

火箭防雹作业技术方法的探讨

李金枝¹ 吴书君² 王凤娇² 王立静²

(1. 山东省无棣县气象局, 251900; 2. 山东省滨州市气象局)

提 要: 针对火箭防雹作业的特点, 就火箭防雹的作业部位、作业时机、用弹量、作业指挥等方面进行了深入的探讨, 明确地提出了火箭防雹作业的部位、时机和剂量判定程序及作业的技术方法。

关键词: 火箭防雹 作业技术 作业参数

引 言

目前我国人工防雹已经基本形成了雷达-高炮为主的作业体系, 在冰雹形成机制和催化防雹作业理论等方面, 许焕斌等^[1]、洪延超等^[2]结合数值模拟进行了大量研究; 随着我国冰雹云探测手段和作业工具研制技术的提高, 雷达-火箭防雹作业技术研究不断加强, 在火箭防雹作业方面结合常规雷达, 施文全等^[3]就作业方法、用弹量等进行了有益的论述和探讨; 李宏宇等^[4]就火箭防雹催化作业参数进行了详细的数值模拟, 表明: 对于火箭催化防雹, 根据不同的发射点位置、有效发射仰角范围及方位角范围的配置, 使火箭携带的 AgI 烟剂撒播段尽可能地横跨雹云上升气流区并通过极值区或通过雹云强回波区附近, 这为制定火箭防雹作业技术方法提供了理论基础。但就作业方法等问题, 常见的还是建立在常规雷达监测和高炮防雹理论基础上, 如王雨增等^[5]、陈文选等^[6]结合 711 雷

达建立的作业用弹量估算等, 依托新一代天气雷达探测, 建立火箭防雹作用方法尚不多见。

黄河三角洲地区是山东省冰雹等强对流天气多发地。从 1994 年开始, 滨州市布设“三七”高炮进行人工增雨防雹作业, 使对冰雹灾害的防护实现了从“灾后救助”向“灾前防御”的转移。2002 年起在渤海湾南部沿海地区布设火箭发射架进行人工防雹作业, 计划逐步构筑以火箭发射系统为主的防雹作业体系。本文依据目前冰雹形成机制和防雹机制理论, 结合滨州 CINRAD/SC 雷达探测资料以及实际防雹个例, 在建立火箭防雹技术方法上进行探讨。

1 火箭防雹作业的原理及技术关键

1.1 火箭防雹的作业原理

目前防雹作业普遍采用的方法有两种, 一是向云中播撒催化剂, 二是爆炸影响雹云的发展^[1]。火箭防雹主要是属于第一种, 即

资助课题: 国家自然科学基金项目(40275001)

收稿日期: 2006 年 10 月 30 日; 修定稿日期: 2007 年 8 月 15 日

向云中播撒催化剂的方法,通过人工途径把比自然雹胚多得多的“人工雹胚”引入云体,使之影响冰雹及雹云的发展过程,达到减轻或防止灾害的发生。

1.2 技术关键

从撒播作业的原理可以看出,要想使播撒作业获得较好的效果,必须掌握好作业时机,向云体特征部位播撒足够多的人工冰核,使其长大成为与自然雹胚尺度相当的冰粒,并进入主上升气流的冰雹生长区。即从实际作业角度讲,关键在于撒播时机、撒播部位和用剂量。

火箭防雹作业控制范围比高炮大、撒播速度快,催化剂成核率高,核化速度快,由于从播撒到起作需要一定的时间,播撒应适当提前,例如提前10分钟左右;火箭射击精度低于高炮,且播撒受环境风的影响甚大,因此在对作业部位、作业时机的要求上较高炮更高。

2 作业部位的确定

2.1 “穴道”的概念

根据许焕斌等^[1]对强对流雹云单体的对流流场特点和相应过冷水场配置的综合分析,并结合雹云实例,利用三维雹云模式(GF)和三维粒子增长运行模式进行数值模拟研究发现,不论是超级单体风暴、单体还是多单体风暴,在主上升气流边侧都存在着水平速度为零的区域,由于垂直气流和水平气流的配置,决定了进入水平速度零域的粒子具有独特的运行轨迹,只能随着它的逐渐长大由入流带它进入主上升气流区,构成一个冰雹生长的“穴道”。只要是进入“穴道”的雹胚都可以循环运行增长,可与自然雹胚实现平等“竞争”。因此,“穴道”入口处即为最佳

的作业部位。在该区域播撒,避免了人工冰核直接播撒到主上升气流区,使人工冰核在未增长到雨粒子尺寸前已被带出云顶,失去了“争食”的机会,又保证了播撒区人工冰核有足够的核化成长时间,且成雹胚后可以进入主上升气流区,参加“竞争”,达到限制冰雹长大,减轻和避免灾害的目的。

2.2 “穴道”位置的确定

强对流云流场分布特征是在云体下层辐合和上层辐散之间存在一个相对于云体水平风速为零的区域即“零域”,在经过该区域的垂直剖面上表现为一条线,称为“零线”。水凝物粒子沿“零线”循环运行增长并逐步进入主上升气流的冰雹长大区长大成雹。为此,在“零线”下方主上升气流边侧的入流区,可称之为冰雹形成的“穴道”,雹胚在“穴道”入口区形成,再随着尺度的增长而逐步进入主上升气流区。因此“穴道”的位置可由云体的主上升气流区及其流场的相对水平风速近于零的“零域”位置来确定^[1]。“零域”位置可利用雷达的RHI观测资料来判定,当云体正面移向或移离雷达站时,可以通过径向速度图判定;当云体从侧向移过雷达站时,可由悬挂回波的轴线来判定,此轴线区域即为“零域”。

通过新一代多普勒天气雷达实际探测,也印证了强对流单体这种流场结构。2001年8月23日晨3时,对流云在河北南部发展,强风暴单体在引导风的作用下,向SSE方向移动,5时前后冰雹云从鲁西北的德州开始横穿鲁中,12时左右从鲁东南日照入黄海减弱。受其影响,山东省有7个市的13个县(区)61个乡镇遭受冰雹和大风袭击,冰雹最大直径5cm,降雹持续10~30分钟,造成的直接经济损失在10亿元左右。位于强风暴单体移动方向左侧的滨州新一代天气雷达对本次过程进行了比较完整的探测,尤其是利用该雷达具有的RHI功能,探测到比较典

型的悬挂回波区和回波墙,强回波呈纺锤状,表现为典型超级单体特征。

图 1(见彩页)为 8 时前后,单体移动到测站正南,移向为远离雷达测站方向,观测到的一幅单体 RHI 图,通过径向速度图,较好地揭示了这一超级单体的内部风场运动特征,单体移动方向的前沿存在明显的趋向雷达的径向速度区,即入流区(图中粗箭头表示),在距测站 90km 处近地面到 7km 高度等速度线梯度较大,离开和趋向雷达的正负径向速度在此形成强烈的辐合运动,而在 8km 以上的高空,情况恰好相反,为辐散运动,可以判断在 7~8km 之间,存在“零域”。

对于主上升气流区的位置,是播撒作业的关键区域,雷达观测表明,强回波中心对应上升气流区的最大值区^[4],对于超级单体风暴对应着无回波区“穹隆”或弱回波区,在图 1 所示个例中,作业播撒部位为单体距雷达 95km 粗箭头表示处。

2.3 作业中播撒部位的确定

通过最近几年结合新一代天气雷达观测和实际作业个例,需要考虑大气环境温度场和雷达观测到的单体整体结构。例如,播撒部位应在对流的云空中强回波中心的下方外测 1~2km 处的 30~40dBz 的强度区外沿,播撒区的温度一般掌握在 -6~-15℃ 之间为宜。一般可以利用多普勒雷达的组合反射率因子(CR)和垂直液态含水量(VIL)产品^[7]的空间分布简单地确定单体最大上升气流区,CR 产品可以不用对每个仰角进行寻找就可以显示风暴中最高反射率因子,依此确定风暴最大上升气流区域位置,根据当日探空资料计算播撒适宜的温度窗高度。播撒部位选定在单体移向的正前方,最强回波外沿 30~40dBz 区域。

俄罗斯科学家(例如 Abshaev 等^[8])提出了一套雷达-火箭防雹作业系统。其防雹

作业部位的判定结果,与“穴道”理论给出的结论是基本一致的,只不过“穴道”理论是根据强对流(雹)云流场动力学特征与云中大粒子运行增长的微物理学特征相互作用的规律得出的^[1]。

3 用弹量的计算

作业用弹量一般计算公式为^[3,9,10]:

$$M = \frac{VQE}{GFn} \times 10^9$$

对中等强度雹云撒播体积 V 可取 10km^3 , $0\text{℃} \sim -20\text{℃}$ 层云中撒播区含水量 Q 可取 $5 \sim 10\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 单个不成灾冰雹粒子的质量 G 在 0℃ 层高度上一般为 0.5g , 催化剂成核率 F 在 -10℃ 时取 10^{15} 个 $\cdot \text{g}^{-1}$, 人工雹胚的形成概率 E 一般取 10^{-4} , 一发火箭催化剂的含量 n 为 10g , 在此情况下 $M=0.1 \sim 0.2$ 发, 这里没有考虑催化剂的扩散速率等因素。

但实际上,雹云撒播面积一般大于 10km^2 , 另外受撒播环境的不均匀性及其它因素影响,用弹量要大一个量级,即 $1 \sim 2$ 发为宜。

4 作业时机

雹云是小尺度或中- γ 尺度系统,其生命史一般 1 小时左右,雹云发展的两个关键阶段——跃增阶段和孕育阶段,其时间仅几分钟到十几分钟,作业的最佳时机在跃增阶段初期,也是冰雹“穴道”结构的形成时期,这样在雹云发展到孕育阶段,即冰雹生长阶段时人工冰核已经长大到自然雹胚尺度,可获得最佳“争食”效益。从滨州地区降雹持续时间看,一般为几分钟到十几分钟,个别达 40 分钟,因此降雹开始时间应为播撒作业的时间下限,随着降雹的开始,雹云的顶高、强度、闪

电频数都迅速下降,多数雹云在十几分钟内即进入消亡阶段。

在实际作业中,适时把握雹云的跃增阶段是一项较困难的工作,加之作业点的固定性和准固定性,给掌握最佳作业时机带来难度。但把握强对流的发展,即“穴道”的形成,在时间上则相对较宽裕。只要天气形势、大气层结、云体大小符合雹云形成特征,且“穴道”已形成即可进行人工播撒作业;在降雹开始后,由于“穴道”仍可能维持,为了防止出现长时间降雹(超过10分钟的降雹)造成危害,仍应进行作业。在特定天气形势下,雹云的生成、发展往往在地域和强度上有一定的相对固定性,这给掌握最佳作业时机带来很大方便。

5 作业程序

5.1 确定防雹作业云体

(1) 作业云体指标

结合滨州市开展人工防雹作业10年来的作业经验和近几年滨州新一代天气雷达实际观测资料统计,对于已成雹云或很可能发展成为雹云的对流云体指标见表1。

表1 雹云判别指标

要素	指标
组合反射率因子强度	随季节不同一般要大于50或55dBz
云体高度	超过-20℃层高度
垂直积累液态含水量(VIL)	一般大于 $35\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
强回波(大于55dBz)高度	超过0℃层高度1000m
3km处强度大于30dBz云体的大小	水平范围大于 10km^2
对流的初始回波高度	达-15℃层高度

上述指标要结合当天的天气形势、影响系统等综合判断,在把握不大的情况下,当发现速度、强度场上具有明显的雹云特征时^[11],遵循宁空勿漏的原则。

(2) 其他指标

在同一天内出现与已经降雹的冰雹云体在强度、云高等特征相似的对流云。

在典型的低涡、横槽等强对流易发展的天气形势下,处于加强阶段且其移动方向下游存在防御空白区的强对流云。

5.2 确定作业高度

作业高度一般结合当日0℃层高度以及雷达探测的对流单体“穴道”位置确定。紧急情况下,作业高度可定在单体空中强回波高度以下1000m左右,其适宜的环境温度为 $-6\sim-15\text{℃}$ 。根据火箭生产厂家提供的弹道数据表可知火箭发射高度角及有效距离。

5.3 作业前的准备

作业前应以作业点为圆心,以与确定作业高度相对应的有效作业距离为半径划出警戒线。确定警戒线后随时注意需作业云体的移动情况,连同其进入警戒线时的大体方位通报作业点,做好作业前的一般准备。

5.4 射击诸元的订正

了解当日高空风分布情况,做好发射方位高度订正准备。

顺风使火箭飞行高度角增长,订正值负即减小发射高度角;逆风使飞行高度角减小,订正值正即增加发射高度角;横侧风使火箭偏向风的来向,订正方向与风的去向相同即射击方位角向风的去向方向偏移,具体订正数据依据火箭生产厂家提供的数据。

高空风应选用各层平均状况,资料可从常规高空资料取得,对风向按预计的发射方向进行分解。

5.5 作业指令下达

在云体接近警戒线前,注意云体的移动及强度变化,特别是适宜作业高度有无重大变化。在接近警戒线前10分钟通报作业点催化单体作业方位,以便调整发射方向,做好

发射前一切准备。

在催化单体接近警戒线前 1~2 分钟通报作业方位、用弹量,下达发射指令。

6 应用实例

2002 年 5 月 31 日午后到 6 月 1 日傍晚,滨州市先后有 5 个县 19 个乡镇降雹,其中 6 月 1 日自 9 时在渤海湾南部沿海生成的对流云团向南传播、加强,先后影响沾化、垦

利、利津、东营、博兴等地,持续近 10 小时,该地区主要布设“三七”高炮做为防雹工具,单体影响地区相关炮点进行了防雹作业,地面仍出现了降雹,形成不同程度的冰雹灾害。在影响沾化北部火箭作业点时(图 2,见彩页),根据雷达探测和探空资料,确定影响作业的基本要素和作业参数,实施防雹催化作业。

从连续的雷达回波演变看,单体向 SSE 方向移动,雷达观测方向与风暴移向有约 30 度的夹角,基本接近风暴向雷达测站移动,

表 2 2006 年 6 月 1 日 08 时济南站探空资料

0℃层高度	-20℃层高度	850hPa		700hPa		500hPa		400hPa		300hPa	
		风向	温度	风向	温度	风向	温度	风向	温度	风向	温度
4.2km	6.7km	230°	22℃	275°	8℃	315°	-13℃	310°	-25℃	295°	-41℃

雷达 RHI 观测图像(图 3,见彩页)较好地反映了风暴流场结构。从径向速度场上,在约 5km 到 7.5km 高度,水平气流逐渐由辐合转变为辐散,说明该高度区域为辐合与辐散的过渡区域,即“零域”,而强度图上,50dBz 的强回波发展到 12km(-60℃左右)高,达到 60.5dBz 最强回波中心在 7.4~8.3km 区域,从雷达观测资料可以判断,对该冰雹云作业“穴道”在中空强回波下方,高度 6km 处,催化作业部位确定为图 3 黑色方框区。612 火箭作业点布设 WR-1B 型火箭,采用固定作业方式,根据雷达探测资料,指挥中心下达了作业方位正北、仰角 60 度的作业参数,12:56,雹云移动到作业点 4~5km 的东北方向,开始实施防雹作业,发射火箭弹 2 枚。实施火箭防雹作业,发现在作业 7~10 分钟后出现了持续 15 分钟左右的雹云减弱(图略),以后有所加强,火箭作业点保护区内未见雹,而当单体影响其南部 608 高炮作业点时,出现明显降雹,靠近垦利边界地区出现轻灾。

7 结 语

在应用雷达指挥防雹作业,确定火箭作业参数过程中,常规的 RHI 产品比较直观、便捷。根据新一代天气雷达观测规定,雷达观测连续进行体积扫描,非 SA 雷达利用移植的 CINRAD 气象产品软件包,生成诸如组合反射率因子、垂直剖面等基本产品以及风暴跟踪、弱回波区、冰雹指数等对流识别产品,为更好地发挥新一代天气雷达效益奠定了基础。目前滨州 CINRAD/SC 雷达运行采用批运行工作模式,即每 10 分钟进行一次体扫,其他时间进行 PPI 自动观测,可以针对强回波区,人工进行 RHI 观测,这样保证了有连续的体扫资料生成气象产品,提高了天气的预警能力,同时能利用其 RHI 观测方式,对典型的强对流风暴进行 RHI 观测,获取人工防雹作业参数,提高人工防雹作业的效率。

火箭作业由于其抗击环境风的能力较

差,对较小的对流单体作业难度较大。只有充分利用新一代天气雷达具有的准确定位功能结合当日 0°C 层高度以及雷达探测的单体“穴道”位置确定作业部位以及时机。对影响其作业参数因素进行定量订正,并在最短的时间内将作业诸元传递到作业点,才能提高其作业精度,发挥其应有的威力。

致谢:本文在完成过程中以及作业技术实际应用中均得到了北京大气环境研究所许焕斌研究员的悉心指导和帮助,特此感谢。

参考文献

- [1] 许焕斌,段英,刘海月. 雹云物理与防雹的原理和设计[M]. 北京:气象出版社,2004:148-159;214-221.
- [2] 洪延超. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究[J],气象学报,1999,57(1):30-44.
- [3] 施文全,李斌. 利用雷达指挥 WR-1B 型火箭进行防雹作业的方法[J]. 气象,1996,22(7):52-56.
- [4] 李宏宇,胡朝霞,肖辉,等. 人工防雹实用催化方法数值研究[J]. 大气科学,2003,2:212-221.
- [5] 王雨增,刘新元. 防雹作业用弹量的计算[J]. 气象,1996;22(6):29-31.
- [6] 陈文选. 山东地区人工防雹用弹量的估算[J]. 气象,2000,26(9):36-38.
- [7] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:181-188.
- [8] Abshaev All. M. etal, Aircraft-rocket technology for hail suppression[R]. Eighth WMO Scientific Conference on Weather Modification, Casabulanca, Morocco, 7-12, April, 2003, WNP report No. 37, 339-342.
- [9] 章澄昌. 人工影响天气概论[M]. 北京:气象出版社,1992:280-281.
- [10] 王雨增,李风声,伏传林. 人工防雹实用技术[M]. 北京:气象出版社,1994:76-80.
- [11] 吴书君,王凤娇,王立静. 强对流天气的多普勒径向速度分析[J]. 山东气象,2002,4:27-29.

李金枝等：火箭防雹作业技术方法的探讨

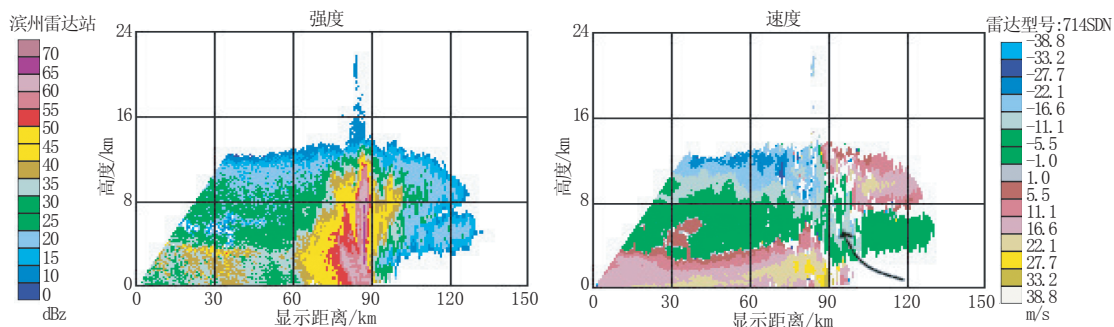


图1 2001年8月23日超级单体RHI

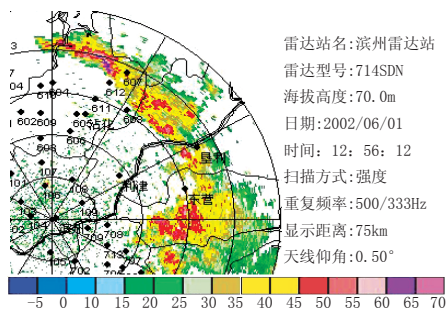


图2 2002年6月1日火箭作业回波分布图 (编号612为火箭作业点)

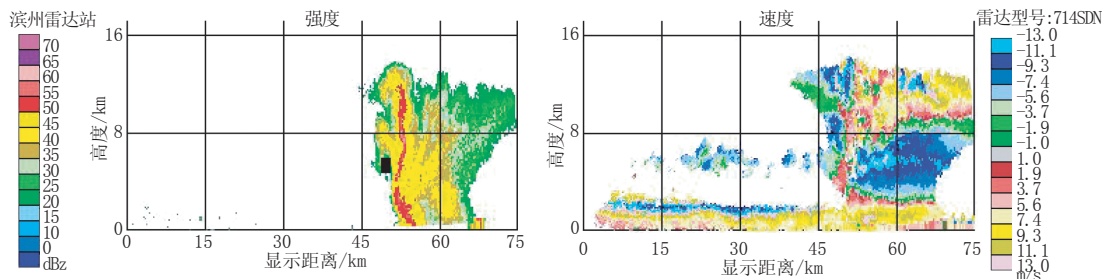


图3 2002年6月1日滨州雷达RHI观测资料