

万夫敬,江敦双,赵传湖. 2017年8月6日山东罕见雷暴大风成因分析[J].海洋气象学报,2018,38(2):60-66.
Wan Fujing, Jiang Dunshuang, Zhao Chuanhu. Analysis of an unusual thunderstorm gale in Shandong on 6 August 2017 [J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(2):60-66. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.008. (in Chinese)

2017年8月6日山东罕见雷暴大风成因分析

万夫敬^{1,2},江敦双¹,赵传湖³

(1. 青岛市气象局,山东 青岛 266003; 2. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心,山东 青岛 266003; 3. 中国海洋大学物理海洋实验室,山东省高校海洋-大气相互作用与气候重点实验室,山东 青岛 266100)

摘要: 利用多普勒天气雷达资料和常规观测资料,分析了2017年8月6日山东东部地区一次罕见的极大风速达到12~13级的雷暴大风事件。此次过程发生在高空西北气流影响下,中低层强垂直风切变和较大的温度直减率为雷暴大风的出现提供了有利环境条件。中尺度边界辐合线不断触发新的对流单体,最终形成飚线结构。此次过程10级以上雷暴大风在雷达图上的主要特征包括:近地层显著的径向辐散(速度差 $\geq 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)或者大的径向速度(速度绝对值 $\geq 29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);较显著的中层径向辐合(MARC)特征(速度差 $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)或者强中反气旋结构(速度差 $\geq 31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);中气旋底部高度扩展至2 km以下等特征。

关键词: 中气旋; 飚线; 雷暴大风; 中层径向辐合

中图分类号: P458.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)02-0060-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.008

Analysis of an unusual thunderstorm gale in Shandong on 6 August 2017

WAN Fujing^{1,2}, JIANG Dunshuang¹, ZHAO Chuanhu³

(1. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 3. Physical Oceanography Laboratory and Key Laboratory of Ocean-Atmospheric Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract Based on the data from Doppler weather radar and regular observations, the characteristics of a thunderstorm gale with the maximum instantaneous wind over 12-13 grade occurring in the east of Shandong are analyzed. It is a thunderstorm gale case under the influence of upper northwestern current, and the lower vertical wind shear and high temperature lapse rate are favorable for the occurrence of it. The mesoscale boundary convergence line constantly triggers new convection cells and eventually the squall line structure comes into being. Features such as obvious radial divergence on surface layer (velocity difference $\geq 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) or large radial velocity region (absolute value of velocity $\geq 29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), MARC (velocity difference $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), strong meso-anticyclone at middle level (velocity difference $\geq 31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and mesocyclone bottom height below 2 km are evident in the radial velocity chart for the thunderstorm gale stronger than storm in the process. These characteristics are of significant importance in disastrous gale detection and its early warning.

Key words mesocyclone; squall line; thunderstorm gale; MARC

收稿日期:2018-01-31; 修订日期:2018-04-08

基金项目:山东省气象局科研项目(SDYBY2017-06, sqd2017-01, sqd2013-02); 青岛市气象局科研项目(2016qdxq1, 2015qdxq03, 2014qdxq02)

作者简介:万夫敬,女,硕士,工程师,主要从事中短期天气预报和中尺度灾害性天气预报研究, fwan1985@163.com。

引言

在对流风暴产生的灾害性天气现象中,雷暴大风因发生频率高、致灾性强且预报预警难度大等特征,其产生的环境条件、触发机制和临近预警一直是强对流灾害性天气研究中的重要内容之一^[1]。1978年 Fujita^[2]提出了弓状回波的概念模型,指出在发展成熟的弓状回波向前突出的顶部,对应灾害性大风区。其后 Smull and Houze^[3-4]根据观测事实和数值模拟指出,飊线系统中存在3支主要气流:主上升气流、飊前低层流向后部的斜升气流和飊后中低层流向前部的下沉入流,后部下沉气流到达地面而产生的直线风造成弓状回波顶部的灾害性大风。

灾害性地面大风产生的原因很多,如弓状回波中的 γ 中尺度涡旋会造成局地强风,灾害性大风由后侧入流急流与中涡旋的线性叠加造成^[5-9];强单体风暴产生的下击暴流也会导致地面大风的产生^[10-11];冰雹重力拖曳和融化过程对强风暴下击暴流的产生具有重要作用^[12];飊线发生时也常伴随着破坏性很强的龙卷风或下击暴流,其后部的入流和地面高低压间的气压梯度力可能是造成飊线大风的原因^[13]。国内多普勒天气雷达投入业务应用以来,对多个飊线个例研究表明,飊线回波具有线状分布,移动速度快,有时伴有中气旋等特点,雷暴大风与弓状回波相联系^[14-15]。姚叶青等^[16]分析认为,弓形回波中层有明显的辐合特征,表明下沉气流很强,很快会出现地面大风,中气旋的出现有利于干冷空气夹卷入雷暴,增加了地面大风出现的可能性。

2017年8月6日下午到夜间发生在山东东部地区的一次强雷暴大风过程,造成了严重的风灾,该次强对流过程被列为山东2017年十大天气气候事件之一。本文利用潍坊和青岛CINRAD/SA雷达资料结合常规资料对这次灾害性大风过程的天气背景及风暴演变特征等进行了详细分析,以期积累此类天气的预报经验。

1 天气实况与背景

此次强雷暴大风过程持续时间较长,影响范围广,强度大,半岛地区多年未见。潍坊、青岛、烟台、威海的部分县(市)先后遭受风雹袭击(表1),共有99站出现8~9级大风,16站出现10~11级大风,2站达到12级或以上大风。其中,潍坊南孙极大风速达 $37\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (13级),青岛夏格庄为 $35.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12

级),此外,潍坊地区出现了冰雹。本次过程受灾人口15.8万人,农作物受灾面积 1.74 万 hm^2 ,倒塌房屋281间,直接经济损失2.4亿元,其中农业损失2.1亿元。

表1 2017年8月6日10级以上大风实况

Table 1 Actual situation of the wind stronger than force 10 gale on 6 August 2017

时间	站点	极大风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	极大风风向/ $(^\circ)$
17:44	博山区-白塔污水	25.8(10级)	303
19:05	潍坊-南孙	37.0(13级)	250
19:27	昌邑自动气象站	25.0(10级)	234
19:44	昌邑-卜庄	25.3(10级)	182
19:50	莱州-土山	29.0(11级)	229
20:03	昌邑-防潮坝	27.9(10级)	255
20:17	平度-崔召镇	26.2(10级)	260
20:43	莱西-店埠镇	30.5(11级)	281
20:43	莱西-北墅	26.8(10级)	259
20:55	莱西-夏格庄	35.5(12级)	262
21:03	莱西-姜山镇	28.7(11级)	270
21:07	即墨-金口镇	24.7(10级)	287
21:14	即墨-金口镇	28.7(11级)	277
21:19	即墨-金口镇	32.2(11级)	271
21:27	即墨-田横岛	25.6(10级)	301
21:27	莱阳-羊郡站	28.9(11级)	265
21:30	即墨-丰城镇	25.4(10级)	258
21:36	即墨-丰城镇	26.7(10级)	262
22:05	周村-淄博师专	26.9(10级)	213
00:15	荣成-瓦屋石	25.1(10级)	275

8月6日08时500 hPa形势场(图1a),东北冷涡比较活跃,中心温度 $<-10\text{ }^\circ\text{C}$,冷涡西南侧高空槽后西北风风速约 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,半岛南部地区达到 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。强西北气流引导中层干冷空气从中高纬度南下到黄淮地区。700 hPa(图1b)半岛南部地区西北风速 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。850 hPa(图1c),我国西北至黄淮一带为 $\geq 22\text{ }^\circ\text{C}$ 的暖区,河南至鲁中北部存在温度 $\geq 24\text{ }^\circ\text{C}$ 的暖脊。8月6日08—17时,地面处于热低压中,山东大部分地区最高气温达 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,部分超过 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 。中层入侵的干冷空气叠加在低层暖空气上,使得我国西北至黄淮一带850 hPa与500 hPa的温度差 $\geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 。山东大范围地区内大气上冷下暖的结构非常明显,利于出现层结不稳定。济南500~850 hPa的温度露点差达到 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,说明该区域中层较干。青岛站08时探空分析(图1d)显示,CAPE值大于 $2\text{ 500 J}\cdot\text{kg}^{-1}$,对流温度 $34.4\text{ }^\circ\text{C}$,

20时CAPE值增大至 $3\ 700\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,850~975 hPa温度直减率达到 $8.8\ ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,接近干绝热递减率,0~6 km垂直风切变为 $20\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~3 km垂直风切

变为 $12\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以往研究表明,中层强垂直风切变利于组织性强的风暴如飏线、超级单体等形成,低层强垂直风切变利于地面大风的产生^[17-19]。

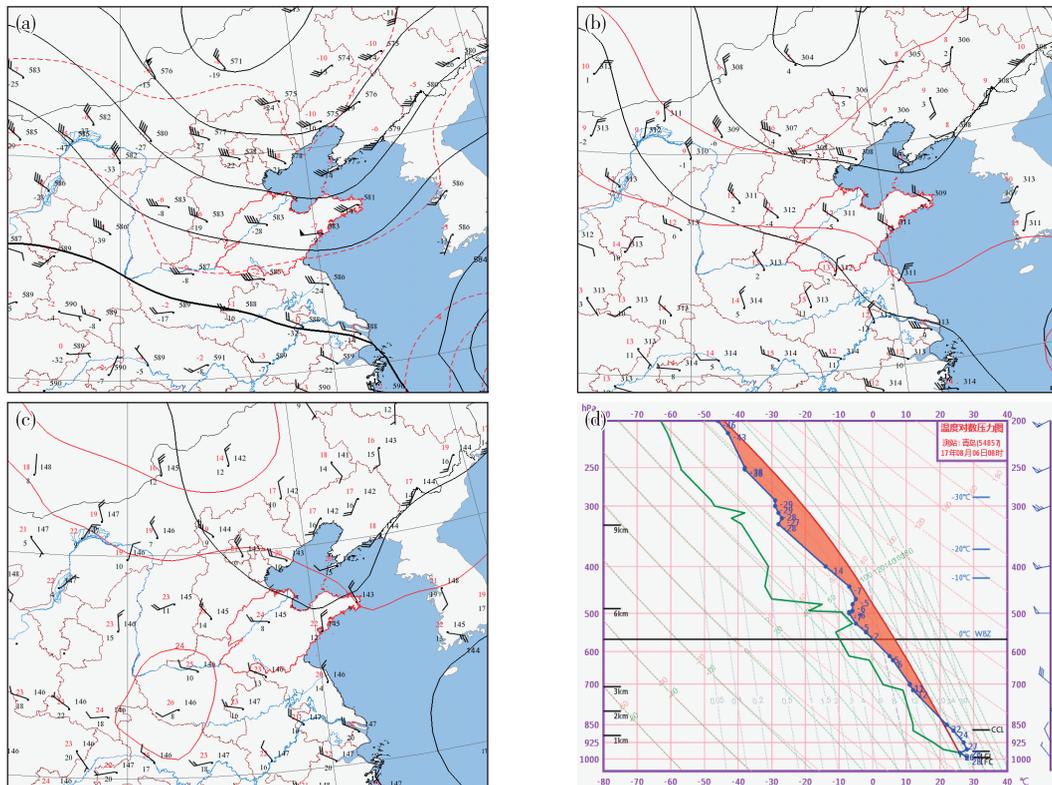


图1 8月6日08时天气图(a. 500 hPa,b. 700 hPa,c. 850 hPa)和青岛探空图(d)

Fig.1 Synoptic chart at 500 hPa (a), 700 hPa (b), and 850 hPa (c) & t - $\ln p$ diagram in Qingdao (d) at 08:00 BST on 6 August 2017

2 风暴演变特征

分析潍坊雷达反射率产品可知,孤立对流风暴东移、演变过程中与海风锋触发的雷暴相作用形成飏线。6日15:50前后,有孤立对流风暴形成于章丘东南部与博山交界处(图2a),之后向东偏北方向移动,移动过程中不断加强演变成强风暴(图2b、c,单体D0)。强风暴影响青州和寿光一带时,雷达 9.9° 仰角反射率因子产品上出现明显三体散射(TBSS)现象(图2i、j)。16:43雷达 0.5° 仰角反射率因子产品从寿光到昌邑一线可以识别出近似东西向的窄带回波(图2g),径向速度上有辐合线相对应(图2h)。窄带回波是海风锋产生的中尺度边界辐合线,逐渐向内陆推进,推进过程中强度逐渐加强,17:48前后窄带回波东段触发对流单体2(图2b)。对流单体2迅速发展,同时在其前侧又有对

流单体3生成发展(图2c),从而形成不太连续的近东西向对流回波带。对流单体2、3与影响青州和寿光的风暴D0相互作用,19:34前后形成飏线的主体回波(图2d,红色圆圈区域)。主体回波移动速度明显加快,东移过程中发展成io长度约200 km的飏线系统,局部形成了弓形结构(图2e、f),相继在昌邑、莱州、平度、即墨等地产生10级或以上大风天气。6日21:50前后飏线南段进入青岛南部海区,7日00:30前后减弱消失,北段在6日22:40前后进入烟台东部海区,中段在7日00:20前后影响威海东部海区,01:30前后减弱消散。此次飏线从形成(6日19:00前后)至消亡(7日01:30前后)历时约6 h 30 min,在威海至青岛以南海区影响时间大概2 h 40 min,在烟台至威海以北海区影响时间大概2 h 50 min,由于无法获得海上大风实况,无法详细分析飏线强度及其影响程度。

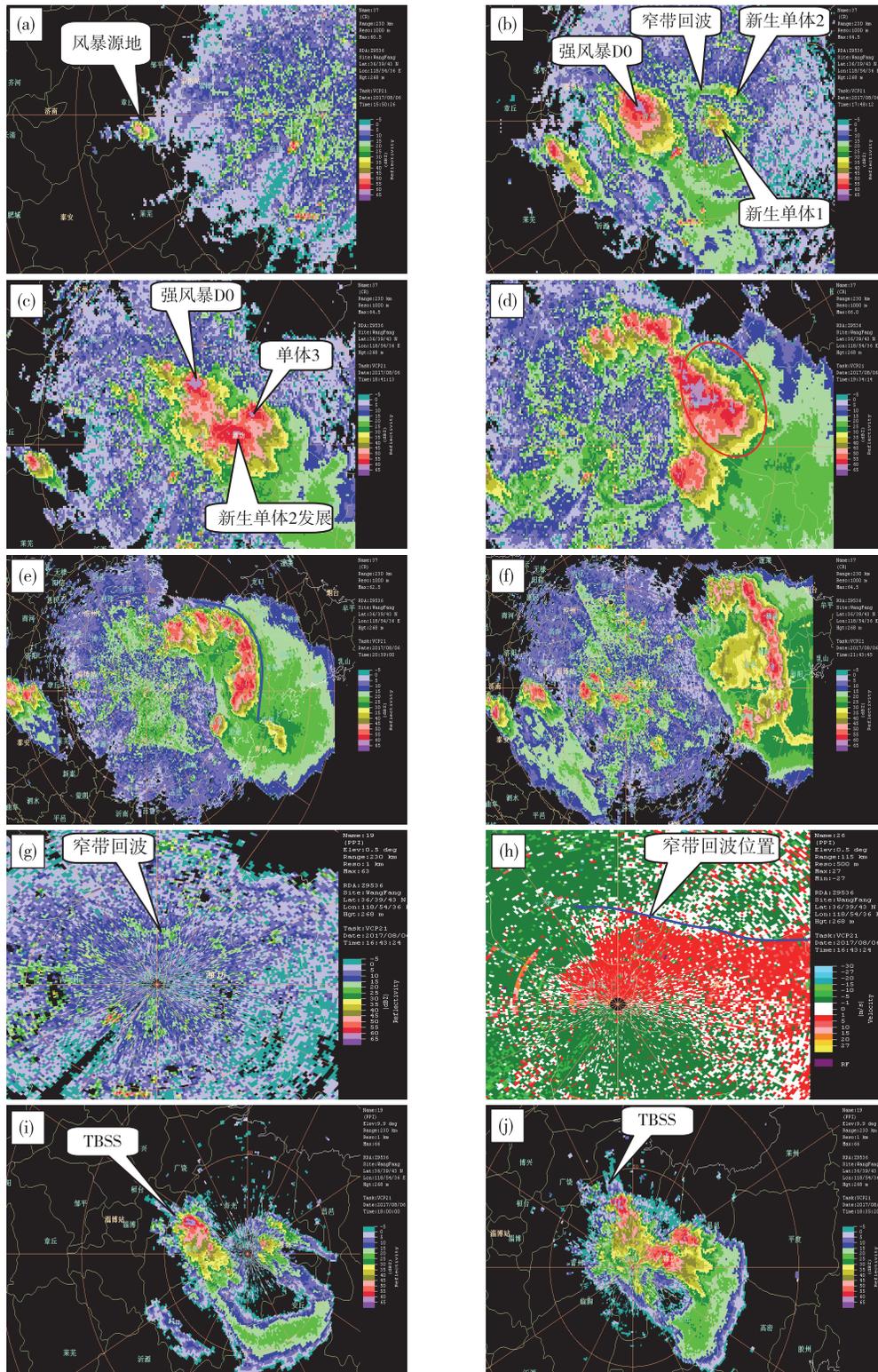


图 2 2017 年 8 月 6 日潍坊雷达 15:50、17:48、18:41、19:34、20:39、21:43 组合反射率因子 (a-f)、0.5° 仰角 16:43 基本反射率因子 (g)、平均径向速度 (h) 和 9.9° 仰角 18:00、18:35 基本反射率因子 (i、j)

Fig.2 Combination reflectivity factors at 15:50 (a), 17:48 (b), 18:41 (c), 19:34 (d), 20:39 (e), and 21:43 (f) & base reflectivity factor (g) and average radial velocities (h) at 0.5° elevation angle at 16:43 & base reflectivity factors at 9.9° elevation angle at 18:00 (i) and 18:35 (j) from Weifang Doppler weather radar on 6 August 2017

3 灾害性大风与径向速度和中气旋参数关系分析

3.1 昌邑周围 10 级或以上大风

昌邑周围 10 级或以上大风出现时间是在 19:05—20:03 之间。19:04, 4.3° 仰角径向速度场显示, 潍坊南孙附近约 3.1 km 高度出现显著的径向辐合特征, 离开雷达的最大径向速度为 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 朝向雷达的最小径向速度为 $-17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。同时, 3.4°、6.0° 和 9.9° 仰角也出现辐合特征, 辐合区垂直范围从 2.6 km 到 6.6 km。0.5° 仰角, 潍坊南孙附近约 0.7 km 高度出现显著径向辐散特征 (图 3a), 离开雷达的最大径向速度为 $25.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 朝向雷达的最小径向速度为 $-12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 两者相差 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 1 min 后南孙区域站出现 $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极大风速。19:22, 0.5° 仰角 (图 3b) 昌邑附近约 0.9 km 高度出现速度模糊现象, 径向速度最小值为 $-25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 退模糊后实际径

向速度为 $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 19:27 昌邑站出现 $25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极大风速。同时, 4.3° 仰角, 昌邑附近约 4 km 高度出现显著径向辐合特征, 离开和朝向雷达的最大径向速度均为 $23.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 辐合区垂直范围从 2.7 km 到 5.8 km。19:34, 0.5° 仰角 (图 3c) 卜庄附近约 1.1 km 高度存在速度模糊现象, 径向速度最小值为 $-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 退模糊后实际径向速度为 $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 19:44 卜庄区域站出现 $25.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极大风速, 中层也存在明显的径向辐合, 辐合区垂直范围从 3.2 km 到 7.0 km。19:46, 0.5° 仰角 (图 3d) 径向速度产品显示速度模糊范围进一步增大, 1.3 km 高度速度模糊最小值为 $-16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 退模糊后实际径向速度为 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 19:50、20:03 分别在土山和防潮坝区域站出现 $29.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $27.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极大风速。

由此可见, 中层存在明显的径向辐合, 近地层有显著的径向辐散 (速度差 $\geq 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 或者大的径向速度 (速度绝对值 $\geq 29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 是产生昌邑周围 10 级或以上强雷暴大风的典型特征。

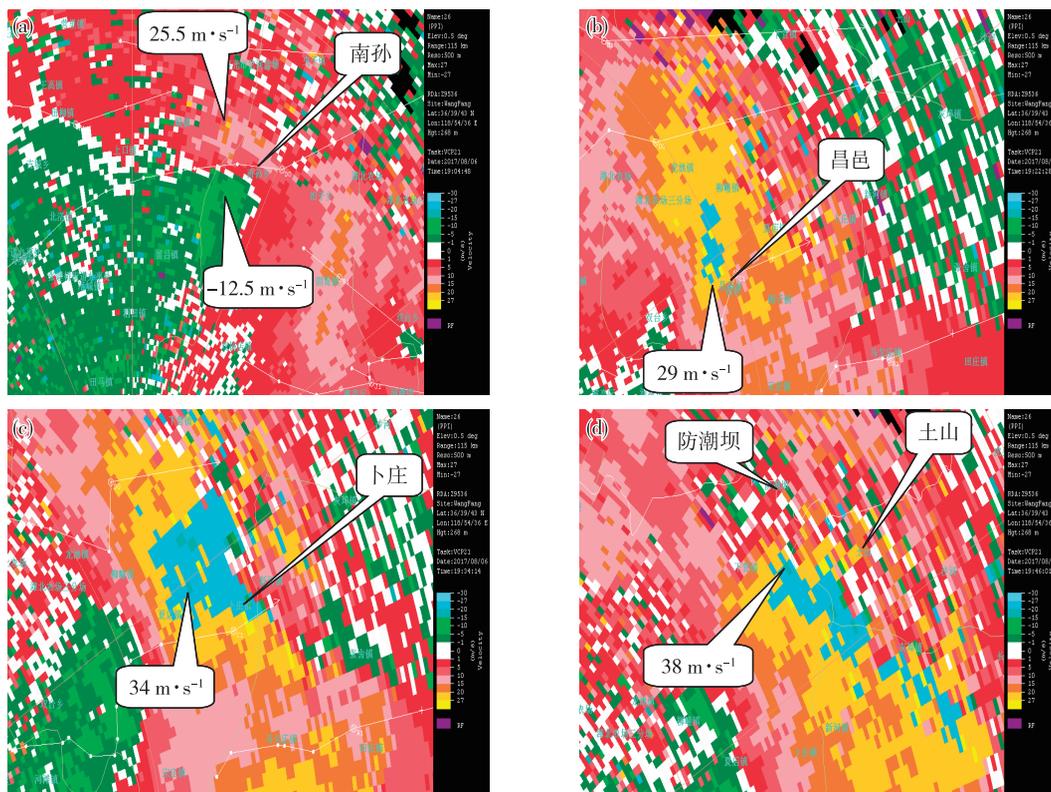


图3 2017年8月6日潍坊雷达0.5°仰角平均径向速度图(图中标注速度为退模糊后的速度;a.19:04,b.19:22,c.19:34,d.19:46)

Fig.3 Average radial velocities at 0.5° elevation angle from Weifang Doppler weather radar on 6 August 2017 (velocities in Fig.3 are after dealiasing; a. 19:04, b. 19:22, c. 19:34, d. 19:46)

3.2 青岛 10 级或以上大风

青岛 10 级或以上大风出现时间是在 20:17—

21:35 之间, 但青岛雷达 0.5° 仰角径向速度产品都没有大的径向速度或强辐散特征 (图略)。除莱西

北墅站外,其他几个站都是由同一单体导致(图 4a),同时 20:50 起连续 7 个体扫出现中气旋,属于镶嵌在线性回波带里面的超级单体。此阶段飊线表现为典型的中层径向辐合(MARC)特征,但影响崔召和北墅时特征不显著(径向速度差 $<25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),影响店埠至金口一带时 MARC 特征显著。20:39,约 4.9 km 高度上(图 4b),离开雷达的最大径向速度为 $24.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,朝向雷达的最小径向速度为 $-5.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者相差 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,20:43 店埠区域站出现 $30.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风速。21:08 时次约 5.9 km 高度上(图 4c),离开雷达的径向速度出现

模糊,去模糊后最大径向速度为 $31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,朝向雷达的最小径向速度为 $-13.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者相差 $44.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,21:19 金口区域站出现 $32.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风速。由青岛雷达回波图可以看出,影响崔召区域时风暴中层为强中反气旋结构(图 4d-f),持续时间 6 个体扫,19:52 崔召附近最大出流为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大入流为 $-29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者相差 $39\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相距 5.1 km(图 4d),其余体扫时段内,最大入流和最大出流速度相差均超过 $31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这种中反气旋结构可能预示着强的下沉气流。

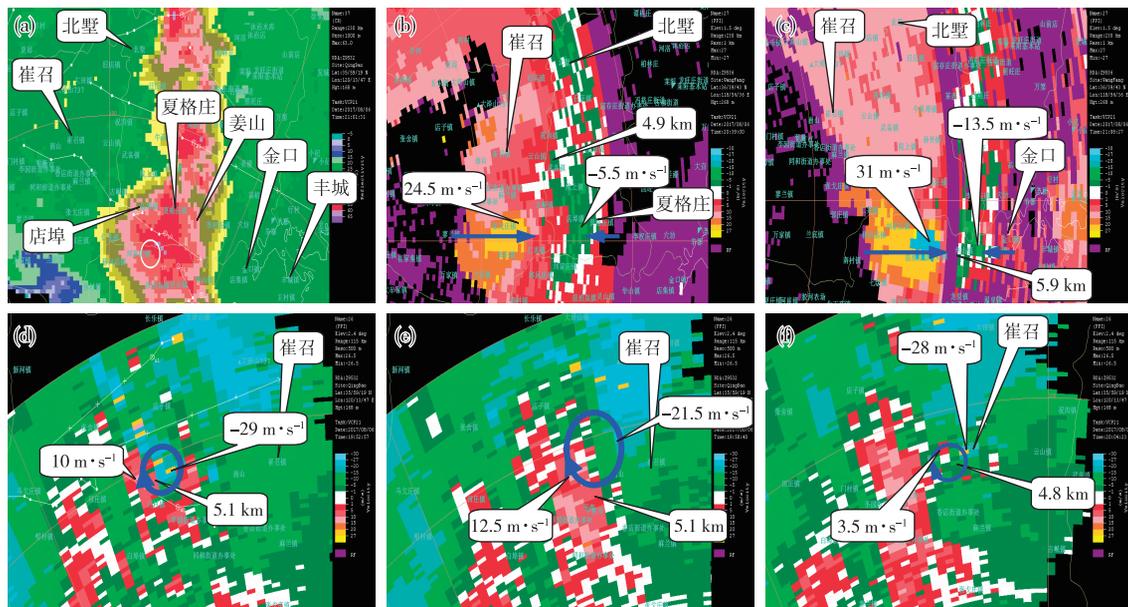


图 4 2017 年 8 月 6 日青岛雷达 21:01 组合反射率因子(a)、潍坊雷达 20:39(b)、21:08(c) 1.5°仰角平均径向速度和青岛雷达 19:52(d)、19:58(e)、20:04(f) 2.4°仰角平均径向速度图(图中标注速度为退模糊后的速度)

Fig.4 Combination reflectivity factors at 21:01 (a) from Qingdao weather radar, average radial velocities at 1.5° elevation angle at 20:39 (b) and 21:08 (c) from Weifang weather radar, and average radial velocities at 2.4° elevation angle at 19:52 (d), 19:58 (e) and 20:04 (f) from Qingdao weather radar (velocities in Fig.4 are after dealiasing)

由此可见,较显著的中层径向辐合(MARC)特征(速度差 $\geq 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)或者中层强中反气旋结构(速度差超过 $31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)也是产生 10 级或以上强雷暴大风的典型特征。

青岛雷达监测发现,20:50 起连续 7 个体扫出现中气旋。中气旋是 WSR-88D 雷达的一种速度导出产品,它表示了对流风暴中与强烈上升气流相联系的小尺度涡旋,是表征是否为超级单体风暴的最重要的因子。由中气旋参数图(图 5)可以看出,对预报强风最具重要提示作用的是底部高度较低,基本处于 2 km 以下。分析发现雷暴大风发生前 2~3 个体扫,中气旋底高都是在不断下降的,中气旋底高显著下降,很可能大多数的雷暴大风与中气旋的

降低密切相关。该次过程中气旋底部处于较低高度,利于诱发地面大风天气,中气旋底部高度在 2 km 以下可作为地面大风的临近预警指标之一。

4 小结

1)此次飊线过程持续时间较长,影响范围广,强度大,产生了严重的风灾。本次过程发生在高空西北气流影响下,中低层强垂直风切变和较大的温度直减率为雷暴大风的出现提供了有利环境条件。

2)中尺度边界辐合线造成的窄带回波,向内陆推进过程中触发对流单体,并与东移雷暴相互作用,形成飊线前期主体,东移过程中发展成长度为 200 km 左右的飊线系统,局部出现弓形回波。飊线

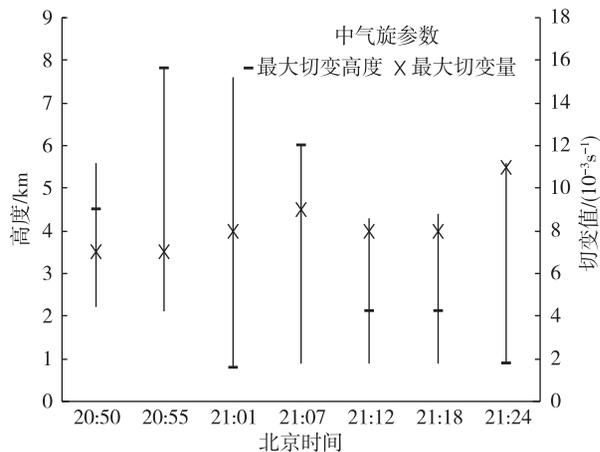


图5 中气旋参数演变(黑色竖直线代表中气旋的厚度,即底部与顶部的连线)

Fig.5 Temporal evolution of mesocyclones (the black vertical line; the depth of cyclone, i. e. connection between the bottom and the top)

从形成(6日19:00前后)至消亡(7日01:30前后)历时约6 h 30 min。

3) 10级以上雷暴大风在雷达径向速度特征上表现为多样性。主要有近地层显著的径向辐散(速度差 $\geq 35 m \cdot s^{-1}$)或者大的径向速度(速度绝对值 $\geq 29 m \cdot s^{-1}$);较为显著的中层径向辐合(MARC)特征(速度差 $\geq 30 m \cdot s^{-1}$)或者强中反气旋结构(速度差 $\geq 31 m \cdot s^{-1}$)。产生10级或以上大风的强风暴中气旋具有较低的底部高度,基本处在2 km以下。

参考文献:

- [1] 方翀,俞小鼎,朱文剑,等. 2013年3月20日湖南和广东雷暴大风过程的特征分析[J].气象,2015,41(11):1305-1314.
- [2] Fujita T T. Manual of downburst identification for project Nimrod [R]//Satellite and Mesometeorology Research Paper 156. Chicago:University of Chicago,1978;104.
- [3] Smull B F, Houze R A Jr. A midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain: Radar and satellite observations [J]. Mon Wea Rev, 1985, 113 (1): 117-133.
- [4] Smull B F, Houze R A Jr. Dual-Doppler radar analysis of a midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain [J]. J Atmos Sci, 1987, 44 (15): 2128-2149.
- [5] 刁秀广,侯淑梅. 4次大暴雨过程雷达径向速度和超低空西南急流特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):46-53.
- [6] 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.
- [7] 高帆,张永婧,李瑞,等. 2015年8月3日山东西北部暴雨过程的中尺度特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):96-101.
- [8] 王俊.线状中尺度对流系统的多普勒雷达统计特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(4):25-33.
- [9] 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.
- [10] 苏添记,刁秀广,符长静,等.山东半岛强对流天气风暴参数统计分析[J].山东气象,2016,36(2):15-19.
- [11] 刘洪恩. 微下击暴流的特征及其数值模拟[J].气象学报,2001,59(2):183-195.
- [12] Fu D, Guo X. Numerical study on a severe downburst-producing thunderstorm on 23 August 2001 in Beijing [J]. Adv Atmos Sci, 2007, 24 (2): 227-238.
- [13] Schmidt J M, Cotton W R. A high plains squall line associated with severe surface winds [J]. J Atmos Sci, 1989, 46 (3): 281-302.
- [14] 农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等.广西一次飚线大风天气的成因和预警分析[J].气象,2014,40(12):1491-1499.
- [15] 牛淑贞,张一平,席世平,等. 基于加密探测资料解析2009年6月3日商丘强飚线形成机制[J].暴雨灾害,2012,31(3):255-263.
- [16] 姚叶青,俞小鼎,张义军,等. 一次典型飚线过程多普勒天气雷达资料分析[J].高原气象,2008,27(2):373-381.
- [17] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等.山东省2006年4月28日飚线天气过程分析[J].气象,2007,33(1):74-80.
- [18] 赵瑜,赵桂香,王思慧,等. “7·28”山西中部强对流天气的中尺度分析[J].干旱气象,2017,35(5):874-885.
- [19] 周后福,刁秀广,赵倩,等.一次连续下击暴流天气的成因分析[J].干旱气象,2017,35(4):641-648.