

文章编号:1000-694X(2008)01-0170-08

# 一次秋季沙尘暴的诊断和天气雷达观测分析

王伏村<sup>1,2</sup>, 付有智<sup>2</sup>, 李 红<sup>2</sup>

(1. 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, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省张掖市气象局, 甘肃 张掖 734000)

**摘 要:** 使用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  每天 4 次的再分析资料对 2006 年 10 月 5 日发生在甘肃、内蒙古西部、蒙古国南部沙尘暴天气的位势涡度、干侵入、局地垂直螺旋度进行了诊断分析。分析结果表明: 对流层高层的高位势涡度库位势涡度柱向下、向南伸展, 在等熵面陡立处, 垂直涡度分量急剧增大, 使锋面低压迅速发展, 低空急流形成; 高空干冷空气向东南下侵, 蒙古国南部从西到东的大风、沙尘暴由下滑冷锋引起, 持续时间长, 强度强; 河西走廊、内蒙古西部的大风、沙尘暴由上滑冷锋引起, 持续时间短, 强度相对弱。利用张掖 CINRAD-CC 天气雷达观测数据对导致张掖沙尘暴的  $\beta$  中尺度双阵风锋结构进行了初步分析, 认为第二条阵风锋使风速忽然加大, 阵风锋的辐合上升使沙尘扬起抬升, 能见度迅速下降。

**关键词:** 沙尘暴; 位势涡度; 干侵入; 阵风锋

**中图分类号:** P445.4

**文献标识码:** A

大风、沙尘暴天气是西北危害严重的天气现象, 由于其对工农业、交通、环境、人民生活危害极大, 因而受到社会广泛关注。我国学者从 20 世纪 70 年代开始, 对沙尘暴的成因和机理研究成果颇丰, 徐国昌等<sup>[1]</sup>对 1977 年 4 月 22 日发生在张掖地区的黑风过程中的热力因子作了研究, 并提出了黑风预报的着眼点。王式功等<sup>[2-5]</sup>对西北地区先后发生的强沙尘暴成因做了分析。张平等<sup>[6]</sup>统计了 2002 年中国沙尘暴天气与物理量场的关系, 指出风是扬沙和沙尘暴天气的先决条件。汤绪等<sup>[7]</sup>对甘肃河西走廊春季沙尘暴与低空急流的关系作了研究, 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。尚可政等<sup>[8]</sup>对甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中东太平洋海温之间的遥相关做了分析, 指出春、夏季河西走廊沙尘暴发生次数与前二年赤道中、东太平洋海温的负相关最好。张强等<sup>[9]</sup>, 从物理上系统解释了特强沙尘暴天气的沙尘壁特征。丁荣等<sup>[10]</sup>对甘肃河西走廊中部近 45 a 来大风沙尘暴气候背景进行了分析, 给出了大风沙尘暴天气的时空分布及形成原因。李艳春等<sup>[11]</sup>总结了宁夏沙尘暴发生机制。尹晓惠等<sup>[12]</sup>研究了我国北方沙尘暴与强沙尘暴过程的分型特征。屠妮妮等<sup>[13]</sup>研究了温度平流在引发强沙尘暴的蒙古气旋中的作用。

近年来, 对沙尘暴天气的数值模拟和诊断分析成果也层出不穷, 王建鹏等<sup>[14]</sup>模拟了河西走廊地形对沙尘暴天气系统的影响。王劲松等<sup>[15-16]</sup>使用模式输出量对位涡的水平分布和垂直螺旋度在强沙尘暴发生、发展中的作用进行了诊断分析。赵琳娜等<sup>[17]</sup>对高层位涡下传使中低层气旋快速发展在强沙尘暴中的作用进行了诊断分析。笔者使用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$  每天 4 次的再分析资料对 2006 年 10 月 5 日发生在甘肃、内蒙古西部、蒙古国南部的大风沙尘暴天气的位势涡度、干侵入进行了诊断分析, 探讨其在这次沙尘暴中的作用, 并利用张掖 CINRAD-CC 天气雷达观测数据对导致这次张掖沙尘暴的双阵风锋结构进行了初步分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

数据来源于 2006 年 10 月 5—6 日 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$  每天 4 次的再分析资料; Micaps 天气填图地面、高空资料; 张掖 CINRAD-CC 反射率因子、经向速度数据; 张掖地面自动站观测数据。

### 1.2 方法

位涡是绝对涡度矢量与位温梯度矢量的点积,

收稿日期: 2007-04-29; 改回日期: 2007-08-03

基金项目: 中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象科学研究基金项目(IAM200713); 国家自然科学基金项目(40475011); 兰州中心气象台创新基金共同资助

作者简介: 王伏村(1969—), 男, 甘肃临泽县人, 工程师, 主要从事天气预报及多普勒雷达应用研究。E-mail: wangfucun3@yahoo.com.cn

因而是一个既包含热力因子又包含动力因子的物理量。在等压坐标系中,由 Ertel 位涡,引进静力平衡,并假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多<sup>[18]</sup>,则位涡表达式为:

$$PV = PV_1 + PV_2$$

$$= -g(f - \zeta) \frac{\partial \theta}{\partial p} - g \left( \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$$

式中: $\zeta$ 为相对涡度; $f$ 为科氏参数; $\theta$ 为位温。 $PV_1$ 表示惯性稳定性( $f + \zeta$ )和对流稳定性( $-g \frac{\partial \theta}{\partial p}$ )的作用; $PV_2$ 表示斜压性( $\nabla_p \theta$ )和水平风垂直切变( $\frac{\partial \vec{V}}{\partial p}$ )的贡献。位涡的单位为 PVU。

## 2 位势涡度分析

位势涡度是表示气块热力和动力特征的物理量,它将动力和热力两种不稳定机制有机地结合在一起<sup>[19]</sup>。高位势涡度区对应气旋环流,低位势涡度区对应反气旋环流;对流层高层的高值位涡扰动向下伸展时,在对流层低层及地面的斜压区会激发出气旋<sup>[18]</sup>。吴国雄等<sup>[20]</sup>证明了倾斜涡度发展理论,指出大气的干湿斜压性及风垂直切变的增强可以导致系统气旋性垂直涡度的激烈发展,倾斜涡度的发展必伴有低空急流存在。王劲松等<sup>[15]</sup>的研究认为,沙尘暴发生在  $PV_2$  的负值中心,  $PV_2$  负值强度的增强和减弱与沙尘暴的爆发时间有很好的对应关系。

### 2.1 位势涡度与低空急流

从 10 月 5 日 20 时 700 hPa 位势涡度(PV)水平分布(图 1a)可以看出,50°N、96°E、45°N、92°E、41°N、95°E 有三个相对大值中心,中心值分别为 0.7 PVU、1.1 PVU、0.9 PVU。第一个中心和其偏东位置的大值区相连,对应 700 hPa 低槽区移速较快的北段(图略),地面对应蒙古低压,位势涡度大值区随高度向西北倾斜;后两个中心连成带状,对应 700 hPa 低槽区移速较慢的南段,地面对应蒙古低压向南伸展的低压带。从 20 时相对湿度和位势涡度沿 95°E 剖面(图 1e)可以看出,从 200 hPa、49°N 位势涡度大值区有位势涡度柱向下、向南伸展, +1 PVU 位势涡度柱在 550 hPa 以下分为两支:一支在 50°N 附近;一支在 45°N 附近,向下伸展到 650 hPa 以下,分别对应 700 hPa 上第一、第二个大值中心,可见低层位涡是有高层位涡下传所致。6 日 02 时(图 1b)第一个中心加强东南移至 49°N、103°E,中心值 1.0 PVU,地面对应蒙古低压加强南移,中心值为 997 hPa;第二、三个中心合并,中心位

置东南移至 44°N、95°E,中心值 1.1 PVU,前端 0.4 PVU 等值线东南伸展到 102°E 以东,41°N 以南。6 日 08 时(图略)第一个中心继续加强东移至 49°N、107°E,中心值增大至 3.0 PVU,蒙古国低压激烈发展,而南部河西走廊,内蒙古西部、宁夏上空位势涡度明显减小,并有负值区。对应地面大风、沙尘暴发生在位涡大值中心西侧正值区内,而不是位涡大值中心。

从 5 日 20 时位势涡度和相当位温沿地面冷高压中心点(86°E、53°N)和低压中心南侧点(105°E、45°N)的垂直剖面(图 1f)中看到相当位温等值线在对流层中下层非常陡立,在绝热无摩擦情况下,位势涡度守恒,按照倾斜涡度发展理论<sup>[20]</sup>,沿等熵面下滑的高位涡气块在等熵面陡立处,垂直涡度分量急剧增大,使锋面低压迅速发展,气压梯度风加大;相应 800 hPa 垂直涡度演变图上(图略),5 日 20 时至 6 日 02 时 6 h 涡度中心值从  $9 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$  增至  $20 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ 。从 10 月 5 日 20 时 300 hPa 位势涡度(PV)和全风速水平分布(图 1c)可以看出,位涡大值中心在 49°N、95°E,中心值 5.3 PVU, +1 PVU 等值线带向南伸展到 41°N 附近,与之相配的全风速  $\geq 30 m \cdot s^{-1}$  风速核带向南伸展到 40°N 以南,风速核带比位涡等值线带略偏东偏南,6 日 02 时在 42°N、101°E 出现全风速  $40 m \cdot s^{-1}$  大值中心(图略)。从 5 日 20 时位势涡度和全风速沿 93°E 剖面(图 1d)可以看出,20  $m \cdot s^{-1}$  的全风速等值线从高空急流区向下伸展到 650 hPa,对应位势涡度从对流层向下伸展到 700 hPa。700 hPa 位涡 0.4 ~ 1.0 PVU 的正值区与全风速  $\geq 12 m \cdot s^{-1}$  风速急流区有较好的对应(图略),对应地面大风、沙尘暴发生在低空西北或偏西风急流区,而西南风急流区对应地面大风较小。

从以上的分析可以看出,对流层低层低空急流形成的原因:一方面是由于对流层高层大动量冷空气下沉到低层和低层空气发生动量交换,使低层大气运动加速;另一方面是由于对流层高层高位涡冷空气沿等熵面下沉到低层,在等熵面陡立处,大气垂直涡度急剧增大,气旋性环流加强,气压梯度风加大所至。

### 2.2 位势涡度涡斜压项 $PV_2$ 与大风、沙尘暴的关系

位涡正压项  $PV_1$  的值比位涡斜压项  $PV_2$  的值大得多,  $PV_1$  水平分布与位涡 PV 的水平分布基本相似。

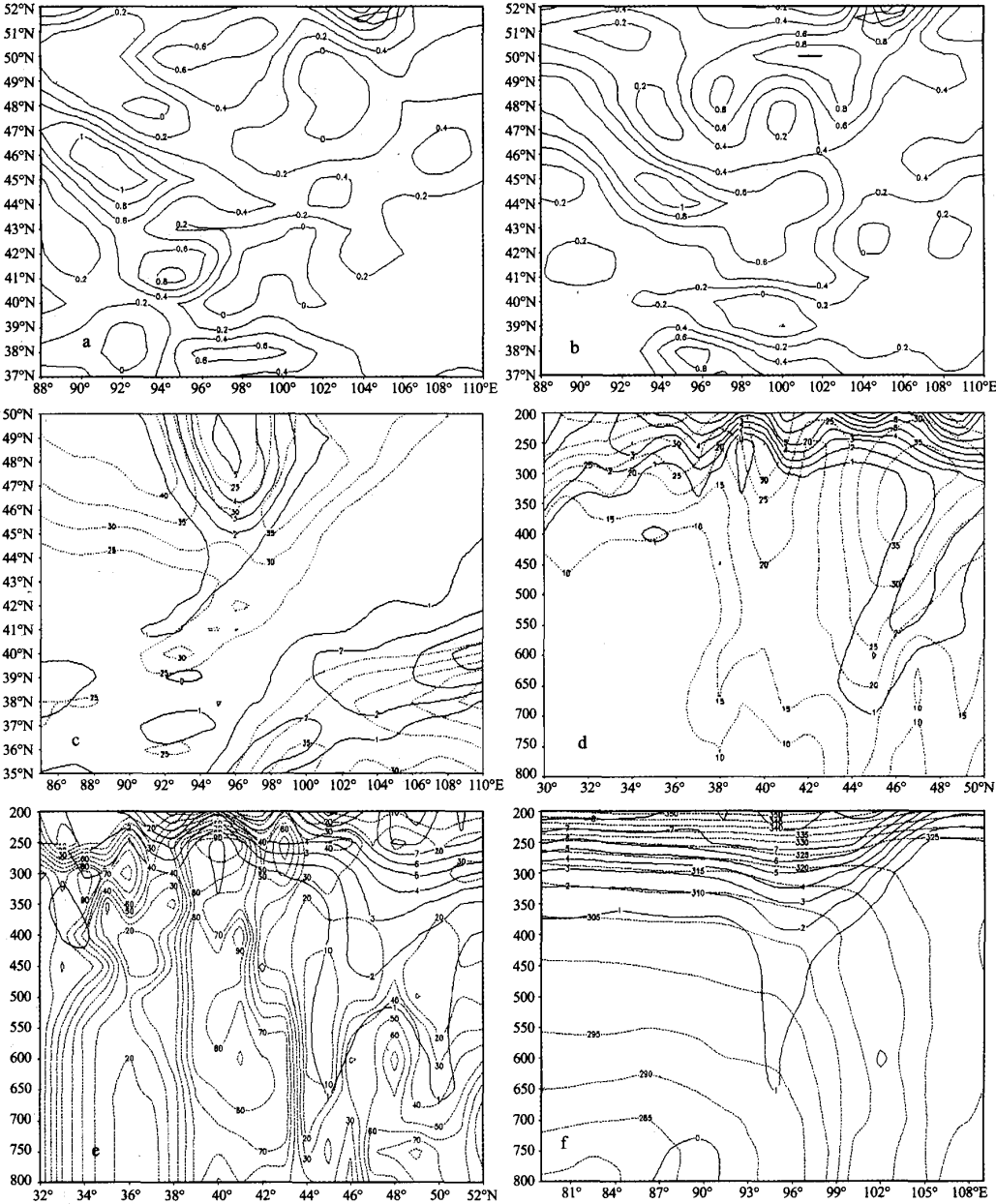


图 1 位势涡度、全风速和相对湿度的水平、垂直分布

a. 2006 年 10 月 5 日 20 时 700 hPa 位势涡度(单位:  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ )水平分布; b. 6 日 02 时 700 hPa 位势涡度水平分布; c. 5 日 20 时 300 hPa 位势涡度(实线)和全风速(虚线, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )水平分布; d. 5 日 20 时位势涡度(实线)和全风速(虚线)沿 93°E 剖面; e. 5 日 20 时相对湿度(虚线, 单位: %)和位势涡度(实线)沿 95°E 剖面; f. 5 日 20 时位势涡度(实线)和相当位温(虚线)沿地面图上点(86° E, 53° N)和点(105° E, 45° N)的垂直剖面

Fig. 1 The distribution of the potential vorticity, wind and relative humidity

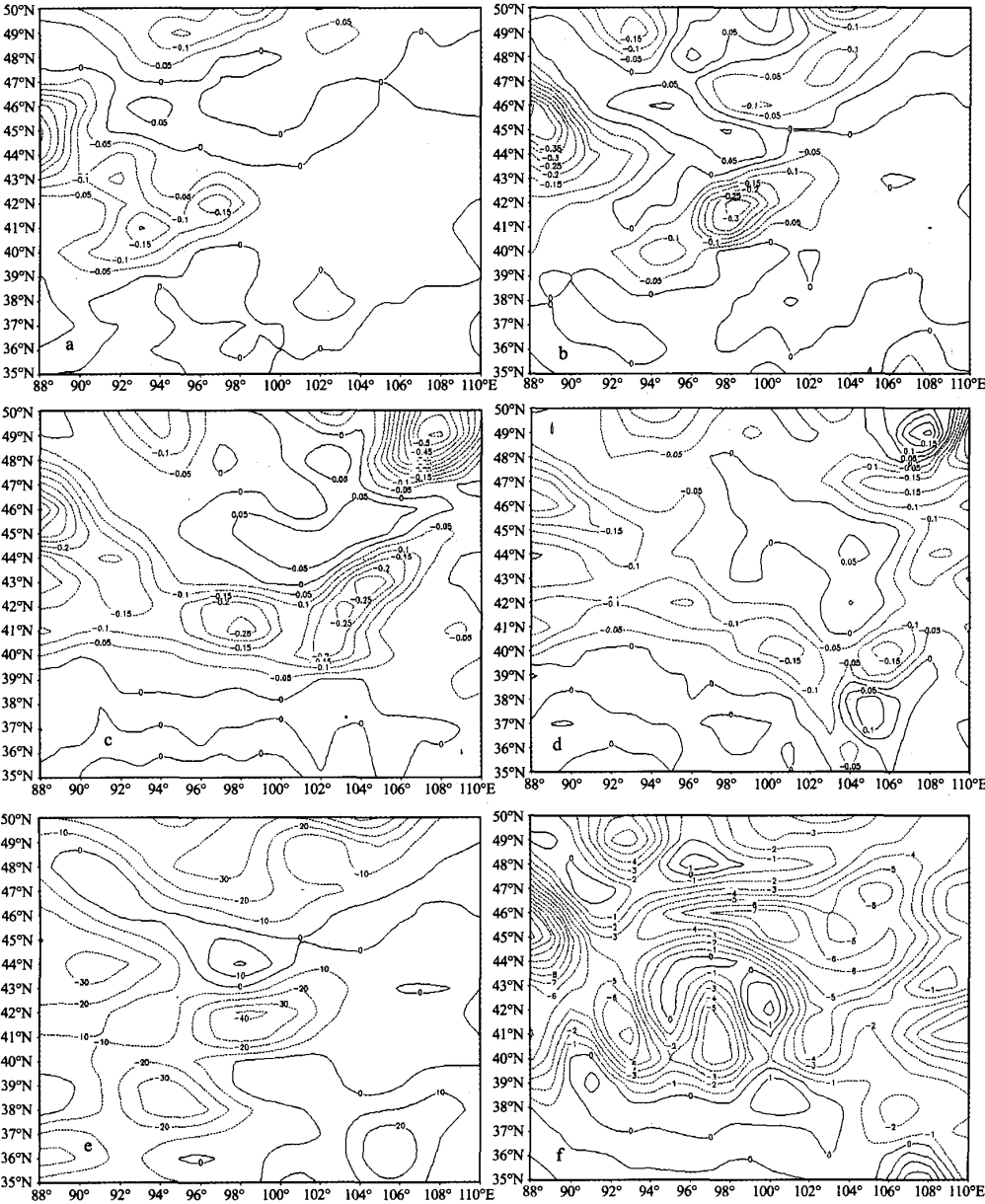


图 2 800 hPa 位涡斜压项  $PV_2$  的演变及位温梯度和垂直风切变特征

a. 2006 年 10 月 5 日 14 时 800 hPa 位涡斜压项  $PV_2$ (单位:  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 水平分布; b. 20 时; c. 6 日 02 时; d. 6 日 08 时;  
e. 5 日 20 时位温沿 Y 方向变化 (单位:  $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ ); f. 5 日 20 时 800 hPa 垂直风切变 (单位:  $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

Fig. 2 The 800 hPa baroclinic item of potential vorticity  $PV_2$  and the variety of the potential temperature and the vertical wind shear

从 10 月 5 日 14 时至 6 日 08 时 800 hPa 位涡斜压项  $PV_2$  水平分布(图 2a—d)可以看出,  $PV_2$  的负值区域比  $PV(800 \text{ hPa}$  图略)正值区偏南 2 个纬度, 前部偏东 3 个经度, 与地面蒙古低压中心对应的

负值中心从  $-0.15 \text{ PVU}$  减小到  $-0.55 \text{ PVU}$  并东移到  $110^\circ \text{ E}$  以东; 其南部的  $PV_2$  的负值区不断有负值中心向东南传播, 并发展成带状, 5 日 20 时最小负值中心值达  $-0.45 \text{ PVU}$ , 以后开始减小。通过 5

日 20 时 800 hPa  $\frac{\partial \theta}{\partial y}$  分析(图 2e)可以看出,  $\frac{\partial \theta}{\partial y}$  负值区中心与  $PV_2$  负值区中心对应,也就是说  $PV_2$  负值区中心斜压性很强;从 20 时 800 hPa  $\frac{\partial u}{\partial p}$  (即 850—750 hPa 垂直风切变)分析(图 2f)可以看出,  $\frac{\partial u}{\partial p}$  的负值区与  $PV_2$  负值区基本对应,位置偏南一个纬度,说明  $PV_2$  负值区垂直风切变较大,且风速随高度增大,800 hPa 以上有低空急流存在。与 3 h 地面图大风、沙尘暴发生区域对比分析,  $PV_2$  的负值区移过区域与 3 h 后大风、沙尘暴发生区域对应关系很好,负值区中心也是大风、沙尘暴强度中心。  $PV_2$  的负值强度的增强和减弱与大风、沙尘暴发生、发展、减弱对应关系很好,因此  $PV_2$  对大风、沙尘暴的落区、爆发时间有一定的预示作用。

3 干侵入分析

干侵入是指从对流层顶附近下沉至低层的干空气,它可以用相对湿度场或位涡场来表征<sup>[21]</sup>。干侵入具有高位势涡度和低湿两个特征<sup>[22]</sup>。Danielsen 在 20 世纪 60 年代曾绘制了干侵入气流的三维结构(图 3a1),揭示了干空气在三维等熵面上下沉的轨迹<sup>[23]</sup>。Browning 等研究表明,干侵入是来自对流层顶折叠区域的高  $PV$  气流,对温带气旋的发展起着有利的促进作用<sup>[24]</sup>。Browning 等研究表明,当暖输送带气流被卷入发展的温带气旋环流中并与高层干空气相互作用时,暖输送带的上游向北边界表现为上滑冷锋结构,暖输送带接近气旋中心的的下游被干侵入空气超过,产生下滑冷锋结构(图 3a2 下和上)<sup>[25]</sup>。

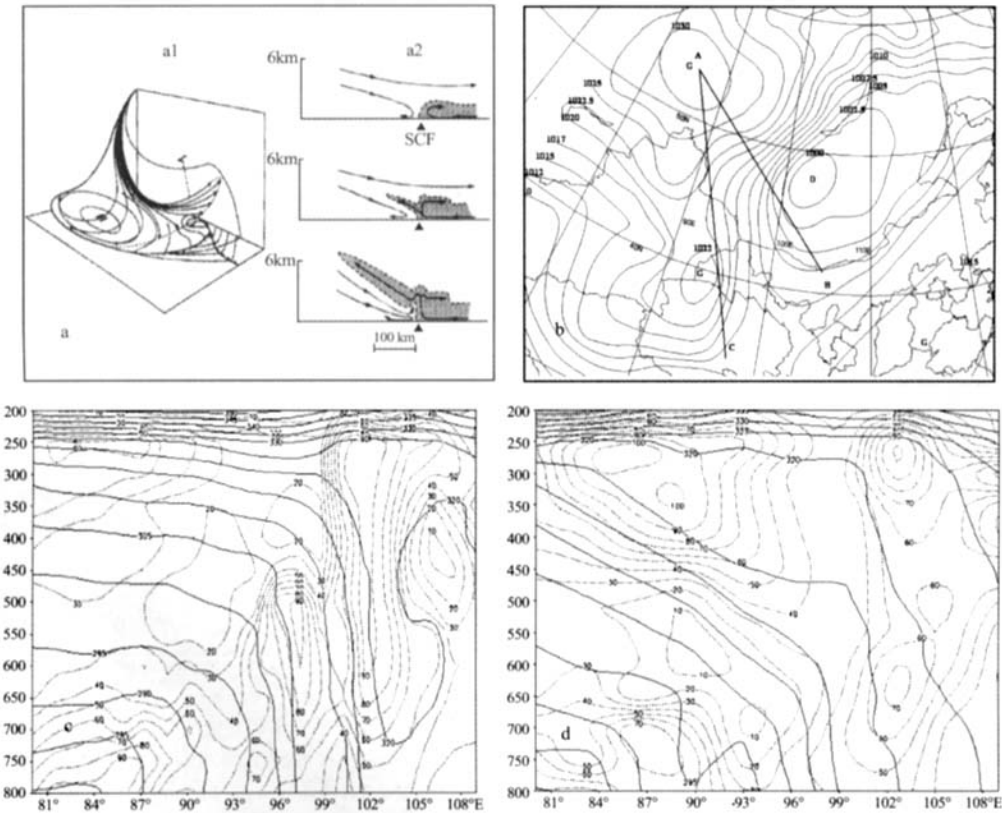


图 3 干侵入气流的三维结构和冷锋结构

a. 干侵入气流的三维结构和冷锋结构<sup>[23,25]</sup>; b. 2006 年 10 月 5 日 20 时海平面气压场; c. 5 日 20 时沿 A 点(86°E, 53°N)和 B 点(105°E, 42°N)的相对湿度和相当位温垂直剖面; d. 5 日 20 时沿 A 点(86°E, 53°N)和 C 点(97°E, 34°N)的相对湿度和相当位温垂直剖面

Fig. 3 The three dimension schematic illustration of dry intrusion and cold frontal structure

从20时相对湿度和位势涡度沿 $95^{\circ}\text{E}$ 剖面(图1e)可以看出,从200 hPa,  $49^{\circ}\text{N}$ 高位势涡度库有位势涡度柱向下、向南伸展,与位势涡度柱相配合的是干冷空气柱(相对湿度 $\leq 40\%$ ),可以认为这是干侵入的源泉。在5日20时地面图上(图3b),从冷高压中心A点( $86^{\circ}\text{E}$ ,  $53^{\circ}\text{N}$ )至B点( $105^{\circ}\text{E}$ ,  $42^{\circ}\text{N}$ )靠近蒙古低压一侧作相对湿度和相当位温垂直剖面(图3c)可以看出,在 $92^{\circ}$ — $97^{\circ}\text{E}$ 对流层上层有干冷空气(相对湿度 $\leq 40\%$ )下传,干冷空气迭置在暖湿空气之上,形成位势不稳定状态,容易产生对流。对应垂直速度剖面,最大上升速度中心在700 hPa,  $97^{\circ}\text{E}$ 附近,最大上升速度为 $-1.0\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大下沉中心在500 hPa,  $92^{\circ}\text{E}$ 附近,最大下沉速度为 $0.5\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在远离低压中心一侧,沿A点( $86^{\circ}\text{E}$ ,  $53^{\circ}\text{N}$ )至C点( $97^{\circ}\text{E}$ ,  $34^{\circ}\text{N}$ )作相对湿度和相当位温垂直剖面(图3d),从图中看到,与锋面对应的相当位温等值线在对流层中缓慢倾斜上升;从相对湿度分布可以看出,暖湿空气沿锋面爬升到干冷空气上部,在相当位温等值线曲率最大处,湿空气被干冷空气截断。对应垂直速度剖面,最大上升速度中心在450 hPa,  $97^{\circ}\text{E}$ 附近,最大上升速度为 $-0.3\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在 $93^{\circ}\text{E}$ 附近有从250 hPa到850 hPa的 $0.2\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 下沉速度带。从冷锋结构可见,与Danielsen曾绘制的干侵入气流三维结构图(图3a1)基本一致,左侧气流轨迹线接近地面,右侧气流轨迹线凌驾于地面低压之上。

从上面分析看,在靠近蒙古低压一侧的冷锋为下滑冷锋,冷锋附近等熵面陡立,有利锋面气旋发展,锋前上升速度中心在对流层低层,对流强;在远离蒙古低压一侧的冷锋为上滑冷锋,冷锋附近等熵面缓慢倾斜上升,锋前上升速度中心在对流层高层,有弱对流。从地面图大风、沙尘暴时空分布看,蒙古南部从西到东的大风、沙尘暴由下滑冷锋引起,持续时间24 h以上,强度强;河西走廊、内蒙西部的大风、沙尘暴由上滑冷锋引起,持续时间12 h,强度相对弱。

#### 4 天气雷达阵风锋分析

阵风锋(也称弱窄带回波)在雷暴大风临近预报中具有重要意义。梁爱民等<sup>[26]</sup>在对北京雷暴大风的研究中发现,阵风锋是产生雷暴大风的主要类型之一,在雷达回波上呈环状或带状弱回波,一般与强回波主体移动方向一致,速度图像显示一般为单一速度控制(个别呈辐合带),风速一般较大。

10月5日张掖天气雷达观测到的双弱窄带回波与上述形成原因不同,弱窄带回波上游并无强对流回波,而是冷锋前弱对流和锋后强下沉干冷空气出流形成。从5日23时29分至23时51分 $1.5^{\circ}$ 仰角雷达强度回波(图4a, b, c)可以看出,23时29分在冷锋到达前,在张掖东北侧有一弱对流云团生成,最大强度31 dBZ,并向南伸展,其在减弱过程中,下沉气流流出边界形成弱窄带回波,位置在张掖一线,此时张掖站极大风速增到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,23时46分演变成一段圆弧形阵风锋(第一条弱窄带回波),距离张掖6.5 km,对流云团强度减弱到24.9 dBZ,同时,弱对流云团消散时下沉气流向后辐散气流与冷锋后更干更冷的下沉气流流出边界相遇,形成第二条弱窄带回波并移至张掖,其强度为7.1 dBZ,两条弱窄带回波间距6.5 km,此时张掖极大风速猛增到 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,23时44分出现扬沙,23时46分发展成沙尘暴,能见度下降到500 m,23时59分极大风速增大到 $19.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (上游站高台23时08分风速 $21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,扬沙;临泽23时30分风速 $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,扬沙)。张掖沙尘暴持续到6日0时21分。从同时次径向速度图上看(图4d, e, f),两条阵风锋基本为单一速度控制,前沿入流回波很弱,长度约60 km,前一条最大径向速度 $12.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,宽度约3 km;后一条最大径向速度 $17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,宽度约1 km,并且在23时51分(图4f),第二条阵风锋后侧出现明显的向着雷达的冷色区域,既后向辐散气流,雷达中心另一侧有离开雷达速度(暖色),在23时51分(图4f)达到最强,最大速度 $-24.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从23时46分 $0.5^{\circ}$ ,  $1.5^{\circ}$ ,  $2.4^{\circ}$ ,  $3.4^{\circ}$ 仰角径向速度图(图4g, e, h, i)可以看出, $0.5^{\circ}$ 仰角为整层西北气流,辐散气流基本在相对雷达高度400—700 m之间,厚度约300 m,此辐散气流的出现、增强、减弱消失与沙尘暴的发生、维持、减弱消失相对应。辐散气流起到对地面扬起沙尘的抽吸作用,使沙尘暴维持。

从上述分析看,第二条阵风锋在底层更干更冷的高速冷空气与弱对流云团消散时下沉气流向后辐散气流形成强辐合上升,使吹离地面的沙尘扬起,能见度迅速下降,沙尘暴形成。阵风锋的形成、移动及长度对下游大风、沙尘暴的强度及影响范围预警有很好的参考价值。

#### 5 小结

1) 对流层高层的高位势涡度库有位势涡度柱向下、向南伸展,在等熵面陡立处,垂直涡度分量急剧

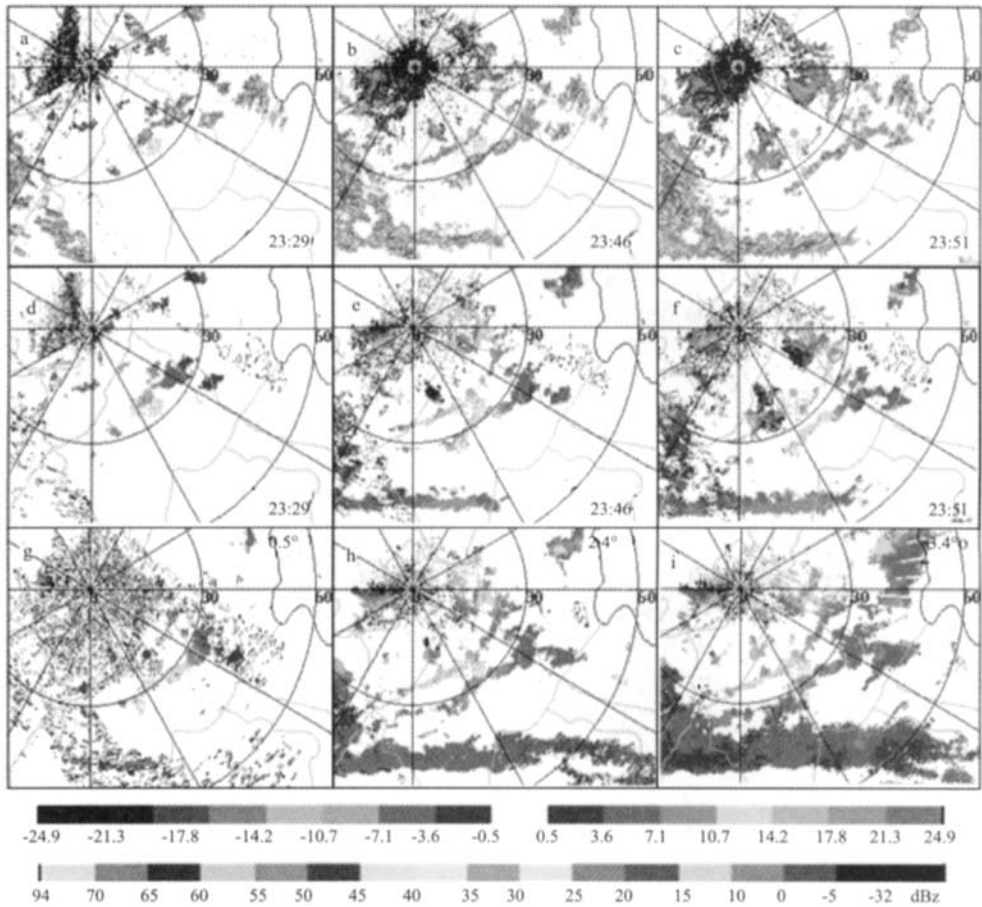


图 4 甘肃张掖 10 月 5 日雷达强度回波和径向速度回波

a. 甘肃张掖 5 日 23 时 29 分 1.5°仰角雷达强度回波; b. 23 时 46 分、c. 23 时 51 分、d. 5 日 23 时 29 分 1.5°仰角径向速度回波; e. 23 时 46 分、f. 23 时 51 分、g. 23 时 46 分 0.5°仰角径向速度回波; h. 2.4°仰角径向速度回波; i. 3.4°仰角径向速度回波

Fig. 4 The radar reflectivity and radar radial velocity on Oct. 5, 2006 in Zhangye of Gansu

增大,使锋面低压迅速发展,气旋性环流加强,气压梯度风加大,低空急流形成。

2)  $PV_2$  的负值区移过区域与 3 h 后大风、沙尘暴发生区域对应关系很好,负值区中心也是大风、沙尘暴强度中心。 $PV_2$  的负值强度的增强和减弱与大风、沙尘暴发生、发展、减弱对应关系很好。

3) 这次蒙古国南部从西到东的大风、沙尘暴由下滑冷锋引起,持续时间 24 h 以上,强度强;河西走廊、内蒙古西部的大风、沙尘暴由上滑冷锋引起,持续时间 12 h,强度相对弱。

4) 阵风锋在底层更干更冷的高速冷空气与弱对流云团消散时下沉气流向后辐散气流形成强辐合上升,使吹离地面的沙尘扬起,能见度迅速下降,沙尘暴形成。阵风锋的形成、移动及长度对下游大风、沙尘暴的强度及影响范围预警有很好的参考价值。

5) 阵风锋后方低空辐散气流起到对地面扬起沙尘的抽吸作用,使沙尘暴维持。

#### 参考文献(References):

- [1] 徐国昌,陈敏连,吴国雄. 甘肃省“4. 22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报,1979,37(4):26-35.
- [2] 王式功,杨德保,周玉素,等. 我国西北地区“94. 4”沙尘暴成因探讨[J]. 中国沙漠,1995,15(3):281-286.
- [3] 徐建芬,牛志敏,陈伟民,等. 我国西北地区 4. 5 沙尘暴天气研究[J]. 中国沙漠,1996,16(3):281-286.
- [4] 常兆丰,刘虎俊,纪永福,等. 河西走廊最近一次强沙尘暴的调查分析[J]. 中国沙漠,1997,17(4):442-446.
- [5] 杨民,蔡玉琴,王式功,等. 2000 年春季中国北方沙尘暴天气气候成因研究[J]. 中国沙漠,2001,21(增刊):6-11.
- [6] 张平,杨德保,尚可政,等. 2002 年春季中国沙尘暴天气与物理量场的相关分析[J]. 中国沙漠,2003,23(6):675-680.
- [7] 汤绪,俞亚勋,李耀辉,等. 甘肃河西走廊春季沙尘暴与低空急流[J]. 高原气象,2004,23(6):840-846.

- [8] 尚可政, 孙黎辉, 王式功, 等. 甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中太平洋海温之间的遥相关分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 239—243.
- [9] 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.
- [10] 丁荣, 张德玉, 梁俊宁, 等. 甘肃河西走廊中部近45a来大风沙尘暴气候背景分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 792—796.
- [11] 李艳春, 赵光平, 陈楠, 等. 宁夏沙尘暴天气研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 137—141.
- [12] 尹晓惠, 王式功. 我国北方沙尘暴与强沙尘暴过程的分型特征及趋势预测[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 130—136.
- [13] 屠妮妮, 矫梅燕, 赵琳娜, 等. 引发强沙尘暴的蒙古气旋的动力特征分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 520—527.
- [14] 王建鹏, 沈桐立, 刘小英, 等. 西北地区一次沙尘暴过程的诊断及地形影响的模拟实验[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 259—267.
- [15] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴, 等. “4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 89—87.
- [16] 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): 83—87.
- [17] 赵琳娜, 赵思雄. 引发北方沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 116—126.
- [18] Hoskins B J. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability[J]. Q J R Meteor Soc, 1974, 100(425): 480—482.
- [19] 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及诊断分析[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 371—378.
- [20] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓青. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387—405.
- [21] Browning K A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development[J]. Meteor Appl, 1997, 4: 317—324.
- [22] 于玉斌, 姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 769—774.
- [23] Danielsen E F. Project Springfield Report[R]. Defense Atomic Support Agency, Washington D C. 20301, DASA 1517 (NTIS# AD-607980), 1964: 99(转引自[21]).
- [24] Browning K A, Golding B W. Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1995, 121: 463—493.
- [25] Browning K A, Roberts N M. Variation of frontal and precipitation structure along a cold front[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1996, 122: 1845—1872.
- [26] 梁爱民, 张庆红, 申红喜, 等. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象, 2006, 32(11): 73—80.

## Diagnostic Analysis and Weather Radar Observation of a Sand-dust Storm in Autumn

WANG Fu-cun<sup>1,2</sup>, FU You-zhi<sup>2</sup>, LI Hong<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration & Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 2. Zhangye Meteorological Bureau, Zhangye 734000, Gansu, China)

**Abstract:** Based on the reanalysis data of NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$ , the diagnostic analysis on potential vorticity, dry intrusion and vertical helicity of a sand-dust storm process occurred in the west of Gansu and Inner Mongolia and the south of Mongolia during period from Oct. 5, 2006 to Oct. 6, 2006 was conducted. The high potential vorticity air from upper level of troposphere extended downwards and southwards, its vertical component increased rapidly at steep of iso-entropy plane, promoting the rapid development of the cyclone and resulting in a low level jet; at the same time, the upper level dry air intruded southeastwards, leading to the intensive and long-lasting gale and sand-dust storm from west to east in the south of Mongolia. Whereas, the gale and sand-dust storm occurred in Hexi corridor and west of Inner Mongolia are resulted from sliding upwards cold-front, lasting short period and behaving relatively weak intensity. There is certain corresponding relation between the evolution of the vertical helicity and the occurrence of sand-dust storm. The vertical distribution of helicity over the sand-dust storm area is the negative value in the upper levels and the positive value in the low levels. The centre of intensive sand-dust storm is just down the maximum value of helicity. In addition, making use of the observational data by CINRAD-CC weather radar we have analyzed the  $\beta$ -medium scale double gust-front structure that resulted in sand-dust storm in Zhangye of Gansu. It was concluded that the genesis of the dust-storm in study region is generated form the second gust-front.

**Keywords:** sand-dust storm; potential vorticity; dry intrusion; gust-front