## 一次强对流风暴过程人工防雹作业雷达回波演 变特性分析

龙俊霖1 周毓荃2 陶玥2

1 成都信息工程大学,四川 成都 610225
 2 中国气象科学研究院,北京 100081



摘要本文利用北京、天津两部 CINRAD/SA 雷达观测,对 2021 年 6 月 30 日影响北京地区的一次强对流风暴过程中的 A、B 两个对流单体的人工影响天气作业雷达回波演变特性进行了分析。通过对统计区域内多种物理参数和不同高层不同反射率强度档的格点数在单体发展各阶段及作业前后的变化分析。得到不同强度单体在不同作业情况的演变特性的认识。结果表明:单体 B 为普通对流云团(生命期为 3 小时),在发展初期进行大剂量作业后(24 分钟内有效作业火箭 74 发,高炮 58 发)可以看到有较好的抑制单体发展的特征:作业后一小时内,单体各高度层平均反射率、风暴体高度、垂直累积液态水等参数都呈下降趋势。较强回波(30-60dBZ 档区)格点数总体减少,较弱回波(20-30dBZ 档区)格点数快速增加,对流结构整体减弱。而单体 A 为超级单体(生命期为 5.5 小时),初生阶段由于作业剂量不足(30 分钟内有效作业火箭 15 发),未见明显抑制效果。临近成熟阶段进行了连续大剂量作业(80 分钟内有效作业火箭 15 发,高炮 182 发)。虽也能观测到类似 B 回波的一些特征:高层平均反射率、云顶高度、强回波厚度、垂直累积液态水等参数下降,较大反射率强度档区(50-70dBZ 档区)格点数减少,低层较小反射率强度档区(30-50dBZ 档区)格点数增多,并维持约 30 分钟的效果。但整体针对超级单体 A 的作业抑制效果不明显。

关键词 冰雹过程、雷达回波、人工催化作业、演变特性分析 文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2210.22043

## Analysis of radar echo evolution characteristics of a severe convective

## storm artificial hail suppression operation

Long Junlin<sup>1</sup>, Zhou Yuquan<sup>2</sup>, Tao Yue<sup>2</sup>

(1. College of Meteorological Observation, Chengdu University of Information Technology / CMA Key Laboratory of Atmospheric

Sounding, Chengdu 610225, Sichuan, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration / Weather Modification Center of China

Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**收稿日期 2022-02-16; 网络预出版日期** 作者简介 龙俊霖,男,1995 年出生,硕士研究生,主要从事人工影响天气的研究。E-mail: 870615319@qq.com 通信作者 周毓荃 从事大气物理与人工影响天气研究。E-mail: <u>zhouyq05@163.com</u> 资助项目 国家重点研究发展计划 (2016YFA0601701) Funded by National Key Research and Development Program of China(Grants 2016YFA0601701)

Abstract : Based on the CINRAD/SA radar observations in Beijing and Tianjin, the radar echo evolution characteristics of two convective cells A and B in a severe convective storm affecting Beijing on June 30, 2021 are analyzed. Through the analysis of the variation of various physical parameters and the number of grid points of different reflectivity intensity grades in different stages of cell development and before and after operation in the statistical area. The evolution characteristics of cells with different strengths under different operating conditions are obtained. The results show that the cell B is a normal convective cloud cluster (life time is 3 hours), and after the large dose operation (74 rockets and 58 anti-aircraft guns are effectively operated within 24 minutes) in the early stage of development, it can be seen that the cell B has good characteristics of inhibiting the development of the cell. The parameters such as mean reflectivity, storm body height and vertically integrated liquid water at different heights of the storm body all show a downward trend. The number of grid points of the stronger echo (30-60dBZ) decreases, while the number of grid points of the weaker echo (20-30dBZ) increases rapidly, and the convection structure weakens as a whole. Cell A is a supercell (life time is 5.5 hours), and there is no obvious inhibition effect in the initial stage due to insufficient operating dose (15 rockets are effectively operated within 30 minutes). Near the mature stage, continuous high-dose operations were carried out (105 rockets and 182 anti-aircraft guns were effectively operated within 80 minutes). Although some characteristics similar to echo B can also be observed: the average reflectivity, cloud top height, strong echo thickness, vertical integrated liquid water and other parameters in the upper layer decrease, the number of grid points in the higher reflectivity intensity range (50-70dBZ) decreases, and the number of grid points in the lower reflectivity intensity range (30-50dBZ range) increases and lasts for about 30 minutes. However, the overall work suppression effect on supercell A is not obvious.

## 1 引 言

冰雹是一种强对流天气过程,因其具有极大破坏性、发展迅速、预报难度大等特点,往 往给人们的生产生活带来极大的不便,甚至造成巨大的经济损失。1953年苏联于阿拉扎尼 山谷开展了最早的人工防雹试验,并提出了最初的防雹机制(Marwitz, 2010)。后续美国、 瑞士、加拿大、南斯拉夫等国家都相继开展了大量的人工防雹试验(Federer, 1986; Gilbert, 2016; Mesinger, 1992),我国从1958年开始也进行了一系列人工防雹理论和实践研究(黄 美元,2000; 洪廷超,2005; 许焕斌等,2001)。

Silverman 认为人影效果检验是人影作业中的首要环节。尽管人工防雹作业在世界范围 内引起了较大的关注,且很多试验都得出了令人振奋的结果。但由于目前对冰雹形成机制、 播云理论的认知和探测技术还存在较大局限。客观评价作业效果仍然是一个业务和科研难题。 人工防雹效果检验方法发展至今,可以大体上分为统计检验和物理检验。在上世纪六七十年 代,人们通过对多年保险数据统计的农作物受灾情况来评估作业效果(Battan,1973)并得 出防雹作业能够有效减少数十倍损失的结论。当然,简单通过农作物的损失评估防雹作业有 效性是缺乏说服力的。在此后很长时间内人们更倾向于通过开展随机对照试验来得出更有统 计学意义的评估结果。统计的对象主要为冰雹大小和数量、降雹范围、冰雹总质量等降雹数 据(Foote and Knight,1979),试验可以在一个特定的区域进行,也可以选取两个有高相关 性的区域进行交叉随机试验。随机决定是否对满足作业条件的单体进行作业,通过显著性检 验方法分析作业单体与非作业单体是否有显著性差异(Rasmussen, 2018; List, 1999)。但由于随机试验设计、经费、试验周期等多方面条件制约,开展随机试验的难度依然较大。于是效果检验的研究重点又逐渐从依赖统计检验,强调随机化试验回到注重经验证据,将探索物理规律与统计检验相结合的研究方向上(Changnon, 1986)。

自 20 世纪 70 年代, 雷达首次被运用在人工影响天气试验中, 随着多普勒和极化雷达技术的日渐成熟, 雷达具有了足够的分辨率, 具备了对云体复杂物理过程进行建模的能力。同时也为人影效果检验提供了新的思路。1973 年, Marwitz 就利用雷达探测的冰雹云最大回波高度、最大反射率等参数计算冰雹概率指数来评估作业效果。Federer 等人(1986)总结了1977-1981 年在瑞士中部进行的 Grosversuch IV随机防雹试验。试验数据通过密集的测雹板网络和一部 10cm 波长雷达采集。分别采用了基于测雹板和雷达的两个独立方法对作业和非作业的共 216 个冰雹云单体进行统计分析。此试验中, 用雷达反演的冰雹动能来评估作业影响, 与测雹板网络得出了基本一致的结论。Foote 等(2005)利用 TITAN 系统对冰雹云进行跟踪并分析了人工播云作业对降雹概率、动能、冰雹质量等雷达物理量影响。Vujović和 Protić (2017) 详细分析了对雷暴单体进行碘化银播云作业后雷达参数的演变情况。研究发现在超级单体中, 对播云作业最敏感的参数为云中反射率最大区域的高度, 最不敏感的是最大反射率。云顶高度等都对播云作业有较明显的响应。

在我国也进行了大量基于雷达的播云作业效果检验工作。陈羿辰(2016)利用双线性偏 振雷达对播云作业前后云体宏微观特征及粒子的微物理变化过程进行了分析,得出了防雹作 业前后云顶高度、回波强度、粒子相态等物理参数特征。李斌(2020)等采用最大雷达回波 顶高、回波强中心反射率和 40dBZ 回波强度顶高三个参数通过物理统计检验方法评估作业 效果。宋文婷、王飞等(2017)利用北京 SA 雷达分析比较了作业回波与非作业回波的参数 变化情况,运用 Wilcoxon 秩和检验方法证明了催化作业的积极作用。利用雷达对作业单体 进行跟踪分析除了可以得出一些作业效果证据。还有助于我们实时掌握雹云发展演变过程和 催化作业后的物理响应,这对进一步研究人影基础理论和完善技术方法都具有重要的意义。 例如李培仁等(2002)利用雷达对 2001 年山西运城的一次强降雹防雹作业进行了分析,认 为对于强降雹天气过程,传统在雹云初期进行催化是不对的,因为少量的催化剂相对于强降 水而言可能没有效果,甚至起到反作用。进而提出对强降雹进行防雹作业,应将全部防雹火 力集中在强冰雹云的移动路径上,在雷达的监测下,将冰雹提前降落。

可以看出,运用雷达研究冰雹云特性及播云催化响应相比于传统统计方法,更加强调物 理特征。充分了解雹云演变特性及播云后的回波演变特征是基于雷达进行防雹作业物理检验 的基础。这需要对大量人工影响天气作业进行细致分析,而目前的研究是远远不够的。

超级单体是引发降雹最多的一种天气系统。是对流风暴发展得最强大的一种形式。从 20世纪 60年代,就开展了大量对超级单体的研究。其雷达回波结构、标志性的有界弱回波 区、低层勾状回波、中尺度气旋等特性被相继发现(Browning and Foote,1976;Chisholm,1973)。

3

因其具有极强的致灾性,使其成为人工影响天气领域重点的关注对象。北京夏季受冷涡影响, 多短时强降水、冰雹等强对流天气(丁青兰等,2007;苏永玲等,2011;张琳娜等,2013)。 本文针对2021年6月30日蒙古冷涡背景下北京地区的一次超级单体冰雹天气过程开展的人 工防雹作业,利用 CINRAD/SA 雷达对两块作业云团进行跟踪分析,通过分析回波演变及播 云作业前后作业回波区反射率、云顶高度、垂直累积液态水、不同高度不同反射率强度档区 格点数的变化特征,研究单体生命期各阶段相关物理参数的演变特征及催化作业后的播云响 应。一方面,参数化产品能在一定程度上反映超级单体发展实况,有助于判断单体发展阶段, 为作业时机选择提供参考。另一方面,研究云体作业后物理参数随时间的变化规律有利于监 测作业响应并初步判断作业效果,为防雹作业方案设计、作业指挥、效果检验提供依据。

## 2 资料和方法

#### 2.1 资料和处理

雷达资料采用北京和天津塘沽的两部 CINRAD/SA 多普勒天气雷达,两部雷达均采用 VCP21 扫描模式,6分钟内完成9个不同仰角的扫描,有效扫描半径为230km,将雷达基数 据通过八点插值法进行格点化处理,生成三维格点数据(肖艳姣,2006),格点化处理的数 据的范围和分辨率分别为:水平方向230km×230km,分辨率1km×1km;垂直方向20km, 分辨率为1km。

天气形势场资料采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的高分辨率 ERA5 再分析资料, 探空数据为L波段探空秒级数据。

#### 2.2 研究方法





高度及垂直累积液态水都以统计区域内第95百分位数为参数值。

同时为进一步细致分析回波不同高度层不同反射率强度档的变化特征。本文分不同高度 层对不同反射率强度档的格点数进行统计分析,高度层划分为三层:1-3km为低层,4-6km 为中层,7-9km为高层;反射率划分为4个档,根据回波强度的不同,针对作业回波A划 分为30-40dBZ、40-50dBZ、50-60dBZ、60-70dBZ四个档区,针对作业回波B划分为20-30dBZ、 30-40dBZ、40-50dBZ、50-60dBZ四个档区。

为追踪目标回波进行作业效果的分析,通过对生命周期内回波演变的初步分析,本文以 作业云团雷达组合反射率大于 45dBZ 区域的加权质心为中心划定统计区域,统计区域大小 为 25km×25km 的矩形区域。这里选择 45dBZ 作为阈值的主要的考虑有两点: (1) 较高的 反射率阈值可以较好地区分开不同的回波单体; (2) 45dBZ 反射率阈值在冰雹云识别、预报 具有广泛应用(刘新伟等, 2021; Mather et al, 1976; 潘留杰, 2013)。樊鹏(1994) 根据 Smith 等(1975)数值模拟提出的云内最初冰雹增长区水凝物的中数直径为 0.4~0.5cm 的理 论,使用通用的雷达气象方程和 MP 雨滴谱指数分布的关系式(Marshall, 1948), 推导出冰 雹云初期冰雹形成时的等效雷达反射率因子为 44dBZ。为方便起见,一般使用 45dBZ 作为 阈值对冰雹云进行分析。

而统计区大小设定主要根据大于阈值的回波面积和回波形状。由于主要的作业时段内, 作业目标单体组合反射率大于 45dBZ 的回波面积峰值约在 600-650km<sup>2</sup> 左右。且回波形状在 主要作业时段内呈块状,且东西与南北方向尺度大致相当。综合以上方面考虑,统计区大小 选定为 25km×25km 的矩形区域较为适宜。

3 天气形势与降水实况

#### 3.1 天气形势



图 3.1 ERA5 再分析资料 2021 年 6 月 30 日 16 时 (BJT) 位势高度、风场、温度场:

(a) 500hPa; (b) 700hPa; (c) 850hPa; (d) 950hPa

Fig 3.1 Potential height, wind distribution and temperature distribution (a) 500hPa; (b) 700hPa;

(c) 850hPa; (d) 950hPa of ERA5 reanalysis data at 16 BJT on 30 Jun 2021

从 30 日午后 14 时探空图(图 3.2a)可见北京上空对流不稳定能量较大。CAPE 值达到了 3278J/kg,极易发生极端天气过程。低层有较大风切变。底层为东南暖湿气流输送水汽,高 层为干冷西风,有利于强对流发展。到 20 时,对流发展旺盛,CAPE 值更是达到了 3543J/kg。

图 3.2 2021 年 6 月 14 时 (a) 和 20 时 (b) 北京探空分析图,黑线为温度,蓝线为露点温度 Fig 3.2 L band radiosonde analysis diagram at 14:00(a) and 20:00(b),30 June 2021. The black line indicates the temperature and the blue line indicates the dew point temperature.

#### 3.2 降水实况

图 3.3 17:00-22:00 北京地区小时降水量及降雹信息(单位: mm)(a) 17:00-18:00; (b) 18:00-19:00; (c) 19:00-20:00; (d) 20:00-21:00; (e) 21:00-22:00; (f) 22:00-23:00

Fig 3.3 Hourly precipitation and hail point in Beijing area from 17:00 to 22:00 on 30 Jun 2021 (a) 17: 00-18:00; (b) 18:00-19:00; (c) 19:00-20:00;

(d) 20:00-21:00; (e) 21:00-22:00; (f) 22:00-23:00

6月30日傍晚至夜间,受冷涡底部西北气流和低层切变影响,北京地区、内蒙古中南部,河北省中北部和天津北部地区出现大范围强对流天气。北京北部、河北中部、南部、天津都出现强降水过程。17:30有多个对流单体在北京西北部生成,其中一个对流单体在不断合并加强后逐渐发展为超级单体,导致20:00-22:00北京地区出现了大面积的强降水,期间最大小时雨强37.6mm,20:00-21:00在门头沟、海淀、丰台、大兴自西北向东南先后出现降雹,冰雹最大直径达2cm。小时雨量及冰雹落点见图3.3。

## 4 作业概况与回波演变

#### 4.1 作业目标回波

从雷达回波上可见,30日17:30 左右北京西北方向张家口境内有多单体对流云生成。其 中可能会对北京城区造成较大影响的有两个单体,分别记为单体 A 和单体 B。本次作业主 要针对单体 A 和单体 B 开展,其中单体 A 生命周期长,成熟期具有"穹隆"结构、有界弱 回波等典型特征为产生降雹过程的超级单体,单体 B 生命周期较短,对流结构相对较弱, 雷达回波较弱,降水过程较短,为普通对流单体。通过北京、天津两部 SA 雷达对单体 A、 B 进行联合探测并用质心法对雷达回波进行追踪。北京、天津两部雷达的位置及有效探测范 围见图 4.1a,追踪得到两个回波体大致的移动轨迹如图 4.1b 所示,经测算单体 A、B 移动 速度达到 40km/h。图 4.2 给出了单体 A、B 组合反射率演变图及作业信息(蓝圈为高炮作业, 红圈为火箭作业,箭头为发射方位,数字表示作业剂量)。虚线箭头为典型时刻单体 A、B

图 4.1 北京、天津雷达站位置(a)及回波 A(17:30-23:00)和回波 B(17:30-20:30) 移动路径、作业站点位置及地势图(b)

> Fig 4.1 The location of Beijing radar and Tianjin radar(a) and the path of echo A and echo B and chorography(b)

图 4.2 回波 A、B 组合反射率演变图及作业信息,红色圆圈及圈中黑色实线箭头为火箭射界圈及发射方位 角,黑色数字为火箭用弹量,蓝色圆圈及圈中蓝色实线箭头为高炮射界圈及发射方位角,蓝色数字为高

炮用弹量。黑色虚线箭头为垂直剖面图的剖面位置和方向。垂直剖面图在图 4.3 及图 4.4 给出 Figure 4.2 Evolution diagram and operation information of the combined reflectance of echo A and echo B. The red circle and the black solid arrow in the circle are the rocket firing boundary and launching azimuth, the black number is the projectile used by rocket, the blue solid arrow in the blue circle and circle is the anti-aircraft gun firing boundary and launching azimuth, and the blue number is the projectile used by anti-aircraft gun. Black dotted arrows show the position and direction of the vertical section. Vertical sections are given in Fig. 4.3 and 4.4

#### 图 4.3 回波 A 典型时刻垂直剖面图

Fig. 4.3 Vertical section of echo A at typical time



图 4.4 回波 B 典型时刻垂直剖面图 Fig.4.4 Vertical section of echo B at typical time

#### 4.2 作业概况及有效性分析

地面作业采用的高炮和火箭 AgI 含量分别为 2g/枚和 10g/枚。作业层高度为相对地面高度 5000m。根据各作业点上报的作业信息,针对回波 A 作业共开展了 12 轮次,消耗火箭弹 141 枚,高炮 156 枚。针对回波 B 作业共 26 轮次,共消耗火箭 138 枚,高炮 182 枚。图 4.1b 中三角为作业点位置,数字为作业点编号。根据地面作业发射的位置、仰角及方位角信息,通过判定是否落在催化目标区域内,筛选出无效的作业点次后,按照每间隔 6 分钟进行划分,得到各时段有效作业信息表。表 4.1 为针对作业回波 A 的有效作业,表 4.2 为针对作业回波 B 的有效作业。

## 图 4.5 作业统计区 (矩形框)、高炮 (蓝圈)、火箭 (红圈) 炮弹射界圈及发射方向 Fig. 4.5 Operation statistics area (rectangular box), the effective area of rocket operation and rocket-firing track

作业有效性筛选的具体判定方法以 18:06-18:12 为例,图 4.5 中红色(回波 A)与蓝色 方框(回波 B)为作业统计区(25km×25km)。圆圈即为射界圈。红色的圆圈表示火箭作业, 蓝色的圆圈表示高炮作业。数字表示用弹量,箭头为发射的方位角,发射仰角在 60°至 65° 之间。如果火箭的发射轨迹或高炮落点能达到作业目标回波区域则为一次有效作业。

表 4.1 回波 A 各时段有效作业统计表

Table. 4.1 Echo A statistical table of effective operation in each period

	-								
时间	总弹量	作业站点编号及各时段作业量(火箭弹量/高炮弹量)							
		3	6	8	9 10	11	12	13	
18:12-18:18	6/0	6/0							
18:24-18:30	6/0	3/0	3/0						
18:36-18:42	3/0		3/0						
19:06-19:12	12/0			12/0					
19:18-19:24	6/24			0/24	6/0				

19:24-19:30	24/58	12/0	6/0	0/58	6/0		
19:30-19:36	6/0		6/0				
19:36-19:42	24/60	12/0	6/0		6/0	0/60	
19:42-19:48	12/0				6/0	6/0	
19:48-19:54	6/0						6/0
19:54-20:00	6/0				3/0	JA	3/0
20:06-20:12	0/40						0/40
20:18-20:24	9/0						9/0

表 4.2 回波 B 各时段有效作业统计表									
Table.4.2 Echo B statistical table of effective operation in each period									
时间	台谣号	作业站点编号及各时段作业量(火箭弹量/高炮弹量)							
	心汗里	1	2	4	5	7			
18:06-18:12	58/58	0/58	58/0						
18:12-18:18	10/0			6/0	4/0				
18:24-18:30	6/0			3/0	3/0				
19:06-19:12	0/40					0/40			
19:12-19:18	6/0					6/0			
19:18-19:24	6/0					6/0			
19:24-19:30	11/0					11/0			

## 5 回波演变特性及作业物理响应分析

## 5.1 回波演变特性分析

5.1.1 回波 A 演变特性分析



通过 2.2 节所述物理参量统计方法,结合雷达回波演变情况对超级单体 A 进行分阶段分析。对于超级单体分为初生阶段、成熟阶段、消散阶段。初生阶段单体为塔状积云,垂直尺度略大于水平尺度,回波不接地。超级单体成熟阶段的标志是表现出如"穹隆"结构、悬垂回波、有界弱回波区等典型特征。消散阶段,由于下沉气流逐渐扩散到整个单体,单体回波强度、云顶高度开始下降。超级单体 A 生命周期内各物理参量的时序变化图如图 5.1、图 5.2 及图 5.3 所示。

图 5.1 作业回波 A 北京、天津协同观测(17:30-23:00) 各高度层平均反射率, 虚线框内处于北京雷达观测盲区, 故采用天津雷达观测资料作为补充(下同), 柱状图表示作业信息

Fig 5.1 The average reflectivity of each altitude level of echo A was observed by Beijing radar and Tianjin radars from 17:30 to 23:00, The dashed line box is in the blind area of Beijing radar observation, so the radar observation data of Tianjin is used as a supplement, bar charts represent operational information

#### 图 5.2 作业回波 A 北京、天津协同观测(17:30-23:00)云顶高度(ET)、风暴体高度(TOP)、强回波厚度 (CT)、强中心质心高度(CTM)

Fig 5.2 The cloud top height (ET), storm top height (TOP), strong echo thickness (CT), centroid height of strong echo center (CTM) of echo A was observed by Beijing and Tianjin radars from 17:30 to 23:00

图 5.3 作业回波 A 北京、天津协同观测(17:30-23:00) 垂直累积液态水(VIL)

# Fig 5.3 The vertically integrated liquid (VIL) of echo A was observed by Beijing and Tianjin radars from 17:30 to 23:00

初生阶段(17:18-19:54): 17:18 在北京雷达站西北部约150km 处的张家口境内有局部 对流单体生成,单体中心高度为6km,最大反射率强度约为35dBZ,回波未接地。从17:30 开始,回波强度增长至45dBZ以上。开始对单体A各项物理参数进行跟踪分析。从17:30-18:00, 单体A稳定发展,大于45dBZ回波面积增大,各高度层反射率均稳定增长,其中4000米高 度层平均反射率最大,2000米最小,云顶高度、强回波高度、厚度、垂直累积液态水均为 明显增长趋势。到18:00回波A强中心在55dBZ以上,此时单体前段在上升气流作用下, 回波强度逐渐变强,单体后端强回波接地,开始逐渐消亡。这种生消交替在超级单体中是常 见的。可以看到18:06,2000米高度层平均反射率持续上升,而较高的高度层反射率下降。 维持时间较短。后单体进一步发展。19:12-19:30,单体回波强度和强回波面积有一定程度减 弱。19:30的回波A剖面图呈塔状,最强回波接地。说明上升气流有所减弱。此时段,低层 的平均反射率大幅度提升。回波顶高及强回波厚度和垂直累积液态水都有明显下降也印证了 这一点。

#### 图 5.4 19:54 单体 A (超级单体) 成熟阶段回波特征

#### Fig 5.4 Echo characteristics of cell A (super cell) in maturity stage at 19:54

成熟阶段(19:54-21:00): 19:36 左右,单体进入跃增阶段,各高度层平均反射率大幅度 提升,在18分钟内,均提升约10dBZ 左右。回波顶高尤其是风暴体高度抬升明显。垂直累 积液态水18分钟内上升约12kg/m<sup>2</sup>。到19:54,超级单体成熟,从雷达回波看,表现出典型 的超级单体结构特征。"穹窿"结构明显。图 5.4 为此时的 CAPPI 图像。可以看1km 高度层 有明显的勾状回波、到4km、6km 高度层都能看到有界弱回波区。各高度层都能看到三体 散射长钉。此时的物理参数演变也具有显著的特征。经过超级单体成熟前的跃增阶段,6km 及8km 中高高度层的平均反射率均达到极大值。其中,6km 平均反射率最大。云顶高度上 升至13km,风暴体高度上升至11km。垂直累积液态水达到单体生命周期的最大值,约为 42kg/m<sup>2</sup>。单体A 维持超级单体特征约十余分钟后。对流有所减弱。并伴随大面积的降水(降 雹)过程。中高层平均反射率下降,2km 平均反射率大幅度上升。回波顶高也有一定程度下 降。20:30,从雷达回波可以看到单体A 与其西南方向的大片强回波开始合并。受此影响, 各高度层平均反射率再次升高。但与局部对流增强导致回波强度升高不同。各高度层反射率 增长浮动大致相当。也没有改变各高度层反射率之间的大小关系。低层反射率大于高层,虽 然云体辐合使回波强度有所增加,但单体已逐渐步入消散阶段。

消散阶段(21:00-23:00):21:00 后,回波顶高逐渐回落,回波强度逐渐降低,到22:00, 单体组织化减弱,回波形状由块状向片状转变,降水发展到整个对流云团,说明上升气流进 一步减弱,单体逐渐消亡。消散阶段各物理参数的变化趋势主要为各高度层平均反射率稳定 下降,且低层平均反射率大于高层。云顶高度、风暴体高度、强回波区域的厚度及质心、垂 直累积液态水都呈现下降趋势。

5.1.2 回波 B 演变特性分析

对单体 B 各阶段物理参量的变化特征进行分析。与超级单体不同,普通对流单体,生命周期较短,过程较为简单,初生阶段同样表现为塔状积云,回波未接地,开始降水可作为单体成熟的标志,雷达回波接地也标志单体成熟阶段的开始。强中心下降到近地面,对流结构减弱则标志消亡阶段的开始。单体 B 生命周期内物理参量时序变化图如图 5.5、图 5.6 及 图 5.7 所示。

图 5.5 作业回波 B (17:30-20:30) 各高度层平均反射率, 柱状图表示作业信息

Fig 5. 5 The average reflectivity of each level of echo B, and the bar chart represents the operation information from 17:30 to 20:30

图 5.6 作业回波 B(17:30-20:30) 云顶高度(ET)、风暴体高度(TOP)、强回波厚度(CT)、强中心质心 高度(CTM)

Fig 5.6 The cloud top height (ET), storm top height (TOP), strong echo thickness (CT), centroid height of strong echo center (CTM) of echo B from 17:30 to 20:30

#### 图 5.7 作业回波 B(17:30-20:30) 垂直累积液态水(VIL)

Fig 5.7 The vertically integrated liquid (VIL) of echo B from 17:30 to 20:30

初生阶段(17:30-18:00):单体 B 于 17:30 左右初生,与回波 A 处于同一回波带上,从 图 4.3 可见,初生时,回波强中心高度约在 6km 左右,回波未接地。单体 B 初生发展阶段,各高度层平均反射率增加。云顶高度及风暴体高度基本保持稳定。但强回波区域明显变厚。 垂直累积液态水从初生时的 5kg/m<sup>2</sup>增长至 18kg/m<sup>2</sup>.。

成熟阶段(18:00-18:30): 18:00,单体 B 此时云顶高度达 10km,大于 45dBZ 的强回波 区域深厚,上至 7km (-20℃)高度层,下面强回波已接地。此时段,各高度层平均反射率 达到最大值。云顶高度达到 10km。

消散阶段(18:30-20:30): 18:30 回波 B 对流结构已经开始减弱。强回波区域呈柱状, 不利于对流的进一步发展。19:00,回波 B 尾部快速消亡,头部继续发展,强回波面积快速 缩小。到 20:00 左右,风暴单体 B 消亡。且回波强度明显低于回波带上的其他区域,云体向 深厚的层积混合云转变,云体厚度达 6-7km,从各项物理参数看单体 B 消散阶段各高度层平 均反射率总体呈下降趋势。低层平均反射率大于高层。回波高度在 18:30-19:18 都维持下降 趋势。从 19:18-19:48 有抬升现象。风暴体高度上升约 4km。之后再度下降。垂直累积液态 水下降明显,到 20:30 后已维持在降低水平。单体 B 整个生命周期约 3 小时。

#### 5.2 作业响应分析

本小节根据作业信息及作业前后物理参数演变特征对催化作业后云体的响应作出初步 分析。为进一步研究回波变化特性及作业对云体造成的影响。按照 2.2 节所述方法,对回波 不同高度层、不同反射率强度档的格点数进行统计分析。

#### 5.2.1 回波 A 作业分析

由表 4.1 可见,针对回波 A 的作业主要集中在 18:12-18:42; 19:06-20:24 两个时段内进行。其中第一段作业约 30 分钟,有效作业火箭弹 15 发,第二阶段作业约 80 分钟,有效作业火箭 105 发,高炮 182 发。图 5.8 为作业回波 A 各高度层不同反射率强度档格点数目时序图。下面针对两个作业时段分别讨论各参数的变化特征。

图 5.8 作业回波 A 各高度层不同反射率强度档区格点数时序变化图: (a) 30-40dBZ; (b) 40-50dBZ; (c) 50-60dBZ; (d) 60-70dBZ Fig 5.8 Time series variation diagram of grid points in different reflectivity intensity intervals of echo A at each altitude, (a) 30-40dBZ; (b) 40-50dBZ; (c) 50-60dBZ; (d) 60-70dBZ

(1)18:12-18:42:在 5.1.1 节提到,单体 A 在 18:06 左右单体有生消演替过程。在 18:06 作业后约 20 分钟,各高度层的平均反射率大幅度提升。上升数值随高度增加而减少,2000 米高度层的平均反射率增长最大,在作业结束后约半小时提升了 13dBZ,而 8000 米高度层, 只增长约 6dBZ。云顶高度、风暴体高度升高约 2km,强回波厚度增加。垂直累积液态水跃 升约 15kg/m<sup>2</sup>。从格点数统计来看。作业后 50-70dBZ 档格点数有略微提升。表现出一定的 增雨特性。

(2) 19:06-20:24: 从超级单体 A 整个生命周期来看,这个作业时段处于风暴发展阶段的后期及成熟期。在较强的上升气流作用下,作业催化后 6000、8000 米等较高高度层的平均反射率快速上升。19:30-20:00 半个小时内。8000 米高度层平均反射率从 25dBZ 上升至 37dBZ,升高约 12dBZ。而 2000 米高度层只上升约 4dBZ。在一个小时连续、密集的作业下, 20:00-20:30,天津雷达显示除 2000 米高度层外,4000、6000、8000 米高度层平均反射率均出现不同程度的下降,且 8000 米高度层下降最为明显。下降趋势持续约 30 分钟。同时段内, 云顶高度、风暴体高度、强回波厚度、强中心质心高度都有明显下降。其中风暴体高度下降 趋势最为明显,下降约 2km。垂直累积液态水基本维持不变。

从格点数统计分析结果看, 19:30 后, 30-40dBZ 与 40-50dBZ 较小的反射率强度档的低 层格点数减少, 而较大的 50-70dBZ 档区各高度层都出现快速上升, 也说明此时处于冰雹云 的跃增阶段, 冰雹云快速发展。临近 20:00, 超级单体成熟, 单体垂直剖面表现出明显的"穹 隆"结构, 用格点数统计方法分析此时特征主要表现为 30-40dBZ 档区低层格点数处于极小 值附近。而 60-70dBZ 档区各高度层均出现峰值, 中高层率先达到峰值, 低层靠后。符合冰

雹胚胎在中高层循环增长后降至低层的增长模型。

该时段催化作业开始后,30-40dBZ 和 40-50dBZ 反射率强度档区中低层格点减少,而 50-60dBZ 与 60-70dBZ 档区格点数快速上升。因此在作业初期不排除对云体发展有一定的促 进作用。作业后期从 20:00 开始至 20:30。经过一个小时的持续作业后。可看到一些对雹云 的抑制迹象。具体表现为:低层:60-70dBZ 档区的格点数有明显减少,而较小反射率强度 档区的格点数(30-40dBZ 和 40-50dBZ)由减少转变为增加的趋势;中层:60-70dBZ 格点 数减低并维持在 150 个以下,50-60dBZ 格点数减小 200 个。而 30-40dBZ 格点数上升约 250 个;高层:云顶高度降低。各反射率强度档区格点数均有降低趋势或维持在较低水平。总体 表现为较大反射率强度档区(50-70dBZ)格点数均有减少。而较小的档区(30-50dBZ)表 现为中低层增加,高层减少。表明此时段作业对雹云确有一定的抑制作用。

5.2.2 回波 B 作业分析

针对单体 B 的作业主要集中在 18:06-18:30 和 19:06-19:30 两个时段内。第一段作业约 24 分钟,有效作业火箭 74 发,高炮 58 发。第二段作业约 24 分钟,有效作业火箭 23 发,高炮 40 发。图 5.9 为作业回波 B 各高度层不同反射率强度档区格点数目时序图。两个作业时段各物理参数的变化特征为:

(1) 18:06-18:30: 从 18:06 开展大剂量作业后,单体没有进一步发展,各高度层平均 反射率呈较为平稳的下降趋势。18:42 低层出现较为复杂的新生合并过程导致 2km、4km 高 度层平均反射率略有波动,但单体消散的总体趋势没有改变。回波顶高在作业后 30min 内 未见明显下降。而风暴体高度、强回波厚度、回波强中心质心高度都有显著的下降。作业后 30min 内下降幅度都在 2km 左右。作业后,垂直累积液态水快速下降。作业开始后 40min 内,垂直累积液态水从18kg/m²下降至8kg/m²。通过对格点数的统计,可以看到作业开始后 10min。20-30dBZ 格点数有较大的增幅,其中作业层高度即中层上升趋势最为明显。从18:06 作业开始经过 30min 后,格点数上升了 400 个,低层与高层同时段内都上升约 200 个。作 业结束后,上升趋势仍稳定维持了 24min 左右; 30-40dBZ 格点数在作业初期有上升的趋势, 主要表现在中层和低层,随着作业继续和催化剂扩散很快就转为下降趋势;40-50dBZ格点 数在作业后有波动下降的趋势,其中高层在作业结束后 20min 内格点数降至 0,50-60dBZ 格点数在作业后各层格点数都处在 0-50 个的极低水平。总体看来,第一轮作业后,除 20-30dBZ 反射率档区外,其他更大的反射率强度档区格点数基本都有不同程度的下降。作 业效果较好。其中可以从 30-40dBZ 档区的中低层看到作业后有明显的先增加后降低趋势。 另外,40-50dBZ 低层未见明显下降,可能是由中高层催化后形成的大粒子在重力作用下降 至低层导致的。

图 5.9 作业回波 B 各高度层不同反射率强度档区格点数时序变化图:

(a) 20-30dBZ; (b) 30-40dBZ; (c) 40-50dBZ; (d) 50-60dBZ

Fig 5.9 Time series variation diagram of grid points in different reflectivity intensity intervals of echo A at each altitude, (a) 20-30dBZ; (b) 30-40dBZ; (c) 40-50dBZ; (d) 50-60dBZ

(2)19:06-19:30 对单体 B 总共有效作业 63 发,其中火箭 23 发,高炮 40 发,作业时 单体处于消亡阶段,作业后单体快速消亡。根据 5.1 节给出的第二个作业时段前后 (19:00-20:30)各项物理特征变化的时序图。从平均反射率看,作业后各高度层的平均反射 率先是继续减弱,后 8000 米高度层略微上升。在临近 20:00,各高度层平均反射率集中在了 25dBZ 左右。说明此时云体内垂直结构表现均匀,符合前文对流云转化为深厚层积云的实况。 回波顶高等参数在此时段作业后出现显著上升,其中风暴体高度上升幅度最大约为 4km,云 顶高度上升约 1km。VIL 在作业结束后有小幅度上升,后持续下降,最终稳定在 2kg/m<sup>2</sup>左右 的较低水平。而第一轮作业后,20-30dBZ 反射率强度档区的格点数经过持续上升后开始回 落,第二轮作业开始后,格点数再次开始上升。至 19:30 后,中层格点数趋于稳定,低层有 下降趋势,高层格点数继续大幅度抬升。结合前文对云顶高度的变化分析,这与云顶高度的 抬升有直接关系。30-40dBZ 档区在第二轮作业结束后 30min 内也出现了高层上升,中层稳 定,低层下降的趋势。40-50dBZ 档区与 50-60dBZ 档区都表现为中低层在较低水平波动,高 层有出现短暂峰值。总体看来。第二轮作业可能导致潜热释放,促进了云体升高。

## 6 结论与讨论

本文利用北京、天津两部 SA 雷达对北京一次强对流风暴进行跟踪观测。为了解对流单 体演变特征及人影作业的影响效果。通过一定区域的物理量统计和不同高度层、不同反射率 强度档区的格点数统计分析方法,对作业单体 A、B 进行了分析。得到的结果如下:

(1)6月30日傍晚,受低涡底部西北气流和低层切变的影响在河北张家口有对流单体 初生,自西北向东南移动过程逐渐发展为超级单体风暴,移速为30-50km/h,影响河北、北 京、天津地区。受此超级单体风暴影响,北京出现大风、局地短时强降水、冰雹等强对流天 气。期间最大小时雨量为37.6mm,最大冰雹直径达2cm。其中,可能会对北京城区造成较大 影响的有A和B两个回波单体,生命周期分别为5-6小时和3小时。

(2) 从反射率、回波高度、厚度等物理参量变化趋势及不同高度层不同反射率强度档 区格点数统计结果来看,作业对云体演变有明显的影响。针对单体 B 作业后,各高度层平 均反射率、风暴体高度、垂直累积液态水等参数都出现较为显著降低,作业后单体没有进一 步发展。从格点数统计来看,低反射率强度档区(20-30dBZ)格点数大幅度升高,其中作 业高度层(6km)最为显著。30-40dBZ 中低层格点数有先增加后减少的趋势,较大反射率 强度档区(40-60dBZ)格点数稳定下降。作业结果较好。

(3)针对超级单体 A 的作业,首先是第一个作业时段后,出现了平均反射率、回波顶高、垂直累积液态水快速提升的现象,说明作业非但没有起到抑制效果,反而可能在一定程度上促进了单体的进一步发展。第二个作业时段,在经过1个小时大剂量作业后,反射率、回波顶高、垂直累积液态水等也出现了下降,高层各反射率强度档区格点数减少,低层较小的反射率档区(30-50dBZ)格点数增加等现象。但只持续了30min,仍出现了大面积降雹过程,实际作业效果不佳。通过对单体 A、B 的发展演变及作业情况的比较。主要区别及作业

特点有以下几点:①单体 A 为超级单体,其形成机制复杂,作业机理相较普通对流单体有 较大区别。现阶段技术条件对超级单体进行干预难度较大。②单体 A、B 初生时刻接近(相 隔 10 余分钟),且第一时段作业开始时间也基本一致。但作业剂量有较大差别,单体 B 在 第一作业时段作业剂量较大(24 分钟内有效作业火箭 74 发,高炮 58 发)。而单体 A 则较少 (30 分钟内有效作业火箭 15 发)。③单体 A 第二作业时段经行了连续大剂量作业(80 分钟 内有效作业火箭 105 发,高炮 182 发),但作业时机处于超级单体成熟阶段前后,是单体发 展最为旺盛的时期。从各物理参量变化趋势看,即使是连续大剂量作业也没有出现理想的催 化效果。

(4)总体来看,对不同性质、不同对流强度的云团进行催化作业,作业响应的差异是 较大的。作业时机、剂量以及作业持续性对抑制一定强度的对流单体十分关键。在单体发展 初期进行连续大剂量作业可能会取得更好的效果。总体上对于生命周期长、发展剧烈的强风 暴,人工播云的抑制能力还是十分有限的。



## 参考文献

[1] Marwitz J D. 2010. Hailstorms and Hail Suppression Techniques in the U.S.S.R[J]. Bulletin of the American Meteorological

Society,54(4):317-325. doi:10.1175/1520-0477(1973)0542.0.CO;2

68-92.

- [2] Federer B, Waldvogel A, Schmid W, Schiesser H H, Hampel F, Schweingruber M, Stahel W, Bader J, Mezeix J F, Doras N, D'Aubigny G, DerMegreditchian, G, Vento D. 1986. Main Results of Grossversuch IV[J], Journal of Applied Meteorology and Climatology, 25(7): 917-957. doi:10.1175/1520-0450(1986)0252.0.CO;2
- [3] Gilbert, D B, B A Boe, T W Krauss. 2016. Twenty seasons of airborne hail suppression in Alberta, Canada[J]. Wea. Modif., 48:
- [4] Mesinger F, Mesinger N. 1992. Has Hail Suppression in Eastern Yugoslavia Led to a Reduction in the Frequency of Hail?[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 31(1): 104-111. doi:10.1175/1520-0450(1992)0312.0.CO;2
- [5] 黄美元,徐华英,周玲. 2000. 中国人工防雹四十年[J].气候与环境研究, 2000(03):318-328. Hang Meiyuan, Xu Huaying, Zhou Ling. 2000. 40th Anniversary of Artificial Hail Suppression in China[J]. Climatic and Environmental Research(in Chinese), 2000(03):318-328. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.03.12
- [6] 李兴宇,洪延超. 2005. 三维冰雹云数值催化模式改进与个例模拟研究[J]. 气象学报,2005(06):874-888. Li Xingyu, Hong

Yanchao. 2005. Improvement of three-dimensional hail cloud numerical catalytic model and case study[J]. Acta Meteorologica

Sinica, 2005(06):874-888. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.06.005

[7] 许焕斌,段英. 2001. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的"利益竞争"防雹假说[J]. 大气科学,2001(02):277-288.

Xu Huanbin, Duan Ying. 2001. A Study on the Formation Mechanism of Hail and the "Interest Competition" Hypothesis of Hail

Prevention between Artificial Hail Embryo and Natural Hail Embryo[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,

2001(02):277-288. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.02.14

- [8] Battan, L J. 1973. survey of weather modification in the Soviet Union: 1973, Bulletin of the American Meteorological Society, 54(10): 1019-1030. doi:https://doi.org/10.1175/1520-0477(1973)054<1019:SOWMIT>2.0.CO;2
- [9] Foote, G B, Knight, C A. 1979. Results of a Randomized Hail Suppression Experiment in Northeast Colorado. Part I: Design and

Conduct of the Experiment[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 18(12): 1526-1537.

doi:10.1175/1520-0450(1979)0182.0.CO;2

- [10] Rasmussen R M, Tessendorf, S A, Xue L, Weeks C, Ikeda K, Landolt S, Breed D, Deshler T, Lawrence B. 2018. Evaluation of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP)[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57(11): 2639-2660.doi:10.1175/JAMC-D-17-0335.1
- [11] List R, Gabriel K R, Silverman B A, Levin Z, Karacostas T. 1999. The Rain Enhancement Experiment in Puglia, Italy: Statistical

Evaluation[J]. Journal of Applied Meteorology, 38(3): 281-289.doi:10.1175/1520-0450(1999)0382.0.CO;2

- [12] Changnon S A. 1986. A Perspective on Weather Modification Evaluation[J]. Journal of Weather Modification, 18(1): 1-5.
- [13] Federer B, Waldvogel A, Schmid W, et al. 1986. Main Results of Grossversuch IV[J]. Journal of Climate & Applied Meteorology, 25(7):917-957. doi:10.1175/1520-0450(1986)0252.0.CO;2
- [14] Makitov V S, Foote G B, Krauss T W. 2005. Hail metrics using conventional radar[C]. 85th AMS Annual Meeting, 9–13 January 2005, San Diego, CA. 85th AMS Annual Meeting, 9–13 January 2005, San Diego, CA.
- [15] Vujovic D, Protic M. 2017. The behavior of the radar parameters of cumulonimbus clouds during cloud seeding with AgI[J]. Atmospheric Research, 189(JUN.):33-46. doi:10.1016/j.atmosres.2017.01.014
- [16] 陈羿辰,张龙斌,金永利,等. 2016. 利用双线偏振雷达分析人工防雹作业效果[J]. 气象科技, 44(03): 479-488. Chen Yichen,
   Zhang Longbin, Jin Yongli, et al. 2016. Analysis of the effect of artificial hail suppression using dual-line polarization radar[J].
   Meteorological Science and Technology, 44(03): 479-488. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.03.022
- [17] 李斌,郑博华,朱思华. 2020. 人工防雹作业效果物理统计评估方法运用初探[J]. 沙漠与绿洲气象, 14(04):113-118. Li Bin, Zheng Bohua, Zhu Sihua. 2020. Preliminary study on the application of physical statistical evaluation method for the effect of artificial hail suppression[J]. Desert and Oasis Meteorology, 14(04):113-118. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.04.015
- [18] 宋文婷, 蔡淼, 王飞. 2017. 北京一次对流云人工催化作业效果检验[J]. 气象与减灾研究, 40(2):8. Song Wenting, Cai Miao,
   Wang Fei. 2017. Test of the effect of a convective cloud weather modification operation in Beijing[J]. Meteorology and Disaster
   Reduction Research, 40(2):8. doi:10.12013/qxyjzyj2017-019
- [19] 李培仁,裴巨才,孙鸿娉等. 2002 一次强降雹天气过程的人工防雹作业[J]. 气象, 2002(07): 29-32. Li Peiren, Pei Jucai, Sun Hongping, et al. 2002. Artificial hail suppression in a severe hail weather process[J]. Meteorological Monthly, 2002(07): 29-32. doi:CNKI:SUN:QXXX.0.2002-07-007
- [20] K A Browning, G B Foote. 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 102(433). doi:10.1002/qj.49710243303
- [21] Chisholm A J. 1973. Radar case studies and airflow models, Albert hailstorms[J]. Meteor Monogr Amer Met Soc 36:1-36.
- [22] 丁青兰,王令,陈明轩,王迎春,陶祖钰. 2007. 北京地区暖季对流天气的气候特征[J]. 气象, 2007(10): 37-44. Ding Qinglan,
   Wang Ling, Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Tao Zujue. 2007. Climatic Characteristics of Warm Season Convective Weather in
   Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2007(10): 37-44. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.10.006
- [23] 苏永玲,何立富,巩远发,李泽椿,郁珍艳. 2011. 京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析[J]. 气象, 37(02): 177-184. Su YongLing, He Lifu, Gong Yuanfa, Li Zechun, Yu Zhenyan. 2011. Analysis of spatiotemporal distribution and synoptic characteristics of strong convection in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Meteorological Monthly, 37(02): 177-184. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.2.007

- [24] 张琳娜,郭锐,何娜,廖晓农. 2013. 北京地区冰雹天气特征[J]. 气象科技, 41(01): 114-120. Zhang Linna, Guo Rui, He Na, Liao Xiaonong. 2013. Characteristics of hail weather in Beijing[J]. Meteorological Science and Technology, 41(01): 114-120.
   doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2013.01.022
- [25] 肖艳姣,刘黎平. 2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报, 2006(05): 647-657. Xiao Yanjiao, Liu Liping. 2006. Research on 3D Lattice and Mosaic Method of New Generation Weather Radar Network Data[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006(05): 647-657. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.05.011
- [26] 张正国,邹光源,刘丽君,程鹏. 2014. 雷达回波顶高(ET)产品在广西冰雹云识别中的应用研究[J]. 气象研究与应用,

35(04):89-92. Zhang Zhengguo, Zou Guangyuan, Liu Lijun, Cheng Peng. 2014. Application of radar echo top height products in hail cloud recognition in Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 35(04):89-92.

doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2014.04.021

- [27] 李朝华,王磊,衡志炜. 2020. 突发性强对流天气快速识别预警改进方法[J]. 高原山地气象研究, 40(03):10-17. Li Chaohua, Wang Lei, Heng Zhiwei. 2020. Improved method for rapid identification and early warning of sudden severe convective weather[J]. Plateau And Mountain Meteorology Research, 40(03):10-17. doi:10.3969/j.issn.1674-2184
- [28] 易笑园,孙晓磊,张义军,郭玲,王艳春. 2017. 雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变及闪电活动的特征分析[J]. 气象学报, 75(06):981-995. Yi Xiaoyuan, Sun Xiaolei, Zhang Yijun, Guo Ling, Wang Yanchun. 2017. Evolution of radar echo parameters and characteristic analysis of lightning activity in the process of thunderstorm cell merging[J]. Acta Meteorologica Sinica, 75(06):981-995. doi:10.11676/qxxb2017.073
- [29] Westcott N. 1984. A Historical Perspective on Cloud Mergers[J]. Bull.amer.meteor.soc, 65(3):219-227.
- [30] 刘新伟,蒋盈沙,黄武斌,潘永洁等. 2021. 基于雷达产品和随机森林算法的冰雹天气分类识别及预报[J]. 高原气象, 40(04):
  898-908. Liu Xinwei, Jiang Yingsha, Huang Wubin, et al. 2021. Hail weather classification and prediction based on radar products and random forest algorithm[J]. Plateau Meteorology, 40(04): 898-908.doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00063
- [31] Mather G K, Treddenick D, Parsons R. 1976. An Observed Relationship between the Height of the 45 dBZ Contours in Storm Profiles and Surface Hail Reports[J]. Journal of Applied Meteorology, 15(12):1336-1340. doi:10.1175/1520-0450(1976)015<1336:AORBTH>2.0.CO;2
- [32] 潘留杰,张宏芳,王楠等. 2013.陕西一次强对流天气过程的中尺度及雷达观测分析[J]. 高原气象, 32(01):278-289. Pan Liujie, Zhang Hongfang, Wang Nan, et al. 2013. Mesoscale and radar observation analysis of a severe convective weather process in shaanxi[J]. Plateau Meteorology, 32(01):278-289.doi: CNKI:SUN:GYQX.0.2013-01-028
- [33] 樊鹏. 1994. 用风暴剖面45dBz高度选择防雹作业时机[J]. 陕西气象, 1994(04): 29-31. Fan Peng. 1994. Selecting the time of hail suppression operation with the height of 45dBz of storm profile[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 1994(04): 29-31. doi:CNKI:SUN:SXQI.0.1994-04-013

[34] Smith P L, Jr, Myers C G, Orville H D. 1975. Radar Reflectivity Factor Calculations in Numerical Cloud Models Using Bulk

Parameterization of Precipitation[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 14(6): 1156-1165.

doi:10.1175/1520-0450(1975)014<1156:RRFCIN>2.0.CO;2

[35] Marshall J S, Palmer W M K. 1948. THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 5(4): 165-166. doi:10.1175/1520-0469(1948)005x003C;0165:tdorwsx0003e;2.0.co;2.



















## 附 录

图 4.2 回波 A、B 组合反射率演变图及作业信息,红色圆圈及圈中黑色实线箭头为火箭射界圈及发射方位角,黑色数字为火箭 用弹量,蓝色圆圈及圈中蓝色实线箭头为高炮射界圈及发射方位角,蓝色数字为高炮用弹量。黑色虚线箭头为垂直剖面图的 剖面位置和方向。垂直剖面图在图 4.3 及图 4.4 给出

Figure 4.2 Evolution diagram and operation information of the combined reflectance of echo A and ECHO B. The red circle and the black solid arrow in the circle are the rocket firing boundary and launching azimuth, the black number is the projectile used by rocket, the blue solid arrow in the blue circle and circle is the anti-aircraft gun firing boundary and launching azimuth, and the blue number is the projectile used by anti-aircraft gun. Black dotted arrows show the position and direction of the vertical section. Vertical sections are given in FIG. 4.3



and 4.4

图 4.3 回波 A 典型时刻垂直剖面图

Fig. 4.3 Vertical section of echo A at typical time

图 4.4 回波 B 典型时刻垂直剖面图 Fig.4.4 Vertical section of echo B at typical time

### Analysis of radar echo evolution characteristics of a severe convective

## storm artificial hail suppression operation

Long Junlin<sup>1</sup>, Zhou Yuquan<sup>2</sup>, Tao Yue<sup>2</sup>

(1. College of Meteorological Observation, Chengdu University of Information Technology / CMA Key Laboratory of Atmospheric

Sounding, Chengdu 610225, Sichuan, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration / Weather Modification Center of China

Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the CINRAD/SA radar observations in Beijing and Tianjin, the radar echo evolution characteristics of two convective cells A and B in a severe convective storm affecting Beijing on June 30, 2021 are analyzed. Through the analysis of the variation of various physical parameters and the number of grid points of different reflectivity intensity grades in different stages of cell development and before and after operation in the statistical area. The evolution characteristics of cells with different strengths under different operating conditions are obtained. The results show that the cell B is a normal convective cloud cluster (life time is 3 hours), and after the large dose operation (74 rockets and 58 anti-aircraft guns are effectively operated within 24 minutes) in the early stage of development, it can be seen that the cell B has good characteristics of inhibiting the development of the cell. The parameters such as mean reflectivity, storm body height and vertically integrated liquid water at different heights of the storm body all show a downward trend. The number of grid points of the stronger echo (30-60dBZ) decreases, while the number of grid points of the weaker echo (20-30dBZ) increases rapidly, and the convection structure weakens as a whole. Cell A is a supercell (life time is 5.5 hours), and there is no obvious inhibition effect in the initial stage due to insufficient operating dose (15 rockets are effectively operated within 30 minutes). Near the mature stage, continuous high-dose operations were carried out (105 rockets and 182 anti-aircraft guns were effectively operated within 80 minutes). Although some characteristics similar to echo B can also be observed: the average reflectivity, cloud top height, strong echo thickness, vertical integrated liquid

water and other parameters in the upper layer decrease, the number of grid points in the higher reflectivity intensity range (50-70dBZ) decreases, and the number of grid points in the lower reflectivity intensity range (30-50dBZ range) increases and lasts for about 30 minutes. However, the overall work suppression effect on supercell A is not obvious.



Fig 3. 1 Potential height, wind distribution and temperature distribution (a) 500hPa; (b) 700hPa; (c) 850hPa; (d) 950hPa of ERA5 reanalysis data at 16 BJT on 30 Jun 2021



图 3.2 2021 年 6 月 14 时 (a) 和 20 时 (b) 北京探空分析图,黑线为温度,蓝线为露点温度 Fig 3.2 L band radiosonde analysis diagram at 14:00(a) and 20:00(b), 30 June 2021. The black line indicates the temperature and the blue line indicates the dew point temperature.



图 3.3 17:00-22:00 北京地区小时降水量及降雹信息(单位: mm)(a) 17:00-18:00;(b) 18:00-19:00; (c) 19:00-20:00;(d) 20:00-21:00;(e) 21:00-22:00;(f) 22:00-23:00

Fig 3.3 Hourly precipitation and hail point in Beijing area from 17:00 to 22:00 on 30 Jun 2021 (a) 17: 00-18:00; (b) 18:00-19:00; (c) 19:00-20:00;

(d) 20:00-21:00; (e) 21:00-22:00; (f) 22:00-23:00



图 4.1 北京、天津雷达站位置(a)及回波 A (17:30-23:00)和回波 B (17:30-20:30) 移动路径、作业站点位置及地势图(b) Fig 4.1 The location of Beijing radar and Tianjin radar(a)

and the path of echo A and echo B and chorography(b)







图 4.2 回波 A、B 组合反射率演变图及作业信息,红色圆圈及圈中黑色实线箭头为火箭射界圈及发射方位角,黑色数字为火箭 用弹量,蓝色圆圈及圈中蓝色实线箭头为高炮射界圈及发射方位角,蓝色数字为高炮用弹量。黑色虚线箭头为垂直剖面图的 剖面位置和方向。垂直剖面图在图 4.3 及图 4.4 给出

Figure 4.2 Evolution diagram and operation information of the combined reflectance of echo A and ECHO B. The red circle and the black solid arrow in the circle are the rocket firing boundary and launching azimuth, the black number is the projectile used by rocket, the blue solid arrow in the blue circle and circle is the anti-aircraft gun firing boundary and launching azimuth, and the blue number is the projectile used by anti-aircraft gun. Black dotted arrows show the position and direction of the vertical section. Vertical sections are given in FIG. 4.3

and 4.4



图 4.3 回波 A 典型时刻垂直剖面图

Fig. 4.3 Vertical section of echo A at typical time



图 4.4 回波 B 典型时刻垂直剖面图 Fig.4.4 Vertical section of echo B at typical time









图 4.5 作业统计区 (矩形框)、高炮 (蓝圈)、火箭 (红圈) 炮弹射界圈及发射方向 Fig.4.5 Operation statistics area (rectangular box), the effective area of rocket operation and rocket-firing track



图 5.1 作业回波 A 北京、天津协同观测(17:30-23:00) 各高度层平均反射率, 虚线框内处于北京雷达观测盲区, 故采用天津雷达观测资料作为补充(下同), 柱状图表示作业信息

Fig 5.1 The average reflectivity of each altitude level of echo A was observed by Beijing radar and Tianjin radars from 17:30 to 23:00, The dashed line box is in the blind area of Beijing radar observation, so the radar observation data of Tianjin is used as a supplement, bar charts represent operational information





图 5.2 作业回波 A 北京、天津协同观测(17:30-23:00)云顶高度(ET)、风暴体高度(TOP)、强回波厚度 (CT)、强中心质心高度(CTM)

Fig 5.2 The cloud top height (ET), storm top height (TOP), strong echo thickness (CT), centroid height of strong echo center (CTM) of echo A was observed by Beijing and Tianjin radars from 17:30



图 5.3 作业回波 A 北京、天津协同观测(17:30-23:00)垂直累积液态水(VIL) Fig 5.3 The vertically integrated liquid (VIL) of echo A was observed by Beijing and Tianjin radars from 17:30 to 23:00







图 5.4 19:54 单体 A (超级单体) 成熟阶段回波特征

Fig 5.4 Echo characteristics of cell A (super cell) in maturity stage at 19:54



图 5.5 作业回波 B (17:30-20:30) 各高度层平均反射率,柱状图表示作业信息 Fig 5.5 The average reflectivity of each level of echo B, and the bar chart represents the operation

information from 17:30 to 20:30







Fig 5. 6 The cloud top height (ET), storm top height (TOP), strong echo thickness (CT), centroid height of strong echo center (CTM) of echo B from 17:30 to 20:30



图 5.7 作业回波 B(17:30-20:30)垂直累积液态水(VIL) Fig 5.7 The vertically integrated liquid (VIL) of echo B from 17:30 to 20:30





Fig 5.8 Time series variation diagram of grid points in different reflectivity intensity intervals of echo A at each altitude, (a) 30-40dBZ; (b) 40-50dBZ; (c) 50-60dBZ; (d) 60-70dBZ

ケ





Fig 5.9 Time series variation diagram of grid points in different reflectivity intensity intervals of echo A at each altitude, (a) 20-30dBZ; (b) 30-40dBZ; (c) 40-50dBZ; (d) 50-60dBZ

