

王伏村,付双喜,张德玉,等.一次雷暴大风引发的强沙尘暴天气的中尺度系统分析[J].干旱气象,2014,32(6):954-961, [WANG Fucun, FU Shuangxi, ZHANG Deyu, et al. Analysis on Mesoscale System of a Strong Dust - storm Triggered by Thunderstorm[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(6):954-961], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-06-0954

一次雷暴大风引发的强沙尘暴天气 的中尺度系统分析

王伏村¹,付双喜²,张德玉¹,张浩文¹,代德彬¹,刘玉洁¹

(1. 甘肃省张掖市气象局,甘肃 张掖 734000;2. 甘肃省人工影响天气办公室,甘肃 兰州 730020)

摘要:使用探空、地面和张掖多普勒天气雷达观测资料对2013年7月30日发生在河西走廊的一次强沙尘暴天气进行了分析。结果表明:这次雷暴大风沙尘天气是对流层低层冷平流作用下,不稳定能量释放形成的 β 、 γ 中尺度对流系统造成的,雷暴下击暴流的辐散流和密度流是引发地面强风和沙尘暴的直接因素。高层干、中层相对湿和低层干的层结,易产生雷暴大风天气。1 h正变压和负变温演变能很好地反映雷暴下击暴流形成的雷暴高压和冷池的强弱变化,同时也反映了下击暴流的辐散气流和冷池密度流造成的地面大风及沙尘天气的变化。

关键词:河西走廊;雷暴;下击暴流;沙尘暴

文章编号:1006-7639(2014)-06-0954-08 **doi:**10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-06-0954

中图分类号:P445.4

文献标识码:A

引言

沙尘暴天气是危害极其严重的天气现象之一,对大气环境影响较大,受到社会广泛关注。引发沙尘暴的天气系统有大尺度锋面系统,也有中小尺度强对流系统。我国学者近10 a来对大尺度锋面系统引发的沙尘暴成因和机理做了大量研究。张强等^[1]在总结以往研究成果的基础上,探讨、解释、概括分析了特强沙尘暴天气的物理特征及其气候效应。王伏村^[2-3]、程鹏^[4]、汤绪^[5]等分别对甘肃河西走廊沙尘暴的动力、热力和螺旋度特征、以及与低空急流的关系作了较为细致的分析研究。

除了大尺度锋面系统,中小尺度对流系统产生的雷暴大风也时常会引发沙尘暴天气,雷暴大风引发的沙尘暴天气春、夏季均有发生,由于突发性强,给预报预警带来难度。韩经纬等^[6]对2005年4月1日发生在内蒙古中部的一次飑线伴有强沙尘暴天气过程进行了监测和分析,发现沙尘暴发生区与天气雷达回波的逆风区对应。岳平等^[7]根据对流体在热低压条件下激发强沙尘暴的机理,并应用

Rennó和Ingersoll的热机自然对流理论,对2004年7月12日强对流引发的沙尘暴内部动力热力结构进行了探讨。以前由于观测手段的限制,缺乏高时空分辨率的观测数据,对此类沙尘暴的形成机制分析有限,认识不够全面。本文借鉴近几年一些雷暴大风的研究方法^[8-10],使用探空、地面和多普勒天气雷达高时空分辨率观测数据对甘肃河西走廊2013年7月30日雷暴大风引发的一次强沙尘暴天气的形成机制做进一步研究,重点分析大风沙尘暴天气发生的天气尺度环境条件、中尺度对流系统的天气雷达特征以及1 h正变压和负变温与雷暴高压和冷池强度、大风沙尘暴强度的关系,以期为此类沙尘暴天气潜势预报和短临预警提供参考。

1 天气实况

2013年7月30日15~21时,甘肃河西的张掖和武威市出现了雷电、大风和区域性沙尘暴天气,高台、临泽、张掖、山丹、永昌出现沙尘暴,武威、民勤出现扬沙,其中临泽最低能见度400 m,达到强沙尘暴,张掖极大风速24.6 m/s(3个乡镇自动站极大风

收稿日期:2014-04-03;改回日期:2014-05-07

基金项目:甘肃省自然科学研究基金计划项目(1208RJZA)、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2012M52;CMATG2009MS38)及甘肃省气象局科研项目(2013-10;2014-17;2014-02)共同资助

作者简介:王伏村(1969-),男,高级工程师,甘肃临泽县人,主要从事天气预报业务及灾害性天气机理研究. E-mail:wangfucun3@aliyun.com

速超过30 m/s),武威极大风速达到26.5 m/s(3个乡镇自动站极大风速超过30 m/s)。此次沙尘暴天气是近5 a来河西走廊夏季最强的大风沙尘暴天气,来势迅猛,侵袭范围广,影响较大。此次大风沙尘暴天气致使河西走廊中东部农业设施及农作物严重受损,直接经济损失达5 000万元以上,且2人因烟囱倒坍砸伤致死。

2 天气系统演变

2.1 高空天气系统

30日08时500 hPa上(图1a),欧亚中高纬度为2槽1脊型,里海和贝加尔湖为槽区,蒙古为冷涡,巴尔喀什湖高压脊发展,脊前为强西北风气流,风带中心风速为24 m/s,风带东北侧为蒙古冷涡(受东移蒙古冷涡底部冷空气影响,29日下午至夜间甘肃河西走廊出现了阵雨或雷阵雨天气),河西走廊至蒙古一带为显著的负变高区(图1d),低涡主体活动位置偏北偏东,新疆及河西走廊处在脊前西

北气流带中,等高线与等温线基本平行,斜压性较弱。20时系统整体略东移,形势变化不大。

30日08时700 hPa上(图1b),高度场系统与500 hPa的相似,新疆及河西走廊处在脊前西北气流带中,风带中心风速为20 m/s。不同的是等高线与等温线有明显的交角,温度槽在新疆东部,温度脊在河套地区(图1d),河西处在700~500 hPa温度 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 不稳定带中,新疆北部到河西西部有冷平流活动,大气具有明显的斜压性。20时(图1c),700 hPa锋区前沿已到达河西走廊中东部。

30日08时850 hPa上(图略),高度场系统配置为鞍型场,新疆北部和四川为高压,蒙古和南疆为低压,河西走廊处在鞍型场中部,有利于温度场锋生。温度场上,南疆和河西走廊为温度脊,北疆为温度槽,冷暖对比较700 hPa的更强。20时,850 hPa锋区前沿到达河西走廊中部,河西走廊东部仍为暖脊控制,说明700 hPa锋区移动快于850 hPa,有利于对流层低层对流不稳定发展。

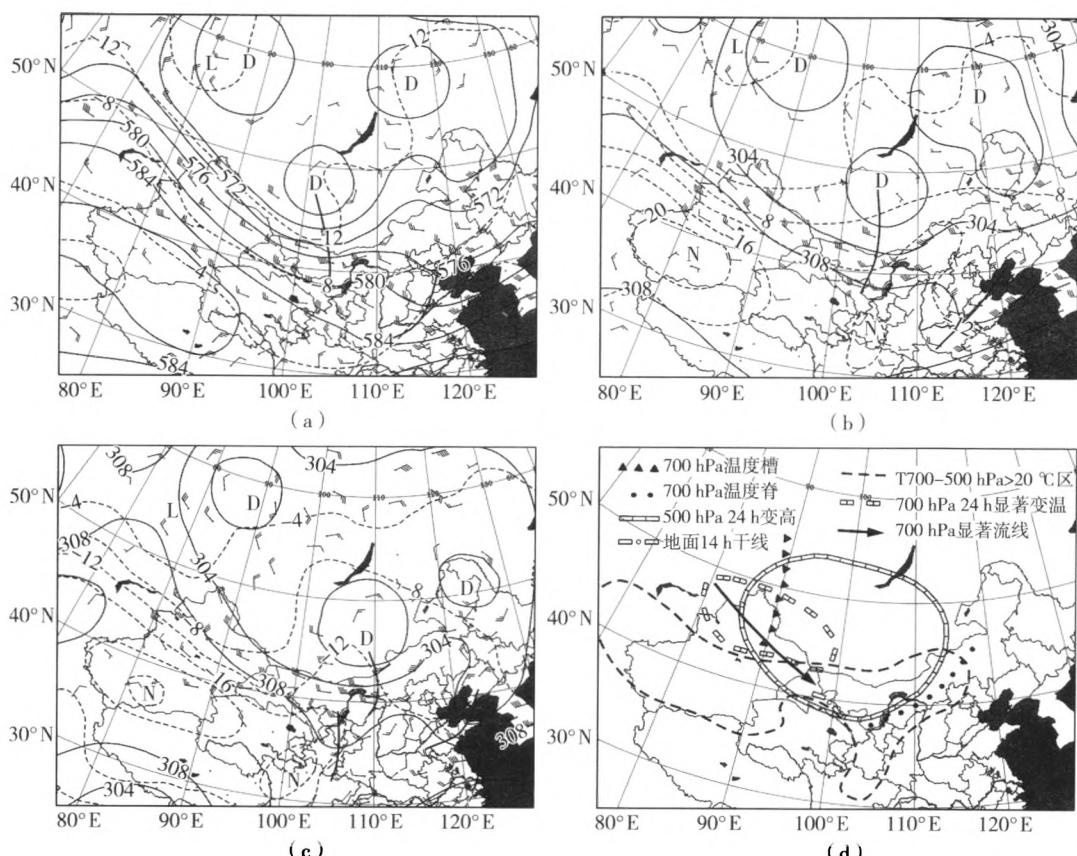


图1 2013年7月30日08时(a, b)和20时(c)500 hPa (a)、700 hPa (b, c)

天气图和08时强天气综合分析图(d)

(实线为高度场,单位:dagpm;虚线为温度场,单位:°C)

Fig. 1 The synoptic charts on 500 hPa (a) and 700 hPa (b, c) at 08:00 (a, b) and 20:00 (c),

comprehensive analysis of severe weather at 08:00 (d) on 30 July 2013

(the solid lines for geopotential height, Unit: dagpm; the dotted lines for temperature, Unit: °C)

2.2 地面天气系统

30 日 14 时地面图上(图略),弱冷锋在玉门和酒泉之间,锋后为小阵雨天气,敦煌 3 h 变压为 +1.3 hPa,酒泉和张掖有干线存在(图 1d);在地面冷锋和干线的作用下,午后雷暴得到快速发展,17 时冷锋在张掖和山丹之间(图 2a),张掖 3 h 变压猛增到 +4.5 hPa,锋后出现雷暴高压及雷阵雨、大风、沙尘暴天气,极大风速 24.6 m/s,最小能见度 400 m。雷暴大风经过张掖站时(图 2c),1 h 内气压急增 5.8 hPa,气温骤降 11.1 ℃,相对湿度增加 37%,2 min 平均风速增大 8 m/s。从逐分钟数据演变来看(图 2d),阵风锋过境时气象要素变化更细微,气压先缓慢上升,大风来临前 3 min,即 16:26 开始气压以 0.2~0.4 hPa/min 的增幅快速上升,16:29~16:30 平均风速在 2 min 内增加到 17.0 m/s 以上,16:30 出

现雷暴、大风和沙尘暴天气,16:30~16:35 气温以平均 0.5 ℃/min 的降幅快速下降,相对湿度在 4 min 内迅速下降 5% 后又快速回升,16:33 出现阵雨天气。20 时冷锋到达武威和民勤一线,永昌 3 h 变压达到 +6.1 hPa,风力仍然很大,武威极大风速达到 26.5 m/s,为扬沙天气,沙尘有所减弱。21 时以后雷暴高压显著减弱,大风、沙尘暴天气消失。30 日 08 时至 31 日 08 时张掖至武威各站降水量在 0~4.0 mm。

以上分析表明,对流层中高层蒙古冷涡底部冷空气快速过境后,使得河西中高层降温、降压,而对流层低层较暖,垂直温度直减率加大,不稳定性增强,在对流层低层冷平流作用下,不稳定能量释放形成的 β 、 γ 中尺度对流系统造成此次雷暴大风沙尘天气。

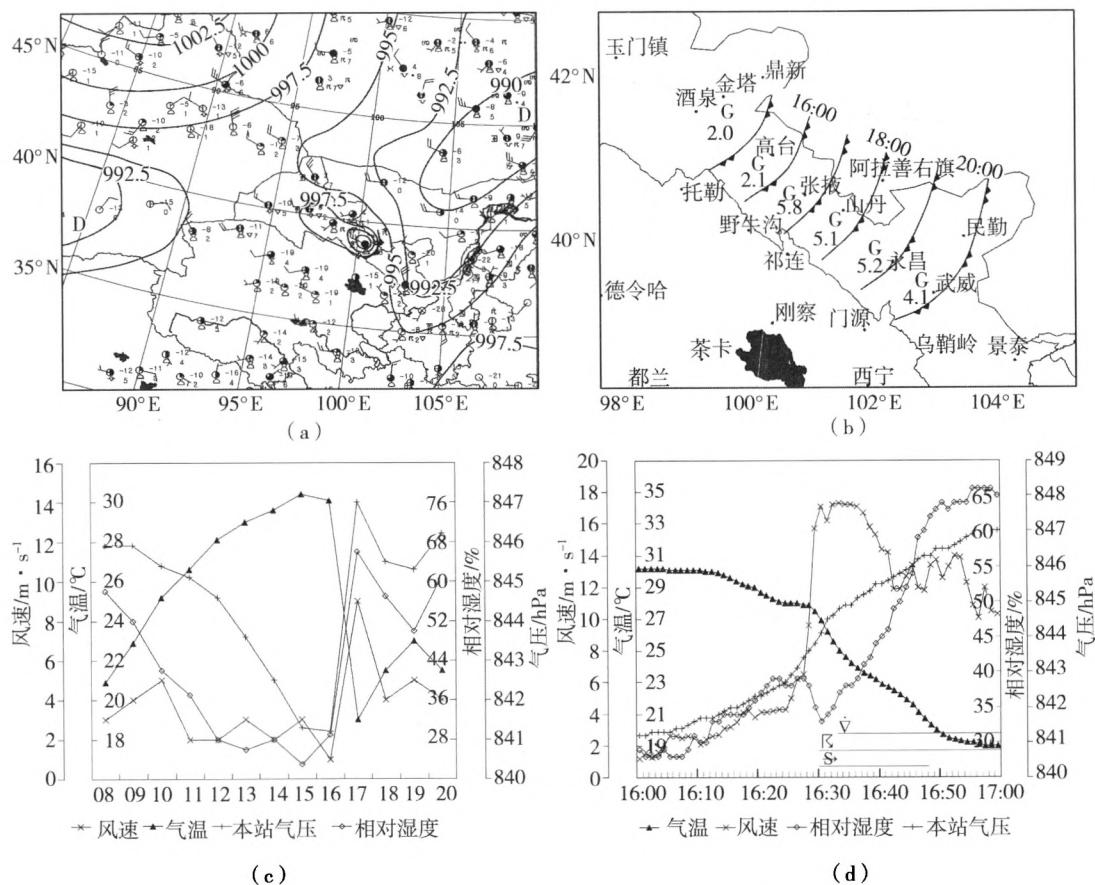


图 2 2013 年 7 月 30 日 17 时地面图(a)和 15~20 时逐时变压最大值和阵风锋(b)及张掖站 08~20 时逐时(c)和 16~17 时逐分钟(d)气压、气温、相对湿度和 2 min 平均风速变化

Fig. 2 The surface weather chart at 17:00 (a), hourly maximum variable pressure and the position of gust front from 15:00 to 20:00 (b) and hourly changes from 08:00 to 20:00 (c) and minutely evolutions from 16:00 to 17:00 (d) of pressure, temperature, humidity and wind speed in Zhangye on 30 July 2013

3 热力、动力演变特征

3.1 探空廓线演变

张掖和民勤 2013 年 7 月 30 日 08、20 时的探空廓线显示,08 时(图 3a),张掖 550 hPa 以上为干层,中层 600~550 hPa 是相对浅薄的湿层,600 hPa 到地面是喇叭口向下的次干层,露点温度和温度层结曲线呈“ \times ”型,这种高层干、中层相对湿的层结,易积聚不稳定能量和产生雷暴天气,而边界层的干层加快了下沉气流中蒸发冷却作用,负浮力加大,有利

于下击暴流的形成。张掖站中层湿层较薄,水汽含量少,易形成干下击暴流,有利于沙尘暴产生。20 时张掖(图 3b),雷阵雨过后,整层湿度增大,不利于沙尘的扬起和输送,能见度很好。08 时民勤(图 3c),300 hPa 以上为干层,中层 600~300 hPa 是相对湿层,且湿层较厚,边界层是喇叭口向下的次干层。深厚的湿层中水汽及雨滴含量高,形成的下击暴流相对较湿,这也是雷暴到达武威、民勤后,不易起沙尘的可能原因。

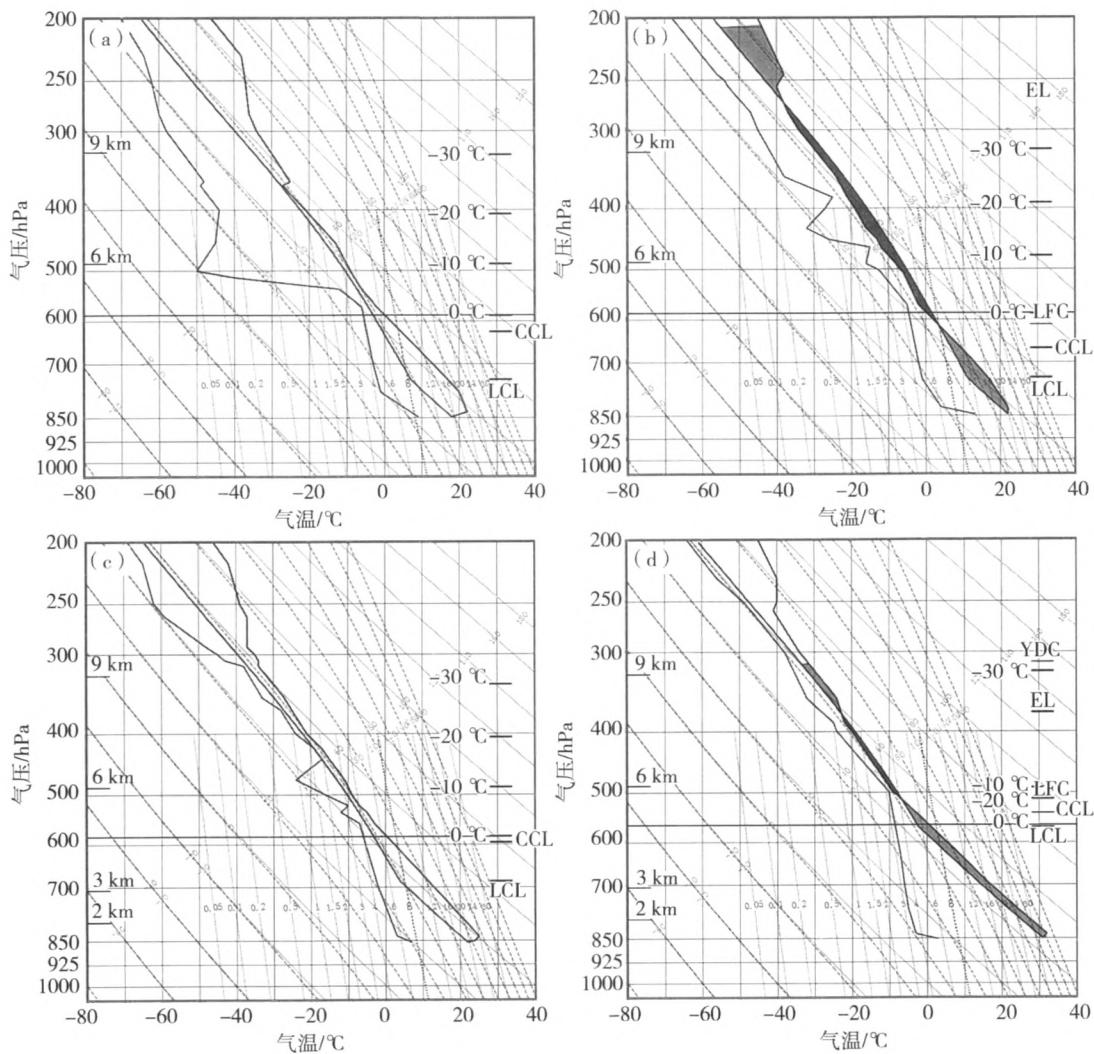


图 3 2013 年 7 月 30 日 08 时(a,c)和 20 时(b,d)张掖(a,b)及民勤(c,d)T-LnP 图

Fig. 3 The T - $\ln P$ diagram at Zhangye (a, b) and Minqin (c, d) stations
at 08:00 (a, c) and 20:00 (b, d) on 30 July 2013

3.2 地面 1 h 变压演变

在高原及其周边复杂地形下,海平面气压场订正误差大,通常使用 3 h 正变压来表示冷高压的强弱。然而,像雷暴高压这样时空尺度较小的系统,3 h 内与外界已发生较多的质量和能量交换,3 h 变压

已无法准确地反映雷暴高压的强度,而 1 h 内雷暴冷池与外界质量和能量交换相对较少,能更好地反映雷暴高压的强度变化。15 时(图 4a),金塔站 1 h 变压为 +2.0 hPa,雷暴高压前方最大变压梯度为 3.3 hPa/100 km,酒泉出现雷电和极大风速为 18.3 m/

s的大风,说明有弱对流活动和下沉气流造成的雷暴高压形成。高台站以东为1 h负变压,说明处在暖低压中。17时(图4b),1 h正变压区东移到张掖,张掖站1 h变压骤增到+5.8 hPa,雷暴高压前方最大变压梯度为10.0 hPa/100 km,说明有强雷暴高压活动,过去90 min内,从高台到张掖出现雷暴、大风和沙尘暴天气,张掖极大风速24.6 m/s,临泽最小能见度400 m。20时(图4c),1 h正变压区东移到走廊中东部,武威1 h变压为+4.1 hPa,雷暴高压前方最大变压梯度为5.6 hPa/100 km,虽有些减弱,但强度仍然很强,过去3 h内,从山丹到武威出现雷暴、大风和沙尘天气,山丹、永昌出现沙尘暴,武威和民勤出现扬沙,武威站在19:50极大风速达26.5

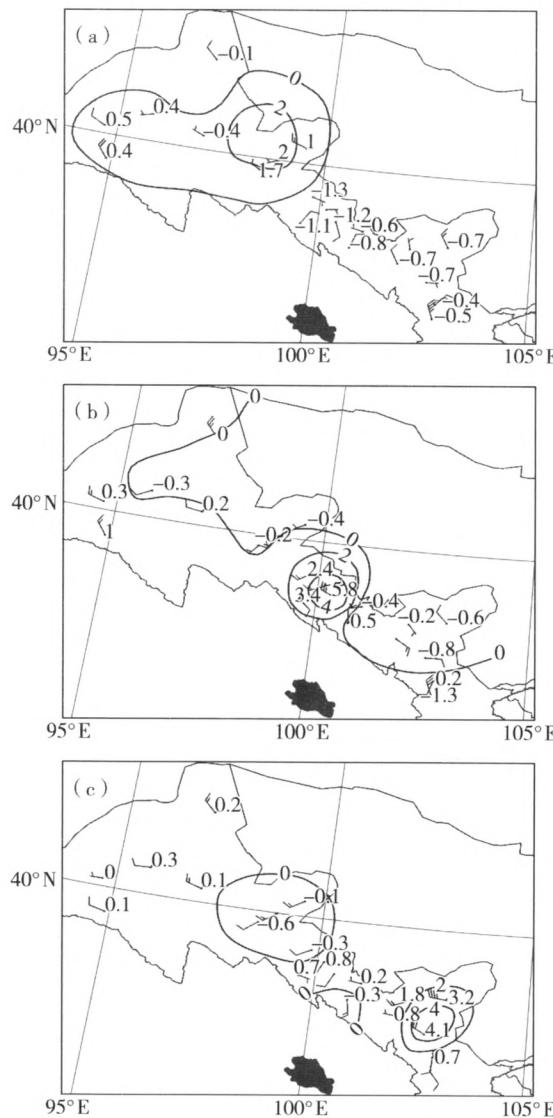


图4 2013年7月30日15(a)、
17(b)、20时(c)1 h变压

Fig. 4 The 1 h variable pressure at 15:00 (a), 17:00 (b) and 20:00 (c) on 30 July 2013

m/s 。23时(图略), 1 h 变压显著减弱,说明强雷暴高压明显减弱,雷暴、大风和沙尘天气消失。可见, 1 h 正变压演变能很好地反映对流及下击暴流形成的雷暴高压的强弱变化,同时也反映了下击暴流辐散气流造成的地面大风及沙尘天气变化。

3.3 地面 1 h 变温演变

雷暴冷池的水平尺度、厚度和强度直接影响着地面灾害性大风的强度。就雷暴的时间尺度来说,1 h 内雷暴冷池温度受外界影响较小,使用地面 1 h 变温可近似反映雷暴冷池的尺度和强弱变化。15 时(图 5a),酒泉站周边出现 1 h 负变温区,说明有弱冷空气活动(15 时晴天日变化应为正变温),酒泉站负变温达 -6.5°C ,走廊其它区域为正变温,雷暴

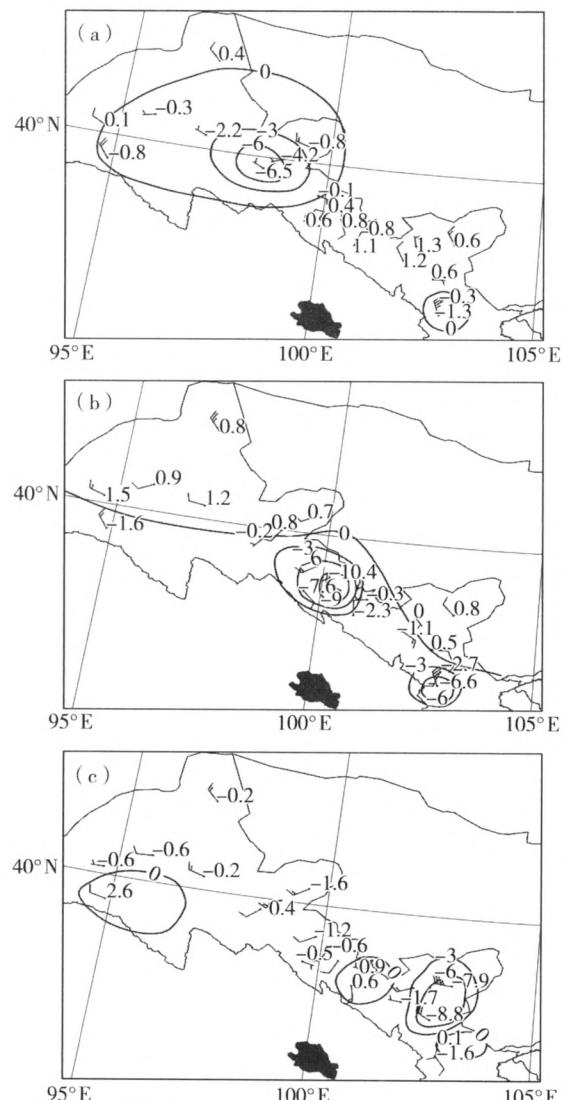


图 5 2013 年 7 月 30 日 15(a)、
17(b)、20 时(c)1 h 变温

Fig. 5 The 1 h variable temperature at 15:00 (a), 17:00 (b) and 20:00 (c) on 30 July 2013

高压前方最大变温梯度为 $5.2^{\circ}\text{C}/100\text{ km}$ 。17时(图5b),负变温区东移到走廊中部,张掖1 h负变温骤降至 -11.1°C ,雷暴高压前方最大变温梯度增大到 $19.1^{\circ}\text{C}/100\text{ km}$,说明雷暴冷池显著增强。20时(图5c),1 h负变温区东移到走廊中东部,武威1 h负变温为 -8.8°C ,雷暴高压前方最大变温梯度为 $16.0^{\circ}\text{C}/100\text{ km}$,雷暴冷池强度略有减弱,但仍然很强。23时(图略),受气温日变化影响,大部分地方为负变温。可见,1 h负变温演变与1 h正变压演变相似,均能较好地反映雷暴冷池的尺度和强弱变化,同时也反映了雷暴冷池密度流对地面大风及沙尘天气变化作用。

4 中尺度雷暴演变特征

15:32 张掖多普勒雷达 1.5° 仰角反射率因子显

示(图6a),在高台西北侧云带中有2块相对强的对流云A、B,A云块强度44 dBZ,水平尺度约10 km,B云块强度40 dBZ,水平尺度约20 km。对应的径向速度图上(图6e),对流云前沿有70 km长的18 m/s向着雷达的风速带;15:49(图6b),A云块强度增强为46 dBZ,水平尺度约20 km,B云块增强为44 dBZ,水平尺度约30 km,继续向高台移近,A、B之间的云块开始变薄断裂。对应的径向速度图上(图6f),高台出现20 m/s以上的向着雷达的风速区,此时地面出现大风沙尘暴天气;16:00(图6c),A云块强度继续增强至53 dBZ,B云块增强为47 dBZ,2云块继续向东北移,并在B云块的东南侧新生成了C云块,强度为52 dBZ,水平尺度约5 km,同时A、B云块基本上分裂成2个独立的云块。对应的径向速度图上(图6g),在B雷暴移动的前方高台附近出现

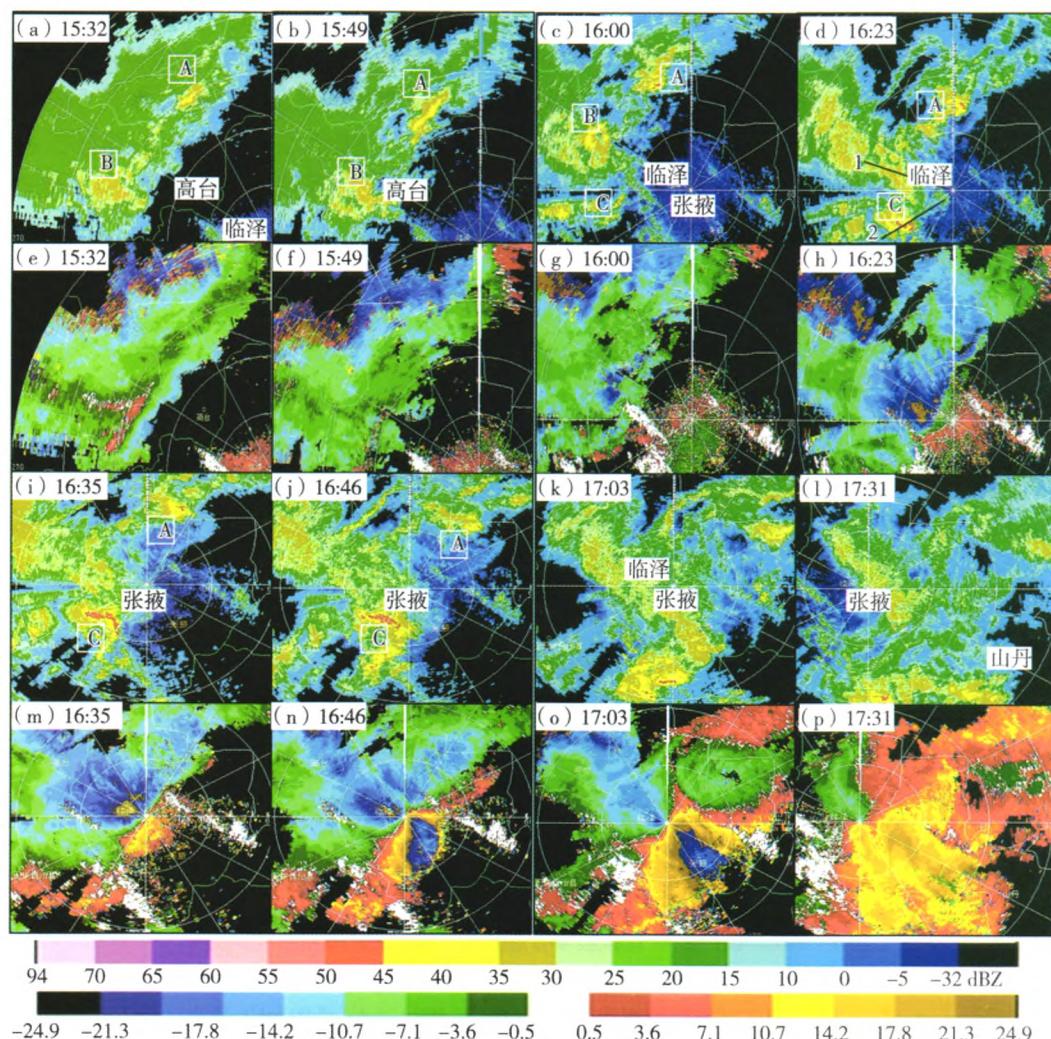


图6 2013年7月30日张掖多普勒雷达 1.5° 仰角反射率因子(单位: dBZ)和径向速度图(单位: m/s)
(a ~ d, i ~ l 为反射率因子; e ~ h, m ~ p 为径向速度)

Fig. 6 The reflectivity (Unit: dBZ) and radial velocity (Unit: m/s)
at 1.5° elevation of radar in Zhangye on 30 July 2013

(a ~ d and i ~ l represent the reflectivity, e ~ h and m ~ p represent the radial velocity)

了小范围的速度模糊,径向速度超过 25 m/s;16:23(图 6d),A 云块强度继续增强为 57 dBZ,B 云块的强度开始减弱为 42 dBZ,2 云块继续向东北移,C 云块增强为 55 dBZ,水平尺度约 20 km,并向张掖、临泽移动。对应的径向速度图上(图 6h),在 B 雷暴移动的前方出现扇形的西北向大风区,临泽附近出现大面积的速度模糊,径向速度估计超过 30 m/s,此时临泽出现大风和强沙尘暴天气。同时从 B 雷暴剖面图(图 7b 和 7d)可以看出,>40 dBZ 回波基本在 4 km 以下,下沉气流占主导地位,>30 m/s 风速核在 2 km 以下,上升气流被切断抬升到中高层,说明此时雷暴已处于消弱阶段。从 C 雷暴剖面图(图 7c 和 7e)可以看出,>45 dBZ 回波高度超过 8 km,上升气流和下沉气流有组织的成对出现,说明雷暴处于强盛阶段(据灾情调查显示,当地出现冰雹天气);16:35(图 6i),A、B 云块强度同时减弱,分别为 51、41 dBZ,而 C 云块继续增强为 57 dBZ,水平尺度约 50 km,并向张掖移动。对应的径向速度图上(图 6m),张掖附近出现大面积速度模糊,估测径向速度超过 30 m/s,此时张掖出现大风和沙尘暴天气;16:46(图 6j),A 云块强度继续减弱为 43 dBZ,B 云块

减弱分散成絮状,C 云块也开始减弱为 51 dBZ,继续东移;17:03(图 6k),A 云块强度维持为 46 dBZ,C 云块北段减弱为 42 dBZ,南段新生一强度为 54 dBZ 的雷暴;17:31(图 6l),A、C 云块减弱消散,在山丹南侧生成强度为 43 dBZ 的新雷暴。对应的径向速度图上(图 6p),山丹西北侧为 24 m/s 以上的径向速度区,此时山丹出现大风沙尘暴天气。

雷暴大风到达雷达站前 1~2 h 的风廓线(图略)显示,地面(海拔高度 1.5 km)到 2.5 km(海拔高度 4 km)的平均垂直风切变为 4.8 m/s,属中等强度风切变。从张掖附近的 VAD 风廓线(图 7a)可以看出,下击暴流从 900 m 下降到 600 m 时的平均风速迅速增大到 20 m/s,风速变化 8 m/s。根据王秀明等^[8]的研究,把 2 km 以下的这种速度增幅可归结为下击暴流的辐散气流和密度流的作用,然后经 1 个体扫时间到达地面。

综上所述,雷暴大风、沙尘暴天气的影响系统是 β 、 γ 中尺度对流系统,雷暴在由强盛转为消亡阶段时,雷暴下击暴流在近地面层的辐散流和密度流作用下,使地面层风速爆发性增大,引发地面强风和沙尘暴天气。

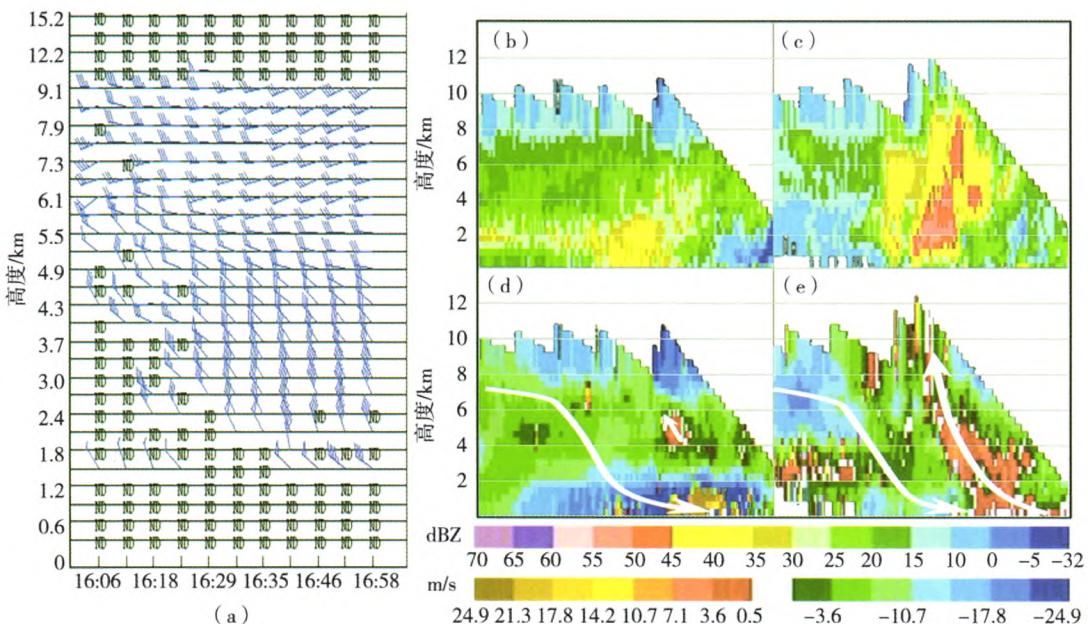


图 7 2013 年 7 月 30 日张掖多普勒雷达 VAD 风廓线和回波剖面

(a) 风廓线,(b) 沿图 6d 1 号线反射率因子剖面(单位: dBZ),
(c) 沿图 6d 2 号线反射率因子剖面(单位: dBZ),(d) 沿图 6d 1 号线
径向速度剖面(单位: m/s),(e) 沿图 6d 2 号线径向速度剖面(单位: m/s)

Fig. 7 The VAD wind profile and cross section of echoes of radar in Zhangye on 30 July 2013
(a) the wind profile, (b) the reflectivity section along 1 line segment of figure 6d (Unit: dBZ),
(c) the reflectivity section along 2 line segment of figure 6d (Unit: dBZ), (d) the radial velocity section along
1 line segment of figure 6d (Unit: m/s), (e) the radial velocity section along 2 line segment of figure 6d (Unit: m/s)

5 小 结

(1)这次雷暴大风沙尘天气是对流层低层冷平流作用下,不稳定能量释放形成的 β 、 γ 中尺度对流系统造成的,雷暴下击暴流的辐散流和密度流是引发地面强风和沙尘暴的直接因素。

(2)高层干、中层相对湿的层结,易积聚不稳定能量和产生雷暴天气,而边界层的干层有利于下击暴流的形成。

(3)1 h 正变压演变能很好地反映对流及下击暴流形成的雷暴高压的强弱变化,同时也反映了下击暴流辐散气流造成的地面大风的强弱变化。

(4)1 h 负变温演变能较好地反映雷暴冷池的尺度和强弱变化,同时也反映了雷暴密度流对地面大风强弱的影响。

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] 王伏村,邵亮,郭良才,等.河西走廊一次强沙尘暴过程的干侵入分析[J].干旱气象,2008,26(2):30-34.
- [3] 王伏村,许东蓓,王宝鉴,等.河西走廊一次特强沙尘暴的热力动力特征分析[J].气象,2012,38(8):950-959.
- [4] 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.
- [5] 汤绪,俞亚勋,李耀辉,等.甘肃河西走廊春季强沙尘暴与低空急流[J].高原气象,2004,23(6):840-846.
- [6] 韩经纬,孟雪峰,宋桂英.一次伴随强沙尘暴天气飑线的多普勒雷达回波特征[J].气象,2006,32(10):57-63.
- [7] 岳平,牛生杰,张强,等.夏季强沙尘暴内部热力动力特征的个例研究[J].中国沙漠,2008,28(3):509-513.
- [8] 王秀明,俞小鼎,周小刚,等.“6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J].高原气象,2012,31(2):504-514.
- [9] 梁建宇,孙建华.2009年6月一次飑线过程灾害性大风的形成机制[J].大气科学,2012,36(2):316-336.
- [10] 陈明轩,王迎春.低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J].气象学报,2012,70(3):371-386.

Analysis on Mesoscale System of a Strong Dust – storm Triggered by Thunderstorm

WANG Fucun¹, FU Shuangxi², ZHANG Deyu¹, ZHANG Haowen¹, DAI Debing¹, LIU Yujie¹

(1. Zhangye Meteorological Bureau of Gansu Province, Zhangye 734000, China;
2. Gansu Province Artificial Modification Office, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the sounding data, observation data from automatics weather station and the radar data in Zhangye of Gansu Province, the forming mechanism of a strong sandstorm occurred in Hexi Corridor on 30 July 2013 was analyzed. The results showed that the thunderstorm and dust storm weather was caused by the mesoscale β or γ convective system which triggered by instable energy from cold advection in the lower troposphere, and the divergence flow and density flow of downburst were the direct factors producing strong wind and dust storm. The stratification with dry upper level, wet middle troposphere and dry boundary layer was easy to produce thunderstorm weather. The 1 hour positive variable pressure and negative variable temperature could well reflect the intensity of thunderstorm high pressure and cold pool. And also the variation of strong wind and dust storm caused by the divergence flow of downburst and density flow of cold pool.

Key words: Hexi Corridor; thunderstorm; downburst; dust storm