 质量浓度继续增加至 $6\,700\sim 6\,900\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,此时为沙尘暴天气过程最强时段,高浓度值持续到 24 日 07:00,随后开始快速降低,至 12:00, PM_{10} 质量浓度已下降到 $500\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,此后 PM_{10} 质量浓度变化不大,表明此次沙尘暴过程趋于减弱结束。

表 1 2014 年 4 月 23~24 日沙尘暴主要发生站点实况
Tab. 1 The weather situation of main stations during the sandstorm process in Gansu from 23 to 24 April 2014

观测站点	能见度/m	瞬时风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	瞬时风向	天气现象	出现时间(北京时)
敦煌	20	—	—	特强沙尘暴	23 日 13:58
	40	—	—	特强沙尘暴	23 日 14:00
	20	22	西北	特强沙尘暴	23 日 17:00
	30	—	—	特强沙尘暴	23 日 18:32
马鬃山	900	—	西北	沙尘暴	23 日 12:58
	900	26	西北	沙尘暴	23 日 14:00
	900	22	西北	沙尘暴	23 日 14:28
肃北	200	—	—	强沙尘暴	23 日 15:05
	80	—	—	强沙尘暴	23 日 18:54
	100	24	西北	沙尘暴	23 日 20:00
瓜州	200	—	—	强沙尘暴	23 日 15:29
	200	24	西	强沙尘暴	23 日 20:00
	900	—	—	沙尘暴	23 日 16:51
玉门	800	20	西南	沙尘暴	23 日 17:00
	650	—	—	沙尘暴	23 日 19:17
	480	—	—	强沙尘暴	23 日 19:31
	300	20	西北	强沙尘暴	23 日 20:00
	600	20	西北	沙尘暴	23 日 23:00
鼎新	550	—	—	沙尘暴	23 日 22:30
金塔	490	—	—	强沙尘暴	23 日 20:00
	400	22	西北	强沙尘暴	23 日 23:00
	600	—	—	沙尘暴	23 日 18:23
肃州区	600	20	西北	沙尘暴	23 日 20:00
	940	—	—	沙尘暴	23 日 20:51
高台	440	—	—	强沙尘暴	24 日 01:12
	500	—	—	沙尘暴	24 日 02:00
临泽	700	—	—	沙尘暴	23 日 21:04
甘州区	900	22	西北	沙尘暴	23 日 21:25
	700	—	—	沙尘暴	24 日 03:32
山丹	700	—	—	沙尘暴	24 日 03:32
	900	—	—	沙尘暴	24 日 05:00

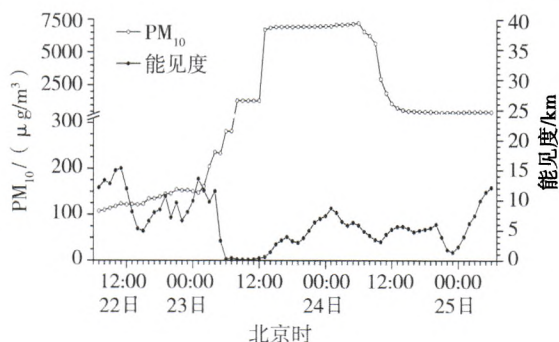


图1 2014年4月22日06时至25日06时

PM₁₀质量浓度和能见度逐小时演变Fig.1 The evolutions of the hourly PM₁₀ concentration and visibility from 06:00 April 22 to 06:00 April 25, 2014

1.2 沙尘暴过境前后地面要素变化特征

敦煌自动气象站记录的2014年4月22日06:00至25日06:00(北京时间)逐小时近地面气温、相对湿度和气压显示(图2),22~23日白天,气温持续上升,并在23日沙尘暴爆发前达最高,而相对湿度快速下降,向着有利于沙尘暴发生的暖干状态发展。23日13:00,气温急剧下降,14:00~16:00时段气温降幅达10.0℃,同时伴随着气温的下降,相对湿度从7%略增至17%,此后气温持续降低,相对湿度略有增加。在沙尘暴来临前,地面气压骤降到874.3 hPa,随着沙尘暴过程开始,冷空气增强,气压开始持续猛增,至24日凌晨,气压已上升至893.7 hPa,沙尘暴过程的10 h内气压增幅达19 hPa。

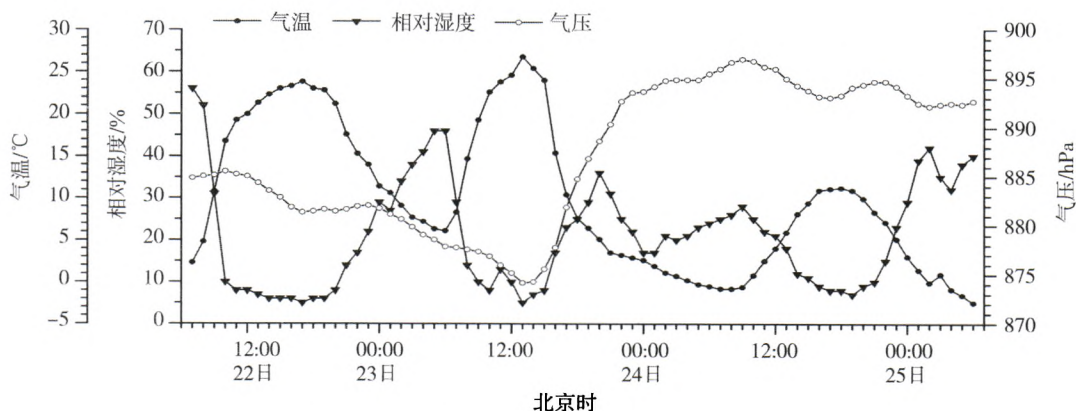


图2 4月22~25日逐小时近地面气温、相对湿度和气压变化

Fig.2 The changes of the hourly temperature, relative humidity and air pressure from 22 to 25 April 2014

沙尘暴发生前,4月21~22日夜间以偏南风为主,白天以西北风为主,风速都不大。沙尘暴发生过程中,风向一直保持西北风,23日15:00风速迅速增加到最大值 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此后逐渐减小;25日过程结束后,风向恢复到爆发前的状态(图3)。

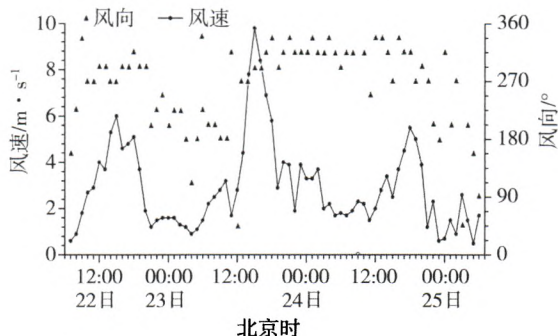


图3 4月22~25日10 min 风向、风速演变

Fig.3 The evolutions of the ten minutely wind direction and wind speed from 22 to 25 April 2014

1.3 高空及地面影响天气系统

影响这次沙尘暴过程的高空关键系统是强风带和强锋区。4月23日08:00,欧亚中高纬500 hPa环流形势为“2槽1脊”,2槽分别位于中西伯利亚到新疆西部和日本海附近,贝加尔湖附近为高压脊。西北地区大部分地方处于西北气流控制中,随着贝加尔湖高压脊逐渐东退,中西伯利亚低压槽开始分裂东移,在新疆北部形成低压中心,其值达到541 dagpm,中心温度达 -34°C 。与低压槽对应的高空锋区在东移过程中不断加强,并于23日13:00开始影响河西西部,敦煌出现强沙尘暴天气;23日20:00,高空锋区及强风带全面影响甘肃河西,河西中西部等高线与等温线呈垂直配置,大气斜压性进一步增强,有利于动量下传。同时在500 hPa上,河西西部对应出现一支 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强西风带,中心风速达 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;700 hPa上也出现一支 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强西风带,中心风速达 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高、低空强风速

带共同作用引发了第二阶段的沙尘暴过程(图略)。

地面形势图(图略)显示,4月23日08:00,地面冷高压在巴尔喀什湖附近,中心气压值达1 040 hPa,锋面位于新疆中部,锋前为热低压,中心值为980 hPa,位于若羌站,锋面附近出现扬沙天气。到14:00,锋面进入河西,敦煌和马鬃山出现特强沙尘暴天气。锋面过境后酒泉地区降温升压明显,且风速显著增大,敦煌站3 h 变压达6 hPa,23日08:00至24日08:00降温达16℃。伴随着冷锋东移,甘肃河西中西部相继出现大范围的大风、沙尘暴天气。由此可知,此次沙尘暴过程的地面影响系统是地面冷高压和地面热低压,以及两者过渡地带产生的地面强冷锋。冷空气推着暖空气进入甘肃河西走廊,受地形“狭管效应”影响,风速加大,加之甘肃河西拥有丰富的沙源,有利于强沙尘暴天气的爆发。

2 中尺度数值模拟及检验

2.1 模式简介及模拟方案

采用的模式是 WRFV3.4.1,其水平分辨率为9

km×9 km,格点数为430×300,垂直方向共38层。模拟区域水平中心点为39.9°N、92.2°E。模式输出结果为每1 h 输出一次。模拟时间从2014年4月22日08时至25日08时(北京时),模拟时效为72 h。参数化方案采用 Lin 微物理方案、Kain – Fritsch 对流参数化方案、YSU 边界层方案、RRTM 长波辐射方案、Goddard 短波辐射方案以及 Noah land – surface 陆面方案。背景场和边界条件采用美国国家环境预报中心(NCEP)的 FNL 再分析资料,每6 h 一次。

2.2 影响系统模拟及检验

图4是500 hPa和700 hPa 实况及数值模拟的高空环流形势。500 hPa 实况上(图4a),23日08:00 巴尔喀什湖附近为强斜压槽控制,在槽线附近有条强风速带;相应模拟图上(图4c),对强斜压槽的位置模拟较准确,也模拟出了槽前强风速带的分布。700 hPa 上(图4b),强斜压槽位于新疆北部,对应槽中有强冷平流,槽前有低空急流,最大风速在20 m · s⁻¹以上;模拟试验(图4d),对强斜压槽的位置、

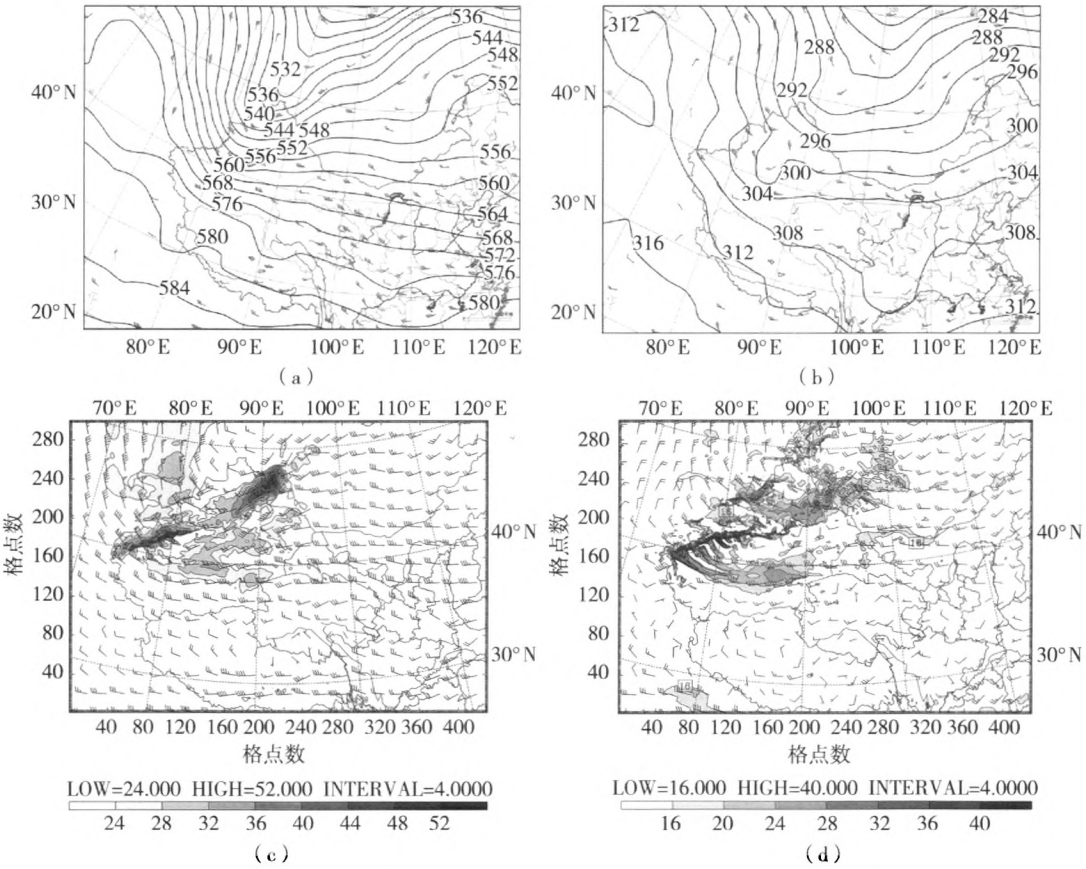


图4 2014年4月23日08时500 hPa(a,c)、700 hPa(b,d)观测(a,b)及模拟(c,d)的位势高度(单位:dagpm)和风速(单位:m · s⁻¹)合成图(色标为风速大小,模拟图中风向标单位为5 m · s⁻¹)

Fig. 4 The observed (a,b) and simulated (c,d) of 500 hPa (a,c) and 700 hPa (b,d) geopotential height (Unit:dagpm), wind speed (Unit:m · s⁻¹) at 08:00 on April 23, 2014

形态及低空急流模拟准确。由于天山的阻挡,低空急流分成了天山以北和以南 2 部分,天山以南的急流此时已经开始影响甘肃河西,马鬃山及敦煌附近风速较强,与沙尘暴发生的时间相对应。

2.3 地面气象要素模拟及检验

对沙尘暴过程中敦煌、马鬃山、玉门、金塔 4 站的气温、气压、风速、风向模拟检验表明(图 5),该试验模拟出了此次沙尘暴过程各要素的变化特征,其中对气温和气压的模拟效果较好,特别是沙尘暴发生时各要素“突变”情况模拟较为准确。对气温而言,敦煌、玉门和金塔后半段模拟效果比前半段要

好,不仅变化趋势与实况变化相同,且模拟误差也比较小,而前半段的模拟误差较大;马鬃山站,前半段模拟误差较小,后半段模拟误差增加,但变化趋势与实况相同。对地面气压的模拟非常准确,除金塔外,模拟值与观测值非常接近,整体误差较小,且气压变化趋势一致。对风速的模拟,马鬃山和金塔 2 站模拟效果较好,与实况相比,不仅变化趋势相似,且误差也较小;敦煌和玉门站总体变化趋势相同,但模拟风速比实况明显偏小。在对风向的模拟上,金塔和敦煌偏差略大,马鬃山和玉门模拟的风向和实况基本相同。

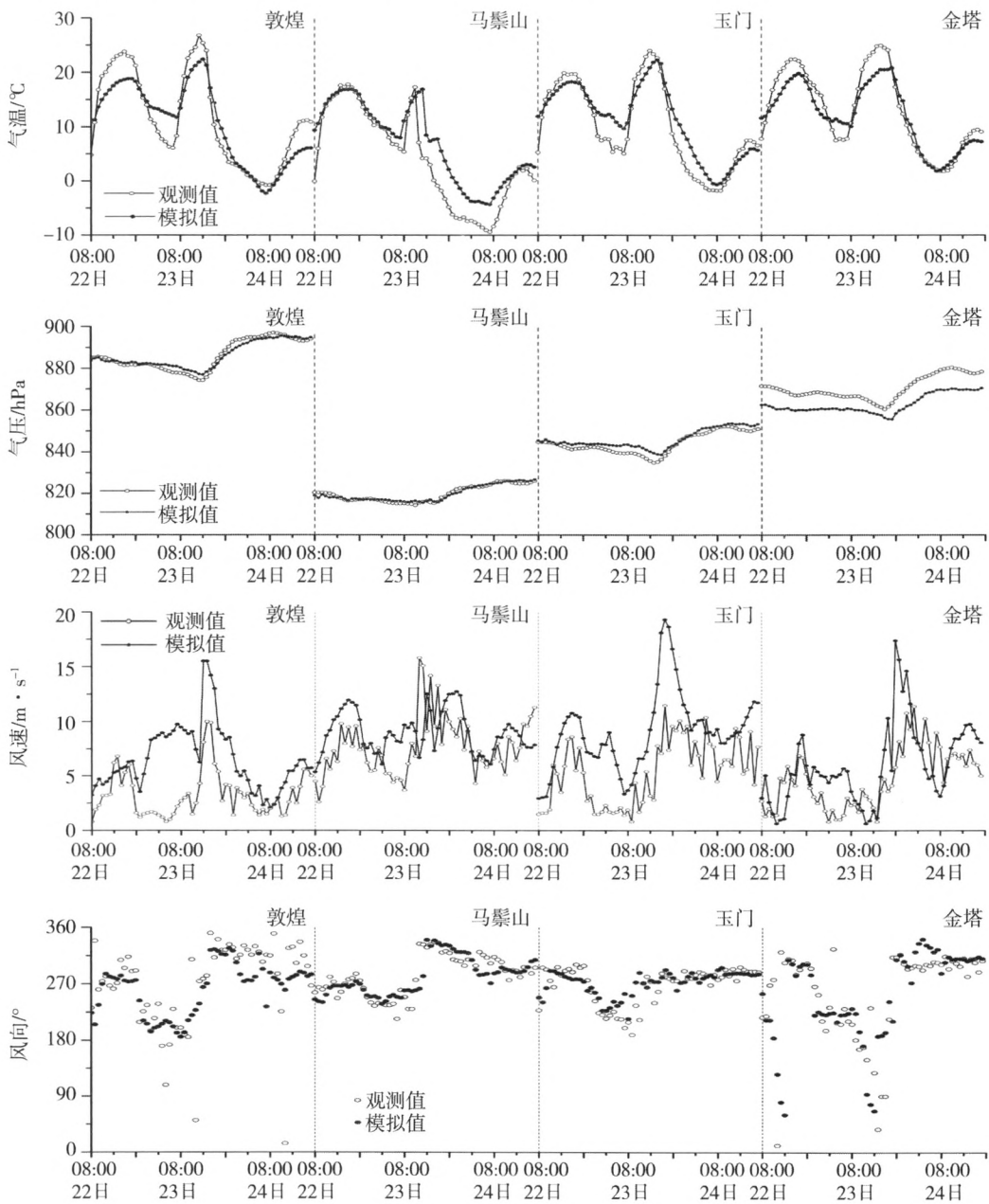


图 5 沙尘暴过程中敦煌、马鬃山、玉门、金塔各站逐小时气温、气压、风速、风向实况及模拟变化
Fig.5 The changes of the observed and simulated surface temperature, air pressure, wind speed and wind direction in Dunhuang, Mazongshan, Yumen and Jinta stations during the sandstorm process

3 沙尘暴发生机制分析

位涡是表征大气动力、热力性质的综合物理量,其定义为:

$$p = a \xi_a \cdot \nabla \theta \tag{1}$$

其中, a 为比容(单位: $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), ξ_a 为绝对涡度(单位: s^{-1}), θ 为假相当位温(单位: K);它等于单位质量气块的绝对涡度在 $\nabla \theta$ 方向的投影与 $|\nabla \theta|$ 的积。对于无摩擦、绝热大气中位涡守恒,即:

$$\frac{dP}{dt} = 0 \tag{2}$$

已有研究表明^[17-19],基于湿位涡守恒,当等熵面倾斜增大时,沿等熵面下滑的气流由于风切变、对

流稳定度的变化而促使低层垂直涡度急剧增大。对沙尘暴过程而言,水汽变化可忽略,湿位涡退化为位涡,湿位涡原理对位涡仍然适用。由前面分析可知,此次沙尘暴过程具有明显的中尺度特征,在此次沙尘暴过程模拟的基础上,利用模拟资料和位涡守恒理论,开展此次特强沙尘暴的发生机制研究。

3.1 沙尘暴过程期间等熵面形态

图6是此次特强沙尘暴过程中沙尘暴2个主要爆发阶段的位温剖面。可以看到,4月23日11:00,冷暖空气在敦煌附近对峙,310 K位温等值线非常陡峭,从300 hPa高度附近下降到700 hPa,并已达到敦煌以西,表明此时敦煌已经在沿着等熵面下滑的冷空气影响下;23日17:00,冷暖空气依然在敦煌附近对峙。

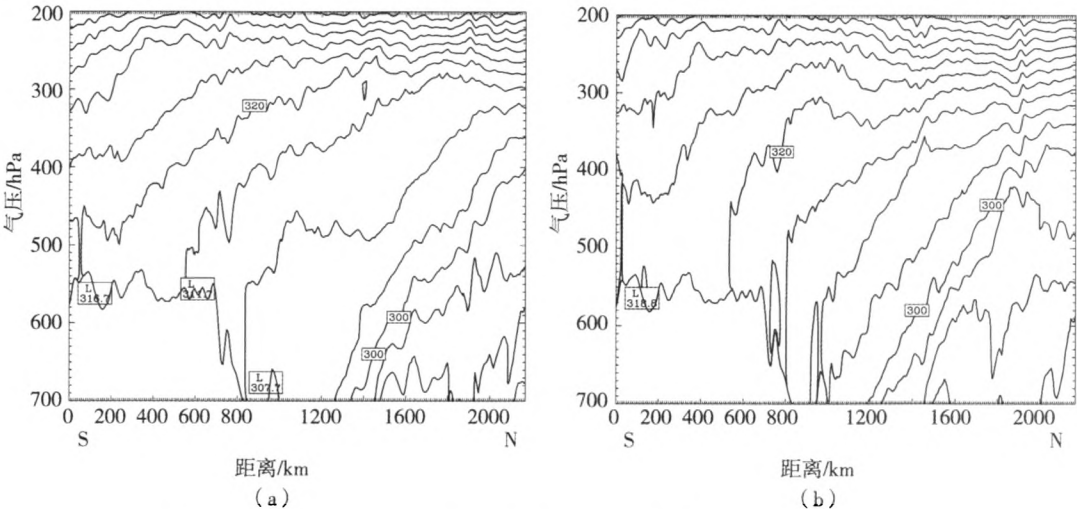


图6 2014年4月23日11:00(a)、17:00(b)敦煌位温的经向剖面(单位:K)
Fig. 6 The meridional sections of the potential temperature at Dunhuang station at 11:00 (a) and 17:00 (b) on April 23, 2014 (Unit:K)

3.2 310 K等熵面位涡下滑

图7是2014年4月23日08:00~20:00期间 $\theta = 310 \text{ K}$ 等熵面位涡变化,可知此次沙尘暴过程中,在等熵面上与强斜压槽对应的是高位涡值的冷空气堆。该位涡高值区在23日08:00由新疆北部向南疆盆地扩展,位涡最大达8 PVU,且在位涡舌处有细胞状的位涡团出现(图7a);11:00,伴随位涡主体的东移,位涡团增加,在敦煌附近也出现了细胞状的位涡团,敦煌附近的位涡值达到1.5 PVU(图7b);14:00,位涡增大到2.1 PVU,由实况可知,与敦煌位涡相对应,此时敦煌为特强沙尘暴(图7c);17:00、20:00(图7d和7e),随着位涡主体的临近,敦煌再次出现了新一轮的沙尘暴天气。

3.3 垂直涡度及垂直速度变化特征

从沙尘暴发生的主要阶段敦煌站的垂直涡度剖面上(图8)可以看出,23日11:00、14:00及17:00在敦煌附近有正涡度柱自200 hPa向低层伸展(图8中箭头),表明该正涡度柱与垂直上升运动的发展关系密切。

利用模拟资料分析此次强沙尘暴过程中敦煌站垂直速度经向剖面发现(图9),在4月23日11:00强沙尘暴发生初期(图9a),敦煌以西有强上升运动发展,上升速度中心在600 hPa附近,速度为 $2.8 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;与此同时,敦煌以东700 hPa以下区域有较强的下沉运动发展东移,下沉速度最强达 $-1.6 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。伴随上升中心的东移,敦煌开

始出现沙尘暴天气;12:00(图 9b),随着上升运动中心的加强和上升区的扩大,下沉气流也在增强,但此时敦煌低层仍处在较强的下沉运动中;13:00(图 9c),敦煌完全处在强上升气流中,此时敦煌发生特强沙尘暴,能见度不足 20 m;14:00(图 9d),对流层中层以下基本上为下沉气流,上升运动中心出现在

400 hPa,第一波的沙尘暴趋于减弱。可见,此次特强沙尘暴主要是由强的上升运动引起的,而强的下沉运动在沙尘暴发生初期阻碍了沙尘的垂直扩散,降低了水平能见度,对沙尘暴起到加强作用。然而在第一波沙尘暴结束后,强的下沉运动抑制了沙尘的快速扩散,对沙尘暴结束起到延迟作用。

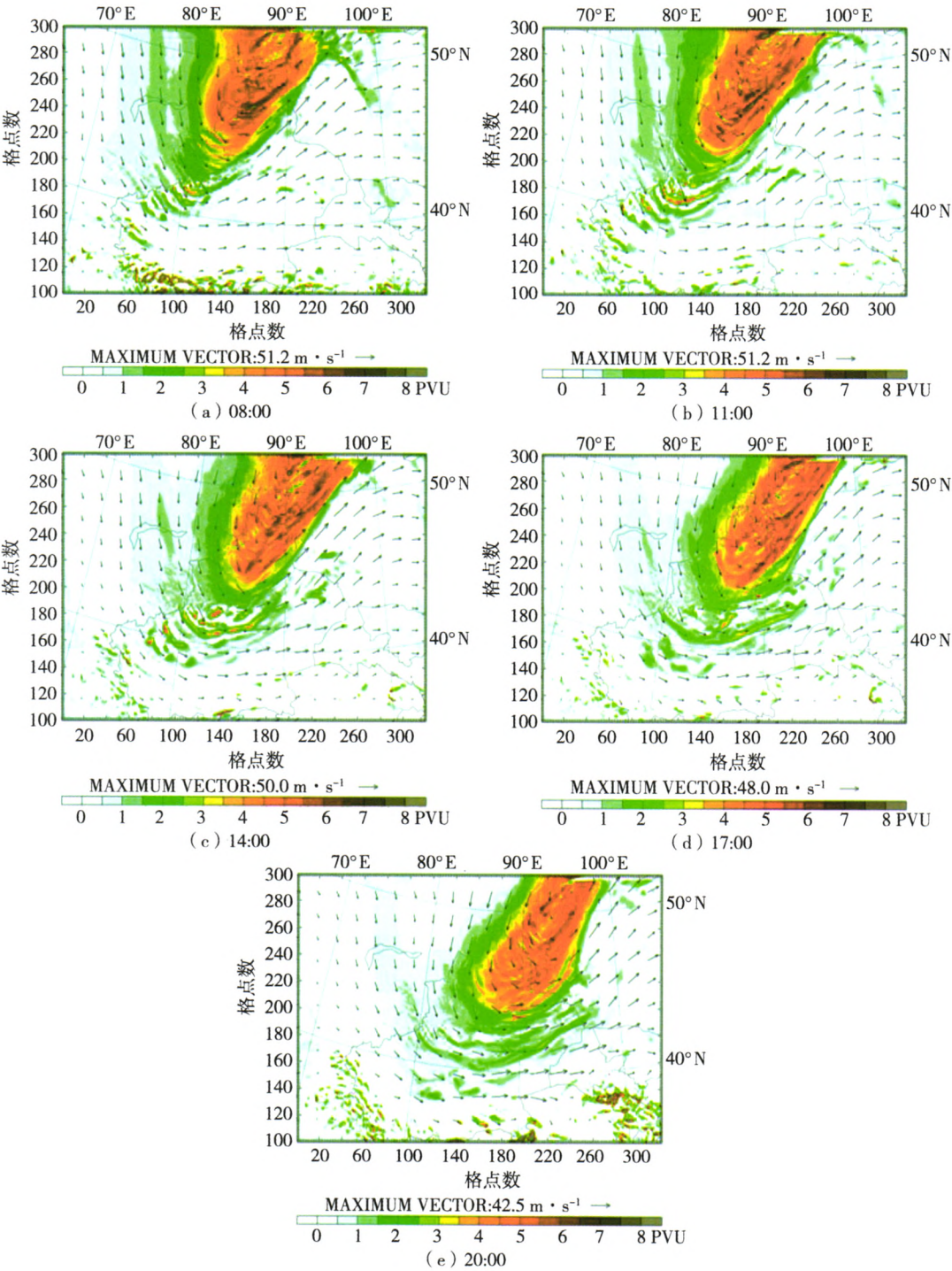


图 7 2014 年 4 月 23 日 08:00 ~ 20:00 逐 3 h $\theta = 310$ K 等熵面位涡(单位:PVU)
Fig. 7 The three - hour changes of potential vortex for 310 K
isentropic surface from 08:00 to 20:00 on April 23, 2014 (Unit:PVU)

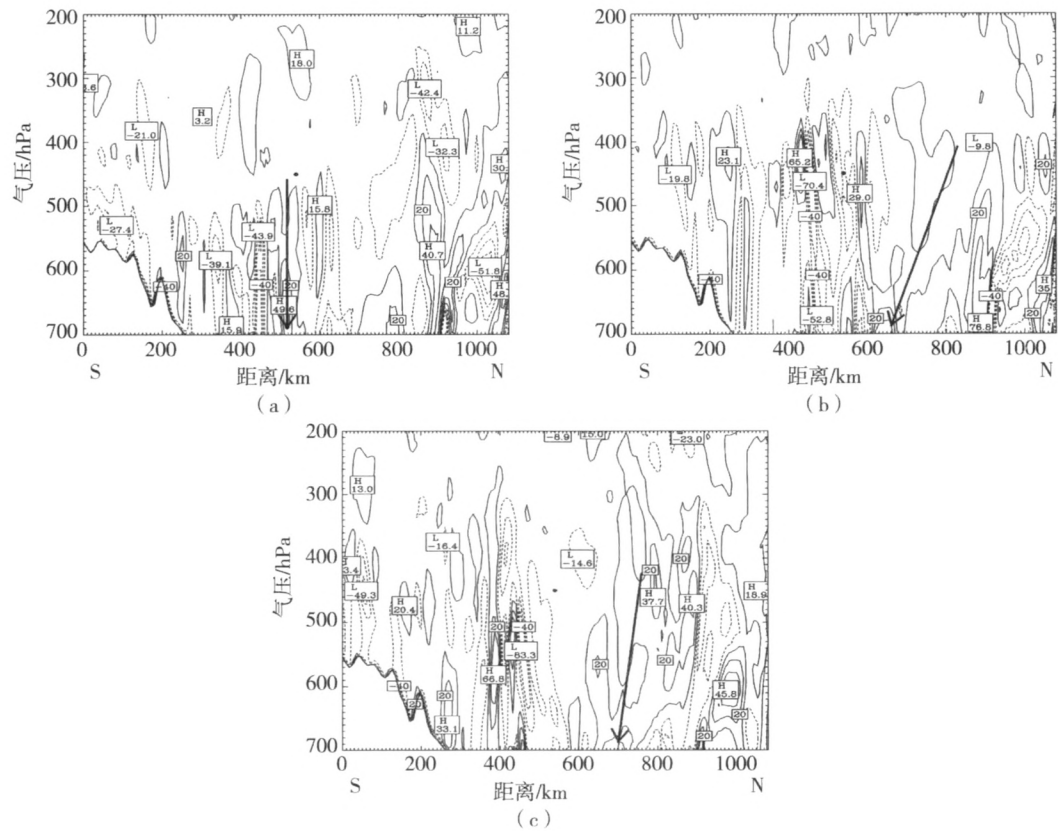


图 8 2014 年 4 月 23 日 11:00(a)、14:00(b)、17:00(c)垂直涡度剖面(单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 8 The profiles of vertical vorticity at 11:00 (a), 14:00 (b) and 17:00 (c) on April 23, 2014(Unit: 10^{-5} s^{-1})

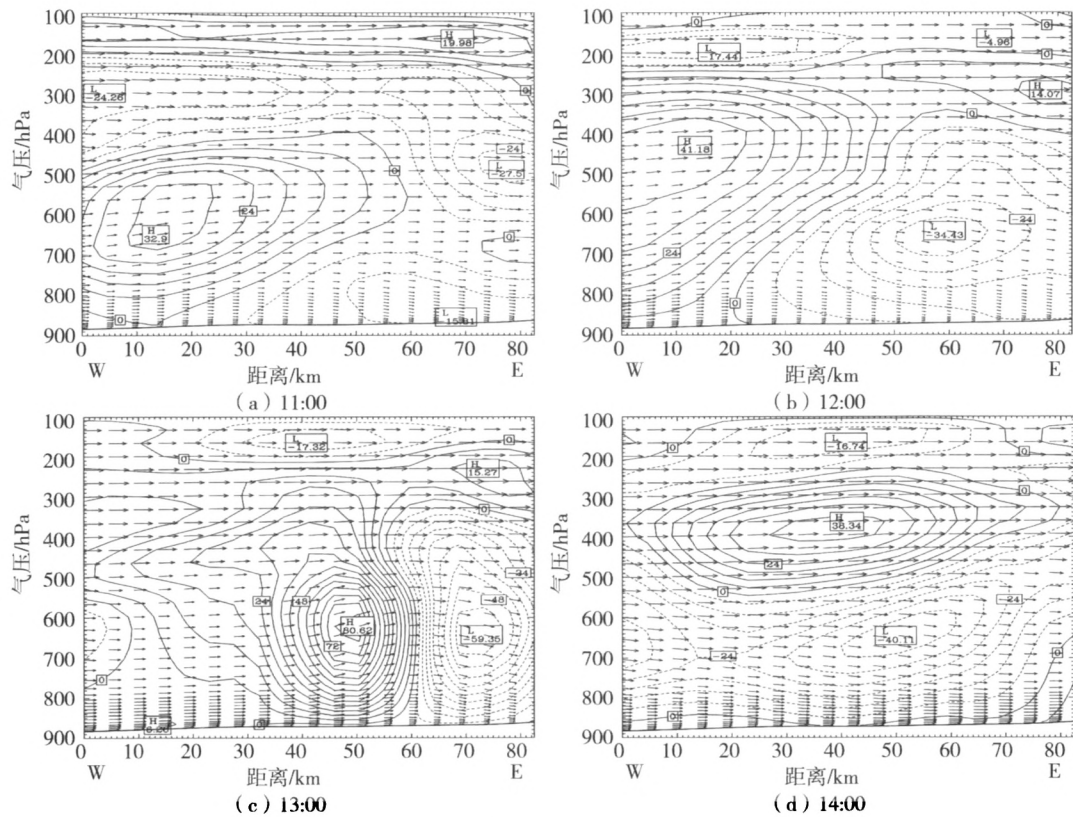


图 9 2014 年 4 月 23 日 11:00 ~ 14:00 敦煌垂直速度纬向剖面(单位: $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 The zonal section of the hourly vertical speed over Dunhuang from 11:00 to 14:00 on April 23, 2014(Unit: $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

综上所述,此次特强沙尘暴发生的机制是,高值位涡沿着陡峭的 310 K 等熵面下滑时垂直涡度增大(基于等熵面位涡守恒),进而造成气旋性环流增强、垂直速度剧增,最终导致强沙尘暴的发生。

4 结 论

(1) 此次强沙尘暴过程来临时,各要素出现“突变”,风速加大、能见度陡降、PM₁₀ 浓度陡增、地面气温和气压大幅度下降;模式模拟结果与实况一致,较能准确地反映各要素的强烈变化。

(2) 此次特强沙尘暴的高空和地面影响系统表明,强风带和强锋区是高空影响系统,而冷高压和热低压是地面关键影响系统,以及两者过渡地带产生的地面强冷锋;此外,河西地形的“狭管效应”对此次沙尘暴的发生起加强作用。

(3) WRF 中尺度预报模式准确模拟出了影响此次沙尘暴过程的主要天气系统,其模拟资料分析表明,强烈上升和下沉运动的相互作用是此次沙尘暴发生的主要因素,而垂直正涡度柱是上升运动产生的直接原因。

(4) 高值位涡沿着陡峭的 310 K 等熵面下滑,由于等熵面倾斜和沿等熵面位涡守恒,故垂直涡度增大,进而造成气旋性环流增强和垂直速度剧增,最终导致强沙尘暴的发生。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 林良根,寿绍文,沈之林. 一次强沙尘暴过程中干空气侵入的数值模拟和诊断分析[J]. 南京气象学院学报,2006,29(3):371-378.

- [3] 赵明瑞,杨晓玲,滕水昌. 甘肃民勤地区沙尘暴变化趋势及影响因素[J]. 干旱气象,2012,30(3):421-425.
- [4] 康凤琴,李耀辉,吕世华. 2001 年 4 月 8 日强沙尘暴天气的数值模拟研究[J]. 中国沙漠,2003,23(6):658-685.
- [5] 赵仕伟,胥永文,史荟燕,等. 我国沙尘灾害遥感监测研究与展望[J]. 气象与环境科学,2009,32(4):65-68.
- [6] 马禹,王旭,肖开提,等. 天山北麓一例黑风暴天气的成因[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(3):112-113.
- [7] 程鹏,王宝鉴,孔祥伟,等. 河西走廊一次强沙尘暴天气的螺旋度诊断[J]. 干旱气象,2013,31(1):144-149.
- [8] 杨先荣,王劲松,张锦泉. 高空急流带对甘肃沙尘暴强度的影响[J]. 中国沙漠,2011,31(4):1046-1051.
- [9] 刘景涛,钱正安,姜学恭,等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统类型分析[J]. 高原气象,2004,23(4):540-547.
- [10] 狄潇泓,张新荣,刘新伟,等. 甘肃省两次强沙尘暴天气对比分析[J]. 干旱气象,2013,32(1):81-86.
- [11] 刘树华,刘新民,高尚玉. 沙尘暴天气成因的初步分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),1994,30(5):589-596.
- [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] 段海霞,李耀辉,蒲朝霞,等. 高空急流对一次强沙尘暴过程沙尘传输的影响[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1461-1472.
- [14] 王汝佛,冯强,尚可政. 2010 年春季我国一次强沙尘暴过程分析[J]. 干旱区地理,2014,37(1):31-44.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387-404.
- [18] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Quart J Roy Meteor Soc,1985;877-946.
- [19] 伍荣生,谈哲敏. 广义涡度与位势涡度守恒定律及应用[J]. 气象学报,1989,47(4):436-442.

Mesoscale Simulation of a Strong Sandstorm Process and Its Triggering Mechanism Analysis on 23 April 2014 in Gansu Province

LI Guanglin¹, ZHANG Tiejun², REN Yulong², WANG Yong³

(1. Dunhuang Meteorological Bureau of Gansu Province, Dunhuang 736200, China; 2. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China; 3. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the observation data and 6-hour reanalysis of NECP and vortex theory, the strongest dust storm process was simulated by WRF model from 23 to 24 April 2014 in Gansu Province. On this basis, the forming mechanism of the dust storm was further analyzed by using the theory of potential vorticity. The observed data showed that the meteorological elements suddenly changed during the sand-dust storm process, wind speed increased, visibility steeply fell, concentration of PM₁₀ spurted, ground temperature and air pressure significantly dropped. The simulated results were consistent with the observation, which could accurately reflect the tremendous change of each factor. The dust storm was affected by high level strong wind and frontal zone, surface cold high pressure and thermal low pressure, and strong cold front in their transitional zone, while the terrain of Hexi Corridor with funnelling played an important role in strengthening of the dust storm. The vertical vorticity continuously increased with the sliding down of the high value area of vortex along the steep 310 K isentropic surface, it caused the strong upward movement of airflow, and interacted with the sinking motion, which eventually led to the occurrence of the strong dust storm.

Key words: mesoscale numerical simulation; sandstorm; conservation of potential vorticity