

一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度 结构特征观测研究^{*}

吴芳芳¹ 俞小鼎² 王 慧³ 商 建¹ 周文君¹

WU Fangfang¹ YU Xiaoding² WANG Hui³ SHANG Jian¹ ZHOU Wenjun¹

1. 江苏省盐城市气象局, 盐城, 224005

2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081

3. 上海中心气象台, 上海, 200030

1. *Yancheng Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Yancheng 224005, China*

2. *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China*

3. *Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030, China*

2018-08-22 收稿, 2019-03-12 改回.

吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 商建, 周文君. 2019. 一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究. 气象学报, 77(5): 785-805

Wu Fangfang, Yu Xiaoding, Wang Hui, Shang Jian, Zhou Wenjun. 2019. An observational study of multi-scale structural features of MCC on the coast of the Yellow Sea. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(5): 785-805

Abstract From the evening of 3 July to early morning of 4 July 2006, a mesoscale convective complex (MCC) from northern Jiangsu to the Yellow Sea spawned a series of tornadoes, linear convective winds and heavy precipitation. In this paper, the synoptic weather background and the MCC structure are analyzed in detail using conventional surface and upper-level observations, regional automatic weather station observations, satellite cloud images and Doppler weather radar data. The main conclusions are as follows. (1) In the upper levels, strong divergence developed in response to the background field. In the middle levels, the MCC was located in front of an eastward-moving short-wave trough to the northwest of the subtropical high at 500 hPa. In the surface, the MCC was located in the warm zone of a frontal cyclone, in the presence of medium-to-strong convective available potential energy (CAPE) and large vertical wind shear in a deep layer (0–6 km) as well as in the low level (0–1 km). (2) The main vertical circulation exhibits some characteristics. The southeasterly flow in lowest layer and the warm, moist southwesterly flow in the middle-lower levels transported air mass from the south of the MCC to the center of the MCC. Northwesterly flow prevailed in the rear of the MCC, was relatively dry entrained into the MCC, causing evaporative cooling and strong descending motion. The downdraft with momentum from northwesterly winds builded a meso- β scale cold pool near surface, and the meso- β scale gust front formed along the boundary between the cold pool and the surrounding warm and moist airmass. Cold high pressure formed from the ground to the lower troposphere (thunderstorm high pressure), while the meso- β scale low pressure developed in front of the gust front. A warm core emerged in the middle and upper levels of the MCC due to the latent heat release caused by condensation. In the middle troposphere, the MCC was characterized by a meso- β scale cyclonic vortex and low pressure; in the upper troposphere, meso- β scale anticyclonic divergent flow prevailed. (3) Doppler weather radar observations revealed that the MCC at mature stage mainly presented a linear structure. The main component of the MCC was an active bow squall line on the scale of 150–200 km, while several weak convective rain belts with a cyclonic curvature

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金(41775044)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-028)、江苏省北极阁基金(BJG201902)。

作者简介: 吴芳芳, 主要从事短期及短时临近天气预报研究。E-mail: wuff102@163.com

通信作者: 俞小鼎, 主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究。E-mail: xdyu1962@126.com

existed. Several rain belts merged into the common vortex center, which coincided with the center of the frontal cyclone in the ground and also the center of the meso- β scale cyclone of the corresponding MCC with a diameter of 40–60 km. (4) Multiple mesovortices appeared in front of the active bow squall line, and four EF2 tornadoes and two EF1 tornadoes occurred in these mesovortices. The mesovortices had horizontal scale of 4–5 km, with the rotation speed close to strong mesocyclones in supercells but less vertical extension, and the formation mechanism was also significantly different from cyclones in supercells. (5) The scale of the cloud system at the mature stage of the MCC was 1000 km in which the coldest part below 220 K (-52°C) was about 400 km. The main internal structure of the MCC included a 150–200 km long active bow squall line, a meso- β scale cold pool and the gust front in the ground, and mesoscale vortexes on the scale of 4–5 km in front of the bow squall line. Some mesoscale vortexes led to the formation of EF1 and EF2 tornadoes on scales of only tens to hundreds of meters. The entire system showed obvious multi-scale structural features.

Key words MCC, Squall line, Mesovortices, Tornado, Multi-scale structural features

摘 要 2006年7月3日傍晚到4日凌晨,苏北到黄海的一个中尺度对流复合体(MCC)产生了系列龙卷、直线型对流大风和强降水,利用常规高空地面观测、区域自动气象站、卫星云图以及多普勒天气雷达资料,详细分析此次中尺度对流复合体的结构和产生的天气背景。主要结论如下:(1)该中尺度对流复合体高层为对应分离背景场的强辐散,中层在副热带高压西北侧和500 hPa东移的短波槽前,地面位于锋面气旋暖区内;该中尺度对流复合体发生在中等到强的对流有效位能、强的深层(0—6 km)和低层(0—1 km)风垂直切变环境下;(2)该中尺度对流复合体主要垂直环流特征为:近地层东南气流和其上的中低层西南暖湿气流从对流复合体南部流入到复合体中心,复合体后部对流层中低层和中层为较干冷的西北气流夹卷进入中尺度对流复合体,导致降水蒸发冷却形成强烈下沉气流,产生带有西北风动量的下沉气流,到地面形成 β 中尺度冷池,冷池与周边暖湿气流的交界处为 β 中尺度阵风锋,同时中尺度对流复合体位于对流层低层到地面部分形成深厚冷池导致的雷暴高压,阵风锋前部有 β 中尺度暖低压;中尺度对流复合体中高层由于水汽凝结潜热释放加热形成暖心结构,位于对流层中层的主要特征为 β 中尺度气旋性涡旋对应的中尺度低压,对流层高层存在 β 中尺度辐散反气旋环流;(3)多普勒天气雷达探测揭示该中尺度对流复合体成熟阶段主要呈现为线性结构,主要构成是一条尺度在150—200 km的活跃弓形飚线,还有数条较弱的呈气旋性弯曲的对流雨带,雨带旋入共同的涡旋中心,该涡旋中心与地面锋面气旋的中心相对应(重合),同时也是相应中尺度对流复合体的 β 中尺度气旋的中心,直径为40—60 km;(4)在上述活跃弓形飚线的前侧出现多个中尺度涡旋,4个EF2级龙卷和3个EF1级龙卷都发生在这些中尺度涡旋内,导致龙卷的中尺度涡旋水平尺度为4—5 km,旋转速度接近超级单体的强中气旋旋转速度,垂直伸展比超级单体中气旋浅薄,形成机制也与超级单体中气旋有明显差异;(5)该中尺度对流复合体成熟阶段的云系尺度为1000 km,其中低于220 K(-52°C)冷云盖的尺度在400 km左右,其内部结构的主要构成是一条150—200 km长的活跃弓形飚线,地面 β 中尺度冷池和阵风锋,沿着弓形飚线前侧出现多个尺度为4—5 km的中尺度涡旋,其中部分中尺度涡旋导致尺度只有几十至几百米的EF1和EF2级龙卷,呈现出明显的多尺度结构特征。

关键词 中尺度对流复合体,飚线,中尺度涡旋,龙卷,多尺度结构特征

中图法分类号 P445

1 引言

中尺度对流系统(MCS)最初是根据卫星红外云图上中尺度低亮温区域来识别的(Zipser, 1982; Doswell III, 2001)。卫星所探测的中尺度低亮温区域对应对流导致的冷云盖,冷云盖下面是以各种方式组织起来的雷暴群,包括旺盛对流部分和层状云部分,这些雷暴群的云顶和云砧连接在一起形成上述冷云盖,其尺度通常为100—1000 km。随着研究的深入,借助多普勒天气雷达探测,发现这些中尺度

对流系统在其发展成熟阶段会形成一套环流系统(Houze, et al, 1989; Houze, 2004),包括中尺度倾斜上升和下沉气流,有时还具有 β 中尺度涡旋(Mesoscale Convective Vortices, MCV),这样在动力结构上的确构成了一个相对完整的中尺度环流系统。美国气象学会气象学词典定义中尺度对流系统为任何产生超过连续100 km尺度降水区域的雷暴群(Markowski, et al, 2010)。Maddox(1980)将中尺度对流系统中持续时间最长(生命史在6 h以上)、在红外云图上形状接近圆形(偏心率 ≥ 0.7)、低亮温

区域很大(相当黑体亮温(TBB) $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 的云覆盖面积 $>1\times 10^5\text{ km}^2$ 、内部 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 的冷云区面积 $\geq 5\times 10^4\text{ km}^2$)的称为中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)。Augustine 等(1991)和 Jirak 等(2003)提出用 TBB 为 -52°C 闭合等值线来识别中尺度对流复合体,其判定标准是 -52°C 的冷云盖面积 $\geq 5\times 10^4\text{ km}^2$ 、生命史 $\geq 6\text{ h}$ 且偏心率 ≥ 0.7 。Maddox(1983)发现,发生在美国中部地区的中尺度对流复合体的天气尺度强迫主要是对流层中层的弱短波槽和强的低层暖平流,在上升运动区发展起来的中尺度对流复合体主要是由于对流层低层有强暖平流而不是中层短波槽前的正涡度平流的强迫所导致的。他进一步指出,中尺度对流复合体位于对流层中层短波槽前,随着短波槽东移,潜热加热导致其中层的暖核和高层的冷核。尽管环境背景不同,但中尺度对流复合体成熟阶段却呈现出许多与热带对流系统相似的特征。近年来中国气象工作者也对中尺度对流复合体进行了研究,王宁等(2016)分析了吉林一次中尺度对流复合体过程;万夫敬等(2018)分析了鲁、豫两次中尺度对流复合体过程,总结了中尺度对流复合体红外云图特征及环境条件。

通过红外云图只能观测到构成中尺度对流系统的雷暴群上空的冷云盖,而雷暴群的组织结构通常是无法通过云图得到的(低轨气象卫星微波云图可以得到部分低分辨率的中尺度对流系统垂直结构信息),需要通过天气雷达来探测。Houze 等(1990)利用多普勒天气雷达研究了发生在美国俄克拉荷马州伴随强降水的中尺度对流系统结构,发现不同个例间的中尺度结构变化很大,而且几乎是连续变化的。他们发现可以粗略地将这些变化很大的中尺度对流系统结构分为两大类:(1)线性结构,由线状的对流降水回波和位于线状对流回波后部、前部或侧面的层状降水回波构成,其中层状降水部分位于线状对流降水后部的情况居多;(2)不规则结构或非线性结构,很难对其结构进行描述和分类。其中,第一种结构约占三分之二,第二种结构约占三分之一。在所谓线性结构中,可以进一步分为两个子类,一种南北呈对称结构,另一种南北为非对称结构,北部较宽大。Houze 等(1990)还发现,所有强对流天气都可以出现在上述不同结构的中尺度对流系统中,具有

对称线性结构的中尺度对流系统更容易产生强降水,非对称线性结构的中尺度对流系统产生冰雹和龙卷的几率相对较高,而非线性(不规则)结构的中尺度对流系统产生强冰雹的几率最大,但产生龙卷和强降水的几率不如线性结构的中尺度对流系统。对于达到中尺度对流复合体标准的中尺度对流系统,线性结构和非线性(不规则)结构的比例几乎是相等的。线性结构的中尺度对流系统与更早的飚线概念相对应,因此,有不少学者将他们称为飚线,近些年来,部分学者将其称为准线性对流系统。Parker 等(2000)将雷达回波上呈线性结构的中尺度对流系统进一步划分为 TS (Trailing Stratiform)、LS (Leading Stratiform)和 PS (Parallel Stratiform) 3 个子类,分别代表层状云降水回波位于线状对流降水回波后部、前部和侧翼,其中 TS 子类出现频率最高,占到 60%左右。

随着探测技术的发展,特别是多普勒天气雷达布网以来,中国学者对中尺度对流系统及伴随的强对流天气进行了多方面研究,俞小鼎等(2012)总结了强对流天气临近预报技术进展,吴芳芳等(2013)统计分析了苏北超级单体风暴发生的环境条件和多普勒天气雷达回波特征,王秀明等(2015)研究了中国东北龙卷环境特征,郑媛媛等(2015)总结了台风龙卷的环境背景和雷达回波结构,曾明剑等(2016)分析了近十年江苏梅雨期龙卷天气的环境特征,王易等(2018)统计分析了南京雷达中气旋产品特征,郑永光等(2017)总结了强对流天气预报的一些基本问题,高晓梅等(2018)分析了鲁中地区分类强对流天气环境参量。强龙卷以及下击暴流破坏力极大(Fujita, 1981; 俞小鼎等, 2006a),可造成严重的人员伤亡和财产损失。龙卷有不同类型,俞小鼎等(2008)研究了安徽一次伴随强龙卷的强降水超级单体;吴芳芳等(2010)分析了苏北一个伴有龙卷的强降水超级单体;张小玲等(2016)研究了苏北阜宁产生 EF4 级龙卷的超级单体风暴。符式红等(2018)分析了一次海南龙卷。江淮梅雨期苏皖豫平原地区龙卷多发,俞小鼎等(2006c)研究了安徽一次系列龙卷过程;刘娟等(2009)分析了苏、皖北部的一次龙卷,同日该地区有多个龙卷发生(范雯杰等, 2015);张一平等(2012)分析了河南两次龙卷事件,表明该

类龙卷与低空西南急流相关,具有在某地频发特征。

迄今为止对于发生在中国的中尺度对流复合体内部结构的研究很少。陶祖钰等(1996,1998)用常规资料揭示中尺度对流复合体的环流结构,指出中国中尺度对流复合体内部细致结构还有待通过多普勒雷达和中尺度观测网在今后的研究中揭示。张晰莹等(2010)利用齐齐哈尔 C 波段多普勒天气雷达,结合常规观测资料和卫星云图对 2005 年 7 月 16 日下午至夜间发生在黑龙江省中部的中尺度对流复合体的产生背景和内部结构进行了分析,该中尺度对流复合体产生了冰雹、系列龙卷和强降水。遗憾的是,中尺度对流复合体主体部分距离雷达较远,而其中心附近没有雷达,因此,雷达只能探测到它的部分结构。2006 年 7 月 3 日下午至夜间,一个发展旺盛的中尺度对流复合体在苏北地区产生了一系列

EF1—EF2 级龙卷、广泛的强降水以及直线型对流大风。中尺度对流复合体中心区所覆盖的连云港、涟水、盐城盐都区、射阳、大丰 5 个观测站平均过程雨量超过 97 mm,其中最大雨量为 117 mm,出现在盐都区至射阳之间。最大小时雨量出现在盐都区气象站,7 月 3 日 21 时 16 分—22 时 16 分(北京时,下同)降雨量 106 mm,其中 21 时 40—50 分降雨量 34 mm,对应雨强 204 mm/h。图 1 为 2006 年 7 月 3 日 16 时—4 日 02 时上述中尺度对流复合体产生的降水分布和系列 EF2 和 EF1 级龙卷的位置。此次中尺度对流复合体发生在强的风垂直切变和低层强暖湿气流环境下,在 α 、 β 中尺度上都呈现出程度较高的组织性,又恰好发生在各种观测资料丰富的地区,为研究华东地区中尺度对流复合体的多尺度结构特征提供了一次难得的机会。

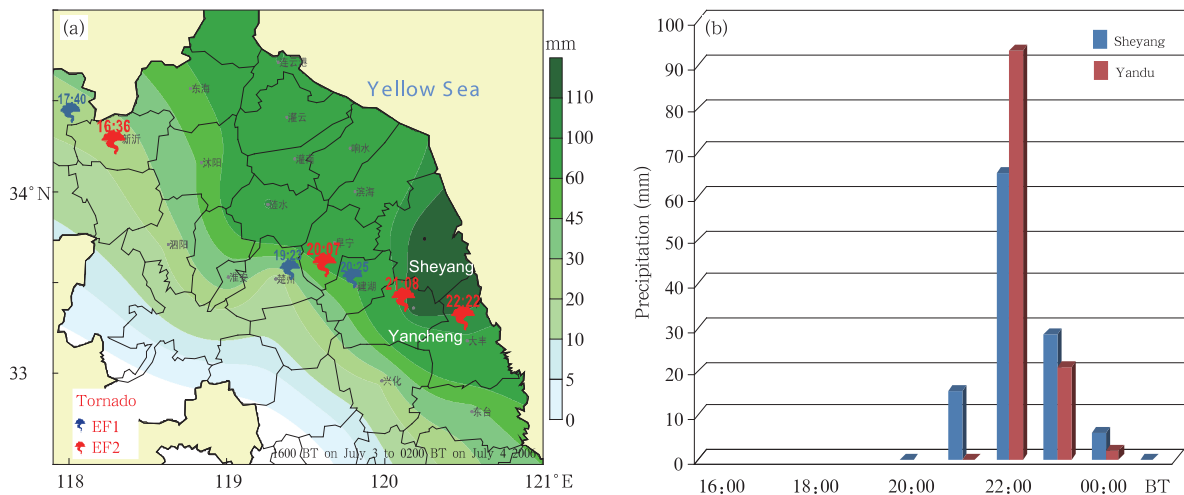


图 1 2006 年 7 月 3 日 16 时—4 日 02 时中尺度对流复合体产生的降水(色阶)和龙卷分布(a)以及中尺度对流复合体中心逐时降水量(b)

Fig. 1 Precipitation and tornadoes distribution from 16:00 BT 3 July to 02:00 BT 4 July 2006 (a), and hourly precipitation at the MCC center (b)

本研究将基于中国国家级气象观测站常规高空地面资料、静止气象卫星红外云图、区域自动气象站资料、尤其是盐城和连云港 SA 型多普勒天气雷达探测资料对此次导致苏北大范围暴雨、系列龙卷和直线型对流大风的中尺度对流复合体内部多尺度结构进行详细分析。有利条件是中尺度对流复合体产生和成熟的区域位于苏北 5 部新一代天气雷达中的

两部(连云港和盐城 SA 型多普勒天气雷达)有效探测范围内,成熟阶段中尺度对流复合体中心距离上述两部雷达位置较近,可以对中尺度对流复合体内部结构进行比较详细的描述;苏北地区密集的自动气象站网可以配合多普勒天气雷达描述中尺度对流复合体结构中较为精细的部分。此外,此次中尺度对流复合体的成熟阶段恰好好在 7 月 3 日 20 时前后,

使得探空资料能够部分地分辨该中尺度对流复合体,与卫星云图结合可以对中尺度对流复合体环境背景和整体特征进行更好的揭示。

2 中尺度对流复合体形成与环境背景

2006年6月27日—7月5日,江苏一直有间歇性的中尺度对流云团活动,7月2日08时—7月4日08时是其中一次活跃期(图略),对流云团发展区域位于低层850 hPa切变线以南和500 hPa副热带高压西北侧588 dagpm线以北,横跨地面准静止锋(梅雨锋),并位于高空250 hPa强辐散区下面的上升气流区。在该活跃期,出现了强烈发展的中尺度对流复合体(图略)。该中尺度对流复合体初始发展可以追溯到7月2日20时,与其有关的中尺度对流系统位于500 hPa短波槽前,其周边500 hPa等压面上具有明显气旋性涡旋流场,在接下来6 h内,该中尺度对流系统发生分裂(图略),分裂后其北边的部分与其东边的另一个中尺度对流系统合并,在3日02时形成更大的一个中尺度对流系统(图略)。此后,这个中尺度对流系统未再分裂,3日08时其中心位于豫、鲁、皖三省交界处(图略),略微呈现出逗点状。6 h后,该中尺度对流系统呈现出典型的逗点状(图略),中心位于山东南部 and 江苏西北部交界的微山湖附近,并在接下来的6 h中,向东南部发展形成中尺度对流复合体,20时达到成熟阶段(图2),并一直持续到4日05时(图略),文中将以这个中尺度对流复合体作为研究对象。

图2给出了7月3日18—23时1 h间隔的FY-2C相当黑体亮温(TBB)分布,其中闭合紫色虚线为TBB低于220 K(-52°C)特征线。根据Augustine等(1991)和Jirak等(2003)的判定标准,该中尺度对流复合体在3日18时前后开始形成,19时达到中尺度对流复合体标准,20时进入成熟阶段,其生命史从3日19时持续至4日05时,达10 h。其主轴方向从3日19—22时近似南北方向,转为4日03—05时近似东西方向(图略)。3日20时进入成熟阶段,标志是这一时刻风暴云盖亮温达到最低,形成了发展旺盛的 α 中尺度对流复合体。

表1为7月2日20时、3日08和20时高空短波槽以东和地面准静止锋(梅雨锋)以南暖湿区中几

个代表性探空站观测的对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、0—6 km风垂直切变、850 hPa温度露点差、850和500 hPa温差、可降水量(PW)、地面露点、低空急流强度、抬升凝结高度(LCL)以及 0°C 层高度。这几个测站在探空气球施放期间均未受到对流的影响,并且与对流发生区域和时间的距离都不远,可以较好地代表近风暴环境。从表中可以看出,就深厚湿对流的基本要素静力不稳定和水汽条件而言,3个探空都呈现出有利的形势,将静力不稳定和水汽结合起来形成表征深厚湿对流发生潜力的对流有效位能和对流抑制能量,几个探空对流有效位能均在1000 J/kg以上,最大值超过3000 J/kg,属于中等或强的级别(Markowski, et al, 2010; 俞小鼎等, 2012),有利于深厚湿对流的形成。3日08时南京探空、20时南京(图3)和上海探空呈现出较大的对流抑制能量,分别达到195和210 J/kg。在3.1节将会看到,中尺度对流复合体内部存在一条强飚线,该飚线前沿较强阵风锋(外流边界)将暖湿气块抬升到自由对流高度以上,使得新的雷暴得以触发,整个对流系统中尺度对流复合体得以持续。露点、可降水量以及低空急流都比较大,有利于对流性暴雨的产生,其中强低空暖湿急流是最关键的条件,原因在于低空暖湿急流一方面可以迅速补充被降水消耗掉的水汽,同时也可以使得被深厚湿对流消耗掉的对流有效位能得到不断补充,使得深厚湿对流可以长时间持续。最显著的暖湿低空急流出现在3日20时的南京,850和925 hPa分别为20和18 m/s的西南风急流(图3)。0—6 km风矢量差最小18 m/s,最大24 m/s,属于中等偏上到强的深层风垂直切变(Muller, 2001; Markowski, et al, 2010; 俞小鼎等, 2012),有利于高度组织化的对流结构(如超级单体风暴和/或组织程度高的飚线)形成。7月初是江苏龙卷的高发期(范雯杰等, 2015),而且常常出现在梅雨期暴雨天气情况下,江苏梅雨期暴雨天常有低空急流出现,而且抬升凝结高度较低,这两个条件恰恰有利于龙卷尤其是不低于EF2级别强龙卷的产生(Brooks, et al, 2002; Evans, et al, 2002; Craven, et al, 2002; Thompson, et al, 2003)。从7月3日20时南京探空(图3)看到,对流层中低层存在一定的干层,有利于下击暴流及其

伴随的直线型雷暴大风的产生,而融化层高度较高,不利于大冰雹的落地。因此,环境条件有利于龙卷、直线型雷暴大风及短时强降水的发生(俞小鼎等,

2006b,2008,2012;吴芳芳等,2010,2012,2013),不利于强冰雹的发生。

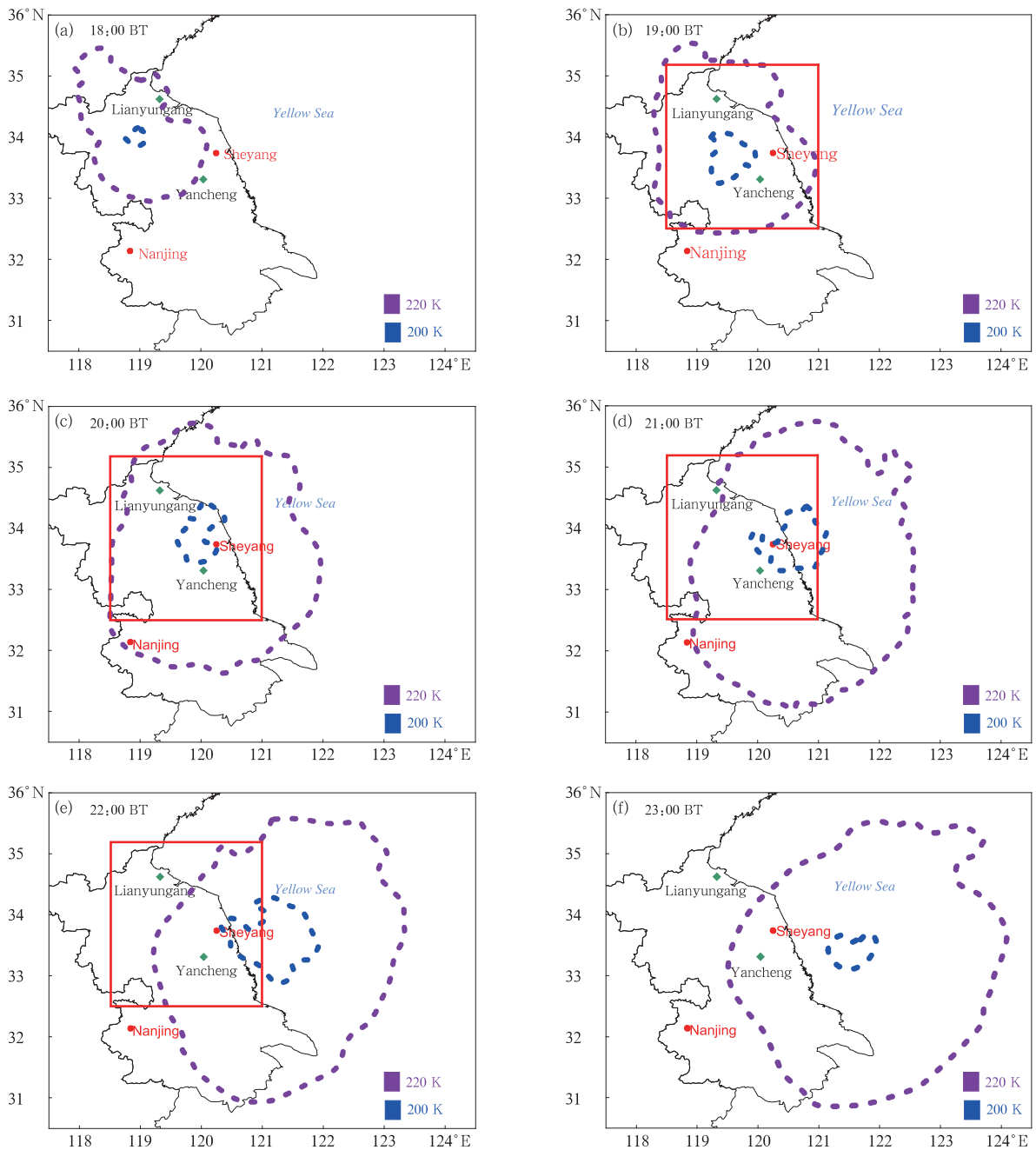


图2 2006年7月3日18—23时(a—f)FY-2C 1 h平均相当黑体亮温分布

(闭合紫色、蓝色虚线为TBB低于220 K、200 K($TBB < -52^{\circ}\text{C}$ 、 -72°C)特征线,

图中盐城和连云港为SA型多普勒天气雷达所在地点,南京和射阳为探空所在地点)

Fig. 2 Hourly evolution (a—f) of the FY-2C IR channel TBB (K) distribution

from 18:00 to 23:00 BT 3 July 2006

(Yancheng and Lianyungang are the locations of SA Doppler weather radars,

Nanjing and Sheyang are the locations of soundings)

表1 7月2日20时、3日08和20时地面准静止锋附近对流活跃区代表性探空导出参量
Table 1 Key environmental parameters derived from Fuyang sounding on 20:00 BT 2 July
and Nanjing sounding on 08:00 and 20:00 BT 3 July

参量	7月2日20时(阜阳)	7月3日08时(南京)	7月3日20时(南京)
CAPE(J/kg)	2030	3040	1350
CIN(J/kg)	50	110	195
0—6 km 风矢量差(m/s)	18	20	24
850 hPa 急流(m/s)	16	16	20
925 hPa 急流(m/s)	14	18	18
可降水量(mm)	68	57	56
露点(℃)	27	26	22
850 hPa 温度露点差(℃)	2	5	6
850—500 hPa 温差(℃)	23	27	26
抬升凝结高度(hPa)	955	972	875
0℃层高度(km)	5.5	5.3	5.4

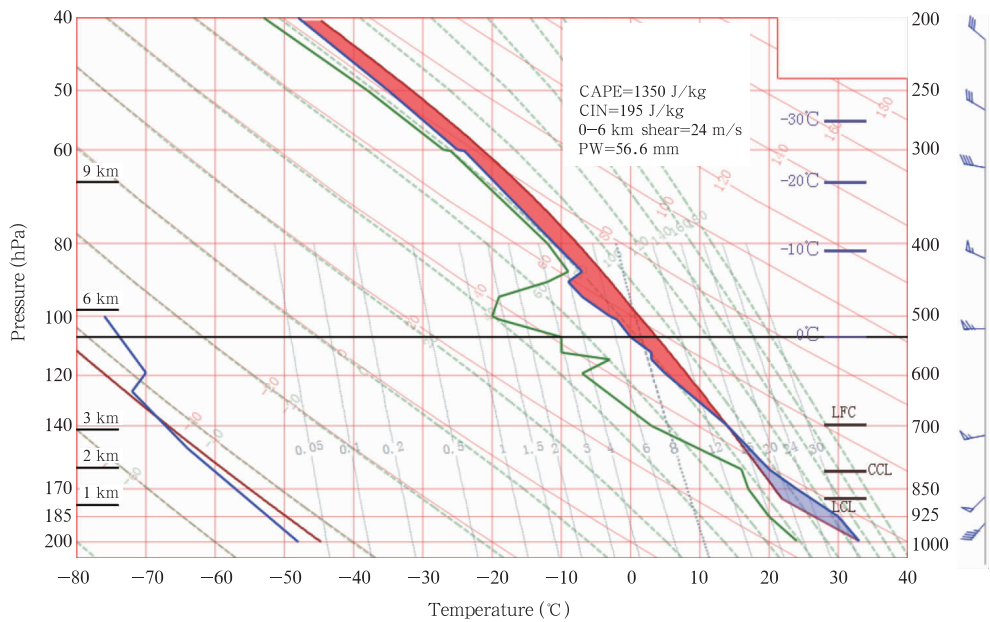


图3 2006年7月3日20时南京探空 T - $\ln p$
Fig. 3 T - $\ln p$ diagram from Nanjing sounding on 20:00 BT 3 July 2006

3 中尺度对流复合体内部结构特征分析

3.1 中尺度对流复合体与锋面气旋——地面图分析

7月3日08时地面图上,低压倒槽从西南地区伸向黄淮,地面静止锋位于豫、苏、鲁交界到黄海,14时静止锋上出现扰动,河南兰考附近出现闭合低压以及锋面,低压中心气压995 hPa,豫、鲁、皖、苏四省交界处周边形成锋面气旋(图略)。

地面锋面气旋中心15时位于鲁西南金乡一带,从低压中心向南到安徽亳州附近可以分析出一条东北—西南向弱冷锋,向东至黄海有一条近东西向锋

面(图略),锋北侧温度23—25℃,露点21—23℃,锋南侧温度26—32℃,露点24—28℃,这条锋面为弱暖锋。锋面以南中尺度对流复合体未来形成区内苏北地面气温27—30℃,露点温度25—28℃,其中中尺度对流复合体未来中心盐城地面气温与露点差约2℃,接近饱和,此区域内地面高温、高湿,08时探空显示徐州、射阳低空出现逆温层,存储和积累了大量的不稳定能量,有利于产生组织程度较高的对流风暴。15时30分后,暖锋南侧鲁西南苍山到苏北产生一条南北向对流带。16时锋面气旋中心位于山东省济宁附近,16时34分红外云图上(图略),暖区

内新沂附近生成一个近似圆形、云盖亮温很低的对流云团,显示有深厚对流发生,16时36分前后新沂出现 EF2 级龙卷(图 1)。17 时锋面气旋中心位于山东省邹城附近,17 时 34 分红外云图上(图略),新沂云团向东南扩展并趋于“圆形”,同时该云团与北侧另一对流云团相遇迅速发展,18 时(图 2a),中尺度对流复合体 220 K 特征线包围的面积扩大,19 时(图 2b)气旋暖锋略有北抬,两云团合并后,220 K

特征线包围的面积形成一个南北方向近似椭圆型,并达到中尺度对流复合体标准。20 时锋面气旋中心到达微山湖—连云港一带,低压中心气压 994 hPa,冷锋伸向皖北,暖锋东伸到黄海,暖区中中尺度对流复合体进入成熟阶段,中心区域亮温低于 200 K(图 4 深紫色虚线),对应盐城雷达组合反射率因子,出现一条有组织的 β 中尺度弓形飑线(图 4 红黄蓝等值线)。

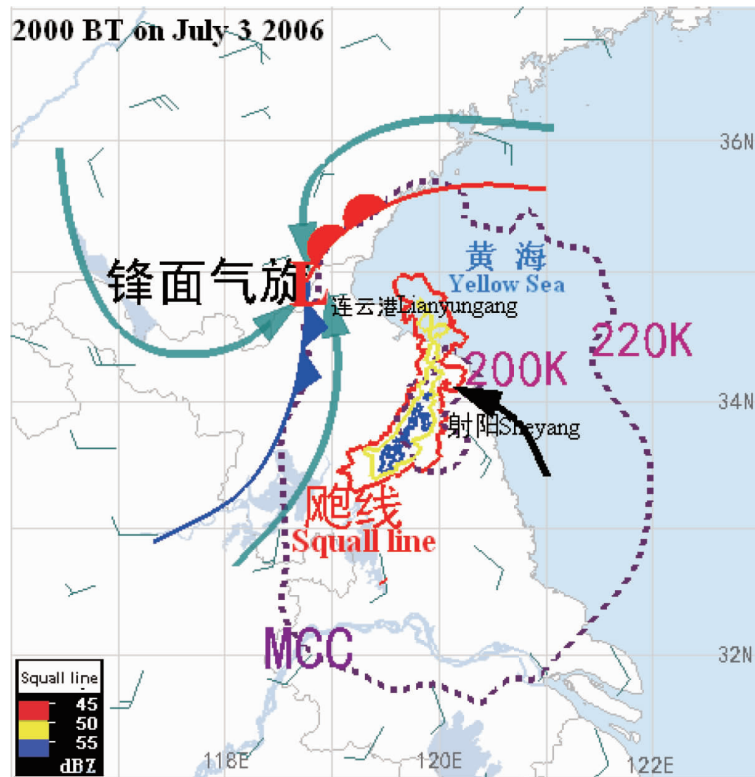


图 4 2006 年 7 月 3 日 20 时地面风场(灰色)叠加同时次 FY-2C 1 h 平均相当黑体亮温 220 K、200 K 特征线(紫色虚线)、盐城雷达探测的飑线(红黄蓝等值线)

(粗箭头表示地面流线;气旋冷、暖锋用常用冷暖锋符号标识,图中中尺度对流复合体、飑线位于气旋暖区中,连云港雷达站位于气旋中心附近,射阳位于中尺度对流复合体中心飑线前沿)

Fig. 4 The ground wind field (gray) at 20:00 BT 3 July 2006 superimposed with hourly evolution of FY-2C IR channel TBB distribution and the squall line detected by Yancheng radar

成熟阶段中尺度对流复合体云系尺度很大,如果将 20 时该中尺度对流复合体所有云系都算在内(图 5),则其长轴尺度在 1000 km 左右,属于典型的 α 中尺度对流系统,其中 220 K (-52°C) 特征线向气旋暖区东南部扩展,包围的区域成熟阶段初期近似

椭圆形(图 2c、图 4),其南北方向的长轴尺度 400 km 左右,短轴尺度 300 km 左右,属于 α 中尺度系统(低端);旺盛期呈直径超过 400 km 的近圆形;后期南北方向尺度减小到 300 km 左右,东西方向尺度增至 400 km 左右,变成长轴为东西方向近似椭圆。中

尺度对流复合体成熟阶段长时间维持 α 中尺度,中心对应一条弓形飑线,连续移向气旋暖区东南部,此区域存在强低空暖湿急流,地面高温、高湿,表明持续有不稳定能量和水汽供应是该中尺度对流复合体长时间维持 α 中尺度的关键。

3.2 中尺度对流复合体总体垂直结构

3.2.1 中尺度对流复合体的总体环流结构——高空图和红外云图分析

图 5 给出中尺度对流复合体中心射阳以及周边探空各层温度、湿度和风,均叠加 3 日 20 时红外云图。地面锋面气旋之上,925 hPa 图上,低涡位于射阳—徐州—章丘—青岛一带,850—700 hPa 低涡位于徐州—章丘—青岛一带,冷式切变位于临沂到阜阳,暖式切变从临沂伸向青岛。红外云图上,中尺度

对流复合体西北侧呈现干冷下沉气流的暗区,低涡的东侧和南侧呈现出明显的涡旋云带结构,其中,中尺度对流复合体云团位于 700 和 850 hPa 暖式切变以南。

低层西南暖湿气流从中尺度对流复合体南部流入,直到其核心区,风矢量场呈现明显气旋式旋转曲率,为构成中尺度对流复合体的对流风暴低层入流;而 400—100 hPa 高层从中尺度对流复合体东北部流出,风矢量场具有明显反气旋曲率,与红外云图纹理形态呈现特征一致,为中尺度对流复合体高层出流,其中 925 hPa (距地面约 0.7 km) 风矢量和 250 hPa (距地面约 11 km) 风矢量分别与中尺度对流复合体低层入流和高空出流的红外云图纹理结构对应最好。

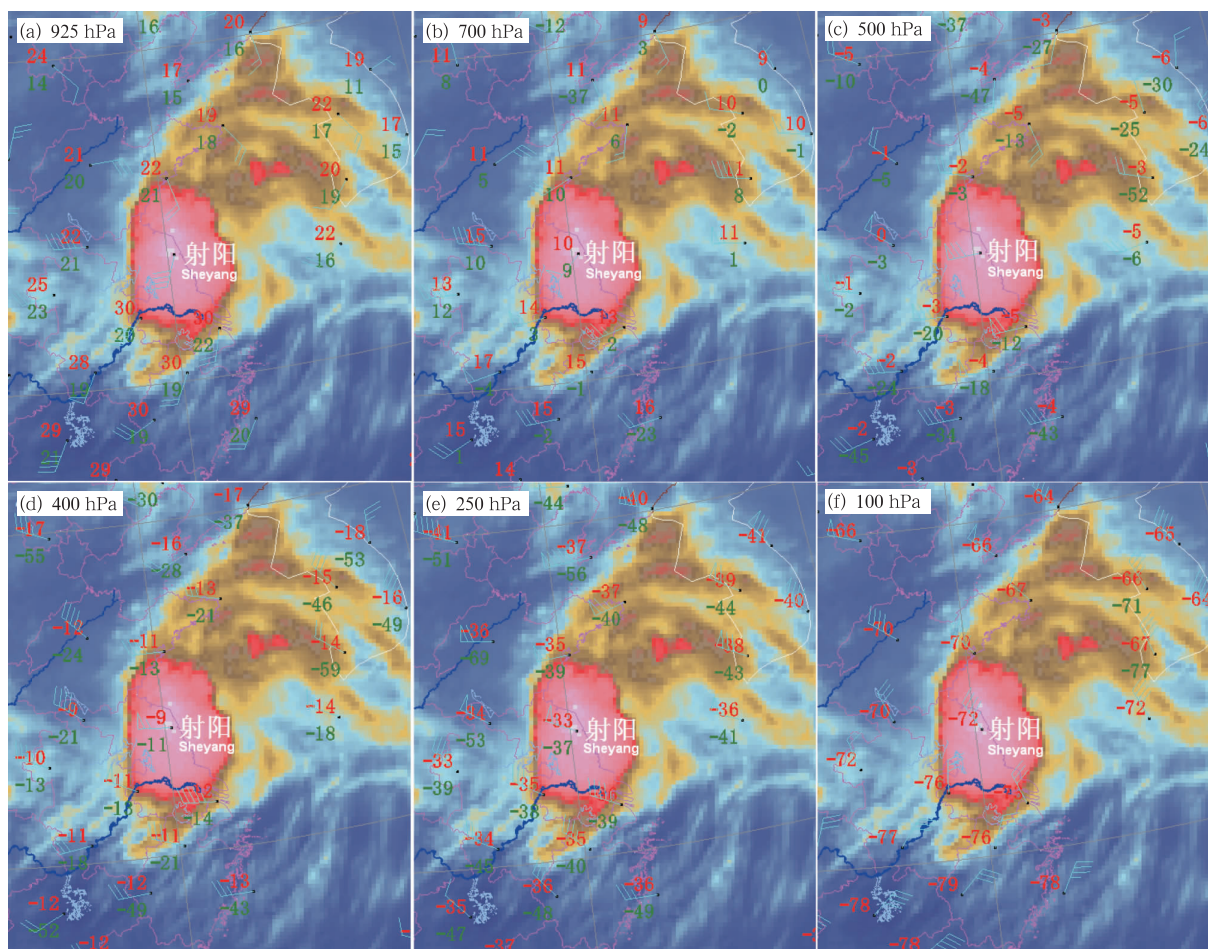


图 5 2006 年 7 月 3 日 20 时 FY-2C 红外云图分别叠加 925(a)、700(b)、500(c)、400(d)、250(e)和 100 hPa(f)各层观测的温度、露点和风向、风速

Fig. 5 FY-2C IR image at 20:00 BT 3 July 2006 superimposed with observed temperature, dewpoint, and wind at 925 (a), 700 (b), 500 (c), 400 (d), 250 (e) and 100 (f) hPa levels

如前所述,最终形成中尺度对流复合体的中尺度对流系统初始形成于 500 hPa 短波槽前,位于 850 hPa 切变线南侧(图略)。3 日 14 时以后,高空槽以东和低空切变线以南地面准静止锋(梅雨锋)上出现锋面气旋扰动,而正在形成中的中尺度对流复合体北侧位于地面锋面气旋暖区内靠近暖锋附近,同时大气边界层内的低层暖湿气流变得十分显著。因此,中尺度对流复合体形成于 500 hPa 短波槽前、副热带高压以北、高空(250 hPa)强辐散区以下,以及对流层低层显著暖湿急流的天气尺度上升运动区内,与地面准静止锋上锋面气旋扰动相伴随。与 Maddox(1983)分析的发生在美国南部大平原上的中尺度对流复合体相比,其形成的大尺度环境方面,均位于 500 hPa 短波槽下游,只是 Maddox 分析的中尺度对流复合体环境低层暖平流明显,而苏北的中尺度对流复合体低层暖平流很弱(因为低层水平温度梯度很弱),但低层暖湿气流很强(与副热带高压和西侧低值系统间较强气压梯度相关)。

3.2.2 中尺度对流复合体中心地面自动气象站要素演变——雷暴冷高压与阵风锋分析

图 6a—d 与图 2b—e 中红框对应,此时段中尺度对流复合体中心对应一条飑线。雷达探测显示 19 时飑线位于连云港、灌云到淮安,19 时 10 分地面观测站显示,灌南站温度降至 25.8℃,气压升至 998.1 hPa,灌南附近形成雷暴高压冷池(图 6a 黑 H),并对应飑线中部后侧雷达图上低层高反射率因子区(图略),冷池与周边暖湿气流的交界处形成 β 中尺度阵风锋,呈东北—西南方向(图 6a 蓝三角线),位于响水、滨海至淮安,阵风锋前部为暖湿低压区,楚州站位于低压中心附近,气压 994.6 hPa(图 6a 红 L),温度 29.1℃,阵风锋前为东南风,在雷暴高压、飑线前侧,19 时 23 分左右,楚州流均镇产生 EF1 级龙卷(图 1)。

20 时雷暴冷高压南下,滨海站位于雷暴冷高压中心附近,气压 999 hPa(图 6b 黑 H),20 min 升压 2.2 hPa,温度降至 27℃,滨海站及滨海农科园区域自动气象站均出现 7 级以上偏西大风,同时伴有短时强降水,阵风锋位于射阳到建湖一带(图 6b 蓝三角线),建湖站位于暖湿低压中心附近,20 min 降压 2.1 hPa,气压 994.3 hPa(图 6b 红 L),温度 29.9℃,阵风锋前为东南风,最大瞬时风力达 7 级,出现在建湖局区域自动气象站,在雷暴高压、飑线前侧,20

时 13 分前后阜宁东沟、杨集和益林镇出现 EF2 级龙卷(图 1、10),此外建湖境内也产生 EF1 级龙卷。

21 时雷暴冷高压中心南移(图 6c),位于滨海、阜宁至射阳,高压为 998 hPa,雷暴高压区中的射阳站,21 时 02 分出现极大阵风 18.9 m/s,是与极端短时强降水相伴随的下沉气流辐散出流产生的直线型大风(21 时 10 分射阳 10 min 升压 2 hPa,气压达 999.2 hPa),阵风锋到达射阳与盐城交界处(图 6c 蓝三角线),位于暖湿低压中心附近的盐都站气压 995.7 hPa(图 6c 红 L),阵风锋前 20 时 39—43 分盐都站、射阳洋马和盐城市气象局区域自动气象站出现 8—12 m/s 瞬时东南风,在雷暴高压、飑线前侧,21 时 08 分前后盐都新兴镇、青墩镇出现 EF2 级龙卷(图 1、10)。

21 时 40 分,雷暴高压区域增大,温度降低,射阳到盐城温度 24—27℃,雷暴高压中心附近的盐都站 20 min 升压达 2 hPa,气压 999.3 hPa(图 6d),21 时 37 分观测到 19.3 m/s 瞬时大风,21 时 40—50 分降雨量 34.2 mm,在雷暴高压区雷达探测到下击暴流辐散特征,阵风锋转为近东西向(图 6d 蓝三角线),位于大丰北部—兴化一线,大丰站位于暖湿低压中心附近,气压 995 hPa(图 6d 红 L),10 min 降压 1.1 hPa,阵风锋前出现最大瞬时风力达 6 级的东南风,在雷暴高压、飑线前侧,22 时 20 分前后大丰新丰镇产生 EF2 级龙卷(图 1、10)。

由图 6 可见,飑线产生极端短时强降水,与之伴随的冷下沉气流倾泻在地表形成 β 中尺度雷暴高压冷池,冷池与周边暖湿气流的交界处为 β 中尺度阵风锋,飑线南下过程中雷暴高压发展,出现偏西大风,阵风锋从东北—西南向转为近东西向,阵风锋前部地面有 β 中尺度暖低压,低层有暖湿东南风(图 6 蓝色箭头),环境低层风垂直切变大,对应在飑线、雷暴高压前侧产生了 EF1 和 EF2 级系列龙卷。

与上述分析结合,盐城和连云港多普勒天气雷达低仰角反射率因子和径向速度图上,飑线前沿存在明显的辐合线,与根据地面图确定的阵风锋位置对应,进一步证实了上述分析结果(图略)。

3.2.3 中尺度对流复合体中心中高层流场——雷达和探空资料分析

7 月 3 日 18 时 34 分 FY-2C 可见光云图(图略)上,中尺度对流复合体风暴顶位于苏北洪泽湖到黄海,形态近似圆形,其下雷达探测到一条飑线(图 9)

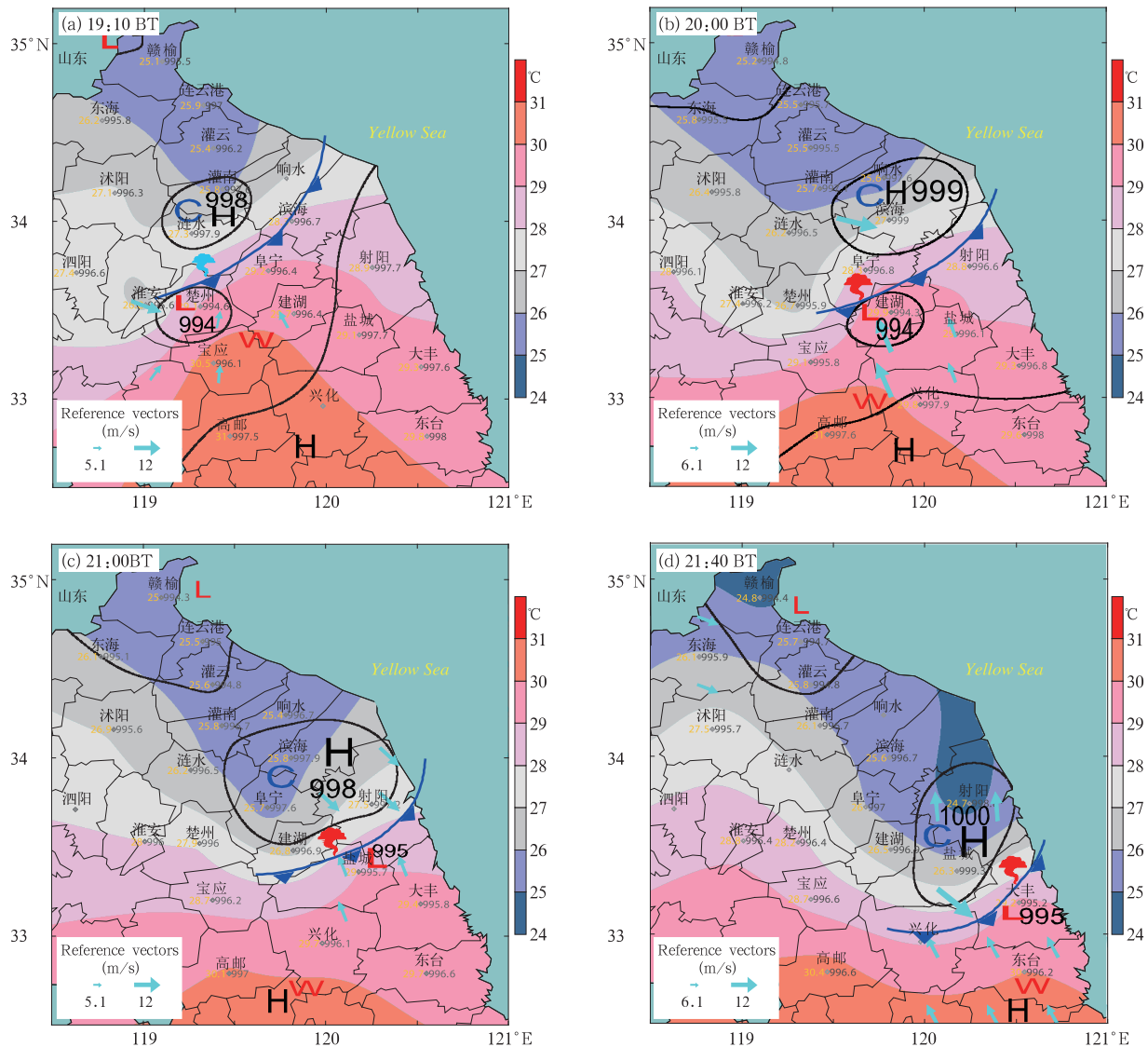


图6 2006年7月3日19时10分(a)、20时(b)、21时(c)、21时40分(d)苏北中尺度对流复合体成熟时段(对应图2b—e中红框)其中的飑线(图4、图9)及其周边范围内地面雷暴冷高压和阵风锋演变

(图中为县气象站(加密资料)海平面气压(灰黑字,单位 hPa)、气温(黄字,单位℃)和风(2 min 平均,单位 m/s),黑色圈为雷暴冷高压(黑 H),蓝三角线为阵风锋,阵风锋前有暖低压(红 L 为暖低压中心),EF2 级龙卷产生于飑线前侧,C、W 分别表示冷区与暖区)

Fig. 6 Evolution of the squall line (Fig. 4, Fig. 9), the thunderstorm cold high pressure and gust front in the surrounding area of the north Jiangsu MCC at its mature stage at 19:10 (a), 20:00 (b), 21:00 (c), 21:40 (d) BT 3 July 2006

(a—d correspond to the red box in Fig. 2b—e)

移向东南。20时58分连云港多普勒雷达图(图9d)上,该飑线位于盐城建湖、阜宁、射阳到黄海一线,长度超过200 km,0.5°仰角反射率因子图上,2.8 km高度附近飑线主要由密实的50 dBz左右回波组成,形态呈弓形(图7a₁双箭头所指),对应0.5°仰角径

向速度图上,出现 β 中尺度辐合线(图7a₂双箭头左右);1.5°仰角反射率因子图上,飑线形态仍然呈现弓形,5 km高度附近反射率因子略有减弱,主要由密实的45—50 dBz回波组成(图7b₁双箭头所指),飑线高反射率因子主要集中在0℃层高度以下,有

利于短时强降水的产生。1.5°仰角径向速度图上,在低层 β 中尺度辐合线之上,5 km 高度附近阜宁到

射阳出现近似对称 β 中尺度辐合式气旋性涡旋(图7b₂白色圈),离开雷达的出流速度为15 m/s

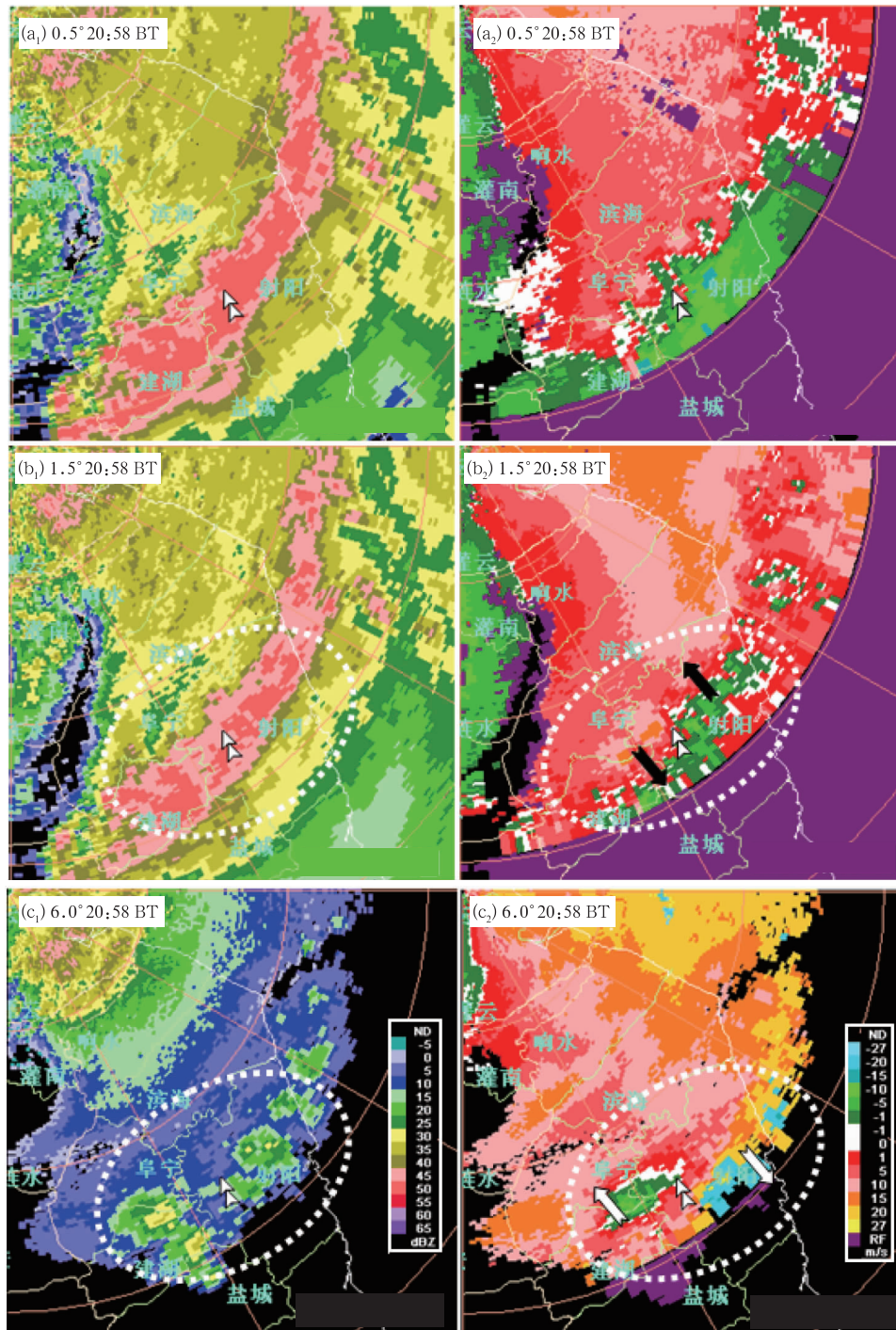


图7 2006年7月3日20时58分连云港SA雷达0.5°(a)、1.5°(b)、6.0°(c)仰角
反射率因子(a₁—c₁)和径向速度(a₂—c₂)

(双箭头指向同一位置)

Fig.7 Radar reflectivity (a₁—c₁) and radial velocity (a₂—c₂) images at 0.5° (a),
1.5° (b), 6.0° (c) elevations at 20:58 BT 3 July 2006 observed by Lianyungang SA radar

(图 7b₂ 双箭头左侧黑箭头附近),流向雷达的入流速度为 10 m/s(图 7b₂ 双箭头右侧黑箭头附近),旋转速度为 13 m/s。对比 20 时探空,对流层 3—6 km 高度气温射阳比南京低 3—6℃,中尺度对流复合体中低层为冷性;4—8 km 高度气压射阳比南京低 1—5 hPa,中尺度对流复合体中层主要特征为 β 中尺度气旋性涡旋对应的中尺度低压;10—14 km 高度爬线反射率因子明显减弱,对应径向速度图上出现辐散气流,单侧最大径向速度达到 34 m/s(图略),20 时探空显示对流层 8—12 km 高度气温射阳比南京高 2℃左右,中尺度对流复合体中高层为暖心结构;在爬线中低层高反射率因子区之上,6.0°仰角反射率因子图上,16 km 高度附近爬线回波减弱为 10—35 dBz(图 7a₁—c₁ 双箭头位置),显示爬线风暴顶在 16 km 高度附近,相应 6.0°仰角径向速度图上,在中层 β 中尺度气旋性涡旋中尺度低压之上,14—16 km 高度阜宁到射阳爬线顶部出现浅薄的 β 中尺度辐散式反气旋环流,转动速度 27 m/s(图 7c₂ 白色圈中双箭头左右白箭头所指)。与之对应,盐城多普勒天气雷达 19 时后在高仰角反射率因子和径向速度图上,淮安到响水上空也探测到风暴顶辐散(图略),显示成熟时段中尺度对流复合体顶部有浅薄短暂的辐散反气旋环流,雷达和探空资料分析表明,中尺度对流复合体垂直流场特征中低层为冷心,中层为 β 中尺度气旋性涡旋对应的中尺度低压,中高层为暖心结构,高层辐散,最后在风暴顶部形成浅薄短暂的 β 中尺度辐散式反气旋环流。

3.2.4 中尺度对流复合体垂直结构

根据上述分析,图 8 给出了 7 月 3 日苏北到黄海中尺度对流复合体成熟阶段大致的垂直环流结构示意图。模型图显示,中尺度对流复合体有相对稳定、近似圆形的 α 中尺度冷云盖(图 8 紫色线)。边界层近地层东南气流和其上低层西南暖湿气流从中尺度对流复合体南部流入到中心(图 8 红色粗箭头线),风矢量具有明显的气旋性旋转曲率,异常暖湿的低空气流进入风暴,在中下层形成强烈的中尺度上升气流(图 8 红色双箭头),空气柱拉伸降温降压,中尺度对流复合体位于对流层中下层部分形成冷心(图 8);中高层水汽凝结潜热释放加热形成暖心结构(图 8);500 hPa 西风槽后,中尺度对流复合体后部为较干冷的西北气流夹卷进入爬线,导致降水蒸发冷却

形成强下沉气流,产生带有西北动量的冷下沉气流(图 8 蓝色粗箭头线),倾泻在地表形成 β 中尺度雷暴高压冷池(图 8 黑线),冷池与周边暖湿气流的交界处为 β 中尺度阵风锋(图 8 蓝色锋线),阵风锋前侧地面形成 β 中尺度暖低压(图 8),低层有暖湿东南风和西南风(图 8 红色粗箭头线),低层偏北气流与偏南气流辐合旋转上升;对流层上层加热、下层冷却在中层形成 β 中尺度气旋性涡旋对应的中尺度低压(图 8 绿色线),对流层中层 β 中尺度气旋性涡旋导致向上的气压梯度力扰动进一步加强中尺度对流复合体的低层入流。爬线顶部、16 km 高度附近中尺度对流复合体顶部有 β 中尺度浅薄短暂的辐散反气旋环流。中尺度对流复合体东北侧,高层环境风矢量场具有明显反气旋曲率,而风暴顶反气旋环流加大了其东北侧气压梯度,增加反气旋性弯曲的辐散外流,高层反气旋环流增加了风暴顶辐散,出流从复合体的北部流出(图 8 紫色粗箭头线),与 250 hPa 流场、红外云图纹理特征一致(图 5e)。图 8 只是给出了中尺度对流复合体整体的粗略垂直环流结构,对于其内部更为细致的结构,需要通过多普勒天气雷达回波进行分析。

3.3 中尺度对流复合体结构——雷达资料分析

3.3.1 α 和 β 中尺度结构

7 月 3 日 20 时连云港位于锋面气旋中心附近(图 4),利用该雷达资料分析上述系统。图 9 与图 2 对应,为连云港 SA 雷达 7 月 3 日 18—23 时逐时 0.5° 仰角反射率因子,每个距离圈间隔为 100 km。18—19 时,回波为两条主要的对流雨带,整体呈“人”字形螺旋,一条雨带从安徽蚌埠附近伸向连云港以北,长度在 300 km 左右,最强回波在 50—55 dBz,另一条雨带从黄海海面伸向连云港以北,长度在 300 km 以上,最强回波为 40—45 dBz。由于这两条雨带均呈现出气旋性曲率的螺旋结构,可以大致判断在连云港附近存在旋转核心,这个核心与同时段锋面气旋的中心对应。18 时在上述两条对流雨带之间,还存在一条回波强度较弱的气旋性曲率的雨带(30—35 dBz),汇入上述旋转核心。18—19 时上述两条线状对流雨带的尺度都达到 α 中尺度低端,其中回波较强部分(40 dBz 以上)尺度基本上属于 β 中尺度高端(150—200 km)。

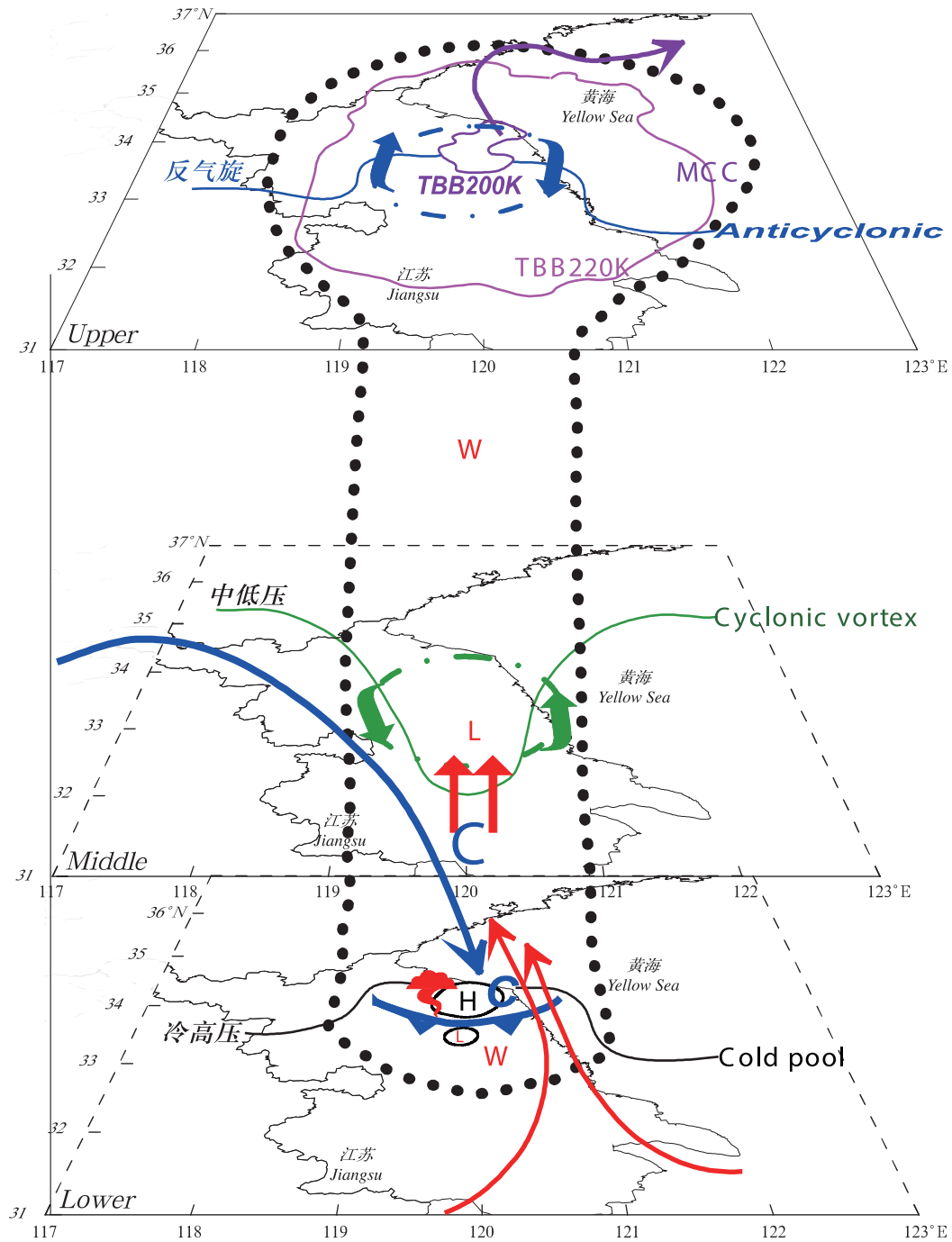


图 8 2006 年 7 月 3 日苏北黄海之滨中尺度对流复合体垂直结构示意图

(蓝色锋线表示阵风锋; 蓝色、红色和紫色箭头线表示冷、暖气流和出流;

H、L、C、W 分别表示高压、低压、冷区、暖区)

Fig. 8 The schematic diagram of vertical structure of the MCC on 3 July 2006

(the blue frontline represents the gust front; the blue, red and purple arrows denote cold airflow,

warm airflow and upper-level outflow; H and L show high pressure and low pressure;

C and W show cold and warm zones)

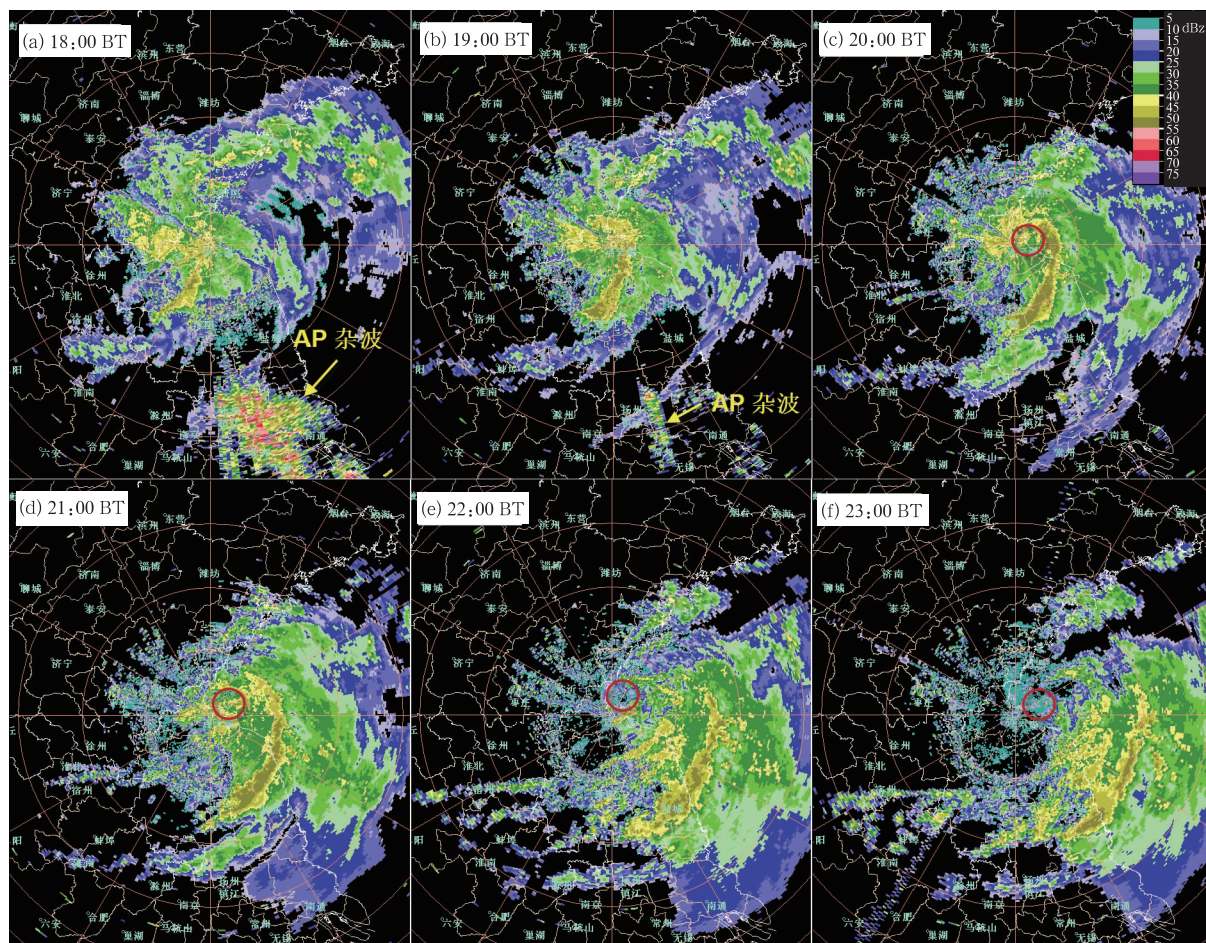


图9 2006年7月3日18—23时(a—f)连云港SA雷达0.5°仰角反射率因子逐时图像
(每个距离圈间隔为100 km)

Fig.9 Hourly radar reflectivity images at 0.5° elevation from 18:00 to 23:00 BT (a—f)
3 July 2006 observed by Lianyungang SA radar

20时安徽蚌埠到连云港附近的对流雨带增强,回波强度50—55 dBz,个别位置最强回波超过55 dBz,整条回波带呈较为典型的弓形飑线结构(图9),随后产生雷雨大风、龙卷和强降水等强对流天气。这条回波带能够迅速发展的原因是位于锋面气旋暖区之中,该区域内强低空暖湿急流提供了充足的水汽和能量供应,使得飑线能够维持较长时间。18—19时从黄海海面伸向连云港北部的对流雨带明显减弱,不过飑线以东黄海海面上仍有较弱的气旋曲率对流雨带汇入连云港附近的涡旋中心。20时反射率因子图上,可以比较确定地判断出涡旋核心的位置(图9中红色圆圈)。由于涡旋较大,相应的径向速度图上并不容易识别,只有在盐城SA雷达20时径向速度图上能够识别出上述涡旋,其位置

和尺度与根据连云港SA雷达低仰角反射率因子图上呈气旋式旋入该涡旋中心的螺旋对流雨带确定的位置和尺度大致相当(图略)。如果用蓝金组合涡旋模型(俞小鼎等,2006a)代表整个涡旋,则红色圆圈代表整个涡旋的核心部分,其尺度为40—60 km,属于 β 中尺度气旋,从地面附近一直扩展到7—8 km高度,并且从低到高自东北向东南方向倾斜。该 β 中尺度气旋一方面对应上述锋面气旋的涡旋中心,另一方面,根据Houze(2004)给出的中尺度对流系统概念模型,也是相应中尺度对流复合体的 β 中尺度气旋中心,直径为40—60 km;21时飑线回波特征与20时类似,至22和23时,除了上述那条主要对流雨带“弓形飑线”以外,还有数条呈气旋性曲率较弱一些的雨带,旋入共同的涡旋核心。

总体上来说,上述中尺度对流复合体从雷达回波结构看,除了一条主要呈气旋性弯曲的弓形飚线外,还有数条较弱的呈气旋性旋转的雨带,数条雨带旋入共同的涡旋核心,即锋面气旋的中心,同时对应中尺度对流复合体的 β 中尺度气旋的中心。因此,这个中尺度对流复合体是线性结构,其雷达回波结构呈现的主要线状对流——弓形飚线的总长度最长在300 km以上,属于 α 中尺度低端,而其活跃对流部分(40 dBz以上部分或深厚湿对流部分)尺度随时间有所变化,在150—200 km,属于 β 中尺度的高端。

3.3.2 γ 中尺度涡旋及其导致的龙卷

这次中尺度对流复合体过程中先后观测到7次龙卷,其发生时间、位置和强度见图1,其中有4次EF2级龙卷,3次EF1级龙卷,系列龙卷导致9人死亡,92人受伤。7月3日20—23时是盐城地区3个EF2级龙卷发生时段(图10),此时段中尺度对流复合体低于200 K的冷云盖位于盐城上空(图2c—e中红框内),地面自动气象站观测到雷暴冷高压、阵风锋以及前侧暖低压(图6b—d),在阵风锋后侧盐城雷达组合反射率因子图上为一条回波强度40—60 dBz的弓形飚线(图10a—c黄、灰等值线),对比图10a—c与图6b—d,飚线后侧回波强度在50 dBz以上的密实部分对应雷暴高压区,雷暴高压的前沿、阵风锋之后,也就是飚线的前侧分别在20时07分、21时08分和22时20分先后出现3个EF2级龙卷(图10a—c)。3次EF2级龙卷发生地点分别位于盐城市的阜宁县、盐都区和大丰县,距离盐城雷达站都比较近,分别为58、14和29 km。这3次龙卷都发生在弓状飚线的前侧,沿着50—55 dBz反射率因子区域的前沿中尺度涡旋内(图10)。

图10d—i分别给出了7月3日20时07分、21时08分和22时22分飚线盐城SA型多普勒天气雷达的反射率因子和径向速度,3个时刻选择了不同仰角,分别是0.5°、2.4°和0.5°,在相应仰角上,该时刻导致龙卷的中尺度涡旋(Weisman, et al, 1998, 2003; Trapp, et al, 2002, 2003, 2005)最明显(图10中深蓝色小圆环)。特别需要指出,这几个中尺度涡旋不是与超级单体风暴相联系的中气旋,这两类 γ 中尺度涡旋产生的机制都涉及到水平涡度在垂直气流中扭曲为垂直涡度,但它们有明显差别。中尺度

涡旋形成过程中,水平涡管的垂直扭曲发生在下沉气流中,由于地转涡度的拉伸使得气旋式涡旋占支配地位(Trapp, et al, 2003)。而超级单体中气旋的形成是含有显著水平涡度分量的低层暖湿入流在强上升气流中垂直扭曲,而上升气流与垂直气旋性涡度的高度相关使得气旋式涡旋得以加强,反气旋涡旋受到抑制(Markowski, et al, 2014)。因此,这几个发生在弓形飚线前侧的龙卷属于非超级单体龙卷。根据Trapp等(2003, 2005)的研究,这类中尺度涡旋主要形成于飚线和弓形回波前侧,可以导致龙卷或者直线型对流大风,它们产生的龙卷在非超级单体龙卷中是属于比较强的,有些龙卷可以达到EF2甚至EF3级。尽管这类飚线和/或弓形回波前侧的中尺度涡旋通常比超级单体中气旋要浅薄,但常常被中气旋探测算法错误地识别为中气旋。上述3个导致龙卷的中尺度涡旋,盐城SA多普勒天气雷达中气旋探测算法均识别出中气旋。图10所示3个产生EF2级龙卷的中尺度涡旋(深蓝色小圆圈)直径在4—5 km(其放大图见图片右上角),龙卷发生时这3个中尺度涡旋底部距离地面分别为0.8、0.2和0.3 km,非常靠近地面,这一点与产生龙卷的超级单体中气旋类似,中尺度涡旋的旋转速度分别为25、22和25 m/s,与较强中气旋的旋转速度相当。这3个中尺度涡旋底部,其内含有直径在1 km及以下的小涡旋,旋转速度分别为16、20和18 m/s(图10右上角放大图中蓝色箭头所指),该小涡旋与产生龙卷的超级单体中气旋内龙卷式涡旋特征TVS类似(Brown, et al, 1978)。除了产生龙卷的中尺度涡旋,图10中浅蓝色小圆圈表示未产生龙卷(至少没有观测到)的中尺度涡旋,也是位于弓形回波前侧。此外,对于飚线前侧另外龙卷发生地点和时间,在连云港和/或盐城SA雷达0.5°仰角径向速度图上都发现了对应的中尺度涡旋(图略)。Weisman等(2003)及Trapp等(2003)根据数值模拟结果指出,只有在对流层中低层(0—2.5 km)风垂直切变比较强时,才会在飚线和/或弓形回波前侧出现中尺度涡旋,否则,仍然可以模拟出飚线和/或弓形回波,只是其前侧不会出现中尺度涡旋。而此次中尺度对流复合体的确出现在对流层中低层风垂直切变较强的环境下。

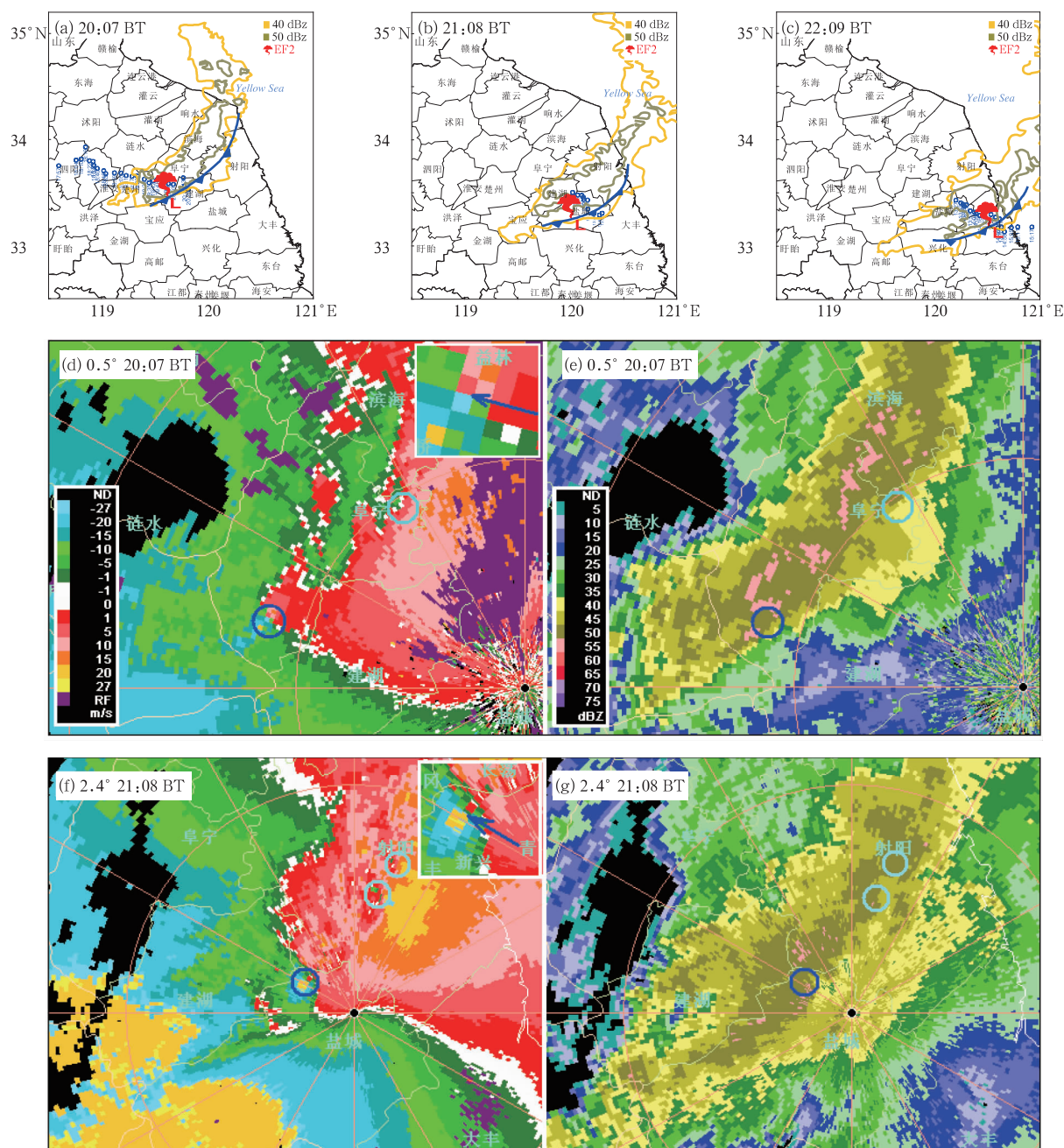


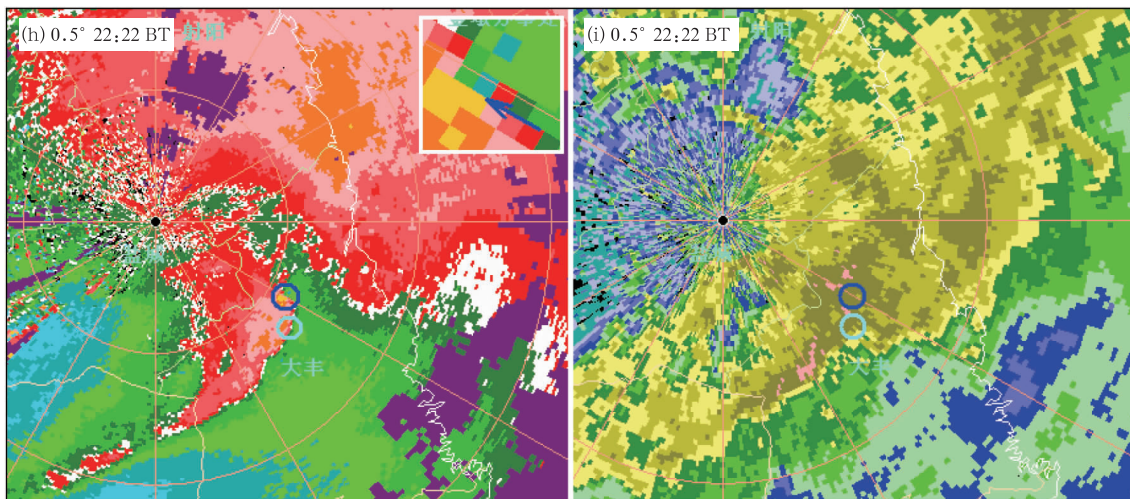
图10 2006年7月3日20时07分(a)、21时08分(b)、22时09分(c)盐城雷达探测的飑线(黄、灰等值线)及地面自动气象站识别的阵风锋和EF2级龙卷(对应图2c—e中红框和图6b—d);盐城SA型多普勒天气雷达20时07分0.5°仰角(d、e)、21时08分2.4°仰角(f、g)和22时22分0.5°仰角(h、i)

平均径向速度(d、f、h)和反射率因子(e、g、i)

(深蓝色小圆圈代表产生龙卷的中尺度涡旋,该中尺度涡旋放大图在平均径向速度图的右上角,浅蓝色小圆圈代表没有产生龙卷的中尺度涡旋)

Fig. 10 The squall line detected by Yancheng Radar (yellow, gray contour), gust front and EF2 tornado identified from automatic station observations at 20:07 (a), 21:08 (b), 22:09 (c) BT 3 July 2006 (correspond to the red box in Fig. 2c—e, and Fig. 6b—d), and the Yancheng SA Doppler weather radar observations at 20:07 BT at 0.5° elevation angle (d, e), at 21:08 BT at 2.4° elevation angle (f, g) and 22:22 BT at 0.5° elevation angle (h, i) of average radial velocity (d, f, h) and reflectivity factor (e, g, i)

(The small dark blue circle represents the mesovortice that produced the tornado, the magnified image of the mesovortice is located at the upper right corner of the average radial velocity panel; the small light blue circle represents the mesovortice without the tornado)



续图 10

Fig. 10 Continued

3.3.3 γ 中尺度下击暴流

本次中尺度对流复合体发展过程中,不仅先后观测到 7 次龙卷以及导致龙卷产生的直径 4—5 km 的中尺度涡旋,径向速度图中还发现有表明下击暴流事件的低层辐散特征。由于只能在距离雷达较近范围内通过低层辐散特征确认下击暴流,此次中尺度对流复合体发展过程只识别出两次下击暴流低层辐散特征:一次发生在 7 月 3 日 21 时 10—20 分盐城市盐都区东北部和射阳县交界处(图略)。20 时 58 分在连云港 0.5°仰角径向速度图上, β 中尺度辐合线两侧出现 2 个明显的正、负径向速度辐合对,一个位于建湖东部、盐都北部与射阳交界,另一个位于射阳站以北地区(图 7a₂ 双箭头左右),该径向辐合为风暴中层径向辐合,对流风暴内中层径向辐合预示下击暴流的产生(Roberts, et al, 1989; 俞小鼎等, 2006a, 2006b; 吴芳芳等, 2009)。与射阳站以北地区的风暴中层径向辐合对应,射阳气象站 21 时 02 分出现瞬时阵风 18.9 m/s,为下沉气流辐散出流产生的下击暴流直线型大风,并伴有短时强降水,同时温度降低(图 6c),出现雷暴冷高压(射阳站 21 时 10 分 10 min 升压 2 hPa,气压达 999.2 hPa); 20 时 58 分位于建湖、盐都与射阳交界的风暴中层径向辐合特征在 1.5°仰角径向速度图上比 0.5°仰角更为明显(图 7a₂、b₂ 双箭头位置左侧),5 km 高度附近离开雷达的出流速度为 15 m/s(图 7b₂ 双箭头左侧),流向雷达的入流速度为 10 m/s,速度差值达 25 m/s。

中层径向辐合出现比地面大风提前 10—30 min(俞小鼎等, 2006b), 21 时 14 分在盐城雷达径向速度图中盐都的东北部到射阳交界观测到下击暴流导致的低层辐散特征(距离地面 200—500 m),辐散中心对应炮线低层 50—55 dBz 高反射率因子区(图略),该辐散中心距离盐都站很近,盐都站 21 时 37 分观测到 18 m/s 大风, 21 时 40—50 分降雨量 34.2 mm,为伴随下击暴流产生的极端短时强降水。低层辐散尺度从开始的 6 km 左右, 21 时 20 分逐渐扩大到 12 km 左右,属于 γ 中尺度的宏下击暴流(俞小鼎等, 2006b),正、负速度对差值达到 36 m/s,其中单侧最大径向速度达到 28 m/s,极值中心距离地面 450 m。如果假定辐散为轴对称的(为了能够近似计算散度),则对应的散度值为 $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。另一次下击暴流低层辐散特征发生在 7 月 3 日 21 时 50 分—22 时 05 分盐城市盐都区、射阳县和大丰县交界处附近,下击暴流导致的低层辐散尺度从初始时的 6 km 扩展到快结束时的 15 km 左右,构成低层辐散的正、负速度对差值为 32 m/s。两次下击暴流的低层辐散中心距离盐都站均很近,盐都站 21 时 16 分—22 时 16 分降雨量 106 mm, 20 min 升压 2 hPa,温度下降, 21 时 40 分气压升至 999.3 hPa(图 6d),强烈下沉气流伴随极端短时强降水倾泻在地表形成 β 中尺度雷暴高压冷池。

4 结 论

对 2006 年 7 月 3 日傍晚到 4 日凌晨发生在苏

北到黄海的一次中尺度对流复合体过程的天气背景尤其是其内部多尺度结构进行了详细分析,主要结论如下:

(1) 该中尺度对流复合体产生的天气背景的主要特征是:高层为南亚高压东伸脊东北侧与副热带西风急流分流区对应的辐散流场,中层为副热带高压西北侧和 500 hPa 东移的短波槽前,低层为低空急流轴左前侧、700 和 850 hPa 切变线南侧,以及地面锋面气旋暖区内。地面至 500 hPa 风向随高度呈明显顺时针旋转、低空有东南风和位于其上的西南风暖湿急流。本例中尺度对流复合体是在中等至强的对流有效位能、强的深层(0—6 km)和低层(0—1 km)风垂直切变环境下形成,同时对流层中层存在一定的干层,低层露点值很高,因此,该中尺度对流复合体不仅具有产生强降水的极大潜势,还具有产生龙卷和直线型对流大风的较大潜势。

(2) 文中中尺度对流复合体 220 K(-52℃)特征线包围的区域成熟阶段初期近似椭圆形,南北方向长轴尺度在 400 km 左右,短轴尺度在 300 km 左右,属于 α 中尺度系统(低端);旺盛期呈直径达到 400 km 以上的近似圆形;后期南北向尺度减至 300 km 左右,东西向尺度增至 400 km 左右,变成长轴为东西方向近似椭圆形,仍属于 α 中尺度系统。中尺度对流复合体成熟阶段长时间维持 α 中尺度,连续移向气旋暖区东南部,此区域有强低空暖湿急流,地面高温、高湿,加上中尺度对流复合体云顶的辐射降温,有利于被对流活动消耗掉的对流有效位能的重建,使得中尺度对流复合体能够长时间维持。

(3) 该中尺度对流复合体成熟阶段,内部为一条尺度在 150—200 km 活跃的弓形飑线,移向东南,与之伴随的强下沉气流倾泻到地面附近形成 β 中尺度雷暴高压冷池,冷池前沿为阵风锋(雷暴外流边界),飑线南下过程中雷暴冷高压持续发展,气压升高,温度持续下降,面积逐步增大,产生 100 mm/h 以上极端短时强降水,并出现系列下击暴流,飑线前 β 中尺度阵风锋从东北—西南向转为近东西向,阵风锋前有暖湿的东南风,环境低层风垂直切变大,对应在飑线、雷暴高压前侧产生了 EF1 和 EF2 级系列龙卷。

(4) 此次中尺度对流复合体在 20 时前后成熟,与 20 时探空时间相近;射阳探空站位于中尺度对流复合体中心区域;中尺度对流复合体形成和演变均

位于苏北新一代天气雷达有效探测范围内;其覆盖区域有较密集的地面自动气象站,多种设备组成的观测网揭示了该中尺度对流复合体云盖下的结构特征:中层相对干冷的西北气流夹卷进入中尺度对流复合体,蒸发冷却形成强烈下沉气流,到地面形成 β 中尺度冷池(雷暴高压)和阵风锋,阵风锋前部地面形成 β 中尺度暖低压;低层暖湿偏南急流沿阵风锋前侧进入中尺度对流复合体,形成强烈上升气流;复合体中层产生 β 中尺度气旋性涡旋对应的中尺度低压;复合体中高层由于水汽凝结潜热释放加热形成暖心结构;复合体风暴顶存在 β 中尺度辐散反气旋环流;暖湿的偏南急流从风暴低层流进,持续输送水汽和维持高对流有效位能,高层流出从风暴顶流出,构成了一个具有高度组织的中尺度环流系统。

(5) 该中尺度对流复合体重要特征产生了系列龙卷和下击暴流,由于主要灾害发生在盐城多普勒天气雷达有效探测范围内,因此有机会研究了导致龙卷和下击暴流产生的精细结构:弓形飑线内部 2—5 km 高度有中层径向辐合,飑线低层密实的高反射率因子区对应径向速度图中尺度在 6—15 km 辐散场,此区域产生 γ 中尺度下击暴流并形成了 β 中尺度雷暴高压冷池。弓形飑线前侧有多个中尺度涡旋,该涡旋水平尺度 4—5 km,产生机制与超级单体中气旋不同,结构上垂直伸展高度比超级单体中气旋偏低。中尺度涡旋中有部分涡旋转动速度与产生龙卷的超级单体包含的强中气旋旋转速度相当,其内含直径约 1 km 类似龙卷式涡旋特征的小涡旋,该类中尺度涡旋导致尺度几十到几百米的系列 EF2 和 EF1 级龙卷的产生。

参考文献

- 范雯杰,俞小鼎. 2015. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 41(7): 793-805. Fan W J, Yu X D. 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China. Meteor Mon, 41(7): 793-805 (in Chinese)
- 符式红,王秀明,俞小鼎. 2018. 相似环流背景下海南两次不同类型强对流天气对比研究. 气象学报, 76(5): 742-754. Fu S H, Wang X M, Yu X D. 2018. A comparative study on two consecutive severe convective weather events in Hainan under similar background. Acta Meteor Sinica, 76(5): 742-754 (in Chinese)
- 高晓梅,俞小鼎,王令军等. 2018. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析. 气象学报, 76(2): 196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al. 2018. Characteristics of environmental pa-

- rameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province. *Acta Meteor Sinica*, 76(2): 196-212 (in Chinese)
- 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. *气象*, 35(10): 32-39. Liu J, Zhu J J, Wei D B, et al. 2009. Doppler weather radar typical characteristics of the 3 July 2007 Tianchang supercell tornado. *Meteor Mon*, 35(10): 32-39 (in Chinese)
- 陶祖钰, 黄伟, 顾雷. 1996. 常规资料揭示的中尺度对流复合体的环流结构. *热带气象学报*, 12(4): 372-379. Tao Z Y, Huang W, Gu L. 1996. Meso- α -scale circulation of mesoscale convective complex revealed by conventional sounding data. *J Trop Meteor*, 12(4): 372-379 (in Chinese)
- 陶祖钰, 王洪庆, 王旭等. 1998. 1995 年中国的中- α 尺度对流系统. *气象学报*, 56(2): 166-177. Tao Z Y, Wang H Q, Wang X, et al. 1998. A survey of meso- α -scale convective systems over China during 1995. *Acta Meteor Sinica*, 56(2): 166-177 (in Chinese)
- 万夫敬, 刁秀广. 2018. 两次 MCC 红外云图特征与天气实况异同性分析. *气象*, 44(6): 759-770. Wan F J, Diao X G. 2018. Comparative analysis on cloud evolution features and weather of two MCCs. *Meteor Mon*, 44(6): 759-770 (in Chinese)
- 王宁, 王秀娟, 张硕等. 2016. 吉林省一场持续性暴雨成因及 MCC 特征分析. *气象*, 42(7): 809-818. Wang N, Wang X J, Zhang S, et al. 2016. Analysis on causes and MCC characteristics of a continual heavy rain process in Jilin Province. *Meteor Mon*, 42(7): 809-818 (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 2015. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. *气象学报*, 73(3): 425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G. 2015. Study of Northeast China torandoes: The environmental characteristics. *Acta Meteor Sinica*, 73(3): 425-441 (in Chinese)
- 王易, 郑媛媛, 孙康远等. 2018. 南京雷达中气旋产品特征值统计分析. *气象学报*, 76(2): 266-278. Wang Y, Zheng Y Y, Sun K Y, et al. 2018. A statistical analysis of characteristics of mesocyclone products from Nanjing Radar. *Acta Meteor Sinica*, 76(2): 266-278 (in Chinese)
- 吴芳芳, 王慧, 韦莹莹等. 2009. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征. *气象*, 35(1): 55-64. Wu F F, Wang H, Wei Y Y, et al. 2009. Analysis of a strong gust front and downburst with Doppler weather radar data. *Meteor Mon*, 35(1): 55-64 (in Chinese)
- 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧等. 2010. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征. *大气科学学报*, 33(3): 285-298. Wu F F, Yu X D, Wang H, et al. 2010. A HP supercell case study with the data of Doppler weather radar detection. *Trans Atmos Sci*, 33(3): 285-298 (in Chinese)
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚等. 2012. 对流风暴中气旋特征与强烈天气. *气象*, 38(11): 1330-1338. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al. 2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms. *Meteor Mon*, 38(11): 1330-1338 (in Chinese)
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚等. 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. *气象学报*, 71(2): 209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al. 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu. *Acta Meteor Sinica*, 71(2): 209-227 (in Chinese)
- 俞小鼎, 姚秀平, 熊延南等. 2006a. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 314pp. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006a. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar. Beijing: China Meteorological Press, 314pp (in Chinese)
- 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛等. 2006b. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析. *应用气象学报*, 17(4): 385-393. Yu X D, Zhang A M, Zheng Y Y, et al. 2006b. Doppler radar analysis on a series of downburst events. *J Appl Meteor Sci*, 17(4): 385-393 (in Chinese)
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民等. 2006c. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. *高原气象*, 25(5): 914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al. 2006c. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar. *Plateau Meteor*, 25(5): 914-924 (in Chinese)
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. *大气科学*, 32(3): 508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm. *Chinese J Atmos Sci*, 32(3): 508-522 (in Chinese)
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. *气象学报*, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 311-337 (in Chinese)
- 曾明剑, 吴海英, 王晓峰等. 2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. *气象*, 42(3): 280-293. Zeng M J, Wu H Y, Wang X F, et al. 2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period. *Meteor Mon*, 42(3): 280-293 (in Chinese)
- 张小玲, 杨波, 朱文剑等. 2016. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析. *气象*, 42(11): 1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al. 2016. Analysis of the EF4 tornado in Fuying county, Jiangsu province on 23 June 2016. *Meteor Mon*, 42(11): 1304-1314 (in Chinese)
- 张晰莹, 吴英, 王承伟等. 2010. 东北地区 MCC 雷达回波特征分析. *气象*, 36(8): 32-39. Zhang X Y, Wu Y, Wang C W, et al. 2010. Analysis on MCC echo characters of Dopple radar in Northeast China. *Meteor Mon*, 36(8): 32-39 (in Chinese)
- 张一平, 俞小鼎, 吴葵等. 2012. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析. *气象学报*, 70(5): 961-973. Zhang Y P, Yu X D, Wu Z,

- et al. Analysis of the two tornado events during a process of regional torrential rain. *Acta Meteor Sinica*, 70(5): 961-973 (in Chinese)
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 2017. 强对流天气预报的一些基本问题. *气象*, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting. *Meteor Mon*, 43(6): 641-652 (in Chinese)
- 郑媛媛, 张备, 王啸华等. 2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. *气象*, 41(8): 942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al. 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure. *Meteor Mon*, 41(8): 942-952 (in Chinese)
- Augustine J A, Howard K W. 1991. Mesoscale convective complexes over the United States during 1986 and 1987. *Mon Wea Rev*, 119(7): 1575-1589
- Brooks H E, Craven J P. 2002. Database of proximity soundings for significant severe thunderstorms, 1957-1993//Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms. San Antonio, TX: AMS, 639-642
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar. *Mon Wea Rev*, 106(1): 29-38
- Craven J P, Brooks H E, Hart J A. 2002. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection//Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms. San Antonio, TX: AMS, 643-648
- Doswell III C A. 2001. Severe convective storms: An overview//Doswell III C A. *Severe Convective Storms*. Boston, MA: AMA, 1-26
- Evans J S, Doswell III C A. 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings//Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms. San Antonio, TX: AMS, 635-638
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *Mon Wea Rev*, 38(8): 1511-1534
- Houze R A Jr, Rutledge S A, Biggerstaff M I, et al. 1989. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *Bull Amer Meteor Soc*, 70(6): 608-619
- Houze R A Jr, Smull B F, Dodge P. 1990. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. *Mon Wea Rev*, 118(3): 613-654
- Houze R A Jr. 2004. Mesoscale convective systems. *Rev Geophys*, 42(4): RG4003
- Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R I. 2003. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. *Mon Wea Rev*, 131(10): 2428-2449
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes. *Bull Amer Meteor Soc*, 61(11): 1374-1387
- Maddox R A. 1983. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. *Mon Wea Rev*, 111(7): 1475-1493
- Markowski P, Richardson Y. 2010. *Mesoscale Meteorology in Mid-latitudes*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell Publication, 407pp
- Markowski P, Richardson Y. 2014. What we know and don't know about tornado formation. *Phys Today*, 67(9): 26-31
- Muller A R. 2001. Severe local storms forecasting//Doswell III C A. *Severe Convective Storms*. Boston, MA: AMS, 433-480
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3413-3436
- Roberts R D, Wilson J W. 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar. *J Appl Meteor*, 28(4): 285-303
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al. 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea Forecasting*, 18(6): 1243-1261
- Trapp R J, Weisman M L. 2002. Low-level mesovortices within squall lines: Vortexgenesis and association with damaging surface winds//Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms. San Antonio, TX: AMS, 630-634
- Trapp R J, Weisman M L. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: Their genesis and implications. *Mon Wea Rev*, 131(11): 2804-2823
- Trapp R J, Tessendorf S A, Godfrey E S, et al. 2005. Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: Climatological distribution. *Wea Forecasting*, 20(1): 23-34
- Weisman M L, Davis C A. 1998. Mechanisms for the generation of mesoscale vortices within quasi-linear convective systems. *J Atmos Sci*, 55(16): 2603-2622
- Weisman M L, Trapp R J. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: Overview and dependence on environmental shear. *Mon Wea Rev*, 131(11): 2779-2803
- Zipser E J. 1982. Use of a conceptual model of the life-cycle of mesoscale convective systems to improve very-short-range forecasts//Browning K. *Nowcasting*. New York: Academic Press, 191-204