

# 多普勒雷达产品在祁连山区一次人工增雨作业中的应用分析

曹玲<sup>1,2</sup>, 李国昌<sup>3</sup>, 郭建华<sup>2</sup>, 陈和平<sup>2</sup>, 窦永祥<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; 3. 甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要** 利用多普勒雷达资料, 分析了2005年7月1日发生在河西中部及祁连山中段人工增雨降水过程的多普勒雷达回波及其产品的表现特征, 认为这次降水过程是由于大尺度天气系统造成了大范围降水回波长时间维持, 加之人工增雨作业共同影响的结果。其强度场、速度场具有混合性降水回波特征, 并且在增雨催化阶段表现显著。速度图上的辐合流场、风廓线产品特征及雷达垂直积分液态水含量产品对进行强降水落区、降水系统移动、地面降水估计具有较明确的指示意义。反射率因子图上的零度层亮带和速度图上的汇合流场特征是把握人工增雨作业时机和部位的重要依据。祁连山中段沿山不同海拔高度地面降水的时间和空间分布特征, 为检验增雨效果提供了研究依据。另外, 从天气学和物理量诊断方面对此次降水过程进行了分析。

**关键词** 人工增雨; 祁连山区; 层状云降水; 雷达回波特征

中图分类号 P412.25

文献标识码 A

## 引言

河西走廊位于青藏高原北部边缘, 受高原大地形影响, 自然降水稀少, 蒸发量大, 生态脆弱<sup>[1-2]</sup>。主要水资源来自发源于祁连山的黑河。近年来, 由于气候变暖和人为影响等原因, 使祁连山雪线上升, 积雪减少, 对黑河来水量造成很大威胁, 从而影响黑河流域农业生产和生态环境。及时运用最新科学技术和手段, 实施人工增雨(雪)作业, 是最直接也是最有效增加河西水资源的措施。开发利用祁连山人工增雨(雪)空中云水资源, 是提高大气降水效率, 缓解水资源短缺的一种有效途径。西部开发科技行动项目“祁连山空中水资源开发利用研究”项目组, 6月1日至7月31日在祁连山区进行了为期2个月的人工增雨外场试验, 重点开展了祁连山区降水性层状云系的微物理结构特征探测及物理评估研究工作。本文根据2005年7月1日飞机增雨降水过程的影响值资料, 着重分析了多普勒雷达回波的表现

特征和祁连山中段各海拔梯度地面降水的特征。

## 1 飞行作业时间及航线

人工增雨飞机7月1日上午08:31起飞, 11:43落地, 飞行航线为: 中川—景泰—武威—永昌—张掖—民乐—永昌—武威—景泰—中川, 历时3 h 12 min, 航程约1 200 km。在河西中部及祁连山中段作业时间从9:40开始至10:30结束。

## 2 天气背景

2005年6月30日08时500 hPa图上, 在巴尔喀什湖和新疆中部各有一低槽, 二者中间为一发展强烈的高压脊, 副热带高压在30°N附近活动, 控制我国东南地区。河西及祁连山区处于槽后中纬度偏西气流中。7月1日, 新疆中部低槽由于其后高压脊的作用, 明显东移南压, 且经向度加大, 副热带高压西伸北进, 在其西部边缘的青藏高原东部西南气

收稿日期 2005-09-20 改回日期 2005-11-28

基金项目 西部开发科技行动重大项目“祁连山空中水资源开发利用研究”(2004BA901A16)子课题“祁连山中段地形云物理结构和催化效率研究”及甘肃省科学技术研究项目“黑河流域气候预测及评估系统”(2005-05)共同资助

作者简介 曹玲(1963-), 女, 甘肃临泽人, 工程师, 从事天气预报与应用研究工作。E-mail: zycaoling88@163.com

流加强,将孟加拉湾的水汽带到河西中部地区。同时随新疆低槽东移的较强冷空气迅速进入河西和祁连山中段地区,与副高西部边缘的偏南暖湿气流交汇(图1),在该地区上空形成大面积降水云区。这种长波槽云系多为层状云,具有一定的含水量<sup>[3]</sup>。

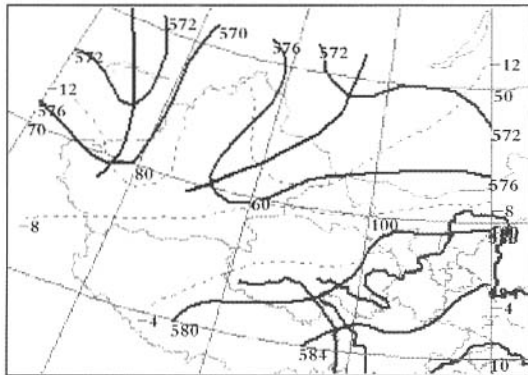


图1 7月1日(实线为等高线,虚线为等温线) 08时500 hPa环流形势

Fig. 1 500 hPa circulation situation at 08 00 on 1 July (solid line for contour, dotted line for isotherm)

700 hPa在6月30日和7月1日,柴达木低涡发展明显,表明有持续的偏南气流的水汽输送,在700~500 hPa形成相当的湿层,成为有利于降水的大气层结。地面图上6月30日08~20时,河西中部至高原东部也相应为地面热低压,整个新疆为高压控制,冷锋位于河西西部,移动速度缓慢,冷锋后云带较宽(图2),从预报角度讲有利于产生中雨以上降水。

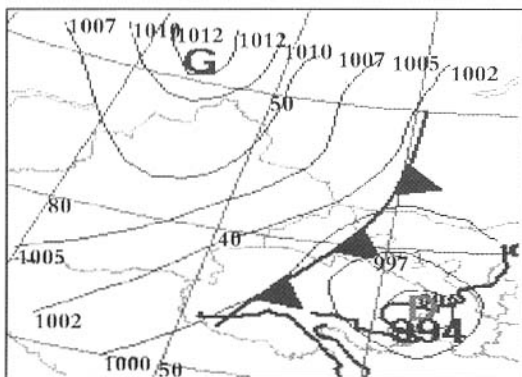


图2 6月30日14时地面形势

Fig. 2 Ground situation at 14 00 on 30 June

### 3 卫星云图

从7月1日10时至2日02时云图动画可以看出,降雨云带主要自西南向东北方向移动,700 hPa和500 hPa叠加的偏南气流输送的水汽与500 hPa高空低槽携带的冷空气在作业区上空交汇,形成较深厚的降雨云团。从16时云图(图3a)和18时云图(图3b)上看,主体云系仍在张掖上空,19时处于云体尾部,20时后随着主力云系继续东移,张掖逐渐处于主力云系后部的均匀云层中。2日02时以后降雨云系完全移出作业区,降水结束。

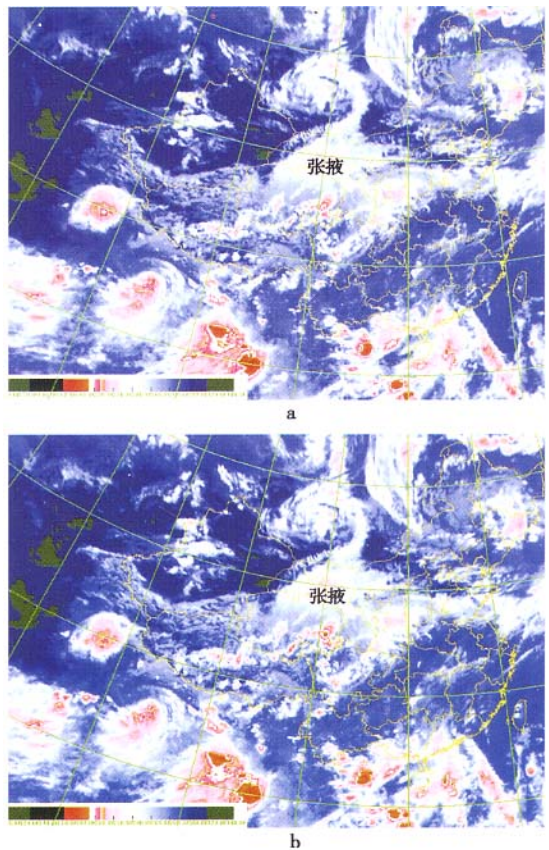


图3 2005年7月1日卫星云图

Fig. 3 Satellite cloud images on July 1st 2005 (a for 16 00 and b for 18 00)

### 4 物理量分析

#### 4.1 水汽通量

水汽是形成降水的必要条件,大气中水汽含量越高,越有利于形成较大降雨。一般水汽主要集中在低层,700 hPa的湿度与降水有直接的关系。在6月30日20时700 hPa的水汽通量场上,从青藏高

原中东部有一准东西向的宽广的水汽高值区。7月1日08时(图4a),这条水汽输送带转为西北—东南向,高原东侧有湿舌向河西中部伸展,河西中部及

祁连山区中段均包含在此湿舌中水汽通量梯度密集区<sup>[4-5]</sup>。在西南急流的引导下,水汽源源不断地向西北方向输送。

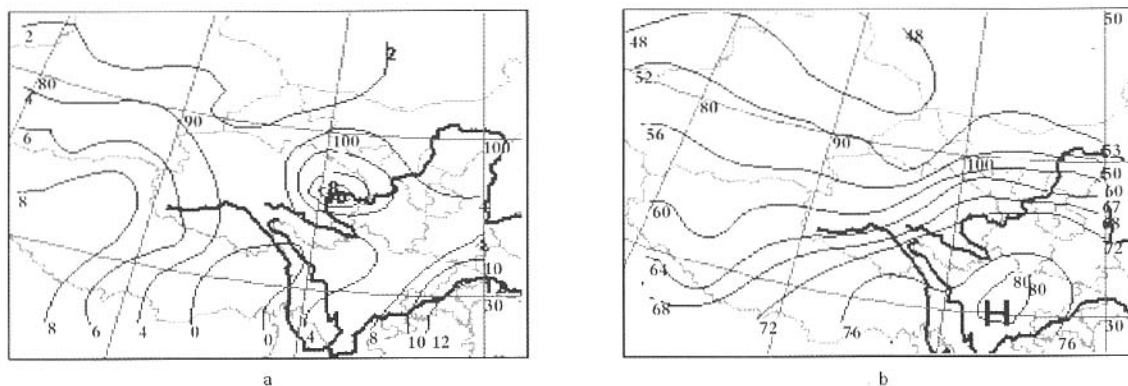


图4 2005年7月1日08时700 hPa物理量场(a:水汽通量场 b:假相当位温)

Fig. 4 Physical quantity fields at 700 hPa at 08:00 on July 1st, 2005

(a for water vapor flux field, b for pseudo-equivalent potential temperature)

## 4.2 假相当位温

假相当位温反映了大气中显热和潜热即能量的多少<sup>[6]</sup>。在6月30日20时700 hPa的假相当位温场上(图4b)40°N以南均处在 $\geq 58$  °C的高能区,在西南急流的引导下,高能区迅速向东北方向扩展。7月1日08时,在高原中部至河西中部形成一等假相当位温线密集带, $\geq 60$  °C的高能区已经控制了河西以东和以南地区。

## 5 多普勒天气雷达产品分析

### 5.1 雷达回波强度变化与增雨催化过程及降水的对应关系

2005年7月1日,多普勒天气雷达反射率因子在河西中部及祁连山中段大降水发生前后表现出的4个阶段性特征相当明显。回波强度的变化与雨强变化基本一致。

08时以前为降水回波初生阶段。配合副高西侧边缘西南气流发展,张掖西南方向上有小的块状回波东北移动,这是整个降水回波的前锋,强度在20~30 dBz之间,雷达平均1 h累积雨量在1 mm以下。

08~14时为降水回波发展加强阶段。08~10时块状回波增大较慢,移动也较慢。10~14时后块状回波增大比较迅速,其块状的大小差异也增大,从雷达回波可清楚地看到回波强度增大的过程。11时后块状回波迅速发展为絮状回波,在PPI上,絮状

回波特征表现为在比较大的范围内,回波边缘呈支离破碎,没有明显的边界,回波中夹有一个个结实的团块,似一团团棉花絮。这种絮状回波按排列顺序和结构特征,又可分为片絮状、带絮状、块絮状和破絮状<sup>[7]</sup>。重点作业区的测站东北偏东、东、东南、南等方向回波强度明显增大,至13时回波由分散的块状合并为积一层混合性回波,降雨回波几乎覆盖雷达探测范围内的所有地区,混合云回波结构明显。从13时01分组合反射因子图上看到(图5),测站东侧的回波强度明显大于西侧,最强回波达49 dBz,该时雷达最大1 h累积雨量达12.7 mm。这段时间正是飞机增雨作业和催化剂催化时段,降水云层的发展是否就是人工催化的结果,有待于进一步研究,但至少是有关。

14~20时为降水回波成熟稳定阶段。16时43分回波覆盖整个雷达探测范围,在张掖至山丹、民乐之间的强回波中心更加明显,显现出层状云降水回波持续性和积状云回波雨强大的特征,最大回波强度达50 dBz(图略)。17时51分,在3000~4000 m高度之间出现零度层亮带(图6),说明大气层结更加趋于稳定且水汽含量在此高度以上达到极大值<sup>[8,11]</sup>,由于催化剂只有在负温区才有效,所以此高度以上也是人工增雨作业的有力部位。至19时25分一直维持层积混合回波。强回波区始终位于测站东南方向山丹—民乐一带,且几乎呈准静止状态。16~20时也是地面降水集中稳定的时段,而且雨强



较大,雷达平均1 h 累积雨量估计 11.5 mm。  
20~23 时为降雨回波减弱东移阶段。20 时后

层状云回波开始向絮状回波演变,并逐渐东移。至  
23 时 57 分完全移出雷达探测范围。

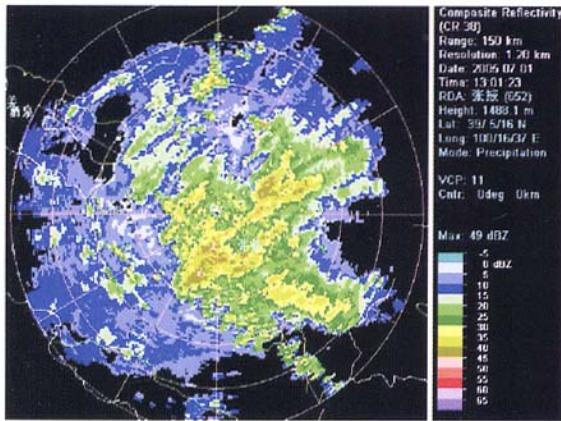


图5 7月1日13:01 组合反射率因子  
Fig.5 The composite radar reflectivity factor  
at 13:01 on July 1st, 2005

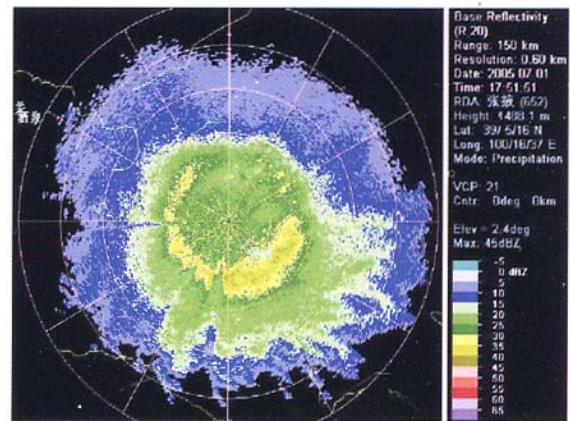


图6 7月1日17:51 零度层亮带回波  
Fig.6 The echo of 0°C layer bright band  
at 17:51 on July 1st

此次降水是在大尺度环流背景下,大范围回波  
缓慢移动,使得降水时间较长,造成累积雨量较大。  
在大范围层状云回波中明显的强回波区山丹和民乐  
县降雨量级尤其明显。

5.2 速度图特征

7月1日13~20 时速度图上,在低层3 300 m  
左右始终存在由负中心指向正中心的西北气流,负  
速度面积大于正速度面积,正速度区集中在张掖—  
山丹—民乐一带,在山丹至民乐一线形成气流辐合,  
对应在此区域的强回波区。从16 时 59 分的速度图  
上看到,3 400 m 以下零速度线呈“S”型(图

7a)<sup>[8,11]</sup>,说明从低层到中层,风向顺转,表现出明  
显的暖平流特征,为稳定降水形势。暖平流将水汽输  
送到降水区,形成湿中心,在大范围稳定云层中出现  
局部的积状云回波特征;另外在3 000 m 高度正负  
速度最大值分别达 5.7 m/s 和 -12.0 m/s,表现出  
明显的风速辐合。在17~18 时从近地层到3 300 m  
高度层表现为一汇合流场特征<sup>[8,11]</sup>(图 7b),气流汇  
合的区域也是回波强度大值区,对应这一时段地面  
降水相对较大,张掖、民乐、山丹 1 h 降水量在 3~4  
mm 之间。

5.3 垂直积分液态水含量与降水的对应关系

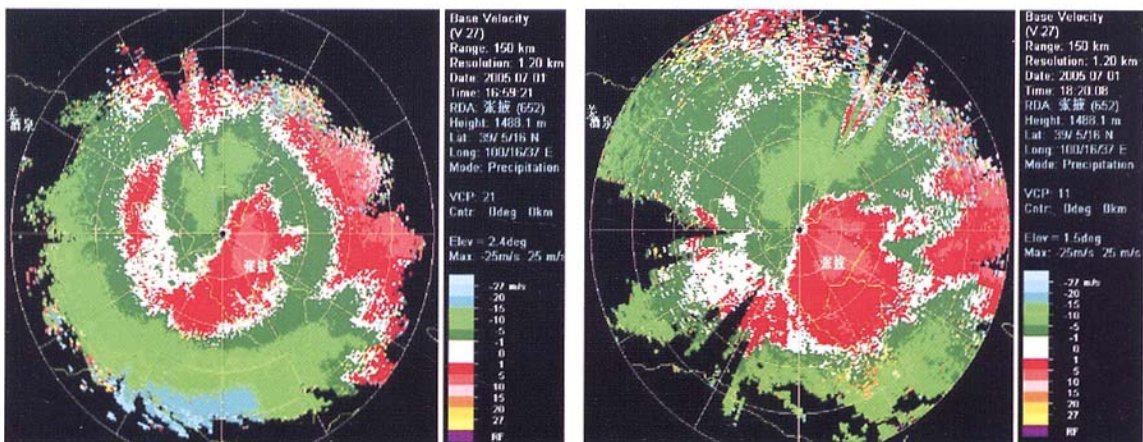


图7 速度图特征 (a.零速度线‘S’型 b.汇合流场)  
Fig.7 The velocity characteristics

将 7 月 1 日 14~24 时每 6 min 1 次的垂直积分液态水含量按小时计算平均值,与寺大隆、花寨子、民乐、山丹 4 个雨量点对应时次的平均降水量做时间演变趋势分析(图 8),发现二者变化非常一致。在增雨作业约 3 h 后的 14 时开始垂直积分液态水含量逐渐增大,18 时达到最大值,其时也是地面降水量最大的时段。

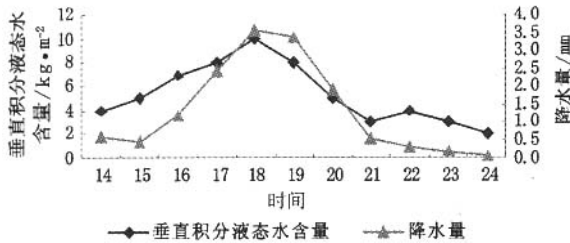


图 8 垂直积分液态水含量与降水量逐时演变  
Fig. 8 The hourly evolution of vertical integrated liquid water content and the precipitation

#### 5.4 风廓线表现出的流场特征

在 7 月 1 日 17 时 36 分~18 时 53 分的风廓线图(图略)从低层由 NW 风转为 SW 风,风向发生 270°顺转,说明从低层到高层存在着强烈的暖平流;在高层(5.2~5.5 km)存在明显的 SE 风与 SW 风的切变,表现出气层的不稳定。4.0~5.5 km 高度层上,风速仅 4~6 m/s,表明高空引导气流很弱,导致降雨系统东移缓慢(与组合反射率因子强中心移动速度极相符合),能较长时间影响本地造成大降水。

### 6 祁连山中段地面梯度降水分析

为配合这次人工增雨试验,项目组在祁连山中段沿山不同海拔高度布了 9 个自记雨量点,实时记录增雨作业前后各点雨量变化。雨量点地形分布大致是由西南向东北海拔高度逐渐降低,位置最南的点寺大隆站海拔高度最高,最北的点张掖站海拔高度最低,各雨量点分布及海拔高度见表 1。

表 1 祁连山中段沿山不同海拔高度雨量点分布

Tab. 1 The distribution of recording raingauge sites in the middle section of the Qilian Mountain

项目	张掖	西水	莺落峡	山丹	民乐	肃南	花寨	大渚麻	寺大隆
纬度/°N	38°56′	38°34′	38°48′	38°48′	38°27′	38°50′	38°37′	38°29′	38°27′
经度/°E	100°26′	100°18′	100°21′	101°05′	100°49′	99°37′	100°21′	100°29′	99°54′
海拔高度/m	1 484	2 714	1 671	1 766	2 282	2 312	2 301	2 398	2 863

通过对各雨量点降水量资料统计分析,从中可以得到以下几个特点:①在作业前 5 h 内,作业区基本无降水,而在催化后几小时内(15~20 时),作业区及下游各站 1 h 降水量最大达 2.5~5.4 mm,明显高于非作业区的高台和临泽(1 h 最大降水量为 1 mm);②图 9 是各雨量点 7 月 1 日 14~24 时降水量分布,从图中看到,作业区东部降水量明显高于西部。由于飞机在此区域重复作业,而且相对处于西部作业区的下游,加之辐合流场的作用,可能是造成这一结果的主要原因之一;③在作业区之外的寺大隆也为一大值中心,应该是海拔高度较高的原因,说明地形的作用不可忽视;④在大渚麻和肃南各有一降水量低值区(图 9),是因为在作业区边缘,人工增雨效果较弱;⑤主要影响区张掖、山丹、民乐地面降水增加明显,可能是人工增雨起了一定作用。

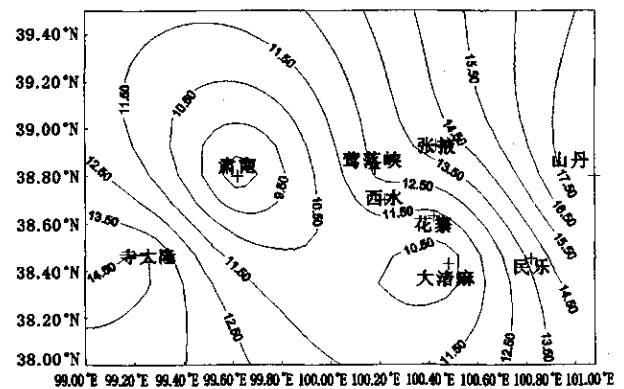


图 9 作业区 7 月 1 日 14~24 时降水量分布  
Fig. 9 The distribution of precipitation in the seeding area from 14:00 to 24:00 on July 1st

## 7 小 结

(1) 这次降水过程是在有利于降水的大尺度天气背景下进行人工增雨作业造成的结果。新疆低压槽东移南压和副热带高压西伸北抬为降水提供了大尺度天气环流背景,人工增雨作业使降水更加显著。降水系统在作业区滞留时间较长也是此次降水量显著的另一原因。

(2) 通过多普勒雷达可以实时监测增雨作业后降水云层的变化过程和特征。这次降水过程在增雨作业和催化阶段降水回波的变化特征十分明显,此期间的回波强度增加迅速,积层混合云特征显著,尤其在重点作业区及其下游降雨回波强度明显强于其他区域。

(3) 速度图上出现辐合流场与强降水落区有着很好的对应关系,气流汇合的区域对应着降水量大值区。低层到中层显著的暖平流,为降水提供了丰富的水汽条件。

(4) 气流汇合区域和零度层亮带可为人工增雨作业时机和部位提供可靠依据。因为气流汇合区域中的上升气流会把催化剂带到云中去,有利于催化的发生,零度层亮带以上水汽含量丰富且为负温区,在此部位作业更加有效。

(5) 降水系统的移向移速可利用风廓线产品来估算,当引导气流弱时,降雨系统会在一地滞留时间较长,产生的累积雨量大。

(6) 雷达垂直积分液态水含量产品与地面降水

量的对应关系非常好,利用这一产品可以比较准确地进行短时临近降水估计预报,为防汛抗洪工作提供可靠气象依据。

### 参考文献:

- [1] 宋连春, 韩永翔, 孙国武. 中亚和中国西北干旱气候变化特征及其对产业结构的影响[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 43-47.
- [2] 罗哲贤. 西北干旱研究的若干问题[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 55-58.
- [3] 中国气象局科技发展司. 人工影响天气岗位培训教材[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 28-29.
- [4] 崔玉琴. 西北内陆上空水汽输送及其源地[J]. 水利学报, 1994(9): 79-87.
- [5] 樊晓春, 董彦雄, 王若安. 一次强对流性天气的发生条件及云图演变特征[J]. 干旱气象, 2004, 22(增刊): 26-29.
- [6] 贾宏元, 穆建华, 孔维娜. 2004年宁夏一次区域性大到暴雨的诊断分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 24-29.
- [7] 中国气象局. 飞机人工增雨(雪)作业业务规范[S]. 北京: 气象出版社, 2000. 107-108.
- [8] 戴铁丕, 张培昌, 詹煜, 等. 雷达气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1995. 256-278.
- [9] 牛生杰, 孙照渤, 安夏兰. 层状云降水中小尺度系统的微物理结构观测研究[A]. 樊鹏. 陕甘宁人工增雨技术开发研究[C]. 北京: 气象出版社, 2003. 8-14.
- [10] 付双喜, 李照荣, 刘世祥, 等. 甘肃中部飞机人工增雨作业的雷达回波特征[J]. 干旱气象, 2004, 22(增刊): 30-33.
- [11] 总参气象局. 多普勒天气雷达资料分析与应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2001. 113-115.

## Application Analysis of Doppler Radar Products in an Artificial Rain Enhancement Operation in Qilian Mountain Area

CAO Ling<sup>1,2</sup>, LI Guo-chang<sup>3</sup>, GUO Jian-hua<sup>2</sup>, CHEN He-ping<sup>2</sup>, DOU Yong-xiang<sup>2</sup>

- (1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 2. Zhangye Meteorological Bureau of Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. Weather Modification Office of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

**Abstract** The characteristics of Doppler radar echoes and products in the artificial rainfall enhancement operation in the middle section of the Qilian Mountain on July 1st, 2005 were analyzed in this paper by using radar data. It shows that the large scale weather background which resulted in large range rainfall echoes keeping for long time, and weather modification caused this rainfall process together, and the intensity and the velocity fields present the mixed precipitation echo characteristics, especially remarkable during the rainfall enhancement phase. Results show that the convergence flow field on the velocity image, wind profile products and vertical integrated liquid water content (VIL) have specific instruction significance to prediction of rainfall area and rainfall moving system as well as ground precipitation; the 0 °C layer bright band on the base reflectivity image and the convergence flow field on the velocity image are important basis for rain enhancement opportunity and position. The spatial-temporal distribution characteristics of precipitation along the different heights above sea level in the mid-section of Qilian Mountain provide the study basis for examining the effects of rain enhancement. Additionally, the precipitation process was analyzed from the synoptic meteorology and physical quantity diagnoses in the paper.

**Key words**: rainfall enhancement; Qilian Mountain area; stratus precipitation; characteristic of Doppler radar echo