

甘肃河西走廊两次强对流天气对比分析

王伏村^{1,2} 李耀辉¹ 牛金龙² 张得玉²

(1. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,兰州 730020; 2. 甘肃省张掖市气象局)

提 要: 使用地面高空观测资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 6小时再分析数据和张掖 CINRAD/CC 雷达观测数据,对2006年7月7日、8月10日发生在甘肃河西走廊中部的两次强对流天气的环流形势、大气稳定度、相对风暴螺旋度(SRH)、天气雷达回波特征进行了对比分析。分析结果表明:产生这两次强对流天气环流形势不同。7月7日飑线对流系统产生于北部沙漠戈壁由北向南移动,右移飑线前部结构为气旋式旋转;8月10日对流系统产生于青藏高原由南向北移动,来自高原上的暖湿气流水汽充足,不稳定层比7月7日深厚,产生冰雹的左移超级单体结构为反气旋式旋转。7月7日右移飑线相对风暴螺旋度降雹前为正值,降雹开始后转为负值;8月10日左移反气旋超级单体相对风暴螺旋度在发展期为负值,降雹开始后跃增到 $60\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 以上。

关键词: 强对流天气 条件对称不稳定 相对风暴螺旋度(SRH) 雷达回波

A Comparative Analysis of Two Strong Convective Weather in Hexi Corridor

Wang Fucun^{1,2} Li Yaohui¹ Niu Jinlong² Zhang Deyu²

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province; Lanzhou 730020;
2. Zhangye Meteorological Office; Gansu Province)

Abstract: By using the NCEP reanalysed data, the conventional observation data and Doppler radar data of the synoptic and mesoscale characteristics of two strong convective weather in Hexi Corridor are analyzed. The results show that they are differ greatly from each other on the circulation and mesoscale system. A right-moving squall-line(cyclone) led to the hail on 7 July 2006. In contrast, a strong left-moving (anticyclone) supercell brought on the hail on 10 August 2006. The value of storm-relative helicity(SRH) for right-moving squall-line is positive in the 0—3km layer, while the value of storm-relative helicity(SRH) for left-moving supercell is negative during development.

Key Words: strong convective weather conditional symmetric instability storm relative helicity(SRH) radar echo

基金项目: 中国气象局兰州干旱气象研究所(IAM200713)项目资助

收稿日期: 2006年9月29日; 修定稿日期: 2007年9月28日

引 言

强对流天气在有利的大尺度天气背景下生成、发展,大尺度天气背景限定了中小尺度对流天气系统的强度、时空尺度、演变特征。从大尺度天气观测资料中很难捕捉到中小尺度天气系统信息,而多普勒雷达观测具有空间、时间分辨率高的特点,对中小尺度天气系统的发展、演变、位置、移动以及内部结构进行监测,为灾害性天气临近预报提供了不可或缺的手段。随着我国新一代天气雷达监测网的建成,强对流天气研究成果逐年增多。尤莉等^[1]对赤峰地区冰雹天气总结了 4 种环流型并根据有关对流物理量集成了预报方法。郭媚媚等^[2]研究了台风外围超级单体的多普勒天气雷达回波特征。李云川等^[3]利用河北新乐的 CINRAD-SA 多普勒天气雷达产品对河北省中南部的冰雹、强风、大型降水进行了统计分析,得到了不同天气类型的雷达产品指标。王莉萍等^[4]利用多普勒天气雷达和闪电定位资料分析了河北衡水市的一次飊线特征。王华等^[5]对 2005 年北京城区两次强冰雹天气进行了对比分析,雷达回波分析表明,这两次强冰雹天气分别由中- γ 和中- β 对流系统引起。本文使用地面高空观测资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ 6$ 小时再分析数据和张掖 CINRAD/CC 雷达观测数据,通过环流形势、大气稳定度、相对风暴螺旋度(SRH)、天气雷达回波特征对 2006 年 7 月 7 日、8 月 10 日发生在甘肃河西走廊中部的两次强冰雹天气过程进行了对比分析。

1 两次强对流天气的环流特征

1.1 2006 年 7 月 7 日飊线天气的环流特征

500hPa 高空图上(图 1a)河西走廊处在槽后脊前西北气流中,西北气流中有明显冷平流下滑。由于降水过后,近地层湿度较大,

沙漠、戈壁太阳辐射增温较快,再加上中、高层下沉干冷空气使对流不稳定性加强。这种形势下,在低层辐合切变动力抬升作用下,易产生剧烈对流天气。

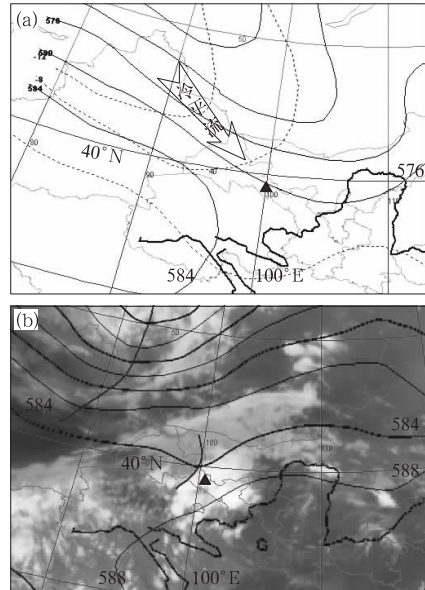


图 1 两次强对流天气 500hPa 环流形势

(a) 7 月 7 日 08 时 500hPa 高度(实线)和温度(虚线)等值线 (b) 8 月 10 日 20 时 500hPa 高度(实线)等值线和卫星云图(黑三角为冰雹发生地)

1.2 8 月 10 日超级单体强对流天气环流特征

由于盛夏赤道副热带地区对流旺盛,热带风暴在海洋生成,使副热带高压 588 线北抬到 39°N 附近,西伸至 95°E 以西,热带水汽沿 588 和 584 线之间的西南气流穿越高原抵达河西走廊干旱地区(图 1b),暖湿气流穿越高原西部在热力作用下生成对流云团,不断北上影响河西地区。当热带风暴登陆填塞后,副热带高压开始东退,新疆北部低槽分裂冷空气跟进。高原上北上的对流云团在没有遇到冷空气时,产生的对流天气比较弱,持续

时间短,一旦遇到新疆东移冷空气,会迅速加强并产生强烈对流天气。

2 两次强对流天气的不稳定分析

2.1 相当位温 θ_e 垂直分布

相当位温 θ_e 随高度的变化反映了大气

的对流稳定度。 θ_e 随高度减小,大气对流不稳定; θ_e 随高度增加,大气对流稳定。

从 7 月 7 日 14 时 θ_e 沿 100°E 垂直剖面图(图 2a)可以看出, θ_e 小值中心带在 450hPa 附近,在 850~450hPa 之间, θ_e 随高度减小,大气处于对流不稳定状态。暖湿气流与干冷空气交接面在 39°N 附近,并有干冷气柱下侵。

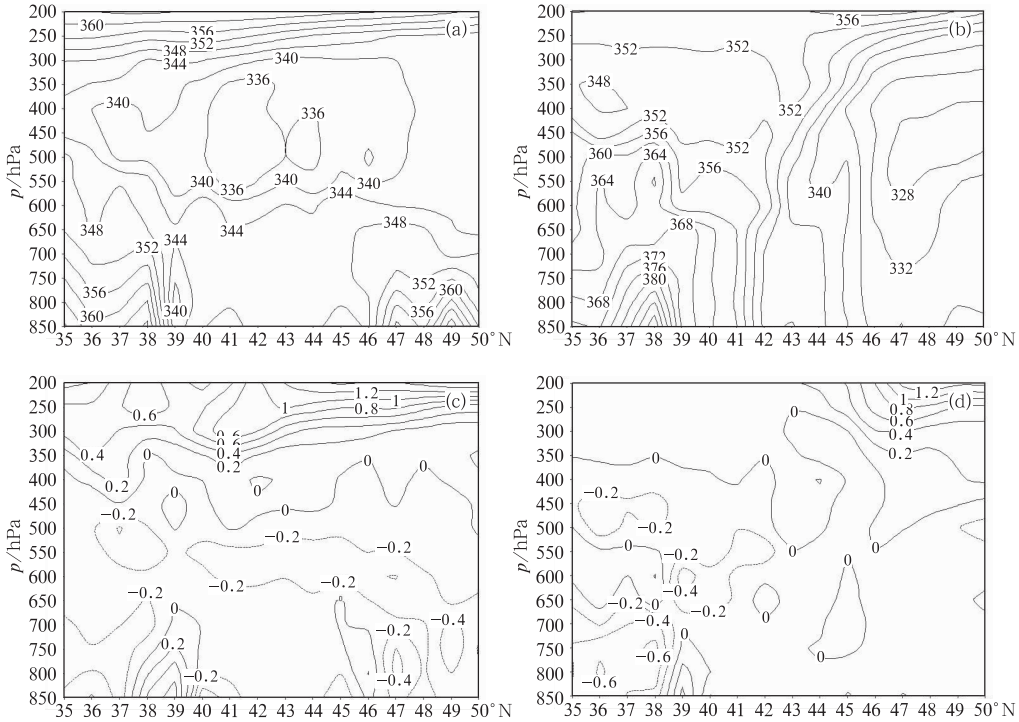


图 2 相当位温 θ_e 和湿地转位涡 MPV_g 垂直剖面图

- (a) 7 月 7 日相当位温 θ_e 沿 100°E 垂直剖面
- (b) 8 月 10 日相当位温 θ_e 沿 101°E 垂直剖面
- (c) 7 月 7 日湿地转位涡沿 100°E 垂直剖面
- (d) 8 月 10 日湿地转位涡沿 101°E 垂直剖面

从 8 月 10 日 14 时 θ_e 沿 101°E 垂直剖面图(图 2b)可以看出, θ_e 小值中心在 350hPa 附近,在 850~350hPa 之间, θ_e 随高度减小,大气处于对流不稳定状态,不稳定层比 7 月 7 日深厚。暖湿气流与干冷空气交接面在 42°N 附近。

2.2 条件对称不稳定分析

条件对称不稳定可以用湿地转位涡

MPV_g 来判定^[6],其表达式表是为:

$$MPV_g = -g(f + \zeta_g) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} - g \left(\frac{\partial u_g}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} - \frac{\partial v_g}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \right)$$

$MPV_g < 0$ 为条件对称不稳定, $MPV_g > 0$ 为条件对称稳定。

从 7 月 7 日 100°E 的 MPV_g 垂直剖面图(图 2c)可以看出,14 时在 40°N 以北,850~

450hPa 为条件对称不稳定层,850hPa MPV_g 负值中心为 $-0.43 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对流先在北部不稳定区产生, 然后向南移动; 20 时(图略)强冰雹天气结束后, 850hPa 负值区域中心值减小到 $-0.21 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 40°N 以南的正值中心增加到 $0.4 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并向北、向上扩展, MPV_g 由负转正或负值减小的区域, 条件对称不稳定能量释放, 对流从低层向上发展。

从 8 月 10 日 100°E 的 MPV_g 垂直剖面图(图 2d)可以看出, 14 时在 38°N 以南 850~650hPa, 800hPa MPV_g 负值中心为 $-6.1 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 850~650hPa, 500~300hPa 为条件对称不稳定层, 650~550hPa 为条件对称稳定层, 39°N 上空的正值区在 700hPa 被负值区分隔开; 20 时(图略)强冰雹天气结束后, 38°N 以北的正值中心增加到 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并向南推进过 37°N 以南、向上稳定层扩展到 600hPa 以上, 中层正值区向下发展与下层正值区接通, MPV_g 由负转正值的区域, 条件对称不稳定能量释放, 说明中、低层都有对流发展。

3 相对风暴螺旋度分析

Brandes 于 1989 年提出了“相对风暴螺旋度”(storm_relative helicity, 即 SRH)的概念, 定义为:

$$H_{s-r-T} = \int_0^h (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

具体计算螺旋度时, 广泛采用^[7,9-10]的是 Davies-Jones 等用探空资料根据解析几何性质得出的计算公式:

$$H_{s-r-T} = \sum_{n=0}^{N-1} [(u_{n+1} - c_x)(v_n - c_y) - (u_n - c_x)(v_{n+1} - c_y)]$$

上式中风暴速度是这样确定的: 以

850hPa 到 400hPa 气层中的质量加权平均风, 风向向右偏转 40° , 风速大小的 75% 作为该点的风暴速度。使用多普勒雷达 VWP 风廓线资料计算螺旋度^[8]时, 风暴移动速度用 10 个体扫实际风暴平移速度的大小, 风暴移动方向取右移和左移风暴 10 个体扫平均移动方向。

3.1 7 月 7 日右移飢线相对风暴螺旋度特征

图 3a 是 2006 年 7 月 7 日 17:27—18:50 右移飢线相对风暴螺旋度时间演变图, 从图中可以看出, SRH 时间演变存在两个波峰波谷, 两个波谷对应两次降雹。在发展期 0~3km SRH 均为正值, 主要是因为 0~3km 垂直风切变矢量顺时针旋转占优势。降雹开始后 SRH 下降到 $-40 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 以下, 主要是因为 0~3km 垂直风切变矢量逆时针旋转占优势。

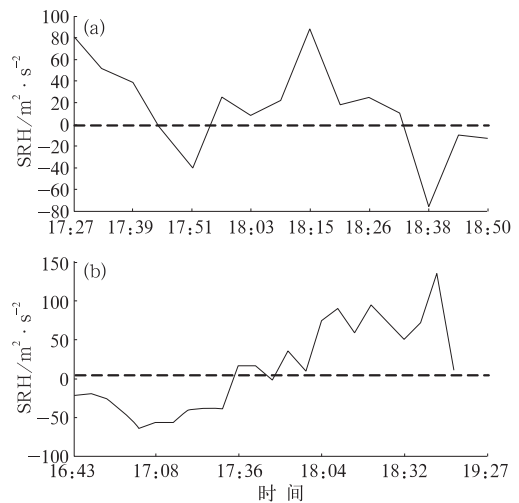


图 3 相对风暴螺旋度时间演变图
(a) 7 月 7 日 (b) 8 月 10 日

3.2 8 月 10 日左移反气旋超级单体相对风暴螺旋度特征

图 3b 是 2006 年 8 月 10 日 16:43—18:32 左移反气旋超级单体发展维持期相对

风暴螺旋度时间演变图,从图中可以看出,在左移超级单体发展期 0~3km SRH 在 $-70 \sim 0 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 之间,最小值为 $-68 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,主要是因为 0~3km 垂直风切变矢量逆时针旋转。维持期 SHR 在 $0 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 附近波动;降雹开始后,SRH 跃增到 $60 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 以上,主要是因为底层 0~3km 垂直风切变矢量逐渐转为顺时针旋转。

4 多普勒雷达回波特征分析

4.1 7月7日右移飏线多普勒雷达回波特征

7月7日冰雹天气由飏线引起,13:41 雷达 1.5° 仰角反射率因子图上,张掖市北部 100km 处的巴丹吉林沙漠上空不断有对流单体生成,向南移动,15:22(图 4a,见彩页),其中一个单体右前方有新单体生成,雷暴单体向多单体转变,转向西南移动;径向速度图上低层为辐合,中层为气旋式旋转(图略)。16:22(图 4c,见彩页),不断生成的雷暴单体排列成线状,具有飏线特征,右侧最强雷暴单体后部 V 形槽口回波明显,表明有强的干冷空气进入飏线内部,在 V 形槽口附近触发生成新的单体补充到飏线中,使得飏线得以维持和发展^[11],右前部有倒 V 型槽口,说明入流很强;径向速度图上,右前方有气旋式切变,尾部为反气旋切变,飏线前部有 40km 长的风向辐合线(图略)。17:03(图 4d,见彩页),飏线右前部分裂向西南加速移动,左后部减弱向东南移动,飏线西北有新对流单体向东南移动,有合并趋势。17:30,飏线最大反射率因子 61dBz。17:50(图 4e,见彩页),飏线演变成逗点回波,最大反射率因子 62dBz,并开始和西北移来的风暴合并,18:02(图 4f,见彩页),风暴合并,合并后 $>45 \text{dBz}$ 回波面积增大 2 倍,入流速度增大到 $15.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从 18:02 反射率因子剖面图(图 5a,见彩页)可以看出,反射率因子有强

大的回波悬垂;径向速度剖面图(图 5b,见彩页)上,近地面有 $15.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的入流中心,入流区一侧出流风速 $-13.6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,地面有强烈的辐合上升运动;从中层 6km 到底层 1km 有倾斜的偏西风大值区,大值区右侧无回波,空气水汽含量迅速减小,表明有干冷空气卷入,使得位势不稳定加强^[12],上升气流和下沉气流增强,风暴维持时间增长。18:55 移动到南部山区开始减弱。当日 08 时探空图上, -20°C 高度为 6.6km, -10°C 高度 4.9km, 0°C 高度 2.9km。17:30, $>45 \text{dBz}$ 高度 7.95km, 18:02, $>45 \text{dBz}$ 反射率因子高度 6.8km(飏线已在雷达 30km 以内,高悬垂体被切断,实际应在 8km 以上),具有降大冰雹的条件。灾情报告,17:30—18:40 左右先后两次在临泽县平川镇、蓼泉镇、甘州区龙渠乡降雹,冰雹直径 5~20mm。

4.2 8月10日左移超级单体多普勒雷达回波特征

8月10日冰雹天气由左移反气旋超级单体引起,16:29(图略)西南气流中北上的对流单体开始分裂,移动方向的左后方为反气旋式单体,右后方为气旋式单体,在低层 0~5km 的反时针旋转的垂直风切变矢量作用下,诱发的非静力平衡的垂直气压梯度力使主上升气流左侧的上升气流加强,从而使分裂后的反气旋式单体向偏北方向移动(左移)并加强;17:24,气旋式单体减弱右移出雷达探测范围。17:58(图 6c,见彩页),左移单体已发展为超级单体,左侧入流处有回波强度高梯度区,单体 $>45 \text{dBz}$ 的高反射率因子区演变为反逗号形回波,右侧有弱右移雷暴生成。从垂直剖面图上看(图 5c,见彩页),从低到高向入流一侧(西北方)倾斜,但倾斜幅度不大,有界弱回波区(BWER)。回波顶移过低层反射率因子的高梯度区而位于有界弱回波区(BWER)之上,具有超级单体结构特

征,最大反射率因子为 61dBz(仰角 1.5°), >45 dBz反射率因子的高度超过 8.3km(当日 08 时探空图上一 20°C 高度为 6.6km)。18:30 以后其强度明显减弱,最大反射率因子降到 50dBz 以下。灾情报告,18:00—18:30 在山丹李桥乡、霍城乡降雹,最大冰雹直径 20mm。

在径向速度图上,16:29(图略)对应左移单体高反射率因子区位置,气流为反气旋旋转,对应右移单体高反射率因子区位置,气流为气旋旋转,旋转速度在 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(仰角 1.5°)。17:36(图 6e,见彩页),左移单体的旋转速度明显增大,最大旋转速度 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,正负速度中心距离约 3km;右移单体的气旋旋转已明显减弱,旋转特征不明显。17:58(图 6g,见彩页),左移单体的旋转速度达最大值,最大旋转速度 $24.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,高度为 5km 附近,在 6.8km,旋转速度为 $20.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,旋转速度 $>20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的厚度约 2km,持续时间一个体扫,按照中气旋的 3 个判据,旋转速度持续时间和延伸厚度达不到中气旋标准。18:09 以后旋转速度明显减弱。

5 结 语

(1) 7 月 7 日飏线由槽后脊前西北气流中冷平流下滑引起的对流不稳定加强产生。8 月 10 日超级单体强对流天气由副热带高压西北边缘与西风气流中波动共同作用产生。

(2) 7 月 7 日对流系统产生于北部沙漠戈壁由北向南移动。8 月 10 日对流系统产生于青藏高原由南向北移动。8 月 10 日来自高原上的暖湿气流水汽充足,不稳定层比 7 月 7 日深厚。

(3) 7 月 7 日右移飏线相对风暴螺旋度降雹前为正值,降雹开始后转为负值。8 月

10 日左移反气旋超级单体相对风暴螺旋度在发展期为负值,降雹开始后跃增到 $60\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 以上。

(4) 7 月 7 日右移飏线前部对流系统结构为气旋式旋转;8 月 10 日超级单体对流系统结构为反气旋式旋转。不论是气旋式旋转还是反气旋式旋转的中尺度对流系统,发展到一定强度都能产生剧烈对流天气。

参考文献

- [1] 尤莉,徐玉强,程玉琴,等. 赤峰地区冰雹天气的环流特征及预报[J]. 气象,2006,32(4):101-105.
- [2] 郭媚媚,麦冠华,胡胜,等. 肇庆市一次超级单体的多普勒雷达资料分析[J]. 气象,2006,32(6):97-101.
- [3] 李云川,王福侠,裴宇杰,等. 用 CINRAD-SA 雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J]. 气象,2006,32(10):64-69.
- [4] 王莉萍,崔晓东,常英,等. 一次飏线天气的非正规气象资料特征分析[J]. 气象,32(10):88-93.
- [5] 王华,孙继松,李津. 2005 年北京城区两次强冰雹天气的对比分析[J]. 气象,33(2):49-55.
- [6] Dixon, R. S., Browning, K. A. and Shutts, G. J. The relation of moist symmetric instability and upper-level potential-vorticity anomalies to the observed evolution of cloud heads[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2002;128, 839-859.
- [7] 李耀辉,寿绍文. 旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的应用[J]. 南京气象学院学报,1999,22(1):95-102.
- [8] 王丽荣,胡志群,匡顺四. 应用雷达产品计算风暴相对风暴螺旋度[J]. 气象,2006,32(4):46-51.
- [9] 郑峰. 螺旋度应用研究综述[J]. 气象科技,2006,34(2):119-123.
- [10] Davies J M, Hourly H. Instability and EHI in forecasting supercell tornadoes[R]. 17th Conference on Server Local Storms St Louis, MO; Amer Meteor Soc. 1993;107-111.
- [11] 张腾飞,段旭. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. 高原气象,2006,25(3):531-538.
- [12] 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.

王伏村等：甘肃河西走廊两次强对流天气对比分析

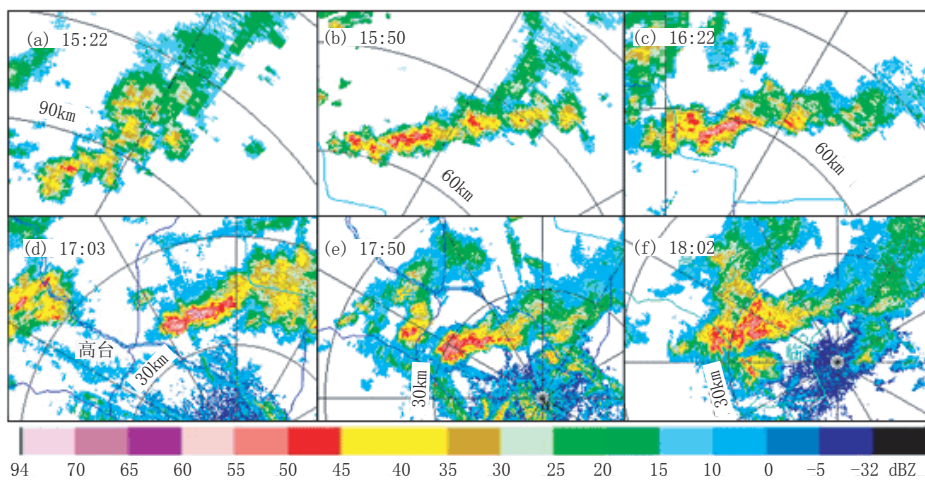


图4 2006年7月7日虬线多普勒雷达1.5°仰角反射率因子演变图

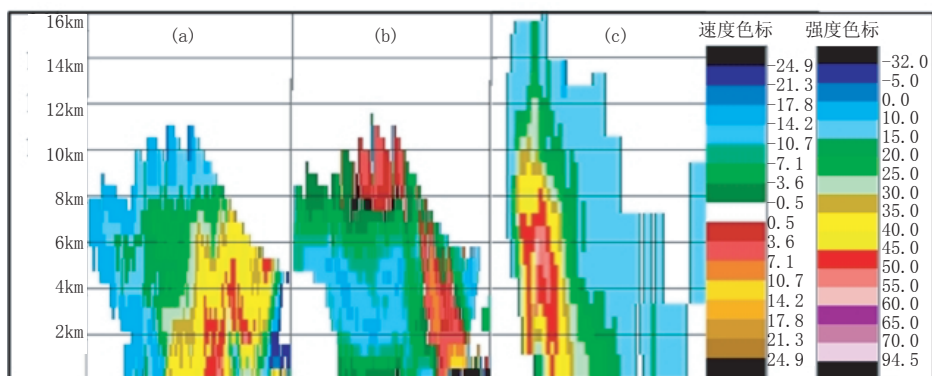


图5 2006年7月7日虬线18:02反射率因子剖面(a)和径向速度剖面(b), 2006年8月10日左移反气旋超级单体17:58反射率因子剖面(c)

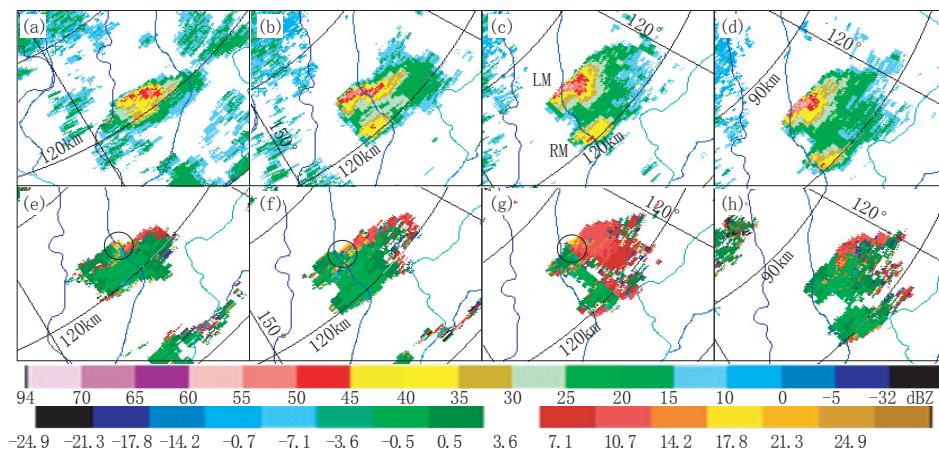


图6 2006年8月10日17:36—18:00(北京时)张掖雷达每间隔两个体扫左移反气旋超级单体的0.5°仰角反射率因子(a-d)和1.5°仰角径向速度演变图(e-h)。