

张婷婷,王培涛,王凤娇.一次长寿命超级单体风暴雷达回波特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(1):98-103.
Zhang Tingting, Wang Peitao, Wang Fengjiao. Analysis of radar echo characteristics of a long-life super monomer storm[J].Journal of Marine Meteorology,2017,37(1):98-103. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.011. (in Chinese)

一次长寿命超级单体风暴雷达回波特征分析

张婷婷,王培涛,王凤娇
(滨州市气象台,山东 滨州 256600)

摘要: 利用常规气象观测资料、章丘站探空资料及滨州、济南新一代 SA 天气雷达探测资料,对 2016 年 6 月 14 日发生在山东中部地区一次强降雹天气过程进行分析。结果表明:雷暴发生前大气不稳定能量的明显增加,较强垂直风切变是有利于强对流天气发生的环境条件;长寿命超级单体沿两山之间的谷地运动,地形对雹体发生、发展起到了抬升和维持作用,对单体的移动起到了导向作用;雷暴发生前的垂直累积液态水含量(VIL)跃增对冰雹粒子的形成和增长十分有利;超长的三体散射(TBSS)、深厚而持久的中气旋、高悬的强反射率中心、有界弱回波区以及风暴顶强烈辐散都是大冰雹发生的显著特征。

关键词: 大冰雹;地形作用;三体散射;中气旋;有界弱回波区

中图分类号: P406 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0098-06

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.011

Analysis of radar echo characteristics of a long-life super monomer storm

ZHANG Tingting, WANG Peitao, WANG Fengjiao
(Binzhou Meteorological Observatory, Binzhou 256600, China)

Abstract In this paper, a sever hail event happened in central Shandong province on June 14, 2016 was analyzed based on the conventional observations, sounding data of Zhangqiu station and new generation SA weather radar detections in Binzhou and Jinan. The results show that: The significant increase of atmospheric unstable energy and the strong vertical wind shear are the favorable environmental conditions for generation of strong convection. The long-lived hail monomer moved along the valley between two mountains, which played an important role in air mass uplifting, monomer sustaining, and monomer track leading. The VIL (vertically integrated liquid) leap before the occurrence of thunderstorm is favorable to the formation and growth of hail particles. The long TBSS (three body scatter signature), deep and persistent mesocyclone, overhanging strong reflectivity center, bounded weak echo regions and strong divergence at the top of the storm are significant characteristics of this strong hail event.

Key words large hail; terrain effect; three-body scattering; mesocyclone; bounded weak echo region

引言

大冰雹是指降落到地面时直径 ≥ 20 mm的冰雹。长期以来,国内外学者对于冰雹微物理过程及

预报预警做了大量研究工作。1970年,Donaldson^[1]首次利用多普勒天气雷达观测到超级单体的“龙卷气旋”,也是目前广泛使用的所谓“中气旋”;1992年,Johns等^[2]研究认为产生冰雹,尤其是强冰雹,

收稿日期:2016-07-25;修订日期:2017-03-09

基金项目:山东省气象局科研项目(2014sdqxm19);山东省预报员专项(sdyby2012-16,sdyby2016-15)

作者简介:张婷婷(1990—),女,本科,助理工程师,主要从事中短期天气预报和雷达应用方面的研究,bxzhangtingting@qq.com。

要求对流风暴内部具有较强且持续时间相对长的上升气流,因而较大的对流有效位能和相对强的深层垂直风切变是有利于强冰雹产生的重要环境条件;俞小鼎等^[3]对一次伴有强烈龙卷的强降水超级单体风暴进行了研究;郑媛媛等^[4]对安徽一次典型超级单体风暴结构和演变进行了仔细分析;刁秀广等^[5]对山东一次长寿命风暴的回波和中气旋产品特征与流场结构进行了分析;朱敏华等^[6]、廖玉芳等^[7]对我国冰雹的三体散射长钉进行了统计和分析;李清森^[8]分析大量观测资料认为,山区多是风暴的“源地”,在一定条件下风暴极易形成或者加强;余志敏^[9]研究指出,风暴经常有“绕山沿河”运动的特点,或有由山区移向平原地区的特点。

2016年6月14日下午到夜间,鲁中山区北部出现了大范围的冰雹、雷暴大风、短时强降水等强对流天气。其中章丘市观测到了最大直径20 mm的冰雹;淄博淄川观测站17:37出现了最大直径7 mm的冰雹,瞬时极大风速达到 $21.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;淄博周村商家镇出现最大直径20~30 mm的冰雹。该文利用常规气象观测资料、章丘站探空资料及滨州、济南新一代SA雷达探测资料,对这次罕见的大范围的降雹天气过程进行了详细分析,试图揭示本次强降雹超级单体的结构特征及其发生、发展演变的环境背景条件,以提高大冰雹的预警能力。

1 天气背景

此次强降雹天气过程是在高空冷涡和地面气旋的共同作用下产生的。前期,东北冷涡始终位于黑龙江地区维持少动,冷涡后部向蒙古国一带伸出横槽,13日白天横槽南压并逐渐加强为闭合冷涡,受此影响,13日傍晚到夜间山东中西部大部分地区出现强对流天气,局地还出现暴雨。该阶段的降水增强了近地面及低层湿度,为14日的强对流天气的发生提供了充足的水汽条件。分析14日08时的高空图(图1)可见,冷涡移至华北中部地区,山东处于涡前动力上升区,另外环绕鲁中、半岛、渤海湾一带,500 hPa、700 hPa及850 hPa都有明显的风场辐合切变,表明影响天气系统深厚。14时前后,地面气旋南压到黄河中下游,山东大部分地区处于低压倒槽中。14日下午到夜间是横槽转竖的关键时段,触发了不稳定能量,致使冰雹等强对流天气发生。

2 物理量诊断分析

由14日08时章丘探空资料可知,K指数为25

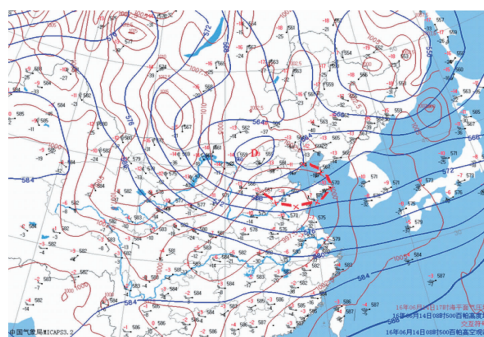


图1 2016年6月14日08时500 hPa环流形势场及17时海平面气压场(蓝色实线为500 hPa等高线,褐色实线为海平面等压线,红色断点线为700 hPa风场辐合区,D处为500 hPa冷涡中心)

Fig.1 The 500 hPa height field at 08:00 BST and the sea-level pressure field at 17:00 BST 14 June 2016 (blue solid line represents 500 hPa contour line, brown solid line represents the sea level isobars, red breakpoint line represents the 700 hPa wind field convergence area, "D" represents the cold vortex center at 500 hPa)

$^{\circ}\text{C}$,SI指数为 0°C ,CAPE为 $163 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,大气层结的不稳定性并不明显。为了更准确的判定当时的对流潜势,使用雷暴发生前(14日12时)章丘的地面最高温度(26°C)和露点(20°C)对其进行订正,得到了订正后的探空分析图(图略)。CAPE值增加到 $1384 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,相当于订正前的8.5倍,指示午后大气层结是极其不稳定的。

雷暴中冰雹增长需在 0°C 层以上,其中,大冰雹增长区往往达到 -20°C 层附近或者更高^[10-11]。14日08时对流发生之前,章丘附近的干球温度 -20°C 层高度为7.1 km、干球温度 0°C 层(DBZ)高度为4.1 km,而实际上冰雹融化层的高度更接近于湿球温度 0°C 层(WBZ)高度^[12]。根据俞小鼎^[12]的研究,当对流层大气整层相对湿度近乎饱和时,DBZ和WBZ高度几乎是一样的,但当对流层大气尤其是对流中层或中下层存在明显干层时,WBZ高度明显低于DBZ高度。从T-logP图上可以看出,中低层湿度相对较小,因此判断WBZ的高度低于4.1 km。按照俞小鼎^[12]给出的T-logP图确定WBZ高度的方法估测WBZ高度约为3.6 km,比DBZ高度低了0.5 km。可见,本次过程冰雹融化层高度较低,这可使大冰雹顺利降落到地面。

另外,从济南雷达站的风廓线资料看,风暴产生前(14时)0~5 km的风速垂直切变达到 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较强的垂直风切变与上升气流之间的相互作用能够产生附加的抬升作用,使得风暴进一步加强与

维持。

3 雷达回波特征分析

3.1 超级单体移动特征

超级单体 R0 移动路径如图 2 所示,14 日 15:15 在济南雷达站东部监测到有对流单体开始发展,迅速加强并编号为 R0,19:58 结束编号,持续时间为 4 h 45 min,平均移速在 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。R0 生成于济南雷达站东部,随后东偏北方向移动,穿越黄河后,单体强度迅速增强,并折向东南移动,进入章丘市。章丘位于山谷之中,南北两侧均有小型山脉,而单体 R0 恰好穿过两山之间,继续东移至淄川地区,淄川和青州之间山脉相隔,山脉之间有狭窄山谷,单体沿狭窄山谷东移,移出山脉后,在青州东南部开始分裂减弱,最终于潍坊北消失。整体来看,超级单体 R0 基本沿两山之间的谷地移动,这种地形即对单体的发生和发展起到了抬升和维持作用,又对单体的移动起到了导向作用。根据所收集的资料来看,超级单体 R0 造成多处降雹,章丘、淄博南部多地落下犹如乒乓球大小的冰雹。

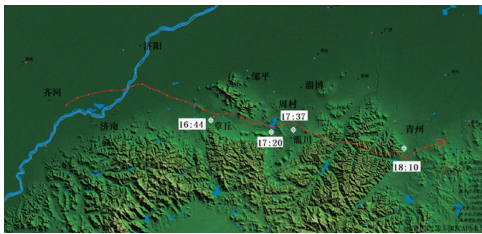


图 2 鲁中山区北部地形及强降雹单体移动路径(白色方块表示造成灾情的大冰雹降落点)

Fig.2 Topography of the northern part of Central Mountain Area of Shandong (shaded) and the track (red) of hail monomer (white box shows the position and timing of disastrous large hail events)

3.2 垂直累积液态水含量特征

经过四个体扫后,R0 移至黄河附近,中心强度达到 60 dBZ,VIL 值也在一个体扫内由 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 跃增到 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,随后一个体扫内,继续增强到 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 3),VIL 的跃增意味着云体内部大的粒子增加或粒子浓度的增加,对冰雹粒子的形成和增长十分有利。与此同时,对应单体回波顶来看,也由 7.5 km 增长到 11 km 以上,都表明强回波区的高度有显著增厚、增高,刁秀广等^[13]研究认为降雹单体在成熟前期会伴有明显的 VIL 跃增现象。此后持续到 18:24,VIL 中心值都维持在 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。另外,从 $\text{VIL} > 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $\text{VIL} > 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的

面积变化情况来看,也反映出了强雷暴水平尺度的变化特征。雹体成熟阶段,强雷暴的水平尺度仍有比较显著的变化,出现了三次较明显的增长过程,影响范围更广。

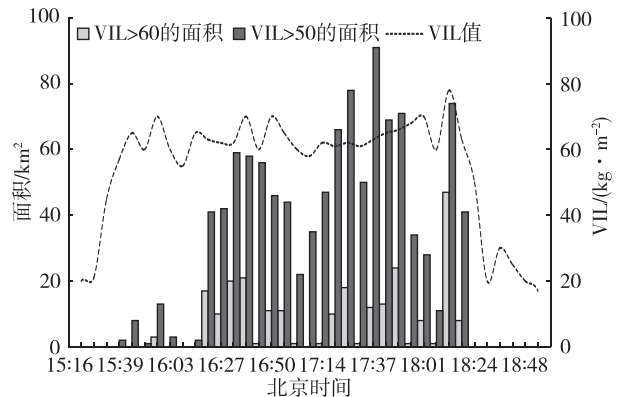


图 3 超级单体风暴中心的 VIL 值与 $\text{VIL} > 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $\text{VIL} > 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的面积演变情况

Fig.3 The change curve of VIL of the supercell storm center (dashed line), and the area variations of regions where $\text{VIL} > 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (black bars) and $\text{VIL} > 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (gray bars)

3.3 风暴参数及中气旋参数演变特征

图 4a 为风暴参数演变,包括最大反射率因子(DBZM)及其所在高度(HT)、单体顶高(TOP)和基于单体的累积液态水含量(C-VIL)。由图可知,DBZM 大致在 45~70 dBZ 之间变化,强盛阶段 DBZM 维持在 65~72 dBZ 左右,但幅度变化不大。C-VIL 在风暴初生阶段和消亡阶段幅度变化较大,其中在 15:28—15:45 时段的两个体扫内,C-VIL 由 $22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,表明单体内部冰相大粒子的迅速增长;18:13—18:30 的两个体扫内,C-VIL 由 $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 减少至 $19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,表明单体内部冰相粒子的迅速减少,雹体强度减弱(单体距离雷达中心 70 km 之外,不存在静锥区对 C-VIL 值的低估影响),其他时段维持在 $55 \sim 75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。风雹发展过程中, TOP 和 HT 变化幅度较大,初生阶段 TOP 在 6~8 km 左右,15:39 风暴 TOP 迅速抬高至 11.2 km,但 HT 维持在 5 km 以下,表明风暴发展强烈且强回波的高度较低;16:09—16:21, TOP 稳定维持在 9 km 左右,风暴发展高度一般,HT 由 2.6 km 迅速增至 9 km,随后在邹平地区出现降雹;后续 TOP 分别在 16:32—16:38, 16:44—17:02, 17:08—17:25 三个时段迅速增至 12 km 以上,第一次跃增时,HT 降至 2.4 km,后两次跃增,HT 发展到 6.5~8.5 km,分别在章丘中北部和淄博周村区出现降雹。

以上表明,HT 对于冰雹的预报更具指示意义。

产生冰雹需要强盛的上升运动,因此,风暴底的辐合和风暴顶的辐散必不可少的。在速度产品中看到了明显的中气旋结构(图略)。16:14,2.4°仰角上 R0 单体出现了明显的速度对,并且负速度出现了速度模糊,利用退模糊计算出正负速度差达到了 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但是其发展厚度不高。16:26 中气旋的厚度逐渐增加,风暴底的辐合和风暴顶的辐散也更加明显,2.4°~4.0°仰角上存在速度模糊,订正后正负速度差分别达到 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;6.0°仰角上,风暴 R0 质心位于两个负速度强中心之间,9.9°仰角辐散场速度差达到 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,远远超出了 Witt 等^[14]给出的风暴顶正负速度差与地面降雹尺寸之间的经验关系中大冰雹产生的阈值范围($38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

图 4b 为中气旋参数的演变(其中 16:09、16:15 和 17:08 三个时刻为三维相关切变),包括底高(M-BASE)、顶高(M-TOP)、最强切变(M-SHEAR)所在高度(HGT)。由图可知,M-TOP 变化幅度较小,基本维持在 6.5~8 km,只在 16:44 前出现了一次突降现象,同时 HGT 也随之下降,16:45 位于章丘中北部观测到直径 2 cm 左右的冰雹,这与方翀等^[15]、

晋勤等^[16]研究的冰雹出现时在中气旋特征上的表现一致。M-BASE 在 1~6.5 km 之间变化,17:25 和 18:07 出现了两次显著抬升,分别抬升了 3 km 和 5 km,HGT 逼近 M-BASE,此后淄博周村文昌湖区和青州部分乡镇出现降雹。M-BASE 的突然升高及 HGT 逼近底高时,表明中气旋明显加强^[15]。17:31—18:01 时段内出现了连续的“高顶低底”的中气旋结构,厚度很大,平均在 5.8 km 左右,最大厚度为 6.3 km,出现在 17:55,远远超出了朱君鉴等^[17]利用济南和滨州的 15 次中气旋过程研究得到的产生冰雹的中气旋厚度指标值 2.5 km,HGT 大多位于中气旋结构的中上部;18:07—18:13 时段内,M-BASE 迅速抬升后,呈现“高顶高底”,表明雷暴发展剧烈,此时 C-VIL 也出现了跃增现象,一个体扫内由 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加至 $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,达到过程最强。M-SHEAR 是风暴内部最大正负速度绝对值的和除以两点之间的距离,它反映了风暴内部的螺旋扰动情况,是产生上升气流的重要动力条件。其中,17:37 M-SHEAR 突增到 $34 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,此时淄川气象站及周边部分乡镇出现了最大直径 30 mm 的冰雹,降雹时间持续 10 min 左右。

中气旋维持时间长(1.5 h 以上)的超级单体必

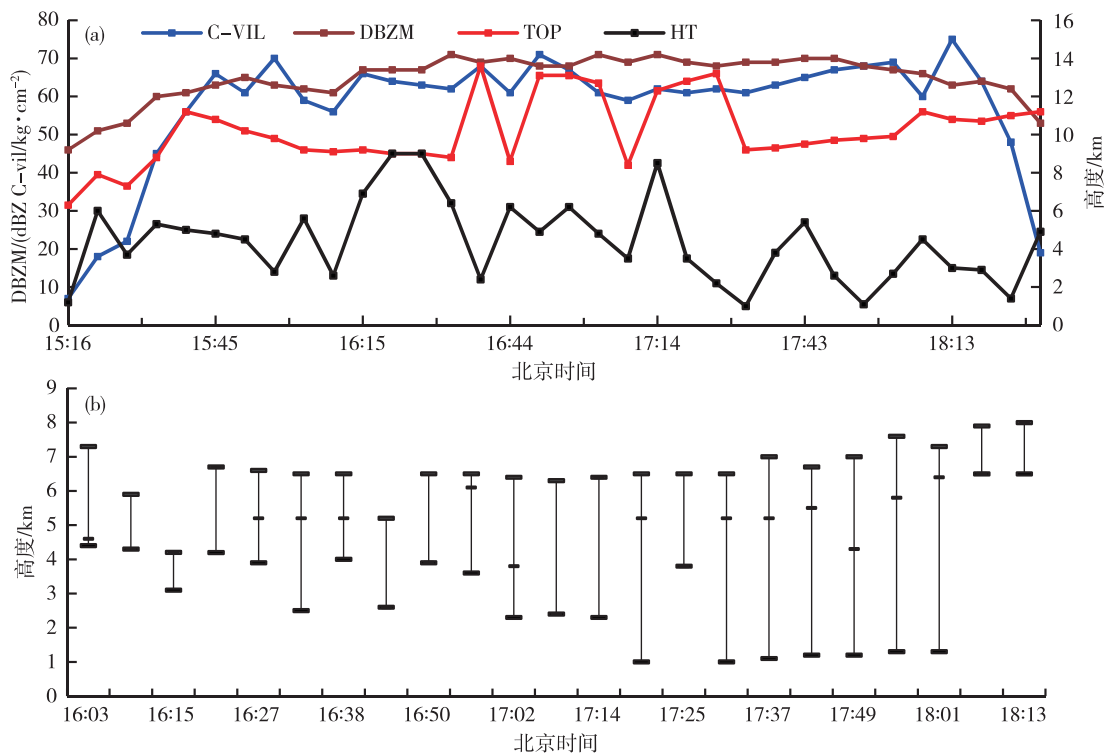


图 4 风暴参数及中气旋参数演变情况(a. 风暴参数时序变化,b. 中气旋特性,竖线为中气旋底高和顶高之间的连线,上中下短横线分别为中气旋顶高、最强风切变高度、中气旋底高)

Fig.4 The variations of storm parameters (a) and mesocyclone parameters (b; The upper and bottom strigulas show heights of top and bottom parts of the mesocyclone, and the middle strigula shows the layer with the strongest wind shear)

定产生冰雹^[17]。超级单体 R0 伴有的中气旋结构维持时间达 20 个体扫(2 h)左右(不包括三维相关切变),深厚的强上升运动及其较长时间的存在是大冰雹产生的充分条件。

3.4 三体散射及回波悬垂特征

16:14—17:43 雷达图上,可以看到明显的三体散射(TBSS)结构特征。其中,3.4°仰角和 4.3°仰角上的 TBSS 存在时间最长且最为明显,部分时段 2.4°仰角和 6.0°仰角的 TBSS 也十分明显。各个层次的 TBSS 都出现在强反射率中心的延伸方向上,强核心的反射率在 0.5°~6.0°仰角上都超过 65 dBZ,对应高度在 2.7~9.3 km,说明了大冰雹的所处高度和大致位置,也反映了单体垂直方向发展深厚。

根据廖玉芳等^[7]在强雹暴的雷达三体散射统计和个例分析中对 TBSS 长度的计算方法,大致计算了不同时刻、不同仰角的 TBSS 长度(表 1),并进行了对比分析。

16:14 第一次出现了三体散射,3.4°和 4.3°两个仰角最为明显。16:32 三体散射长钉明显变长,4.3°仰角上达到 66 km 以上(图 5a),6.0°仰角上也达到 43 km,表明大冰雹的尺寸和垂直密度分布有明显的增加。研究表明,冰雹云强度越强,三体散射长度越长,目前国内 S 波段雷达观测到的最长 TBSS 为 70 km^[9](为 2006 年 4 月 9 日永州雷达监测到的 6.0°仰角上),说明此时冰雹云已发展非常强烈。而随后两个个体扫中,长钉长度减弱但宽度明显增加,表明大冰雹区在雷达方位上的范围明显增加。

表 1 不同时刻不同仰角的 TBSS 长度

Table 1 The TBSS length with different elevation angles at different times

时间	TBSS 长度/km			
	2.4°仰角	3.4°仰角	4.3°仰角	6.0°仰角
16:14	13.6	26.2	18.0	—
16:20	25.8	25.5	29.2	34.8
16:26	29.2	25.5	30.3	27.0
16:32	26.7	35.5	66.1	43.2
16:38	34.1	40.8	44.1	27.6
16:44	36.2	50.0	52.5	26.0
16:50	29.4	40.7	29.7	—
16:55	—	33.4	23.7	—
17:01	31.5	47.2	35.0	—
17:07	34.2	35.6	35.7	—
17:13	—	32.9	55.3	26.5
17:19	—	34.5	32.5	55.7
17:25	—	35.5	35.0	29.1
17:31	32.1	33.7	28.8	—
17:37	35.6	47.6	45.8	—
17:43	42.9	47.3	45.3	—

TBSS 存在的持续时间也是强冰雹预警的关键因素之一。在廖玉芳等^[7]的研究中,对 20 个 TBSS 个例进行统计,持续时间在 30~60 min 的情况居多,只有 1/5 的 TBSS 持续时间超过 90 min,而此次强降雹过程中,TBSS 出现的初始时间是 16:14,结束时间是 17:43,连续存在时间长达 16 个体扫(1.6 h)。其中 3.4°和 4.3°仰角上 TBSS 始终存在,而 6.0°和 2.4°仰角部分时段未出现明显的 TBSS;1.5°仰角以下,由于其他回波的遮挡或者高度太低而难以识

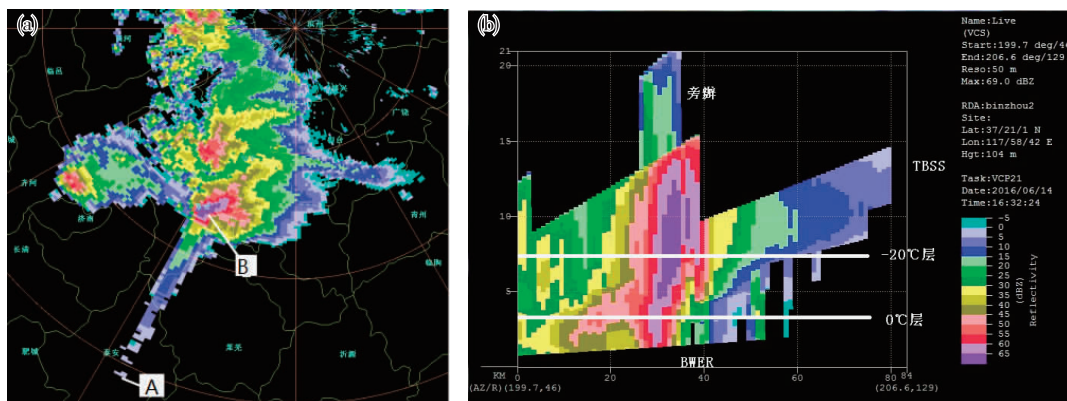


图 5 16:32 三体散射雷达特征(a.4.3°仰角的基本反射率产品(A 处为长钉顶端,距离雷达 155 km,B 处为大冰雹区域,距离雷达 82 km 左右,高度为 6.8 km 左右),b.沿三体散射的反射率剖面图)

Fig.5 Three-body scattering of radar at 16:32 BST (a.base reflectivity with 4.3° elevation angle (“A” indicates the spike top, which is about 155 km away from the radar; “B” indicates the large hail region, which is about 82 km away from the radar and at the height of 6.8 km), b.the reflectivity profile along the three-body scattering)

别,而到高层 9.0° 仰角上,基本观察不到TBSS特征,表明高层的上升气流减弱无法支撑大冰雹的存在。

异常强盛的上升气流最重要的特征就是比初生阶段具有更高更强的风暴反射率中心,具体地讲,如果 -20°C 等温线对应的高度之上有超过50 dBZ的强反射率中心,则有可能产生大冰雹^[18]。Witt等^[14]指出相应反射率因子核心的值越大,相对高度越高,产生大冰雹的可能性和严重程度就越大。因此,在相同的环境下,上升气流越强,高悬的反射率因子中心的强度就越强,伸展高度也越高,大冰雹发生的概率就越大。

图5b为16:32分沿回波强中心至TBSS方向的反射率垂直剖面图。可以看到非常显著的TBSS和旁瓣回波,这是大冰雹的显著特征,同时可以看到,65 dBZ以上的强回波高度接近12 km,远远的高于 -30°C 层(8.5 km)高度,其下5 km存在明显的有界弱回波区(BWER),表明风暴内部具有深厚而强烈的上升区,悬挂的冰雹在降落之前具有一个长时间维持的大范围的增长区。

4 结论

1) 订正的雷暴发生前大气不稳定能量明显增加,同时较强的垂直风切变利于强对流天气的发生;湿球温度 0°C 层高度较低,显著降低了冰雹融化层高度;长寿命降雹单体基本沿两山之间的谷地移动,这种地形对于单体的发生、发展起到了抬升和维持作用,同时对单体的移动起到了导向作用。

2) 降雹发生前伴有明显的VIL跃增现象,雹体成熟阶段,VIL强度变化不大,但水平尺度仍有比较显著的变化;三体散射是此次降雹过程的最明显特征之一,TBSS持续时间较长,TBSS长度也较长。超长的TBSS长度及其对应的VIL强度可以预示冰雹的尺寸和分布密度较大。

3) 此次过程中深厚而持久的中气旋结构、高悬的强反射率中心、有界弱回波区以及速度场上风暴顶强烈辐散是大冰雹发生的显著中尺度特征。

参考文献:

- [1] Donaldson R J. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1970, 9(4): 661-670.
- [2] Johns R H, Doswell C A I. Severe local storms forecasting[J]. *Weather and Forecasting*, 1992, 7(4): 588-612.
- [3] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风雹研究[J]. *大气科学*, 2008, 32(3): 508-522.
- [4] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测资料分析[J]. *气象学报*, 2004, 62(3): 317-328.
- [5] 刁秀广,杨晓霞,朱君鉴,等. 一次长寿命风暴的CINRAD/SA雷达反射率及中气旋产品特征与流场结构分析[J]. *高原气象*, 2008, 27(3): 657-667.
- [6] 朱敏华,俞小鼎,夏峰,等. 强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 215-223.
- [7] 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 812-820.
- [8] 李清森. 张家口地区的风暴“源地”[J]. *高原气象*, 1987, 6(2): 237-243.
- [9] 余志敏. 强对流天气文集[M]. 北京:气象出版社, 1983: 143-149.
- [10] Nelson S P. The influence of storm flow structure on hail growth[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(8): 1965-1983.
- [11] Miller L J, Tuttle J D, Knight C A. Airflow and hail growth in a severe northern high plains supercell[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1988, 45(4): 736-736.
- [12] 俞小鼎. 关于冰雹的融化层高度[J]. *气象*, 2014, 40(6): 649-654.
- [13] 刁秀广,黄秀韶,任钟冬,等. CINRAD/SA雷达冰雹探测算法效果检验及参数本地化[J]. *气象科技*, 2007, 35(5): 727-731.
- [14] Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. *Weather and Forecasting*, 1998, 13(2): 286-303.
- [15] 方翀,郑媛媛. 新一代天气雷达中气旋产品特征值统计和个例分析[J]. *气象*, 2007, 33(11): 16-20.
- [16] 冯晋勤,汤达章,俞小鼎,等. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J]. *气象*, 2010, 36(8): 47-52.
- [17] 朱君鉴,王令,黄秀韶,等. CINRAD/SA中气旋产品与强对流天气[J]. *气象*, 2005, 31(2): 38-43.
- [18] 潘玲,赵海军,王庆华,等. 临沂地区冰雹发生规律及分级预警技术研究[C]//中国气象学会年会 s1 灾害天气监测、分析与预报. 2015.