

刘昭武,郝茂生,龚佃利.鲁西北地区一次秋季强对流天气的雷达识别分析[J].气象研究与应用,2020,41(1):79-83.

Liu Zhaowu, Hao Maosheng, Gong Tianli. Radar identification anlysis of a severe autumn convective weather in Northwest Shandong [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(1): 79-83.

# 鲁西北地区一次秋季强对流天气的雷达识别分析

刘昭武<sup>1</sup>, 郝茂生<sup>1</sup>, 龚佃利<sup>2</sup>

(1.滨州市气象局, 山东 滨州 256612; 2.山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 271001)

**摘要:** 利用 SA 雷达探测和高空探空资料,结合防雷作业数据和灾情信息,对 2016 年 9 月 11 日发生在鲁西北地区的强对流天气过程中两个对流单体进行雷达识别分析。结果表明:两个对流单体发展迅速,在 4-7 个体扫(约 25-45min)内,垂直液态水含量(VIL)分别跃增了  $27\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $16\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,达到  $64\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $57\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ;在反射率因子图上都具有典型的冰雹回波特征:存在较明显的强回波墙、回波穹窿、有界弱回波区;实施防雷作业后,对流单体回波顶高、VIL、风暴质心高度、冰雹概率、强冰雹概率等指标持续下降,进一步证实了开展防雷作业可有效地减小降雹灾害。

**关键词:** 秋季强对流;雷达识别;防雷效果

中图分类号: P412.25

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2020.1.16

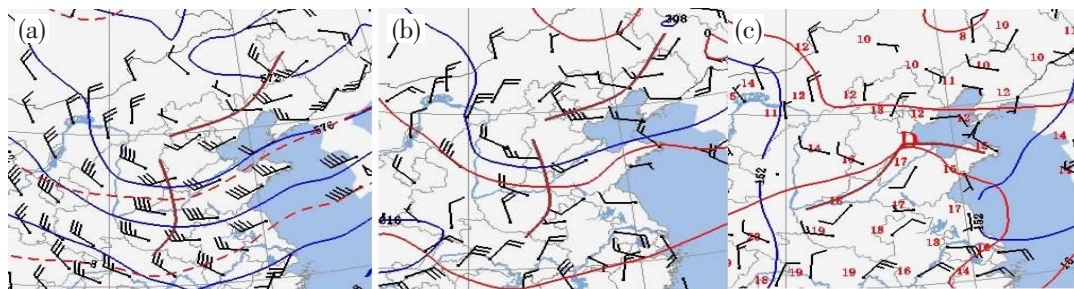
## 引言

冰雹是由强对流天气系统引起的一种剧烈天气现象,降雹发生时,常伴有短时强降水、大风、雷电等灾害性天气,常常给农业生产带来严重损失。不少学者对多普勒天气雷达在冰雹监测预警中的应用做了研究,王娟等<sup>[1]</sup>指出强回波中心强度超过 60dBz、具有倾斜结构和“V”型缺口、垂直液态水含量(VIL)值维持在  $40\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  以上、回波顶高维持在 12km 以上的雷达回波特征可用于识别冰雹;钱卓蕾等<sup>[2]</sup>指出在降雹前最大反射率因子及其所在高度的突降和 VIL 的突增可作为判别降雹的指标;汤兴芝等<sup>[3]</sup>指出回波强度、回波顶高和 VIL 可作为冰雹发生的参考条件;李湘<sup>[4]</sup>指出回波强度大于 50dBz、回波核高

度、VIL 值出现明显跃增等可作为雹灾的联合预警指标;张磊等<sup>[5]</sup>认为 VIL、VWP 产品变化能够很好地指示云体发展情况,是判别降雹潜势的指标;也有学者利用冰雹识别算法、冰雹概率等统计指标研究发生冰雹天气的可能性<sup>[6-8]</sup>。但是由于降雹具有很强的局地性,各地雹云活动规律不同,尤其是针对秋季强对流天气的识别研究较少。基于以上学者研究基础上,针对鲁西北地区一次秋季强对流天气过程雷达识别,并结合防雷效果分析<sup>[9-11]</sup>做进一步研究,为提高强对流天气预报水平提供参考。

## 1 天气形势与物理量分析

从 9 月 11 日 08 时的高空形势场(图 1)上,可见 500hPa 气旋性环流中心位于吉林西部,低槽分为



(蓝色线:等高线;红色线:等温线;棕色线:槽线)

图 1 9 月 11 日 08 时 500hPa(a)、700hPa(b)、850hPa(c)形势场

收稿日期: 2020-01-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC150790X)项目

作者简介: 刘昭武(1979-),男,大学本科,工程师,主要研究方向:应用气象、人工影响天气。E-mail: lzwbeifeng@126.com

两段,北段从辽宁西部经河北东北部直至北京,南段从晋冀交界处一直向南伸展到河南南部,鲁西北处于槽前西到西南气流中,同时温度槽落后于高度槽,槽后的冷平流明显,有利高空槽继续东移加深,引起鲁西北中层降温,增强对流不稳定。700hPa 槽线的位置与 500hPa 几乎重合,该层的冷平流较 500hPa 层更为明显;850hPa 在渤海湾地区有一气旋式环流生成,其东、西两侧的暖、冷式切变位于鲁西北地区。上述的天气形势正是有利于鲁西北发生强对流天气的“高空低槽型”,500hPa 槽后的冷空气与低层槽前的暖湿空气叠加,上冷下暖的配置极易产生强对流天气。

进一步分析 9 月 11 日 08 时济南章丘探空资料(图 2),发现本地的对流有效位能 CAPE 值仅为 304.8J/kg,似乎表明大气对流不稳定并不强,这主要是低层有逆温存在的缘故,低层逆温的存在,起到干暖盖的作用,有利于近地层能量的聚集,一旦干暖盖被打破,对流将非常激烈。为了定量地估计当时的

对流潜势,利用冰雹发生前(14 时)阳信(距离章丘 100.7km)的地面最高温度(24℃)和露点(21℃)对章丘探空资料进行订正,得到了订正后的探空分析图(图 2b),其中 CAPE 值激增到  $2017\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是订正前的 6.6 倍,抬升凝结高度(LCL)由 914.3hPa 下降到 953hPa,自由对流高度由 688.3hPa 下降到 832hPa;500hPa 高度层以上露点曲线与层结曲线相距较远,温度露点差大多数气层超过  $16^\circ\text{C}$ ,而 500hPa 高度层以下各层露点曲线与层结曲线距离相对较近,温度露点差大多数气层在  $9^\circ\text{C}$  以下,表明高层大气较干,低层大气较湿,类似于对流不稳定的“喇叭口”形态;另外,冰雹发生前抬升指数 LI 为  $-1.19^\circ\text{C}$ ,且 850hPa 的比湿在  $8\text{--}10\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,从低层到高层的风向始终为西到西南风,0–6km 风速的垂直切变量约为  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,存在弱的垂直风切变。以上这些数据表明强对流发生前,鲁西北地区环境场已经具备了一定的动力条件和水汽条件。

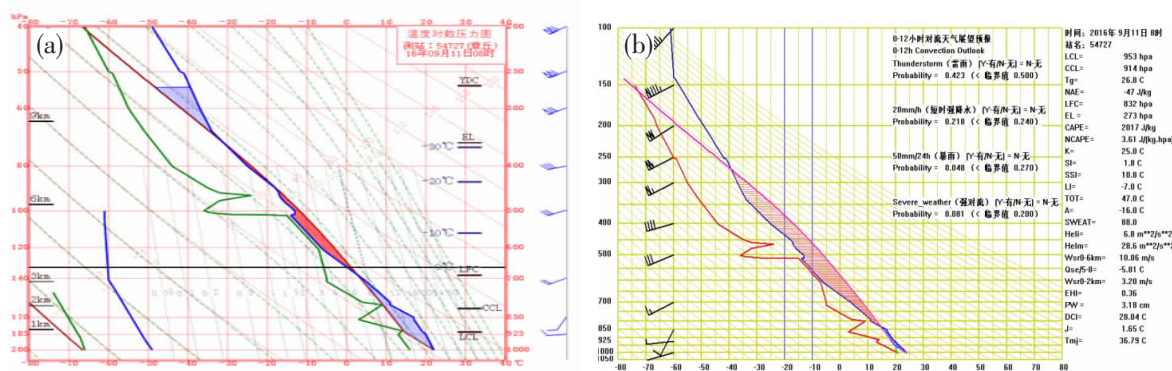


图 2 9 月 11 日 08 时章丘探空(a)、订正探空(b)分析

## 2 雷达回波特征分析

### 2.1 对流性回波演变概况

2016 年 9 月 11 日上午,鲁西北上空不断有零散的弱对流回波自西南向东北方向移动,大部分地区出现了雷雨天气;中午 12 时后,自河北沧州新生的多单体风暴向东偏北方向移动,并快速发展,在河北沧州与山东滨州、德州市交界的地区迅速发展形成南北向的带状回波,东西宽 30–50km,南北长 150–200km,带状回波南端不断出现新生对流单体,到 16 时逐渐转向东南方向移动。在带状回波移动过程中有两个单体发展最为旺盛,分别是生成于 14:47 的单体 B9 和 16:04 的单体 N1(图略),单体 B9 生命期约 2h(22 个体扫),移经德州乐陵、庆云和滨州

阳信、无棣四个县,单体 N1 生命期长达 4.5h(47 个体扫),移经济南商河、滨州惠民、博兴,淄博高青、桓台、临淄,东营广饶以及潍坊青州、寿光等九个县市(区),这两个强对流单体造成了滨州、淄博两市境内的冰雹、雷雨大风、短时强降水等灾害性天气。

### 2.2 两个单体风暴参数特征

图 3 是 14 时 47 分—15 时 40 分对流单体 B9 和 16 时 04 分—16 时 57 分 N1 的对流风暴参数,由图可见,单体 B9、N1 回波强度最大值分别为 66dBz、67dBz,回波顶高最大值分别为 12.7km、10.5km,VIL 最大值分别为  $64\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $57\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,均满足滨州市冰雹预警指标。两个对流单体在生成后迅速发展,仅在 4–7 个体扫内,对流单体 B9、N1 的 VIL 值最大跃增量分别达到了  $27\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $16\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,VIL 值和 VIL 值



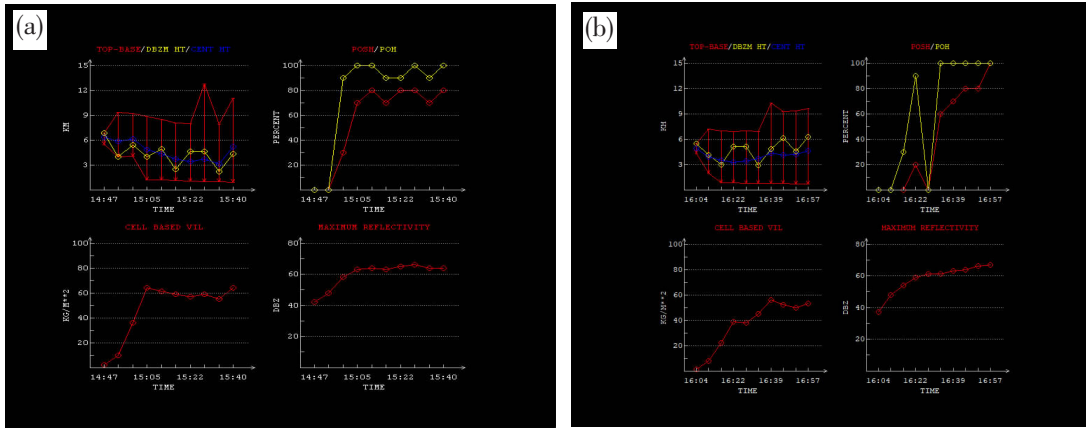


图3 对流单体 B9(a)、N1(b)的风暴参数

跃增量均满足大冰雹( $\geq 20\text{mm}$ )的临界预警指标<sup>[12]</sup>; 两个强对流单体的冰雹概率、强冰雹概率最大值均达到了 100%, 出现冰雹的可能性非常大。

2.3 两个单体回波结构特征及演变

2.3.1 单体 B9

单体 B9 于 9 月 11 日 14:47 正式编号, 回波质心高度在 6.8km, 接近 $-20^{\circ}\text{C}$ 高度, 有利于冰雹的形成与发展; 随后 4 个体扫内(约 25 分钟), 回波强度、回波顶高、VIL 值、冰雹概率、强冰雹概率迅速升至 63dBz、9.3km、64 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、100%、80%, 此后单体 B9 继续发展, 15:28 回波顶高升至 12.7km, 此时单体 B9 各项指标均达到最大值, 处于成熟阶段; 15:46 单体

B9 各项指标仍然维持较高值, 此时回波质心高度迅速下降至 0.8km, 在反射率因子  $1.5^{\circ}$ (图 4a)、 $2.4^{\circ}$ (图 4b)、 $3.4^{\circ}$ (图 4c)、 $4.3^{\circ}$ (图 4d) 均观测到了三体散射现象。两个体扫后回波质心高度迅速回升到 6.2km, 此时沿径向  $107.4^{\circ}$ (图 4e)和  $119.2^{\circ}$ (图 4f)对 16:04 的体扫数据做剖面, 单体 B9 回波强度达 45dBz 的高度超过了 11km, 存在较明显的强回波墙、回波穹窿和有界弱回波区, 阳信金阳作业点观测到了降雹, 由于未能实施防雹作业, 在此后的十几分钟内, 在下游地区连续观测到冰雹, 造成了阳信金阳、信城两个街道办的鸭梨大面积受灾; 随着降雹、强降雨的出现, 单体 B9 能量得到释放, 各项雷达指标均出现下

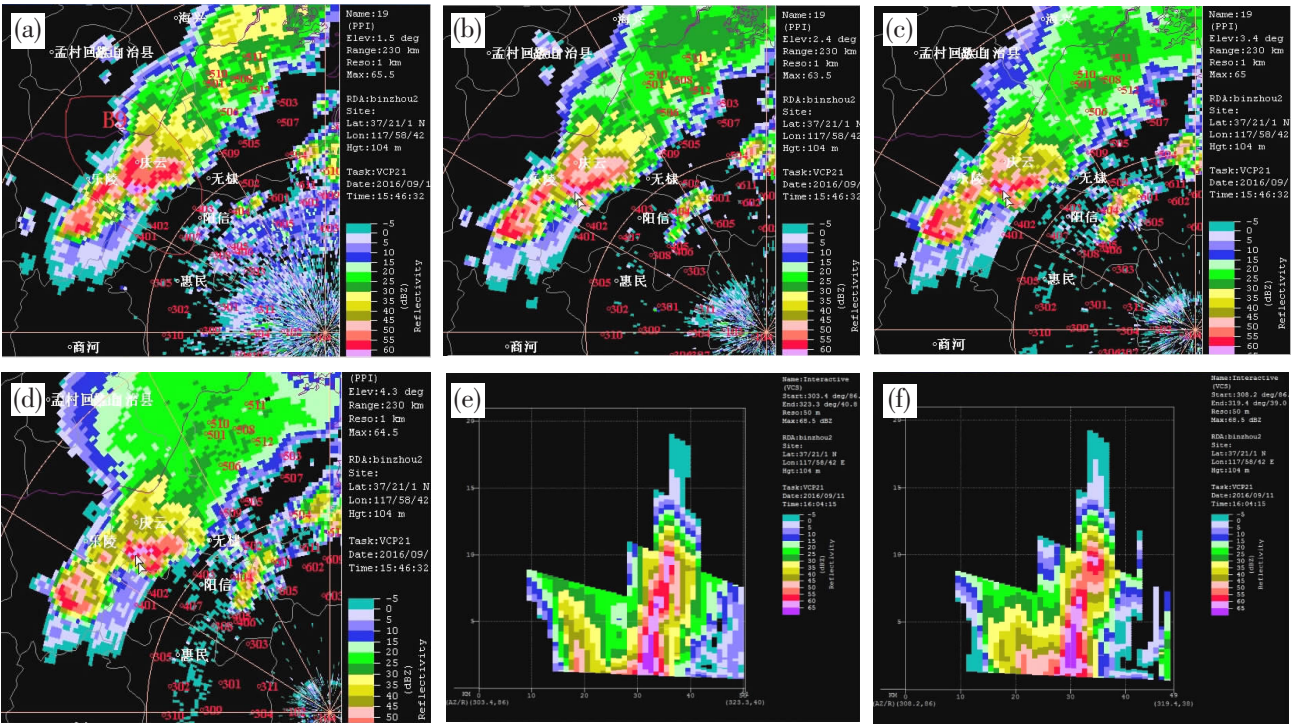


图4 对流单体 B9 不同仰角 15:46 反射率因子(a-d)和 16:04 分沿径向  $107.4^{\circ}$ (e)和  $119.2^{\circ}$ (f)剖面图

降,16:28 下游人影作业点对单体 B9 实施了第一次防雹作业,作业后进一步加速了单体 B9 的减弱,回波强度、回波顶高、VIL 值、冰雹概率、强冰雹概率迅速降至 58dBz、4.9km、18kg·m<sup>-2</sup>、20%、0%,三个体扫后单体 B9 停止编号。

### 2.3.2 单体 N1

单体 N1 于 9 月 11 日 16:04 正式编号,风暴质心高度在 5.4km,超过 -10℃ 高度,比较有利于冰雹的形成与发展;随后 7 个体扫间隔内(约 40min),回波强度、回波顶高、VIL 值、冰雹概率、强冰雹概率迅速升至 63dBz、10.2km、57kg·m<sup>-2</sup>、100%、70%,对 16:51(图 5a)、16:57(图 5b)的体扫数据做剖面,单体 N1 回波强度达 45dBz 的高度伸展到 10km,存在较明显的强回波墙、回波穹窿和弱回波区;17:03 左右,单体 N1 进入惠民县,17:16、17:18 连续两次对单体 N1 实施防雹作业,作业后风暴质心高度突降至 1.3km,17:29 对单体 N1 实施第三次防雹作业,随后回波顶高、VIL 值、风暴质心高度、冰雹概率、强冰雹

概率持续下降,分别降至 7.3km、42kg·m<sup>-2</sup>、0.3km、80%、30%,连续三次防雹作业后在惠民县没有观测到降雹;17:56 以后单体 N1 再次发展,各项指标逐渐恢复,对 18:02(图 5c)的体扫数据做剖面,单体 N1 回波强度达 45dBz 的高度再次伸展到 10km,同时存在较明显的强回波墙、回波穹窿和有界弱回波区,淄博高青县、桓台县相继出现冰雹、雷雨大风灾害,冰雹最大直径 20mm 左右,高青国家气象观测站极大风速 23.5m·s<sup>-1</sup>;19:00 左右,单体 N1 进入博兴县曹王镇,对 19:13(图 5d)的体扫数据做剖面,单体 N1 回波强度达 45dBz 的高度伸展到 10km,但是强回波区域呈现倾斜结构,存在回波穹窿和弱回波区,博兴县曹王镇出现短时强降水,1 小时降水量达 45.5mm,随着短时强降雨的出现,单体 N1 的能量得以释放,各项雷达产品指标迅速下降,回波强度、回波顶高、VIL 值、冰雹概率、强冰雹概率、最大回波高度分别降至 54dBz、4.7km、12kg·m<sup>-2</sup>、0%、0%、0.7km,此后单体 N1 继续减弱,直至停止编号。

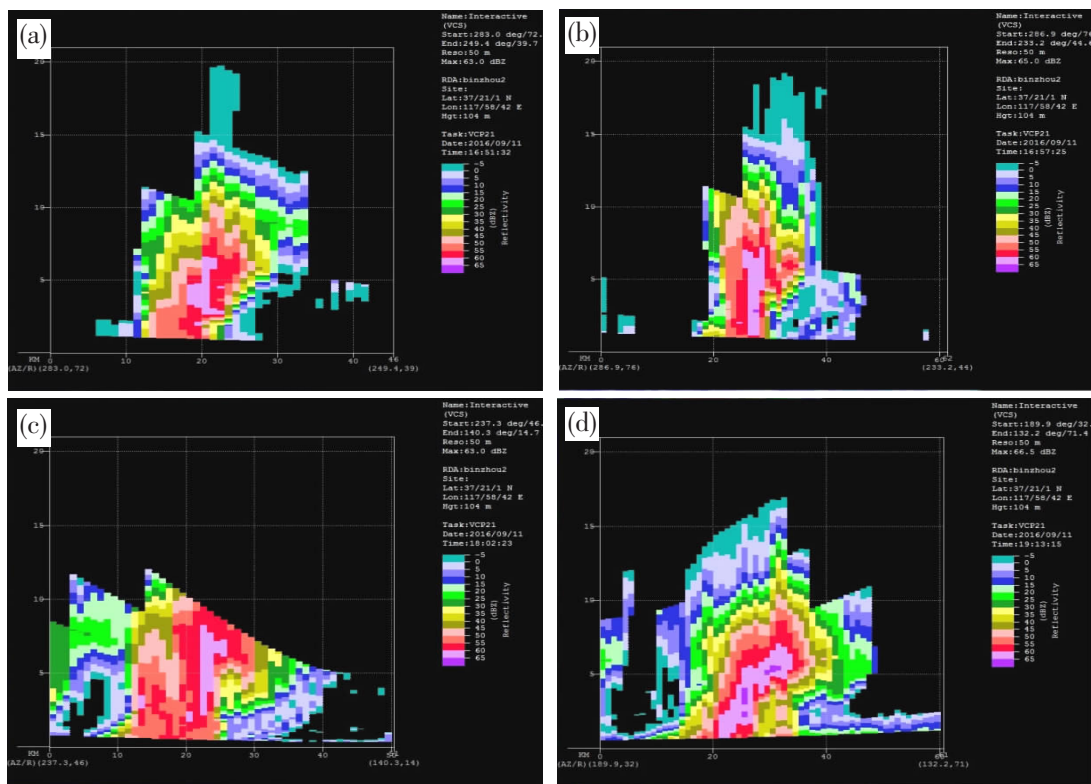


图 5 对流单体 N1 不同时刻的雷达反射率因子图

## 3 结论

(1) 鲁西北地区 2016 年 9 月 11 日强对流天气属于“高空低槽型”,是有利于强对流天气发生的环

流形势,物理量指标反映大气具有强的对流不稳定,对强对流天气的发生具有较好的指示意义。

(2) 从对流风暴参数图分析,对流单体 B9、N1 在生成后迅速发展,仅在 4-7 个体扫内,VIL 值最大

跃增量分别为  $27\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $16\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 非常有利于冰雹的产生。

(3) 两个对流单体在反射率因子图上都具有典型的冰雹结构特征, 存在较明显的强回波墙、回波穹窿、有界弱回波区。

(4) 通过两个对流单体的防雹作业效果分析, 实施防雹作业后, 对流单体回波顶高、VIL 值、风暴质心高度、冰雹概率、强冰雹概率等指标持续下降, 进一步证实了开展防雹作业可有效地减小降雹灾害。

#### 参考文献:

- [1] 王娟, 王军君, 王婷, 等. 桂林初春一次冰雹天气过程分析[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(1): 29–33.
- [2] 钱卓蕾, 杨祥珠, 钱月萍, 等. 一次低涡型冰雹天气的环境条件和中尺度特征分析 [J]. 气象研究与应用, 2019, 40(2): 16–20+85.
- [3] 汤兴芝, 黄兴友. 冰雹云的多普勒天气雷达识别参量及其预警作用[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(3): 261–265.
- [4] 李湘, 张腾飞, 胡娟, 等. 云南冰雹灾害的多普勒雷达特征统计及预警指标[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 88–98.
- [5] 张磊, 张继韞. 一次局地强冰雹的多普勒雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(4): 26–30.
- [6] 欧坚莲, 黄帆, 欧欣格, 等. 梧州市强对流天气潜势预报探讨[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(4): 14–17.
- [7] 周金莲, 钟敏, 吴翠红, 等. CINRAD/SA 类强冰雹识别算法的应用检验[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 373–378.
- [8] 王啸华, 曹舒娅, 王金鑫, 等. 一次秋季强降水超级单体风暴过程分析[J]. 气象科学, 2012, 32.
- [9] 唐佐阳, 吕巍伟, 吕校华, 等. 衡邵盆地 7–8 月对流云特征与人工增雨作业效果分析 [J]. 气象研究与应用, 2018, 39(1): 51–54+69.
- [10] 王庆, 樊明月, 张洪生. 一次防雹作业过程的效果分析 [J]. 海洋气象学报, 2018, 38(2): 96–102.
- [11] 宁瑞斌, 纪凡华, 于金源, 等. 2014 年 9 月 14 日聊城人工增雨效果分析[J]. 山东气象, 2016, 36(145): 18–22.
- [12] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 159–160.

## Radar identification anlysis of a severe autumn convective weather in Northwest Shandong

Liu Zhaowu<sup>1</sup>, Hao Maosheng<sup>1</sup>, Gong Tianli<sup>2</sup>

(1. Binzhou Municipal Meteorological Service, Binzhou Shandong 256612;

2. Weather Modification Office of Shandong Provincial People's Government, Jinan Shandong )

**Abstract:** Based on the SA radar detection and high-altitude sounding data, combined with hail suppression data and disaster information, two convective cells during the severe convective weather in northwest Shandong on September 11<sup>th</sup>, 2016 were recognized and analyzed. The results showed that the vertically integrated liquid water (VIL) of 4 to 7 scanning volumes (about 25–45 minutes) increased by  $27\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $16\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , up to  $64\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $57\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively. On the reflectivity factor map, there are typical characteristics of hail echo: which are obvious strong echo wall, echo vault and bounded weak echo area. After the implementation of hail suppression operation, the echo peak height, VIL, storm center of mass height, hail probability, hail probability and other indexes of convection cell continued to decrease, which further proved that our operation could effectively reduce the hail disaster.

**Key Words:** strong convective events in Autumn; radar echo recognition; hail suppression effect