

# 多普勒雷达速度场特征 在人工增雨作业中的判据指标应用

李红斌<sup>1</sup> 何玉科<sup>1</sup> 姚展予<sup>2</sup> 赵繁盛<sup>1</sup> 张家伟<sup>1</sup>

(1. 大连市人工影响天气办公室, 大连 116001;  
2. 中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室)

**提 要:** 对大连市2003年6月至2005年10月43次降水天气过程的多普勒雷达速度场资料进行了统计和分析, 给出了几种常见的雷达回波零速度线特征分别呈“S”型、“弓”型和速度不对称型等分布特征时对人工增雨作业潜力分析和作业条件判别的几个判据指标, 作为增雨作业决策的辅助判别指标。

**关键词:** 雷达速度场特征 人工增雨 作业判据

## Application of Doppler Radar Velocity Field Characters to Precipitation Enhancement Operation

Li Hongbin<sup>1</sup> He Yuke<sup>1</sup> Yao Zhanyu<sup>2</sup> Zhao Fansheng<sup>1</sup> Zhang Jiawei<sup>1</sup>

(1 Dalian Weather Modification Office, Dalian 116001; 2. Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences)

**Abstract:** By statistical analysis of Doppler radar velocity field data of forty-three rainfall processes from June 2003 to October 2005 at Dalian district, the effects of radar velocity field characters on future rainfall variation and precipitation enhancement condition were gained, the indications of several familiar echo velocity characters of the cloud systems on the developing changes of the coming rainfall were obtained. Several criterions were concluded for analyzing the precipitation potential region and the opportunity for precipitation enhancement operation while radar echo showed “s” or bow shape. By using these characters as assistant criterions in precipitation enhancement command, the practical validation showed good results in the precipitation enhancement operation at Dalian district in spring and summer of 2006. These criterions have become as important estimating indexes in the real-time precipitation enhancement operation control at Dalian district.

**Key Words:** radar velocity field character precipitation enhancement operation operation criterion

中国气象局新技术推广应用项目(CMATG2006M47)资助。

收稿日期:2007年7月23日; 修定稿日期:2008年2月25日

## 引 言

受到大气中诸多条件制约,自然云降水通常不能将空中云水充分降落到地面,且统计表明,我国北方地区<sup>[1]</sup>自然降落到地面的云水只占空中总云水量的 19%~30%,其主要原因,北方降雨云系是以冷云或混合性云为主<sup>[2]</sup>,自然云中通常过冷水较多,而凝结核较少。如辽宁省飞机增雨观测到的层状云中凝结核平均只有 3~5 个/升,积层混合云中凝结核平均 7~9 个/升,实验表明,要产生充分降水,对稳定性降雨云中凝结核(或冰晶)应达到 20~100 个/升<sup>[2]</sup>。所以,人工增雨就是根据不同的降雨云体的物理特性,选择云发展的合适时机,向云中的适宜部位、适量地播撒人工催化剂,促使云层增加降水量的过程<sup>[3]</sup>。因此,在实际作业中,要提高降水效益,必须在充分分析增雨潜力的条件下,科学地选择作业时机、部位和催化剂量<sup>[3]</sup>。

增雨潜力分析和作业时机选择对作业成败至关重要。通常稳定性降雨云其作业的最佳时机应选择在降水云系的发展旺盛时期<sup>[2]</sup>;积状云作业则选择在对流云发展的初期,即产生降水 5、6 分钟时。因为,此时降雨云系中存在着使云系和降水维持或发展的上升运动和暖湿空气<sup>[4]</sup>,源源不断的水汽输送和上升运动对云中充足的过冷水起到保障作用<sup>[5]</sup>,才能经过人工催化后,降水逐步加大,因此,这是有利于人工增雨作业的宏观场上很重要的增雨潜力条件之一<sup>[5]</sup>。实践表明,无论何种降雨云,若作业时机选择在降水云系处于减弱(即使作业当时降水回波很强)阶段,其结果不仅造成人工增雨弹的损失浪费,同时也会加速降水的减弱消失。因此,增雨潜力分析和作业时机选择是人工增雨科学作业的前提。我国自 20 世纪 50 年代起就陆续开展和实施以农业抗旱和水库蓄水为目的的人工增雨作业,并同时将作业的组织实施与试验研究相结合进行。特别进入 80 年代后,全

国许多省市,如黑龙江<sup>[6]</sup>、河北、河南<sup>[7]</sup>、山东等省率先系统地开展了人工增雨作业技术指挥系统,各地总结了以雷达回波参数<sup>[8-10]</sup>为主的增雨潜力分析和作业判别指标,更多的是从云降水微物理方面进行研究和探索。近些年,随着新一代多普勒雷达在全国各地的普及和建设,雷达探测所获得的数据产品为科学指挥人工增雨作业提供了更为丰富、准确的科学依据,特别是多普勒雷达速度场在人影作业中的应用也得到不断的深入和拓展<sup>[11]</sup>,但目前对多普勒雷达速度场特征在人工增雨作业决策指挥中应用的却很少。

大连市新一代多普勒雷达于 2003 年 6 月建成并投入使用。同年“火箭增雨流动作业决策指挥系统的研究”的科研课题在大连市科技局立项。大连市人影办通过三年来的业务科研和作业实践,不断摸索,系统地总结了以多普勒雷达参数为主的、适合大连地区的人工增雨作业潜力分析和时机选择的作业判别指标体系<sup>[12]</sup>,特别是着重分析了雷达回波速度场的零速度线特征在增雨潜力分析和作业时机选择的宏观场中的判据指标。作为辅助作业判据指标,在 2006 年大连春夏的增雨作业中得到应用,取得了较好的效果,目前已作为大连人工增雨作业决策和指挥的重要判别指标之一。

## 1 速度场分布特征及其增雨作业中的指示意义

### 1.1 资料来源及分析

对大连地区 2003 年 6 月至 2005 年 10 月的 43 次降水天气过程多普勒雷达回波 PPI、RHI 强度和速度场资料进行了统计和分析,表明大连地区主要降水云系为稳定性的层状云(39%)和积层混合云(42%),积状云降水较少(19%)。分别对大范围的稳定性降雨云系和对流性降雨云系每个个例速度场

进行分析,得到了几种常见的对增雨作业潜力分析和作业时机选择具有指示意义的速度场及零速度线的分布特征。

## 1.2 稳定性降水云系雷达 PPI 速度场特征及增雨作业指标判别

对 43 次降水天气过程进行分类统计,有 34 次为稳定性降雨过程,9 次为对流性降水过程。在稳定性降水过程中,统计和分析发现,产生“S”型、“弓”型和不对称型速度场零速度线分布特征的个例分别为 6、5、10 次,出现概率约占稳定性降水总数的 61%。

### 1.2.1 “S”型零速度线特征及作业指标分析

在大范围稳定性降水云系中,若 PPI 回波速度场上出现了零速度线通过本站且呈对称的“S”型分布(图 1,见彩页)特征时,其测站周围上空风随高度呈顺时针变化,为暖平流,存在上升的暖湿气流,表明降雨云系将进一步发展<sup>[4]</sup>。对应的 PPI 降雨回波强度随时间变化在不断加强,地面降水也在不断加强,降雨云系处于发展加强阶段,根据人工增雨潜力云判别分析得出:此时的降雨云系具有较好的增雨潜力<sup>[5]</sup>,是实施增雨作业的有利时机<sup>[2]</sup>。

反之,若 PPI 回波速度场上出现了通过本站的零速度线呈反“S”型(图 2,见彩页)弯曲时,表明测站周围风随高度逆时针旋转,为冷平流,即云中存在着下沉运动,预示未来降雨云系将减弱消亡。对应的该时段 PPI 降雨回波强度随时间出现了逐渐减弱的变化,此时地面降水逐渐减弱,由人工增雨潜力判别<sup>[2]</sup>分析得出:即使仍具备雷达其它作业判据指标,此时的降雨云系也不具有增雨潜力<sup>[5]</sup>,是作业结束的判别指标。

### 1.2.2 “弓”型零速度线特征及作业指标判别

在大范围稳定性降水云系中,当 PPI 回

波速度场出现了通过本站的零速度线呈“弓”型分布特征时,对人工增雨作业潜力分析和时机选择将有二种指示意义。其一,若“弓”型零速传线呈辐散流场时(图 3,见彩页),测站周围空气对应着垂直下沉运动,表明此时降水云系处于减弱消亡阶段,地面降水出现了逐渐减弱的趋势。根据增雨潜力判别条件,“弓”型辐散速度场出现后,其降雨云系不具有增雨潜力<sup>[2]</sup>,是增雨作业结束的判别指标。分析该时刻本站附近上空风垂直廓线变化(图 4,见彩页)特征也可以看到,此时本站附近低层的风随高度呈逆时针变化,出现了冷平流,而高层风则随高度呈顺时针旋转,是暖平流,且风随高度和时间的变化特征可以看到高(低)层的暖(冷)平流不断加强,说明此时大气正在趋向稳定层结,动力上升运动和水汽输送趋于逐渐减弱,预示降雨云系将要减弱消亡<sup>[2]</sup>。从对应 PPI 降雨回波强度随时间的变化也显示降雨云系逐渐减弱,动力下沉运动和大气稳定层结的配置表明:出现“弓”型辐散速度场时,降雨云系不具有增雨潜力<sup>[5]</sup>,是增雨作业结束的判别指标。

其二,当“弓”型零速度线为辐合流场时(图 5,见彩页),测站周围附近为垂直上升运动,对应地面降水逐渐加强,存在有利于人工增雨作业的动力场条件<sup>[5]</sup>。分析该时刻本站附近上空风的垂直廓线变化(图 6,见彩页)有:风随高度呈顺时针旋转,有暖平流,所以,大气中存在着上升的暖湿气流,大气层结的热力和动力不稳定,将促使动力上升运动不断加强,此时的降水云系处于发展旺盛阶段<sup>[2]</sup>。从分析的 PPI 回波强度随时间加强的变化趋势也表明,出现“弓”型辐合速度场时,降雨云系具有较好的增雨潜力<sup>[5]</sup>,可作为增雨作业时机选择的判据指标。

### 1.2.3 不对称速度场特征及增雨作业判别

在稳定性降雨过程中,出现频率最大的是速度不对称特征,即速度场中的出(入)流

区面积或速度大小不等。通过统计分析,速度场不对称情况对人工增雨作业潜力也有两种指示意义。其一,本站近地面层上有正、负面积分布不对称区,当入流区面积大于出流区面积时(图7,见彩页),且入流速度大于出流速度时,表明近地面辐合不断加强<sup>[13]</sup>,有利于降雨云系的发展,并看到该不对称速度场呈“S”型分布特征,表明有暖平流存在,因此,动力上升运动和暖湿空气输送的配置关系促使该降雨云系在发展旺盛时期,此时,地面的降雨也不断加大,根据增雨潜力判别条件<sup>[2]</sup>得出:其降雨云系具有较好的增雨潜力<sup>[3]</sup>,是实施增雨作业的有利时机<sup>[2]</sup>。

反之,若出现相反的不对称速度场分布特征,即当速度场的出流面积大于入流面积(图略),且出流速度大于入流速度时,表明测站附近地面为辐散流场,辐散下沉运动将预示降雨云系不断减弱消亡<sup>[3]</sup>,此时,地面降水逐渐减小,根据增雨潜力判别得出:该不对称速度场出现时,对应的降雨云系不具有人工增雨潜力<sup>[5]</sup>,是人工增雨作业结束的判别指标。

### 1.3 不稳定性降雨回波 RHI 速度场特征及增雨作业判别

在对流性降雨云系中,沿回波的移动方向取 RHI 回波速度场,当出现低层辐合、高层辐散时(图8,见彩页;其回波的移动方向为图中方位角所在方向),此时垂直方向对应上升运动,有利于对流云的维持和发展,表明降雨云系将不断发展加强<sup>[4]</sup>。从 RHI 回波强度图变化(图略)情况也可以看出:降雨云团在迅速发展,地面降水逐渐增大,表明该云系具有较好的人工增雨潜力,是实施增雨作业的有利时机<sup>[2]</sup>;反之,若低层辐合大于高层辐散,则云中为下沉运动<sup>[4]</sup>,则该降雨云系不具有增雨潜力<sup>[5]</sup>,是结束作业的重要判据。

## 2 个例分析

利用回波速度场的零速度线特征作为增雨作业潜力分析和时机选择的辅助判别指标,在2006年大连地区春夏几次增雨作业过程中进行了应用,取得良好效果。以2006年5月5日一次天气过程为例进行说明。

受高空槽和地面倒槽共同影响,2006年5月5日,大连市出现了一次全区范围的稳定性降水天气过程。市人影办结合抗旱和城区绿化需求组织适时开展了火箭人工增雨作业。根据雷达实时监测,5日上午10时37分,从回波 PPI 上看到,全区出现了大片絮状结构降水回波,强度在20~40dBz之间,通过高显 RHI,发现云顶高度为5~6km,此时,回波 PPI 速度场上已出现了明显的呈辐合的“弓”型零速度线(图9,见彩页)特征,表明测站近地面为辐合上升运动。从分析的该时刻测站风的垂直廓线图(图10,见彩页)看到:本站上空风随高度呈明显的顺时针旋转,有暖平流存在。暖平流辐合表明大气中存在使降雨维持和发展的水汽条件和上升运动<sup>[4]</sup>,降雨云系处于发展阶段,有较好的增雨潜力<sup>[5]</sup>,也是增雨作业的有利时机<sup>[2]</sup>。

速度场上已出现了明显的呈辐合的“弓”型零速度线(图9,见彩页)特征,表明测站近地面为辐合上升运动。从分析的该时刻测站风的垂直廓线图(图10,见彩页)看到:本站上空风随高度呈明显的顺时针旋转,有暖平流存在。暖平流辐合表明大气中存在使降雨维持和发展的水汽条件和上升运动<sup>[4]</sup>,降雨云系处于发展阶段,有较好的增雨潜力<sup>[5]</sup>,也是增雨作业的有利时机<sup>[2]</sup>。

市作业指挥中心通过雷达作业指标判别模型,并参照速度场特征,通过作业指挥系统的实时运行,于10时40分,大连市区、旅顺、金州三个作业点同时量化输出了火箭增雨作业技术方案<sup>[14]</sup>,指挥中心经空域请示后,向这三个作业点发出了作业指令(即作业仰角、方位角、用弹量等),各地相继实施了催化作业同

时。对大连、旅顺两个作业点影响区内的自动站逐时雨量资料(图 11, 见彩页)分析看到: 作业前, 降雨逐渐增加; 作业后 30 分钟至一小时的降雨量明显增大, 从图中可看到, 在 10—11 时一小时内, 降水增加的梯度由作业前的 1.6mm/h 迅速增大到 3.0mm/h, 11—12 时内增大到 4.5mm/h, 作业后降水强度显著增大。同时, 通过雷达跟踪监测分析, 作业前, 作业云体回波强度呈缓慢发展趋势, 作业后半小时左右, 其云体附近的回波强度明显增强, 云体迅速发展, 表明催化效果明显。

作业后, 降水从 10 点 40 分持续到 13 时 40 分时, 回波 PPI 速度场上出现了通过本站的零速度线呈“弓”型分布的辐散流场(图 12, 见彩页), 动力场中将出现下沉气流, 不利于云系的维持和发展; 从 PPI 强度随时间变化可看到, 降雨回波强度随时间明显减弱, 根据增雨作业潜力指标判断, 该云系已不具有人工增雨潜力。市作业指挥中心立即向各增雨作业点发出作业结束指令, 作业车辆返回。从大连、旅顺影响区内自动站雨量逐时变化可以看到, 从 14 时降水迅速减小, 14—15 时降水 1.3mm/h, 15—16 时降水 0.1mm/h。

采用回波速度场的零速度线分布特征从动力学和水汽条件方面分析人工增雨作业潜力和作业时机的选择, 应用效果显著, 目前该方法已作为大连市决策实时指挥人工增雨作业的辅助的重要判别指标。

### 3 小 结

利用多普勒雷达实时决策指挥人工增雨作业, 通常采用雷达回波强度、云顶高度、负温层厚度、液水量含量等相关参数进行作业指标判别。而通过分析雷达回波速度场则从宏观上反映了使降雨云系发展维持的动力场和水汽条件, 也是人工增雨作业潜力分析和作业时机选择的重要依据。

(1) 当雷达回波速度场出现了通过本站的零速度线呈“S”型分布特征时, 表示降雨云系具有较好的增雨潜力, 是实施增雨作业

的有利时机; 反之, 是作业结束的指标判据。

(2) 当雷达回波速度场出现了通过本站的零速度线呈“弓”型辐合(辐散)场特征时, 表示降雨云系具有(不具有)增雨潜力, 是实施(结束)增雨作业的判据指标。

(3) 当速度场呈不对称“S”型辐合流场特征时, 表明降雨云系具有较好增雨潜力; 反之, 速度场呈不对称辐散特征时, 表明降雨云系不具有增雨潜力, 是作业结束的判据指标。

(4) 当对流云回波 RHI 速度场中出现低层辐合、高层辐散, 且高层辐散大于低层辐合时, 表明云系具有增雨潜力, 是作业最佳时机; 反之, 则不具增雨潜力。

### 参考文献

- [1] 门宝辉, 赵樊京, 梁川. 我国北方地区水资源可持续利用状况评价[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 4: 42-46.
- [2] 人工影响天气岗位培训教材[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] 李大山主编. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [4] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文著[M]. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1979.
- [5] 毛节泰 郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 192-201.
- [6] 李大山, 等著. 人工影响天气技术体系的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [7] 张存. 周毓荃主编. 人工影响天气优化技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [8] 张昕莹, 金凤岭. 卫星云图雷达回波在人工增雨时机选择中的应用[J]. 气象, 2003, 29(8): 78-85.
- [9] 迟竹萍, 陈金敏, 朱平盛. 利用数字化雷达回波参数分析人工增雨播云条件[J]. 气象, 2001, 27(4): 65-72.
- [10] 白卡娃. 江苏盛夏飞机人工增雨作业的雷达气象学分析[J]. 气象科学, 1999, 19(4): 125-133.
- [11] 李子华, 宫福久. 雷达在天气导变中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [12] 李红斌, 濮文耀, 张殿刚, 等. 火箭增雨作业中雷达和 3S 技术的应用[J]. 气象科技, 2004, 32(4): 247-250.
- [13] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等编. 新一代天气雷达讲义[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [14] 李红斌, 周德平, 濮文耀. 火箭增雨作业部位和催化剂量的研究[J]. 气象, 2005, 31(10): 42-46.

# 李红斌等：多勒雷达速度场特征在人工增雨作业中的判据指标应用

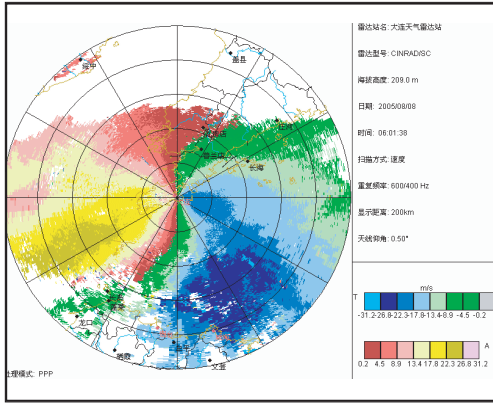


图7 不对称雷达速度场回波特征(辐合)

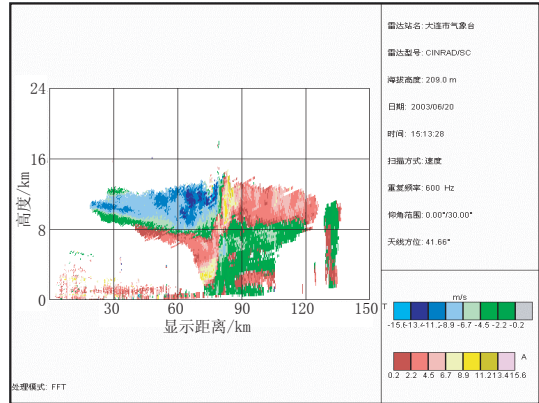


图8 2003年6月20日15时13分对流云RHI速度图

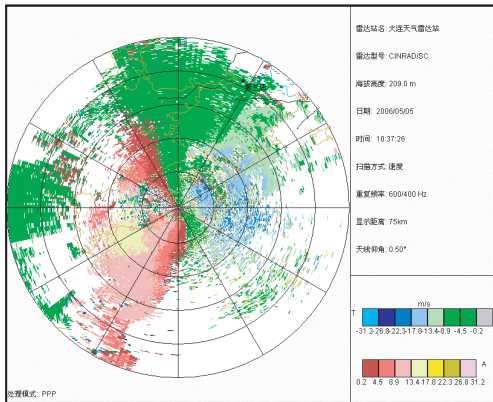


图9 “弓”型辐合流场零速度线回波特征

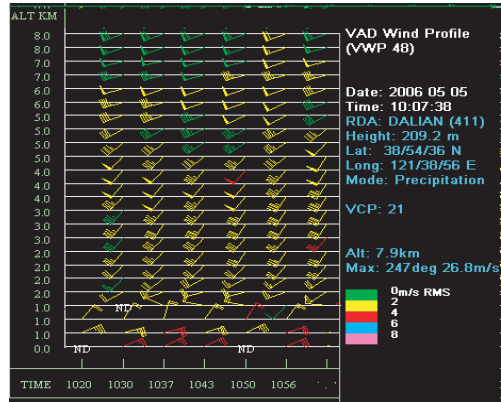


图10 2004年6月16日17-19时段的垂直风廓线

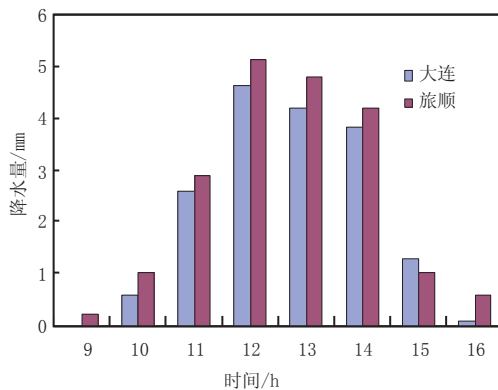


图11 大连、旅顺逐时降水分布图

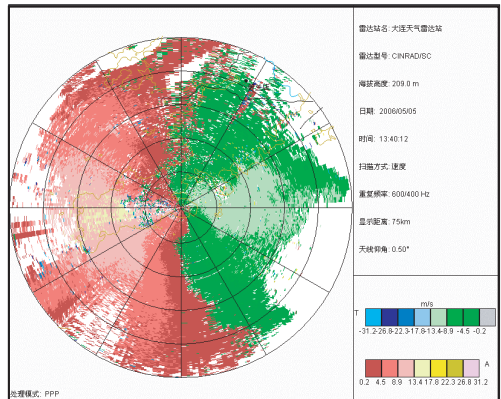


图12 “弓”型辐散流场零速度线回波特征



# 李红斌等：多勒雷达速度场特征在人工增雨作业中的判据指标应用

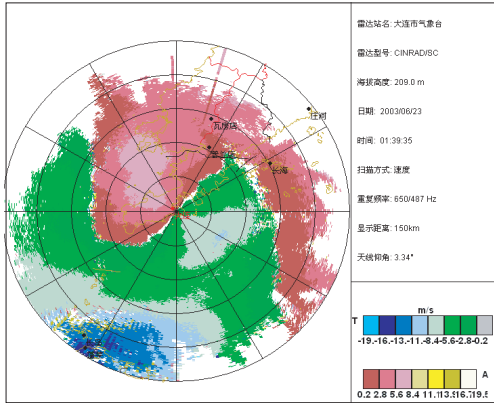


图1 “S”型零速度线回波特征

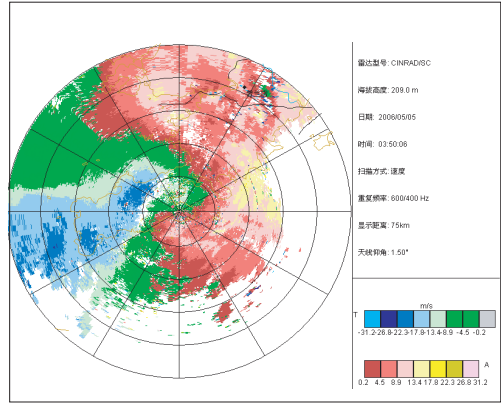


图2 反“S”型零速度线回波特征

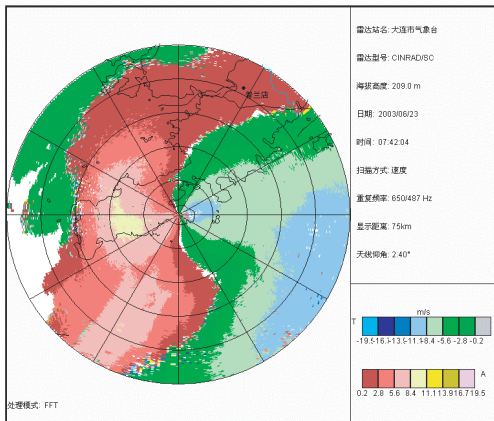


图3 “弓”型辐散流场零速度线回波特征

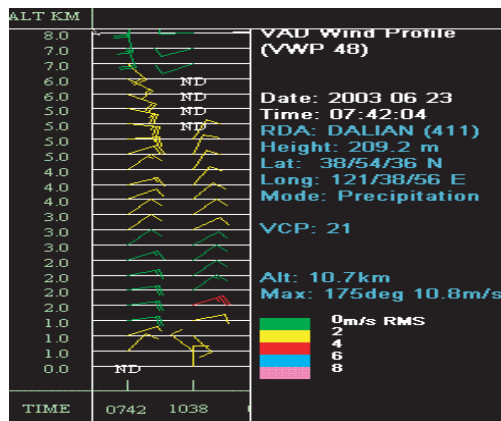


图4 辐散“弓”型速度场特征的垂直风廓线图

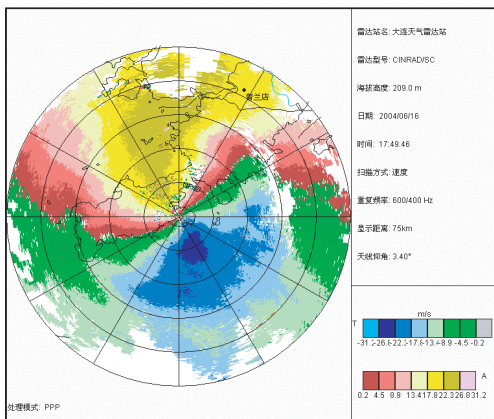


图5 “弓”型辐合流场零速度线回波特征图

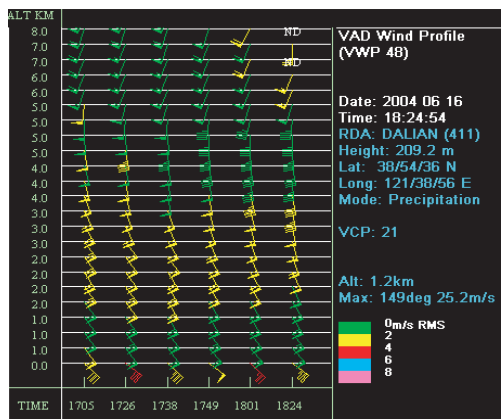


图6 辐合“弓”型速度场特征的垂直风廓线图