

多普勒雷达对一次阵风锋的三维结构研究

王振国¹, 卓 鸿², 李春虎³, 刘爱梅², 杨芙蓉²

(1. 甘肃省甘南州气象局, 甘肃 合作 747000; 2. 济南市气象局, 山东 济南 250001; 3. 山东省气象局, 山东 济南 250001)

摘 要:通过对济南地区一次春季阵风锋的多普勒雷达资料分析,反演出典型的密度流外流边界(阵风锋)的特征,在雷达回波图上表现为一条狭窄的弧状强回波带,强回波带的后方再发展出宽大较弱的回波区。体扫的各仰角速度场显示出阵风锋合理的空间结构;在雷达回波上阵锋的长度表现为低仰角长,高仰角短,而距离表现为低仰角远,高仰角近。速度垂直剖面上存在典型的中层径向辐合 MARC,高度大约在 2.5~7 km 之间,反映出强对流存在明显的后方中层入流。随着仰角的增大,可以分析出阵风锋是近地面现象。

关键词:春季阵风锋;多普勒雷达;空间结构;中层径向辐合 MARC

中图分类号: TN958

文献标识码: A

前 言

MCS 是造成我国强对流天气的主要系统,国内外已有许多关于 MCS 与 MCC 的研究,例如马禹等^[1]对中国及其临近地区的 MCS 进行了普查分析;项续康等^[2]对我国南方地区的 MCC 进行了研究;李玉兰等^[3]对我国西南—华南地区的 MCC 进行了研究,这些研究基本上针对夏季的 MCC 和 MCS,对其他季节的 MCS 研究则较少。目前,多普勒天气雷达在我国得到越来越多的使用,但多限于对雷达资料的堆砌,还没有人从空间结构上进行研究。MCS 是一种有空间立体结构的中尺度系统,常从云图上定义,但地面上伴有的阵风锋等强天气却很少有人分析。我们已对这次发生在黄河下游的一次春季的 MCS 个例从环境场、卫星云图及物理量场等进行了综合分析^[4-5],但觉得仍有必要从雷达的 3 维结构上进行分析,以增加对这次春季 MCS 的进一步认识。

1 实 况

2003 年 4 月 17 日 11 时 30 分左右,济南出现气压涌升(气压在 10 min 内上升了 1 hPa)、气温骤降(气温在 10 min 内下降了 7.7 °C)、风向陡转(偏东转为西西南风)、风力陡增(出现瞬时风速为 19.6 m/s 的大风)的现象,10 min 内降水量达到 8 mm。

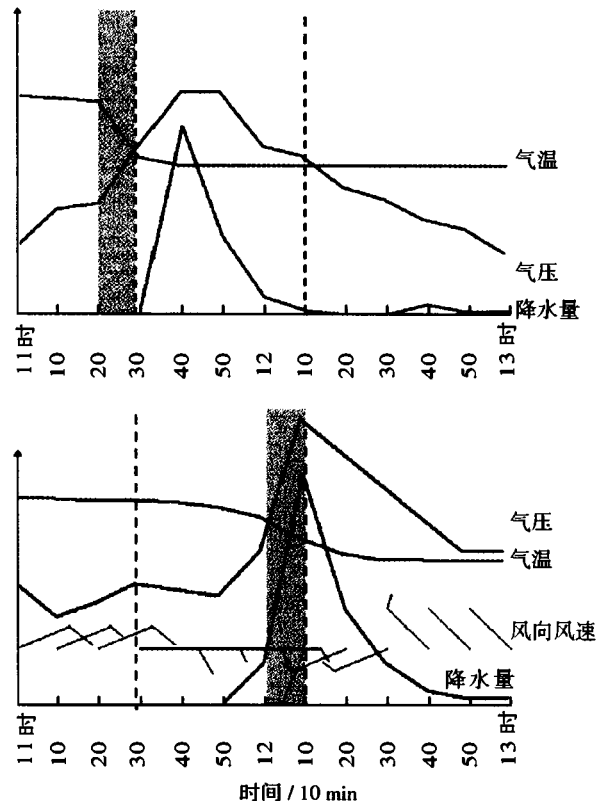


图1 济南(上)和济阳(下)气象要素随时间的变化曲线
Fig. 1 The varying curves of meteorological elements over Ji'nan (top) and Jiyang (bottom)

收稿日期:2006-05-08;改回日期:2006-12-17

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2005sdqxa17)资助

作者简介:王振国(1966-),男,甘肃天水人,工程师,主要从事天气预报研究和业务管理工作。E-mail:w_zg_660918@163.com

从这些气象要素的变化可以看出,11 时 30 分左右,有阵风锋在济南过境。济阳从 12 时开始,气压在 10 min 内上升了 2 hPa,气温在 10 min 内下降了 2.4 °C,12 时至 12 时 10 分,阵风锋在济阳过境。

从这些单站要素的变化看,在这次 MCS 引发的大暴雨过程中,地面还出现了一次典型的阵风锋过程。济阳位于济南以北(NNE)约 30 km,阵风锋过境时间相差 30~40 min(济南 11:30;济阳 12:10),因而据此可估计出飚线的移速约为 45~60 km/h,与 Wakimoto 1982 年总结的阵风锋的模型完全吻合(图 1)。

2 与阵风锋相关联的强回波带的演变

从济南齐河新一代多普勒天气雷达回波上可以看到:4 月 17 日 7 时 28 分西南方向约 150~230 km 处生成一些结构松散的回波,中心强度只有 36 dBZ。到 8 时 53 分左右,这些回波的中心已发展为 53 dBZ 的强回波,并且多块回波排列成一条弧线(图 2 左)。9 时 29 分左右(图略),回波块已逐渐合成一个呈西北—东南走向的回波带,回波带的前端

到达距济南约 100 km 的地方。至 10 时 38 分,回波的中心强度加强到 56 dBZ,强回波带的宽度也明显增加,其前沿距济南仅 50 km(图 2 中)。11 时 08 分这条强回波带到达济南,它造成了济南第一个时段的强降水,1 h 雨量达到 12.2 mm 并伴有强阵风。至 12 时 06 分(图 2 右),强回波带已移至济南东北方 50~100 km 处,第一时段的强降水基本结束。此时带状回波的中心强度和宽度已略有减弱,但强回波带的后方出现相当宽的较弱回波区。

上述分析表明,阵风锋在雷达回波图上表现为一条狭窄的弧状强回波带。它在 9 时至 12 时之间从济南西南方 150 km 之外移到东北方 100 km,移动方向与西南风低空急流的方向一致,反映了阵风锋降水为暖区的强对流降水。在雷达回波的形态上,初始对流阶段为多个有规则排列的对流单体,然后发展成一条狭窄的弧状强回波带。最后在强回波带的后方再发展出宽度加大而强度较弱的回波区。这种回波形态和 Houze 等^[6]总结的强风暴中存在 2 种降水区(狭窄的对流性降水区和宽的增强层状降水区)有些类似。



图 2 4 月 17 日济南的雷达回波

(仰角为 0.5°,最大探测距离为 230 km,距离圈间隔 50 km(但最外圈为 30 km)(以下同),左上角色标表示回波强度等级;蓝色虚线表示弧状对流性回波带的前沿,红色箭头表示它在此时段内的移动)

Fig.2 The echo intensity of Doppler radar in April 17 in Ji'nan

(The elevation is 0.5°; the maximum detecting distance is 230 km, and the interval is 50 km(ragged edge is 30 km); the color bar on the left top corner is the level of echo intensity; blue dashed line indicates the front of convective bow echo belt; red arrow indicates the movement of bow echo belt)

在此特别需要强调的是:雷达最初看到的西南方 150~240 km 处的回波实际上是 M α CS 中强对流

带的顶部,随着 M α CS 的移近,雷达可以扫描到 M α CS 的中下部,所以在 8:53 看到的雷达回波稀疏

而无规律,10:38 和 12:06 看到的雷达回波紧密而有规律,并不是说回波强度增加了,而是由于雷达距离 $M\alpha CS$ 的距离不同所造成的扫描高度的不同,回波的形态更趋于完整。

3 阵风锋在多普勒速度场上的表现

图 3 给出多普勒雷达的速度图。雷达径向速度图基本可分为 4 个部分:西北象限为弱的正速度区,速度只有 0~5 m/s(指径向速度,而非实际风速);东南象限为弱的负速度区,径向速度也只有 1~5 m/s;西南象限既有正速度区,也有负速度区,但径向速度均较弱,且风场呈连续变化。东北象限却有很明显变化:在一大片较弱的负速度区中插入一条长约 70~80 km、宽约 15~20 km 的正速度带,径向速度由 5 m/s 突变为 19 m/s,梯度大,断线的两侧风速对吹,风向风速都不连续,速度零线出现明显的折角。从速度场的定性分析可以看出,阵风锋前的暖区是弱的东北风(-1~-5 m/s),阵风锋过后是强的西南风(13~19 m/s),位于强对流回波带的前

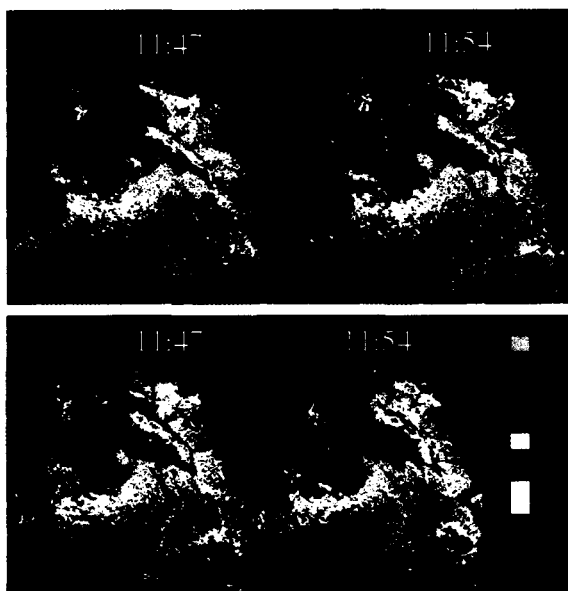


图 3 阵风锋通过雷达站不同时刻的径向速度场(细箭头表示径向速度分量,粗箭头为阵风锋移动方向,点线为 11:47 的阵风锋位置,断线为图上对应时间的阵风锋位置)

Fig. 3 The radial velocity map of gust front at different time (narrow arrow indicates the radial velocity; bold arrow indicates the moving direction of gust front; dashed line indicates the position of gust front at 11:47 AM; broken line indicates the position of gust front at corresponding time)

沿,具有典型的阵风锋风向突变、风力剧增的特征。阵风锋的移动方向是向东北方而不是西南方。从 11:47 至 12:12,25 min 时间内向东北方向移动了 25 km,移速为 60 km/h,与我们上面所看到的单站要素和地面风场实况非常吻合(图 1)。

相同时刻的强度回波也具有相同的特征,强风速带对应着强回波带,位于阵风锋后方,强度达到 40~45 dBZ(图 4)。

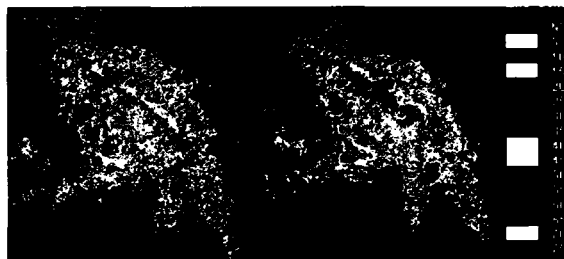


图 4 阵风锋通过雷达站不同时刻强度回波
Fig. 4 The gust front's echo intensity of Doppler radar at different time

4 在多仰角体扫的速度图像中阵风锋的 3 维结构

从图 4 可以看出,强回波带的长度 > 200 km,但正负速度强烈对比的多普勒速度不连续线(包括方向和大小)长度却只有 70~80 km 左右(图 5 中白色短线之间),其他 2/3 的部分由于距雷达较远,处于雷达视线以下观测不到。原因是地球曲率和大气折射所引起的,当探测距离较远时,即使地面雷达作水平探测,波束轴线的高度也会离开地面数千米。若远处降水云发展高度较低,雷达可能探测不到。所以在雷达回波上阵风锋的长度表现为低仰角长,高仰角短,而阵风锋距离表现为低仰角远,高仰角近。

表 1 0.5°仰角雷达不同的距离圈对应的高度

Tab. 1 The altitudes corresponding to different distance intervals of Doppler radar at 0.5° elevation

距离圈/km	50	100	150	200	230
高度/km	0.44	0.87	1.31	1.75	2.01

表 2 55 km 所对应各仰角的高度

Tab. 2 The altitudes corresponding to different elevations at 55 km

仰角/°	0.5°	1.5°	2.4°	3.4°
高度/km	0.48	1.44	2.31	3.27

多普勒天气雷达不同距离圈对应的高度是不同的(表 1、表 2),而相同的距离圈上对应的高度也不同。阵风锋距雷达的距离约为 55 km,在不考虑地球曲率的情况下,这个距离对应雷达的 0.5°仰角的高度应为 0.48 km。也就是说,阵风锋的垂直厚度只有 500 m 左右。

Doviak, R. J^[7]认为,阵风锋虽然产生于风暴,但可以脱离风暴母体,单独传播到 60 km 以外的地方。他着重指出,风暴的外流总是发生在近地面,由于地球有曲率的原因,当雷达探测到阵风锋时,阵风锋已距离雷达 65 km 远,而且已脱离风暴母体 40 km 之外。阵风锋一般发生在 700 m 高度以下,距雷达中心 30~40 km 的对应高度为 500 m 左右。

从上面对这次个例的阵风锋分析来看,符合 Doviak, R. J 的分析,说明阵风锋只是一种近地面的现象,处于雷达视线以下的部分雷达观测不到。

以 12 时 12 分的速度图为例,利用雷达 0.5°、1.5°、2.4°、3.4° 4 个仰角来进一步分析同一时刻同一阵风锋的 3 维结构。

图 5 分别给出 0.5°、1.5°、2.4°和 3.4°仰角的速度场。从图上可以看出,随着仰角的增大,强的正

速度带变短,在 1.5°仰角上与雷达距离变近,而且 0.5°仰角上阵风锋前方有弱负速度区,在 1.5°仰角上已没有负速度(东北风的入流)。说明随着仰角的抬高,由地面阵风锋过境所带来的风向突变在高空看不到,阵风锋是近地面现象。另外,从高仰角(3.4°)的径向速度回波对高层的风向做定性分析,强正速度带距雷达 35 km,说明在 2.1 km 高度上也有强风。西南方 70 km 处 -19 m/s 的负速度极值说明 5 km 高度有强西南风;东东北方向 130 km 处 19 m/s 正速度极值说明在 7.7 km 以上为 SSW 风。另外,近雷达处的速度分布显示出近地面为较弱的南风。

5 阵风锋在雷达垂直剖面上的表现

中层径向辐合(Midaltitude Radial Convergence)位于 MCS 中层,高度在 3~9 km,是 MCS 后部下沉的干空气和云体前部倾斜上升的暖湿气流在中层的辐合,在雷达回波上表现为弓状回波。

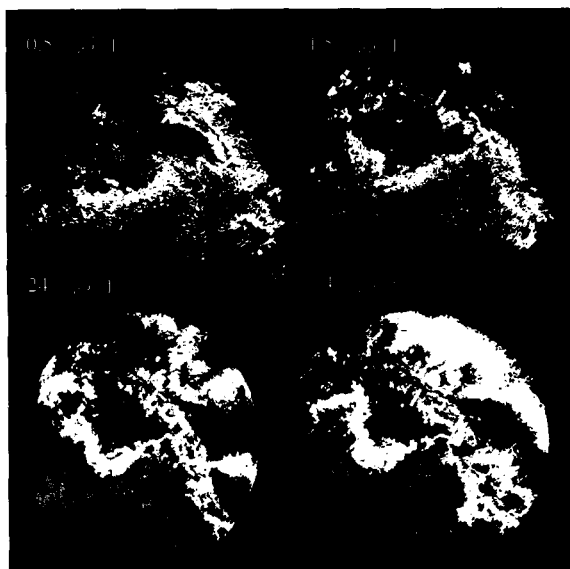


图 5 不同仰角的速度场
(箭头的方向是根据径向速度极值和零线判断的低层及高层实际风的风向)

Fig. 5 The velocity maps at different elevations
(The arrow direction indicates the realtime wind directions of the low level and high level which deduced from the maximum of radial velocity and zero line)

Mid-Altitude Radial Convergence (MARC)
in a Mature MCS

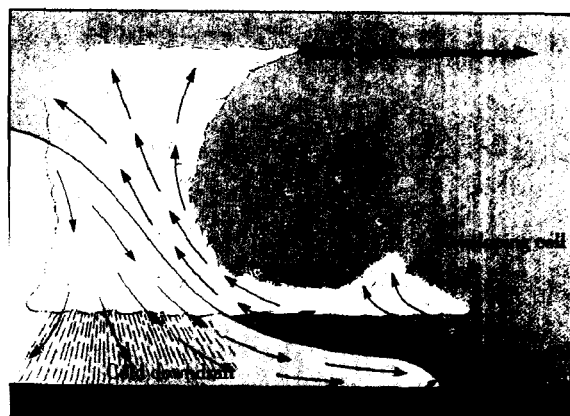
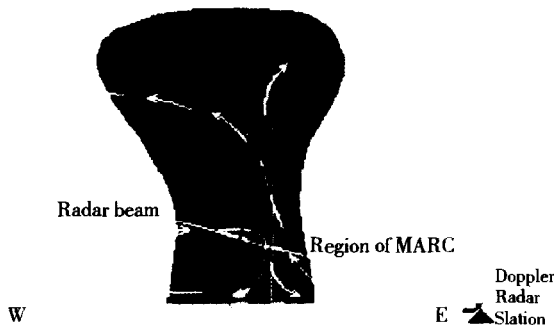


图 6 中层径向辐合(Midaltitude Radial Convergence) (Schmocker, 1996) (上)和 MCS 中的气流(下)
Fig. 6 Midaltitude Radial convergence (Schmocker, 1996) (top) and the air flow of MCS (bottom)

图6上图是成熟的MCS的垂直剖面图,黑色三角为雷达位置,白色线为雷达射线,黄色箭头为上升暖湿气流和下沉干冷空气,黑色椭圆为中尺度径向辐合区。下图为MCS中的气流,红色箭头为暖空气入流,蓝色箭头为中空入流,气流干冷下沉,近地面层的蓝色箭头为低空外流,黑色粗箭头为风暴移动方向,上面黑色细箭头所指为正在发展的风暴单体,下面黑色细箭头所指为冷暖空气形成界面,也就是经常说的阵风锋、密度流等。

在本例中我们也发现了与图6完全符合的中层径向辐合和中层入流。12:12时,从图7右下图可以看到2个对流单体,说明在对流单体的移动方向上触发了新对流单体的产生。在高度大约为2.5~7 km之间有一强度达45~55 dBZ的强回波区,从图7左图看应为中层径向辐合区,飢线就位于强回波的前下方。在地面至500m高度地方,没有回波,

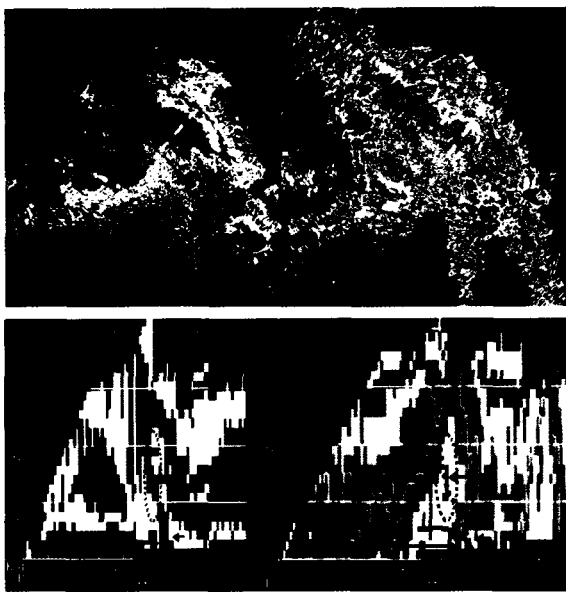


图7 沿着移动方向的阵风锋径向速度和强度回波的垂直剖面

(白色箭头为切面方向,红色椭圆点线为中层径向辐合,蓝色箭头(上)为中空入流,蓝色箭头(下)为低空外流,蓝色粗线为阵风锋,黑点线为不连续线)

Fig.7 The vertical sections of radial velocity and echo intensity along the moving direction of gust front

(The white arrow indicates the direction of section; the red elliptical dot line indicates the MRC; the blue arrow(top) indicates the in flow of middle level; the blue arrow(bottom) indicates the out flow of low level; the bold blue line indicates the gust front; the black dot line indicates the discontinuous line)

这和雷达仰角有关,距离雷达较远的地面很难测到回波。

从速度垂直剖面图可以更清楚地看到中层径向辐合区(图7左)。在高度低于1 km的地方,距离雷达50~55 km处有一明显大速度区,风速达到19 m/s,方向为离开雷达,此处为地面阵风锋后部的干冷空气出流。在同一高度,距离雷达约60 km处也有一弱正速度区,风速仅为0~5 m/s,方向为朝向雷达,为阵风锋前部的暖湿空气入流。风速梯度大,风向突变,风速辐合线距雷达约58 km。在距离雷达20~40 km处、高度为2.5~7 km之间有大速度区,从地面到此高度,不连续线呈后倾趋势。不连续线的前方有一条宽度约10 km的正速度区,此处即为中层径向辐合区,与强度垂直剖面基本一致。

6 总结和讨论

(1)从济南单站的地面要素可以显示出有飢线过境,过境时间为2004年4月17日上午11:30分左右,过济阳时间为12:10,飢线移速约为每小时45~60 km左右。过境处出现了风向急转,风速剧增,气压陡升,气温骤降的典型飢线现象,与Wakimoto 1982年总结的阵风锋的模型吻合。

(2)多普勒雷达速度和回波图像反演出典型的密度流外流边界阵风锋(飢线)的特征。强降水在雷达回波图上表现为一条狭窄的弧状强回波带,强回波带的后方再发展出宽度加大而强度较弱的回波区,与强对流回波带相配合,外流边界位于其前方。

(3)体扫的各仰角速度场显示出飢线合理的空间结构,由于地球曲率和大气折射的作用,在雷达回波上阵风锋的长度表现为低仰角长,高仰角短,而距离表现为低仰角远,高仰角近。

(4)速度垂直剖面上存在典型的中层径向辐合MARC,高度大约为2.5~7 km之间,反映出强对流存在明显的后方中层入流。

参考文献:

- [1] 马禹,王旭,陶祖钰. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征[J]. 自然科学进展,1997,7(6):701-706.
- [2] 项续康,江吉喜. 我国南方地区的中尺度对流复合体[J]. 应用气象学报,1995,6(1):1-17.
- [3] 李玉兰,王倩榕,郑新江,等. 我国西南—华南地区中尺度对流复合体(MCC)的研究[J]. 大气科学,1989(13):417-422.
- [4] 卓鸿,姚秀萍,郑永光,等. 黄河下游春季一次MCS暴雨过程的综合分析[J]. 气象学报,2004,62(4):504-511.
- [5] 卓鸿,胡学敏,李本亮,等. 济南一次春季MCS暴雨的风场解析[J]. 山东气象,2005,1:13-15.
- [6] Houze R A, Rutledge S A, Diggerstaff M I, et al. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1985(70): 609-619.
- [7] Doviak R J. 多普勒雷达和天气观测[M]. 北京:科学出版社,1984. 303-312.

(下转第87页)

- [19] 马嵩乃. 遥感信息模型[M]. 北京:北京大学出版社,1997. 41 - 59.
- [20] 李星敏,刘安麟,张树誉,等. 热惯量方法在陕西省干旱遥感监测中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(1):54 - 59.
- [21] 王小平,张谋草,郭海英,等. 利用地面遥感仪器对土壤水分的监测试验[J]. 干旱气象,2005,24(4):57 - 60.

Method of Drought Monitor by Remote Sensing in Four Provinces of Northwest China: Erads Software as an Example

LI Xingmin¹, YANG Xingguo², WANG Zhao³, SHA Daobin³, DENG Fengdong³

(1. Shaanxi Meteorological Service Observatory for Economic Crop, Xi'an 710015, China;
2. Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China; 3. Shaanxi Remote Sensing Information
Center for Agriculture, Xi'an 710015, China)

Abstract: The method for drought monitoring by remote sensing and monitoring flow were introduced in the paper, which can transfer NOAA/AVHRR data received from DVBS system to Erads software where geographical correction and image mosaic can be done, and drought monitoring model can be made and run. Drought occurred in four provinces of Northwest China in the last ten - day of July, 2006 was monitored by using this method and work flow, and the results were in agreement with observations of soil moisture in this area. It shows if proper drought monitor model is chosen, the drought magnitude can be monitored by this method and work flow.

Key words: drought; remote sensing; monitoring

(上接第 52 页)

Analysis of a Gust Front 3 - D Structure by Using Doppler Radar Data

WANG Zhenguo¹, ZHUO Hong², LI Chunhu³, LIU Aimei², YANG Furong²

(1. Gannan Meteorological Bureau of Gansu Province, Hezuo 747000, China; 2. Ji'nan Meteorological
Bureau of Shandong Province, Ji'nan 250001, China; 3. Shandong Provincial Meteorological Bureau, Ji'nan 250001, China)

Abstract: A spring gust front occurred on April 17, 2003 over Ji'nan was analyzed by using Doppler radar data. A typical density current outflow boundary (gust front) characteristic was retrieved, which presented a strong narrow bow echo belt before a wide weak echo region on Doppler radar echo images. Different elevation velocity fields showed a reasonable spatial structure of the gust front. The characteristic of the gust front on Doppler Radar echo images presented the length was long (short) at low (high) elevation and the distance was far (near) at low (high) elevation. A typical midaltitude radial convergence (MARC) at the height of 2.5 - 7 km on velocity vertical profile indicated an evident rear middle - level inflow. A phenomenon that the gust front was near the ground was found with radar elevation increase.

Key words: spring gust front; Doppler radar; spatial structure; MARC