

朱义青, 管叶莉, 王玉亮. 2020. 山东中西部一次超级单体分裂过程的雷达回波结构和环境条件分析 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 320–332.
ZHU Yiqing, GUAN Yeli, WANG Yuliang. 2020. Analysis of Environmental Conditions and the Structure of Radar Echo for a Supercell Splitting Process in the Midwestern Shandong Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (3): 320–332. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19022

山东中西部一次超级单体分裂过程的雷达回波结构和环境条件分析

朱义青 管叶莉 王玉亮

山东省临沂市气象局, 山东临沂 276004

摘要 利用常规观测资料、济南多普勒雷达资料、FY-2G 资料和加密自动站等资料分析了 2016 年 6 月 14 日一次在华北冷涡背景下发生的超级单体风暴生成及分裂过程, 对超级单体分裂过程的雷达回波特征和环境条件进行了详细的分析。结果表明, 超级单体风暴发生在地面中尺度辐合线附近, 中层短波槽前, 高空有中空急流的环境下, 触发的对流云团向偏东方向移动中, 在不稳定层结和较强的垂直风切变作用下, 对流风暴发生分裂且右移性对流风暴发展加强。风暴分裂后环境风左侧的风暴单体并没有受到明显抑制, 中尺度辐合线附近的露点锋生抵消了反气旋性风暴的受抑制程度, 使反气旋性风暴能有所加强并持续更长的时间。环境风右侧的风暴单体发展加强, 且持续时间长达 2 h。风暴分裂是在单体发展的初期开始, 分裂先从中高层开始, 然后向下延伸, 分裂后相对于环境风方向, 左侧单体为反气旋性左移风暴, 右侧为气旋性右移风暴。气旋性右移风暴强烈发展为具有低层的入流缺口、中高层的弱回波区及风暴顶的强辐散, 与经典超级单体风暴回波特征类似。分裂后右移风暴伴有深厚持久的中气旋, 其起源于中层 4~5 km, 然后向上和向下发展, 最强旋转出现在高层, 旋转速度达 29 m/s, 这与典型超级单体内中气旋都是中层旋转最强有所不同。

关键词 分裂 气旋性右移风暴 触发机制 次级环流

文章编号 1006-9585(2020)03-0320-13

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19022

Analysis of Environmental Conditions and the Structure of Radar Echo for a Supercell Splitting Process in the Midwestern Shandong Province

ZHU Yiqing, GUAN Yeli, and WANG Yuliang

Linyi Meteorological Bureau of Shandong Province, Linyi, Shandong Province 276004

Abstract Based on conventional observation data, in this study, we analyzed Jinan Doppler weather radar data, FY-2G data, and automatic weather station data with respect to the formation and splitting processes of a supercell storm that occurred in the background of a cold vortex in North China on June 14, 2016. The radar echo characteristics and environmental conditions of the splitting supercell were analyzed in particular detail. The results showed that the supercell storm occurred near the mesoscale convergence line on the ground, in front of the centrally located short-wave slot trough. In an environmental condition characterized by hollow jets at high altitudes, which triggered an easterly moving convective cloud cluster, unstable layers, and strong vertical wind shear, the convective storms split, with those that were

收稿日期 2019-02-20; 网络预出版日期 2020-01-08

作者简介 朱义青, 男, 1985 年出生, 硕士, 高级工程师, 从事中短期预报分析研究。E-mail: lyzhuyiqing@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41375120, 环渤海区域科技协同创新基金项目 QYXM201802, 山东省气象局预报员专项 SDYBY2019-14

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375120), Bohai Rim Regional Science and Technology Collaborative Innovation Fund Project (Grant QYXM201802), Shandong Meteorological Bureau Forecaster Special Fund (Grant SDYBY2019-14)

right-shifting strengthening. After splitting, the storm monomer on the left side of the environmental wind was not significantly restrained. The dew-point front near the mesoscale convergence line offset the resistance of the anticyclonic storm, which strengthened and extended the life of the anticyclonic storm. The storm monomer on the right side of the environmental wind was strengthened and lasted 2 h. The storm splitting process began at the initial stage of monomer formation, with the split initiating at the middle and upper levels and then extending downward. After the division, relative to the direction of the environmental wind, the left monomer was an anticyclonic leftward-moving storm, and the right monomer was a cyclonic rightward-moving storm. The cyclonic rightward-moving storm featured an inflow notch at the low level, a bounded weak echo region at the middle-upper level, and strong storm-top divergence at the upper level. These echo features are similar to those of a classic supercell storm. After the division, the rightward-moving storm was accompanied by a deep and long-lasting mid-cyclone that had originated at the middle level (four to five kilometers), and then developed both upward and downward. Its strongest rotation occurred at a high level with a rotation speed of 29 m/s. This differs from the behavior of the classic supercell monomer, which has its strongest rotation in the middle level.

Keywords Split, Cyclone rightward-moving storm, Trigger mechanism, Secondary circulation

1 引言

强对流天气是指由于大气垂直对流强烈发展而产生的雷雨、冰雹、突发性雷暴大风、龙卷风等短时剧烈的灾害性天气,一般都伴有雷电(潘玉洁等, 2008; 孙虎林等, 2011; 陈涛等, 2013; 陈宝君等, 2016; 段亚鹏等, 2017; 覃靖等, 2017)。强对流天气作为影响山东地区的主要灾害性天气之一,常以雷暴大风、冰雹和短时强降水为主,给国民经济和人民生命财产带来巨大损失(高晓梅等, 2018; 侯淑梅等, 2018)。近年来,随着加密地面气象观测网的建设,利用新一代天气雷达对发生在山东境内的强对流天气的监测和分析已取得不少成果。刁秀广等(2008)利用济南多普勒雷达资料对发生在山东西部地区的强风暴过程进行了分析,结果表明,风暴低层存在中尺度辐合现象,风暴前侧的入流依靠后部低层冷空气池的向前推进而得到支撑,产生逆环境风切变方向的主上升气流区;朱君鉴等(2008)对发生在山东临沂地区的一次强对流灾害性大风进行多普勒天气雷达产品分析,研究指出,强降水的拖曳作用,将中层中气旋的水平动量带到地面,中气旋右侧动量的方向与弓状回波后部的强下沉入流方向一致,两者叠加,使地面风速加大,造成灾害性大风;王俊等(2011)对发生在山东临沂南部的一次强烈雹暴的三维结构和形成机制的单、双多普勒雷达分析,研究表明雹暴是在高层的辐散气流与邻近雷暴单体高层气流结合后形成的下沉辐散气流,是该雹暴北风入流的主要产生原因,雹暴与邻近雷暴间通过高层和低层风场间的相互作用,促进了雹暴的产生、发展和维持。

超级单体总是伴随着一个持久深厚的中气旋(牛奔等, 2016; 俞小鼎等, 2006),有时伴随中反气旋,大多数情况下超级单体伴随中气旋,并以右移风暴为主(移向云层中平均风的右侧),少数超级单体伴随着中反气旋,主要为左移风暴,左移风暴较为少见而很少观测到。陈晓燕等(2011)描述了发生在黔西南一次强雹暴天气的环境条件和雷达回波结构,详细分析了强雹暴发展过程的回波结构特征,以及在超级单体中观测到的中反气旋流场结构,并且指出了垂直累积液态水(VIL)值在大冰雹预报中的良好指示性;陈明轩等(2012)利用三维云尺度数值模式和雷达资料快速更新循环四维变分同化(4DVar)技术对一次由多单体合并加强为“右移”超级单体而后又分裂为多单体的风暴过程进行分析,指出风暴前方的低层环境风随高度存在显著的顺时针切变,有利于超级单体风暴的持续发展和右移,与风暴相伴随的冷池以及冷池出流(阵风锋)与低层环境风场的辐合均不断增强,风暴前沿的气流上升明显,低层暖湿空气在强的风切变作用下旋转上升进入风暴内,使得超级单体得以维持和加强。王福侠等(2014)详细分析了发生在河北南部的多个超级单体风暴在相近地点连续生成及分裂的过程,指出由于垂直风切变矢量方向随高度逆时针旋转,分裂后左移的反气旋风暴得到加强,发展成为具有深厚中反气旋的左移超级单体风暴,而右移的气旋性风暴受到抑制。关于超级单体中气旋产生和超级单体分裂的机制主要是从分析一系列三维对流云模式的数值模拟结果而得出的,Klemp(1987)在大量研究的基础上对超级单体风暴动力学进行了系统总结,当风切变矢量随高度基本不变时,气旋式右

移风暴和反气旋式左移风暴会有几乎相当的发展；当风切变矢量随高度顺时针旋转时，分裂后气旋式旋转的右移风暴得到加强，而反气旋式旋转的左移风暴受到抑制。

2016年6月14日下午到夜间在济南齐河县境内有风暴单体形成东移发展和分裂，分裂后分别为反气旋性左移风暴和气旋性右移风暴，其中，分裂后的气旋性右移风暴得到强烈发展和持续了较长时间。上述过程发生在济南 CINRAD/SA 多普勒雷达站以东 50~100 km 范围内，较利于本次过程的观测。山东地区较少观测到如此清晰的超级单体分裂过程，且分裂后右移的超级单体强烈发展的例子。因此本文利用济南 SA 型多普勒雷达观测资料、NCEP 再分析资料、加密自动站资料和 FY-2G 卫星云图资料对本次过程做详细雷达回波结构和环境条件分析。

2 风暴分裂和路径概述

2016年6月14日下午到夜间在济南齐河县境内有风暴单体形成东移发展（图1），15:51（北京时间，下同）分裂成2个风暴单体，一个位于风暴移动方向的左侧，一个位于风暴移动方向的右侧，左侧的向左移动缓慢发展，右侧的向右移动并快速发展加强为超级单体风暴，分析风暴相对径向速度产品发现，左侧的风暴单体是反气旋风暴，右侧的风暴单体是气旋性风暴。15:45在距雷达（方位角135°）21 km 处有风暴单体（单体命名为C）生

成向东北方向移动并有所发展，在 16:08 与向右侧移动的超级单体风暴合并，合并后的超级单体风暴继续偏东东南方向移动。单体分裂后的气旋性风暴发展成具有强中气旋的超级单体风暴。可见，当天的环境条件利于气旋性风暴的发展。

图1为通过点绘济南齐河雷达基本反射率 1.5° 仰角产品的每 6 min 强回波中心（45 dBZ 以上）的位置，记录单体从新生、分裂、右移的风暴合并到消亡的演变过程，从分裂单体的生命史来看，单体分裂后反气旋左移风暴持续时间为 58 min，气旋性右移风暴持续时间长 2 h 48 min，比反气旋左移风暴长 1 h 50 min。

2016年6月14日上述的超级单体风暴产生的强烈天气主要为冰雹大风。其中 15 个中尺度国家气象站出现大于或等于 17 m/s 大风，4 个站出现大于或等于 20 m/s 大风，最大阵风 36.1 m/s，出现在淄博龙泉站；灾情调查发现淄博和潍坊多地出现鸡蛋大小的冰雹。

3 环流形势和不稳地条件分析

3.1 天气形势分析

当冷涡处于（37°N~55°N，105°E~135°E）范围内时，山东地区往往出现区域性强对流天气（阎丽凤等，2014）。2016年6月14日08:00（图2），深厚华北冷涡位于山西与内蒙古交界处（41°N，113°E），从河套到山东大部地区受偏西或西北气流控制，山东中西部上空冷平流较明显，利于条件

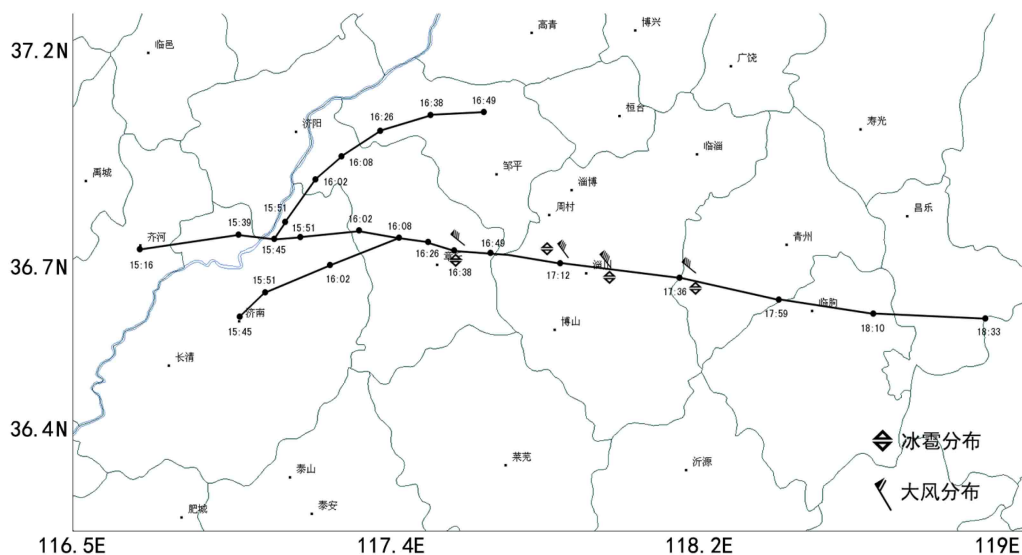


图1 2016年6月14日山东中西部超级单体移动路径、冰雹和大风（风速≥20 m/s）分布

Fig. 1 Distribution of supercell paths, hail, and winds (wind speed ≥ 20 m/s) in the central and western parts of Shandong Province on 14 June 2016

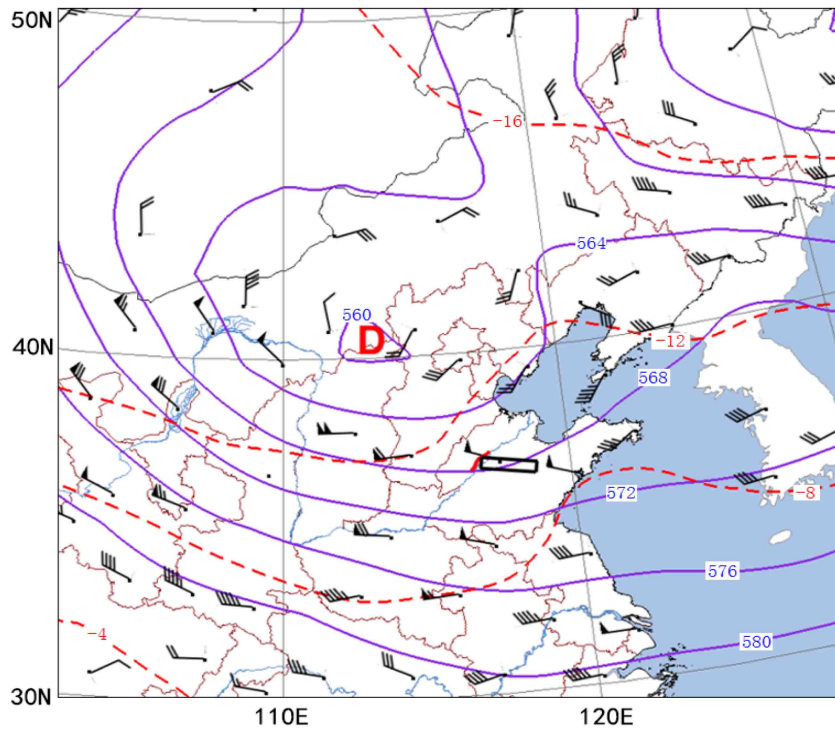


图2 2016年6月14日08:00 500 hPa形势场(黑色方框为分裂的超级单体发生范围;蓝色线为高度场,单位: dagpm;红色虚线为温度场,单位: °C;红色曲线表示地面辐合线)

Fig. 2 Synoptic chart at 500 hPa at 0800 BST 14 June 2016 (the black box contains a range of split supercells, the blue line indicates the geopotential height field, units: dagpm, the red dotted line indicates the temperature field, units: °C, and the red curve indicates the ground convergence line)

不稳定的发展。冷涡底部 500 hPa 有明显的风速大于 20 m/s 的中空急流, 利于午后山东中西部地区上空产生明显的垂直风切变。山东中西部地区处于华北冷涡的东南侧, 正的涡度平流利于该地区上空大尺度上升运动的发展。200 hPa 上风速大于 40 m/s 的高空急流在山东西部地区上空呈现明显的分流结构, 高空辐散明显(图略), 较强的高空辐散条件有利于垂直运动的发展。地面形势场上, 山东中西部地区位于地面低压内部, 且存在一条准西南—东北向的中尺度辐合线。

3.2 局地热力、动力条件

本文研究的超级单体风暴发生于 15:00, 济南章丘探空站 08:00 探空资料(图 3a)显示近地面层水汽较为充足, 850 hPa 以上为干区, 中低层存在较明显的对流性不稳定($\partial\theta_{se}/\partial z < 0$)(图 3b)。对流有效位能不足 52 J/kg, 这与阎丽凤等(2014)给出的山东地区强对流天气的平均对流有效位能 868.0 J/kg 相比明显偏低, 此处这么低的对流有效位能明显不合理, 其主要原因是探空资料是 08:00, 距离对流系统的发生间隔约 7 h。在这段时间内由于大气层结发生变化造成对流有效位能的快速增加。

用 14:00 地面观测值对 08:00 探空曲线进行订正后, 对流有效位能为 1700 J/kg, 而用 2016 年 6 月 14 日 14:00 NCEP 再分析资料计算的 CAPE (Convective Available Potential Energy) 值在 2300 J/kg 左右, 这都明显大于造成山东强对流天气的 CAPE 平均值(阎丽凤等, 2014), 表明具备对流发生的不稳定条件。从风场的垂直分布来看, 850 hPa 以下为西南风, 850 hPa 以上逐渐转为西北风, 500 hPa 的西北风风速达 20 m/s。经计算的 0~3 km 风垂直切变约为 10 m/s, 0~6 km 垂直风切变为 17 m/s, 具有较强的深层风垂直切变, 500 hPa 以下风向随高度顺时针旋转, 风速增大, 特别是近地面层到 850 hPa 风向顺时针旋转幅度最大, 风切变方向垂直系统移动(系统向偏东方向移动)方向向右, 有利于气旋式右移风暴单体的发生发展和分裂。

4 风暴分裂和演变过程

4.1 风暴分裂过程及演变的雷达回波特征分析

为详细描述分析风暴的分裂过程, 选用济南多普勒雷达 1.5°仰角基本反射率因子和径向速度产品

来描述分析。

图 4 和图 5 分别为 2016 年 6 月 14 日不同时段济南多普勒雷达 1.5°仰角基本反射率因子和径向速

度。15:39，距雷达（方位角 83°）27 km 处的对流单体对应速度图上可以看出有一对涡旋（反气旋性涡旋和气旋性涡旋；图 5a）。15:45 风暴单体回波

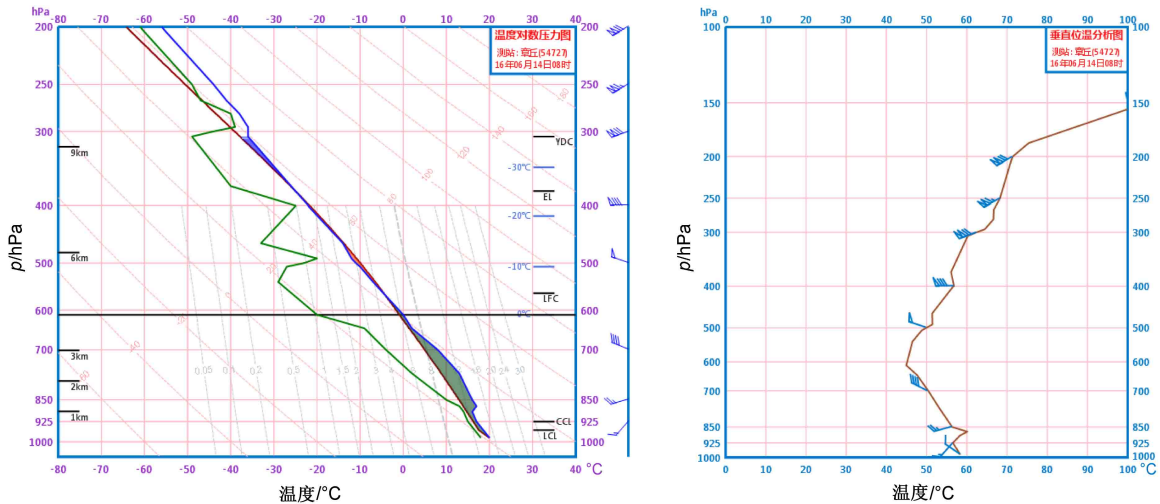


图 3 2016 年 6 月 14 日 08:00 章丘站 (a) 探空曲线 (绿色线为露点温度, 单位: °C; 蓝色线为层结温度, 单位: °C) 和 (b) 假相当位温随高度变化
Fig. 3 (a) Temperature–lnp diagram (the green line indicates the dew point temperature, units: °C, the blue line indicates the stratified curve, units: °C) and (b) pseudo equivalent potential temperature varying with height at the Zhangqiu station at 0800 BST June 14 2016

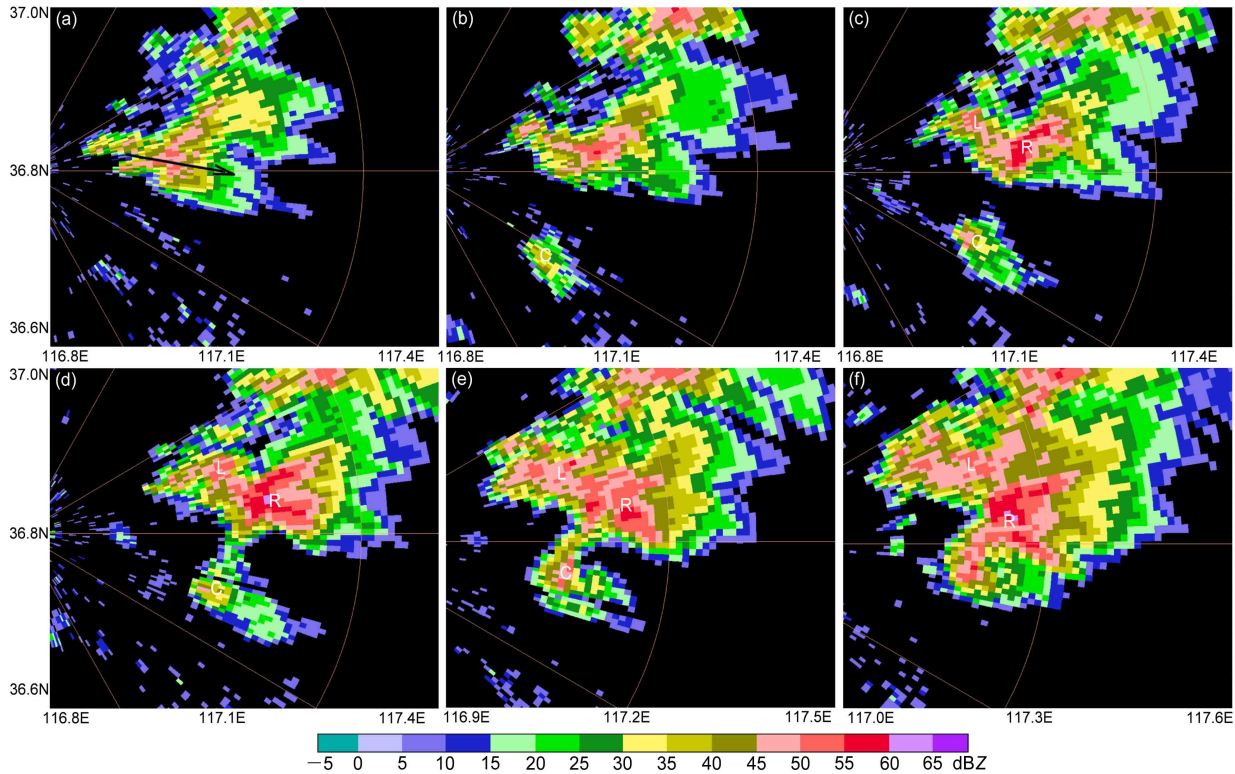


图 4 2016 年 6 月 14 日 (a) 15:39、(b) 15:45、(c) 15:51、(d) 15:57、(e) 16:02、(f) 16:08 济南多普勒雷达 1.5°仰角基本反射率因子。
(a) 中黑色箭头表示环境风方向; L 为分裂后形成的左侧单体命名, R 为分裂后形成的右侧单体命名, C 表示对流单体
Fig. 4 Reflectivity factor at 1.5° elevation angle from Jinan Doppler radar at (a) 1539 BST, (b) 1545 BST, (c) 1551 BST, (d) 1557 BST, (e) 1602 BST, and (f) 1608 BST 14 June 2016. The black arrow in (a) indicates the direction of the ambient wind. L is the name of the left side monomer formed after splitting, and R is the name of the right side monomer formed after splitting, C is convection cell

尺度增大强度加强(图 4b), 反气旋性涡旋和气旋性涡旋开始远离, 反气旋性涡旋向左偏, 气旋性涡旋向右偏(左偏和右偏是相对于风暴承载层(700~500 hPa)平均风而言, 图 4a 黑色箭头代表风暴承载层平均风的方向); 气旋性涡旋位于强回波中心右前侧弱回波区内。15:51 对流风暴开始分裂(分裂后左侧单体命名为 L, 右侧单体命名为 R, 图 4c), 对应的 L 和 R 的 2 个涡旋距离有所增大, 气旋性涡旋有所右偏, L 单体尺度开始增大(图 4d), 但反气旋性正速度值明显减小, 反气旋性涡旋减弱明显, R 单体强度和尺度迅速增加, 出现大于 55 dBZ 的强回波, 说明具有反气旋性的 L 单体受到抑制, 而具有气旋性涡旋的 R 单体得到选择性加强。随着时间推移 L 单体强度逐渐开始减弱并于 16:49 减弱消失, R 单体持续加强并于 16:20 与风暴单体 C 合并, 此后合并的单体快速发展, 16:38 达到最强的单体气旋性涡旋正速度中心强度达 54 m/s, 负速度值位 5 m/s, 核区直径 8 km 左右(图略), 属于强中气旋。

从风暴单体 R 对应强回波中心的位置来看, 高层的强回波位于低层强回波中心右侧弱回波区内。从各个仰角的基本反射率因子来看, 在 6.0°到 3.4°仰角单体 R 已经分裂(图 6c、6d、6e), 但是 0.5°和 1.5°还没有完全分裂(图 6a、6b)。15:51 风暴单体 L 靠近 R 单体的回波强度明显减弱, 说明 L 单体受到明显的抑制, 分裂后具有反气旋涡旋的 L 单体左偏, 具有气旋性涡旋的 R 单体右偏, 2 个单体的距离增大(图 7)。然后 0.5°和 1.5°仰角开始分裂(图 7a、7b), 表明先从中高层开始, 1 个体扫后迅速延伸到低层。

从演变过程可以看出, 风暴单体的分裂先从中高层(6.0°、4.3°、3.4°和 2.4°)开始, 6 min 后, 分裂迅速延伸到低层(1.5°和 0.5°仰角)。从分裂的前一个体扫开始(15:45), 左侧反气旋性风暴单体受到抑制, 右侧气旋性风暴单体继续加强发展。分裂后受到抑制的反气旋性风暴单体 58 min 后消亡, 而加强的气旋性超级单体风暴持续 2 h 48 min。

4.2 气旋性超级单体 R 的雷达回波特征

风暴单体 R 最终发展为具有中气旋的强烈右移性超级单体风暴, 16:38 上述超级单体的中气旋达到最强(图 8), 在中层(1.5°~4.3°)东南侧有宽广的前侧“V”型入流缺口, 反射率因子梯度很大; 清楚的有界弱回波区扩展到将近 6 km 高度

(图 9b), 在往上有强反射率因子核心位于弱回波区之上, 并有清楚的回波悬垂。从底层到高层, 反射率因子高梯度区向东南侧(低层暖湿气流流入一侧)倾斜, 高层强回波中心位于低层入流缺口和中高层弱回波区上空(图 9b)。从 1.5°仰角到 4.3°仰角都观测到明显的中气旋, 均位于东南侧入流缺口附近, 3.4°仰角和 4.3°仰角(高度 4.5~8 km)的中层旋转最强, 旋转速度 29 m/s, 尺度约 8 km, 距雷达约 78 km, 可判断属于强中气旋(俞小鼎等, 2006)。9.9°仰角(高度约 12 km)有明显的风暴顶辐散(图 8e2), 对应强辐散的正、负速度差达到 58 m/s, 构成风暴顶的正、负速度中心间距为 15 km。

综上所述, 风暴单体 R 发展为成熟的气旋性旋转的强烈右移超级单体后, 其低层具有明显“V”型入流缺口, 中气旋位于“V”型入流缺口附近, 低层沿着入流缺口反射率因子梯度很大, 具有明显的有界弱回波区及位于有界回波区上的回波悬垂结构, 有界弱回波区内为旋转的强烈上身气流(高帆等, 2018; 俞小鼎等, 2006), 中层(4.5~7.8 km)旋转最强, 而风暴顶为强烈辐散, 上述特征为经典的超级单体风暴结构特征。经过测算, 上述风暴单体 R 在其生命史中移动方向相对于风暴承载层平均风向偏右 10°, 移动速度约 14 km/h。而相应的风暴单体 L 相对于风暴承载层平均风向偏左 20°, 移动速度约 9 km/h, 即右移风暴比左移风暴移动快。

5 风暴的分裂及选择性加强

有关超级单体风暴的动力学目前仍然不是很成熟, 对于风暴的生成、分裂和分裂后(右移)风暴的选择性加强的动力学理论主要来自于风暴尺度数值模拟结果的分析(Klemp, 1987)。在中等到强的垂直风切变(0~6 km 垂直风切变大于或等于 15 m/s)条件下, 风暴中的上升气流与环境的垂直切变气流相互作用时, 水平涡度将倾斜为垂直涡度, 结果使得气旋性涡旋在初始上升气流的右侧、反气旋性涡旋在初始上升气流的左侧。当上升气流驱动的降水集中在主上升气流时, 降水拖曳能激发下沉气流产生, 传播过程使得气旋式(反气旋式)风暴更倾向于它初始移动方向的右(左)侧。上升气流开始旋转, 旋转诱发产生的沿上升气流两侧的垂直气压梯度力是风暴分裂的基础, 而且降水能够加强

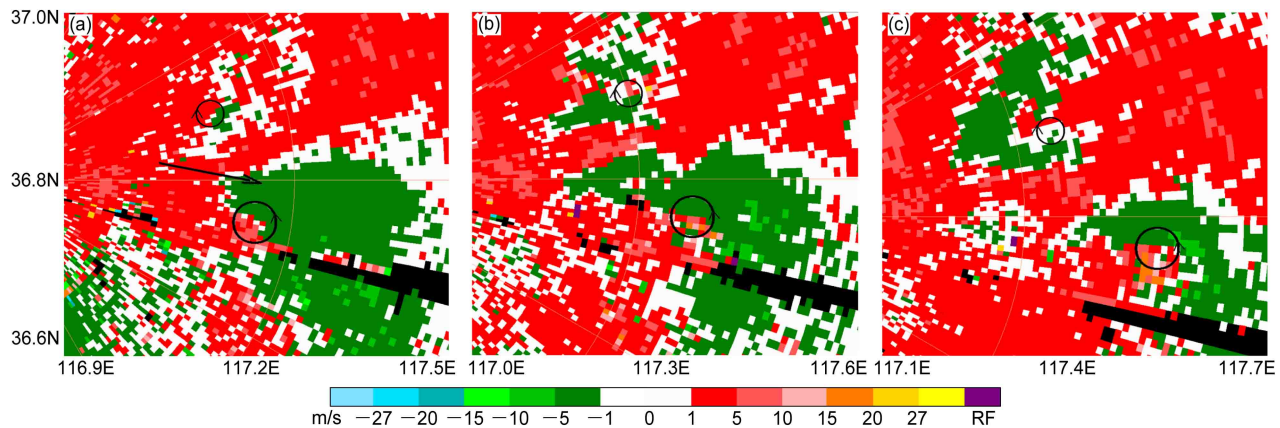


图 5 2016 年 6 月 14 日 (a) 15:39、(b) 15:45、(c) 15:51 济南多普勒雷达 1.5°仰角径向速度。黑色箭头表示环境风方向；黑色圆圈表示气旋和反气旋所在位置

Fig. 5 Average radial velocities at 1.5° elevation angle from Jinan Doppler radar at (a) 1539 BST, (b) 1545 BST, and (c) 1551 BST 14 June 2016. The black arrow in (a) indicates the direction of the ambient wind and black circles indicate the locations of the cyclones and anticyclones

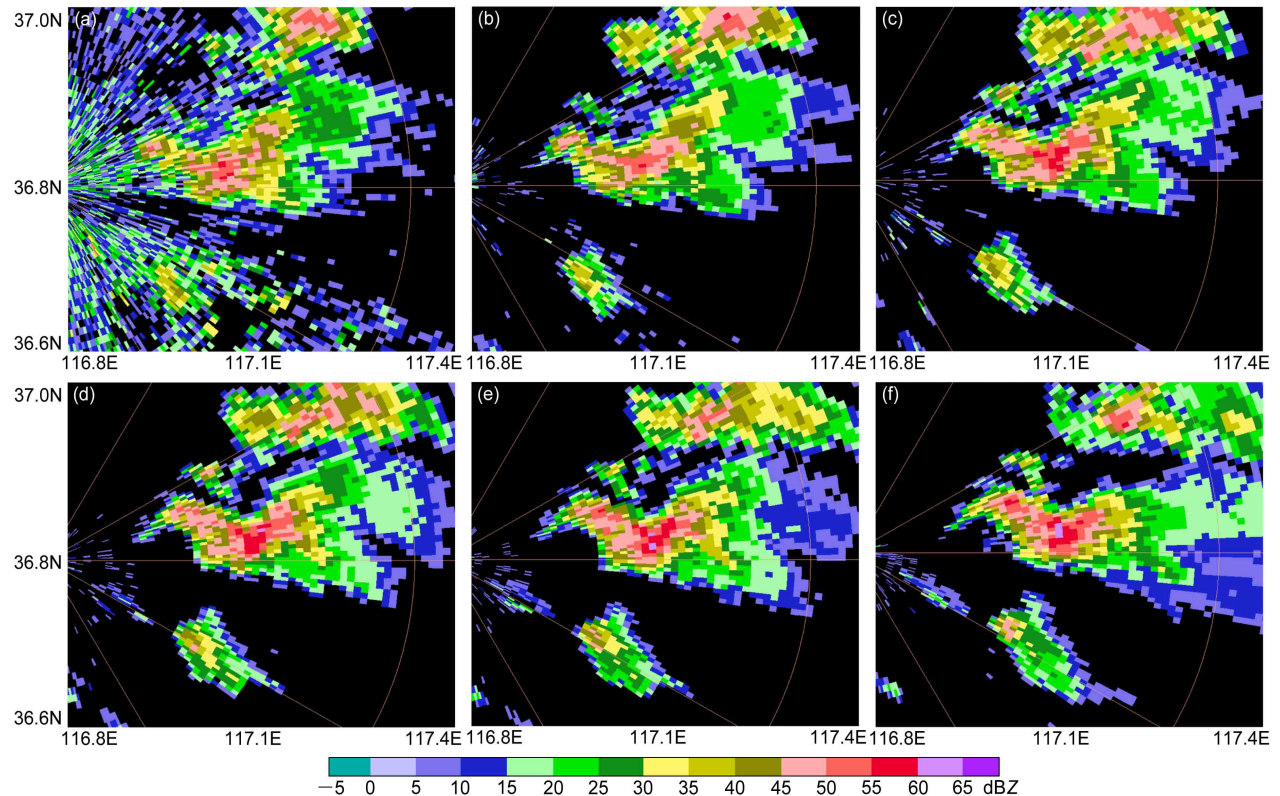


图 6 2016 年 6 月 14 日 15:45 济南多普勒雷达基本反射率因子：(a) 0.5°仰角；(b) 1.5°仰角；(c) 2.4°仰角；(d) 3.4°仰角；(e) 4.3°仰角；(f) 6.0°仰角

Fig. 6 Reflectivity factor from Jinan Doppler radar at 1545 BST 14 June 2016: (a) 0.5° elevation; (b) 1.5° elevation; (c) 2.4° elevation; (d) 3.4° elevation; (e) 4.3° elevation; (f) 6.0° elevation

风暴的分裂。

垂直风切变矢量的方向随高度不变的环境中，与环境相联系的垂直气压梯度即不会选择性的加强风暴分裂后气旋式的右移风暴也不会选择性加强反气旋式左移风暴（俞小鼎等, 2006; 寿绍文等,

2003）。垂直风切变矢量随高度顺时针旋转时，水平气压梯度加强了风暴右侧的上升运动和左侧的下沉运动。因此，分裂的风暴对右移的气旋式旋转的风暴上升气流得到加强，风暴进一步发展；而分裂的风暴对左移的反气旋式风暴中上升气流减弱，风

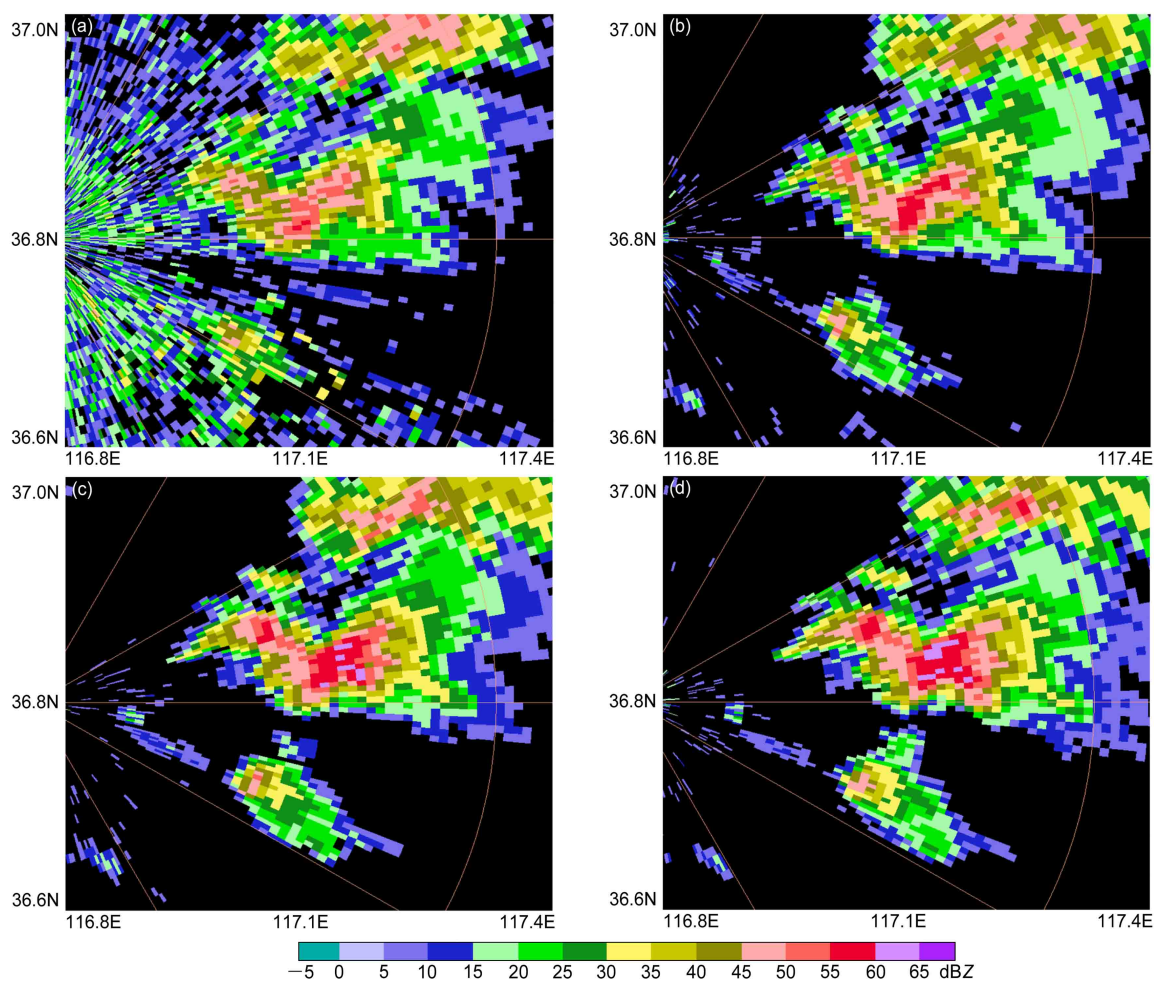


图 7 2016 年 6 月 14 日 15:51 济南多普勒雷达基本反射率因子：(a) 0.5°仰角；(b) 1.5°仰角；(c) 2.4°仰角；(d) 3.4°仰角

Fig. 7 Reflectivity factor from Jinan Doppler radar at 1551 BST 14 June 2016: (a) 0.5° elevation; (b) 1.5° elevation; (c) 2.4° elevation; (d) 3.4° elevation

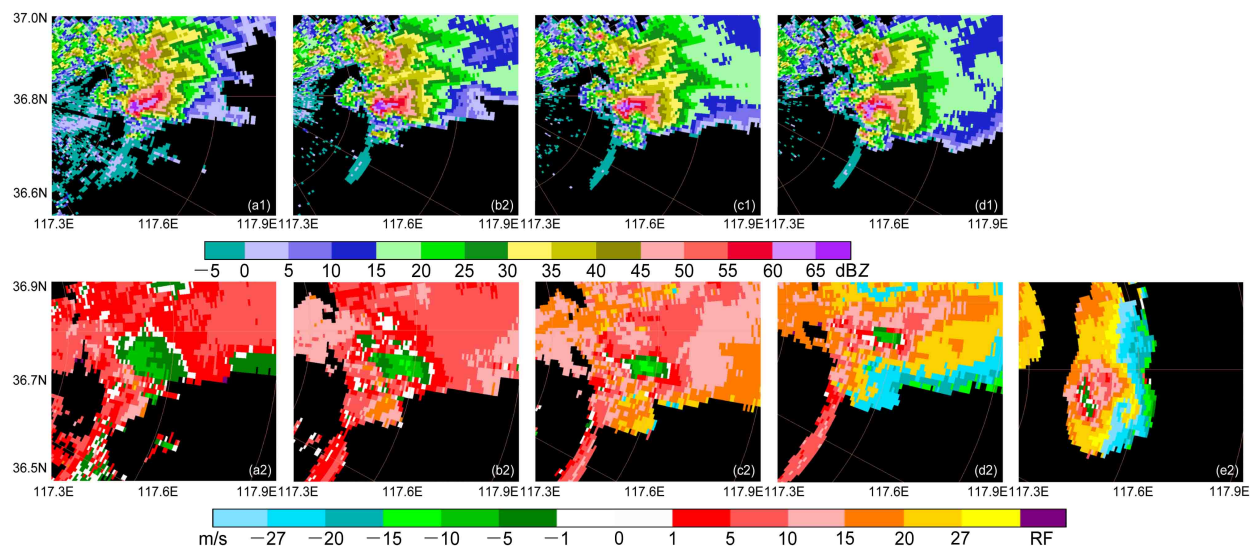


图 8 2016 年 6 月 14 日 16:38 济南多普勒雷达基本反射率因子（第一行）和同时刻风暴径向速度（第二行）：(a1、a2) 1.5°仰角；(b1、b2) 2.4°仰角；(c1、c2) 3.4°仰角；(d1、d2) 4.3°仰角；(e2) 9.9°仰角

Fig. 8 Base reflectivity factor (the first line) from Jinan Doppler radar and storm relative velocity map (the second line) in Jinan at 1638 BST 14 June 2016: (a1, a2) 1.5° elevation; (b1, b2) 2.4° elevation; (c1, c2) 3.4° elevation; (d1, d2) 4.3° elevation; (e2) 9.9° elevation

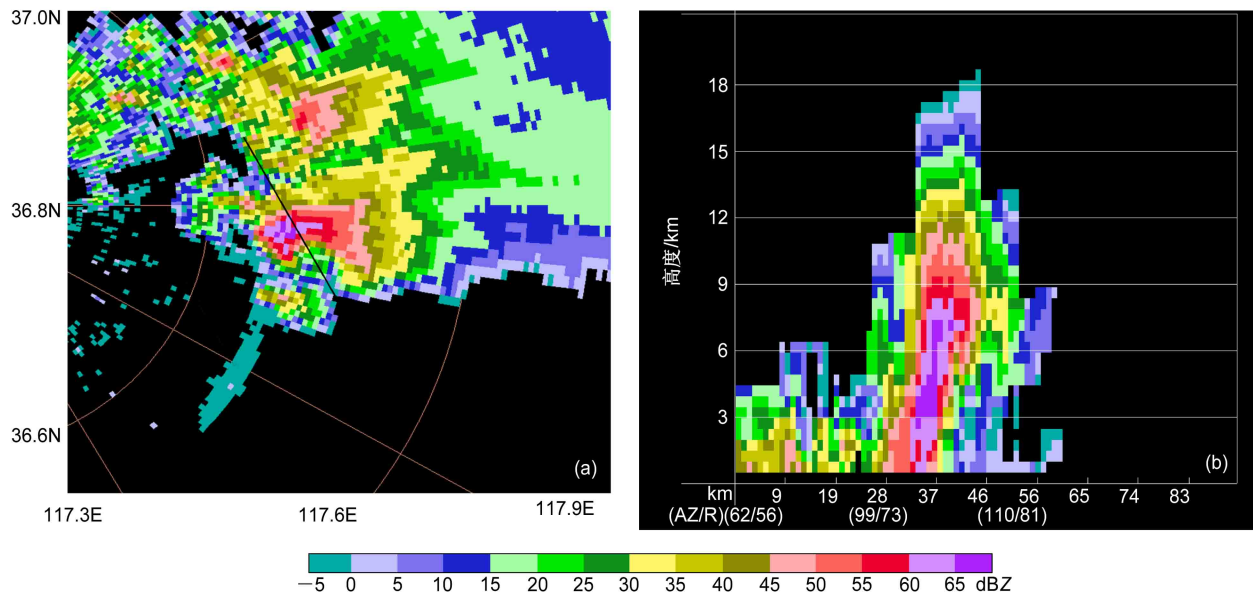


图9 2016年6月14日16:49济南多普勒雷达1.5°仰角(a)反射率因子及(b)其垂直剖面

Fig. 9 (a) Reflectivity factor at 1.5° elevation angle from Jinan Doppler radar and (b) its vertical profile at 1649 BST on June 14 2016

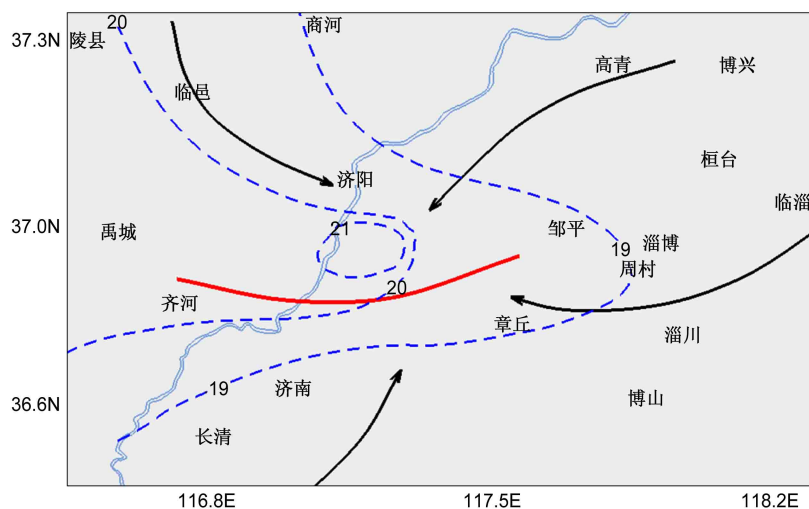


图10 2016年6月13日16:00地面中尺度分析综合图(蓝色虚线为露点温度,单位:°C;红色实线表示地面辐合线;矢量箭头表示地面显著流线)

Fig. 10 Comprehensive map of the ground mesoscale analysis at 1600 BST 14 June 2016. The blue dotted lines are the dew point temperature, units: °C; the red solid line is the ground convergence line; the vector arrows are the significant ground stream line

暴的进一步发展受到抑制。当左移的风暴受到的抑制很强时,很难观测到风暴分裂过程,只能观测到气旋式右移风暴。

分析2016年6月14日08:00章丘探空站(图2,章丘站14:00不做观测)垂直风切变矢量随高度变化可以看出,地面到700 hPa垂直风切变线矢量随高度呈现明显的顺转,700~500 hPa垂直风切变矢量方向变化很小。总体上从地面到500 hPa,垂直风切变矢量随高度顺时针旋转,尤其在低空。本次风暴单体分裂时发现,右移的气旋式风暴确实得到

了选择性加强。

但是,此次个例也与上述理论有不一致的地方,风暴单体分裂后,反气旋式左移风暴L并未很快消亡,而是分裂后3个体扫时间内强度和尺度都有所增加,3个体扫后开始减弱消亡,即反气旋性左移风暴并未受到明显抑制。这里尝试探讨其中可能的原因,对流风暴14日15:16在济南齐河县境内形成东移发展,15:51移动到距雷达(方位角80°)34 km处分裂,分裂后的反气旋性风暴左移,向东北方向移动,16:02移到济阳东南部地区。分析16:00

地面资料场可见, 中尺度辐合线 (图 10) 呈准东西向分布, 位于章丘与济阳之间, 济阳东南部露点温度梯度不断增大, 存在露点锋生, 反气旋性左移风暴 L 移到济阳南部露点温度梯度大值区附近有所发展, 有利的地面形势抵消了反气旋性左移风暴受抑制的程度, 此后随着露点锋的消失, 反气旋性左移风暴 L 迅速减弱。需指出, 这只是一种推断, 需要更加细的高分辨率资料配合数值模拟加以验证。

6 对流风暴触发机制分析

6.1 华北冷涡与中空急流配合产生的次级环流

从穿过对流触发区 117°E 径向剖面图可以看到 (图 11a), 14 日 14:00 有一明显的中尺度径向环流, 低层为偏北风, 对流触发区 (37°N) 附近为较强的上升运动, 中心位于 700 hPa 附近, 而中高层转为偏南风, 形成南部上升、北部下沉的次级环流, 该次级环流的上升气流触发不稳定能量释放而产生对流。产生次级环流的原因是触发对流区位于华北冷涡东南象限气旋性曲率最大的地方, 当华北冷涡向东南方向缓慢移动时, 其东南侧正的局地涡度变化在低层产生较强的负变压, 其变压风促使气流辐合上升, 上下层上升运动贯通, 形成北部下沉、南部上升的径向次级环流。这一次级环流的产生使水平涡度增大, 根据涡度方程可知, 在涡度倾侧项中, 垂直运动有使水平涡管倾侧的趋势, 水平涡度

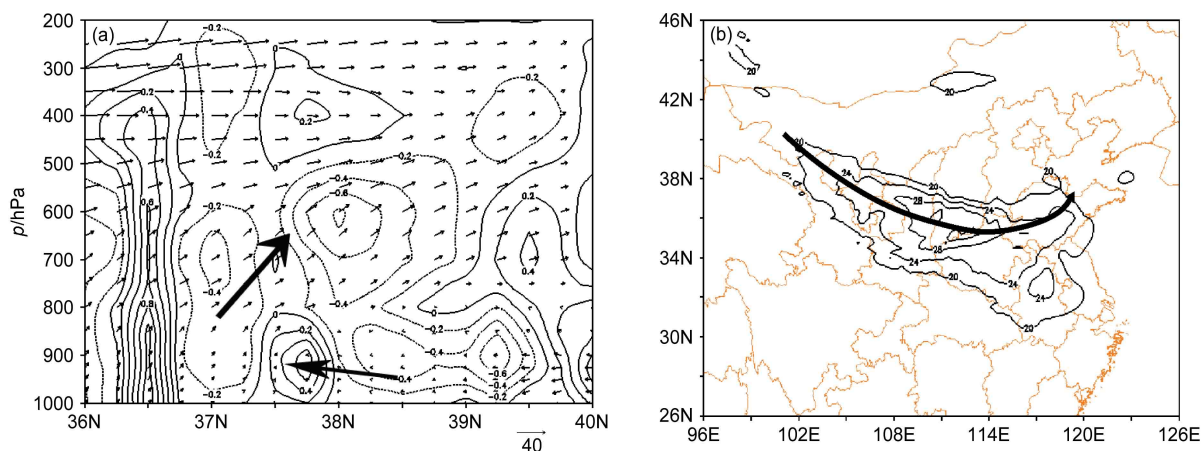
与上升运动相配合, 可使垂直涡度增大, 中尺度涡旋的发展, 使上升运动增强。同时对流触发区域位于 300 hPa 高空急流出口区的左侧 (图 11b), 其大尺度的辐散作用利于低层的辐合上升, 次级环流的上升支和天气尺度的上升运动相叠加, 使上升运动增强, 而使对流云团在上升运动区发展。

6.2 卫星图像特征

强对流的发生与大气低层积聚的能量有关, 能量的积聚表现为大气低层处于高温高湿状态, 但是能量的积聚不是自动释放的, 而是需要一个启动机制 (陈渭民等, 2014; 路秀娟等, 2010; 司福意等, 2013; 吴志彦等, 2017)。6 月 14 日下午 14:00, 从新疆东北部经甘肃中部到陕西和山西延伸到山东上空有急流 (图 11b), 14 日 15:00 的水汽图像上表现为晴空区对应的急流 J (图 12a), 由于急流 J 呈现西北—东南走向并伴随冷平流, 在急流轴左侧为强下沉运动, 冷空气下沉表现为一片晴空无云区。在对流触发区 (37°N , 117°E) 附近假相当位温表现为高能舌 (图 12b), 水汽图像上表现为暖湿云团 (图 12a 图中 A 位置), 当冷平流叠加到低层暖湿气流 A (对流触发区) 上方时, 大气的的不稳定度加大, 从而形成对流云团 A。

7 右移风暴 R 伴随的中气旋结构特征变化

本文分析的分裂后气旋性右移超级单体风暴伴



随的中气旋持续时间超过 2 h, 分析该中气旋从产生到成熟阶段期间的强度随时间变化, 利用济南多普勒雷达资料估计 16:14 至 16:38 中气旋的旋转速度 (图 13)。从图中可以看到, 中气旋发展初期 (16:14), 首先在中层 (4~5 km) 出现, 旋转速度约为 15 m/s。随后中气旋的旋转速度快速加强, 并向下和向上发展, 到 16:20, 中气旋顶部达到 6 km, 底部在 1.5 km。16:26 中气旋进一步向上和向下发展, 向上发展到 6.5 km, 向下发展到 1 km 以下, 接近地面, 最大旋转速度达到 24 m/s, 高度在 6.5 km 左右。16:31 中气旋强度继续增强, 最大

旋转速度 25 m/s, 高度在 6~7 km, 16:38 超级单体达到最强盛, 中气旋最大旋转速度达 29 m/s, 高度在 8 km 左右, 根据俞小鼎等 (2006) 中气旋的判据属于强中气旋。

本文研究的中气旋从中层开始发展, 并且逐渐向上向下发展, 最强旋转出现在高层, 这与典型超级单体内中气旋都是中层旋转最强有所不同。在 16:14 中气旋刚开始出现时, 悬垂回波就已经形成, 且出现有界弱回波区。随着中气旋的发展一直到 16:38 的成熟阶段, 弱回波区和悬垂结构依旧维持。可见, 本文中中气旋发展时间上落后于悬垂回波的发展。

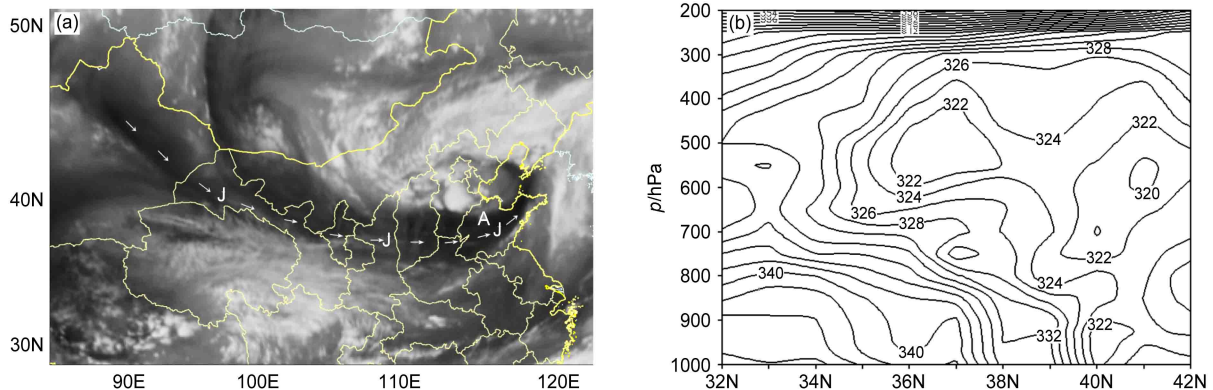


图 12 2016 年 6 月 14 日 (a) 15:00 FY-2G 卫星水汽图像 (箭头表示急流走向, J 表示急流, A 表示对流触发区) 和 (b) 14:00 沿 117°E 的假相当位温 (单位: K) 垂直剖面

Fig. 12 (a) FY-2G satellite water vapor image at 1500 BST 14 June 2016 and (b) vertical profile of pseudo equivalent potential temperature (K) along 117°E at 1400 BST 14 June 2016. The arrows in (a) indicate the jet flow directions, J indicates jet flow, A indicates the convection trigger area

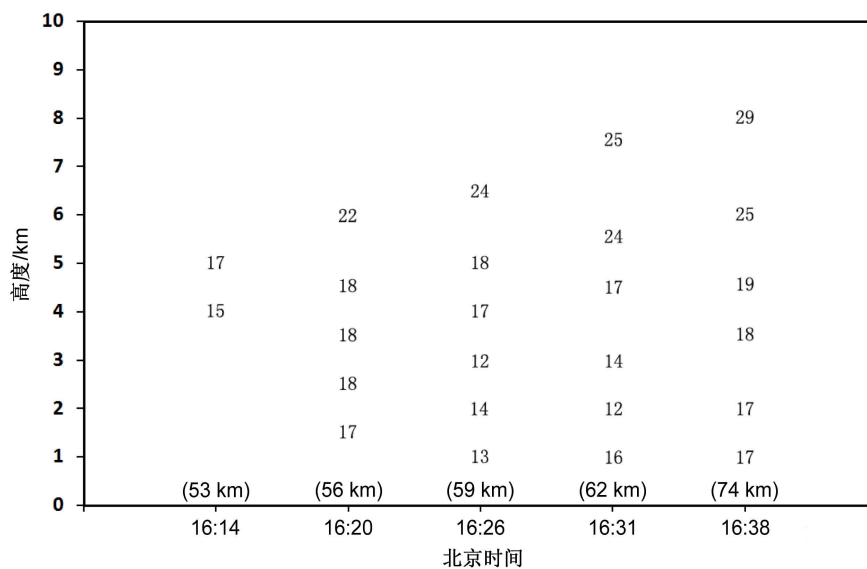


图 13 2016 年 6 月 14 日 16:14 至 16:38 每 6 min 气旋的旋转速度随时间和高度变化 (数值表示旋转速度, 单位: m/s; 最底部括号内数字表示最底层涡旋中心距离雷达的距离, 单位: km)

Fig. 13 Cyclone rotation speed changes with time and height in every 6 min from 1614 BST to 1638 BST 14 June 2016. The value indicates the rotation speed (m/s), the number in the bottom parentheses indicates the distance (km) between the bottom of the vortex center and the radar

8 结论和讨论

(1) 风暴发生在华北冷涡背景下, 在地面中尺度辐合线, 中低层短波槽前和高空急流的强辐散作用下触发对流, 中层干冷空气入侵, 加大了中低层的水汽和热量的平流差异, 使大气不稳定层结加大, 不稳地能量得到积累, 为午后到傍晚的对流风暴发展提供能量。较大的对流有效位能和深厚的强垂直风切变环境, 利于超级单体风暴的产生与发展。低层环境风随高度存在显著的顺时针切变, 非常利于气旋性右移超级单体风暴的发展。

(2) 风暴发展初期为一普通单体, 随后逐渐发展并发生分裂, 分裂后风暴移动方向左侧的单体逐渐减弱, 而右侧的单体发展成具有深厚中气旋的超级单体, 与超级单体动力学理论基本一致。但是, 也有与超级单体动力学理论不一致的地方, 分裂后的反气旋性左移风暴并没有收到明显的抑制, 反而有所加强, 推断其原因可能是沿着地面中尺度辐合线和露点锋生位置移动。

(3) 单体分裂先从中高层开始, 随后快速向下延伸到低层。分裂后左移的为反气旋性风暴, 右移的位气旋性风暴。而分裂前单体发展初期单体内就存在一个气旋—反气旋的涡旋对。分裂后右移的风暴发展为具有明显中气旋的超级单体风暴, 与经典的超级单体风暴有类似特征, 包括低层的入流缺口, 中高层的回波悬垂结构以及风暴顶的强辐散, 伴有持久深厚的中气旋。中气旋在中层(4.5~7.8 km)旋转最强, 旋转速度达 29 m/s。

(4) 本文研究的中气旋从中层开始发展, 并且逐渐向上向下发展, 最强旋转出现在高层, 这与典型超级单体内中气旋都是中层旋转最强有所不同, 并且中气旋发展时间上落后于悬垂回波的发展。

需要指出的是, 对流风暴的分裂过程并不罕见, 只是大多数情况下, 对流风暴中的气旋—反气旋相对较弱, 达不到超级单体中气旋的标准, 分裂后也没有进一步发展。而本文中研究的右移性风暴具有较强的生命史且其伴随的中气旋从中层开始发展, 并且逐渐向上向下发展, 最强旋转出现在高层, 这与典型超级单体内中气旋都是中层旋转最强有所不同, 其原因需要做更多的研究。

参考文献 (References)

陈宝君, 郑凯琳, 郭学良. 2012. 超级单体风暴中大冰雹增长机制的

- 模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 17(6): 767–778. Chen Baojun, Zheng Kailin, Guo Xueliang. 2012. Numerical investigation on the growth of large hail in a simulated supercell thunderstorm [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17(6): 767–778. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.14
- 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 2012. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析 [J]. *大气科学*, 36(5): 929–944. Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Xiao Xian, et al. 2012. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud model and 4-D variational assimilation on radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(5): 929–944. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11132
- 陈涛, 代刊, 张芳华. 2013. 一次华北飑线天气过程中环境条件与对流发展机制研究 [J]. *气象*, 39(8): 945–954. Chen Tao, Dai Kan, Zhang Fanghua. 2013. Study on ambient condition and initialization mechanism of convection in a severe squall line storm event in North China [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 39(8): 945–954. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.08.001
- 陈渭民, 何永健, 邱新法, 等. 2014. 卫星云图观测原理和分析预报 [M]. 北京: 气象出版社, 322–334. Chen Weimin, He Yongjian, Qiu Xinfa, et al. 2014. Satellite Cloud Image Observation Principle and Analysis Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 322–33.
- 陈晓燕, 付琼, 岑启林, 等. 2011. 黔西南州一次分裂型超级单体风暴环境条件和回波结构分析 [J]. *气象*, 37(4): 423–431. Chen Xiaoyan, Fu Qiong, Cen Qilin, et al. 2011. Analysis of environmental conditions and the structure of radar echo for a split supercell in southwest prefecture of Guizhou [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 37(4): 423–431. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.4.005
- 刁秀广, 杨晓霞, 朱君鉴, 等. 2008. 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*, 27(3): 657–667. Diao Xiuguang, Yang Xiaoxia, Zhu Junjian, et al. 2008. The air flow structure and characteristic of CINRAD-products in a long-life storm [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27(3): 657–667.
- 段亚鹏, 王东海, 刘英. 2017. “东方之星”翻沉事件强对流天气分析及数值模拟 [J]. *应用气象学报*, 28(6): 666–677. Duan Yapeng, Wang Donghai, Liu Ying. 2017. Radar analysis and numerical simulation of strong convective weather for "oriental star" depression [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 28(6): 666–677. doi:10.11898/1001-7313.20170603
- 高帆, 褚颖佳, 胡鹏, 等. 2018. 一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征和维持机制 [J]. *气象科技*, 46(2): 336–342. Gao Fan, Chu Yingjia, Hu Peng, et al. 2018. Radar observation characteristics and maintenance mechanisms of a long life supercell storm [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 46(2): 336–342. doi:10.19517/j.1671-6345.20170242
- 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 2018. 山东半岛两次海风锋引起的强对流天气对比 [J]. *应用气象学报*, 29(2): 245–256. Gao Xiaomei, Yu Xiaoding, Wang Lingjun, et al. 2018. Comparative analysis of two strong convections triggered by sea-breeze front in Shandong

- Peninsula [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 29(2): 245–256. doi:10.11898/1001-7313.20180210
- 侯淑梅, 王秀明, 尉英华, 等. 2018. 山东省初秋一次大范围强对流过程落区和抬升触发机制分析 [J]. *气象*, 44(1): 80–92. Hou Shumei, Wang Xiuming, Wei Yinghua, et al. 2018. Analysis of an extensive severe convection falling area and lifting trigger mechanism in early autumn at Shandong Province [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 44(1): 80–92. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.007
- Klemp J B. 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 19: 369–402. doi:10.1146/annurev.fl.19.010187.002101
- 路秀娟, 钟青, 陈涛. 2010. 局地强对流系统发展多样性的个案研究 [J]. *气候与环境研究*, 15(2): 129–140. Lu Xiujuan, Zhong Qing, Chen Tao. 2010. A case study of diversity in the evolution of a local severe convective system [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15(2): 129–140. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.02.03
- 牛奔, 张家国, 吴涛, 等. 2016. 鄂西北一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析 [J]. *暴雨灾害*, 35(1): 45–52. Niu Ben, Zhang Jianguo, Wu Tao, et al. 2016. Analysis on weather process of supercell storm in northwest of Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 35(1): 45–52. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.01.007
- 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 2008. 一次强飚线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析 [J]. *气象学报*, 66(4): 621–636. Pan Yujie, Zhao Kun, Pan Yinong. 2008. Single-Doppler radar observation of a heavy precipitation supercell on a severe squall line [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 66(4): 621–636. doi:10.11676/qxxb2008.059
- 覃靖, 潘海, 刘蕾. 2017. 柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析 [J]. *气象*, 43(6): 745–755. Qin Jing, Pan Hai, Liu Lei. 2017. Analysis of supercell storm leading to disastrous hail in Liuzhou on 9 April 2016 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 43(6): 745–755. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.011
- 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 2003. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 329pp. Shou Shaowen, Li Shenshen, Yao Xiuping. 2003. *Mesoscale Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: Meteorological Press, 329pp.
- 司福意, 周顺武, 王传辉, 等. 2015. 豫中北一次重致灾强对流天气过程剖析 [J]. *高原气象*, 34(6): 1732–1740. Si Fuyi, Zhou Shunwu, Wang Chuanhui, et al. 2015. Analysis of a severe convection event causing heavy disaster in North Central of Henan [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34(6): 1732–1740. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00027
- 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 等. 2011. 2009 年 6 月 3~4 日黄淮地区强飚线成熟阶段特征分析 [J]. *大气科学*, 35(1): 105–120. Sun Hulin, Luo Yali, Zhang Renhe, et al. 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3–4 June 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(1): 105–120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.09
- 王福侠, 俞小鼎, 闫雪瑾. 2014. 一次超级单体分裂过程的雷达回波特征分析 [J]. *气象学报*, 72(1): 152–167. Wang Fuxia, Yu Xiaoding, Yan Xuejin. 2014. Analysis of the splitting processes of the supercell storms based on the Doppler weather radar data [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 72(1): 152–167. doi:10.11676/qxxb2014.010
- 王俊, 俞小鼎, 邵庆国, 等. 2011. 一次强烈雹暴的三维结构和形成机制的单、双多普勒雷达分析 [J]. *大气科学*, 35(2): 247–258. Wang Jun, Yu Xiaoding, Tai Qingguo, et al. 2011. Analysis on the three-dimensional structure and formation mechanism of a severe hailstorm with single- and dual-Doppler radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(2): 247–258. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.05
- 吴志彦, 闵锦忠, 赵海军. 2017. 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*, 37(3): 54–61. Wu Zhiyan, Min Jinzhong, Zhao Haijun. 2017. Characteristics of a cold vortex related severe convection on satellite water vapor imagery [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 37(3): 54–61. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.007
- 阎丽凤, 杨成芳. 2014. 山东省灾害性天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 390pp. Yan Lifeng, Yang Chengfang. 2014. *Handbook of Severe Weather Forecasting Technology in Shandong Province (in Chinese)* [M]. Beijing: Meteorological Press, 390pp.
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 116–129. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. 2006. *Doppler Weather Radar Principle and Business Application (in Chinese)* [M]. Beijing: Meteorological Press, 116–129.
- 朱君鉴, 刁秀广, 曲军, 等. 2008. 4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析 [J]. *气象*, 34(12): 21–26. Zhu Junjian, Diao Xiuguang, Qu Jun, et al. 2008. Study on the damage wind with Doppler radar products in Linyi, Shandong on 28 April 2006 [J]. *Meteorology Monthly (in Chinese)*, 34(12): 21–26. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.12.003