

基于双极化雷达的山东地区强对流过程分析

崔金梦^{1,2}

¹山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南

²山东省气象台, 山东 济南

收稿日期: 2022年8月20日; 录用日期: 2022年9月20日; 发布日期: 2022年9月29日

摘要

为提高冷涡背景下强对流过程气象预报服务的精细化水平, 利用MICAPS常规高空和地面观测资料, 结合济南和青岛的双极化雷达资料等, 对2020年5月16~18日山东大范围强对流天气过程进行了分析研究。结果表明, 此次过程主要受冷涡旋转南下及大气强不稳定影响, 地面辐合线持续稳定存在, 回波不断发展, 高反射率因子回波维持时间较长; 从探空图来看, 大尺度抬升条件非常有利于触发强对流天气, 700 hPa以下上升速度达到-2~-3 m/s, 并且在较强垂直风切变条件下对流组织性较强; 雷达回波表明导致莱西大冰雹和11级阵风的是1个超级单体, 由造成莱州强天气的单体发展增强而成, 导致莱西出现大冰雹的强回波对应Z_{DR}和CC较低值, 近地面Z_{DR}为0, CC为0.8~0.9。在今后的短临预报中要根据观测资料和雷达数据及时更新判断, 努力筑牢气象防灾减灾第一道防线。

关键词

双极化雷达, 山东地区, 强对流过程

Analysis of Severe Convective Process in Shandong Province Based on Dual-Polarization Radar

Jinmeng Cui^{1,2}

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong Province, Jinan Shandong

²Shandong Meteorological Observatory, Jinan Shandong

Received: Aug. 20th, 2022; accepted: Sep. 20th, 2022; published: Sep. 29th, 2022

Abstract

In order to improve the refinement of meteorological forecasting services for the severe convective process in the context of cold vortex, the large-scale severe convective weather process in

Shandong from May 16 to 18, 2020 was analyzed and studied by using MICAPS conventional high altitude and ground observation data, combined with dual-polarization radar data in Jinan and Qingdao. The results show that the process is mainly influenced by the cold vortex southward and strong air instability, the stable presence of surface convergence lines, so the radar echoes keep developing and high reflectance factor echoes last for a long time. In terms of sounding maps, the large-scale lifting conditions are very favorable for triggering severe convective weather, with a rise rate of $-2\sim-3$ m/s below 700 hPa, with strong convective organization under stronger vertical wind shear conditions. Radar echoes indicate that what caused the large hail and 11th storm in Laixi was a super monomer, and the strong echoes that caused the large hail in Laixi correspond to lower Z_{DR} and CC values, with near-surface Z_{DR} of 0 and CC of 0.8~0.9. In short-time forecasts, we should update our judgments based on observations and radar data in a timely manner, and strive to build up the first line of defense for meteorological disaster prevention and mitigation.

Keywords

Dual-Polarization Radar, Shandong Province, Severe Convective Process

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

强对流天气是一种深对流天气过程，由于大气垂直对流强烈发展而产生雷雨、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。山东省内地形条件特殊，北部和东部濒临渤海、渤海海峡和黄海，中有泰山地形阻隔，拥有触发强对流的水汽条件和抬升条件。山东的强对流天气以雷暴大风、冰雹和短时强降水为主，郁珍艳等[1]分析了华北冷涡背景下强对流天气的基本特征，苏永玲等[2]归纳了京津冀地区强对流的时空分布和天气学特征，曹钢锋等[3]给出了山东省强对流天气的特征。双偏振雷达可以推断强对流风暴特别是超级单体风暴的微物理结构，对于强对流过程的复现效果较好，例如，黄秀韶等[4]分析了2020年8月6日发生在山东曲阜一带的强降水风暴合并前后双偏振参量特征和微物理特征，刁秀广等[5]给出了2019年8月16日诸城超级单体风暴双偏振参量结构特征，赵淑芳等[6]研究了山东极端强降雨分钟雨量、Z-R关系和风暴结构演变特征。

5月17日强对流过程范围广、强度大、致灾性强，因冰雹导致直接经济损失共计17.36亿元，因大风导致直接经济损失约0.53亿元。尽管针对此次过程已经提前发布预警信号，但对冰雹的范围和强度估计严重不足，所以在短临预报中，如何利用双极化等多源实况资料把握强对流天气的生消和发展值得研究。

2. 强对流过程实况

受高空冷涡和地面气旋共同影响，2020年5月16~18日山东省出现大范围强对流天气。16日下午到夜间山东省北部地区局部出现冰雹和雷雨大风；17日傍晚到夜间山东省大部地区出现大范围的冰雹、雷雨大风和短时强降水，其中德州、滨州、东营、济南、泰安、济宁、枣庄、临沂、淄博、潍坊、青岛、烟台、威海和日照共14市出现冰雹，冰雹最大直径超6 cm（位于青岛，出现在16日21时前后）。鲁东南和半岛地区普遍出现中雨局部大雨或暴雨并伴有雷电，过程降水量超过50 mm的有51个站，

威海育黎镇初中站最大为 104.6 mm；如图 1 (左)所示，小时最大降水量出现在威海荣成城西站和费县费城站，为 56.9 mm (18 日 00 时和 17 日 22 时)，共 120 个站点出现短时强降水，时间集中在 17 日夜间；山东地区共出现闪电 5758 次，其中 17 日 21~22 时最强，1 小时闪电次数高达 2205 次；如图 1 (右)所示，山东大部地区出现 8~10 级的雷雨阵风，长岛砣矶最大为 12 级(36.8 m/s，出现在 16 日 21 时 35 分)。

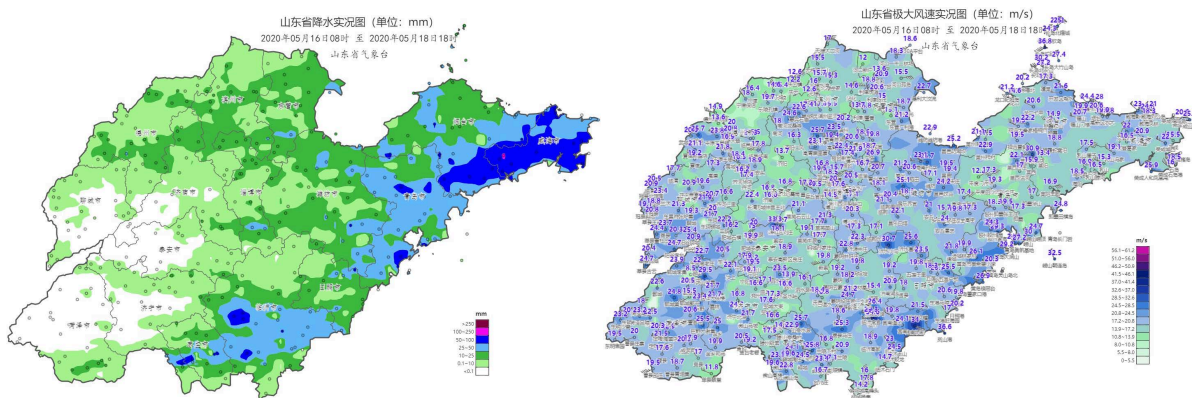


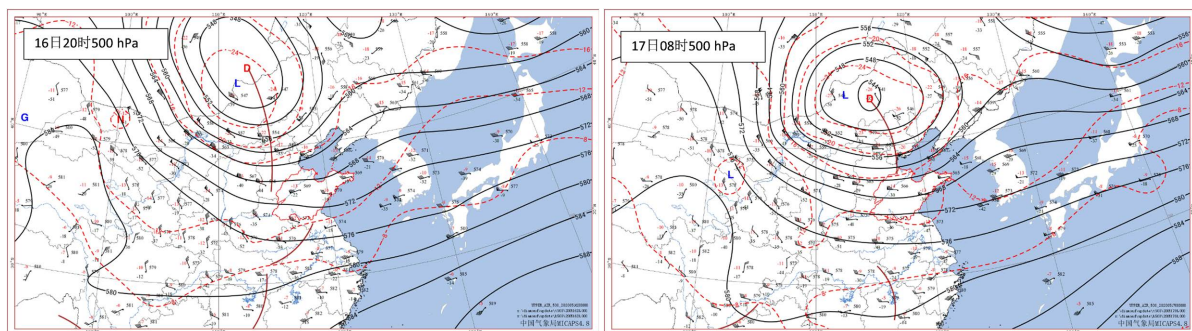
Figure 1. Maximum hourly precipitation (left) and maximum wind (right) in Shandong Province from 08:00 on May 16 to 18:00 on May 18

图 1. 5 月 16 日 08 时至 18 日 18 时山东省小时最大降雨量(左)和极大风(右)

3. 强对流天气成因及机理分析

3.1. 环流形势分析

图 2~5 分别是此次过程对应的 500 hPa、700 hPa、850 hPa 和地面天气形势，由图可见强对流的典型形势。高空东北冷涡随时间推移不断旋转南落，高空冷涡横槽逐渐转竖，到 18 日 08 时时冷涡徘徊在渤海湾上空，系统深厚较强，700 hPa 和 850 hPa 有发展起来的低涡，地面有气旋不断往偏东方向移动，系统在整体上呈现出明显的后倾结构。16 日 20 时，山东位于高空冷涡东南象限，500 hPa 冷涡后部存在 26~30 m/s 的急流；17 日 20 时 700 hPa 可见山东的南部 - 淮河一带有一条暖脊，850 hPa 暖脊在此时伸展到鲁东南 - 半岛南部沿海一带，低涡中心位于山东，切变线横跨山东的西南到东北方向，风速为 12~16 m/s 达到急流强度；17 日 20 时到 18 日 08 时，850 hPa 与 500 hPa 温度相比上下温差达 28℃~30℃，形成上冷下暖的对流性不稳定层结；到 18 日 08 时山东处于冷涡控制当中。地面气旋中心 17 日 20 时位于鲁东南地区，18 日 08 时移到渤海海峡和黄海北部交界一带。整体来看，在强对流过程发展较为旺盛的 17 日夜间，山东处于高空冷涡东南象限、低层低涡右侧、地面气旋东北象限，具有非常好的抬升触发对流条件。



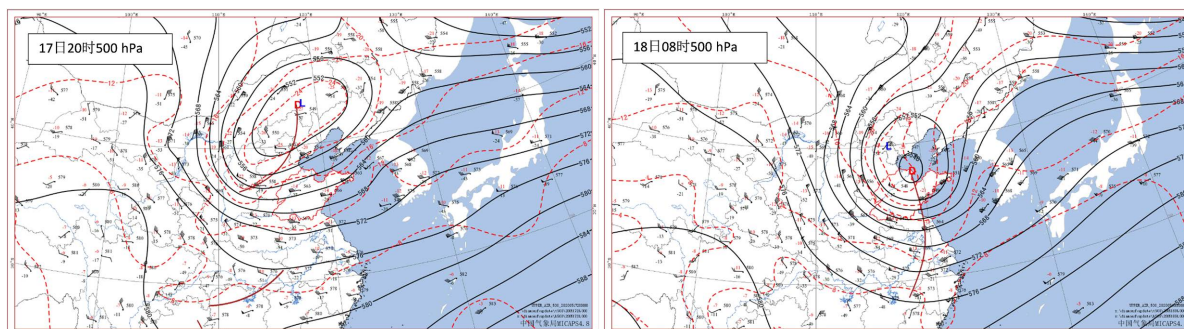


Figure 2. Synoptic situation of 500 hPa

图 2. 500 hPa 天气形势

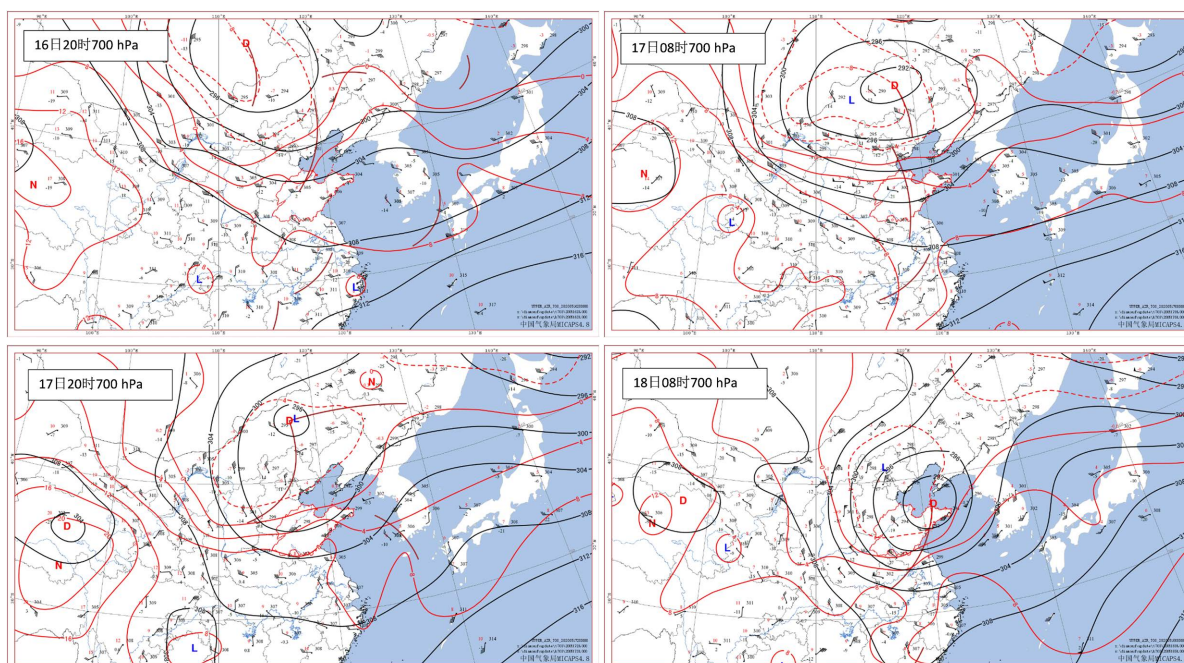


Figure 3. Synoptic situation of 700 hPa

图 3. 700 hPa 天气形势

3.2. 对流环境条件分析

图 6 可见, 17 日夜间, 青岛地区在 925 hPa 以下有明显逆温存在, 低层较湿, 中层较干, 呈现明显的喇叭口状, 同时 0~6 km 垂直风切变强达 34 m/s, 最低逆温层抬升 CAPE 为 2536 J/kg, 融化层高度为 2.9 km, 且在零度层附近存在干层。-20°C 层(6.6 km)与零度层(3.7 km)之间的厚度定义为暖云层厚度, 此时暖云层厚度差为 2.9 km。较大的 CAPE 值、强垂直风切变和适宜的融化层高度, 说明青岛发生冰雹的潜势很大。尽管自由对流高度较高, 但由于此次过程的大尺度垂直上升运动较强, 可触发强不稳定能量释放, 在强垂直风切变下, 对流组织性较强, 易导致出现多灾种强对流天气。

图 7 是徐州探空图, 可以看到, 17 日 08 时该地区的大气层结已经不稳定, 0~6 km 垂直风切变约为 10 m/s, 700 hPa 附近大气的露点曲线与层结曲线比较接近, 湿度条件较好, 为短时强降水的发生提供了较好的水汽条件; 600 hPa 附近, 温度先随高度下降、再随高度有弱的上升、最后又随高度下降, 在这个层结上有逆温层存在, 冰晶或过冷却水滴在这个层结上面融化、碰撞, 形成更大的水滴, 被强大的上升

气流带到高空有利于形成冰雹；在 600 至 500 hPa 高层之间(大致对应-10℃层)较干，有利于形成冰雹和雷暴大风。17 日 20 时 CAPE 增大至接近 3000 J/kg，850 hPa 以下为西南风，风向随高度顺转，中低层有暖平流；700 hPa 到 500 hPa 高度，风向随高度升高有明显的逆转，中高层有冷平流，这样在垂直方向上就形成了上冷下暖的层结分布，有利于不稳定能量的形成和积累，且此时 0~3 km 垂直风切变大约为 16 m/s，低空剧烈的风切变有利于风暴的形成，导致强对流天气的产生。

3.3. 中尺度对流系统演变特征分析

图 8 是 17 日 19 时 07 分济南雷达的部分双极化特征，可以看到，鲁西北地区有较多单体发展，局部反射率因子大于 60 dBZ，对应的 Z_{DR} 在 3.5~4 之间， K_{DP} 在冰雹区域局部 7 以上，CC 有一些小于 0.8 的情况且出现了波束非均匀填充，考虑冰雹融化的影响。济宁地区出现了一个反射率 60 dBZ 以上的单体， Z_{DR} 3.5 局部超过 5。

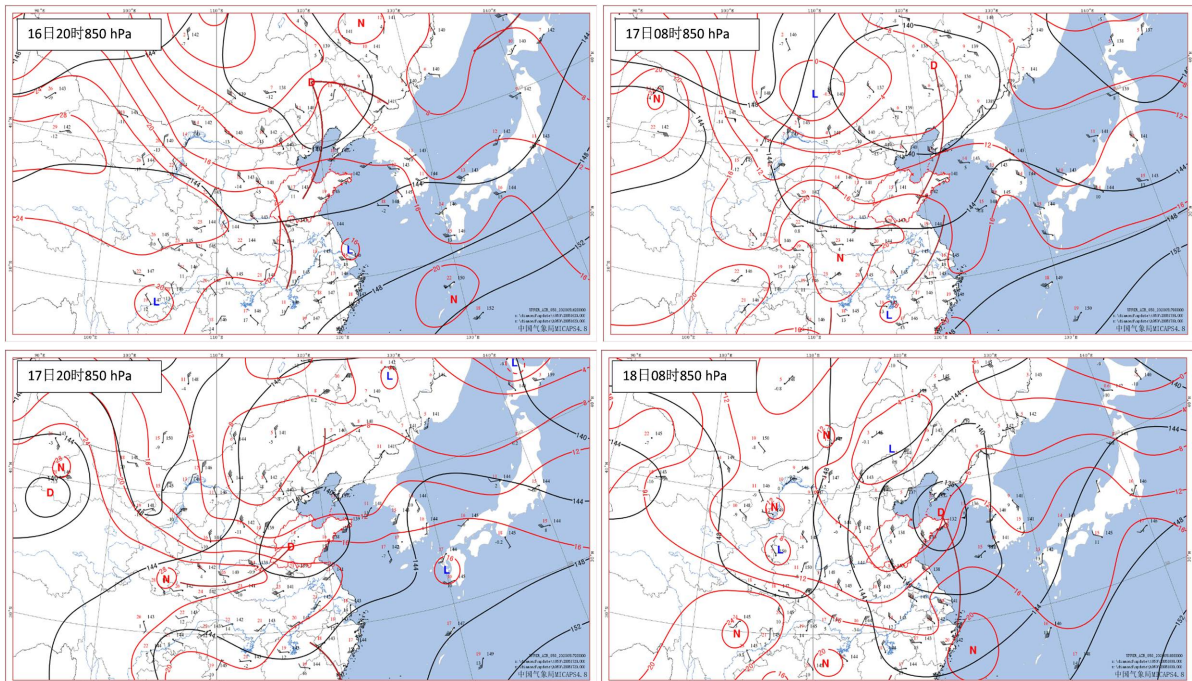


Figure 4. Synoptic situation of 850 hPa
图 4. 850 hPa 天气形势

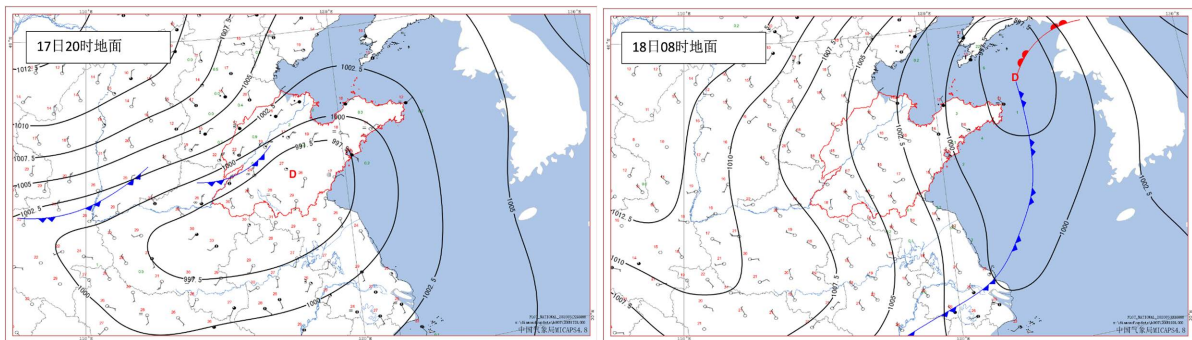


Figure 5. Synoptic situation of surface
图 5. 地面天气形势

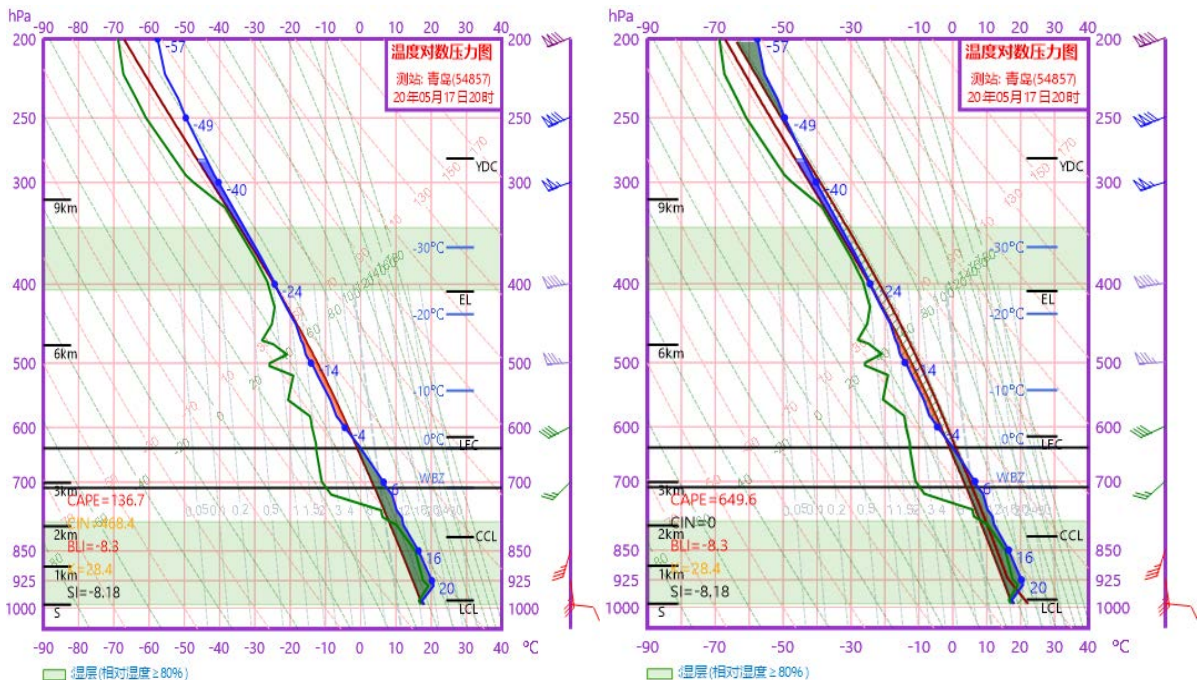


Figure 6. Qingdao sounding map before (left) and after (right) correction at 20:00 on May 17
 图 6. 5月17日20时订正前(左)和订正后(右)青岛探空图

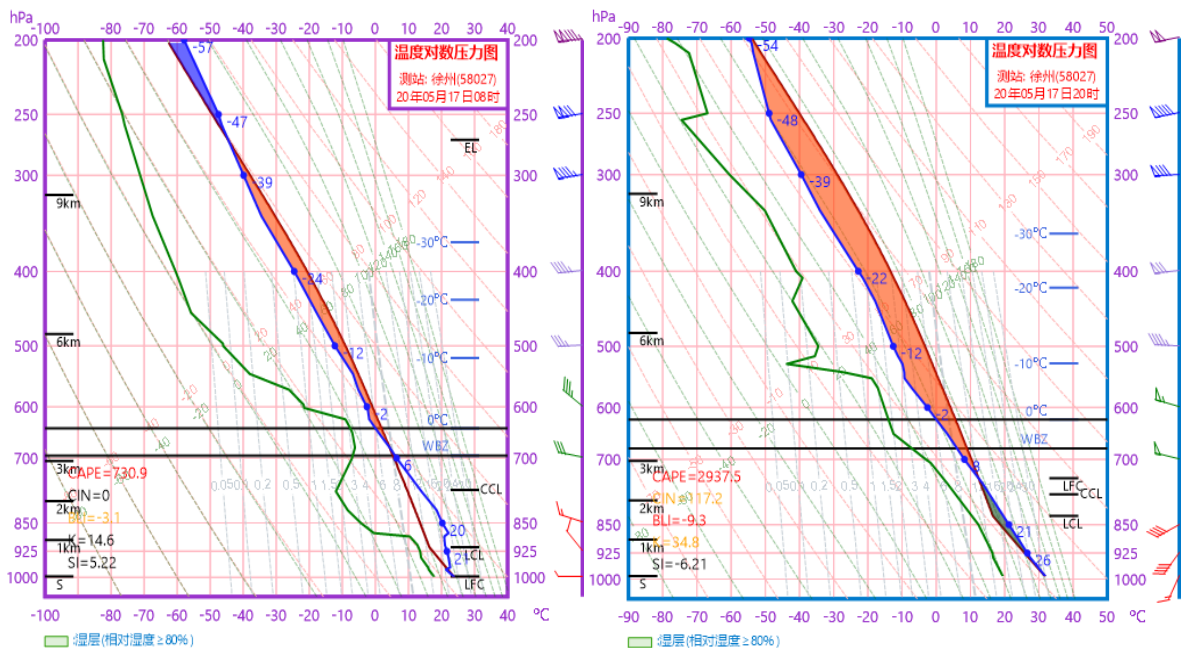


Figure 7. Xuzhou sounding map at 08:00 (left) and 20:00 (right) on May 17
 图 7. 5月17日08时(左)和20时(右)徐州探空图

图 9 给出了青岛雷达组合反射率的演变图, 19 时多单体风暴主体位于潍坊地区, 最大反射率因子约 71 dBZ, 19 时 29 分回波向东移动, 中心不断加强, 最大反射率因子达 77 dBZ, 20 时 31 分在半岛地区有一条线性多单体风暴形成, 后续不断有单体生成, 形成列车效应, 21 时 34 分可以看到明显的线状对流带。

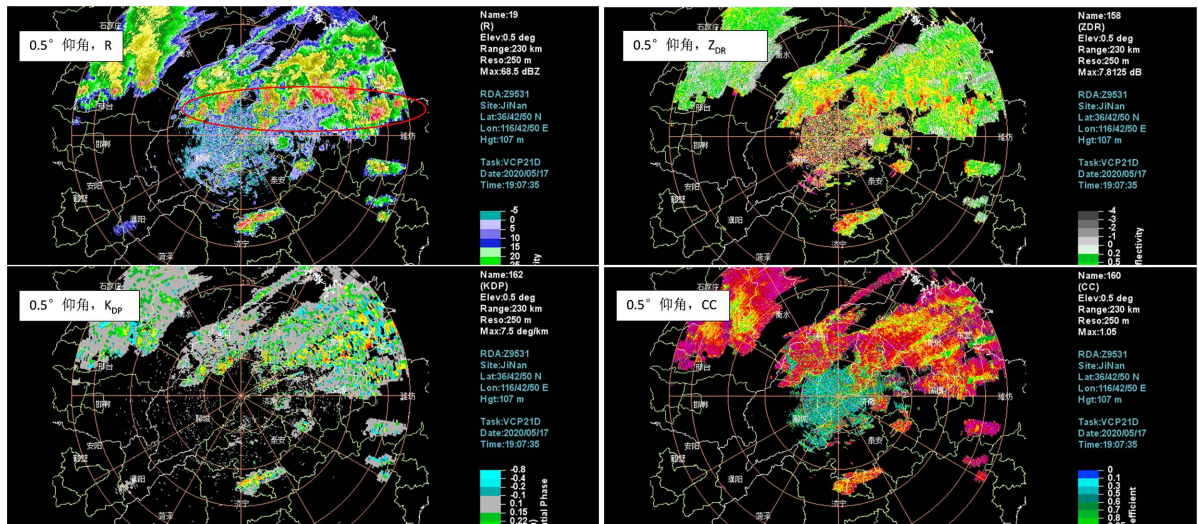


Figure 8. Radar dual-polarization characteristics of Jinan at 19:07 on May 17
 图 8. 5月17日19时07分济南雷达双极化特征

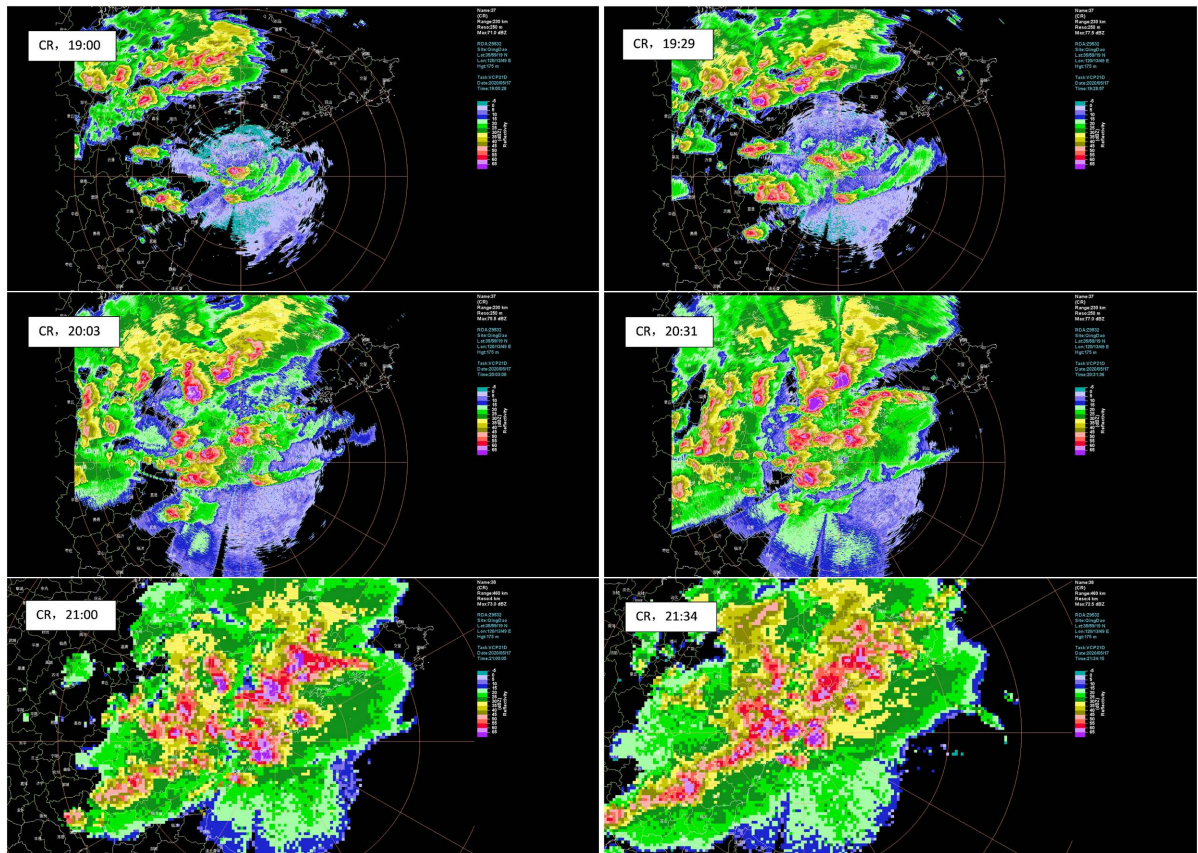


Figure 9. Evolution of combined reflectivity of Qingdao radar
 图 9. 青岛雷达组合反射率演变

图 10 是 19 时 51 分的青岛雷达组合反射率和其他双极化特征展示。在潍坊和莱州分别存在超级单体，此处存在冰雹，回波反射率因子强达 76 dBZ，对应的 Z_{DR} 强回波后面径向出现明显条状的负值区，是由于大冰雹造成的衰减所致。CC 强回波后面径向出现明显小值区，是由于强回波后面雷达波束非均匀填充

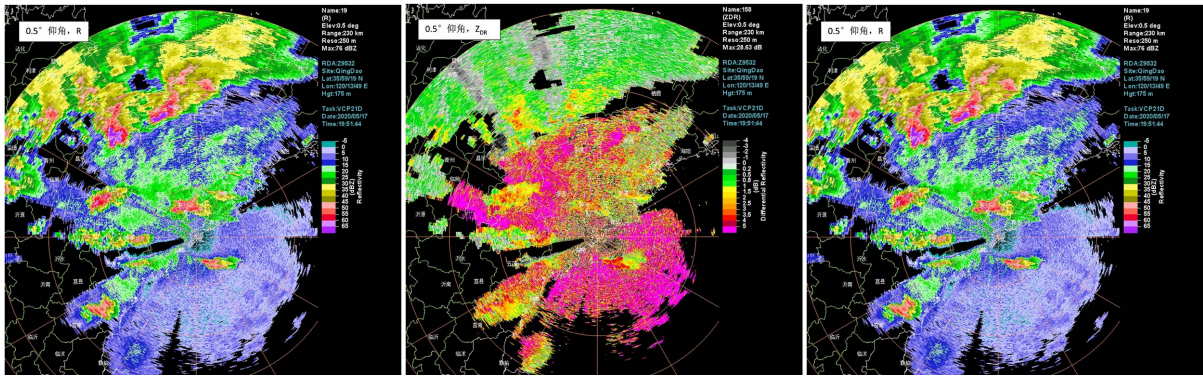


Figure 10. Radar dual-polarization characteristics of Qingdao at 19:51 on May 17
图 10. 5 月 17 日 19 时 51 分青岛雷达的双极化特征

所致，水平极化反射率在 68 dBZ 以上，冰雹直径至少 40 mm 以上(莱西测到冰雹直径 60 mm)。

19 时 57 分可见明显的莱州风暴(图略)。1.5°仰角上面中心反射率因子图上可见大于 70 Dbz 的超级单体，识别到其中的强中气旋旋转速度达 25 m/s，2.4°仰角上强度有所降低但是在 69 dBZ 左右，3.3°仰角上强度略低，抬高仰角之后大值依然存在，可见明显的回波悬垂，强回波悬垂 61 dBZ 伸展到 6.4 km，同时莱州 Z_{DR} 接近 0，CC 小于 0.9， K_{DP} 在 3~4 之间，有大冰雹伴随降水发生。图 11 是 5 月 17 日 20 时 37

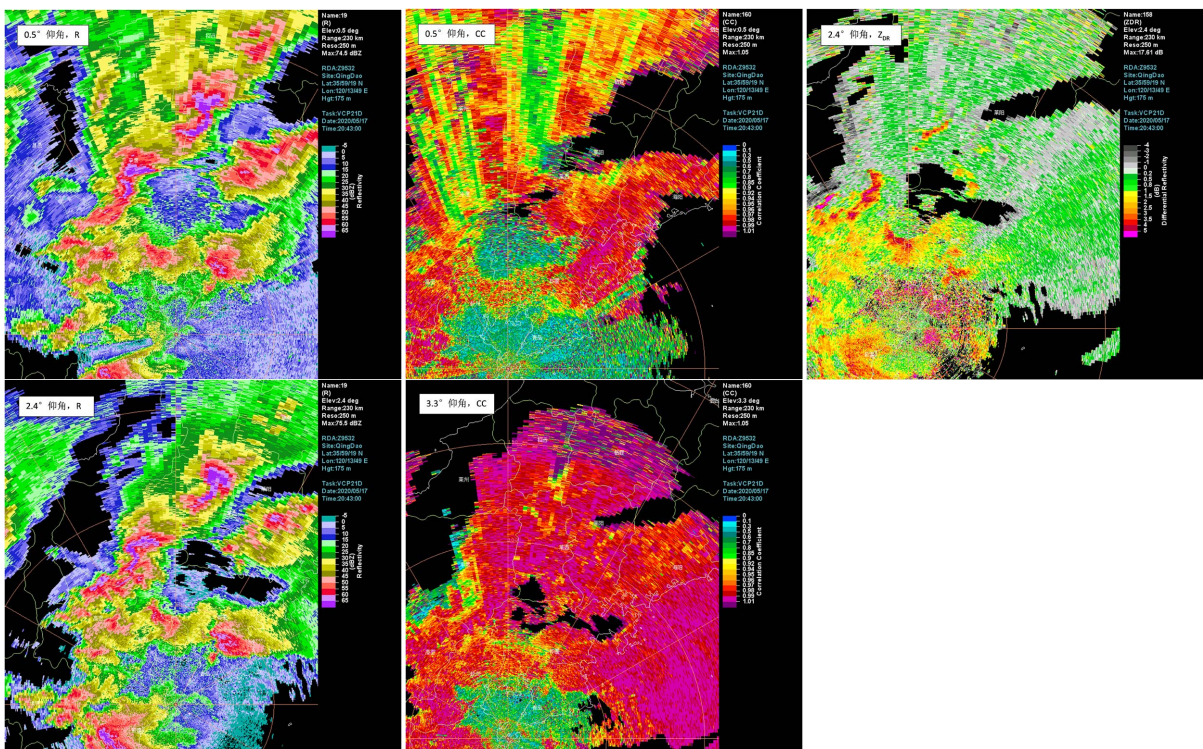


Figure 11. Radar dual-polarization characteristics of Qingdao at 20:37 on May 17
图 11. 5 月 17 日 20 时 37 分青岛雷达的双极化特征

分的青岛雷达的双极化特征，图中可见在莱西和莱州之间右一明显弓状回波，20 时 37 分强回波移动方向有明显的 Z_{DR} 弧， Z_{DR} 柱强回波大于 65 dBZ，伸展高度高， Z_{DR} 强回波后面径向出现明显负值区，是由于大冰雹造成的衰减所致，CC 小于 0.9，CC 强回波后面径向出现明显小值区，是由于强回波后面雷达波

束非均匀填充所致, Z_{DR} 在 0 值附近, KDR 缺值弓形回波前沿低层大速度区, 伴随着强辐散, 为典型的大冰雹特征。

4. 总结与讨论

受冷涡旋转南下、地面气旋及大气强不稳定影响, 16~18 日山东地区出现了多灾种强对流性天气, 地面辐合线持续稳定存在, 回波不断发展, 高反射率因子回波维持时间较长, 造成山东中东部地区大范围的强对流天气。从环流形势来看, 在强对流过程发展较为旺盛的 17 日夜间, 山东处于高空冷涡东南象限、低层低涡右侧、地面气旋东北象限, 具有非常好的抬升触发对流条件。从对流环境来看, 这次过程大尺度抬升条件非常有利于触发强对流天气, 700 hPa 以下上升速度达到 $-2\sim-3$ m/s, 上升速度大, 垂直风切变较强, 对流组织性较强, 且在垂直方向上存在上冷下暖的层结分布, 有利于不稳定能量的形成和积累, 导致强对流天气的发生。从中尺度系统的雷达双极化特征来看, 导致莱西大冰雹和 11 级阵风的是 1 个超级单体, 强中气旋的旋转速度达 25 m/s, 为上游造成莱州强天气的单体发展增强而成, 双偏振雷达产品对冰雹识别有很好的参考, K_{DP} 、 Z_{DR} 、CC 对于冰雹识别可信度较高。

基金项目

山东省气象局科学技术研究项目青年项目“基于多模式的山东短时强降水检验研究”(2021SDQN01); 山东省气象台科研项目“2021 年汛期山东省暴雨过程分析”(SDQXT202105)。

参考文献

- [1] 郁珍艳, 何立富, 范广洲, 等. 华北冷涡背景下强对流天气的基本特征分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(1): 89-94.
- [2] 苏永玲, 何立富, 巩远发, 等. 京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析[J]. 气象, 2011, 37(2): 177-184.
- [3] 曹钢锋. 山东天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 1988.
- [4] 黄秀韶, 刁秀广, 韩永清, 等. 一次强降水风暴回波合并前后双偏振特征分析[J]. 气象科学, 2022, 42(3): 410-419.
- [5] 刁秀广, 郭飞燕. 2019 年 8 月 16 日诸城超级单体风暴双偏振参量结构特征分析[J]. 气象学报, 2021, 79(2): 181-195.
- [6] 赵淑芳, 张立文, 王倩, 等. 山东极端强降雨分钟雨量、Z-R 关系和风暴结构演变特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 806-814.