

李红斌,何玉科,濮文耀,等. 多普勒雷达特征参数在人工防雹决策中的应用[J]. 气象,2010,36(10):84-90.

多普勒雷达特征参数在人工防雹决策中的应用^{*}

李红斌 何玉科 濮文耀 王丽娜 赵繁盛

大连市人工影响天气办公室, 大连 116001

提 要: 对大连地区 2003—2008 年多普勒雷达观测到的 37 个冰雹和强雷两个例雷达体扫资料进行 PUP 软件计算和处理, 得到了每个例雷达回波强度、回波顶高、30 dBz 强回波中心高度、强回波顶高和垂直积分液态水含量几个主要雷达参数值、以及各参数随时间的变化特征, 总结了冰雹云识别的雷达技术指标模型; 根据大连地区降雹特点, 将冰雹云分为强(超级单体)雹云、多单体雹云和单体雹云三类, 总结了冰雹云类型判别的雷达指标(即防雹作业决策指标)。

关键词: 雹云识别, 防雹决策, 作业技术方案

Application of Doppler Radar Characteristic Parameter in Artificial Hail-Suppression Decision

LI Hongbin HE Yuke PU Wenyao WANG Lina ZHAO Fansheng

Dalian Weather Modification Office of Liaoning Province, Dalian 116001

Abstract: The Doppler radar data of 37 hail and thunderstorm cases in Dalian during 2003—2008 were calculated and processed by PUP softwares, several radar main parameters including echo intensity, echo top height, 30 dBz echo center height, top height of strong echo intensity VIL etc. and their temporal variations were obtained. Technique index models of hail-cloud identification were summarized. Based on hail characteristics in Dalian, the hail-clouds were divided into three types: cell, multi-cell and super-cell, and types of hail-cloud radar indexes were summarized (namely hail-suppression decision indexes). By integrating the latest hail-suppression catalytic techniques and practical experience, the Dalian artificial hail-suppression operation models (operation technique projects) were studied and designed. The research did some basic work on hail-cloud identification, hail-suppression scientific decision and operation, and greatly improved the scientific level and economic benefit on Dalian artificial hail-suppression operation.

Key words: hail-cloud identification, hail-suppression decision, operation technique project

引 言

我国是一个农业大国,也是世界上冰雹灾害发生最严重的国家之一,人工防雹是防灾减灾工作的一项重要措施。随着大气科学和相关科学技术的不断提高,人们对冰雹云的识别和防雹能力也在不断提高。目前,世界上开展人工防雹工作的国家有 30

多个,我国在人工影响天气作业规模上已据世界首位^[1],在减轻雹灾损失方面取得了重大的经济社会效益。

近年来,随着新一代天气雷达技术的迅速发展,对降雹机制和人工防雹新技术理论研究均取得了许多新的进展^[2-4],为各地科学开展人工防雹作业提供了更好的基础和依据。一些省、市根据新一代雷达探测数据资料进行分析和研究,总结了各类不同雷

* 大连市科委的“人工防雹作业决策指挥系统的研究”科研课题资助

2009 年 7 月 10 日收稿; 2010 年 4 月 3 日收修定稿

第一作者:李红斌,从事人工影响天气业务与科研。Email:lhb7159@163.com

达参数作为防雹作业的判据指标^[5-8],在一定程度上提高了防雹作业的科技水平。同时,也应该看到人工防雹作业中还存在不少问题,如,对冰雹云的准确识别,作业过程中仍存在一定的盲目性,作业参数的确定上任意性较大,在作业指标上存在着对关键指标参数没有充分应用以及非重要参数指标选取过多等问题。许多省、市经过多年努力,也建立了适合当地条件的人工防雹技术系统^[9-12],但真正应用到实际的并不多,这既有系统业务化的问题,也有作业中的环节多、技术难题未完全解决等问题,致使在防雹作业决策上存在主观臆断的问题。

了解冰雹云的空间结构是进行人工防雹作业的基础,而天气雷达是了解云体结构的最主要的手段。随着新一代多普勒天气雷达等现代化探测设备的投入和使用,为省、市级人影综合业务系统建设提供了良好的基础和有力的技术支撑。为了解决上述问题,提高大连市人工防雹作业的科学性和高效性,本文通过对大连市 2003 年以来多普勒雷达观测到的 37 个降雹和强雷两个例的雷达历史资料进行 PUP 软件计算和处理,得到了每个个例的雷达回波强度、云顶高度、回波强中心高度、强中心顶高以及垂直积分液态水含量等雷达回波主要特征参数值及随时间的变化,并进行了系统性的分析和研究,总结了大连地区的降雹特征、冰雹云识别技术方法,以及防雹作业决策的雷达判别指标模型;在借鉴最新的防雹理论研究基础上^[2],结合大连实践,对防雹作业方案进行了技术设计和科学研究,最大限度解决了防雹作业中的一些技术难题。将科研成果 2009 年应用到大连市 7 次冰雹天气过程的人工防雹作业中,取得了较好的效果,基本实现了对雹云的及时和科学判别,以及实时防雹作业科学决策指挥的目标,因此大大提高了大连市防雹作业的科技水平和综合效益。

1 冰雹云的识别与分类

人工防雹作业的第一步是将雹云从强雷雨云中区别出来,然后进行防雹作业的判别决策,进而确定作业方案。实践证明,只有及时准确地识别和预测出冰雹云,才能有效进行防雹作业,抑制冰雹的进一步发展,将冰雹灾害降到最低。

对 2003 年大连多普勒雷达投入业务运行后观测到的降雹个例和强雷两个例共 37 个个例(把一次局地降雹或强雷雨过程作为一个个例)的雷达体扫资料

进行统计和分析。根据大连地区降雹特征首先将冰雹云进行分类;同时,分别对各类型雹云及雷雨云体扫资料进行 PUP 软件计算和处理,得到每个个例的回波强度、30 dBz 强回波中心高度和顶高、回波云顶高、垂直积分液态水含量的雷达参数值及其变化特征值,进而分析和研究了冰雹云识别的技术方法。

1.1 冰雹云分类

对大连地区 29 个冰雹个例进行降雹特征分析,可将雹云分为三类,即:单体雹云、多单体雹云和强(超级单体)雹云。不同类型雹云个例分别为,单体雹云 11 个、多单体雹云 13 个、强(超级单体)雹云 5 个。由此可见,大连地区产生降雹最多的是多单体雹云,其次是单体雹云,强单体雹云最少。

分别对各类型雹云的每个个例进行雷达回波强度、30 dBz 强回波中心高度、30 dBz 强回波顶高、回波云顶高及垂直积分液态水含量的雷达特征参数值进行了统计和分析,得到了冰雹云类型分析的判据指标(见表 1)。根据以上判别指标确定冰雹云类型,从而确定作业实施方案。其中,回波云顶高度在这里定义为 0 dBz 回波(人影中通常定义的)所在的高度。云顶高度可通过雷达实时监测,采用雷达测高软件计算^[13]得到。

表 1 冰雹云分类判据指标

Table 1 Hail-cloud identification parameter index

雹云类型	回波强度/dBz	强中心(30 dBz)高度/km	强中心(30 dBz)顶高/km	云顶高度/km	垂直积分液态水含量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
强冰雹	≥ 45	5.0~7.5	9~15	12~18	≥ 25
多单体雹云	≥ 30	4.0~6.0	7~13	10~17	10~50
单体冰雹	≥ 25	4.0~5.3	6~11	8~16	5~40

在实施防雹作业时,首先要确定雹云类型,它是防雹作业方案确定的前提,对不同类型的雹云作业将输出不同的作业方案。

1.2 冰雹云分类识别

对 29 个冰雹云个例和 8 个雷雨云个例的雷达回波强度、30 dBz 强回波中心高度和顶高、回波云顶高、垂直积分液态水含量的雷达参数值分别进行统计和分析发现,冰雹云雷达回波参数在雹云发展初期时表现为明显的突变(跃增)特征,且冰雹云强中心高度在云体上部;而强雷雨云的跃增现象不明显,雷雨云的强中心高度在云体下部,结果同雹云理

论结论一致^[2,13]。

由此得到识别雹云的方法:先对雷达初始回波(或强中心回波)高度和强回波顶高进行判断,如强回波出现在云体上部,或 30 dBz 强回波顶高 > 8.3 km 可初步认为冰雹云,再根据该回波的雷达各特征参数随时间的变化做进一步确定,如有跃增现象则确定为冰雹云。在 2009 年大连地区的人工防雹作业中,市人影指挥中心通过雷达实时监测,将雹云识别方法应用到 7 个冰雹天气过程,对及时发现雹

云和科学指挥防雹作业发挥了极大作用,取得了明显的作业效果。

1.2.1 单体雹云雷达参数特征

对 11 个单体雹云个例雷达各特征参数值分别进行统计和分析,得到单体雹云识别的雷达参数特征值及类型指标。这里选取了一个具有代表性的个例,即 2006 年 10 月 13 日 14 时瓦房店市炮台降雹个例。表 2 为此次降雹过程的雷达回波各参数及其随时间的变化特征。

表 2 2006 年 10 月 13 日 14 时瓦房店市炮台镇降雹雷达回波参数变化

Table 2 Variations of hail-cloud radar echo parameters in Paotai Town Wafangdian City at 14:00 BT 13 October 2006

时间	雷达回波强度/dBz	回波云顶高/km	30 dBz 强回波顶高/km	30 dBz 强回波中心高度/km	垂直积分液态水含量/kg·m ⁻²
13:44	40	10	7	4.5	1
13:51	40	12	9	4.5	5
13:58	50	13	10	5	20
14:06	55	14	11	6	30
14:13	55	13	10	4	35
14:20	60	12	9	2	25
14:27	55	12	9	1.5	15
14:35	55	13	8	1.5	15

由表中可见,初始回波在 13:44 已生成,30 dBz 强回波中心高度到 4.5 km 高度处,距 14:00 瓦房店市炮台镇产生降雹历时 15 分钟左右,为实施防雹作业的有利时机;在降雹前 15 分钟内,回波强度、30 dBz 强中心高度和顶高、回波云顶高、垂直积分液态水含量等回波参数均表现为明显的跃增。其中,30 dBz 强回波顶高和垂直积分液态水含量的跃增尤其明显(见图 1、2);降雹结束后,回波高度参数与垂直积分液态水含量均表现为迅速减小。

的个例,即 2006 年 10 月 13 日 13 时 51 分瓦房店市复州城降雹个例。表 3 为此次降雹过程的雷达回波特征参数及其随时间的变化特征。

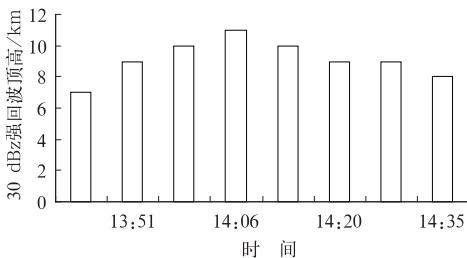


图 1 瓦房店市炮台镇降雹时 30 dBz 强回波顶高变化特征

Fig.1 Variations of 30 dBz echo-top characters as hail in Paotai Town, Wafangdian City

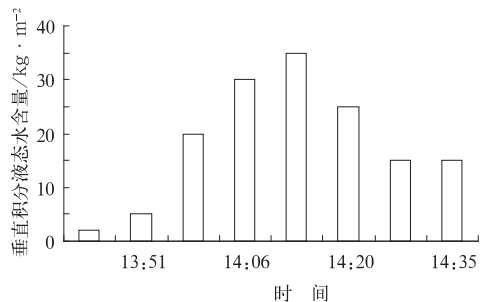


图 2 瓦房店市炮台镇降雹时垂直积分液态水含量变化特征

Fig.2 Variations of VIL characters as hail in Paotai Town, Wafangdian City

1.2.2 多单体雹云雷达参数特征

对 13 个多单体雹云个例的雷达各特征参数值分别进行统计和分析,得到了多单体雹云识别的雷达参数特征值及类型指标。这里选取一个有代表性

从表 3 看到,初始回波 13:22 已生成,30 dBz 强回波中心高度达 5 km 高,30 dBz 强回波顶高到达 8 km,冰雹云特征明显;到 13:51 产生降雹时共用 30 分钟;30 分钟为冰雹云的跃增和发展阶段,此时是防雹作业的最佳时机。这期间,回波的各项特征参数均出现了明显的跃增变化。其中,30 dBz 强回波顶高和垂直积分液态水含量跃增更明显(见图 3、4)。降雹结束后,回波高度参数与垂直积分液态水含量表现为迅速减小。

表 3 2006 年 10 月 13 日 13 时 51 分瓦房店市复州城降雹雷达回波参数变化

Table 3 Variations of hail-cloud radar echo parameters in Fuzhoucheng Town Wafangdian City at 13:51 BT 13 October 2006

时间	雷达回波强度/dBz	回波云顶高/km	30 dBz 强回波顶高/km	30 dBz 强回波中心高度/km	垂直积分液态水含量/kg · m ⁻²
13:22	35	10	8	5	1
13:29	45	11	9	5	15
13:37	55	12	10	6	25
13:44	60	14	11	7	40
13:51	60	16	13	6	50
13:58	60	15	12	4	45
14:06	60	14	9	3	30
14:13	55	12	8	1.5	25

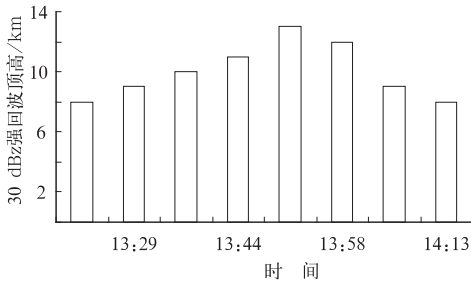


图 3 瓦房店市复州城降雹时强回波顶高的变化特征

Fig. 3 Variations of 30 dBz echo-top characters as hail in Fuzhoucheng Town, Wafangdian City

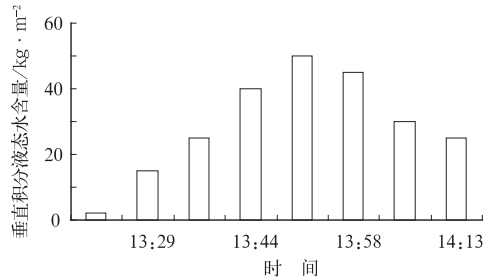


图 4 瓦房店市复州城降雹时垂直积分液态水含量变化特征

Fig. 4 Variations of VIL characters as hail in Fuzhoucheng Town, Wafangdian City

1. 2. 3 强(超级单体)雹云雷达参数特征

对 5 个强(超级单体)雹云个例的雷达各特征参数数值分别进行统计和分析,得到了强(超级单体)雹云识别的雷达参数特征值及类型指标,这里选取了一个

有代表性的典型个例,即 2006 年 10 月 13 日 18 时 47 分普兰店市强降雹的一次个例。表 4 为此次降雹过程的雷达回波特征参数及其随时间的变化特征。

表 4 2006 年 10 月 13 日 18 时 47 分普兰店市强降雹的雷达回波参数特征

Table 4 Radar echo parameter characters of strong hail in Pulandian City at 13:18 BT 13 October 2006

时间	雷达回波强度/dBz	回波云顶高/km	30 dBz 强回波顶高/km	30 dBz 强回波中心高度/km	液态水含量/kg · m ⁻²
17:28	50	14	12	5	20
17:35	55	14.5	12.5	7	45
17:42	55	14	11	5.5	40
17:50	60	14	12	6	55
17:55	60	16	14	6	65
18:04	>65	16	14	6	55
18:26	>65	17	14	5	55
18:33	>65	17	14	6	>70
18:40	>65	17	14	6	60
18:47	60	18	15	7	>70
18:55	>65	17	15	4.5	50
19:02	60	13	11	4.5	45

由表 4 可看到,初始回波于 17:28 已出现,回波强度达 50 dBz,强回波中心高度在 5 km,30 dBz 强回波顶高达到 12 km 以上;回波特征参数跃增明显,从跃增、发展到降雹,历时 1 小时 20 分;从表中还可以看到,在初始回波的跃增和发展过程,回波强度和云顶高度不断加强,发展阶段的回波强度均 >

65 dBz,30 dBz 强中心高度基本在 6~7 km 高度,垂直积分液态水含量在波动中迅速增强,最大时达 > 70 kg · m⁻²;18:47 降雹,从记录上看,降雹时间持续了 20 分钟,冰雹最大有鸡蛋黄大小;降雹结束后,回波高度参数和垂直积分液态水含量迅速下降。

从以上各类型冰雹云的识别与分析得出以下结

果:在实际防雷作业中,首先对 30 dBz 强回波中心高度和顶高做初步判断,再由雷达特征参数随时间的变化进一步确定冰雹云及其类型。对冰雹云及时、准确的识别是科学指挥作业的前提,也是防雷作业实施的决策依据。

1.2.4 强雷雨云的雷达参数特征

对 8 个强雷雨云个例的雷达体扫资料进行计算和处理,得到强雷雨云识别及雷达特征参数指标。这里选取了一个有代表性的个例,即 2008 年 6 月 27 日 9 时 22 分瓦房店市长兴岛的一次强雷雨天气

过程(见表 5)。

从表 5 看到,在强雷雨产生之前的十几分钟里,雷达各特征参数均平稳增加,未出现跃增变化;回波强度参数变化幅度不大,仅有 10 dBz;30 dBz 强回波中心高度始终在 3~4 km 之间,维持在回波的下部;30 dBz 强回波顶高、云顶高变化平稳(图略),垂直积分液态水含量也是逐渐平稳增加;降水结束后,回波各项参数变化逐渐减小。当判断为强雷雨云时,可根据对流云的增雨作业条件实施人工增雨作业^[14]。

表 5 2008 年 6 月 27 日 9 时 22 分瓦房店市长兴岛强雷雨雷达回波参数特征
Table 5 Radar echo parameter characters of strong thunderstorm in Changxindao Town, Wafangdian City at 09:22 BT 27 June 2008

时间	回波强度/dBz	回波云顶高/km	30 dBz 强回波顶高/km	30 dBz 强回波中心高度/km	液态水含量/kg·m ⁻²
9:10	40	10	4.5	3	5
9:16	45	11	8	3.5	5
9:22	45	12	8	3	10
9:29	45	11	8	3	10
9:35	50	11	8	4	15
9:44	50	12	8	4	15
9:47	50	12.5	7.8	3.5	15
9:53	45	12	7.2	2.5	10

2 防雷作业技术方案设计

防雷原理是利用“利益竞争”在云体中进行人工雹胚的过量播撒,使众多雹胚“争食”可利用的云中过冷水,减少局地过冷水量和雹块增长率,从而不能增长到足够大而在下落中融化成雨^[2]。目前主要采用高炮和火箭两种作业工具将人工雹胚引入云中。

其中,火箭作业的特点是水平射程远、垂直距离高、催化剂含量大,且安全性能好,并具有同等高炮的爆炸性能^[2],通常优于(强单体冰雹云除外)高炮人工防雷作业;高炮作业的突出特点是具有“爆炸效应”^[15],在雹云发展旺盛阶段或对强雹云作业,采用高炮效果更好,但它有作业射程距离短,高度低,催化剂量少^[15]等缺点。两种工具特性不同,在人工防雷作业中设计合理,可发挥优势互补。

人工防雷作业是否科学有效,还取决以下要素,即:作业时机、部位、催化剂量和作业方式^[13]。因此,根据防雷催化原理,借鉴最新防雷技术成果,由雹云类型和作业工具(高炮、火箭)不同设计研究了以下六套防雷作业模式(技术方案)。

2.1 单体雹云防雷作业技术方案

单体雹云定义为初生阶段的雹云或弱单体雹

云。

2.1.1 火箭对单体雹云作业技术方案

A. 作业部位(即作业仰角和方位角)

根据雹云催化理论和数值模式计算结果,对于单体雹云实施防雷作业其作业部位应选择**在强回波中心**^[1],由此得到以下结果:

① 仰角确定方法:将强回波中心(或强回波中心附近-6℃层)高度作为火箭作业的垂直抛物线顶高(要换算成当地的海拔高度)及强回波中心距作业点之间的水平距离,查火箭弹道曲线参数确定发射仰角。

② 方位角确定方法:参照火箭增雨作业中对流云方位角的确定方法^[15],即由三角余弦计算求得。

B. 作业剂量:火箭作业剂量确定借鉴了数值模式理论^[1-2],结合作业实践,每次可发射火箭 6~10 枚,作业 10 分钟后判断作业云体变化,决定是否再作业。

C. 发射方式:在-6℃层高度上进行扇形发射,扇形角度<15°。

2.1.2 高炮对单体雹云作业技术方案

A. 作业部位

部位的确定原理同上,由此得到以下结果:

① 仰角确定方法:将强回波中心高度(或 -6°C 层高度)作为高炮作业的炸点高度(换算成当地海拔高度)及强回波中心距作业点之间的水平距离,查高炮弹道参数确定发射仰角。

② 方位角确定方法:参照火箭增雨作业中对流云方位角确定方法^[14],即由三角余弦计算求得。

B. 作业剂量:参照高炮防雹作业技术规范^[17],结合实践,对单体雹云作业每次可发射 10~30 发,并隔 5~7 分钟判断作业后的回波变化,决定是否再作业。

C. 发射方式:对 -6°C 高度层进行水平扇面发射,扇形角度 $<20^{\circ}$ 。

2.2 多单体雹云防雹作业技术方案

多单体雹云定义为相连的两个以上单体雹云、两块合并的雹云或处于发展中的单体雹云。

2.2.1 火箭对多单体雹云作业技术方案

A. 作业部位

作业在成熟单体或发展中单体的强回波中心(或 -6°C 层)高度地方,以及新生单体(即生成于成熟单体右侧的新单体)强回波中心高度^[2]。

作业仰角与方位角的具体确定方法同单体雹云。

B. 作业剂量

作业剂量的确定借鉴了数值模式理论^[1-2],结合作业实践每次对成熟单体作业可发射火箭 8~14 枚,对新生成单体作业每次可发射火箭 6~10 枚;对成熟单体及新生单体应进行反复作业。

C. 发射方式:在 -6°C 层高度上进行扇形发射,扇形角度 $<15^{\circ}$ 。

2.2.2 高炮对多单体雹云作业技术方案

A. 作业部位

作业在成熟或发展中的云体强回波中心(或 -6°C 层高度)地方,以及新生单体(即生成于成熟单体右侧的新单体)强回波中心高度^[2]。

高炮仰角和方位角的具体确定方法同单体雹云。

B. 作业剂量

参照高炮防雹作业技术规范^[17],结合实践,对于成熟单体雹云每次作业可发射炮弹 20~60 发,对新生单体每次作业可发射炮弹 10~30 发。对成熟单体和新生单体应重复作业,雷达实时跟踪作业云体变化,决定是否终止作业。

C. 发射方式:对 -6°C 高度层进行水平扇面发射,扇形角度 $<20^{\circ}$ 。

2.3 强(超级单体)雹云防雹作业技术方案

强雹云定义为超级单体雹云或发展旺盛的成熟冰雹云。

2.3.1 火箭对强(超级单体)雹云作业技术方案

A. 作业部位

作业部位应在发展强盛的雹云(或超级单体)强回波中心前方的弱回波(10~30 dBz)区^[2]。其具体方法为:

① 作业仰角:将强回波中心前方的弱回波(30 dBz)区的 -6°C 层高度作为火箭抛物线的顶高(换算成当地的海拔高度),弱回波区(30 dBz)的强中心距作业点之间的距离为水平距离,由此查火箭弹道曲线参数确定发射仰角。

② 方位角:可参照火箭增雨作业中对流云方位角的确定方法^[14],即由三角余弦计算求得。其中,弱回波区(30 dBz)强中心与作业点之间的距离为弹道发射的水平距离。

B. 作业剂量

借鉴数值模式结论^[1-2],结合作业实践对强(超级单体)雹云作业每次可发射火箭 14~26 枚,并进行反复作业,直到回波减弱或移出射程。

C. 发射方式:对强回波中心前方弱回波区内 -6°C 层高度做扇形发射,扇形角度 $<15^{\circ}$ 。

对强(超级单体)雹云作业,由于其作业部位(穴道)空间狭小^[18],需在短小时内迅速将催化剂直接播撒其中,作业工具可首选高炮^[15]其效果会更好。

2.3.2 高炮对强(超级单体)雹云作业技术方案

A. 作业部位

对于发展强盛的(超级单体)雹云,其作业部位选在强回波中心前方的弱回波(10~30 dBz)区,即“穴道”^[18]处。具体方法为:

① 作业仰角:将强回波中心前方的弱回波(30 dBz)区的 -6°C 层高度作为高炮炸点高度(换算成当地海拔高度),弱回波区(30 dBz)强中心距作业点之间的距离为高炮作业的水平距离,由此查高炮弹道参数确定发射仰角。

② 方位角:可参照火箭增雨作业中对流云方位角的确定方法^[14],即由三角余弦求得。其中,弱回波区(30 dBz)强中心与作业点之间的距离为弹道水平距离。

B. 作业剂量

参照高炮防雹作业技术规范^[17], 结合实践, 对发展旺盛的强(超级单体)雹云作业每次可发射炮弹 100~200 发, 并进行反复作业, 直至回波减弱移出射程。

C. 发射方式: 对强回波中心前方弱回波区的(30 dBz)强中心处进行扇形发射, 扇形角度 $<15^\circ$ 。

对上述各类型的雹云作业, 其防雹作业的最佳时机均应选择在雹云形成初期^[13]、跃增和发展阶段, 及早实施防雹作业是有效防御冰雹的关键。

3 结 语

(1) 对大连市多普勒雷达所观测的冰雹和强雷雨雷达体扫资料进行 PUP 计算和处理, 发现各类雹云在初期和发展阶段的回波强度、30 dBz 强回波中心高度和顶高、垂直积分液态水含量等雷达主要参数特征及跃增变化, 由初始回波和雷达参数的跃增变化总结了识别雹云的技术方法。

(2) 根据大连地区 2003 年以来出现的 29 个冰雹个例及降雹特征分析, 将雹云分为强(超级单体)雹云、多单体雹云和单体雹云三类; 并对各类雹云雷达特征参数分别进行统计和分析, 得到了雹云类型分析的判别指标, 该判据指标是防雹作业决策方案确定的依据。

(3) 集成了最新防雹催化技术理论, 结合大连实际, 根据三种雹云类型和不同作业工具设计研究了 6 套防雹作业模式(作业技术方案), 为大连人工防雹科学指挥作业奠定了基础。

参考文献

[1] 郑国光, 陈跃, 王鹏飞, 等. 人工影响天气研究中的关键问题

[M]. 北京: 气象出版社, 2005.

- [2] 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.
- [3] 陈光学, 段英, 吴兑. 火箭人工影响天气技术[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [4] 王华, 孙继松. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象, 2008, 23(3): 16-21.
- [5] 施文全, 李斌. 利用雷达指挥 WR-1B 火箭进行防雹作业的方法[J]. 气象, 1996, 22(7): 52-56.
- [6] 孙国德, 裴巨才, 等. 雷达识别雹云指标和防雹作业方法[J]. 山西气象, 2001, 55(2): 32-35.
- [7] 张晰莹, 张礼宝, 安英玉, 等. 弱冰雹云雷达回波结构特征分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 38-42.
- [8] 郁青, 王雨增. 综合识别冰雹云[J]. 气象, 1995, 21(7): 26-28.
- [9] 胡玉青, 刘晋, 陈红萍, 等. 晋中市人工防雹减灾系统研究[J]. 气象, 2004, 30(2): 39-41.
- [10] 王致君, 冯锦明, 楚荣忠, 等. 防雹减灾专家系统[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 461-467.
- [11] 王以琳, 黄磊. 地市级人工影响天气业务技术系统[J]. 气象科技, 2007, 23(4): 69-77.
- [12] 张存, 周毓荃. 人工影响天气优化技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 段英, 许焕斌. 爆炸防雹中的云微物理机制的探讨[J]. 气象学报, 2001, 59(3): 91-98.
- [17] 中国气象局科技发展司. 高炮人工防雹增雨作业业务规范[S]. 2000 年 12 月.
- [18] 许焕斌, 田利庆. 强对流云中“穴道”的物理含义和应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 78-86.