

胡鹏,焦洋,高帆.鲁中地区一次超级单体风暴的雷达观测分析[J].海洋气象学报,2019,39(2):134-142.
HU Peng, JIAO Yang, GAO Fan. Observational case study on a supercell storm in central Shandong Province[J].Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(2): 134-142. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.014. (in Chinese)

鲁中地区一次超级单体风暴的雷达观测分析

胡鹏,焦洋,高帆

(济南市气象局,山东 济南 250102)

摘要: 利用济南、滨州和潍坊多普勒天气雷达及常规观测资料,对 2016 年 6 月 14 日下午到晚间发生在鲁中地区的超级单体回波演变和结构特征进行了分析。结果表明,该超级单体风暴产生在较大的对流有效位能和有利的风垂直切变条件下。其演变分为经典超级单体和强降水超级单体两个阶段。经典超级单体由普通单体迅速演变而来,其特征十分明显。强降水超级单体由经典超级单体风暴与其后侧下沉气流触发的普通单体风暴合并形成。合并过程造成风暴旋转强度增强,并产生类似龙卷的小尺度涡旋,导致了地面大风和大冰雹的出现。

关键词: 强降水超级单体; 风暴单体合并; 中气旋

中图分类号: P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)02-0134-09

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.014

Observational case study on a supercell storm in central Shandong Province

HU Peng, JIAO Yang, GAO Fan

(Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102, China)

Abstract The evolution and structure of a supercell, which occurred from afternoon till night on 14 June 2016 in central Shandong Province, is analyzed based on the Doppler weather radar data and conventional observation data in Jinan, Binzhou, and Weifang. The main results are as follows. The supercell storm occurred in a favorable environment of high convective available potential energy (CAPE) and strong vertical wind shear. Its evolution can be divided into two phases, the classic supercell phase and high-precipitation (HP) supercell phase. The classic supercell, with distinct features, evolved rapidly from the initial ordinary cells. The HP supercell formed through the mergers of the previous classic supercell and smaller ordinary cells originated from its rear-flank downdrafts. During the mergers, the rotation is intensified and tornado-like small-scale vortices are generated, leading to gales on the ground and large hailstones.

Key words high-precipitation supercell; storm cell merger; mesocyclone

引言

超级单体风暴是所有风暴中最为少见的一种类型,造成的危害极为严重。此类风暴可以产生龙卷、大冰雹、大风及短时强降水等灾害性天气。其

组织化程度高,发展强盛,维持时间长^[1](通常在 1~4 h,最长可达 8 h)。

20 世纪 60 年代,BROWNING and LUDLAM^[2]首先提出了超级单体(supercell)的概念,并指出了超级单体的雷达反射率因子特征,如钩状回波、回

收稿日期:2018-04-12; 修订日期:2018-10-16

基金项目:山东省气象局科研项目(SDYBY2016-02);中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-063)

作者简介:胡鹏,男,工程师,主要从事短期预报和天气雷达应用研究,hoo_peng@yeah.net。

波穹隆(弱回波区)等。20世纪70年代,随着能够观测径向速度的多普勒天气雷达逐步应用于科研, DONALDSON^[3]和 BROWN et al.^[4]观测到与钩状回波相关的强水平风切变区,并提出了“龙卷气旋”的概念,揭示出超级单体风暴强烈旋转的特性,即 FUJITA^[5]所提出的,目前广为使用的“中气旋”。LEMON and DOSWELL^[6]总结前人的研究,提出了经典龙卷超级单体的概念模型,即超级单体含有强烈旋转的、深厚持久的中气旋,这一概念模型得到雷达观测和数值模拟结果的验证,至今仍被沿用。MOLLER et al.^[7-8]将超级单体分为强降水超级单体、弱降水超级单体和经典超级单体三种类型。

近年来,随着多普勒天气雷达的布网应用,我国气象工作者也对超级单体风暴的生成原因、动力学和热力学机制以及临近预报预警进行了广泛而深入的研究。刁秀广等^[9]对济南地区的54个超级单体风暴进行统计分析研究后,指出孤立类超级单体风暴较镶嵌类超级单体风暴持续时间要长,也更容易造成极端破坏性天气,中气旋参数的差别决定了超级单体风暴结构和天气实况的不同。对强降水超级单体的研究近年来也逐渐增加,俞小鼎等^[10]对一次伴有强烈龙卷的强降水超级单体风暴的分析指出,水平涡度在入流过程中被扭转为垂直涡度,垂直涡度在上升气流拉伸作用下形成中层中气旋,标志着超级单体的诞生。王福侠等^[11]对发生在河北邢台的一次强降水超级单体的分析结果表明,该超级单体风暴是在中到强的热力不稳定和中低层强风切变环境下发展起来的;在超级单体风暴初期有2个强反射率因子中心,每个强反射率因子中心都有独立的前侧入流缺口和有界弱回波区。吴芳芳等^[12]对发生在盐城中北部地区的一次由强降水超级单体产生的大暴雨和龙卷过程进行了分析,发现风暴回波形态的演变可分为“条状—肾形—弓状”三个阶段,在这三个阶段中该风暴具有强降水(high precipitation, HP)超级单体风暴共同特征;该超级单体沿着午后形成的湿热边界层辐合线发展并维持了较长时间。

合并过程是指相邻对流单体之间实现合并从而形成一个更庞大、更复杂的单体或复合系统^[13]。单体的合并雷达观测中较为常见,但又是一种复杂的非线性过程。20世纪70年代以来,研究人员通过雷达观测和数值模拟等手段研究了合并过程造成的风暴结构和形态改变,其物理机制以及造成的灾害性天气。大量研究表明:雷暴单体的合并与

强对流天气的发展变化有着密切的关系。FINLEY et al.^[14]通过对一次强降水超级单体模拟发现:后侧下沉气流形成的阵风锋产生的单体合并到超级单体中的过程为中气旋输送了垂直涡度,从而使得中气旋在降水包裹下依然能够维持其强度。CAREY et al.^[15]的研究指出:超级单体和飑线尾部的合并很大程度上促进了正地闪的加强和龙卷的灾害程度。LEE et al.^[16]的研究表明:在1996年4月19日的一次强风暴和龙卷爆发过程中,单体合并起了重要作用。相当数量(27%~44%)的单体合并后,雷达回波强度迅速增强;54%的龙卷在单体合并前后15 min内产生。国内研究人员对单体合并也有所关注。胡雯等^[13]利用卫星资料对江淮流域夏季的对流云研究表明:对流云合并能明显影响云的发展,80%以上的对流云合并过程中,云团在合并后面积和强度都得到发展,且生命史更长。王俊等^[17]的研究发现,在合并的瞬间,两个对流系统均有所减弱。朱江山等^[18]对2008年7月23日安徽省颍上县一次龙卷风暴的研究指出:风暴单体的连续合并对风暴单体迅速增强为超级单体风暴有重要作用;风暴单体的合并和邻近风暴单体之间的相互作用与龙卷的发生在时间和位置上有着明显的相关。

2016年6月14日下午到晚间受高空冷涡影响,山东省中东部地区自西向东出现了冰雹、大风天气和短时强降水,其中淄博的淄川区和潍坊的昌乐县均观测到直径达7 cm的大冰雹;淄川区龙泉镇观测到 $36.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风;14日18—19时潍坊市东城镇出现了54.7 mm的短时强降水。本次强对流天气过程给上述地区造成了严重的灾害。此次灾害主要由超级单体风暴造成,该风暴强度高、持续时间长、影响范围大,存在由经典超级单体演变为强降水超级单体的过程等特点。已有文献^[19-20]从地形影响和中尺度特征的角度对此次过程进行了研究。本文利用济南、滨州和潍坊的3部多普勒天气雷达资料、常规观测资料对这次过程进行详细的分析。

1 天气背景

2016年6月14日08时,500 hPa图(图1)上,亚欧大陆为两槽一脊形势。阻塞高压位于贝加尔湖西北侧,其前部的偏北气流引导冷空气南下,在华北北部形成一个冷涡,冷涡中心位于 113.5°E , 41°N ,其后部伴有明显的横槽,不断旋转南下。冷涡南侧存在明显的偏西风急流,太原站观测到

40 m · s⁻¹高空风。850 hPa 上,整个华北南部地区到山东中部为一明显的温度脊,且存在较强暖平流(图略)。当冷涡的高层动力活跃区叠加于低层暖湿平流区上空时,将促使对流爆发^[21]。08 时地面图(图略)上地面冷锋位于华北北部到河套东部一带,对应 850 hPa 暖脊区域,锋前存在一个低压。

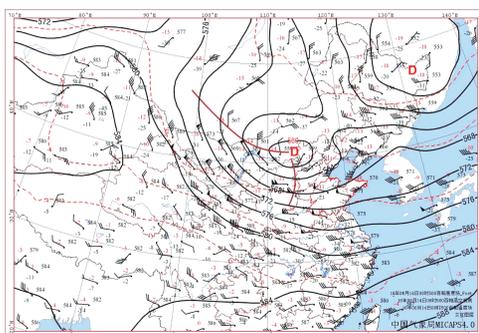


图1 2016年6月14日08时500 hPa形势场
Fig.1 Synoptic situation at 500 hPa at 08:00 BST on 14 June 2016

2 探空图综合分析

分析08时章丘站(54727)探空图(图2a),低层890 hPa以下温度露点差均为2℃,而850 hPa以上温度露点差均在10℃以上,600 hPa附近则达到了20℃。850 hPa与500 hPa之间的温差 $t_{850-500} = 27℃$ 。这种上干冷下暖湿的“干暖盖”式大气层结,

表明存在明显的对流不稳定。而且低层的逆温利于不稳定能量的累积,一旦有适当的抬升触发条件,将会出现强烈的对流天气。正是由于低层逆温的存在,使得对流抑制能量(CIN)较大,为325 J · kg⁻¹,而对流有效位能(CAPE)仅为52 J · kg⁻¹。利用当日章丘站地面观测的日最高气温和相应时刻的露点温度对探空图进行订正后,CIN为40 J · kg⁻¹,CAPE则达到1356 J · kg⁻¹。考虑到当日冷涡及横槽将继续快速东移南下,中高层气温将进一步下降,真实大气环境的对流有效位能应该大于用地面实况订正得到的数值。另外,利用探空数据计算可得湿球温度0℃层(wet blub zero, WBZ)距地面高度为3.3 km,俞小鼎^[22]指出这一WBZ高度非常有利于大冰雹降落到地面。

分析风速矢量端图(图2b)可知,0~6 km的风速矢量差约为18 m · s⁻¹,超过文献[1]中出现超级单体的下限(15 m · s⁻¹)。随着高空冷涡的移近,鲁中地区上空对流层中高层风速将继续加大,所以该数值还将继续增大。由潍坊风廓线雷达14:30的数据计算,0~6 km的风速矢量差约为22 m · s⁻¹,表明此时动力条件更加有利于超级单体风暴的出现。低层的风暴入流层高度上,存在垂直风切变随高度强烈的顺时针旋转,这种垂直切变形势下,易在中层产生气旋式旋转的中气旋^[23]。

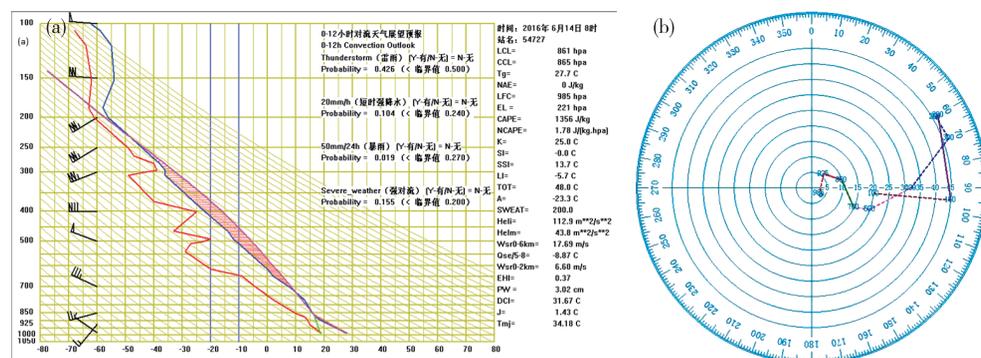


图2 2016年6月14日08时章丘站(54727)探空(a;利用14时地面实况订正后)和风速矢量端图(b)
Fig.2 The t - $\ln p$ diagram (a; corrected by using 14:00 surface observation) and wind velocity hodograph (b) at 08:00 BST on 14 June 2016 at Zhangqiu Station (54727)

3 多普勒天气雷达产品分析

3.1 风暴的移动和演变

3.1.1 经典超级单体阶段

14日15:16在济南雷达站东侧附近有两个风暴单体触发生成(图3a中N0和J0),风暴强中心高

度约为4 km,之后这两个风暴逐渐向东北方向移动。2个体扫以后,J0并入到N0中,N0的回波强度明显增强,5 km左右高度反射率因子在60 dBz以上(图3b)。16时前后,风暴开始转向东南方向(承载层平均风向的右前方)移动。16:14,风暴最大反射率因子为63 dBz,开始出现超级单体风暴的结构特

征,如钩状回波,弱回波区等(图3c)。在相应的径向速度图(图3d)中存在明显的速度对,中气旋产品(M)显示其高度为4~6 km,此时中层中气旋开始生成。16:26,最大反射率因子增强至66 dBz,6.0°仰角出现典型的有界弱回波区(bounded weak echo region, BWER)(图3e);在9.9°仰角上,存在明显的三体散射和旁瓣回波,表明此时已经有大冰雹出现(图略)。16:31—17:00,超级单体风暴继续发展加

强,风暴最大反射率因子达到并维持在68 dBz以上,最强时为71 dBz,同时中气旋也始终维持(图3g-j);强反射率因子核迅速下降到近地面层(图略),表明此时冰雹开始降落到地面,17时前后章丘地面观测站观测到了冰雹。在此期间,超级单体风暴的结构特征如钩状回波、有界弱回波区、回波悬垂等均十分清晰,指示大冰雹的旁瓣回波也始终维持。

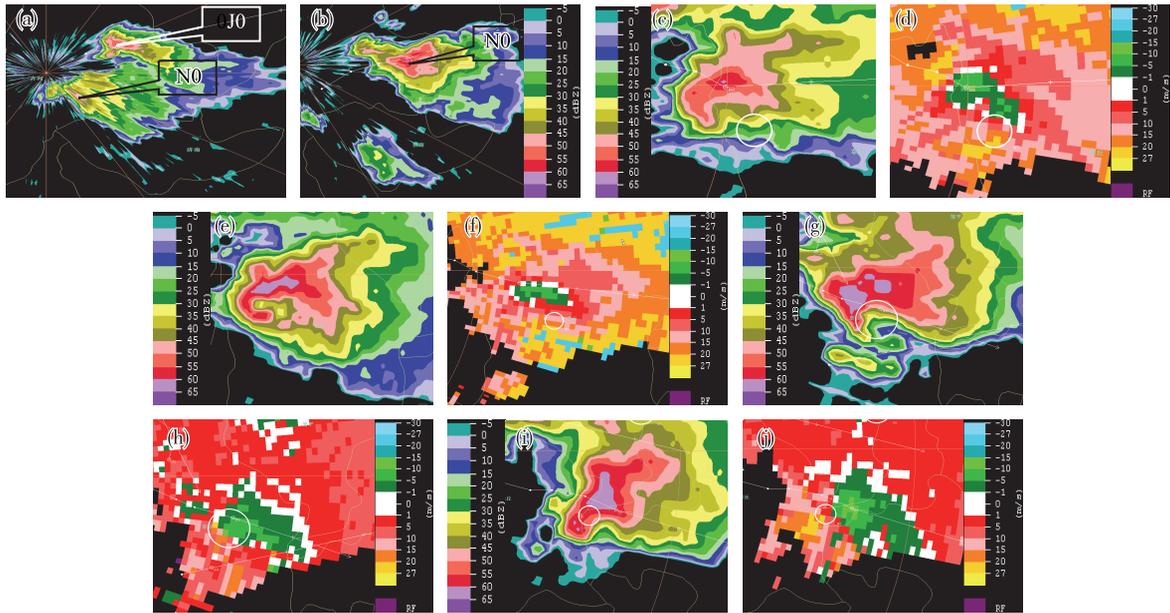


图3 2016年6月14日济南雷达不同仰角反射率因子(a. 15:16, 14.6°; b. 15:33, 14.6°; c. 16:14, 4.3°; e. 16:26, 6.0°; g. 16:43, 1.5°; i. 17:01, 1.5°)和径向速度(d. 16:14, 4.3°; f. 16:26, 4.3°; h. 16:43, 1.5°; j. 17:01, 1.5°)演变

Fig.3 Evolution of radar reflectivity factor at different elevation angle (a. 15:16 BST, 14.6°; b. 15:33 BST, 14.6°; c. 16:14 BST, 4.3°; e. 16:26 BST, 6.0°; g. 16:43 BST, 1.5°; i. 17:01 BST, 1.5°) and radial velocity (d. 16:14 BST, 4.3°; f. 16:26 BST, 4.3°; h. 16:43 BST, 1.5°; j. 17:01 BST, 1.5°) on 14 June 2016 from Jinan CINRAD-SA radar

3.1.2 强降水超级单体阶段

强降水超级单体风暴的重要特征是:强降水超级单体的空间范围通常要大于经典超级单体;中气旋为降水回波包裹,通常位于风暴的右前侧;大范围降水出现在风暴的右后侧;强降水超级单体通常伴有冰雹和灾害性大风,且影响范围较经典超级单体更大;强降水超级单体有时呈现出多单体风暴的特征,有多个强反射率因子中心、多个中气旋和多个有界弱回波区;强降水超级单体回波形态复杂多变,包括肾形、螺旋形、逗点形、“S”形和特别大的钩状;低层入流通常位于风暴移动方向的前侧;龙卷可能出现在中气旋中,也有可能出现在阵风锋的前沿^[10]。

此例超级单体风暴向东南移动进入淄博市后,从潍坊雷达基本反射率因子产品可以看到,随着单体的并入,超级单体的钩状回波范围逐渐增大,强度增强,最终演变为强降水超级单体。分析风暴跟

踪信息(storm tracking information, STI)产品,17:18在超级单体的后侧下沉气流阵风锋触发的普通单体W2发展较为旺盛,其西南侧单体E3刚刚生成(图4a),1个体扫之后(17:24)单体W2移动并入超级单体, E3也发展得更加旺盛(图4c)。MARKOWSKI^[24]指出,与钩状回波相连的水平风切变区表明后侧下沉气流阵风锋的存在。此例基本反射率因子产品中,风暴新生的区域位于钩状回波的西南侧,对应平均径向速度产品中明显的负速度区(图4b、d、f、h、j、l,部分区域为距离折叠所掩盖),故可认为风暴由后侧下沉气流阵风锋触发。17:36—17:47, E3也逐渐并入超级单体,使其范围进一步增大,入流缺口位于风暴的右前侧,第三个普通单体风暴Q4形成(图4e、g、i)。17:59单体Q4并入超级单体(图4k)。在上述时段中,最大反射率因子的强度始终维持在70 dBz以上,出现了直径

7 cm的大冰雹。另外,分析淄博市的萌水、黑旺、淄博师专三个自动气象观测站 17—18 时逐 10 min 的

降水量(图 5),在风暴影响时 10 min 雨量均在 20 mm 以上,这表明风暴与短时强降水相伴随。

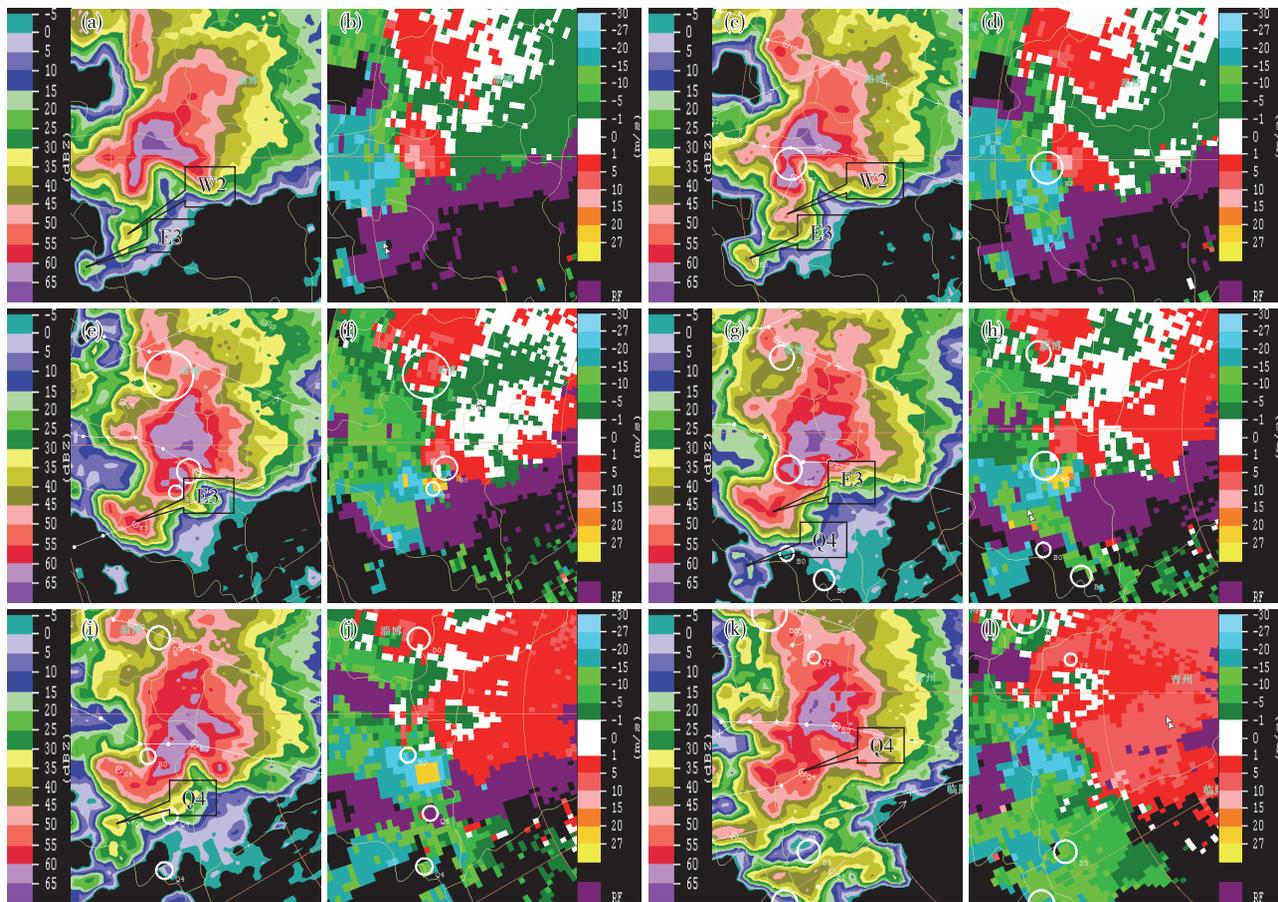


图4 2016年6月14日潍坊雷达1.5°仰角反射率因子(a. 17:18, c. 17:24, e. 17:36, g. 17:42, i. 17:47, k. 17:59)和径向速度(b. 17:18, d. 17:24, f. 17:36, h. 17:42, j. 17:47, l. 17:59)演变

Fig.4 Evolution of radar reflectivity factor and radial velocity at 1.5° elevation angle (a/b. 17:18 BST, c/d. 17:24 BST, e/f. 17:36 BST, g/h. 17:42 BST, i/j. 17:47 BST, k/l. 17:59 BST) on 14 June 2016 from Weifang CINRAD-SA radar

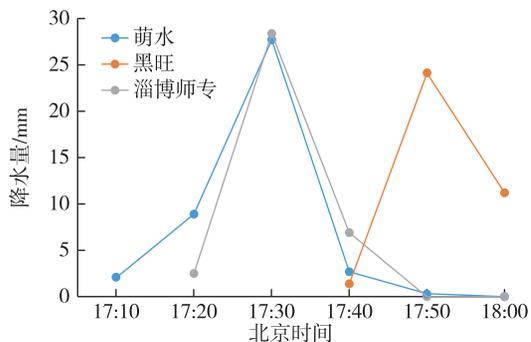


图5 萌水、黑旺、淄博师专自动气象观测站 17—18 时逐 10 min 降水量(单位:mm)

Fig.5 Ten-min precipitation (units; mm) from 17:00 BST to 18:00 BST at the automatic weather stations of Mengshui, Heiwang, and Zibo Normal College

据观测和数值模拟研究^[25-26],风暴单体的合并会导致风暴中的浮力以及上升速度增大。由垂直

方向的涡度方程可知,上升速度随高度增加产生的拉伸作用将造成垂直涡旋涡度增大。这在雷达图像中表现为中气旋旋转速度增大、直径缩小以及更小尺度强涡旋生成,超级单体风暴也随之增强。

在上述风暴合并的时段内(17:25—17:43),由于风暴基本沿潍坊雷达的径向运动,存在明显的速度模糊,无法进行径向速度的分析,故采用滨州雷达资料进行分析。相同地理位置上,在滨州雷达上可以看到中气旋(图6,黑色圆圈)内均有龙卷涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS)出现(图6,黑色圆圈内倒三角),并持续了4个体扫。实况虽无关于龙卷的目击报告,但分析相应时刻的径向速度产品,1.5°仰角上存在比中气旋小得多的小尺度涡旋。分析17:19—17:31的中气旋特征参数(表1)可知,在风暴合并过程中,最大切变值逐渐增大;虽然之后的最大切变值又明显减小,但其高度有所下降。

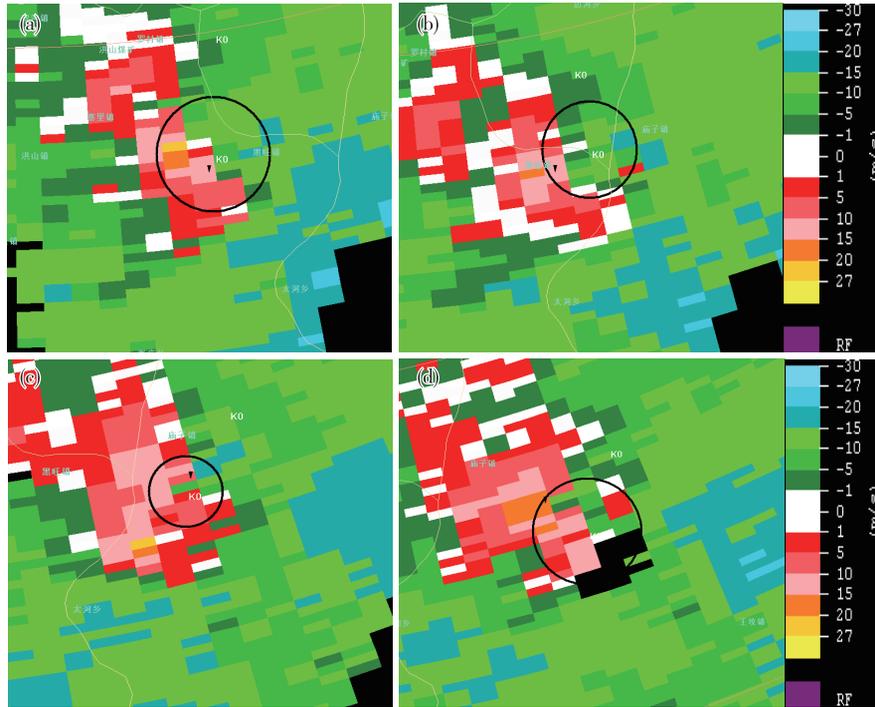


图 6 2016 年 6 月 14 日滨州雷达 1.5°仰角平均径向速度(26 号产品)演变(a. 17:25,b.17:31,c.17:37,d.17:43)
 Fig.6 Evolution of mean radial velocity (No.26 product) at 1.5° elevation angle from Binzhou CINRAD-SA radar on 14 June 2016
 (a. 17:25 BST, b. 17:31 BST, c. 17:37 BST, d. 17:43 BST)

这与文献[18]中所描述的超级单体加强并产生龙卷的过程较为相似。

表 1 中气旋(M)产品的特征参数

Table 1 Parameters of mesoscale cyclone (M) products

观测时间	中气旋特征参数	
	最大切变/(10 ⁻³ s ⁻¹)	最大切变高度/km
17:13	39	6.6
17:19	37	6.5
17:25	39	6.5
17:31	40	6.6
17:37	36	5.5
17:43	10	2.6
17:49	22	4.3

LEMON^[25]指出当普通风暴单体并入超级单体后,对应地面中低压加深,辐合增强,中气旋旋转速度增大,通常会有地面大风出现。此例超级单体风暴在合并过程中,在第一个单体 W2 合并进入超级单体后,潍坊雷达 0.5°仰角平均径向速度产品显示与后侧下沉气流对应的负径向速度区出现了速度模糊,径向速度达到了 31.5 m · s⁻¹(图略)。与该区域相对应,17:25 淄川区龙泉镇自动站观测到了

36.1 m · s⁻¹的大风。

18:11 开始,超级单体风暴南侧仍有单体触发生成,但其移向和超级单体的移动方向基本平行,不再并入其中(图略)。超级单体随之逐渐减弱,至 18:29 风暴消亡,被其南侧新生的风暴取代。由此可知,风暴的合并也是此例超级单体风暴长时间维持的原因之一。

3.2 超级单体风暴的垂直结构分析

下面主要分析强降水超级单体的回波结构特征。

图 7 为 17:30 潍坊雷达 0.5°、2.4°、4.3°、9.9°仰角基本反射率因子和平均径向速度图。此时,超级单体位于淄博市淄川区境内,并已经演变为较为典型的强降水超级单体。由 0.5°仰角反射率因子(图 7a、b)分析,入流缺口位于风暴的右前侧(相对于风暴移动方向)。在 0.5°平均径向速度图上与入流缺口对应的是一个中气旋。由图 7a、b 可知,在该风暴低层,与中气旋相对应的旋转上升气流基本为降水回波包裹。在 2.4°仰角(图 7c、d)上,回波中相对 0.5°仰角向东南(低层入流方向)延伸,即超级单体反射率因子有自低往高向低层入流一侧倾斜的特征。而且有界弱回波区清晰。速度图上,中气旋最大旋转速度约为 25 m · s⁻¹,按照美国国家强风暴

实验室的中气旋判据,达到强中气旋标准。4.3°仰角(图7e、f)上,风暴的反射率因子面积有所减小,并进一步向东南方向倾斜,位于中低层的有界弱回波区上方。虽然高度已达7 km,其基本反射率因子最大强度仍在69 dBz;而速度图显示该层中气旋的

旋转明显减弱。9.9°仰角(图7g、h),回波面积进一步减小,强度也明显减弱,速度图上存在强烈的风暴顶辐散,正负速度差达 $47\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,强风暴顶辐散表明风暴中存在强烈的上升运动,因而也是大冰雹的判据之一。

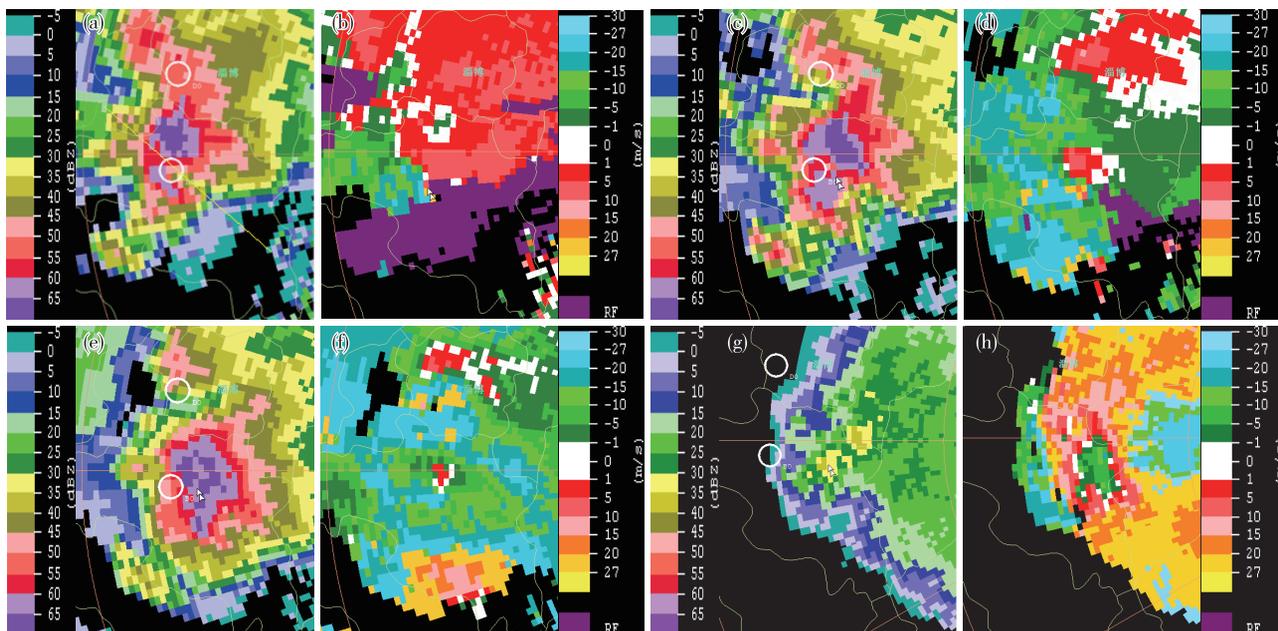


图7 2016年6月14日17:30潍坊雷达不同仰角反射率因子(a.0.5°,c.2.4°,e.4.3°,g.9.9°)和径向速度(b.0.5°,d.2.4°,f.4.3°,h.9.9°)

Fig.7 Radar reflectivity factor and radial velocity at different elevation angle from Weifang CINRAD-SA Radar at 17:30 BST on 14 June 2016 (a/b. 0.5°, c/d. 2.4°, e/f. 4.3°, g/h. 9.9°)

沿该时刻低层入流方向穿过风暴主体做垂直剖面图(图8),在反射率因子垂直剖面图(图8a)上可以看到两个有界弱回波区(BWER)存在,在同一时刻的径向速度剖面图(图8b)上均有速度对与之相对应,多个有界弱回波区也是强降水超级单体的

特征之一。临近的探空观测湿球温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度约为7 km,由图7a可知,在此高度以上,反射率因子核的强度达60 dBz以上,十分有利于大冰雹的产生。

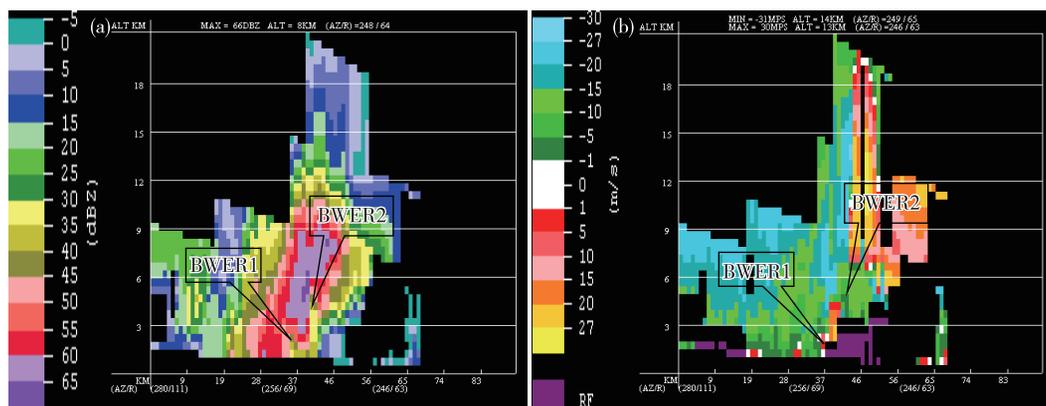


图8 沿风暴低层入流方向所作反射率因子垂直剖面(a;细实线)和径向速度剖面(b)

Fig.8 Vertical cross-section diagram of reflectivity factor (a; thin solid line) and radial velocity (b) along the low-level inflow of the storm

4 小结

1) 此例超级单体发生在高空冷涡影响,上层干冷下层暖湿的不稳定层结,以及较大的对流有效位能和较大的风垂直切变形势下。

2) 此例超级单体的演变过程分为两个阶段,即经典超级单体阶段和强降水超级单体阶段。经典超级单体阶段,风暴迅速由普通单体发展为特征明显的超级单体。之后,其后侧下沉气流触发的数个普通单体风暴并入经典超级单体后,使其逐渐转变为强降水超级单体。该强降水超级单体中气旋位于右前侧,对应的低层强烈旋转上升气流基本为降水回波包裹。强降水超级单体在垂直结构上,存在强烈的风暴顶辐散以及多个有界弱回波区等特点。

3) 风暴的合并造成风暴强度加强,主要表现为中气旋旋转速度增强,并出现类似龙卷的小尺度涡旋。风暴的增强导致地面大风和大冰雹的出现。

参考文献:

- [1] MARKOWSKI P, RICHARDSON Y. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes [M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2010.
- [2] BROWNING K A, LUDLAM F H. Airflow in convective storms [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1962, 88(376): 117-135.
- [3] DONALDSON R J JR. Vortex signature recognition by a Doppler radar [J]. J Appl Meteor, 1970, 9(4): 661-670.
- [4] BROWN R A, BURGESS D W, CRAWFORD K C. Twin tornado cyclones within a severe thunderstorm: Single Doppler radar observations [J]. Weatherwise, 1973, 26(2): 63-71.
- [5] FUJITA T T. Analytical meso-meteorology: A review, severe local storms [J]. Meteor Monogr, Amer Meteor Soc, 1963, 5(27): 77-125.
- [6] LEMON R L, DOSWELL C A III. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis [J]. Mon Wea Rev, 1979, 107(9): 1184-1197.
- [7] MOLLER A R, DOSWELL C A III, PRZYBYLINSKI R. High-precipitation supercells: A conceptual model and documentation, 16th Conf on Severe Local Storms. Kananaskis Park, AB, Canada [C]. Preprints, Boston, MA, AMS, 1990: 52-57.
- [8] MOLLER A R, DOSWELL C A III, FOSTER M P, et al. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures [J]. Wea Forecasting, 1994, 9(3): 327-347.
- [9] 刁秀广, 杨传凤, 李静, 等. 济南地区超级单体强度和流场结构分析 [J]. 高原气象, 2011, 30(2): 489-497.
- [10] 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暴研究 [J]. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [11] 王福侠, 裴宇杰, 杨晓亮, 等. “090723”强降水超级单体风暴特征及强风原因分析 [J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1690-1700.
- [12] 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 等. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征 [J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 285-298.
- [13] 胡雯, 黄勇, 汪腊宝. 夏季江淮区域对流云合并的基本特征及影响 [J]. 高原气象, 2010, 29(1): 206-213.
- [14] FINLEY C A, COTTON W R, PIELKE R A SR. Numerical simulation of tornadogenesis in a high-precipitation supercell. Part I: Storm evolution and transition into a bow Echo [J]. J Atmos Sci, 2001, 58(13): 1597-1629.
- [15] CAREY L D, PETERSEN W A, RUTLEDGE S A. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998 [J]. Mon Wea Rev, 2003, 131(8): 1811-1831.
- [16] LEE B D, JEWETT B F, WILHEMSON R B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence [J]. Wea Forecasting, 2006, 21(4): 449-464.
- [17] 王俊, 龚佃利, 刁秀广, 等. 一次弓状回波、强对流风暴及合并过程研究 I: 以单多普勒雷达资料为主的综合分析 [J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1067-1077.
- [18] 朱江山, 刘娟, 边智, 等. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究 [J]. 气象, 2015, 41(2): 182-191.
- [19] 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.
- [20] 张琴, 孟伟, 朱敏, 等. 2016年6月13-14日山东强对流天气过程的中尺度特征及成因分析 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 101-112.
- [21] 吴志彦, 闵锦忠, 赵海军. 冷涡背景下一次强对流过程的卫星水汽图像特征 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37(3): 54-61.
- [22] 俞小鼎. 关于冰雹的融化层高度 [J]. 气象, 2014, 40(6): 649-654.
- [23] 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.

-
- [24] MARKOWSKI P M. Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review [J]. Mon Wea Rev, 2002, 130(4):852-876.
- [25] LEMON L R. The flanking line, a severe thunderstorm intensification source[J]. J Atmos Sci, 1976, 33(4): 686-694.
- [26] KOGAN Y L, SHAPIRO A. The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger[J]. J Atmos Sci, 1996, 53(17): 2525-2545.