

李红斌,张殿刚,张靖萱,等. 2014. 大连市火箭人工增雨流动作业技术与业务流程. 气象, 40(10):1271-1278.

大连市火箭人工增雨流动作业技术与业务流程^{*1}

李红斌¹ 张殿刚¹ 张靖萱² 赵繁盛¹ 濮文耀¹ 赵雅轩³

1 大连市人工影响天气办公室, 大连 116001

2 大连市气象服务中心, 大连 116001

3 大连市气象台, 大连 116001

提 要: 文章通过统计和分析大连地区 1975—2004 年 30 年过程降水 ≥ 5 mm 的 40 个天气样本资料,总结了主要降水形势为大槽型、中纬度系统型、北涡型和南涡型 4 种类型;同时分析了 2003 年 6—10 月过程降水在 5 mm 以上的 22 个多普勒雷达观测个例,总结得出大连地区主要降水云系为层状云和积层混合云,且积层混合云多于层状云,表明大连地区更适宜开展火箭增雨作业,进而统计和建立了火箭增雨的雷达作业预警、决策判别指标模型;并研究了通过自然降水落区与社会需求综合分析确定作业区域的技术方法;根据雷达预警判别指标权重分析,侧重研究了作业车辆适时调度技术方案及业务流程,为火箭人工增雨科学、高效作业提供保障。

关键词: 火箭增雨, 流动作业, 技术与业务流程

中图分类号: P481

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 10. 012

Techniques and Work Flow of Movable Operation for Rocket Artificial Precipitation in Dalian

LI Hongbin¹ ZHANG Diangang¹ ZHANG Jingxuan²
ZHAO Fansheng¹ PU Wenyao¹ ZHAO Yaxuan³

1 Dalian Weather Modification Office, Dalian 116001

2 Dalian Public Meteorological Service Centre, Dalian 116001

3 Dalian Meteorological Observatory, Dalian 116001

Abstract: Through statistics and analysis of 40 precipitation processes (≥ 5 mm) from 1975 to 2004 in Dalian, four kinds of main precipitation weather situation were summarized in the paper, including large trough style, middle-latitude system style, north vortex style and south vortex style. At the same time, 22 Doppler radar samples of rainfall processes (≥ 5 mm) from June to October, 2003 were analyzed. It is summed up that the main precipitation clouds in Dalian are stratus cloud and stratocumulus cloud, and the stratocumulus cloud is more than the stratus cloud, which indicates that the method of rocket rain enhancement operation is more suitable in Dalian. Then the radar operation warning and decision criterion index model is set up and the method is discussed to determine the operation target area by natural rainfall area and social water requirement analysis. According to the weight analysis of radar warning decision index, the paper focuses on the study of the vehicle second scheduling schemes and work flows, which can be a scientific and efficient guarantee for rocket precipitation enhancement operations.

Key words: rocket precipitation enhancement, movable operation, technique and work flow

* 中国气象局推广应用项目(CMATG2006M47)资助

2013 年 11 月 6 日收稿; 2014 年 6 月 3 日收修定稿

第一作者:李红斌,主要从事人工影响天气技术研究. Email:lhb7159@163.com

引言

近些年,天气雷达在人工影响天气作业中的应用(郑国光等,2005;韩雷等,2007;田利庆等,2005;陈光学等,2008;黄钰等,2013;俞小鼎,2006),特别是在火箭人工增雨作业决策指挥方面越来越发挥着重要作用(施文全等,1996;李红斌等,2005;吴万友等,2012)。许多省(区、市)都采用雷达基本参数作为人工增雨防雹作业的判据指标(樊志超等,2012;王致君等,2001;孙国德等,2001),催化云体过冷层越厚,催化潜力越大,作业效果越好(中国气象局科技发展司,2003)。通过雷达实时监测与作业指标判别分析,确定具有增雨潜力的作业云和最佳作业时机(李红斌等,2005),从而科学指挥作业,因此,新一代天气雷达结合常规气象资料分析可以提高人工增雨作业与效果评估的科学性和准确性。

从目前国内外研究看,新一代雷达在人工影响天气作业中已经成为了一个不可缺少的作业实施决策指挥工具。通过我国过去几十年的人工影响天气业务实践和理论研究,在人工增雨作业预警和作业决策指标研究方面已经取得了显著成果(许焕斌等,2004;胡玉清等,2004;中国气象局科技发展司,2000;刘晴等,2013),特别在飞机人工增雨作业中积累了较丰富的观测基础和科学作业经验(刘建忠等,2012),同时各种研究也表明,对于不同的降雨云系,在作业决策中所采用的作业工具和作业技术方法有很大差别(中国气象局科技发展司,2003)。近些年,火箭人工增雨以它特有的机动、灵活、安全、高效的优越性能迅速在全国得到发展,全国各地目前主要采用火箭车进行增雨流动作业,因此,如何通过雷达监测和回波特征参数指标判别选择增雨潜力云、科学调度作业车辆和作业决策已成为天气雷达在人工增雨作业决策指挥中的一个需要解决的重要问题。

本文对大连地区1975—2004年30年天气资料进行了统计和分析,总结了大连地区产生降水的4种主要天气类型;对2003年6—10月22个降水过程的多普勒天气雷达观测资料统计和分析,总结和建立了火箭增雨流动作业的雷达特征参数的作业预警决策判别指标模型(李红斌等,2005);尤其对火箭车增雨流动作业的目标区域确定,以及车辆科学调度技术思路和方法进行了设计和研究。其研究内容是火箭人工增雨科学与高效作业的前提和保障。

1 适宜火箭增雨作业的天气条件

大连位于辽东半岛南端,地处西风带与南方系统活动交界处,又西濒渤海,春、夏季主要降水系统西风槽经渤海移到大连上空时,强度减弱,降水减小或消失,因此,造成大连地区降水量偏少,春旱频繁。但有时处于西太平洋副热带高压外围边缘,盛行西南暖湿气流,有利降雨云的产生,或偶有气旋北上,带来南方大量暖湿空气,容易产生较强降雨云,有利于人工催化增雨。

1.1 有利于增雨作业的天气形势

对大连地区1975—2004年30年春、夏季过程降水为5个以上气象站 ≥ 5 mm的40个样本天气资料进行统计和分析,总结了4种主要降水天气形势,即大槽型、中纬度系统型、北涡型、南涡型。其中,大槽型占58%、中纬度系统型占16%、南北结合型占13%、南涡型占13%。

1.1.1 大槽型

在高空700 hPa图上,40°N、105°~115°E以南为窄槽区,槽底在35°N以南,且与南槽呼应,环流为经向型。由东西环境场的不同可划分为3种类型。

(1) 大槽Ⅰ型——地面南北向低压型在700 hPa图上,低压中心在40°N附近,有强冷空气配合;地面形势场为近于南北向的低压带(图略)。

(2) 大槽Ⅱ型——地面倒槽顶部高压鼻子型在700 hPa图上,低压中心在45°~50°N,槽后有冷槽配合;地面形势为高压鼻子从东北向西南伸,降水主要在地面倒槽顶部与高压鼻子之间(图略)。

(3) 大槽Ⅲ型——地面倒槽后部降水型在700 hPa图上,有较强南支槽,并有强冷槽配合;地面形势为低压倒槽从贵州向东北伸展,降水产生于地面倒槽后部密集等压线附近(图略)。

1.1.2 中纬度系统型

在700 hPa图上,降水系统为河套附近的中尺度低涡,从涡中向南伸出一槽,或向东暖式切变线,并有冷槽配合;地面在50°N以南分成了南北两部分:北部为低压,南部为弱倒槽,降水主要在地面倒槽北部与高压后部低值区附近。

1.1.3 北涡型

在 700 hPa 图上,低压中心在 40°N 以北,40°N 以南为短波槽或闭合低压,并有冷槽配合;地面为两个低值系统南北分布,降水多在北支冷锋里。

1.1.4 南涡型

在 700 hPa 图上,40°N 以南为低涡,中心在河套附近,从涡中心向南、向东各伸出一槽和暖式切变线,且有冷空气配合;地面为低压或倒槽。若低压向东北上至 40°N 以北时,大连地区会出现中等以上降水。

以上多为层状云、积层混合云的降水天气过程。

降雨云系经渤海移到大连时,地形抬升使降雨云系发展,作业时机多选择在处于发展和发展强盛时期的降水性积层混合云及降水性层状云;对以上 4 种天气类型降水过程的雷达回波及其演变分析发现,其降水回波结构相似,表明云系为异型同构的降水结构。

1.2 火箭增雨作业云类型及潜力分析

采用火箭实施人工增雨作业,目前主要是通过雷达实时跟踪监测,根据雷达决策判别指标分析,确定增雨潜力云及作业最佳时机。

1.2.1 大连降雨云系特征及增雨潜力云类型

对大连地区 2003 年 6—10 月过程降水量在

5 mm 以上的 22 个个例的多普勒雷达观测资料进行统计和分析表明,大连地区的主要降水云系有两类:层状云和积层混合云,其中,积层混合云的降水概率大于层状云,孤立的对流云降水较少。火箭增雨作业即适合于不同类型降雨云,尤其对积层混合云开发潜力最为明显,因此,大连地区降水云系的分布特征对开展火箭人工增雨作业十分有利。

1.2.2 不同类型增雨潜力云雷达参数特征及决策分析

利用大连多普勒雷达历史观测资料,对大连地区 2003 年 6—10 月产生的 22 次降水过程的积状云、积层混合云、层状云的雷达回波及主要特征参数(李红斌等,2005;表 1)进行了统计和分析,得到以下结果:

(1) 积状云(对流云)。在雷达 PPI 上,回波特征多为块状或有规则排列的带状,水平尺度几千米到几十千米,平均强度在 25 dBz 以上,顶高在 8 km 以上,并随季节变化。大连地区出现积状云降水主要集中在 8 和 9 月,回波强度在 35 dBz 以上。

(2) 积层混合云。在雷达 PPI 上,回波特征为范围宽广的絮状结构,回波强度不均,但相差不大,平均在 20 dBz 以上;在回波 RHI 高显上,云顶有起伏,但不大,平均顶高在 5 km 左右,零度层亮带不连续。

表 1 2003 年 6—10 月大连多普勒雷达回波主要特征平均参数值

Table 1 Main characteristics of average parameters of Doppler radar echo from June to October in 2003

云的类型	强度/dBz	云顶高度/km	负温层厚度/km	0℃层高度/km
层状云	≥15	≥4.0	≥1.5	1.8~4.0
积层混合云	≥20	≥5.0	≥2.0	2.0~5.0
积状云	≥25	≥8.0	≥3.0	3.0~5.5

(3) 层状云。在 PPI 雷达平显上,回波表现为大范围片絮状均匀结构,稳定少动,强度在 15 dBz 以上;在 RHI 雷达高显上,回波均匀,顶部平坦,顶高在 4~12 km,常有水平 0℃层亮带(见图 1)。大连地区层状云降水各季都能出现,主要集中在 4—6 月。

2 火箭车流动作业方案设计与技术流程

组织火箭增雨作业前,首先要制定作业方案,包

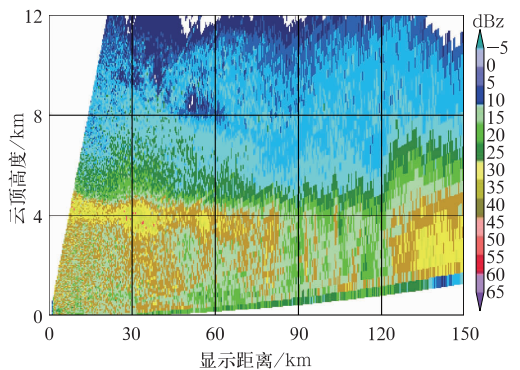


图 1 2003 年 6 月 23 日 02 时回波亮带

Fig. 1 Echo bright band at 02:00 BT 23 June 2003

括作业区域确定、作业车辆指挥调度和作业实施方案确定等。

2.1 火箭增雨作业目标区域的确定

大连地区自然降水分布不均,社会蓄水要求复杂(包括:春季抗旱、水库蓄水、城区绿化及生态环境保护、森林防火等),对增雨作业目标区域的选择提出了更高要求,即在设计本次增雨作业方案时,需根据前期降水情况、本次降水分布和大小,结合社会需求分析,综合确定作业目标区。合理选择作业区域是车载火箭科学作业的前提。

2.1.1 作业目标区域选择的基本原则

一次增雨作业目标区域的选择,首先考虑该地区自然降水是否满足社会需求、该地区是否具备实施增雨作业的天气条件。如果该区域具备增雨作业天气条件,但前期自然降水充足或过多,则不适合增雨作业;若该区域前期自然降水偏少,当地农业、自然植被、水库蓄水等有社会需求,但不具备天气作业条件,也不能选择为增雨目标区。因此,作业目标区域确定的基本原则是:自然降水不能满足当地社会需求,同时又具备实施增雨作业的天气条件。

2.1.2 作业目标区域的确定方法

根据作业区域确定基本原则,首先分析大连地区具备增雨作业天气条件的区域,然后在这些区域中选择具有社会需求的区域,作为本次增雨作业的目标区域。具体方法:

(1) 有利于增雨作业的天气条件分析

根据市气象台 24 h 短时预报,当过程降水满足至少 3 个连续气象观测站预报降雨量 ≥ 5 mm,系统自动报警,并弹出“人工增雨指挥系统”界面,进入该系统,首先进入增雨作业目标区域确定分析。结合卫星云图、数值模式预报、人影产品和自动站雨量等综合分析,确定降水量 ≥ 5 mm 的降水区域(图 2)。

(2) 社会需水分析

大连地区对自然降水的社会需求主要来自 3 个方面:农业抗旱、水库蓄水、城市绿化与生态环境保护。

抗旱分析。土壤墒情是很好的抗旱分析指标,每年 3—5 月,以土壤墒情作为主要分析依据;6—10 月,采用降水距平分析(墒情信息截至 5 月底);水库蓄水分析。通过调取水利部门相关水文资料,了解各水库蓄水量;城市绿化和生态环境保护。对中、小降水天气过程均可实施增雨作业。综合以上分析确

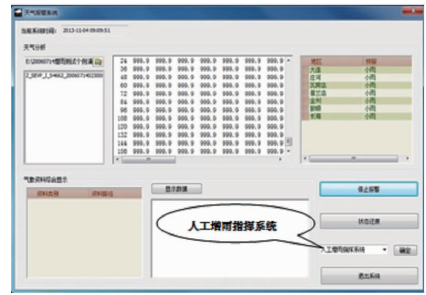


图 2 降雨落区预警和增雨系统弹出界面

Fig. 2 Pop-up interface of precipitation area warning and enhancement system

定本次增雨作业目标区域。

2.1.3 春、夏不同季节作业区域确定

结合大连实际,通常春季人工增雨以农业抗旱为主,夏季主要开展水库蓄水、城区绿化和生态环境保护。具体方法:

(1) 春季(3—5 月)农业抗旱作业区域确定

大连地区降水主要集中于夏季,春季降水较少,过程降水量通常不大,因此增雨区域确定主要考虑该区域是否具备实施增雨作业天气条件,以及土壤墒情情况。具体方法如下:

① 降水区域分析。以市气象台 24 h 天气预报为依据,结合指挥中心对天气形势场、卫星云图、数值预报产品、自动站雨量等资料分析,确定降雨落区。

② 土壤墒情分析。墒情 $\geq 90\%$ 为偏湿区,不利于农作物等生长,不宜实施作业;墒情在 $50\% \sim 90\%$ 为较早区域,实施作业对预防干旱有意义;墒情 $\leq 50\%$ 为中旱和重旱区域,对农作物等生长不利,实施作业有助于缓解旱情。

根据以上确定本次作业目标区域,将重旱作业区作为重点作业区域。

(2) 夏季(6—8 月)作业区域确定

夏季不发土壤墒情信息,故采用降水距平的分析方法,即采用近一个月的降水量进行距平分析。该方法也能较好地反映当地近期自然降水情况。降水距平的表达式为:

$$R = (T - t) / t$$

式中, R 为降水距平, T 为近一个月的降水量, t 为历史同期平均降水量。确定方法如下:

① 降水区域分析。以市气象台 24 h 天气预报

为依据,结合指挥中心对天气形势场、卫星云图、数值预报产品、自动站雨量等资料分析,确定降雨落区。

② 降雨区域确定后,进行降水距平分析。当某区域降水距平 $R \geq 50\%$,表明降水充足,该区不作为本次增雨区域;若某区 $R < 50\%$,表明降水偏少,应进一步分析是否适合增雨,主要考虑到夏季一次过程雨量有时会很大,可能会形成洪涝。

根据以上降水落区与降水距平综合分析确定本次增雨作业目标区域。

2.2 火箭增雨作业车辆调度

目前,大连市拥有车载增雨火箭作业装备 18 套,固定火箭增雨发射系统 8 部,分布在大连的瓦房店市、普兰店市、庄河市、金州区、旅顺口区及大连市区。当增雨作业目标区域确定后,车辆的科学调度便是火箭增雨高效作业的首要环节。

2.2.1 作业车辆二次调度业务流程

在火箭车增雨流动作业中,重点需要解决两个问题,即哪个作业点适合作业,以及车辆何时出发。为此,这里采取了作业车辆二次调度的技术方案,达

到了车辆适时调度,从而实现科学派车、高效作业的目的。具体方法如下:

(1) 目标区域内作业基站和预设点的选择。在综合考虑安全作业、交通便利、调度范围最大化、后勤保障等因素下,在作业区域内设立一个或多个基站,作为车辆从各地到达作业目标区的聚集地;同时,在每个基站附近预设若干作业点(见图 3),作为进一步选择增雨潜力云作业点的基础依据(表 2)。

(2) 宏观一次调度。作业区域确定后,综合考

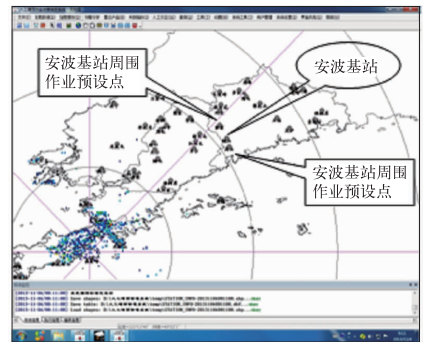


图 3 大连地区火箭增雨预设点示意图
Fig. 3 Chart of the rocket enhancement predetermined points in Dalian

表 2 大连地区火箭增雨部分作业基站及预设点分布

Table 2 Rocket enhancement operation base sites and predetermined points in Dalian					
作业项目	基站编号	基站地名	预设点编号	预设点地名	坐标
瓦房店西部	J07	长兴岛	固定		39.55°N, 121.30°E
	J08	炮台	固定		39.48°N, 121.73°E
普兰店南部	J14	普兰店	Y08	花儿山	39.47°N, 121.96°E
			Y09	唐房	39.44°N, 121.97°E
			Y10	大刘家	39.35°N, 122.17°E
庄河北部	J16	桂云花	Y11	头道沟	40.01°N, 122.57°E
			Y12	同巨	39.88°N, 122.57°E
			Y13	高峰	40.09°N, 122.77°E
			Y14	隋屯	39.98°N, 122.76°E
金州区	J21	金州局	Y20	龙王庙	39.14°N, 121.69°E
			Y21	拉树山	39.25°N, 121.62°E
			Y22	大孤山	38.96°N, 121.86°E
大连市区	J22	大连局	Y23	黄泥川	38.84°N, 121.42°E
			Y24	燕窝岭	38.86°N, 121.66°E
			Y25	西湖嘴	38.90°N, 121.10°E
旅顺口区	J23	旅顺局	Y26	西北	38.82°N, 121.13°E
			Y27	张家村	38.75°N, 121.15°E
碧流河水库	J26	安波	Y32	天益	39.93°N, 122.46°E
			Y33	郑屯	39.85°N, 122.44°E
			Y34	隋屯	39.98°N, 122.76°E
			Y35	大姜屯	40.02°N, 122.71°E

考虑当前增雨需要,确定各作业区域的增雨任务(如农业抗旱、水库蓄水、城市绿化与生态环境保护、森林

防火等)和相应作业基站,基站选取可以一个或多个。并在实施作业前的 12 h 至前 3 h 内将增雨作

业车辆调遣到相应作业基站待命,完成一次调度(即宏观调度)。

(3) 适时二次调度。车辆到达作业基站后,在临近作业的前3 h至作业时间内,业务系统通过雷达回波跟踪监测,根据雷达回波的强度、顶高、顶温、垂直积分液态水含量等作业预警决策指标及权重分析,判断作业基站周围预设作业点上空的目标云增雨潜力,并结合雷达回波移向移速,确定最佳作业点和车辆出发时间(图4)。指挥中心根据输出调度方案,通知相关车辆出发达到相应作业点,完成车辆的适时二次调度。

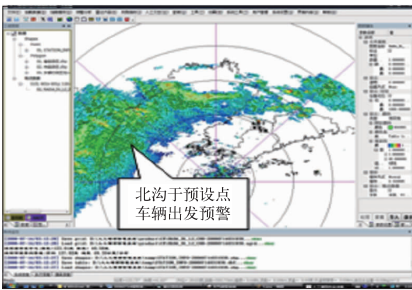


图4 增雨火箭车适时调度雷达决策指挥平台
Fig. 4 Radar decision and command platform of enhancement rocket vehicle timely scheduling

2.2.2 作业车辆适时调度技术方案

(1) 作业车辆出发时间的确定

依据 $S=VT$ 计算车辆从基站到达各作业预设点的时间。其中, V 为车辆安全行驶速度; T 为车辆运行时间,或雷达回波潜力云移动到作业点上空时间 ($10 \text{ min} \leq T \leq 60 \text{ min}$); S 为基站距作业站点之间距离。由此确定车辆到达不同作业站点时间。

根据雷达回波移向移速,计算目标潜力云到达最佳作业点的时间,对比车辆出发到达作业点时间,从而确定车辆出发时间。

(2) 最适宜作业点的确定

根据2003年6—10月大连市多普勒雷达观测的22个降水个例回波特征参数值进行统计和分析,得到了不同类型增雨潜力云的作业预警判别指标模型(李红斌等,2005)。即:

层状目标云选择判别指标:

回波强度 $\geq 15 \text{ dBz}$

$H_{\text{云顶}} \geq 4 \text{ km}$

$T_{\text{云顶}}: -24 \sim -10^\circ\text{C}$

垂直积分液态水含量 $\geq 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$

积层混合云选择判别指标:

回波强度 $\geq 20 \text{ dBz}$ (积云泡)

$H_{\text{云顶}} \geq 4.5 \text{ km}$

$T_{\text{云顶}}: -24 \sim -10^\circ\text{C}$

垂直积分液态水含量 $\geq 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$

对流目标云选择判别指标:

孤立积云回波面积 $\geq 10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$

回波强度 $\geq 25 \text{ dBz}$

$H_{\text{云顶}} \geq 6 \text{ km}$

$T_{\text{云顶}}: -24 \sim -10^\circ\text{C}$

垂直积分液态水含量 $\geq 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$

系统根据以上预警指标判别及权重分析,选择增雨潜力云,确定最佳增雨作业点和车辆出发时间,完成作业车辆的适时调度。

2.3 火箭增雨作业实施

车辆到达作业点后,利用雷达实时跟踪监测判别作业点周围目标潜力云的类型,进而根据雷达作业决策判别指标模型选择最佳作业时机(图5),并确定作业技术方案(李红斌等,2005)(包括火箭作业的仰角、方位角和用弹量等);指挥中心业务系统实时量化输出作业方案(图略),作业技术指挥人员通过空域申请将作业指令及时传达到相关作业点,进行作业的实时指挥。

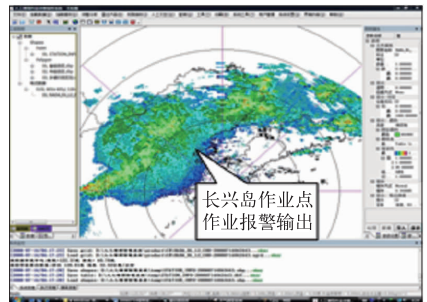


图5 火箭增雨流动作业雷达决策指挥平台
Fig. 5 Radar decision and command platform of rocket enhancement mobile operation

3 作业雷达效果分析

人工增雨效果指的是作业后催化云体是否产生预期变化,降水是否加强。前者是直接效果,诸如作业云体的云顶高度、冰晶数密度、大云滴数密度、持

续时间等的改变是否得到反映;后者是云的一系列物理变化的最终结果,称为人工影响的间接效果。无论是分析人工增雨的直接效果还是间接效果,天气雷达都是非常有效的工具。

针对大连市 2004—2005 年 9 次天气过程的 35 个作业个例,采用多普勒雷达进行了物理检验和初步探讨。根据雷达体扫数据资料和 PUP 软件二次开发产品进行了统计分析,得到了对作业效果分析有意义的几个雷达主要参数的变化规律(李红斌等, 2007)。

3.1 雷达回波强度随时间的变化

大连火箭人工增雨作业主要采用多普勒雷达实时决策判别(李红斌等,2005)分析,由系统自动量化输出作业参数实时指挥作业。对 2004—2005 年火箭增雨作业中的 18 个层状云个例和 13 个积层混合云个例的雷达回波强度(采用体扫 0.5° 仰角数据)作业前后分别进行统计和分析,得到了相似的变化趋势(李红斌等,2007;图 6)。即作业前,强度平均值缓慢增大,作业后,催化云体回波强度先是快速增大,在 30 min 左右达最大,之后缓慢减小。通过相关性检验得到:层状云为 80%;积层混合云为 78.5%。

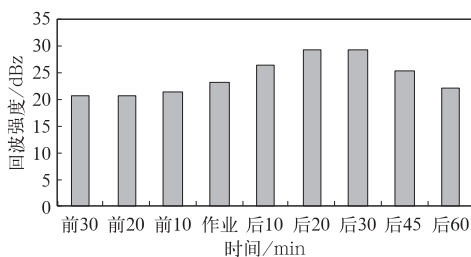


图 6 作业前后层状云和层积混合平均回波强度值随时间的变化

Fig. 6 Average intensity variation of stratus and stratocumulus echoes before and after operation

3.2 雷达回波顶高随时间的变化

3.2.1 层状云回波顶高的变化

通过对 18 个层状云个例的多普勒雷达体扫资料进行剖面分析,得到催化云体平均顶高(取雷达回波 RHI 上 0 dBz 所在高度为云顶高)随时间的变化特征(李红斌等,2007)。即作业前云顶略有升高,作业后云顶先是继续升高,10 min 后催化云体顶高开

始下降,30 min 左右达最低值,之后又逐渐回升(图略)。

通过分析发现,对层状云作业后,云顶出现了下塌现象,可能是层状云在静力催化作用下,降水逐渐增大、下沉气流加强的拖曳作用引起的结果,这与相应时间回波强度增强、降水加大恰好吻合。

3.2.2 积层混合云回波顶高的变化

通过对 13 个积层混合云个例雷达体扫资料的分析和统计,得到了积层混合云顶高随时间的变化特征(李红斌等,2007):作业前云顶缓慢升高,作业后催化云体顶高升高明显,作业 30 min 左右达最高,之后缓慢下降(图略)。分析变化原因可能是对发展的积云泡作业,动力催化效果突显的结果。进行相关性分析:层状云为 76.4%,积层混合云为 75%。

3.3 垂直积分液态水含量随时间的变化

对 18 个层状云个例和 13 个积层混合云个例的垂直积分液态水含量分别进行统计和分析,得到了相近的变化规律(李红斌等,2007;图 7):作业前特征参数基本不变,作业后明显增大,在 20~30 min 达最大,之后迅速下降。通过相关性检验:层状云、积层混合云分别为 64%和 70%。

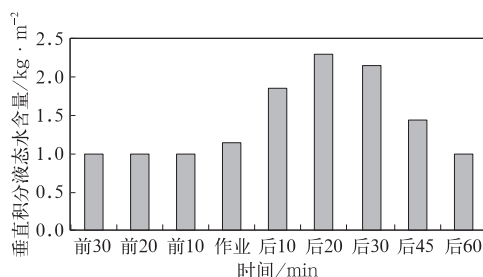


图 7 层状云和积层混合云垂直积分液态水含量平均值随时间的变化

Fig. 7 Vertical injection logic average variation of stratus and stratocumulus

4 结 论

(1) 总结了有利于火箭增雨作业的 4 种天气类型,由此分析每次天气过程的自然降水落区、大小,综合土壤墒情等水文资料及当前社会需水分析,确定本次作业目标任务和作业区域。

(2) 分析研究了车辆适时调度技术方案。根据

雷达实时监测和作业预警指标权重分析,研究了作业车辆适时调度技术方法与业务流程,实现了车辆的适时调度,为车载火箭科学高效增雨作业提供了保障。

(3) 在作业区域确定基础上,系统地研究了作业车辆适时调度、增雨作业决策及实施技术方案确定(包括作业仰角、方位角和用弹量等),从而实现了火箭增雨作业的实时指挥。

(4) 采用建立的作业决策判别指标和火箭增雨作业技术方案进行实际业务应用,通过大连市多普勒雷达对22个增雨作业个例的跟踪监测和效果检验分析,取得了良好的应用效益。

参考文献

- 陈光学,段英,吴兑. 2008. 火箭人工影响天气技术. 北京:气象出版社.
- 樊志超,周盛,高继林,等. 2012. 湖南省柘溪水库人工增雨试验优化技术研究. 气象,38(8):997-1003.
- 韩雷,王洪庆,谭晓光. 2007. 基于雷达数据的风暴识别、追踪及预警的研究进展. 气象,23(1):21-26.
- 胡玉清,刘晋,陈红萍,等. 2004. 晋中市人工防雹减灾系统研究. 气象,30(2):39-41.
- 黄钰,马建立,阮征,等. 2013. 2010年夏季北京零度层亮带特征统计. 气象,39(6):704-709.
- 李红斌,何玉科,周德平,等. 2007. 多普勒雷达数值产品在火箭增雨效果分析中的应用. 气象科技,35(2):269-273.
- 李红斌,周德平,濮文耀. 2005. 火箭增雨作业部位和催化剂量的研究. 气象,31(10):42-46.
- 刘建忠,张蕾,金华,等. 2012. 人工影响天气后下游地面湿度响应分析探讨. 气象,38(3):314-321.
- 刘晴,姚展予. 2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析. 气象,39(10):1359-1368.
- 施文全,李斌. 1996. 利用雷达指挥 WR-1B 火箭进行防雹作业的方法. 气象,22(7):52-56.
- 孙国德,裴巨才,等. 2001. 雷达识别雹云指标和防雹作业方法. 山西气象,55(2):32-35.
- 田利庆,许焕斌,王昂生. 2005. 雹云机理新见解的观测验证和实现. 高原气象,24(1):161-167.
- 王致君,冯锦明,楚荣忠,等. 2001. 防雹减灾专家系统. 高原气象,20(4):461-467.
- 吴万友,黄芬根,宾振,等. 2012. 移动式人工增雨作业技术支撑系统的设计与实现. 气象,38(10):1288-1294.
- 许焕斌,段英,刘海月. 2004. 雹云物理与防雹的原理和设计. 北京:气象出版社.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社.
- 郑国光,陈跃,王鹏飞,等. 2005. 人工影响天气研究中的关键问题. 北京:气象出版社.
- 中国气象局科技发展司. 2000. 高炮人工防雹增雨作业业务规范.
- 中国气象局科技发展司. 2003. 人工影响天气岗位培训教材. 北京:气象出版社.