文章编号:1674-7070(2009)03-0273-06

一次下击暴流天气的多普勒雷达资料分析

王楠[1]　刘黎平[2]　仲凌志[2]

摘要

利用多普勒雷达基本反射率、径向速度资料以及径向速度计算的风切变结果,对一次典型的下击暴流天气过程进行了分析.结果发现:强对流单体合并加强形成弓状回波,在弓状回波前沿反射率因子梯度大值区产生下击暴流,造成地面强风灾害;下击暴流过程中,中层以上一直存在强度不断增大的径向风辐合,为系统发展提供动力支持;下击暴流发生时,底层会出现相应的径向风辐散,是地面大风的直接反应;高低层垂直切变反映了强对流单体内部风场配置结构为底层有较强的暖湿入流、高层有明显的上层出流、中层以上升气流为主,这样的流场配置正是一般强对流单体中的常见特征.

关键词

下击暴流;风切变;多普勒径向速度

中图分类号 P458.121

文献标志码 A

0　引言

Introduction

强对流云在旺盛阶段和开始减弱的阶段都会在云底附近产生冷出流,而能够产生近地面破坏性的水平辐散出流称为下击暴流.Fujita等[1]从20世纪70年代中期开始,利用飞机、多普勒天气雷达基地等监测网对下击暴流进行了系统的研究,在下击暴流的结构、类型、灾害特征等方面做了奠基性研究.根据破坏性水平出流的尺度,Fujita等[1]将下击暴流分为两类:宏下击暴流——最大出流水平尺度超过10 km,持续时间大于10 min;微下击暴流——最大出流水平尺度小于4 km,持续时间小于10 min.美国曾经进行过4次外场试验[2],对下击暴流进行了广泛的观测和深入的研究.我国对于下击暴流的观测和研究相对较少.俞小鼎等[3]曾对一次系列下击暴流进行了详细分析,总结出反射率因子核心的逐渐降低并伴随云底以上的速度辐合的多普勒雷达回波特征,可以用来提前数分钟预警下击暴流的发生.漆良波等[4]研究认为,下击暴流造成的地面出流在雷达回波上表现为近似圆弧的弱窄带回波,这种弱窄带回波与其他雷达观测特征以及地面观测相结合,有助于对产生下击暴流的对流云进行细致分析.然而,目前大多局限于通过雷达回波的形态及其演变等特征,直观、定性地研究风场中尺度结构[5-7],缺少对多普勒雷达资料的定量、深入地分析应用.

2006年6月25日17:20—19:30(北京时,下同),陕西中部出现了强雷阵雨、大风、冰雹天气.大荔县1 h最大降水量17 mm,同时伴有12级大风,最大风速33 $m \cdot s^{-1}$,突破了历史极值.大风造成大荔26个乡(镇)不同程度受灾,因灾受伤50多人,死亡8人.事后有关人员对灾情进行了调查,发现地面风的痕迹是直线型向外辐散的,具有下击暴流风场特征.

1　多普勒天气雷达反射率因子资料分析

Analysis with reflectivity factor materials of Doppler weather radar

2006年6月25日18:31的1.5°仰角PPI(Z)上(图1a,每圈径向距离40 km,☆所示为"大荔"位置,下同),雷达站的东北方向距离90 km处有一条NW-SE走向的中心强度超过55 dBz的强回波带,在其南部有一条NE-SW走向的强度为40~60 dBz的细长回波带,两者前

收稿日期 2009-06-30

资助项目 2009年中国气象局"新一代天气雷达信息共享平台建设"项目

作者简介

王楠,女,硕士,高级工程师,从事短时预报和多普勒雷达资料应用研究.wnanw@163.com

1　陕西省气象台,西安,710016

2　中国气象科学研究院,北京,100081

沿的间距在 20 km 左右. 随着仰角增高,这段距离逐渐缩小,在 6.0°仰角 PPI(Z)(图 1e)上两者间距不超过 10 km,但中心回波强度仍然超过 55 dBz,说明这两条回波都发展旺盛. 事实上,在它们前期发展过程中先后在经过地区产生冰雹、大风等强对流天气.

18:37 在 4.3°仰角以上的 PPI(Z)上两条回波开始合并(图 1f),而低仰角观测到的两者合并在 18:43 出现(图 1b). 连在一起的强回波前部边缘清晰、曲率较大,反射率因子最大达 60 dBz 以上,大于等于 50 dBz 的强回波面积较前明显增加,并迅速演变成为弓状回波.

18:55(图 1c,g),弓状回波前缘到达大荔(下击暴流发生地)上空,低层≥60 dBz 的强回波面积达到最大,其前部的反射率因子梯度也达到最大.

19:02 回波前沿反射率因子梯度迅速减小(图 1d),回波中心强度未变. 这一时刻,6.0°仰角 PPI(Z)上(图 1h)强回波中心突然降至 45 dBz 以下,4.5°仰角以下各层 PPI(Z)上≥55 dBz 的强回波面积骤然减小,反映了强反射率因子核心的急速下降,说明下击暴流相伴随着雷暴云顶崩溃的现象. 大荔在 19:04 出现风速 33 $m\cdot s^{-1}$、风向 290°的大风和直径 6 mm 的冰雹天气. 此后弓状回波演变为带状回波,继续向东南方向移动.

2 多普勒天气雷达径向速度资料分析

Analysis with radial velocity materials of Doppler weather radar

18:37 的 0.5°仰角 PPI(V)上(图 2a),雷达站东北方强回波块上方为大片负速度区,最大速度超过 14 $m\cdot s^{-1}$. 此时 1.5°仰角 PPI(V)上(图略),在相应位置为大片正速度区,其中距离雷达约 90 km 处有一小块负速度区,形成逆风区. 逆风区靠近雷达一侧与正速度区构成径向风辐合,辐合区对应着两块回波在下一体扫的交汇点. 2.4°仰角 PPI(V)(图 2e)上,正速度区强度增加,但逆风区的面积非常小.

到 18:49,底层负速度区明显增强,中层逆风区面积逐渐增大. 18:55 的 0.5°仰角 PPI(V)上(图 2c),在负速度区南侧突然出现一大块正速度区,最大速度超过 10 $m\cdot s^{-1}$,对应着反射率因子图上的弓状回波前沿. 同时,1.5°和 2.4°仰角 PPI(V)上(图 2g),逆风区的面积都突然明显增大,而在 3.3°仰角同一位置上也出现了逆风区,据估算高度达 5 km左右,说明这时的逆风区发展最旺盛. 从 18:49 到 19:02,2.4°仰角的 PPI(V)上的逆风区朝向雷达一侧与正速度交界处形成一段弯曲的速度梯度大值区,与反射率因子图上的弓状回波相对应. 在弓状的北部,正负速度对形成了类似于中气旋的特征. 这样的径向速度场分布说明在下击暴流发生前,在其内部存在中层的气流辐合和气旋式旋转.

19:02(图 2d,h),中层逆风区面积开始减小;同时底层弓状回波前沿负速度区似乎被正速度包围,形成一条辐散带,这是下击暴流爆发产生的地面大风造成的,是下击暴流发生的标志特征. 19:08,底层辐散区消失,伴随着弓状回波转为带状,逆风区也"伸展"为带状,继续与反射率因子回波一同移动、发

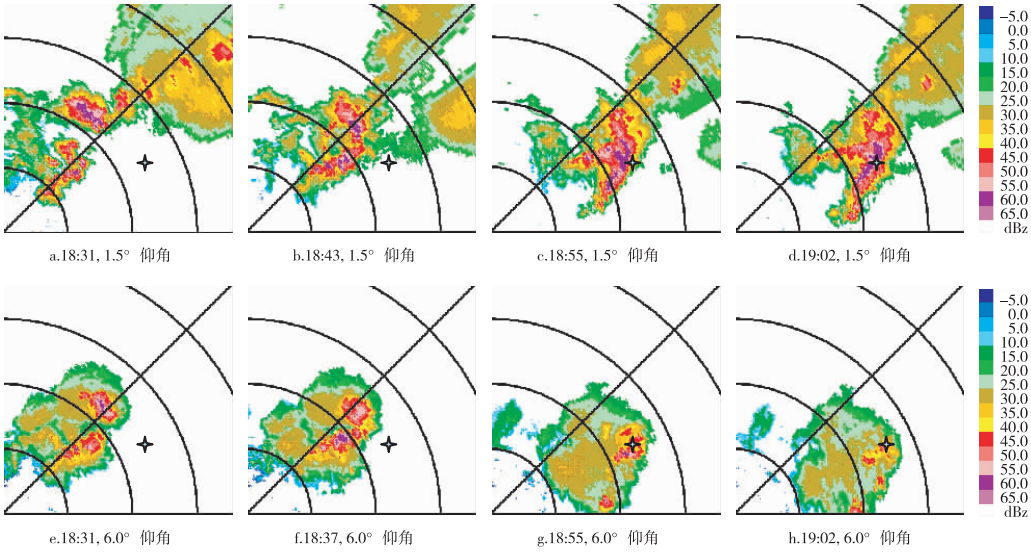


图 1 2006 年 6 月 25 日大荔下击暴流过程反射率因子

Fig. 1 Reflectivity factors diagram of the downburst that happened in Dali on June 25,2006

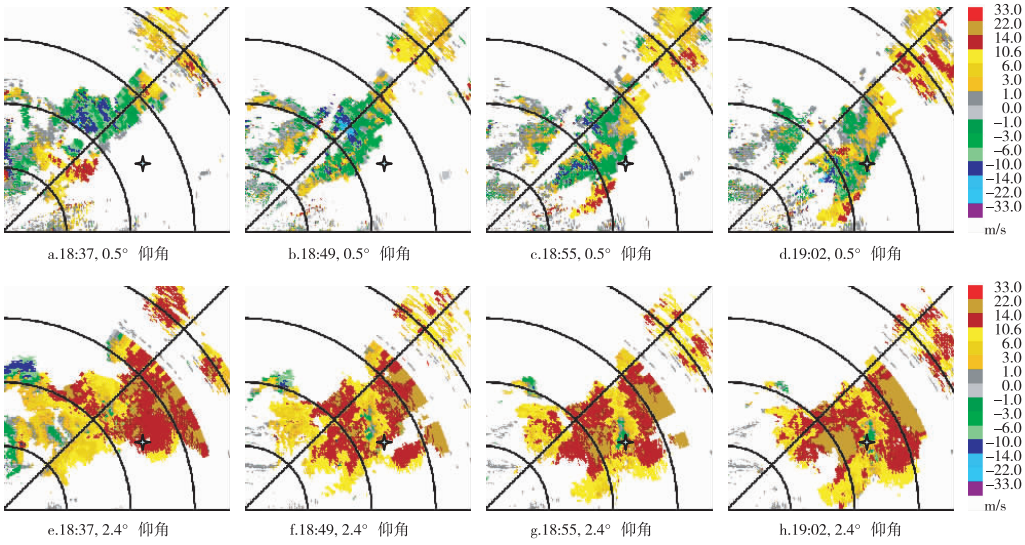


图 2　2006 年 6 月 25 日大荔下击暴流过程径向速度

Fig. 2　Radial velocity diagram of the downburst that happened in Dali on June 25,2006

展,最终减弱消失.

3　多普勒天气雷达径向速度切变分析

Analysis with wind shear of radial velocity of Doppler weather radar

根据气象学中风切变的定义,分别沿雷达径向和方位角方向(下文简称切向)选择一定数量的像素点,利用最小二乘拟合原理计算径向速度的径向切变和切向切变,将这两者合成为组合切变,最后计算垂直切变[8-9].

径向切变定义为雷达径向速度从原点开始沿某一径向随距离的变化,即

$$\frac{\partial v}{\partial r}=\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i\cdot\sum_{i=1}^{n}r_i-n\cdot\sum_{i=1}^{n}(v_i\cdot r_i)}{\sum_{i=1}^{n}r_i\cdot\sum_{i=1}^{n}r_i-n\cdot\sum_{i=1}^{n}r_i^2}. \qquad (1)$$

切向切变定义为在距雷达相同距离上的像素点上,径向速度从 0°方位角开始(正北)沿顺时针方向的变化,即

$$\frac{\partial v}{r\partial\theta}=\frac{\sum_{j=1}^{m}v_j\cdot\sum_{j=1}^{m}\theta_j-n\cdot\sum_{j=1}^{m}(v_j\cdot\theta_j)}{r\cdot\left(\sum_{j=1}^{m}\theta_j\cdot\sum_{j=1}^{m}\theta_j-n\cdot\sum_{j=1}^{m}\theta_j^2\right)}. \qquad (2)$$

径向方位组合切变表示雷达径向速度沿径向、切向的综合变化,定义为

$$\sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{r\partial\theta}\right)^2}.$$

$\frac{\partial v}{\partial r}$和$\frac{\partial v}{r\partial\theta}$分别为式(1)、(2)计算的径向切变和切向切变.

垂直切变:在相同方位角上,距雷达相同距离(即 r、θ 都是常数)的上下两层 PPI 上径向速度值随垂直高度的变化,即

$$\frac{\partial v}{\partial h}=\frac{\sum_{k=1}^{l}v_{上k}-\sum_{k=1}^{l}v_{下k}}{l(r_{上}\cdot\sin\alpha_{上}-r_{下}\cdot\sin\alpha_{下})}. \qquad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中 n、m 和 l 的取值分别为 40、3、2.

18:37,1.5°仰角上(图 3a),与逆风区朝向雷达一侧的正负速度交界相对应的位置,计算出一条近于 NW-SE 走向长约 20 km 的辐合线,强度超过 $1.5\times10^{-3}s^{-1}$. 同样位置的 2.4°仰角上也有一条相对较短的辐合线(图 3d),中心强度超过 $2.2\times10^{-3}s^{-1}$. 与强回波对应的区域,0.5°和 1.5°仰角间、1.5°和 2.4°仰角间的垂直切变为均正值(图 5a,d),由于这次过程回波出现在雷达的东侧,因此正垂直切变意味着风随高度顺转. 底层的垂直切变中心强度达到 $12\times10^{-3}s^{-1}$ 以上,而中层的仅为 $5\times10^{-3}s^{-1}$ 左右,说明底层暖湿层结较强,而中层由于有较强的上升气流使得垂直切变明显减小.

18:55,1.5°和 2.4°仰角上的辐合线强度都有所增加(图 3b,e),中心达到 $2.2\times10^{-3}s^{-1}$ 以上,都向西南方向移动了大约 20 km,此时的 3.3°仰角上也能计算出辐合线,强度在 $1.5\times10^{-3}s^{-1}$ 左右. 同

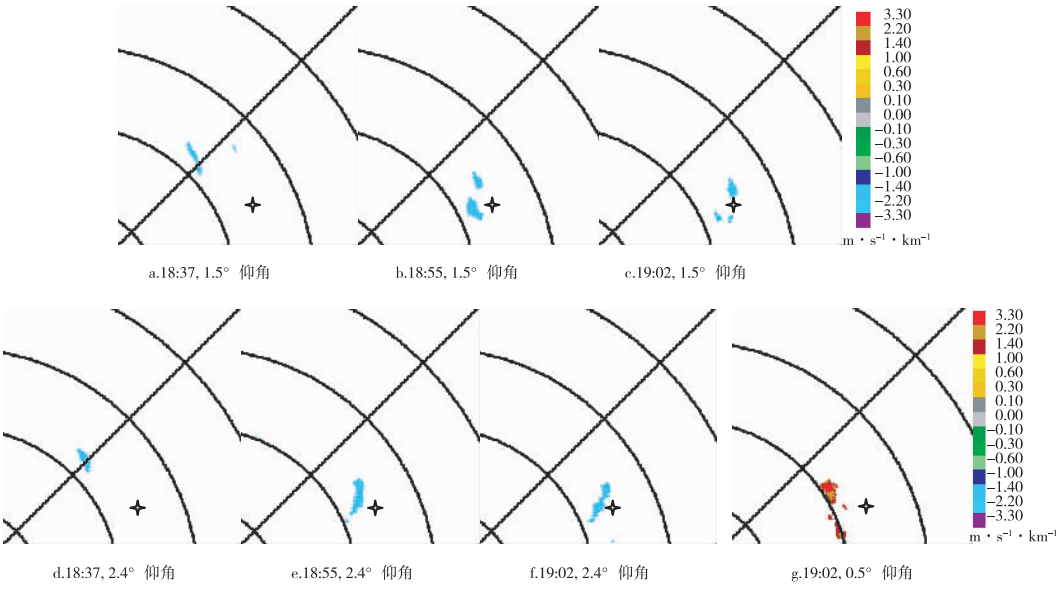


图 3　2006 年 6 月 25 日大荔下击暴流过程径向切变计算结果(显示域值均为 $-1.5\times10^{-3}s^{-1}$)

Fig. 3　The radial shear of the downburst that happened in Dali on June 25, 2006 (show gate: $-1.5\times10^{-3}s^{-1}$)

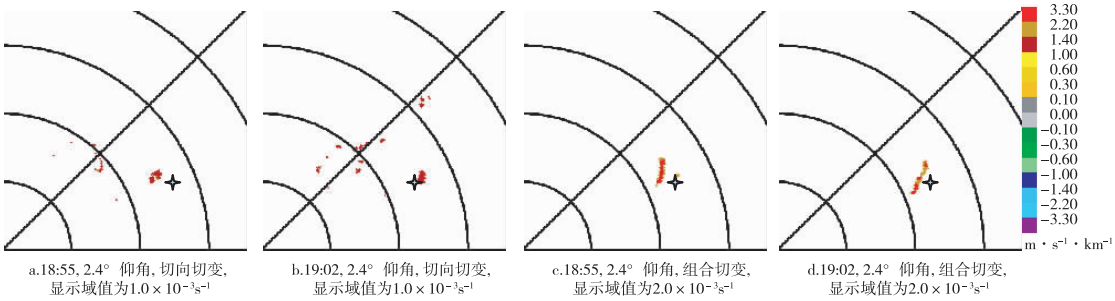


图 4　2006 年 6 月 25 日大荔下击暴流过程切向切变和组合切变计算结果

Fig. 4　The azimuthal shear and combined shear of a downburst that happened in Dali on June 25, 2006

时在 2.4°仰角上在弓状回波的前沿还出现了正的切向切变(图 4a,c),也就是说这一位置径向风场有气旋式旋转,这个气旋式旋转一直维持到下击暴流发生时(图 4b,d). 研究表明下击暴流中经常会出现气旋式旋转,但这样的旋转对下击暴流的作用是促进还是减弱还有待进一步研究[3]. 这一时刻与弓状回波相应位置,低层到中层垂直切变仍为正值(图 5b,e),顶层开始出现负垂直切变(图略). 这样的高低层垂直切变反映了强对流体内部底层暖湿入流、高层干冷辐散、中层以上升气流为主的风场配置结构,说明对流单体已经发展到成熟期.

19:02,1.5°~2.4°仰角上也都还有辐合线存在(图 3c,f),不过强度已经开始减小;0.5°仰角上可以计算出 $\geqslant1.0\times10^{-3}s^{-1}$ 的正径向切变区(图 3g),即辐散区,这是下击暴流引起周围环境风场辐散的表现,可以认为是下击暴流爆发的显著标志. 此时底层的正垂直切变明显减弱(图 5c),且在弓状回波前沿还出现了负垂直切变(图 5f),这可能是干冷的强下沉气流对层结影响造成的. 同时的高层负垂直切变区面积增大,说明上升气流不再强盛.

19:08,2.4°仰角的辐合线继续减弱. 只有 1.5°仰角上的辐合线一直存在,伴随强回波继续东移、减弱.

4　小结

Summary

本文针对一次下击暴流天气过程,应用多普勒雷达资料进行深入分析,得到了其较详细的内部

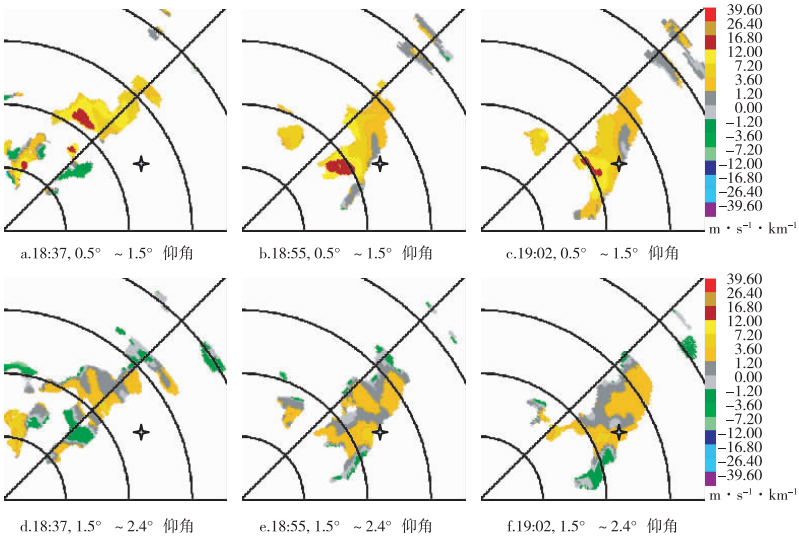


图 5 2006 年 6 月 25 日大荔下击暴流过程垂直切变计算结果

Fig. 5 The vertical shear of a downburst that happened in Dali on June 25,2006

结构.

1) 强对流单体合并加强形成弓状回波,在弓状回波前沿反射率因子梯度大值区产生下击暴流,造成地面强风;下击暴流发生时强反射率因子核心急速下降,说明下击暴流相伴随着雷暴云顶崩溃的现象.

2) 径向速度图上始终存在逆风区,其面积随着回波强度发展逐渐增大,下击暴流爆发后迅速减小.

3) 在下击暴流爆发生之前,云底以上与弓状强回波对应的位置一直存在风场辐合,且强度不断增大,为弓状回波发展提供动力支持;下击暴流发生后,中层以上辐合迅速减弱消失,底层有强辐散,这是由地面大风造成的,据此可以清楚了解下击暴流发生的情况.

4) 强对流单体发展过程中,低到中层垂直切变为正值,高层为负值,反映了其内部风场配置结构为底层有较强的暖湿入流、高层有明显的上层出流、中层以上升气流为主,这样的流场配置正是一般强对流单体中的常见特征.

参考文献

References

[1] Fujita T T, Wakimoto R M. Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner [J]. Mon Wea Rev, 1977, 105: 129-146

[2] Jorgensen W. Forcing and organization of convective systems [J]. Meteor Monographs, 2003, 30: 75-75

[3] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报,2006,17(4):385-393
YU Xiaoding, ZHANG Aimin, ZHENG Yuanyuan, et al. Doppler radar analysis of a series of downburst events [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(4): 385-393

[4] 漆梁波,陈春红,刘强军. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用[J]. 气象学报,2006,64(1):112-20
QI Liangbo, CHEN Chunhong, LIU Qiangjun. Application of weak narrow-band echo in severe weather prediction and analysis [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(1): 112-120

[5] 王楠,刘勇,郭大梅. 利用多普勒雷达资料对一次区域性暴雨的中尺度分析研究[J]. 气象,2007,33(8):29-34
WANG Nan, LIU Yong, GUO Damei. Meso-scale analysis of a regional heavy rain using Doppler radar data [J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(8): 29-34

[6] 张沛源,杨洪平,胡绍萍. 新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J]. 气象,2008,34(1):3-11
ZHANG Peiyuan, YANG Hongping, HU Shaoping. Applications of the newer generation of weather radar to nowcasting and warning of severe weather [J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(1): 3-11

[7] 廖玉芳,俞小鼎,唐小新,等. 基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征[J]. 南京气象学院学报,2007,30(4):433-443
LIAO Yufang, YU Xiaoding, TANG Xiaoxin, et al. Characteristics of supercell storms in Hunan detected by Doppler weather radars [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(4): 433-443

[8] 王楠,刘黎平,徐宝祥,等. 利用多普勒雷达资料识别低空风切变和辐合线方法研究[J]. 应用气象学报,2007,18(3):314-320
WANG Nan, LIU Liping, XU Baoxiang, et al. Recognizing low-altitude wind shear and convergence line with Doppler radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(3): 314-320

[9] 胡明宝,谈曙青,汤达章,等. 单部多普勒雷达探测低空风切变方法[J]. 南京气象学院学报,2000,23(1):113-118
HU Mingbao, TAN Shuqing, TANG Dazhang, et al. A study on the method for detecting low-level wind shear over airport with a single Doppler radar [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2000, 23(1): 113-118

Analysis of a downburst using Doppler radar data

WANG Nan[1] LIU Liping[2] ZHONG Lingzhi[2]
1 Shannxi Meteorological Observatory, Xi'an 710016
2 Chinese Academy of Meteorology Science, Beijing 100081

Abstract The Doppler radar data of basic reflectivity and radial velocity, and the wind shear calculated from radial velocity are utilized to analyze a typical weather course of downburst. The results show that two strong convection cells are merged and hence strengthened to form a bow echo, and the downburst breaks out at the fore part of the bow echo where reflectivity grade is high, resulting in strong wind disaster on the ground. In the course of a downburst, there always exists in mesosphere or higher altitudes the convergence of radial velocity with a growing strength, supplying and congregating abundant energy for the downburst. The corresponding divergence of radial velocity near the ground appears when a downburst breaks out, which directly results from a gust front. The configuration structure of the wind field inside strong convection cells reflected by the high-and low-level vertical wind shear is as follows: there are warm and humid in-currents near the ground, obvious upper-level out-currents in high altitudes and mainly up-currents in mesosphere, which are the common characteristics of the usual strong convection cells.

Key words downburst; wind shear; Doppler radial velocity