

火箭人工增雨作业的个例分析

渠永兴¹, 滕水昌², 蔡元成², 王生元²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020 2. 永昌县气象局, 甘肃 永昌 737200)

摘要 2005年6月27日甘肃永昌实施了火箭人工增雨作业, XDR数字化天气雷达对这次增雨过程进行了跟踪探测。通过分析这次人工增雨前后天气学背景和雷达回波演变情况, 证明在有利的天气形势下, 通过火箭人工增雨作业后, 雷达回波强度增强、回波范围和地面降水频率增大, 作业后24 h地面雨量的分布情况也佐证了这一结果。

关键词 火箭; 人工增雨; 天气背景; 效果分析

中图分类号 P481

文献标识码 A

引言

干旱是甘肃省河西地区的主要自然灾害之一, 每年造成的成灾面积约占各种自然灾害成灾面积一半以上。随着经济的发展, 水资源短缺矛盾日益突出, 人工增雨是增加自然云降水、开发利用空中水资源的重要有效途径。

人工增雨效果是指催化作业后云是否产生了预期的变化。这种变化既可以指降水是否有增加, 也可以指云的宏观物理量, 诸如云的厚度、持续时间、上升气流速度、云体温度以及冰晶数密度、大水滴数密度等是否产生预期的改变。前者是云的一系列物理变化的最终结果, 后者称为人工影响的直接效果或物理效应, 因而可以称为人工影响的间接效果。无论是评定人工增雨的直接效果, 还是分析人工增雨的间接效果, 雷达都是非常有效的工具^[1]。

1 有利于人工增雨的天气形势

1.1 影响系统

人工增雨是一门理论性和实践性都很强的学科。它的成功与否与天气系统和暖湿气流的配置关系非常密切, 与地形、地物及对云的催化部位、催化时机、催化量关系也密切相关。这次人工增雨作业过程前期的主要影响天气系统是500 hPa高空槽, 700 hPa的切变线和地面冷锋。

1.2 高空环流形势

6月26日08时500 hPa形势图上, 整个东亚地区呈2槽1脊型。在阿勒泰略偏北附近, 500 hPa图上有一中心为 $H = 542$ hPa, $T = -20$ °C的低值中心, 发展为温压场基本对称的深厚系统, 将要影响本地的低槽在天山一线, 本地区受其前部的暖脊控制。冷低压系统于27日继续东移南压影响本地, 在08时500 hPa, 乌鲁木齐、哈密、额济纳旗、酒泉、格尔木测站 ΔH_{24} 达 $-3 \sim -4$ hPa, ΔT_{24} 达 $-2 \sim -4$ °C, 酒泉500 hPa温度降为 -13 °C, 格尔木站500 hPa温度降为 -10 °C, ΔT_{24} 达 -4 °C, 在 $35^\circ \sim 45^\circ \text{N}$, $95^\circ \sim 103^\circ \text{E}$ 范围内500 hPa上空被 $-10 \sim 17$ °C的冷气团控制, 说明北方冷空气南侵内陆的影响比较强(图1)。

1.3 水汽含量和水汽输送特征

分析27日水汽网格资料发现, 从500~700 hPa高低空湿度有明显的增加, 比湿的增加主要是水汽输送引起的。特别是27日08时500 hPa在西宁—民勤—巴音毛道一线有一强的水汽输送带, SW风在 $8 \sim 20$ m/s之间, 高空槽基本位于急流上空, 这种配置使相对涡度平流更强, 使这里有强的垂直运动, 见图1中灰色箭头所示。而且在700 hPa西宁—民勤之间存在风的冷锋式辐合与切变, 风的辐合造成水汽通量的辐合。经对27日08时500 hPa($36^\circ \sim 42^\circ \text{N}$, $92^\circ \sim 103^\circ \text{E}$ 区域)的散度计算, 该区域的平均 $D = -6.74 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 说明该区有辐合, 这样的环流形势有利于较强降水产生和持续, 见图2中灰色线所示。

收稿日期 2005-12-05 改回日期 2006-02-07

基金项目 甘肃省人工增雨防雹作业体系工程建设科技开发第三批项目“测雨雷达现场指挥作业研究”(2004人影-3-03)和国家科技攻关项目“祁连山空中水资源开发利用研究”(2004BA901A16)共同资助

作者简介 渠永兴(1951-)男, 山西祁县人, 工程师, 主要从事人工影响天气研究。E-mail: quyongx@163.com

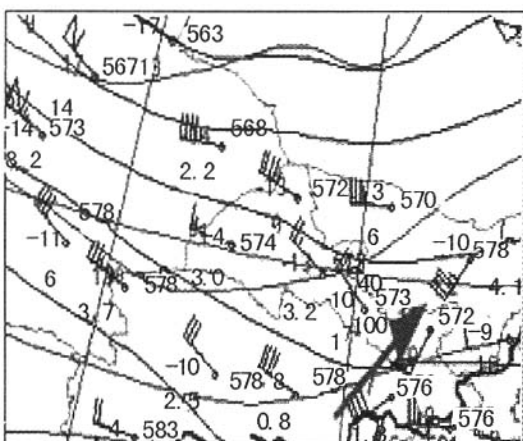


图1 2005年6月27日08时500 hPa形势图
Fig. 1 500 hPa situation at 08 00 on 27 June 2005

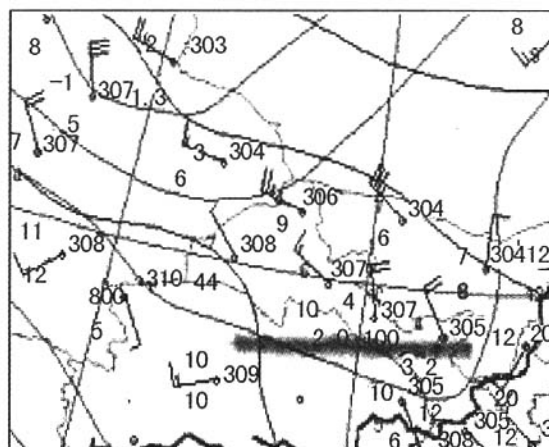


图2 2005年6月27日08时700 hPa形势图
Fig. 2 700 hPa situation at 08 00 on 27 June 2005

1.4 动力条件分析

对27日08时500 hPa的涡度网格资料分析发现，槽前有正涡度平流，中心为 $40 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ ，在500 hPa槽下流区，地转风是从位于低槽的正涡度最大区吹向下流脊上负涡度最大区，涡度平流使槽前正涡度增大，促使槽东移而且有利于气旋的发生、发展（图3）。27日08时K

指数场有一中心为12的高值区位于本地附近，因K指数是稳定性和湿度条件的综合指标，K值愈大愈有利于降水（图4）。这种动力因素更加剧了辐合上升运动，对激发对流有一定的贡献，这从本地云系的变化可见一斑。从27日500~700 hPa和地面形势图综合分析，这次影响过程属前倾槽，这也是降水骤而不久的主要原因。

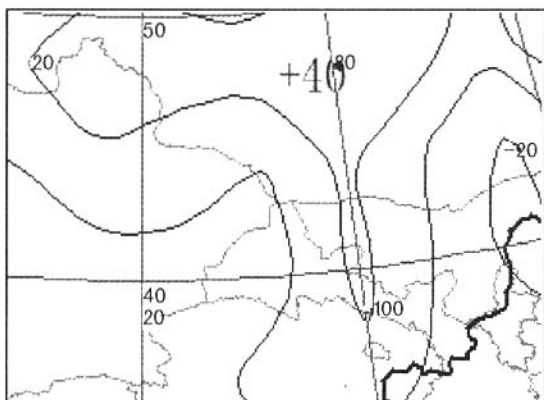


图3 2005年6月27日08时500 hPa 涡度
Fig. 3 The vorticity field at 500 hPa at 08 00 on 27 June 2005

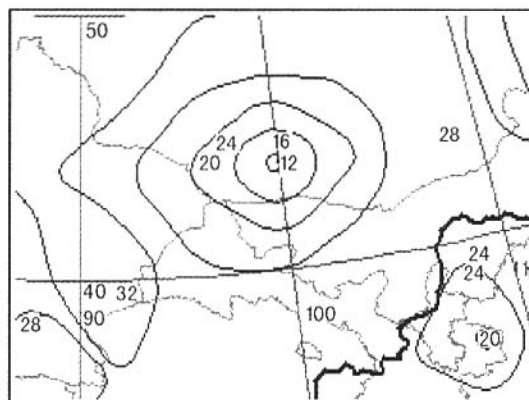


图4 2005年6月27日08时K指数场
Fig. 4 K index field at 08 00 on 27 June 2005

1.5 地形因素

由于永昌县($38^{\circ}14'N, 101^{\circ}58'E$)地处河西走廊中部，南位于祁连山南坡，北有龙首山相夹，地形收缩明显，常引起气流辐合上升运动，地形迎风坡的动力抬升对释放不稳定能量，改变降水的云物理过程，使降水加强有一定的作用。

1.6 云图和地面冷锋的演变

在26日14时河西中部区有($\Delta P_3 = -4.0$)负变压中心，气温急升，地面低压发展，造成不稳定能量增加和上升运动的加强，同时，也预示着上游系统有进一步的发展和加深。14时地面冷锋位于哈密一线，在红外云图上表现为明显的逗点云系，云带前界模糊，后界光滑，色调较白亮，云带较窄，其前部以散乱发展的积雨云团为主，冷锋位于其后界，移速较快，云带与地面冷锋配置较好。于26日23时影响

我区,出现吹风、降温和降水天气(从地面冷锋于 26 日 23 时入侵至 27 日 12 时云系变化依次为 Ci,Cb,

As,Ci 和 Sc),在 27 日 05 时至 08 时的地面观测图上有明显的反映,见图 5、图 6。

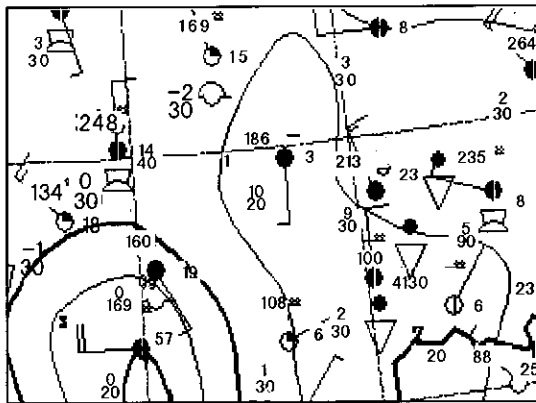


图 5 2005 年 6 月 26 日 23 时地面图
Fig. 5 Ground situation at 23:00 on 26 June 2005

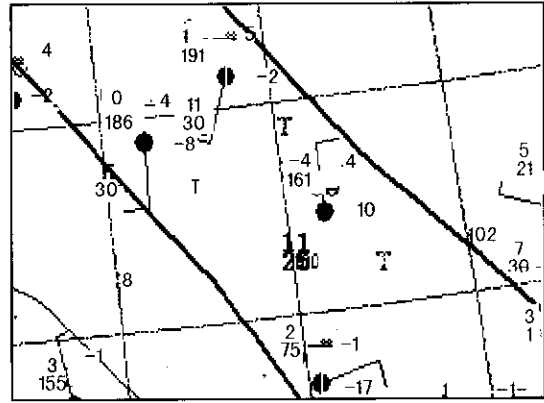


图 6 2005 年 6 月 27 日 02 时地面图
Fig. 6 Ground situation at 02:00 on 27 June 2005

2 火箭作业概况

自然降水从 6 月 27 日 04:40 时开始,根据雷达观测云层变化情况,在永昌气象站驻地实施了火箭增雨作业,作业时间分别为 07:05 和 07:35,第 1 次作业 2 发,发射方位 330°、仰角 56°,第 2 次作业 3 发,发射方位 235°、仰角 56°,整个作业范围覆盖城关等 4 个乡镇,面积约 152 km²,见图 7。



图 7 火箭增雨作业范围示意图

Fig. 7 The operation range of rain enhancement by WR1B rocket

作业采用的催化工具是 WR1B 型 AgI 烟剂火箭,它具有射程远(8 km)、播撒高(最大高度 8 km)、成核率高(在 -10℃成核率为 $1.8 \times 10^{16} g^{-1}$)、核化速度快(5 min)、播撒路径长(5 km)等特点。此火箭点

火箭升空 5 s 后,箭上延时机构启动催化剂播撒装置,火箭沿飞行轨道连续播撒催化剂,并随气流扩散,形成一条弧线催化带,火箭发射仰角 56°,初始高度约 4 km,火箭经测站播撒 AgI 烟粒经毛家庄、南湾一带,处于层状云的中上部。

3 雷达回波分析

为了对这次人工增雨效果进行检验,利用 XDR 数字天气雷达对这次过程进行了跟踪探测。

07 时 08 分雷达探测到在测站的周围区域,云层的回波强度大都为 15 dBz,只有偏北和西南部分回波强度为 20 dBz 的自然降水云区,见图 8。

07 时 08 分火箭向西北发射后,火箭沿飞行轨道连续播撒催化剂。作业的同时并未见回波增强效果,但是经过 30 min 之后,增雨效应才逐渐出现。根据经典理论,催化剂进入云中后,产生的人工冰晶通过贝吉隆过程(由于水面的水汽最早饱和比湿比冰面的高,使得冰晶增长比水滴有利,在水汽供应不足时,冰晶增长而水滴蒸发消耗)使过冷水转化为降水,这个过程是需要一定时间的^[2~3]。冷云激发人工增雨是以转化过冷水含量为基础,层状云冷层中有多少水,除了供给自然冰晶增长成固相雨胚外,还能供给人工冰晶增长达到固相雨胚的尺度,这部分的水量是讨论催化剂用量上限的重要依据^[4~7]。

07 时 42 分,层状云被催化后,在催化云区域已出现 25 dBz 强回波,20 dBz 较强回波区范围明显扩大,已经与自然降水强回波区连成一片,见图 9。从 RHI 图前后变化对比可以看出,催化后强回波横向范围和厚度明显增大,见图 10、图 11。

回波逐渐增强,云体厚度增大,回波区的范围逐渐增大。雷达回波的强度是反映降水强弱的重要因子,它随降水强度的变化而变化,所以雷达回波的增强,一般都标志着降水强度的增加;催化后云体厚度明显增厚与云维持时间有着密切关系,云体厚度越大,云维持的时间越长;催化后的云底水平范围明显扩大。回波接地水平范围大小标志着地面降水范围的大小,云底接地范围越大,地面持续降水的时间越长,在降水强度相同的情况下,累积降水量就越大^[8-11]。所以增加云底范围就意味着延长地面降水的持续时间,增加地面降水量。

通过以上分析,从云的物理特性考虑,出现这些变化的原因可能是:

(1)火箭在播撒过程中由于催化剂扩散、冷凝的双重效应,使云内产生了较强的扰动,引起了云内部的微物理变化,促使云内雨滴迅速合并增大,加快降水的形成,从而使雷达回波增强,高度增高。

(2)由于云内小水滴在以上双重效应作用下迅速合并增大,克服上升气流的支托作用而下沉,产生了强中心下移和云底范围扩大的现象。

(3)由于以上双重效应作用破坏了局部的大气环流,起到了特殊地形的作用,在影响区形成了局地小气候,使作业区成为一个独立的小系统,因此出现雨团移速减慢或少动的现象。这充分表明火箭人工增雨确实引起了云的微物理变化,促进了云水转化,加快了降水的形成,达到了在某处增加降水的目的^[12]。

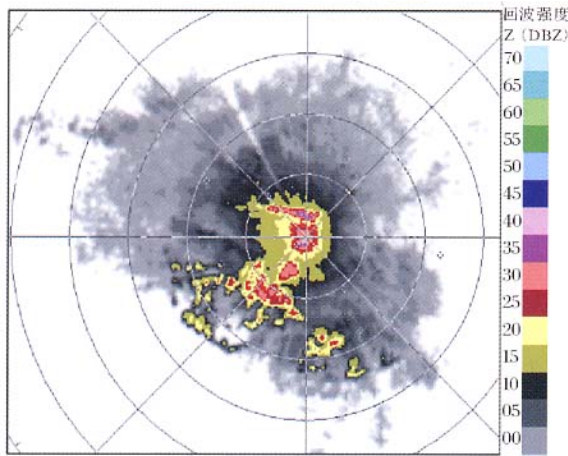


图 8 2005 年 6 月 27 日 07:08 PPI (仰角 2.8°)

Fig. 8 The radar PPI at 07:08 on 27 June 2005 (the elevation 2.8°)

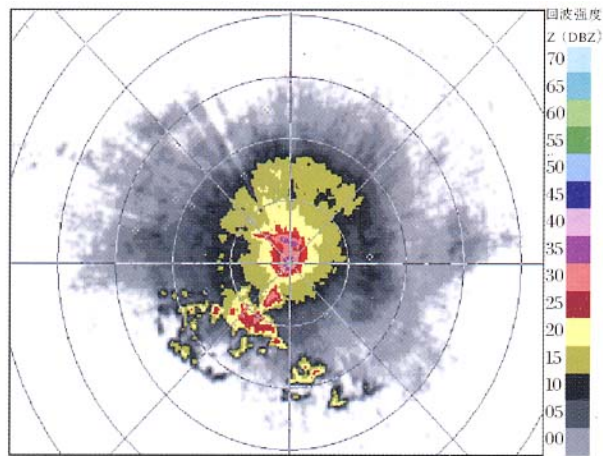


图 9 2005 年 6 月 27 日 07:42 PPI (仰角 3.3°)

Fig. 9 The radar PPI at 07:42 on 27 June 2005 (the elevation 3.3°)

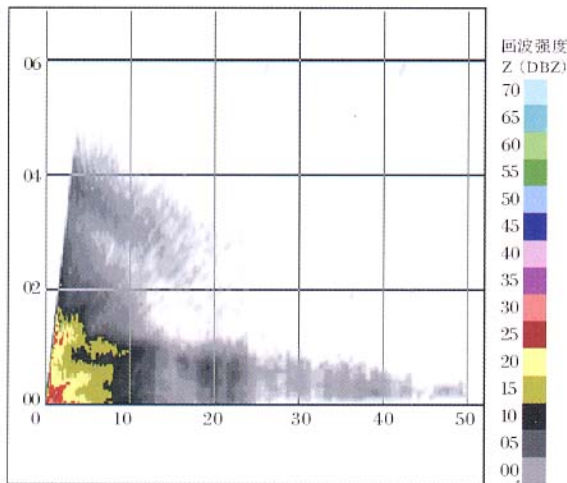


图 10 2005 年 6 月 27 日 07:07 RHI (方位角 315°)

Fig. 10 The radar RHI at 07:07 on 27 June 2005 (the azimuth :315°)

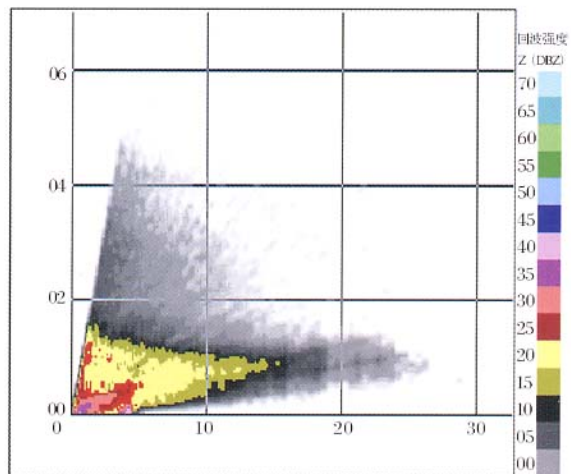


图 11 2005 年 6 月 27 日 07:45 RHI (方位角 320°)

Fig. 11 The radar RHI at 07:45 on 27 June 2005 (the azimuth 320°)

4 地面雨量变化

图 12 是作业前后每隔 5 min 永昌站雨量变化,图 13 是作业前后每隔 1 h 永昌站雨量变化,表 1 是 27 日各测点 24 h 降水量统计。

从图 12 可以看出,本次自然降水从 05 时左右开始,05:40~05:50 降水量有一个最大值,06:00~07:00 降水维持在中位,从火箭增雨 07 时 08 分开始 5 min 降水量始终维持在较高位,粗线标出。同

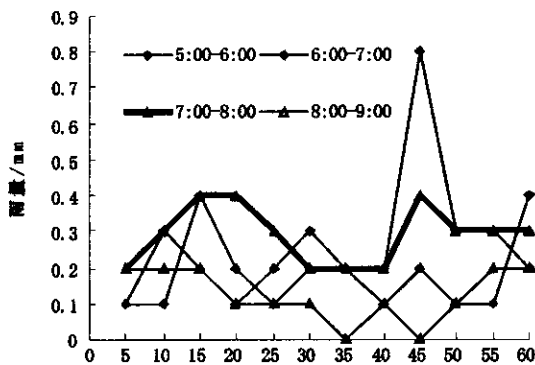


图 12 增雨前后 5 min 雨量变化

Fig. 12 The rainfall change in 5 minutes after and before the rain enhancement operation

样从图 13 也可以看出,从火箭增雨后 07:00~08:00 降水量迅速增加。为了进一步检验这次人工增雨的效果,我们还收集了测站周围 8 个雨量点 24 h 雨量变化情况,主要观察火箭增雨影响范围内的雨量变化情况,从表 1 可以看出,火箭增雨影响范围内的永昌、西大河、皇城、中坝、上坝 24 h 雨量明显大于非影响区金川峡、金昌等地。

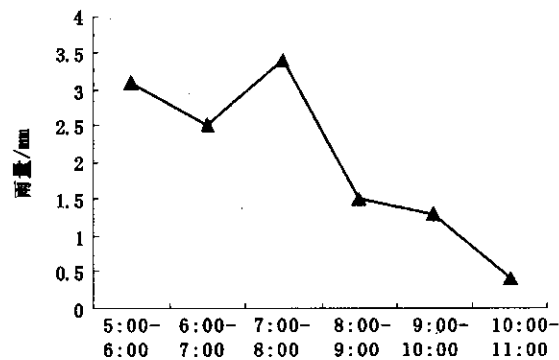


图 13 增雨前后 1 h 降水量变化

Fig. 13 The rainfall change in one hour after and before the rain enhancement operation

表 1 各测点 24 h 降水量统计表

Tab. 1 24 hours precipitation statistics at each measuring site

测点	永昌	西大河	皇城	中坝	上坝	金川峡	金昌	武威	民勤
降水量/mm	12.2	12.9	21.7	16.5	18.7	10.9	3.7	3.5	5.3

5 结 语

(1)这次人工增雨的成功从一个侧面说明,在河西地区进行夏季增雨作业,捕捉主要天气系统特点,选择冷锋层状云作业和高空相对较低的气温,作业时机的把握妥当与否,对实施人工增雨的有效性和效果是至关重要的。

(2)雷达跟踪监测发现,经过火箭人工催化作业后云回波强度增强,回波面积增大。地面监测降水增多,说明增雨效果十分明显。就目前而言,雷达对增雨作业过程的监测、指挥、效果检验方面是最为直接和有效的手段。

(3)火箭增雨影响范围内的 24 h 雨量明显大于非影响区。在作业区分布适当的雨量点,对增雨效果进行比较和检验是必要的。

参考文献:

- [1] 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. 5-8.
- [2] 申亿铭. 云中催化剂的扩散 [M]. 北京: 气象出版社, 1994. 15-18.
- [3] 李连银. 用雷达回波参量分析一次人工增雨的播撒效果 [J]. 山东气象, 1995, 15(4): 32-33.
- [4] 李金辉, 陈保国, 罗俊颜. 陕西关中中层状云降雨雷达回波特征 [J]. 陕西气象, 2004, 30(12): 53-56.
- [5] 黄玉霞, 王宝鉴, 王锡稳, 等. "8.28" 过程的多普勒雷达回波与水汽输送特征分析 [J]. 干旱气象, 2004, 22(3): 49-54.
- [6] 张新荣, 王锡稳, 程鹏, 等. 一次区域性冰雹天气过程分析 [J]. 干旱气象, 2004, 22(4): 64-69.
- [7] 王璠, 董安祥, 沈治广, 等. 一次连续性冰雹天气过程的诊断分析 [J]. 干旱气象, 2004, 22(1): 44-48.
- [8] 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): 101-103.
- [9] 杨梅, 许彬, 经爱凤, 等. 一次人工增雨作业云回波个例分析

- [J]. 江西气象科技 ,2001 24(4) 27 - 29. 80 - 85.
- [10] 迟竹萍 ,陈金敏 ,朱平盛. 利用数字化雷达回波参数分析人工 [12] 刘东升 ,晋玉田. 1998 年初夏飞机人工增雨作业效果分析[J].
增雨播云条件[J]. 气象 2000 26(4) :18 - 21. 四川气象 ,1998 ,18(3) 56 - 58.
- [11] 渠永兴. 甘肃省冰雹云研究综述[J]. 干旱气象 2004 22(1) :

A Case Analysis of Rocket Artificial Influence on Rainfall

QU Yong - xing¹ , TENG Shui - chang² , CAI Yuan - cheng² , WANG Sheng - yuan²

(1. Institute of Arid Meteorology , CMA , Lanzhou 730020 , China ;

2. Yongchang Meteorological Station of Gansu Province , Yongchang 737200 , Gansu , China)

Abstract : On June 27th , 2005 , the rocket rainfall enhancement operation was undertaken in Yongchang county of Gansu province , and the process was tracked and monitored by XDR digital weather radar. Through the analysis of synoptic background and radar echoes evolution before and after the rainfall enhancement operation , it was proved that under the favorable weather condition , after the rocket rainfall enhancement operation , the intensity of radar echo was increasing , the scope of radar echoes and the frequency of surface precipitation were enlarging , and the distribution of surface precipitation in 24 hours after the operation also confirmed the effect of this rocket artificial influence on rainfall.

Key words rocket ; artificial rainfall enhancement ; weather background ; effect analysis