董亚宁,刘福新,孙鸿娉,等,2023. 一次高炮防雹动力效应的相控阵雷达观测分析[J]. 气象,49(8):995-1004. Dong Y N,Liu F X,Sun H P,et al,2023. A study on dynamic effect of hail suppression by anti-hail gun with phased array radar[J]. Meteor Mon,49(8):995-1004(in Chinese).

一次高炮防雹动力效应的相控阵雷达观测分析*

董亚宁[1] 刘福新[2] 孙鸿娉[1] 杨永龙[1]

1 山西省人工影响天气中心,太原 030032

2 山西省临汾市隰县气象局,隰县 041399

提 要:2021 年 7 月 8 日山西省临汾市隰县组织了一次高炮防雹试验。利用隰县的相控阵雷达资料,对炮击强对流云后的动力效应进行分析。通过组合反射率对过程进行分析,可以看到本次作业的时机和部位是符合试验设计的,即:爆炸是在自然云发展期,炸点位于强回波柱上端。通过作业信息和弹道曲线估算试验中炮弹炸点位置,经过雷达、炮点、炸点的时空一致性转换后,对作业前后炸点邻域雷达参量变化进行分析。结果显示:作业前 3~0 min,强回波柱处于发展增强中,在预定炸点附近未见多普勒谱宽区;作业后,在炸点正下端,强回波柱迅速衰弱、分裂、下沉,并在炸点区邻域呈现出多普勒谱宽明显的加宽且维持了 2~3 min,最终导致强回波整体衰落,未见再度强化。这样的演化情景显示出一个效应链:强回波柱由盛转衰是在爆炸后的炸点开始的,爆炸激起的动力扰动蜕变为次级流,展宽了多普勒谱宽,不均匀的动力扰动场诱发的雷诺应力抑制了对流流场,使对流云整体衰落了。另外,从不同强度回波顶高和回波样本数的统计可以看到,爆炸后强回波顶高迅速降低而相应的像素点数迅速减少;弱回波像素点的数值随强回波减少而增多,最后所有强度的回波像素点的数值皆随时间减小。

关键词:观测研究,相控阵雷达,高炮防雹,动力抑制效应

中图分类号:P412 **文献标志码**:A **DOI**:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.062701

A Study on Dynamic Effect of Hail Suppression by Anti-Hail Gun with Phased Array Radar

DONG Yaning[1] LIU Fuxin[2] SUN Hongping[1] YANG Yonglong[1]

1 Shanxi Weather Modification Center, Taiyuan 030032

2 Xixian Meteorological Station, Linfen of Shanxi, Xixian 041399

Abstract: Shanxi Province organized an hail suppression by anti-hail gun test on the afternoon of 8 July 2021 in Xixian County of Linfen City. This paper uses phased-array radar data from the Xixian County to analyse the dynamical effects following shelling of severe convective clouds. First of all, through the analysis of composite reflectivity, it can be seen that the operation time and position of this operation were in line with the test design. In other words, the explosion was during the natural cloud development period and the blast point was located at the upper end of the strong echo column. The location of the shell blast point in the test was estimated from the operational information and ballistic curve. The change in radar parameters in the neighborhood of the blast point before and after the operation is analyzed after the spatio-temporal consistency conversion of radar, shell point and blast point. The results show that the strong echo column was developing and intensifying in 3−0 min before the operation, and there was no Doppler

* 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2021B017)、国家重点研发计划(2019YFC1510304)、山西省重点研发计划(202202130501020)共同资助

2022 年 11 月 18 日收稿; 2023 年 6 月 8 日收修定稿

第一作者:董亚宁,主要从事人工影响天气研究. E-mail:dongyning@163.com

通讯作者:孙鸿娉,主要从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail:fengdichen@sohu.com

spectrum wide area near the predetermined explosion point. After the operation, at the lower end of the blast site, the strong echo column rapidly weakened, split and sank, showing a significant broadening of the Doppler spectrum in the neighborhood of the blast site area. The broadening was maintained for 2—3 min, eventually leading to the overall decay of the strong echo without re-enhancement. This evolution scenario shows an effect chain: the transition from a strong echo column to a decaying one begins at the blast site after the explosion. The dynamical disturbance induced by the explosion metamorphoses into a secondary flow that broadens the Doppler spectrum, and the Reynolds stress induced by the inhomogeneous dynamical disturbance field suppresses the convective flow field, finally causing the overall decay of the convective cloud. In addition, the statistics of the top heights of the echoes and the number of echo samples of different intensities show that the top heights of the strong echoes decrease rapidly after the explosion and the corresponding number of pixels decreases rapidly. The value of the weak echo pixels increases as the strong echoes decrease and finally the value of the echo pixels decreases over time for all intensities.

Key words: observational study, phased-array radar, hail suppression by anti-hail gun, dynamic suppression effect

引 言

冰雹是中小尺度强对流云的产物，作为一种短时强烈的灾害性天气，其发生、发展和影响过程只有数小时甚至几十分钟（李德俊等，2011；王莎等，2019；王俊等，2021）。冰雹以及与之相伴随的大风、雷暴等强天气过程会给人类活动造成很大灾害。对冰雹天气做出准确预报，及时开展人工防雹作业，可以有效减轻冰雹灾害（黄美元和王昂生，1980；许焕斌等，2000；周德平等，2007；李金辉等，2011）。人工防雹是减轻冰雹灾害的一项重要措施，高炮防雹是人工防雹作业的主要方式，我国采用高炮进行防雹作业已有60余年，目前防雹作业规模居世界之首，且还有发展之势（黄美元等，2000；雷恒池等，2008）。我国的防雹工程是先有防雹业务，再有工具发展，随后才有原理性研究（刘治国等，2006）。防雹业务举措、理论、效果皆需要实例验证，因此开展防雹的外场试验，进而验证理论具有相当重要的意义。

国内外多年的人工防雹实践显示（王雨增等，1994；黄美元等，2000；许焕斌，2014；2021），在高炮防雹作业后，经常能观测到“炮响雨落”“化雹为雨”等一些云体的快速响应现象。然而这些现象很多发生在作业后几分钟内，仅从引晶催化的原理难以解释这些现象，爆炸产生的动力学效应起着重要的作用（许焕斌，2014；2021）。黄美元等（1979）认为，爆炸产生的冲击波，改变了云中上升气流，破坏了粒子落速和上升气流间的作用关系，产生防雹效果。郭学良等（2001a；2001b）利用数值模拟，证明改变云中上升气流会对积云的发展演变和降水过程产生明显的影响。许焕斌（1979）指出，炮弹爆炸产生的冲击波和声波会抑制云中上升气流的发展，许焕斌（2001；2014）还对爆炸防雹中存在的动力机制进行探讨，指出爆炸产生的扰动气流和重力波，通过一系列物理效应，使原云体的宏微观结构的协同性发生变化，破坏冰雹的形成，并应用模式模拟再现了该过程，模拟结果与物理假说一致。在前期研究的基础上，许焕斌（2014；2021）归纳中国防雹实践，系统地详述了爆炸防雹的“动力扰动理论”，指出炮弹的爆炸作用产生了扰动流场，扰动流场对云体的背景流场产生抑制作用，抑制导致了云体回波的垮塌和分裂。段英和许焕斌（2001）研究了爆炸防雹的云物理机制，指出在冰雹胚胎帘区的底部发生爆炸，可以改变大雹的运动轨迹，抑制大雹的形成。周非非等（2005）的数值模式试验表明，在雹云发展的不同阶段施加人工抑制，会对雹云的发展和降水产生不同影响，并对其物理机制进行分析。由此可见，爆炸产生的动力效应是人工防雹的关键因素，针对爆炸效应研究，已有许多理论假说，并由许多学者利用各种手段对理论加以印证。然而，由于观测手段的时空分辨率限制，针对爆炸防雹的实际观测证据近乎没有被捕获，利用高分辨率的观测设备开展外场试验，从而对理论进行验证和发展具有重要意义。

相控阵雷达的出现为直接观测这一物理现象提供了条件。相控阵天气雷达是一款可快速扫描探测灾害天气的高新技术雷达系统（张志强和刘黎平，

2011;刘黎平等,2016),可用于冰雹云、强降水风暴高分辨率的快速探测,获取风暴高时空分辨三维径向速度场、强度和微物理精细结构和演化特性数据,对揭示特定区域冰雹云、降水发生发展机理及人工影响效果具有重要作用(刘黎平等,2014;于明慧等,2019;程元慧等,2020;潘佳文等,2022)。相控阵双偏振雷达 1 min 左右的时间分辨率,一定程度上可以排除云体的自然变化,双偏振参量也为分析冰雹云体演变提供了更多的手段(潘佳文等,2020;阮悦等,2022)。孙跃等(2023)利用相控阵双偏振雷达数据,对一次防雹作业前后云体的回波顶高、回波强度、径向速度等宏观特征进行了比较,并利用双偏振参量对云体微物理结构等变化过程进行了分析,通过云体的快速响应变化有力支持了爆炸防雹理论,但该过程中未发现爆炸的直接信号,缺乏相对完整的爆炸效应链。本文结合 2021 年 7 月 8 日临汾市隰县一次高炮防雹过程,利用布署在当地的国产双偏振相控阵雷达的高时空分辨率探测数据,对高炮爆炸效应进行分析,对防雹的动力扰动理论进行了验证(许焕斌,2021)。

1　资　料

研究使用的雷达为布署在隰县的双偏振相控阵天气雷达,该雷达工作频率为 9.5 GHz,采用双极化一维电子扫描的方式,能测得双偏振参量,每 60.25 s 一个体扫数据,仰角从 0.9°到 36.9°,每 1.8°一个仰角,共有 21 个仰角,每个仰角下含 300 个方位(分辨率为 1.2°),距离库分辨率为 30 m。

地面防雹作业实况资料来自山西省隰县气象局。作业炮点为唐户塬炮站,位于雷达站的 107°方位,站点海拔高度为 1201 m,与雷达站的直线距离为 11.55 km(相对位置如图 1 所示)。唐户塬炮站于 14:59—15:00、15:05—15:06、15:14—15:15(北京时,下同)开展防雹作业三次,共发射炮弹 60 发,作业方位角范围(相对于作业炮点)为 225°～264°,作业仰角为 60°。

2　结果分析

2.1　作业云演变概况

首先对防雹作业前后雷达组合反射率演变进行

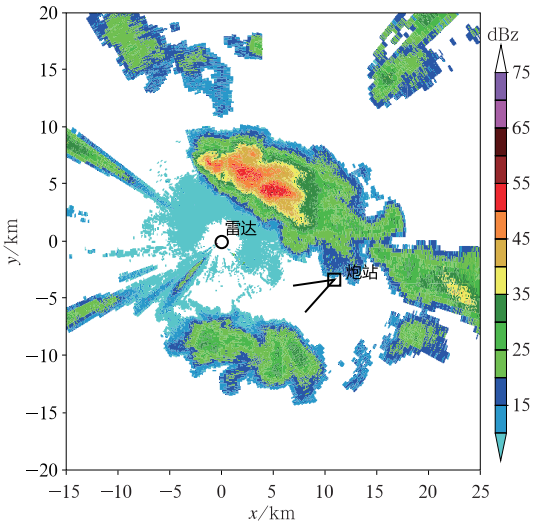
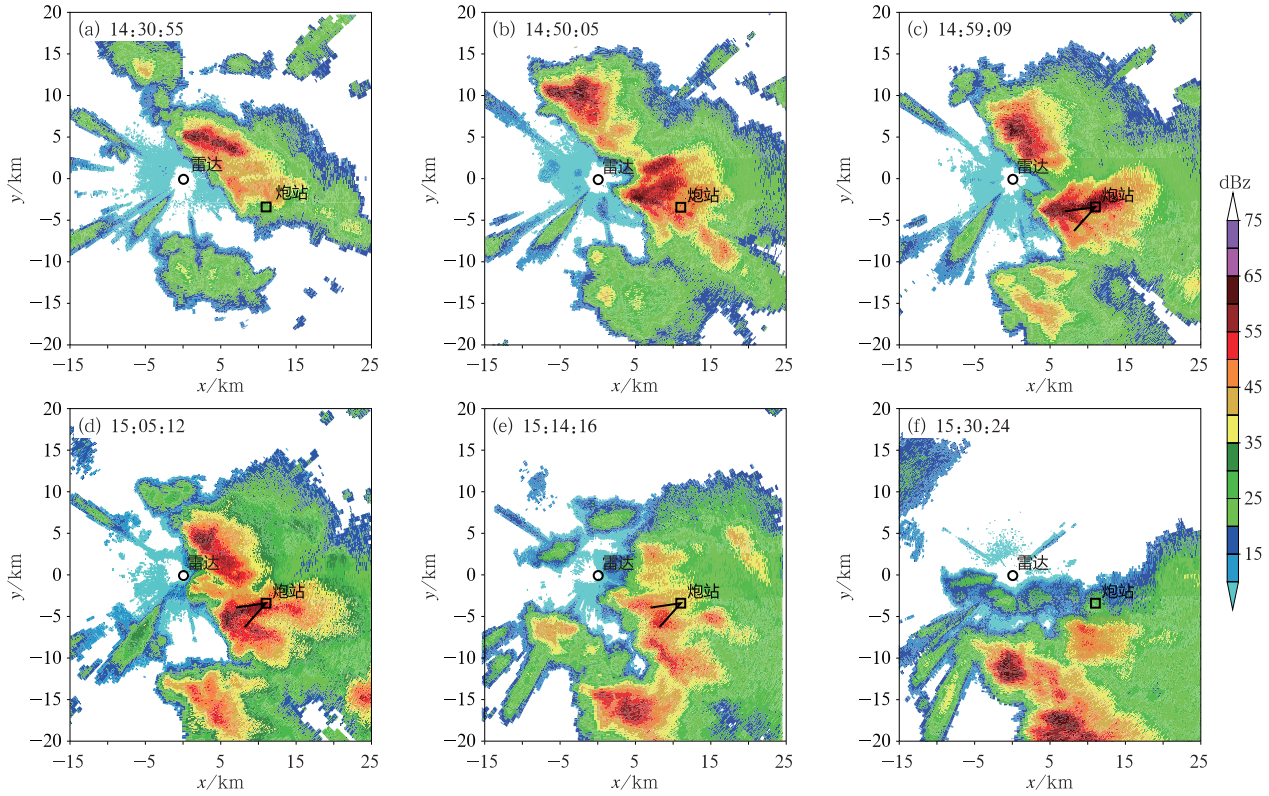


图 1　2021 年 7 月 8 日雷达与炮站相对位置示意图

Fig 1　The relative position of radar and gun launching site on 8 July 2021

分析,对作业合理性进行初分析,图中“V”型黑线为当时高炮作业的方位角范围。2021 年 7 月 8 日 14:30(图 2a),在炮站西北侧开始出现活跃的对流单体活动。回波总体向东南方向移动。回波发展旺盛,强回波中心达到 60 dBz,该作业云为正在发展的雹云,在 14:50(图 2b)左右强回波已移入炮站附近,站点申请作业计划,并准备作业。14:59(图 2c)开始第一轮作业,从该作业时方位角范围来看,对流云回波处于旺盛发展阶段,高炮射击范围可覆盖强回波中上部。第二轮作业为 15:05(图 2d),高炮射击范围位于云体后方,仍然处于云内,可以影响到冰雹云,之后两块对流单体合并,但强度明显减弱。第三轮作业为 15:14(图 2e),雷达回波已明显减弱,高炮射击范围在强对流云边缘位置。三轮作业后,作业云体强回波基本消散(图 2f),之后又有新的对流单体生成合并,但已离开作业站点。从雷达组合反射率演变来看,三轮作业高炮射击覆盖范围均位于对流云体强回波处,第三轮作业略偏晚,以下主要针对前两轮作业进行分析。

对 14:50 炮站偏北侧的对流单体做垂直剖面,分析作业前云体结构。剖面位置如图 3a 黑线所示,通过对流单体的垂直剖面可以看到发现,作业前炮站北侧的强回波单体具有悬挂回波特征(图 3b),这是冰雹云的典型特征之一。由双偏振参量反演的相态识别(冯亮等,2018)结果可见,虽然此时近地面以大雨粒子为主,但高空存在大量霰粒子。在悬挂回波后部 0℃高度附近有冰雹形成,在下落过程中融化



注：V 型黑实线为高炮防雹作业方位范围。

图 2 2021 年 7 月 8 日 14:30:55—15:30:24 作业前后雷达组合反射率演变

Fig. 2 Evolution of radar composite reflectivity before and after operation during 14:30:55－15:30:24 BT 8 July 2021

形成雨加雹和大雨(图 3c)。综上所述，可以认为该单体是正在形成降雹的冰雹云，适合作为防雹作业对象。但是，鉴于相态识别算法本身还存在主观性和经验性(Zhang et al，2019)，且垂直剖面的插值过程可能会平滑掉小范围的高炮动力效应信号，下文仍然以雷达原始观测的数据为主要分析对象，不再对插值剖面和相态识别结果进行深入讨论。

2.2 高炮炸点区域

根据作业仰角和炮弹弹道曲线，判断炸点距炮站约 3～4 km，高度在 4～5 km(图 4a 红圈位置)。图 4b 中 V 型黑线为作业方位角范围，长度为 4 km，V 型区域为炮弹方位角范围。最终确定三角形为炸点区域，该区域为距离雷达约 8～9 km、高度在 4～5 km 处。在该区域中选择方位角 129°的径向剖面作为特征剖面对爆炸区域进行分析。

2.3 作业前后谱宽变化特征

谱宽是抽样体积内粒子的多普勒速度离散程度的度量，影响谱宽的因素大致可以分为气象因素和非气象因素。其中气象因素主要有：垂直风切变、大气湍流运动、粒子下落速度分布(万蓉等，2002；王芬等，2009)。图 5 为作业前后 129°方位角剖面上的谱宽变化，可以看到炮击前在预定炸点附近未见多普勒谱宽区，第一次作业结束后 1～3 min，在预定炸点附近谱宽明显增宽，之后逐渐变小。结合变化出现的时间和位置可以判断，这是由于爆炸产生的冲击波以及蜕变产物产生的外加扰动气流引起了谱宽的增宽。第二次炮击作业对谱宽未造成明显影响，这很可能是由于显示这种响应对时空配合的要求甚高，这个条件不是每轮作业皆可达到的(换言之，其机会是可得而不可求)，以致未能再捕捉到明显的类似扰动。

2.4 作业前后回波反射率变化特征

前两次炮击时间间隔较短，选取炮击前 1 min 到炮击后的连续若干个时次，根据雷达回波，分析炮击可能引起的短时动力效应。从作业前后回波反射率

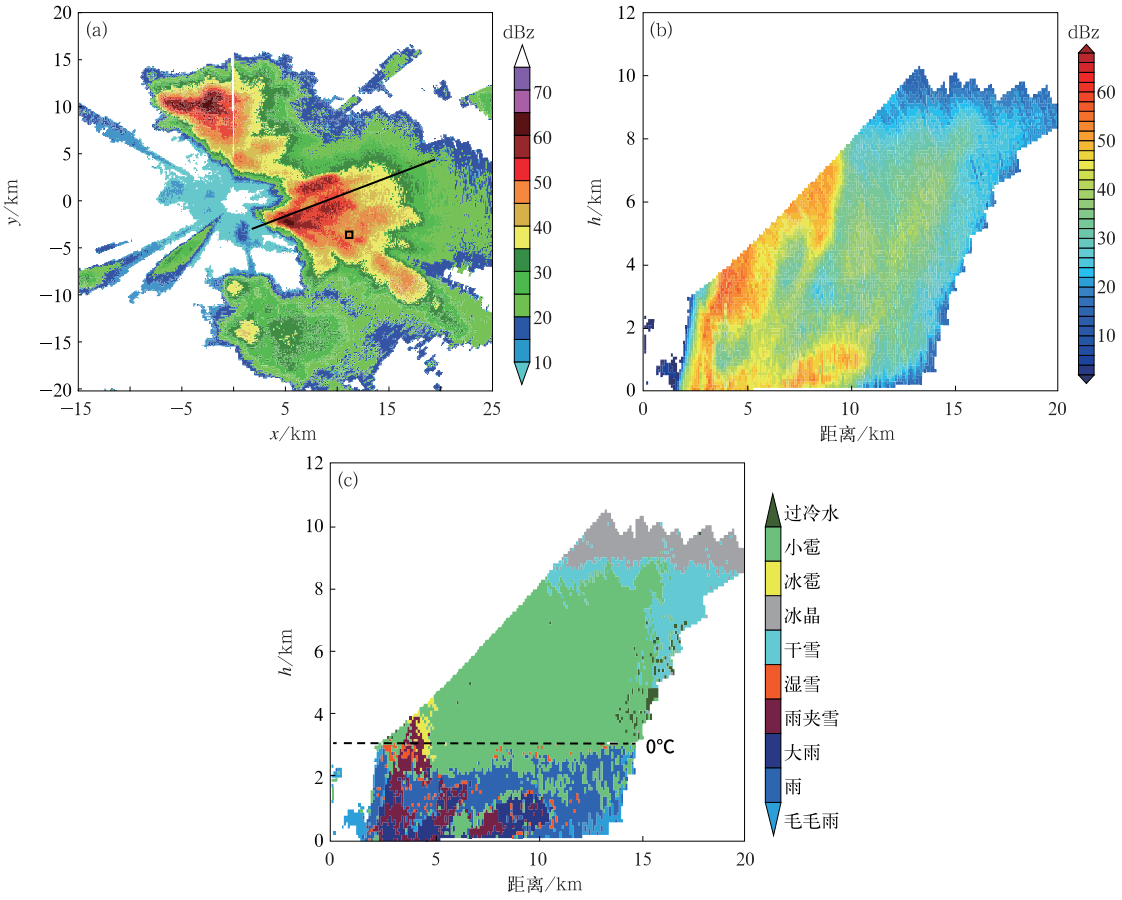
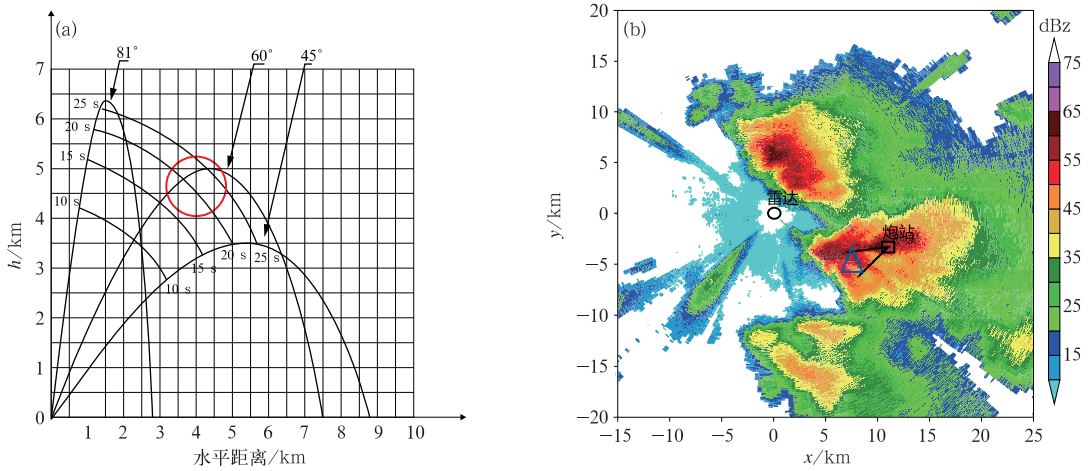


图 3　2021 年 7 月 8 日 14:50 作业前炮站北侧对流单体的典型垂直剖面

(a)剖面位置(黑线),(b)反射率,(c)相态识别

Fig. 3　Typical vertical profiles of the convective cell in the north side of the station before the hail suppression at 14:50 BT 8 July 2021

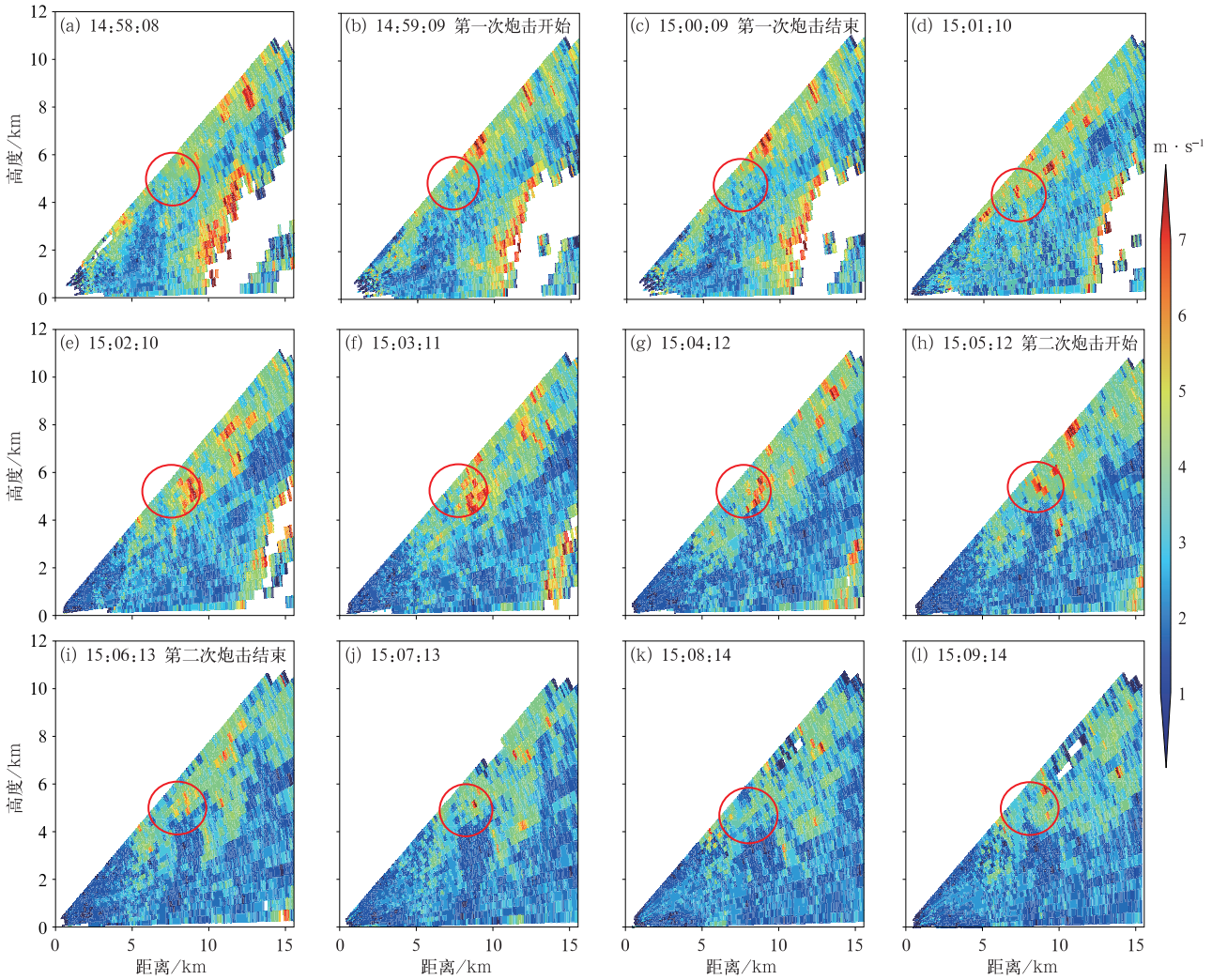
(a) profile position (black line), (b) reflectivity, (c) phase identification



注:红圈为爆炸位置,蓝色三角形为估算的炸点区域。

图 4　2021 年 7 月 8 日 14:59:09(a)13 型人工防雹弹弹道曲线,(b)炸点区域

Fig. 4　(a) Curve of type 13 artificial hail suppression bullet track, and (b) blast point area at 14:59:09 BT 8 July 2021



注:红圈为爆炸点在剖面中的位置。

图 5 2021 年 7 月 8 日 14:58:08—15:09:14 作业前后谱宽变化(129°方位角剖面)

Fig. 5 Variation of spectral width before and after operation (129° azimuth profile) during 14:58:08—15:09:14 BT 8 July 2021

的变化(图 6)可以看到,作业前,回波发展旺盛,强回波面积大、回波连续、结构密实。第一轮作业结束后 1～2 min(15:01、15:02),强回波衰弱不明显,这是因为爆炸对回波的抑制需要一定的时间,这与谱宽的变化相对应。第一轮作业结束后 3～4 min(15:03、15:04),强回波基本明显衰弱、下沉,强回波范围、强度明显减弱。第二轮作业后,强回波继续减弱、下沉,回波整体继续衰弱,在第二轮作业结束后,回波继续衰弱(15:07、15:08),整个作业结束后 3 min (15:19),整体回波强度明显减弱,强回波高度已下降到 1 km 左右。结合多普勒谱宽的变化显示出一个效应链:强回波柱由盛转衰是在爆炸后的炸点开始的,爆炸激起的动力扰动蜕变为次级流展宽了多普勒谱宽,不均匀的动力扰动场诱发的雷诺应力抑制了对流流场,终于使对流云整体衰落了。

2.5 作业前后回波顶高变化特征

为进一步分析雷达回波变化,对雷达方位角 90°～130°范围,距离 15 km 的体扫数据进行不同强度回波顶高的统计,结果如图 7 所示。从 14:30 开始,50 dBz 的强回波已出现在区域上空 4 km 左右,14:33,60 dBz 的强回波也开始出现,高度在 2 km 以内;在 14:59 作业之前,50 dBz 的回波顶高基本维持在 4 km 左右,变化幅度不大。15:00 作业结束后,50 dBz 强回波顶高迅速降低,15:05 第二次作业前,下降到 1 km 左右,15:06 第二次作业结束 5 min

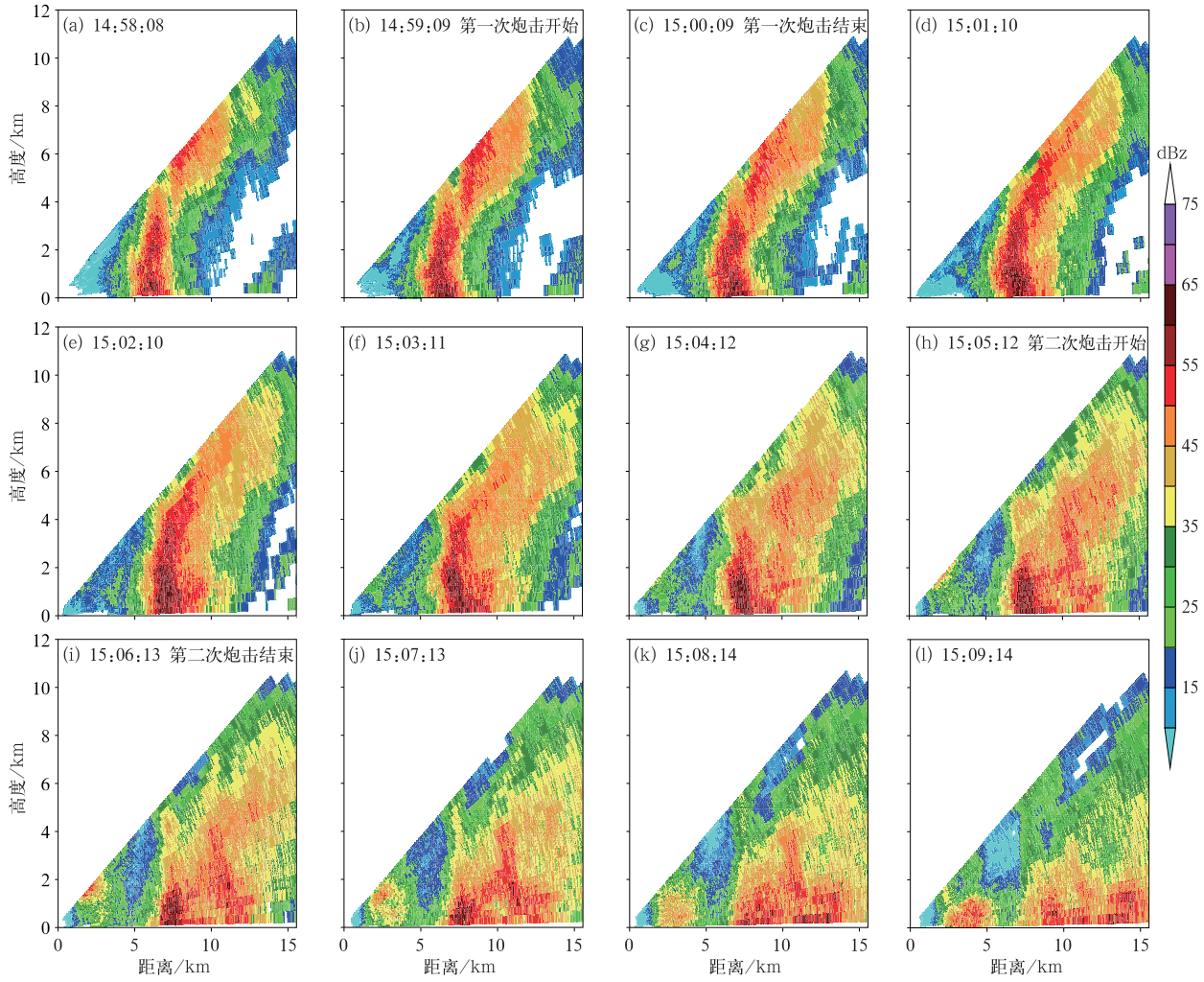


图 6　2021 年 7 月 8 日 14:58:08—15:09:14 作业前后回波反射率变化(129°方位角剖面)

Fig. 6　Variation of echo reflectivity before and after operation (129° azimuth profile) during 14:58:08—15:09:14 BT 8 July 2021

后,顶高下降到 300 m 左右,之后基本维持在 1 km 以内;60 dBz 的强回波由于本身高度较低,受爆炸效应的瞬时影响较小,再之后随着回波结构整体的分裂、衰弱消失;40 dBz 强回波在作业后也出现迅速下降,15:13 下降到最低 2 km 左右,之后又出现回升;20～30 dBz 整体变化不大,有下降但幅度很小。综合来看,研究范围内强回波顶高在作业结束后有明显降低,尤其是处在高炮炸点范围的 50 dBz 强回波,下降幅度很大,且下降时间与高炮作业时间相对应。

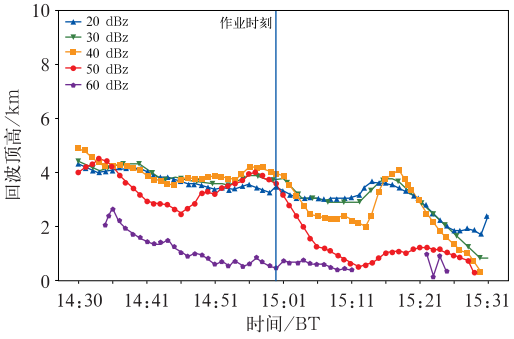


图 7　2021 年 7 月 8 日 14:30—15:31 不同强度回波顶高(距离地面)的时间变化特征

Fig. 7　Time variation characteristics of echo top heights (distance from ground) with different intensities during 14:30—15:31 BT 8 July 2021

2.6　回波样本统计

图 8 为不同强度回波样本数的统计变化,统计范围与回波顶高统计范围相同。可以看到,作业后,

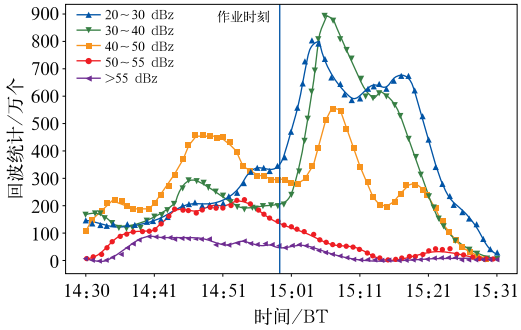


图 8 2021 年 7 月 8 日 14:30—15:31 不同强度回波样本数的时间变化特征

Fig. 8 Time variation characteristics of echo sample numbers with different intensities during 14:30－15:31 BT 8 July 2021

50～55 dBz 的强回波迅速减少，20～50 dBz 的弱回波迅速增加，之后随着回波的整体衰弱整体开始减少，这可能是爆炸对强回波产生抑制作用，导致强回波迅速减少，衰退为弱回波，导致弱回波增多，后因整体回波的衰弱而减少。60 dBz 的回波作业前后变化不大，与其本身高度较低、受爆炸效应的瞬时影响较小有关。作业前 50～55 dBz 也有衰减趋势，但作业前强回波的衰减并未造成弱回波的增加，而在作业后强回波衰减弱回波迅速增加，因此判断作业前的衰减属于云体的自然变化，作业后的迅速衰减是受高炮爆炸效应影响。

3 结论与讨论

(1)利用具有分钟级时间和 30 m 级空间分辨率的相控阵雷达确实可察见爆炸动力效应的反应。佐证了我国爆炸防雹实践中所展示的快速起效性和理论推断的时(几分钟)空(百米)尺度范围的可信性。也表明了相控阵雷达的列装对人工影响天气业务发展是正确、必要的。

(2)此次过程作业云体位于雷达、炮站中间，距离雷达较近，相互位置配置较好，相控阵雷达时间分辨率高。通过组合反射率对过程进行分析，可以看到本次作业的时机和部位比较合理，这些都是本次试验能取得明显效果的基础。孙跃等(2023)同样利用隰县防雹过程的相控阵雷达数据，从宏微观结果变化对爆炸防雹效应进行了深入的分析，但由于该次过程中相互位置、作业时机等影响，未发现谱宽增宽等相对直接的证据。

(3)试验中第一次炮击击中了云体的强回波柱上方，第一次作业结束 3 min 后，在炸点附近出现明显的多普勒谱宽增宽现象，这意味着爆炸的蜕变产物——局地非均匀扰动流场的形成；这样的外加扰动流场形成应力场去抑制背景流场，抑制作用使得炮击前处于强势的回波结构场，从炮击时刻和位置开始，作业区强回波逐渐衰弱、分裂、下沉。第二次作业后，作业区回波继续衰弱、低位，或维持弱状态，没有出现再强化。

(4)对影响范围的不同强度回波顶高和回波样本数进行统计，结果显示高炮作业后，55 dBz 的强回波顶高迅速降低，样本数减少；弱回波样本先增多，后随着整体回波的衰退减少；60 dBz 的强回波因所处位置较低，受爆炸影响较小，作业前后变化不大。从变化出现的时机和特征来看，回波变化是由于爆炸对强回波产生抑制作用，导致强回波高度下降，并衰退为弱回波，弱回波随之增多，后因整体回波的衰弱而减少。

(5)此次试验给出的结果用观测到的实例图像较完整地展现了云中爆炸所诱发的效应链，即如何削弱强对流云的全过程，是可以用来验证防雹作业中爆炸作用的一个观测实例。然而由于爆炸作用的复杂性，为了在防雹外场试验中积累更多的观测个例，需继续进行研究，如果在试验中多次再现类似的观测反应，才可排除“张冠李戴”式的巧合性。下一步，将在该试验基础上，有针对性地布设其他观测设备，同时，利用有专门设计的高炮试验弹，开展对流云三维流场探测，分析爆炸防雹后流场和水成物的变化及爆炸防雹效果，为爆炸防雹技术发展提供更为可靠、严密、丰富的科学数据和技术支撑。

参考文献

程元慧，傅佩玲，胡东明，等，2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验[J]. 气象，46(6)：823-836. Cheng Y H，Fu P L，Hu D M，et al，2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test[J]. Meteor Mon，46(6)：823-836(in Chinese).

段英，许焕斌，2001. 爆炸防雹中的云微物理机制的探讨[J]. 气象学报，59(3)：334-340. Duan Y，Xu H B，2001. The possible cloud-micro physical mechanizm of explosion in hail suppression[J]. Acta Meteor Sin，59(3)：334-340(in Chinese).

冯亮，肖辉，孙跃，2018. X 波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究[J]. 气候与环境研究，23(3)：366-386. Feng L，Xiao H，Sun Y，2018. A study on hydrometeor classification and application based on X-band dual-polarization radar measurements[J].

Climatic Environ Res,23(3):366-386(in Chinese).

郭学良,黄美元,洪延超,等,2001a. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究Ⅰ. 模式建立及冰雹的循环增长机制[J]. 大气科学,25(5):707-720. Guo X L,Huang M Y,Hong Y C,et al,2001a. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model Part Ⅰ: model description and the mechanism of hail recirculation growth[J]. Chin J Atmos Sci,25(5):707-720(in Chinese).

郭学良,黄美元,洪延超,等,2001b. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究Ⅱ. 冰雹粒子的分布特征[J]. 大气科学,25(6):856-864. Guo X L,Huang M Y,Hong Y C,et al,2001b. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model Part Ⅱ: characteristics of hail-category size distribution[J]. Chin J Atmos Sci,25(6):856-864(in Chinese).

黄美元,王昂生,1980. 人工防雹导论[M]. 北京:科学出版社. Huang M Y,Wang A S,1980. Introduction to Artificial Hail Suppression[M]. Beijing:Science Press(in Chinese).

黄美元,徐华英,王昂生,等,1979. 爆炸影响对流云发展过程的原理研究[J]. 大气科学,3(3):280-288. Huang M Y,Xu H Y,Wang A S,et al,1979. Studies of influence on development of convective clouds by explosion[J]. Sci Atmos Sin,3(3):280-288(in Chinese).

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,5(3):318-328. Huang M Y,Xu H Y,Zhou L,2000. 40 Year's hail suppression in China[J]. Climatic Environ Res,5(3):318-328(in Chinese).

雷恒池,洪延超,赵震,等,2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学,32(4):967-974. Lei H C,Hong Y C,Zhao Z,et al,2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. Chin J Atmos Sci,32(4):967-974(in Chinese).

李德俊,唐仁茂,熊守权,等,2011. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象,37(4):474-480. Li D J,Tang R M,Xiong S Q,et al,2011. Radar features and nowcasting of severe hail and short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon,37(4):474-480(in Chinese).

李金辉,岳治国,李家阳,等,2011. 两块冰雹云催化防雹效果分析[J]. 高原气象,30(1):252-257. Li J H,Yue Z G,Li J Y,et al,2011. Analysis on hail suppression effect by catalyse to two hail-clouds[J]. Plateau Meteor,30(1):252-257(in Chinese).

刘黎平,胡志群,吴翀,2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应用[J]. 气象科技进展,6(3):28-33. Liu L P,Hu Z Q,Wu C,2016. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. Adv Meteor Sci Technol,6(3):28-33(in Chinese).

刘黎平,吴林林,吴翀,等,2014. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J]. 大气科学,38(6):1079-1094. Liu L P,Wu L L,Wu C,et al,2014. Field experiment on convective precipitation by X-band phased-array radar and preliminary results[J]. Chin J Atmos Sci,38(6):1079-1094(in Chinese).

刘治国,陶健红,王学良,等,2006. 一次高炮防雹效果的 CINRAD/CC 产品分析[J]. 干旱气象,24(3):23-30. Liu Z G,Tao J H,Wang X L,et al,2006. Effect analysis of a hail suppression by anti-hail gun based on CINRAD/CC products[J]. J Arid Meteor,24(3):23-30(in Chinese).

潘佳文,彭婕,魏鸣,等,2022. 副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析[J]. 气象学报,80(5):748-764. Pan J W,Peng J,Wei M,et al,2022. Analysis of an extreme flash rain event under the background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations[J]. Acta Meteor Sin,80(5):748-764(in Chinese).

潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J]. 气象,46(12):1608-1620. Pan J W,Wei M,Guo L J,et al,2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in southern Fujian[J]. Meteor Mon,46(12):1608-1620(in Chinese).

阮悦,黄慧琳,魏鸣,等,2022. 福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特征分析[J]. 气象,48(4):442-451. Ruan Y,Huang H L,Wei M,et al,2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian[J]. Meteor Mon,48(4):442-451(in Chinese).

孙跃,任刚,孙鸿娉,等,2023. 一次高炮防雹的相控阵双偏振雷达观测特征[J]. 应用气象学报,34(1):65-77. Sun Y,Ren G,Sun H P,et al,2023. Features of phased-array dual polarization radar observation during an anti-aircraft gun hail suppression operation[J]. J Appl Meteor Sci,34(1):65-77(in Chinese).

万蓉,吴书君,汤达章,2002. 多普勒雷达谱宽资料分析应用初探[J]. 山东气象,22(1):26-27,30. Wan R,Wu S J,Tang D Z,2002. Elementary analysis and application of Doppler weather radar's spectral width[J]. J Shandong Meteor,22(1):26-27,30(in Chinese).

王芬,李腹广,李腹玉,等,2009. 新一代多普勒天气雷达 CINRAD/CD 谱宽资料分析应用初探[J]. 沙漠与绿洲气象,3(2):51-54. Wang F,Li F G,Li F Y,et al,2009. Analysis and application of spectrum width against a new generation Doppler weather radar CINRAD/CD[J]. Desert Oasis Meteor,3(2):51-54(in Chinese).

王俊,王文青,王洪,等,2021. 短时强降水和冰雹云降水个例雨滴谱特征分析[J]. 高原气象,40(5):1071-1086. Wang J,Wang W Q,Wang H,et al,2021. Characteristics of the raindrop size distribution during a short-time heavy rainfall and a squall line accompanied by hail[J]. Plateau Meteor,40(5):1071-1086(in Chinese).

王莎,沙勇,宋金妹,等,2019. 冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J]. 气象,45(5):713-722. Wang S,Sha Y,Song J M,et al,2019. Characteristic analysis of hail cloud Doppler radar parameters in the eastern Hebei Province[J]. Meteor Mon,45(5):713-722(in Chinese).

王雨增,李凤声,伏传林,1994. 人工防雹实用技术[M]. 北京:气象出版社. Wang Y Z,Li F S,Fu C L,1994. Practical Technology for Artificial Hail Suppression[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).

许焕斌,1979. 关于爆炸影响气流的力学效应[J]. 气象,5(10):26-28.

Xu H B,1979. About the mechanical effect of explosion on air flow[J]. Meteor Mon,5(10):26-28(in Chinese).

许焕斌,2001.爆炸防雹中可能动力机制的探讨[J].气象学报,59(1):66-76. Xu H B,2001. The possiple dynamic mechanism of explosion in hail suppression[J]. Acta Meteor Sin,59(1):66-76(in Chinese).

许焕斌,2014.人工影响天气动力学研究[M].北京:气象出版社. Xu H B,2014. Studies of Dynamics in Weather Modification[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).

许焕斌,2021.中国的防雹实践和理论提炼[M].北京:气象出版社. Xu H B,2021. Practice and Theory Hail Suppression in China[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).

许焕斌,段英,吴志会,2000.防雹现状回顾和新防雹概念模型[J].气象科技,28(4):1-12. Xu H B,Duan Y,Wu Z H,2000. A review of the current situation of hail suppression and a new conceptual model of hail suppression[J]. Meteor Sci Technol,28(4):1-12(in Chinese).

于明慧,刘黎平,吴翀,等,2019.利用相控阵及双偏振雷达对2016年6月3日华南一次强对流过程的分析[J].气象,45(3):330-344. Yu M H,Liu L P,Wu C,et al,2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon,45(3):330-344(in Chinese).

张志强,刘黎平,2011.相控阵技术在天气雷达中的初步应用[J].高原气象,30(4):1102-1107. Zhang Z Q,Liu L P,2011. Preliminary application of phased array technology in weather radar[J]. Plateau Meteor,30(4):1102-1107(in Chinese).

周德平,杨洋,王吉宏,等,2007.冰雹云雷达识别方法及防雹作业经验[J].气象科技,35(2):258-263. Zhou D P,Yang Y,Wang J H,et al,2007. Hail cloud identification method by radar echoes and experiences from hail suppression operation in Liaoning Province[J]. Meteor Sci Technol,35(2):258-263(in Chinese).

周非非,肖辉,黄美元,等,2005.人工抑制上升气流对冰雹云降水影响的数值试验研究[J].南京气象学院学报,28(2):153-162. Zhou F F,Xiao H,Huang M Y,et al,2005. Modeling evaluation of effects of artificial updraft restraints in a strong hailstorm on its precipitation[J]. J Nanjing Instit Meteor,28(2):153-162(in Chinese).

Zhang G F,Mahale V N,Putnam B J,et al,2019. Current status and future challenges of weather radar polarimetry:bridging the gap between radar meteorology/hydrology/engineering and numerical weather prediction[J]. Adv Atmos Sci,36(6):571-588.

(本文责编:俞卫平)