

# 一次准静止中尺度对流系统 维持机制研究

王啸华<sup>1</sup> 郑媛媛<sup>2</sup> 张盛曦<sup>3</sup> 慕瑞琪<sup>3</sup> 吕润清<sup>3</sup>

1 南京大学, 南京, 210023

2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

3 江苏省气象台, 南京 210044

**摘要:** 2016年7月7日凌晨, 受中尺度对流系统(MCS)影响, 南京出现突发性局地特大暴雨, MCS发展持续近8h, 包括对流触发、准静止后向传播、强降水超级单体和冷池驱动四个阶段, 造成严重内涝。利用多普勒雷达、自动站、风廓线、中国区域再分析、江苏融合同化分析等多源资料详细分析造成这次强降水过程的天气背景和MCS的演变特征, 结果表明中尺度前倾高空槽过境诱发地面低压, 加强了地面辐合, 形成上升运动, 触发了线性对流风暴。3~6 km高度西南气流显著增强,  $\beta$ 中尺度次级环流左侧被抬升和 $\gamma$ 中尺度低压与西南气流的有利配置, 使得南京上空MCS表现出后向传播的准静止特征, 最终发展成为持续8个“雷达体扫”时长的强降水超级单体。强降水超级单体中强降水拖曳作用形成下沉气流, 导致近地面出流, 在南侧激发新的对流, MCS缓慢向南移动。随着MCS内下沉气流加强, 地面出现冷池, 强烈地面辐散加速MCS移动, 强降水过程结束。

**关键词:** 中尺度对流系统(MCS) 后向传播 强降水超级单体 冷池

## Study on the Maintenance Mechanism of a Quasi-Stationary Mesoscale Convective System at Night

WANG Xiaohua<sup>1</sup> ZHENG Yuanyuan<sup>2</sup> ZHANG Shengxi<sup>1</sup> MU Ruiqi<sup>1</sup> LV Runqing<sup>1</sup>

1 Nanjing University, Nanjing 210023

2 Jiangsu Research Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

3 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210044

**Abstract:** In the early morning of 7 July 2016, due to the influence of mesoscale convective system (MCS), a sudden local rainstorm occurred in Nanjing. Development of the MCS including convection triggering, quasi-stationary backward propagation, heavy rainfall supercell and cold pool driving lasted for nearly 8 hours and resulted in serious waterlogging. The weather background and MCS evolution characteristics of this heavy rainfall process were analyzed in detail by using multi-source datasets from Doppler radar, automatic stations, wind profile, China regional reanalysis (CNRR), Jiangsu merged assimilation analysis and so forth. The results showed that the transit of a mesoscale forward-tilting trough induced low pressure at the surface, 第一作者: 王啸华(1981-)主要从事强对流天气预报、雷达资料应用等研究。E-mail: njbocai@163.com 通信作者: 郑媛媛(1963-)主要从事雷达气象和天气预报研究 E-mail: zhengyy63@sina.com 国家重点研发计划(2018YFC1507503), 江苏省“333工程”科研项目(BRA17521)共同资助

strengthening convergence, forming an uplifting movement and triggering linear convective storms. The warm and humid southwesterly flow between 3km and 6km was significantly enhanced and uplifted in the meso- $\beta$ -scale secondary circulation, the favorable configuration of the meso- $\gamma$ -scale low-level low pressure and the southwesterly flow made the MCS over Nanjing exhibit a quasi-stationary feature of backward propagation, and eventually leading to a heavy precipitation supercell in 8 consecutive radar volume scans. The drag effect of heavy precipitation formed a downdraft, which led to the outflow near the surface and stimulated a new convection on the south side, causing the MCS to move slowly to the south. As the downdraft strengthened in the MCS, a cold pool appeared on the ground. The strong divergence accelerated the movement of the MCS, and then the heavy precipitation process ended.

**Key words:** mesoscale convective system (MCS), backward propagation, heavy precipitation supercell, cold pool

## 引言

局地暴雨的监测诊断和预报预警一直是气象部门的业务重点。关于局地暴雨的形成机理,国内外气象工作者已有诸多研究(张舒阳和闵锦忠, 2018; 江丽俐等, 2018; 胡雅君等, 2020; 王莹等, 2021)。其中,针对局地暴雨发生时不同尺度天气系统的相互作用研究表明,在有利的大尺度环流形势下,中尺度对流系统(MCS)是产生局地暴雨的直接原因。更具体地说,由于总降水量与降水率和降水持续时间直接相关(Doswell et al, 1996; Chappell, 1986),因此当MCS中的对流单体在固定区域重复通过时更容易诱发间歇性的短时强降水最终造成局地暴雨(何群英等, 2009)。Schumacher and Johnson (2005)利用雷达资料统计1999-2001年美国洛基山东部的极端暴雨过程时提出了“后向传播MCS”的概念,其雷达回波特征表现为新单体不断在原系统上游的某个特定区域周期性地生成,并沿平行于对流线的方向移入系统后部。众多研究指出,MCS的后向传播是一种非常有利于局地暴雨的组织形式(王晓芳和崔春光, 2012; 俞小鼎, 2013; Wang et al, 2016; 张宁等, 2017; 王珏等, 2019; Hitchcock and Schumacher, 2020)。王晓芳和崔春光(2012)将2010年6—7月长江中下游地区降雨日的线状MCS分为8类,发现后向传播MCS在所有线状MCS中所占的比重居第二位。王珏等(2019)分析湖北省极端短时

强降水 MCS 的雷达回波特征，归纳出类似的结论。此外，俞小鼎（2013）对于北京“721”暴雨过程研究中发现，偏南向的低空急流受到了太行山地形的强迫抬升作用，使得新生单体不断在降水区的西南侧生成，随后向东北偏北方向移动，新生单体反复经过同一个地区，导致极端降水。这些研究加深了对局地暴雨和 MCS 的认识。

近年来，在全球变暖的背景下，江淮地区极端暴雨频次呈现增加趋势。2016年7月7日凌晨，南京出现突发局地暴雨，17个站1h雨量超过50mm，8个站3h雨量超过100mm。上游新生对流单体依次移入南京上空，形成的“后向传播MCS”是造成这次强降水的直接原因。由于中小尺度系统的演变过程复杂，此次突发局地暴雨预报预警难度大，实际业务中客观和主观预报均发生漏报，预警信号未在强降水发生前提前发布，且预警级别不够。因此有必要对其发生发展机制进行分析，以提高对这类天气的预报预警能力。

## 1 实况

受高空槽影响，2016年7月6日白天江苏淮河以南地区出现大范围降水，雨量不大。20时（北京时，下同）以后，沿江中东部降水增强，雨量均达到暴雨。6日22时至7日00时南京附近降水逐渐停止。7日00—01时中尺度对流系统在南京市南部突然触发并迅速发展，02—06时对流系统准静止少动，造成局地持续强降水。07时以后，系统向东南方向移动，降水随之减弱直至消失。自动观测站资料显示，7日00—08时，南京主城和江宁的73个自动观测站中14站降水量超过100mm、21站超过50mm，最大降水量（259.9mm）出现在市区的梅山二中（图1a）。01—05时，梅山二中的累积降水量达258.3mm，其中02—03时1h降水量达到129.2mm（图1b）。这次暴雨过程具有突发性和局地性，中尺度特征明显，短时间降水强度之大较为罕见。受其影响，南京市区和江宁区出现大范围积水，部分小区被淹，7日上午南京公交、地铁运营中断，交通接近瘫痪。

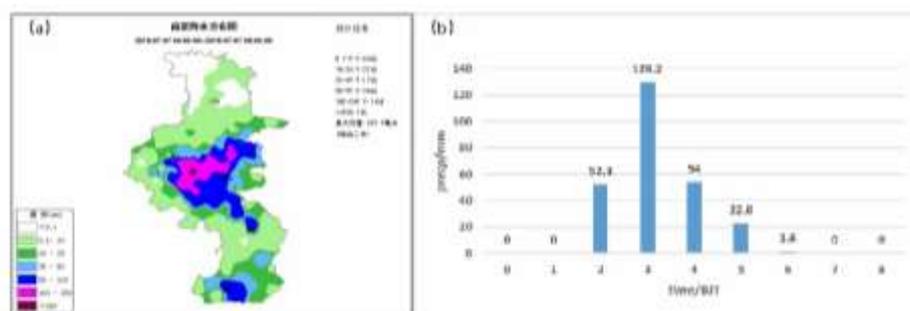
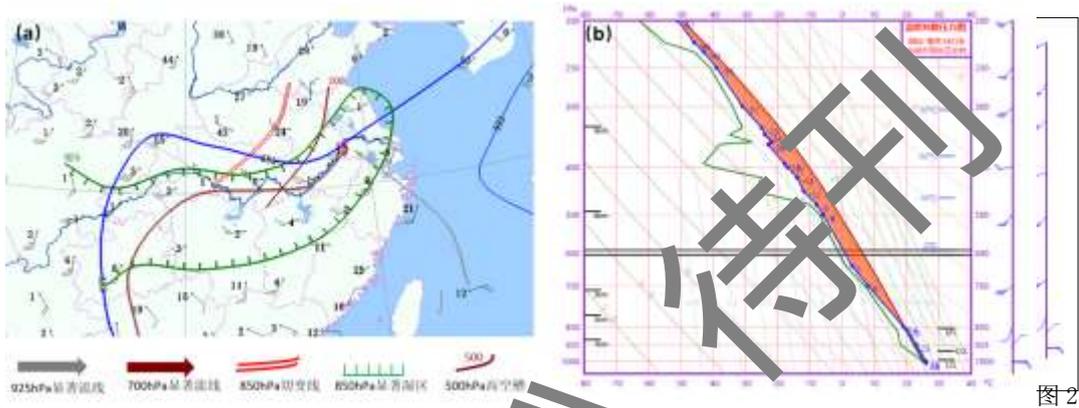


图1 2016年7月7日00—08时南京8h累计降水量分布(a)和梅山二中逐小时雨量(b)  
Fig.1 Observed 8h-accumulated rainfall of Nanjing (a) and hourly rainfall of Meishan Second Middle School (b) from 00:00 to 08:00 BT 7 July 2016

## 2 大气层结稳定条件

6日20时,500 hPa高空槽南移到江苏沿淮地区,南京位于西南—东北走向的狭长显著湿区(南京位于图2a中红色三角处)、高空槽前的深厚湿层中(图2a)。700 hPa南京上空为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南气流,南京位于湿舌顶部和西南气流显著流线的顶端。大气的最大可降水量 $57.3\text{ mm}$ ,CAPE值达到 $2004.9\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,抬升凝结高度为 $1\text{ km}$ ,沙氏指数为 $-1.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且550 hPa以下为深厚的湿层,550~300 hPa为相对干区,不稳定特征明显(图2b)。



2016年7月6日20时天气图(a)和南京温度对数压力图(b)

(图2a中,蓝色线条:500 hPa等高线,单位:dagpm;棕色线条:500 hPa槽线;绿色线条:500 hPa显著湿区范围;黑色风羽:500 hPa风;棕色箭头:700 hPa显著流线;红色双线:850 hPa切变线;灰色箭头:925 hPa显著流线;红色三角:南京的位置)

Fig.2 Weather map (a) and (b) skew-T-log-P diagram of Nanjing at 20:00 BT 6 July

(In Fig.2a, blue lines: potential height at 500 hPa, unit: dagpm, brown line: trough at 500 hPa, green line: wet area at 500 hPa, black barbs: wind at 500 hPa, brown arrow: streamline at 700 hPa, red double lines: shear at 850 hPa, grey arrow: streamline at 925 hPa, red triangle: location of Nanjing)

## 3 对流风暴的中尺度演变特征

受高空低槽和切变线影响,6日08—20时沿江和苏南地区中到大雨,局部出现暴雨。20时以后,降水回波主体东移入海,沿江以南降水逐渐停止。近4 h左右的降水间歇后,南京上空局地对流风暴触发并快速发展,雷达回波演变显示,造成此次强降水的MCS从生成到完全消散,其生命史长达到8 h,先后经历了局地触发、准静止后向传播、强降水超级单体和冷池驱动发展四个阶段。

### 3.1 对流风暴触发机制

7日00时开始,江宁境内有多个对流风暴单体快速触发。至00:12,5个对流单体在

江宁大部和句容局部地区呈东北—西南向线性排列（图 3a），单体的中心回波强度都在 40 dBz 以上，最强超过 60 dBz，回波顶高度约 3~5 km，垂直累积液态含水量为 5~20  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。垂直结构来看，对流单体西侧回波梯度较大，整体随高度向东倾斜（图 3b）。研究表明，这种倾斜结构有利于前后对流单体的合并从而使得对流单体尺度增大、强度增强（French and Parker, 2014; Ping et al, 2014; 黄勇等, 2012, 2013; 翟菁等, 2012）。00:18，距离最近、对流较强的单体 C 和 D 首先发生合并，30 min 后，B、C、D 三个对流单体已经合并成一个多单体风暴，并向东西两侧扩展，对流单体 A、E 也在局地发展（图略）。经过上述过程，至 01:20 南京上空已形成较密实的对流回波带，对流回波强度 45~50 dBz，回波顶高增大到 11~12 km，垂直累积液态含水量增大到 25~40  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。南京市区和江宁的降水迅速增强，市区梅山二中站 7 日 00:30 雨强增大到 2  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

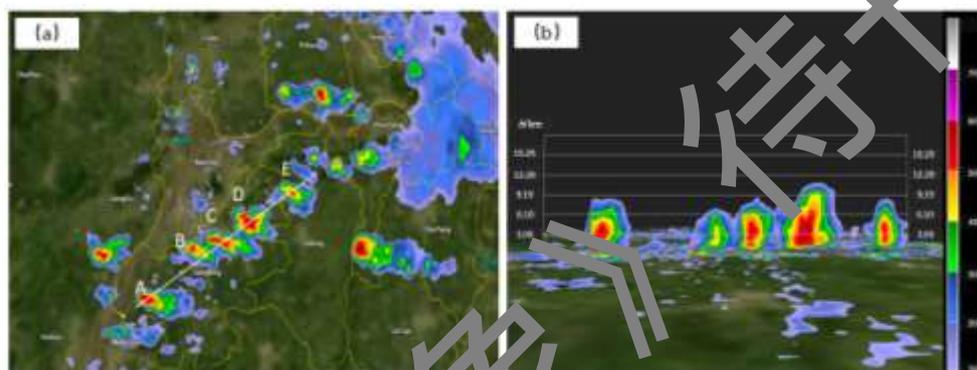


图 3 2016 年 7 月 7 日 00:12 南京雷达 1.5 度仰角反射率因子 (a) 和沿图 3a 中白实线自南向北反射率因子垂直剖面 (b)

Fig. 3 The radar reflectivity of Nanjing at 1.5-degree elevation (a) and reflectivity profile along the white solid line in Fig. 3a from south to north (b) at 00:12 BT 7 July 2016.

很多研究表明，地面辐合线有利于局地对流的触发和发展（王华和孙继松, 2008; 代刊等, 2010; 谌芸等, 2012; 方翀等, 2012; 郭英莲等, 2012）。分析本次过程中对流风暴触发之前的地面自动站风场发现，地面风力较小且风向比较杂乱，未见明显的地面辐合系统（图略）。而南京 6 min 间隔的风廓线（图 4）显示，6 日 23:54 至 7 日 01:00，2.5~4.5 km 高空自上而下由偏南风或偏西风转为西北风或偏北风（如图 4 中红色曲线所示），表明有高空槽过境，高空先转为北风，高空槽且具有前倾特征。相同时段，高淳和六合的风廓线一直为西南气流（六合、南京、高淳风廓线雷达位于图 4b 中红色三角处），未观测到高空槽，从时空尺度判断是一个中尺度的高空槽，中尺度前倾高空槽过境诱发了地面低压。7 日 00:24-01:12 近地面 0.5 km 以下由偏东风转成东南风再转为东北风（如图 4 中绿色箭头所示），这表明南京附近出现近地面低压。

近地面低压的形成引起了地面辐合，地面散度场和雷达回波叠加演变图显示（图5），从7日00时开始风暴发展区域的散度负值快速增大，7日00:11在触发的线性回波带附近有 $-10 \text{ m} \cdot (\text{s} \times 1^0)^{-1}$ 的辐合中心，00:29辐合中心散度负值增加到 $-20 \text{ m} \cdot (\text{s} \times 1^0)^{-1}$ 以上，00:42形成 $-30 \text{ m} \cdot (\text{s} \times 1^0)^{-1}$ 以上强辐合中心，且范围显著扩大，与之相对应的线性分布的对流回波迅速发展增强，形成强对流回波带。之后辐合中心在原地维持，虽有所减弱但直到01:20仍维持着 $-10 \text{ m} \cdot (\text{s} \times 1^0)^{-1}$ 以下，期间对流回波带持续发展加强。

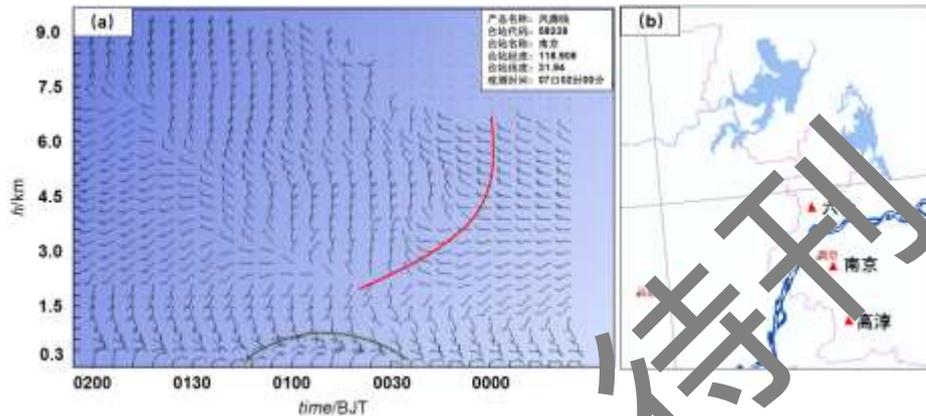


图4 2016年7月6日23:36至7日02:00南京6 min间隔风廓线（红色实线：风场由偏南风或偏西风转为西北风或偏北风，绿色箭头：风场由偏东风逐渐转为东北风），六合、南京、高淳风廓线雷达位置（b）

Fig.4 (a) The every-6-minute wind profile of Nanjing between 23:36 BT 6 July and 02:00 BT 7 July 2016 (red solid line: the wind transfers from southerly or westerly to northwesterly or northerly; green arrow: the wind gradually transfers from easterly to northeasterly, the wind profile stations' location (red triangles) of Luhe, Nanjing and Gaochun (b)

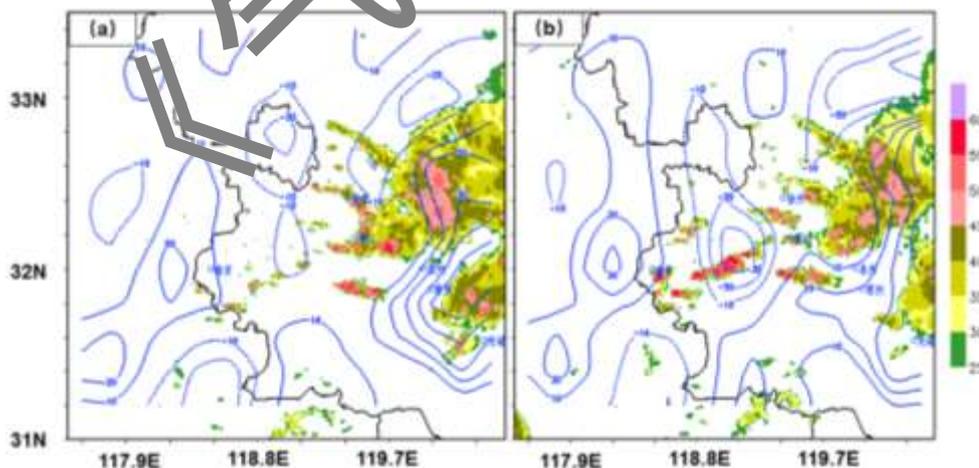


图5 2016年7月7日00:11 (a)和00:49 (b)南京雷达1.5°仰角反射率因子（填色，单位：dBZ）叠加地面散度（等值线，单位： $\text{m} \cdot (\text{s} \times 1^0)^{-1}$ ）

Fig.5 The radar reflectivity of Nanjing (shaded, unit: dBZ) at 1.5-degree elevation and surface divergence (contours, unit:  $\text{m} \cdot (\text{s} \times 1^0)^{-1}$ ) at 00:11 BT 7 July (a) and 00:49 BT (b) 7 July 2016

上述分析表明：中尺度前倾高空槽过境诱发地面低压，进而引起地面辐合快速增强，导致了对流回波带的迅速发展，是此次极端强降水对流风暴的触发机制。

### 3.2 准静止的后向传播机制

7日 01:30 开始在对流带的西侧不断有新的对流回波生成，向偏东方向移动并入南京上空，使得原有对流系统发展加强；而当对流回波向东移过南京上空，则迅速减弱，这一特征一直持续到 03:40（图 6a-b）。由 03:00 反射率因子垂直剖面图可见，多个对流风暴单体合并加强，且 50 dBz 以上强回波一直延伸至地面，大部分位于零度层高度（4.7 km，由 20 时南京探空计算得到）以下，属于低质心高效率降水对流风暴（图 6c）。受其影响，梅山二中站 01:30—03:30 累计降水达到 215.5 mm，连续 4 个小时 10 min 降水量超 20 mm（图 6d）。此外，对流单体整体随高度向东倾斜，在向东移动发展过程中，对流单体高度向上伸展，但在对流带东侧回波强度明显减弱，对流风暴整体呈现出准静止的后向传播特征。

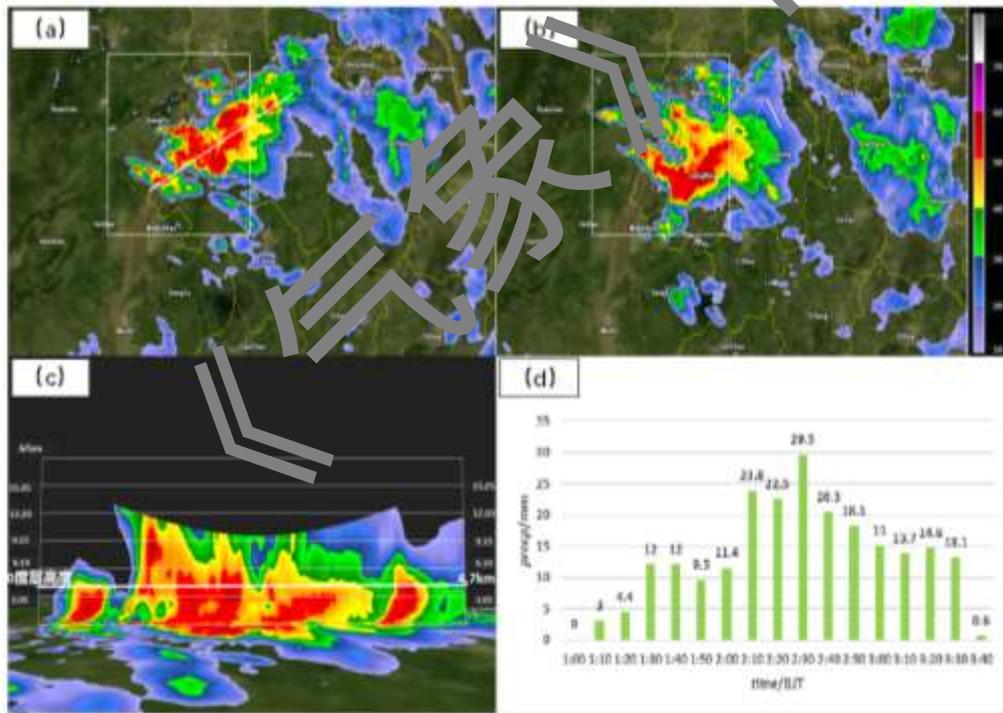


图6 2016年7月7日03:00 (a)和03:30 (b)南京雷达1.5°仰角反射率因子(白色方框:对流回波带),03:30沿图6a白色线段反射率因子剖面(c),01:00—03:40梅山二中站逐10 min雨量(d)  
 Fig.6 The radar reflectivity of Nanjing at 1.5-degree elevation at 03:00 BT (a) and 03:30 BT July 7 2016 (b, white box: convective echo zone), reflectivity profile along the white solid line in Fig.6a from south to north (c) and 10-minute rainfall of Meishan Second Middle School (d) from 01:00 BT to 03:40 BT 7 July

南京 6 min 间隔风廓线雷达资料显示, 7 日 01:30 开始 1.5 km 以下东南风、1.5 ~5 km 高度西南风逐渐增强。03:00, 3~5 km 高度西南风逐渐达到  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上(图 7 中红色透明区域所示), 03:30 之后 3~5 km 高度西南风转为偏南风, 3 km 以下偏南风转为东南风, 南京上空 3 ~5 km 高度西南风转为偏南风(图 7)。西南气流加强发展阶段时间正好与对流回波带西侧不断有对流单体生成, 东移并入对流风暴的时间相对应。西南气流的加强发展加大了南京上空大气层结的不稳定度, 为强降水带来了充沛的水汽和能量。

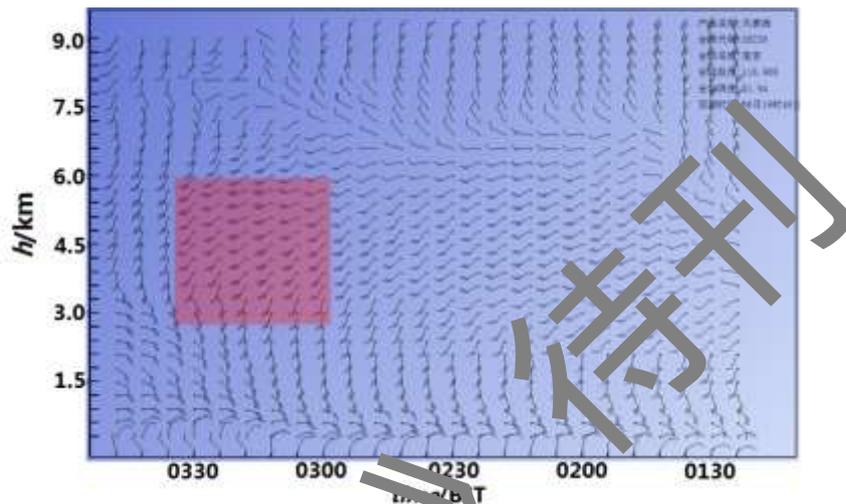


图 7 2016 年 7 月 7 日 01:24—03:48 南京 6 min 间隔风廓线  
(红色区域: 西南风风速逐渐达到  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.7 The every-6-minute wind profile for Nanjing between 01:24 BT and 03:48 BT 7 July 2016  
(red area: the area where the southwest wind speed gradually reaches  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

南京大学大气科学学院使用 WRF 模式, 采用非静力平衡控制方程, 以欧洲中心全球再分析资料为初始边界条件, 同化多源观测数据研发的高分辨率中国区域数据资料 (CNRR) 空间分辨率为 18 km, 时间分辨率 1 h。Zhang et al (2017) 研究表明, 使用高分辨率 CNRR 资料代替传统的观测数据, 在业务预报及科学研究中, 具有可行性和优越性。因此, 本文应用 CNRR 资料对这次强降水过程进行了分析。图 8 是 CNRR 沿  $32^{\circ} \text{ N}$  的相对湿度、温度、 $v-w$  纬向剖面图, 可以看到 6 日 20 时在  $120^{\circ} \text{ E}$  以东为干空气, 900 hPa 以下近地面为弱的偏东风, 850 hPa 以上为偏西风, 湿区主要集中在 700 hPa 以上(图 8a)。7 日 02 时由于沿江中东部降水, 高空湿度减小, 干空气由高空向下, 自东向西楔入, 干舌底部抵达  $118^{\circ} \text{ E}$ , 900 hPa 以下近地面偏东风增强, 在干舌顶端形成风速辐合上升运动。同时, 700 hPa 高空西南气流加强,  $118^{\circ} \text{ E}$  附近偏西风风速辐合, 形成上升运动。对流层中低层和近地面的上升气流叠加, 加强了从地面到高空的上升气流。上升气流在 500 hPa 以上被向东

平移后，在  $120^{\circ} \text{E}$  以东下沉补偿干舌，导致低层向西的出流，从而形成闭合的  $\beta$  中尺度次级环流 C（如图 8b）。西南暖湿气流在环流 C 左侧被抬升，释放凝结潜热，又加强了环流左侧即南京上空的上升气流，这与徐亚钦等（2019）研究浙江典型梅雨锋强降水区的环流特征较接近。结合风廓线和雷达回波资料分析得到，7 日 01 时以后南京上空的西南气流开始逐渐发展，正环流的倾斜上升运动区在南京附近加强，对流系统强烈发展。

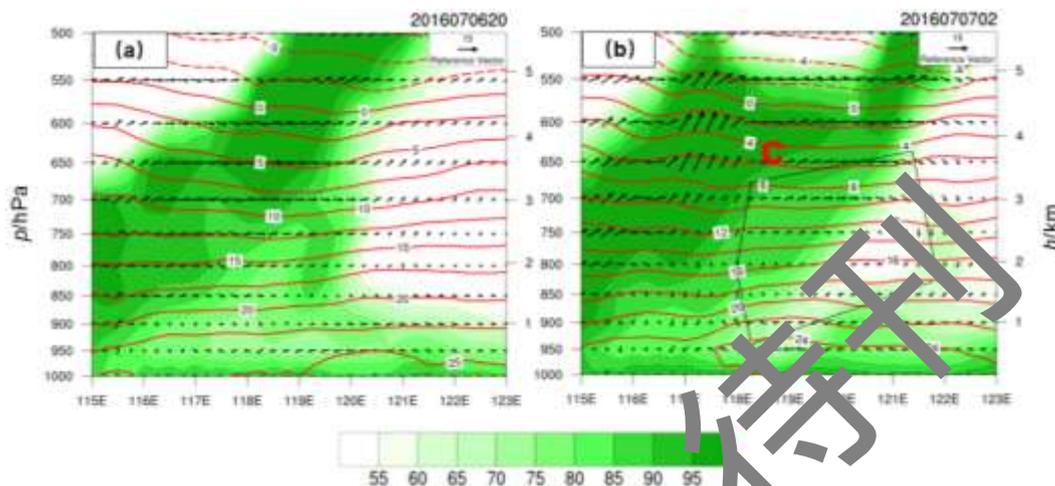


图 8 2016 年 7 月 6 日 20 时 (a) 和 7 日 02 时 (b) 沿  $32^{\circ} \text{N}$  的相对湿度 (填色, 单位: %), 温度 (红色实线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ),  $v-w$  合成垂直剖面 (黑色实线: 次级环流)

Fig.8 The zonal profiles of relative humidity (scaled, unit: %), temperature (red solid lines, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and  $v-w$  across  $32^{\circ} \text{N}$  at 20:00 BT 6 (a) and 02:00 BT 7 (b) July 2016 (black solid lines: secondary circulation)

为进一步分析  $\gamma$  中尺度的风暴演变特征，本文应用分辨率达到  $1 \text{ km}$  的江苏融合同化分析资料，该资料是利用江苏省高精度数值预报系统 (PWAFS) 进行同化分析 (PWAFS 系统包括 ARPS 的 3DVAR 同化子系统及 WRF 模拟子系统)，以 NCEP 的  $0.5^{\circ}$  再分析资料为背景场，生成水平分辨率为  $9 \text{ km}$ 、垂直方向上 51 层的数值模拟结果，将此结果插值到  $1 \text{ km}$  分辨率，作为同化分析系统的背景场，同化南京、常州、淮安及泰州多普勒天气雷达反射率及径向速度资料，生成水平分辨率  $1 \text{ km}$ 、垂直方向上 51 层的同化分析资料。7 日 03 时江苏融合同化分析资料风场和回波叠加图 (图 9) 显示，南京附近  $1.2 \text{ km}$  高度上，对流回波带西侧存在一个  $\gamma$  尺度气旋性涡旋，对应的低压中心 D 位于强对流主体回波西南方向， $50 \text{ dBz}$  以上的强对流回波主体处于低压倒槽两侧东南风和东北风的辐合区之中 (图 9a)。3  $\text{km}$  高度上，气旋性低压辐合中心 D 位于对流回波带西侧的  $50 \text{ dBz}$  强回波主体附近，同时南京处于一支明显的西南气流 A 之中， $119^{\circ} \text{E}$  附近低压 D 南侧气旋环流 B 为西南风，与西南气流 A 叠加，使气旋性辐合增强，加强了对流的发展。而在  $119.5^{\circ} \text{E}$  以东，低压中心 D

东侧气旋性辐合明显减弱，导致对流移入后快速减弱（图 9b）。上述分析可见，南京西部中低层辐合上升形成的低压和 3 km 高空西南气流的有利配置导致对流回波带西侧对流持续发展，东移后在对流回波带东侧快速减弱。

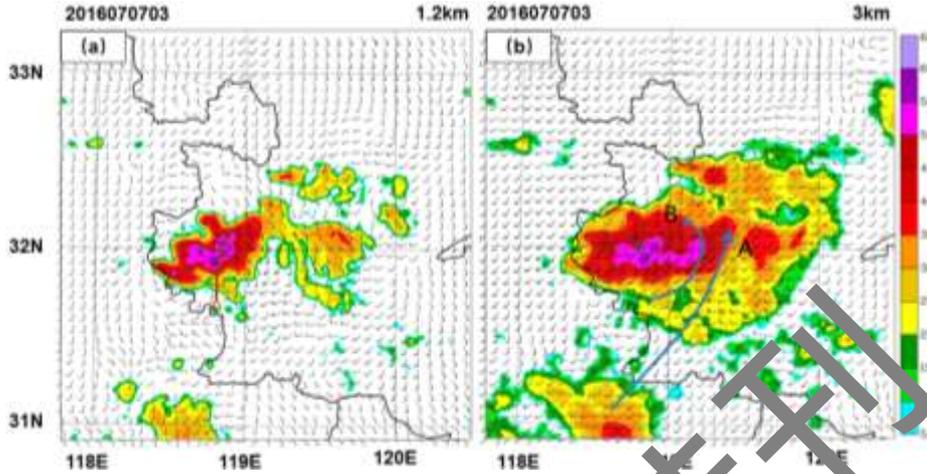


图 9 2016 年 7 月 7 日 03 时南京站 1.2 km (a) 和 3 km (b) 雷达回波 (彩色, 单位: dBZ) 与反演风场叠加

Fig.9 The radar reflectivity (shaded, unit: dBZ) and retrieved wind fields of Nanjing at 1.2 km (a) and 3 km (b) at 03:00 BT 7 July 2016

### 3.3 强降水超级单体

03:30 开始, 雷达回波图上 MCS 回波带逐渐转为团状, 强回波中心反射率因子达到 60 dBz, 径向速度图上出现明显的“速度对”且结构较深厚 (垂直延展厚度 6 km), 从 03:30 到 04:20 连续 8 个“雷达体扫”在钩状回波处出现中气旋, 中气旋底高在 2.0~2.4 km, 顶高 3.0~5.4 km, 切变在 04:01 达到最大  $23 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (表 1)。根据江苏 2005—2014 年发生过的 1370 个中气旋统计, 只有 7.6 %生命史超过 5 个体扫, 最大风切变平均值为  $20.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (王易等, 2018; 田荟君等, 2018), 可见此处属于强中气旋。04:13, 回波顶高 (ET) 为 15 km, 垂直积分液态含水量 (VIL) 最大达  $67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 对应中气旋 M 北侧的秣陵街道自动气象站 03:50-04:20 降水达到 45.6 mm (图 10), 对流回波和中气旋以  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度向东南方向缓慢移动, 对流风暴发展为强降水超级单体。

表 1 7 月 7 日 03:42-04:26 强降水超级单体中的中气旋 A0 底高、顶高、最大切变高度、切变

Table 1 The bottom and top height of the meso-cyclone A0, the height of the maximum shear and the shear in the heavy precipitation supercell from 03:42 BT to 04:26 BT on July 7

时间/BT	底高/km	顶高/km	最大切变高度/km	切变/( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )
03:42	2.0	4.4	2.0	9
03:48	2.1	4.8	2.9	9
03:54	2.2	3.7	3.7	9
04:01	2.3	5.0	5.0	23
04:07	2.2	5.2	3.7	19
04:13	2.4	3.0	2.4	8
04:19	2.3	5.6	3.1	18
04:26	2.4	5.4	4	11

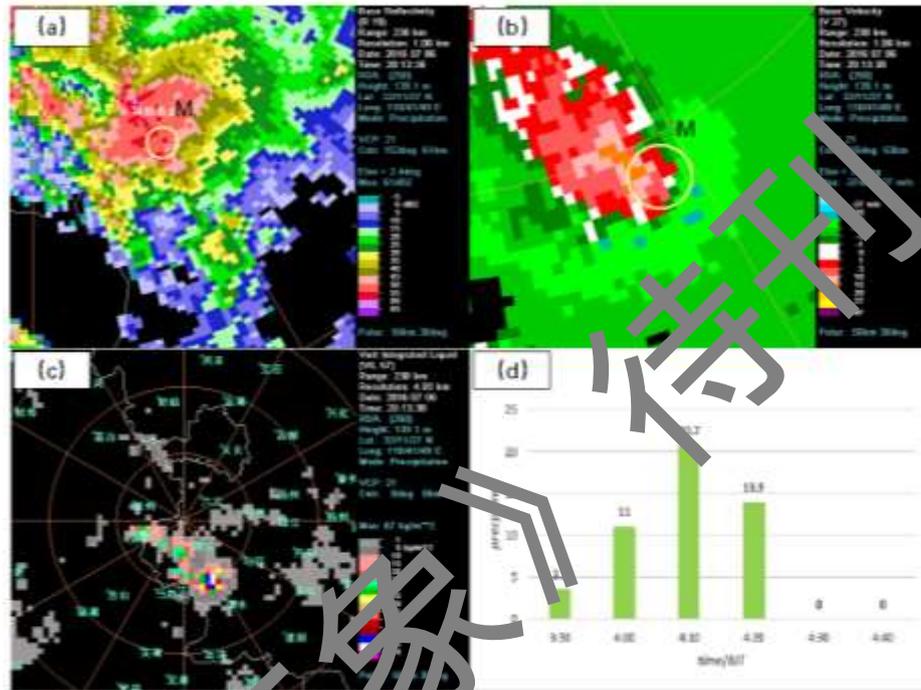


图 10 2016 年 7 月 7 日 04:13 南京雷达 1.5° 仰角反射率因子 (a)；2.4° 径向速度 (b, 黄色圆形：中气旋)；垂直积分液态含水量 (c)；秣陵街道逐 10 min 降水 (d)

Fig.10 The radar reflectivity at 1.5-degree elevation (a), the radial velocity at 2.4-degree elevation (b, yellow cycle: meso-cyclone) and the VIL (c) of Nanjing at 04:13 BT 6 July, every-10-minute rainfall of Moling Street from 3:50 BT to 4:40 BT 7 July 2016 (d)

04:01 中气旋 M 切变最强时刻，沿南京雷达站和中气旋中心雷达反射率因子强度剖面（图 11a）可见，中气旋 M 位于发展旺盛的对流主体前侧，强对流回波由触发阶段倾斜于地面转变为垂直于地面向上伸张，55 dBz 以上对流回波伸展到 9 km 附近，45 dBz 的对流回波伸展到 12 km 附近，65 dBz 以上对流回波 02:48 在 2.5~3 km、04:01 上升到 3 km 左右、04:29 上升到 3.2 km 高度附近（图略）。长生命史中气旋与上升气流重合或者部分重合增加了上升气流的垂直螺旋度，使得对流系统生命史延长，同时中气旋与环境相互作用导致上升的

气压梯度力增强了上升气流，从而导致了强降水。

04:01 沿南京雷达站和中气旋中心径向速度剖面（图 11b，图中白色轮廓为 50 dBZ 以上强回波区域）可见，后侧中层入流 J1 在强降水拖曳作用形成对流风暴内的下沉气流 J2，在近地面向外辐散，导致 M 下方近地面出现了远离雷达的出流区域，在出流区右侧形成出流边界，强迫前方对流层低层朝向雷达的暖湿气流 J3 向上爬升，在现有对流主体的前方触发新的对流，同时，3 km 高度上，出流的“正速度”与入流的“负速度”形成强烈的水平风切变，维持了中气旋发展。区别于其它类型的超级单体，低层入流方向位于中气旋移动方向的前侧，中气旋大部分被包裹强降水中，是强降水超级单体重要特点（张文龙等，2019）。整个强降水超级单体期间，中气旋和“出流区”一起向远离雷达方向移动，且中气旋所在高度和出流区域的高度向上扩展。值得注意的是，这一阶段对流风暴内仍有较强的上升气流存在，整体下层气流不强，在地面未见明显的中尺度高压和冷池，对流风暴主体向南移动的速度较慢。

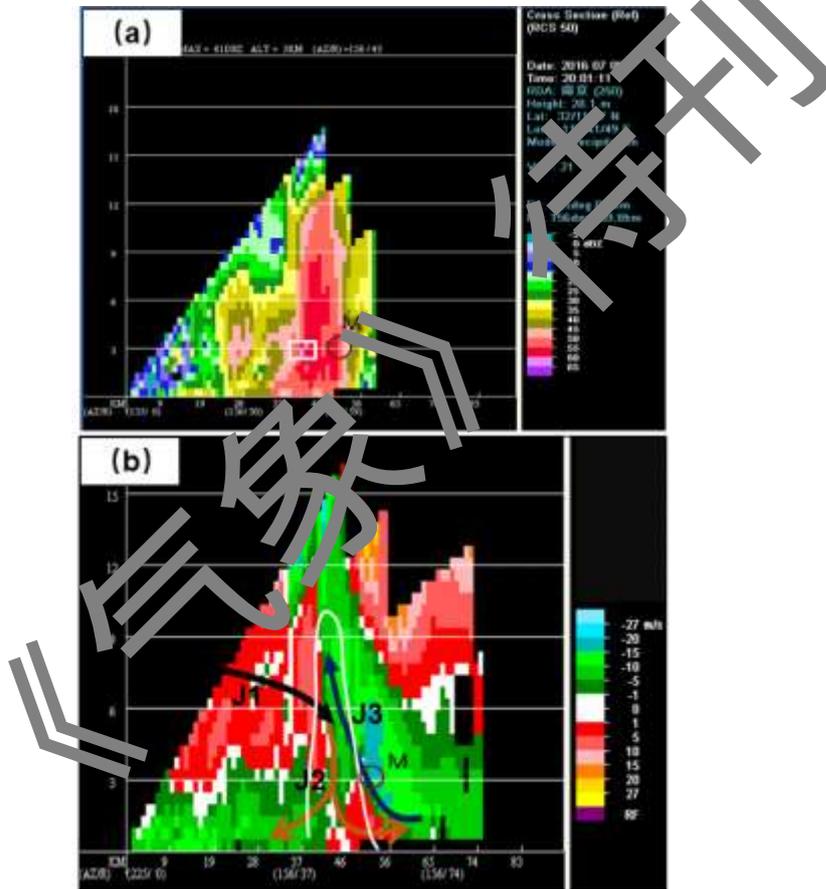


图 11 2016 年 7 月 7 日 04:01 沿南京雷达和中气旋中心连线的径向剖面

(a) 反射率因子（白色矩形：反射率因子 $\geq 50$ dBZ；棕色圆形：中气旋）；(b) 径向速度（J1：中层入流；J2：下沉气流；J3：上升气流；棕色圆形：中气旋）

Fig.11 The cross section of (a) reflectivity (white box: reflectivity  $\geq 50$  dBZ, brown circle: meso-cyclone) and (b) radial velocity (J1: middle-level inflow, J2: downdraft, J3: updraft, brown circle: meso-cyclone) of Nanjing along the white line from Nanjing radar to the center of meso-cyclone at 04:01 BT 7 July 2016

### 3.4 冷池发展

04:30 以后, 对流风暴内部逐渐形成强烈的下层气流, 高层冷空气被带到地面, 在地面形成冷池和中尺度地面高压。地面高压导致的强烈辐散出流在风暴主体东南侧不断触发新的对流, 从而导致整个对流风暴迅速向东南方向移动, 同时地面冷池和中尺度地面高压随风暴主体移动。06 时左右风暴主体移到溧水, 地面冷池和出流也达到了最强, 地面出现了低于  $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  的“冷中心”和  $70\text{ m}\cdot(\text{s}\times 10^0)^{-1}$  以上的地面辐散中心。 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  等温线以内风向呈现反气旋性环流,  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  等温线以外风向穿过等温线呈现明显出流, 在出流的前侧为新生的强回波区(图 12)。07 时对流风暴移入溧阳境内, 此后回波强度快速减弱, 体积减小, 09 时最终在距雷达站东南方的  $120\text{ km}$  处消散。

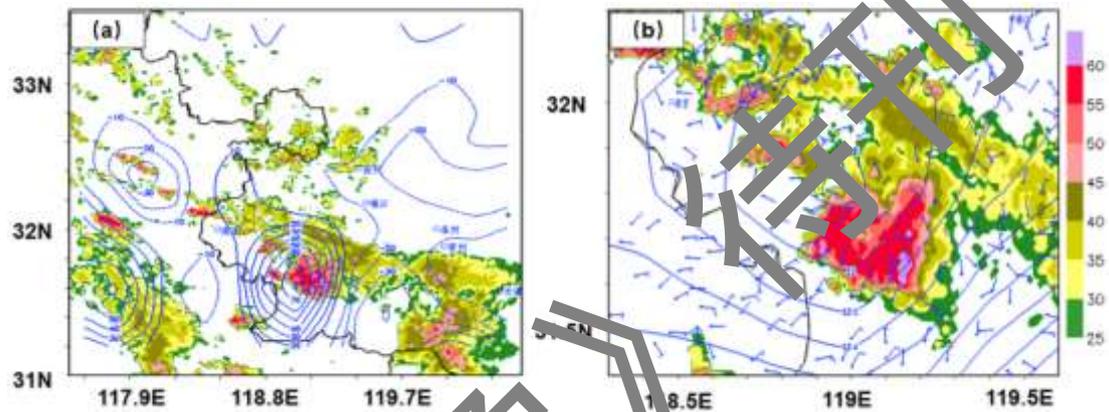


图 12 2016 年 7 月 7 日 (a) 05:59 南京雷达  $1.5^{\circ}$  仰角反射率因子(填色, 单位: dBZ)叠加地面散度(等值线, 单位:  $\text{m}\cdot(\text{s}\times 10^0)^{-1}$ ) (b) 06:20 南京雷达  $1.5^{\circ}$  仰角反射率因子叠加地面温度(等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和风场(风羽)

Fig.12 The radar reflectivity of Nanjing (shaded, unit: dBZ) at 1.5-degree elevation and surface divergence (contours, unit:  $\text{m}\cdot(\text{s}\times 10^0)^{-1}$ ) at 05:59 BT 7 July 2016 (a) and the radar reflectivity of Nanjing at 1.5-degree elevation, surface temperature (contours, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and wind (barbs) at 06:20 BT (b) 7 July

## 4 结论

本文分析了 2016 年 7 月 7 日凌晨南京出现的极端短时强降水过程的环境条件和触发、维持发展机制, 主要结论如下:

(1) 2016 年 7 月 7 日凌晨南京特大暴雨过程对流触发前, 地面未出现明显风向或风速辐合, 中尺度的高空前倾槽过境诱发地面低压, 加强了地面辐合, 形成上升运动, 触发了线性对流风暴。

(2) 沿江中东部干空气下沉形成干舌自东向西楔入, 干舌顶端风速辐合上升与南京上空已经触发对流的上升运动叠加, 形成  $\beta$  中尺度的次级环流, 发展加强的西南暖湿气流在次级环流左侧(南京)被上升气流抬升, 释放潜热能量, 对流加强发展, 又反过来加强了次级环流, 形成正反馈机制。

(3) 南京西部中低层辐合上升形成的  $\gamma$  中尺度低压和  $3\text{ km}$  高空西南气流的加强有利

于对流回波带西侧对流持续发展, 导致 MCS 在南京表现出准静止特征。MCS 最终发展成强降水超级单体, 强降水超级单体中强降水拖曳作用形成下沉气流, 导致近地面辐散出流, 随着 MCS 内下沉气流加强, 地面出现冷池, 强降水过程结束。

目前江苏地区初步完成业务 S 波段天气雷达双偏振功能升级, 基于双偏振天气雷达可以揭示形成短时强降水对流风暴微物理过程, 提高对局地突发特大暴雨的监测和预警能力。

## 参考文献

- 湛芸, 孙军, 徐珺, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象, 38(10): 1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1255-1266 (in Chinese).
- 代刊, 何立富, 金荣花, 2010. 加密观测资料在北京 2008 年 9 月 7 日雷暴过程分析中的综合应用[J]. 气象, 36(7): 160-167. Dai K, He L F, Jin R H, 2010. Synthetic applications of intensive observations to analysis of the 7 September 2008 severe convective systems in Beijing[J]. Meteor Mon, 36(7): 160-167 (in Chinese).
- 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等, 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J]. 气象, 38(10): 1278-1287. Fang C, Mao D Y, Zhang X W, et al, 2012. Analysis on the mesoscale convective conditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(10): 1278-1287 (in Chinese).
- 郭英莲, 吴翠红, 王继竹, 等, 2012. “7. 15”宜昌大暴雨的地形影响特征[J]. 气象, 38(1): 81-89. Guo Y L, Wu C H, Wang J Z, et al, 2012. Yichang topographic effects of the 15 July 2007 heavy rain[J]. Meteor Mon, 38(1): 81-89 (in Chinese).
- 何群英, 东高红, 贾慧珍, 等, 2009. 天津一次突发性局地大暴雨中尺度分析[J]. 气象, 35(7): 16-22. He Q Y, Dong G H, Jia H Z, et al, 2009. Mesoscale analysis of a sudden heavy rain in Tianjin[J]. Meteor Mon, 35(7): 16-22 (in Chinese).
- 胡雅君, 张伟, 赵玉春, 等, 2020. “5·7”闽南沿海暖区特大暴雨中尺度特征分析[J]. 气象, 46(5): 629-642. Hu Y J, Zhang W, Zhao Y C, et al, 2020. Mesoscale feature analysis on a warm-sector torrential rain event in southeastern coast of Fujian on 7 May 2018[J]. Meteor Mon, 46(5): 629-642 (in Chinese).
- 黄勇, 覃丹宇, 邱学兴, 2012. 暴雨过程中对流云合并现象的观测与分析[J]. 大气科学, 36(6): 1135-1149. Huang Y, Qin D Y, Qiu X X, 2012. Study of convective cloud merger in heavy rain using multi-observation data[J]. Chin J Atmos Sci, 36(6): 1135-1149 (in Chinese).
- 黄勇, 王雪芹, 苏爱芳, 等, 2017. 江淮夏季强天气过程中对流云合并现象的卫星观测[J]. 遥感学报, 17(2): 355-360. Huang Y, Wang X Q, Su A F, et al, 2017. Satellite infrared imagery characteristics of convective cloud merger in summer severe weather in Huaihe and Yangtze River Basin[J]. J Remote Sens, 17(2): 355-360 (in Chinese).
- 江丽俐, 钱卓蕾, 陈蔚, 等, 2018. 形成 2015 年浙江省梅汛期暴雨的控制环流及梅雨锋结构[J]. 气象科学, 38(1): 66-75. Jiang L L, Qian Z L, Chen W, et al, 2018. Circulation and Meiyu front in responsible for persistent heavy rainfall over Zhejiang during summer of 2015[J]. J Meteor Sci, 38(1): 66-75 (in Chinese).
- 田荟君, 潘玉洁, 刘佳, 等, 2018. 2014 年 5 月 31 日华东地区一次暖区飑线过程的多普勒天气雷达分析[J]. 气象科学, 38(2): 191-202. Tian H J, Pan Y J, Liu J, et al, 2018. Analysis on a squall line process in warm region of eastern China on May 31 2014 by Doppler radar[J]. J Meteor Sci, 38(2): 191-202 (in Chinese).
- 王华, 孙继松, 2008. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象, 34(3): 16-21. Wang H, Sun J S, 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing area[J]. Meteor Mon, 34(3): 16-21 (in Chinese).
- 王珏, 张家国, 吴涛, 等, 2019. 湖北省极端短时强降水 MCS 类型及特征分析[J]. 气象, 45(7): 931-945. Wang J, Zhang J G, Wu T, et al, 2019. MCS classification and characteristic analyses of extreme short-time severe rainfall in Hubei province[J]. Meteor Mon, 45(7): 931-944 (in Chinese).
- 王晓芳, 崔春光, 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征[J]. 气象学报, 70(5): 909-923. Wang X F, Cui C G, 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: organization mode features[J]. Acta Meteor Sin, 70(5): 909-923 (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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 76(2): 266-278 (in Chinese).
- 王莹, 董畅, 易笑园, 等, 2021. 天津城区一次  $\gamma$  中尺度短时暴雨的热动力环境分析[J]. 气象, 47(4): 398-411. Wang Y, Dong C, Yi X Y, et al, 2021. The thermal and dynamic environmental field analysis of a meso- $\gamma$  scale short-time rainstorm in Tianjin[J]. Meteor Mon, 47(4): 398-411 (in Chinese).
- 徐亚钦, 吴松涛, 杨旺文, 等, 2019. 浙江省梅雨锋强降水的锋生及环流特征分析[J]. 大气科学, 43(6): 1219-1232. Xu Y Q, Wu S T, Yang W W, et al, 2019. Analysis of frontogenesis and circulation characteristics of the Meiyu front with heavy precipitation in Zhejiang Province[J]. Chin J Atmos Sci, 2019(6): 1219-1232 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3): 202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3): 202-209 (in Chinese).
- 翟菁, 胡雯, 冯妍, 等, 2012. 不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟[J]. 大气科学, 36(4): 697-712. Zhai J, Hu W, Feng Y, et al, 2012. Numerical simulations of convective cloud merging processes at different development stages[J]. Chin J Atmos Sci, 36(4): 697-712 (in Chinese).
- 张宁, 张萍萍, 王珏, 等, 2017. 2016年一次由后向传播型 MCS 导致的大暴雨成因分析[J]. 贵州气象, 41(4): 39-44. Zhang N, Zhang P P, Wang J, et al, 2017. The causes of a heavy rain resulted from back propagation MCS in 2016[J]. J Guizhou Meteor, 41(4): 39-44 (in Chinese).
- 张舒阳, 闵锦忠, 2018. 2013年6月23日江淮地区梅雨锋暴雨的发展和维持机制[J]. 气象科学, 38(6): 707-718. Zhang S Y, Min J Z, 2018. Development and maintenance mechanism of Meiyu front rainstorm in Jianghuai area on 23 June 2013[J]. J Meteor Sci, 38(6): 707-718 (in Chinese).
- 张文龙, 崔晓鹏, 黄荣, 等, 2019. 北京“623”大暴雨的强降水超级单体特征和成因研究[J]. 大气科学, 43(5): 1171-1190. Zhang W L, Cui X P, Huang R, et al, 2019. An investigation of the characteristics and mechanism of the high precipitation supercell in the Beijing “623” severe rainstorm[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 1171-1190 (in Chinese).
- Chappell C F, 1986. Quasi-stationary convective systems[J]. Kay P S. Mesoscale Meteorology and Forecasting. Boston, MA: American Meteorological Society: 289-310.
- Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4): 560-581.
- French A J, Parker M D, 2014. Numerical simulation of bow echo formation following a squall line-supercell merger[J]. Mon Wea Rev, 142(12): 4791-4822.
- Hitchcock S M, Schumacher R S, 2020. Analysis of back-building convection in simulations with a strong low-level stable layer[J]. Mon Wea Rev, 148(9): 3773-3797.
- Ping F, Luo Z X, Tang X B, et al, 2014. A simulation of the merger of convective clouds in the torrential rainfalls associated with the Meiyu front[J]. Meteor Atmos Phys, 123(1-2): 51-65.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 133(4): 961-976.
- Wang C C, Chiou B K, Chen G T J, et al, 2016. A numerical study of back-building process in a quasistationary rainband with extreme rainfall over northern Taiwan during 11-12 June 2012[J]. Atmos Chem Phys, 16(18): 12359-12382.
- Zhang Q, Pan Y N, Wang S Y, et al, 2017. High-resolution regional reanalysis in China: Evaluation of 1-year period experiments[J]. J Geophys Res: Atmos, 122(20): 10801-10819.