

# 江淮梅雨峰暴雨的数值模拟与诊断分析

张鹏<sup>1,2</sup>, 许冬梅<sup>1,3,4</sup>, 沈菲菲<sup>1,3,4</sup>, 束艾青<sup>1</sup>, 卞慧敏<sup>1</sup>, 周莹<sup>1</sup>, 李超<sup>5</sup>

1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044
2. 天津市东丽区突发公共事件硬件信息发布中心, 天津 300163
3. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610225
4. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110000
5. 南通市气象局, 江苏 南通, 226018

**摘要:** 利用NCEP/NCAR再分析资料结合新一代中尺度天气研究预报(WRF)模式对2013年7月5-6日发生在江淮地区的一次梅雨锋暴雨过程进行了30 km分辨率数值模拟并对模拟结果进行了诊断分析. 结果表明, 本次江淮地区暴雨过程24 h累积降水呈东西带状分布, 中心最大累积降水量超过180 mm; 环流形势分析表明东北冷涡、副热带高压及江淮切变线构成了影响此次暴雨的关键系统. WRF高分辨率数值模拟可以准确地再现本次降水过程的范围和强度. 通过分析高分辨率的模式输出结果发现, 造成本次暴雨过程的中尺度对流系统(MCS)呈带状分布特征, 系统内部高层辐散和低层辐合相配合, 其中新生单体高层辐散强于低层辐合, 有利于系统上升运动的增强, 发展成熟的对流体高层辐散与低层辐合强度相当; 在MCS发展初期, 南北两侧的次级环流促进了对流的发展, 在MCS发展到成熟阶段后, 次级环流开始抑制对流作用; 在MCS演变过程中产生的水汽相变凝结潜热对暴雨区的对称不稳定及上升运动起到促进作用, 对MCS的发展起间接的正贡献.

**关键词:** 梅雨锋暴雨; 数值模拟; 中尺度对流系统; 诊断分析

**中图分类号:** TU4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0455-2059(2020)04-0527-10

**DOI:** 10.13885/j.issn.0455-2059.2020.04.014

## Numerical simulation and diagnostic analysis of rainstorm during the Meiyu peak of Jianghuai

Zhang Peng<sup>1,2</sup>, Xu Dong-mei<sup>1,3,4</sup>, Shen Fei-fei<sup>1,3,4</sup>, Shu Ai-qing<sup>1</sup>,

Bian Hui-min<sup>1</sup>, Zhou Xuan<sup>1</sup>, Li Chao<sup>5</sup>

1. Key Laboratory on Meteorological Disasters with the Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecasting and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. Tianjin Dongli Emergency Warning Center, Tianjin 300163, China
3. Key Laboratory of Heavy Rain and Drought-flood Disasters in Plateau and Basin of Sichuan Province, Chengdu 610225, China
4. The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110000, China
5. Nantong Meteorological Bureau, Nantong 226018, Jiangsu, China

**收稿日期:** 2019-01-22 **修回日期:** 2019-05-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(G41805070, G41805016); 江苏省自然科学基金项目(BK20170940); 四川省重点实验室开放研究基金项目(SZKT201901, SZKT201904); 中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡研究重点开放实验室联合开放基金项目(2020SYIAE02, 2020SYIAE07); 江苏省气象局青年科研基金项目(KQ202012)

**作者简介:** 许冬梅(1984-), 女, 江苏南通人, 讲师, 博士, e-mail: dmxu@nuist.edu.cn, 研究方向为中小尺度数值模拟与天气诊断, 通信联系人.

**Abstract:** Using the NCEP/NCAR reanalysis data, a Meiyu front rainstorm process that occurred in the Jianghuai area from July 5 to July 6, 2013 was simulated with the new generation mesoscale weather research and forecasting model (WRF) model. The results showed that the rainstorm occurred in the Jianghuai area, and the accumulated precipitation occurred in the east and west for 24 h, and the maximum accumulated precipitation in the center was more than 180 mm. A circulation analysis showed that the northeastern cold vortex and subtropical high pressure and Jianghuai shear line constituted the impact of the rainstorm of the key system. The WRF high-resolution numerical simulation was able to accurately reproduce the scope and intensity of this precipitation process. By analyzing the output of the high-resolution mode, it was found that the mesoscale convective system (MCS) exhibited a band-like distribution characteristic. The high-level divergence and low-level convergence of the system were in the midst of the heavy rain, which was favorable to the ascending motion of the system, and the development of the mature fluid was higher than that of the low-level convergence. In the early stage of MCS development, the secondary circulation on both the north and south sides promoted the development of convection. In the MCS developing stage, the secondary circulation played a role in suppressing the convection. The latent heat of the water vapor phase change during the evolution of the MCS played a role in promoting the symmetric instability and the ascending motion of the rainstorm, in which the MCS development played an indirect positive contribution.

**Key words:** Meiyu front rainstorm; numerical simulation; mesoscale convective system; diagnostic analysis

梅雨锋是夏季风北侧相当位温梯度带中随季风进退而进退的准静止锋,是影响东亚中纬度地区夏季强降水的主要天气系统之一。梅雨锋暴雨会造成中国江淮地区严重的洪涝灾害,因此加强对梅雨锋暴雨的监测与研究,是气象业务部门的一项迫切而重要的任务。

针对梅雨锋暴雨,学者从环流特征、中尺度结构、数值模拟、可预报性等多角度展开了丰富的研究。陶诗言等<sup>[1]</sup>指出梅雨的发生并不是局地现象,是与大范围的环流变化相联系的,是大气环流季节性变换的产物。自20世纪70年代开始,陆续展开了一系列外场观测试验<sup>[2-3]</sup>,以探索梅雨锋暴雨的维持机制以及锋面上中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)的特征及发生、发展机理。Niyomiya等<sup>[2-3]</sup>认为梅雨锋的结构不同于极锋,更偏向于副热带锋,主要表现在湿度对比、强位温梯度、深厚的水汽层及对流性不稳定层结,因此梅雨锋可以用水汽和位温梯度来定义。Kato<sup>[4]</sup>研究表明在中国内陆地区梅雨锋南北温差较小,正压性强,低层有强的水平风切变,以对流云为主。王德翰等<sup>[5-6]</sup>认为梅雨锋在对流层下半部具有相当正压的结构,对流层上半部具有斜压结构。隆霄等<sup>[7]</sup>发现高空急流和低空急流的存在和维持为此次梅雨锋暴雨过程的发生提供了有利的抬升机制。徐娟等<sup>[8]</sup>发现急流活动是梅雨锋发生的必要条件。许小峰等<sup>[9]</sup>的研究表明由于低空急流具有暖湿输送带

的作用,同时对此通道输送的水汽起着动力上的抬升和触发作用,利于形成强度较大的降水。

近年来学者倾向于使用数值模式对暴雨过程进行模拟后得到高时空分辨率的资料,从而进行精细化诊断分析,以期更深一步理解梅雨锋暴雨的发生和发展机制。冯伍虎等<sup>[10]</sup>用非静力数值模式MM5对1996年8月发生在河南、河北等地的特大暴雨过程进行了模拟,结果表明MM5可以很好地模拟大尺度和中 $\alpha$ 尺度天气系统的发生、发展与演变特征。王建捷等<sup>[11]</sup>利用MM5模式对一次梅雨锋暴雨MCS进行研究,并提出了低层中尺度辐合线上强烈发展的梅雨锋暴雨中 $\beta$ 尺度对流系统的气流运动图像。孙建华等<sup>[12]</sup>指出,静力方案能够更好地模拟大范围雨区,对大暴雨区的模拟则是非静力方案更胜一筹,边界层过程在强对流性降水的模拟中是不可忽略的。孙健等<sup>[13]</sup>对比了天气研究与预报(the weather research and forecasting, WRF)模式和MM5模式对1998年多次暴雨过程的模拟结果,认为与MM5相比,WRF能够更好地模拟影响几次暴雨过程的主要天气系统的位置和移动过程,模拟的降水落区优于MM5。侯建忠等<sup>[14]</sup>用WRF模式对陕西2005年汛期降水进行了试运行预报,发现WRF模式对暴雨落区、降水强度和不同类型的降水预报结果均比较理想;细网格模拟的降水落区和强度更接近实况,但可用预报时效较短;粗网格可用预报时效较长,一般可达

36~48 h. 孙建华等<sup>[15-16]</sup>均利用 WRF 模式成功模拟了梅雨锋的暴雨过程, 并利用模拟结果研究了低涡等中尺度系统的发展演变特征及其在暴雨中的作用.

江淮地区梅雨锋降水的形成机理和发生、发展过程具有多样性和复杂性, 针对新的过程需要更深入地探讨. 2013年7月4日夜间-6日上午(北京时间,下同), 江淮地区发生了一次典型的强降水天气过程. 本研究采用美国气象环境预报中心(national centers for environmental prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(national center for atmospheric research, NCAR) $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的逐6 h多要素再分析资料并结合新一代中尺度 WRF 模式对此次暴雨过程进行了大尺度环流分析及数值模拟, 探讨了 MCS 的结构特征及发生、发展过程中的物理机制, 为江淮地区暴雨的理解及预报提供了有效依据.

## 1 暴雨实况

2013年7月5-6日, 江南北部淮河流域的江苏和安徽两省出现一次明显的暴雨过程. 淮河流域江苏省及其以南地区出现大到暴雨或局部大暴雨, 其中5日05:00-6日05:00 24 h有多地降水量超过 50 mm, 甚至超过 100 mm. 安徽省很多地区降水量同样达到了历史最高水平.

图1为7月5日08:00的6 h累积降水量和6日08:00的24 h累积降水量. 5日雨带主要沿淮河流域分布, 东西呈带状, 江苏中北部附近( $33.2^{\circ}\text{N}$ ,  $119^{\circ}\text{E}$ )有一地区降水量超过 100 mm. 6日08:00的24 h累积降水量主要分布于安徽省中南部及江苏省西南部, 同样呈东西向带状分布. 安徽西部有一南北向的降水极大值区域, 中心超过 150 mm, 东南部同样有一降水极大值中心, 中心值超过 180 mm. 5-6日上午, 雨带由北向南移动, 同时向西延伸.

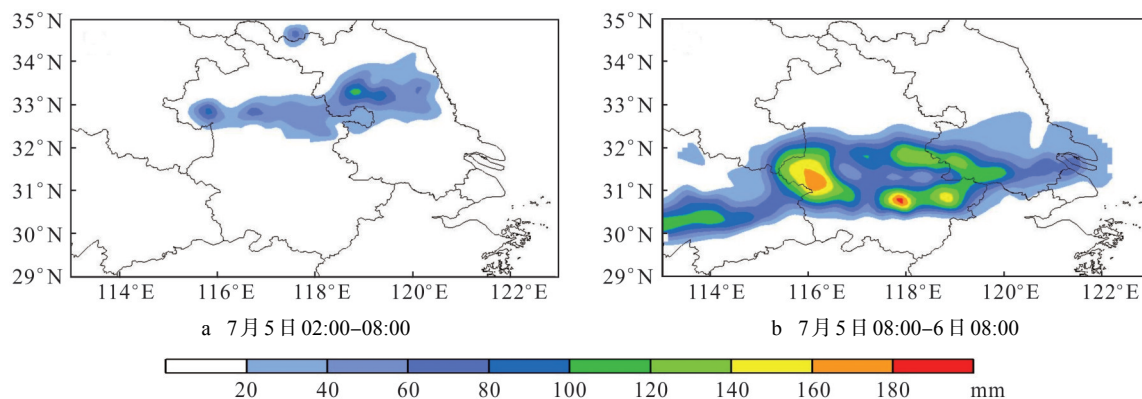


图1 2013年7月5-6日的累积降水量分布

Fig. 1 Distribution of accumulated precipitation on July 5-6, 2013

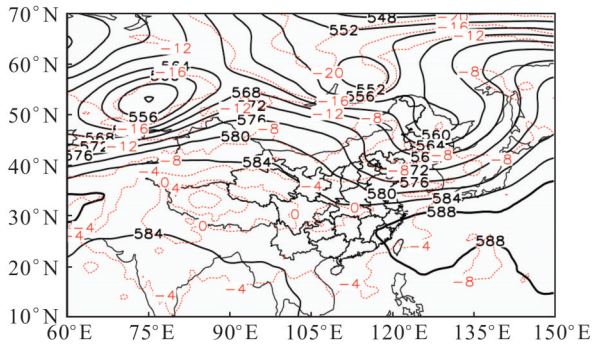
## 2 环流形势和天气系统分析

使用NCEP/NCAR的FNL资料分析暴雨发生时东亚地区的环流形势, 通过2013年7月4日20:00 500 hPa位势高度场分布(图2)可见, 东亚地区中高纬度呈“两槽一脊”形势, 中西伯利亚至中国东北和中亚分别为低槽区, 位于中国东北地区的低槽区中心闭合并伴有低温中心, 槽线由东北延伸至河南一带, 冷空气跟随槽后的偏北气流南下, 进入江淮流域. 江苏和安徽处于500 hPa槽前, 盛行偏西气流. 西太平洋副热带高压控制东海及东南沿海大陆, 588线穿过江苏福建, 其外围的西南暖湿气流与槽后冷空气在江淮地区交汇, 为此次暴雨提供了有利的环流背景场. 此后“两槽一脊”的环

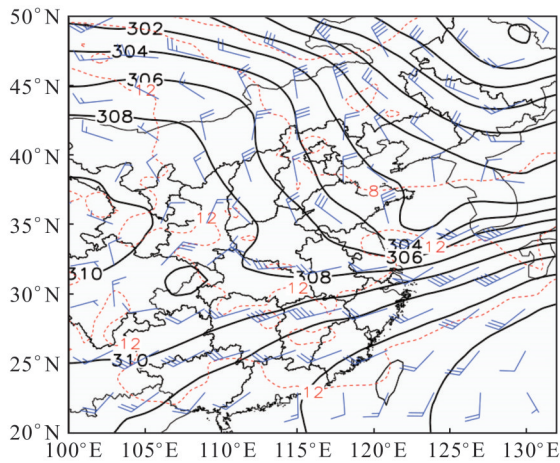
流形势基本维持不变, 东北低涡向东发展, 副热带高压南移, 5日08:00副热带高压脊线位于 $22^{\circ}\text{N}$ 附近, 这是雨带由山东南部南下进入江苏省的原因.

7月5日08:00, 由700和850 hPa高度场可见, 东北冷涡依然存在, 温度槽落后于高度槽, 因此冷涡仍将加深并东移. 同时700和850 hPa处均有西南涡存在. 西南涡风场向东伸出的切变线与东北冷涡槽线相接, 在江淮地区形成东北-西南向的切变线, 切变线南侧有一支西南向的低空急流. 切变线北侧的偏北气流与南侧西南急流于江淮地区交汇, 形成了此次暴雨过程. 可见东北冷涡、副热带高压及江淮切变线为影响此次暴雨的关键系统, 随着系统的缓慢东移南压, 降水带也随之南移.

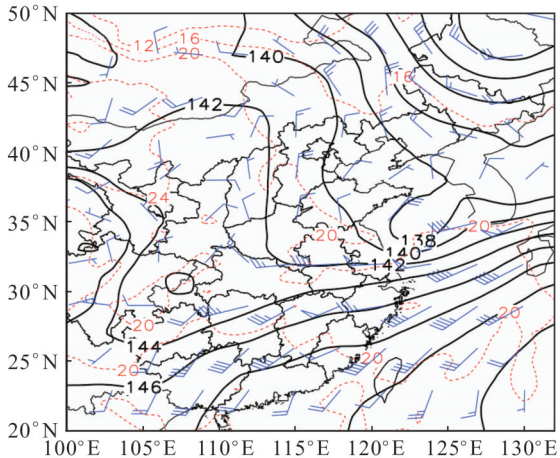




a 7月4日 20:00 500 hPa



b 7月5日 08:00 700 hPa



c 7月5日 08:00 850 hPa

黑色实线为高度场(dagpm); 红色虚线为温度场(°C);  
蓝色风羽表示风场

图2 高度场、温度场及风场

Fig. 2 height field, temperature field and wind field

### 3 试验设计

使用WRF模式V3.5.1版本对此次暴雨过程进行数值模拟. 以水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ , 1次/6 h的NCEP FNL资料为基础, 生成模拟的初始场和边界条件, 采用两层嵌套方案, 积分时段为2013年7月4日20:00-6日08:00, 共36 h, 模式网格区域范

围见图3, 外层和内层网格中心分别位于(35°N, 115°E)和(32°N, 119°E), 外层网格间距9 km, 格点数 $215 \times 215$ ; 内层网格间距3 km, 格点数 $301 \times 319$ . 垂直方向为35层, 模式顶层10 hPa. 内层区域输出模拟结果频次为1次/h. 内外层采用的参数化方案为: 微物理过程方案采用Ferrier方案(new Eta方案); 对外层9 km采用了Kain-Fritsch方案(new Eta方案)积云对流参数化方案, 对高分辨率的内层3 km未采用积云对流参数化方案; 长波辐射采用RRTM方案; 短波辐射采用Dudhia方案; 边界层采用Eta Mellor-Yamada-Janjic方案; 近地面层采用MYJ方案; 陆面过程采用Noah陆面模式方案.

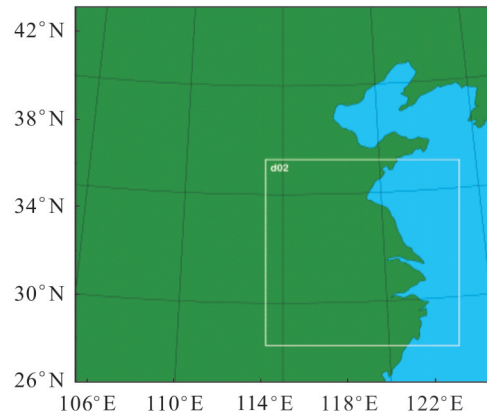


图3 模式网格区域  
Fig. 3 Model domain

### 4 降水模拟结果

图4为5日08:00-6日08:00模拟的24 h降水量与同时段观测的累计降水量分布的对比. 由图4可见, 本次模拟输出的24 h累积降水分布与观测值基本一致, 模拟的雨带呈东西走向, 位置较实况略偏北. 位于31°N附近的降水极大值区, 与观测值在范围和强度上都较一致. 大别山区附近的降水量极大值区也与观测值一致, 最大降水量200 mm以上. 模拟输出的31.8°N附近地区的降水强度较实况偏弱. 通过对比模拟结果和观测值可见, 模拟结果能够反映本次暴雨过程的雨带走向和降水强度, 说明模拟较为成功.

### 5 雷达反射率演变特征

图5为7月5日05:00-11:00模式输出的雷达组合反射率分布. 由图5可见05:00, 安徽和江苏北部在33°N附近, 分别有两个长约200 km的东西走向的强回波带, 表明这两个区域有线状对流产



生,其中位于江苏北部的单体生成于中 $\alpha$ 尺度对流系统后部,该系统由山东省东移入海.06:00,反射率呈现一个狭长的带状回波,原先位于江苏、安徽的两条线状对流合并发展,形成一条东西走向的线状中 $\alpha$ 尺度对流系统,横跨约5个纬度,将其

命名为MCS\_A.此时正值MCS\_A的发展期,南北跨度较小.此后MCS\_A不断发展,并向东南移动,08:00,MCS\_A已发展至成熟期,北部出现层状云区域,雷达反射率大于40 dBZ的区域明显增大,回波中心位于系统南部,其后部(西侧)有新的回

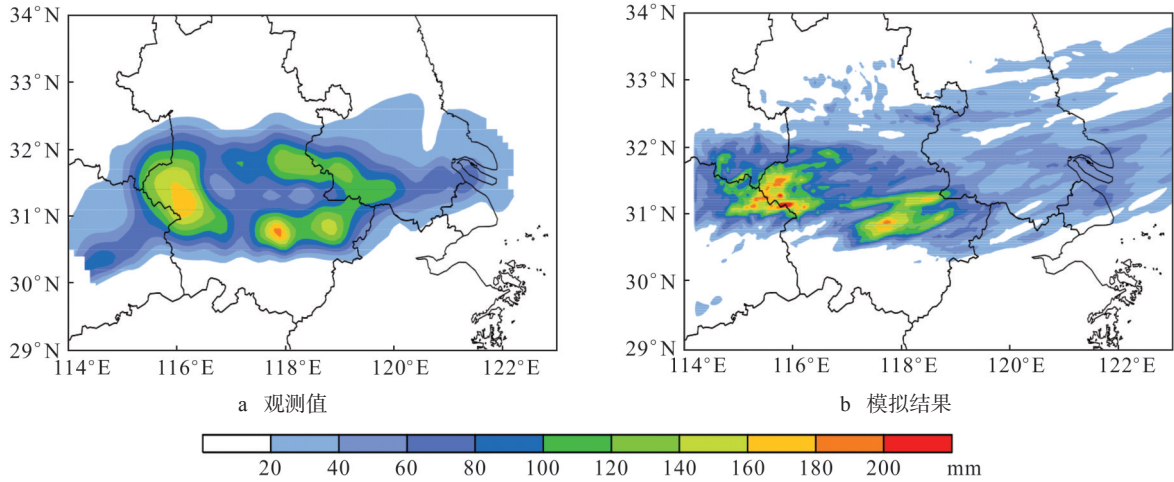


图4 2013年7月5日08:00-6日08:00的24 h累积降水量  
Fig. 4 Cumulative precipitation from 08:00 on July 5 to 08:00 on July 6, 2013

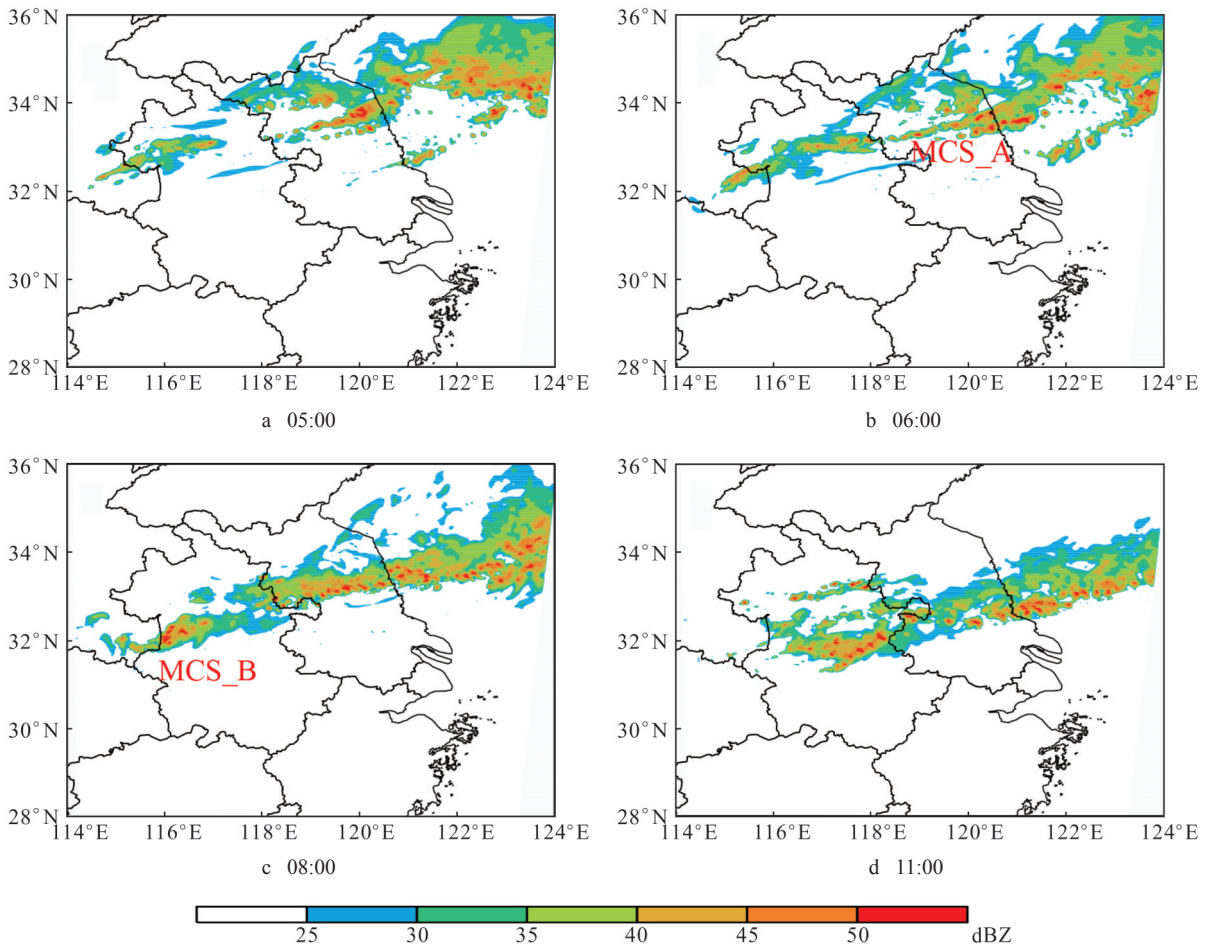


图5 2013年7月5日雷达最大反射率因子分布  
Fig. 5 Distribution of radar maximum reflectivity factor on July 5, 2013

波开始出现, 表明后部有新单体生成发展 (MCS\_B 初期). 5 日 11:00, MCS\_A 的大部分东移入海, 整体回波减弱, 线状组织形式松散, 对流系统进入消散期.

## 6 涡度和散度特征

图 6a 为 7 月 5 日 08:00 850 hPa 高度场上的散度和涡度分布. 在低层涡度场(散度场)上, 线状对流系统表现为一条正涡度带(辐合带), 其上有多个正涡度(负散度)中心, 与 33°N 附近的强回波带对应, 线状系统西南侧有新生单体生成. 图 6b 为沿新生单体中心(116.2°E)的垂直剖面, 可见 32°N 有一向上延伸至 400 hPa 的垂直正涡度柱, 在 500 hPa 以下是中心值达  $-4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的负散度区, 500 hPa 以上为中心值达  $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的正散度区, 形成高层辐散, 低层辐合的配置. 这种配置可在低层形成很强的抽吸作用, 有利于对流系统的增强发展. 图 6c 是在较为成熟的单体处沿 120°E 的垂直剖面, 可以看到伸展至 400 hPa 的垂直正涡度柱位于 32.5°~33.0°N, 500 hPa 以上为辐散区, 以下为辐合区, 高层辐散与低层辐合强度相当. 新生单体高层辐散强于低层辐合, 有利于系统上升运动的增强; 发展成熟的对流体高层辐散与低层辐合强度相当.

## 7 流场特征

### 7.1 水平流场

图 7 是模式输出的 925 hPa 流场. 由图 7 可见, 7 月 5 日 02:00 江苏-山东交界处有一涡旋中心, 其后部偏北气流与南部的西风于 33.0°N 处形成风场辐合带. 随着涡旋东移南下, 该辐合带也向南移动至 32°N. 18:00, 辐合线位于 30.5°N 附近, 与此同时在 32.0°N 附近有一明显的风场辐散区域. 水平流场的配置有利于暴雨的生成和发展.

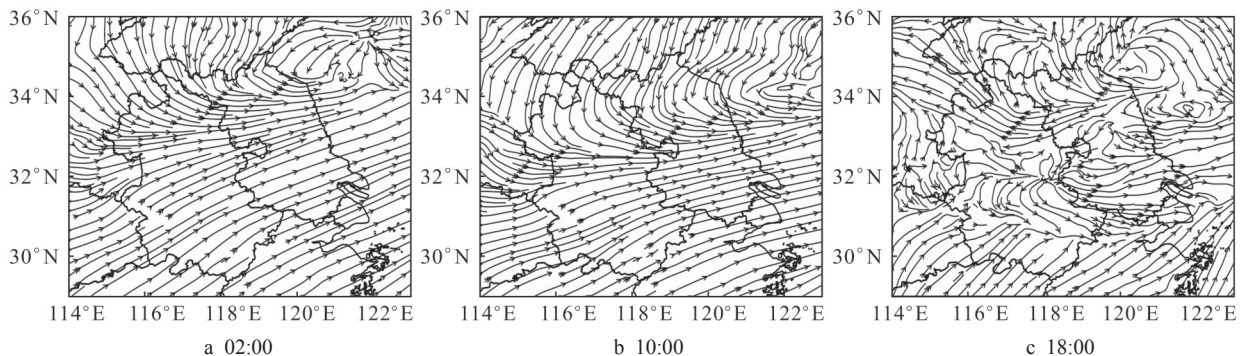
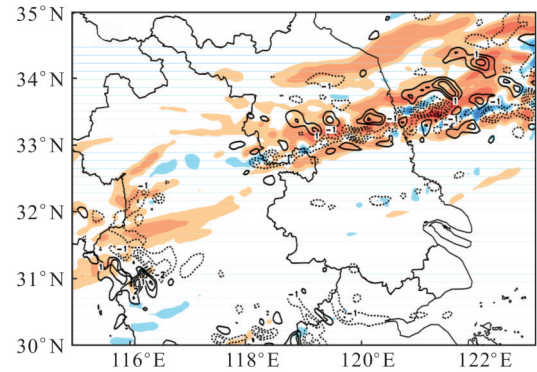
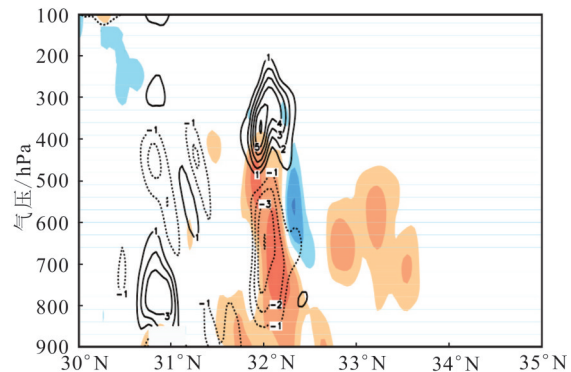


图 7 7 月 5 日模式输出的 925 hPa 流场

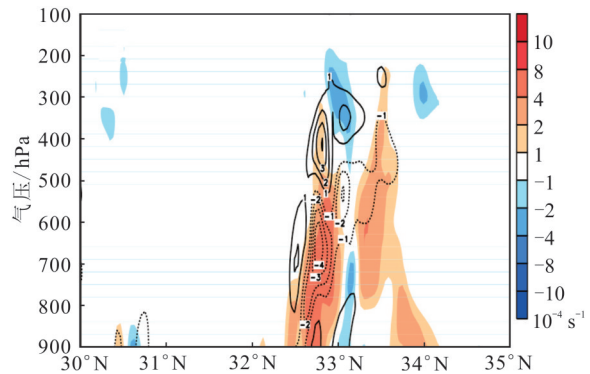
Fig. 7 Mode output flow field at 925 hPa on July 5



a 850 hPa 散度和涡度



b 沿 116.2°E 的垂直剖面



c 沿 120°E 的垂直剖面

阴影区为 850 hPa 涡度场, 等值线为散度场, 单位  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$

图 6 7 月 5 日 08:00 模式输出的 850 hPa 涡度场和散度场

Fig. 6 Mode output field at 850 hPa vorticity field and divergence field at 08:00 on July 5



7.2 垂直运动

为研究线状对流系统MCS\_A不同时期的垂直结构,分别沿垂直于对流系统方向及沿对流系统方向做垂直剖面,分析该对流系统在垂直方向的运动结构(图8). 7月5日05:00, MCS\_A处于生成阶段,在垂直于对流系统的剖面上,在流场辐合线的作用下,南北两侧的空气由西南和西北两个方向流入对流系统内部,并在33.2°~33.8°N附近辐合上升. 南侧暖湿气流上升至约250 hPa高度,之后改向南约60 km,下沉至500 hPa,之后回流向对流系统内部,形成一个反气旋方向的环流;北侧气

流一部分气流上升600 hPa,改向北约80 km后下沉回流;另一部分倾斜上升至400 hPa后向北流动,再下沉回流,在锋面北侧形成一个气旋性环流. 南北两侧气旋和反气旋环流底部的气流在对流区辐合上升,一方面使对流系统加强,促进MCS\_A进一步发展;另一方面使锋面两侧的温度梯度增大,有利于暴雨产生. 沿对流系统方向的垂直剖面有两个上升运动区,分别与安徽和江苏北部新生的对流单体相对应. 其他区域风向表现为一致的西风,与辐合线上的偏西气流对应.

7月5日08:00, MCS\_A发展至成熟阶段,垂直

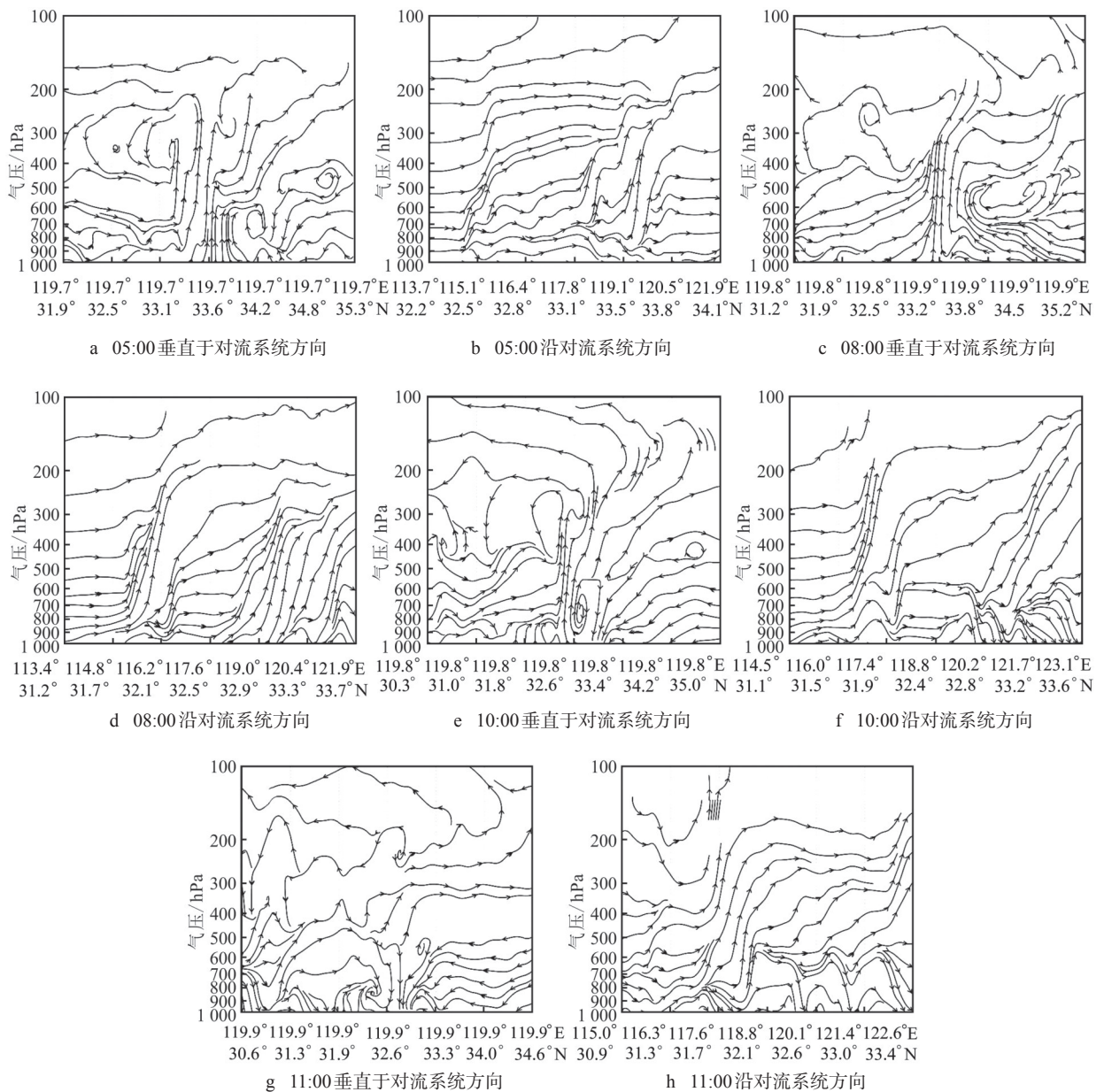


图8 7月5日垂直于对流系统方向及沿对流系统方向的垂直流场随气压的分布

Fig. 8 Vertical stream fields perpendicular to the convective system and along the convective system on different pressures on July 5



于对流系统方向的垂直剖面南侧的反气旋性环流强度增强,并向南延伸;北侧的两个较小气旋性环流合并成一个大的气旋性环流,气流垂直上升至400 hPa后向北运动约100 km,下沉至600 hPa,气旋中心区的上升气流区域相当深厚,可延伸至约100 hPa,之后再向南流出系统.这两个环流构成了两个中尺度垂直次级环流,分别垂直于线状对流系统的南北两侧,这种配置十分有利于对流系统的维持.沿对流系统方向的垂直剖面,117.8°E以东为上升区,与MCS\_A对应,MCS\_A后部新生单体则与115°~117°E的上升区相对应.10:00,MCS\_A进入消散期,垂直于对流系统剖面,系统南侧的反气旋性环流仍然维持,由于降水拖曳作用,北侧气旋性环流中的上升支气流在700 hPa处下沉,使对流北侧低层出现下沉气流.沿对流系统方向的垂直剖面可见,在低层700 hPa以下也出现了下沉气流.至11:00,垂直于对流系统方向,南北

两侧的次级环流不复存在,600 hPa以下气流延南北两侧辐合后在对流区形成下沉气流.沿对流系统方向的垂直剖面上,120°E以东的600 hPa以下为下沉区.

对流系统发展初期,中尺度次级环流与对流系统的发展有正反馈作用,但在系统发展至成熟阶段后,次级环流中下沉支气流导致对流系统的削弱.

## 8 温湿结构特征

图9是沿120°E温度及云水混合比的垂直分布.由图9可见,7月5日06:00,在33.8°~34.0°N附近有一个水汽含量极大值区,并在中层出现了增温现象.08:00,水汽柱向上伸展并南移至33°N附近,与MCS\_A的南移相对应.水汽柱内高温区域伸展至接近300 hPa.至11:00,水汽含量大幅减小,高温区域消失.这种对流系统内部的增温现象是凝结潜热释放对中层大气加热的结果.

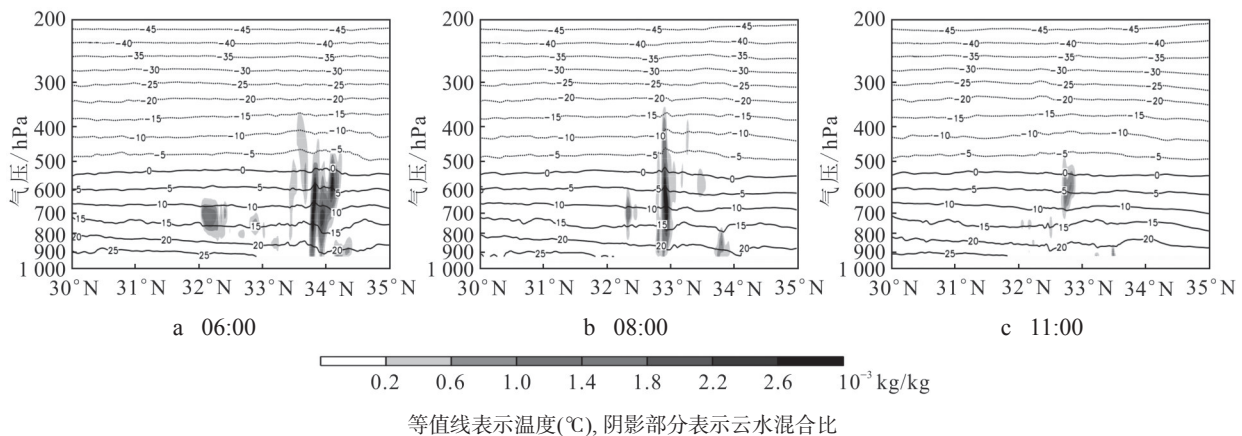


图9 7月5日沿120°E的温度及云水混合比随着气压的垂直剖面

Fig. 9 Vertical profile on different pressures along 120°E and cloud-water mixture ratio on July 5

## 9 水汽相变凝结潜热与中尺度对流系统发展的关系

凝结潜热释放是梅雨锋暴雨发生和发展的关键因素.此次暴雨过程持续时间长,雨带跨度大,7月5日12:00前,模式降水主要发生在淮河区域(32.5°~34.0°N)且对应于MCS\_A的发生和发展.针对此降水过程,分析水汽相变凝结潜热与中尺度对流系统发展的关系.

图10是7月5日各时次沿120°E假相当位温 $\theta_{sc}$ 及垂直速度的垂直剖面图.00:00,江苏境内无明显降水,降水主要发生于山东南部,对应图10中31°N附近有较强的上升运动. $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p}$ 表示假相当位

温随气压的变化程度.32.5°~34.0°N区域对应的500 hPa以下, $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} > 0$ ,为对流不稳定.随着梅雨锋南移,江苏北部逐渐产生降水,至06:00强降水发生于33°~34°N区域.由于水汽凝结释放潜热,暴雨区南部整层 $\theta_{sc}$ 数值较00:00明显增大,尤其是对流层中层(700~400 hPa), $\theta_{sc}$ 由351 K增至354 K.低层高能舌向上伸展至600 hPa,有与高层向下伸展的 $\theta_{sc}$ 大值区连通的趋势.高能舌北侧(33.8°N) $\theta_{sc}$ 线异常陡立, $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p}$ 绝对值急剧减小,表明大气层结不稳定性降低,低层大气近似中性层结.由于雨滴在下落过程中蒸发吸热造成低层大气降温,暴雨区

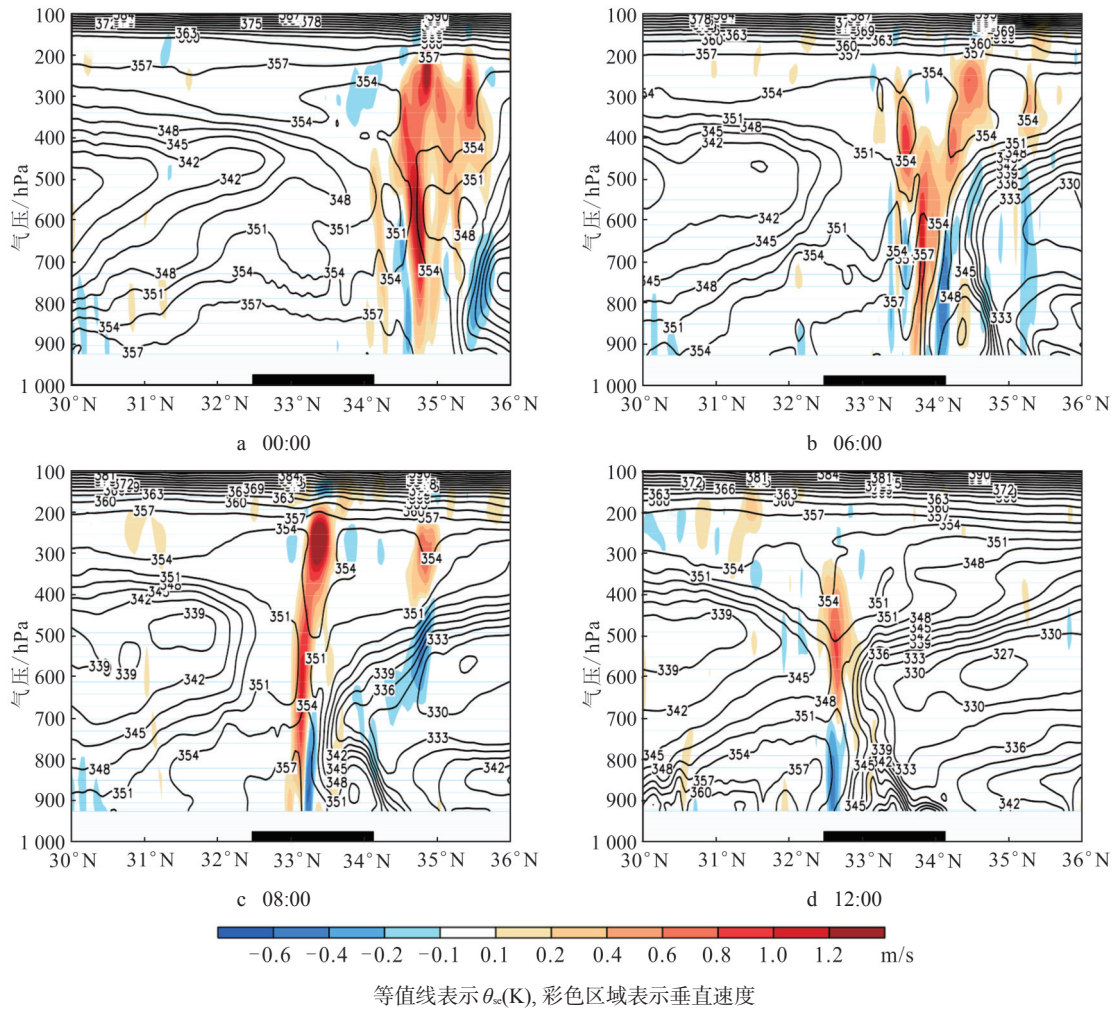


图 10 7月5日沿120°E假相当位温 $\theta_{sc}$ 及垂直速度随着气压的垂直剖面

Fig. 10 False equivalent temperature and vertical velocity vertical profile on different pressures along 120°E on July 5

北部低层 $\theta_{sc}$ 相比于00:00减小,使得暴雨区低层形成了 $\theta_{sc}$ 数值南高北低的分布形势,雨区低层大气斜压性增强,产生对称不稳定,有利于对流的发展.与中层高能中心相对应,垂直速度大值中心也位于对流层中层,表明凝结潜热释放加强了上升运动,主要原因是水汽到达凝结高度后,潜热释放使中层大气升温,气压增大,在气压梯度力的作用下,中层辐散加强并向高层伸展,形成强烈的抽吸作用使上升运动加强,有利于中尺度对流系统的发展,这种发展又促进水汽相变,二者形成正反馈效应.

7月5日08:00,强降水发生于33°N附近,降水区对应一支狭窄的上升运动柱,上升运动相对于06:00增强,垂直速度中心分别出现于对流层中、高层.此时低层高能舌相比于06:00有所回缩,高层 $\theta_{sc}$ 大值区向下伸展至500 hPa以下.随着梅雨锋的进一步南移,锋区位于33°~34°N,原先的低层 $\theta_{sc}$

低值区与锋区低能区合并.至12:00,33°~34°N区域完全由锋后冷气团控制,32.6°N附近高层上升运动明显减弱,低层出现下沉运动,降水结束,潜热释放明显减弱,对应整层 $\theta_{sc}$ 数值减小,高能舌随高度向北倾斜,700 hPa以下呈弱的稳定层结.

由以上分析可知,水汽相变凝结潜热能够增强暴雨区的对称不稳定及上升运动,对中尺度对流系统的发展起促进作用.

### 10 结论

采用NCEP/NCAR的1°×1°FNL再分析资料结合新一代中尺度数值模式WRF,对2013年7月5-6日发生在江淮地区的一次梅雨锋暴雨过程进行了环流场分析,结合模式输出的高时空分辨率资料对造成暴雨过程的MCS的发生和发展及结构演变进行了研究.

本次梅雨锋暴雨过程主要发生于安徽和江苏



两省, 24 h 累积降水呈东西带状分布, 降水极值中心位于江苏北部(33.2°N, 119°E)附近, 中心最大 24 h 累积降水量超过 180 mm, 是一次非常强的降水过程. WRF 模式高分辨率模拟可以很好地再现本次暴雨过程, 模拟得到的 24 h 累积降水与观测结果基本一致, 雨带总体呈东西走向, 较实况偏北. 位于 31°N 附近的降水量极大值区在范围和强度上, 模拟结果与观测结果一致. 大别山区附近的降水大值区得到了成功地模拟, 而 31.8°N 附近的降水强度模拟值较实况结果偏弱, 模拟结果能够很好地体现雨带的走向和降水强度.

通过分析 MCS 结构发现, 在其新生和发展成熟时, MCS 系统内部均存在一支显著的垂直正湿度区, 伴有显著高层辐散和低层辐合相配置, 有利于系统上升运动的增强, 为暴雨的发生和发展提供了有利的动力条件. MCS 南北两侧存在两个显著的中尺度次级环流圈, 在 MCS 系统的发展初期, 该次级环流有效促进了暴雨区的大气低层风速辐合, 与对流活动产生了正反馈作用; 在 MCS 系统发展成熟阶段, 其北侧正环流圈部分气流上升至较低高度后发生了下沉运动, 导致暴雨区低层逐渐出现下沉气流, 间接削弱了暴雨强度的进一步发展. 在 MCS 的演变发展过程中, 水汽含量先增多后减少, 由于水汽凝结潜热释放加热中层大气使得对流区中高层出现增温, 有利于对流的发展. 水汽相变凝结潜热能够增强对流区的对称不稳定性及上升运动, 对 MCS 的发展起正反馈作用.

**致谢:** 对南京信息工程大学高性能计算中心提供的数值计算支持与帮助, 表示感谢!

### 参考文献

- [1] 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 1958, 29(2): 119-134.
- [2] Niyomiya K, Murakami T. The early summer rainy season(Baiu) over Japan[M]//Monsoon Meteorology, Oxford: Oxford University Press, 1987: 93-121.
- [3] Yoshizaki M. Recent activities of field observations on mesoscale convective systems(MCSs) over East China Sea and Kyushu in the baiu season and over the Japan Sea in winter[C]//International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia, Tokyo: University of Tokyo Press, 2002: 80-85.
- [4] Kato K. Air mass transformation over the semiarid region around North China and abrupt change in the structure of the Baiu front in early summer[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1987, 65(5): 737-750.
- [5] 王德翰, 韦统建. 伴有特大暴雨的梅雨锋结构特征[C]//长江流域暴雨文集, 长江流域暴雨科研协作片技术组, 北京: 气象出版社, 1982: 176-181.
- [6] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 5-24.
- [7] 隆霄, 程麟生, 王文. 1999 年 6 月长江中下游梅雨暴雨的环流特征分析[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 563-571.
- [8] 徐娟, 陈勇明. 浙北梅雨季低空急流特征及其与暴雨的关系[J]. 气象科技, 2013, 41(2): 314-319.
- [9] 许小峰, 孙照渤. 非地转平衡流激发的重力惯性波对梅雨锋暴雨影响的动力学研究[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 655-660.
- [10] 冯伍虎, 程麟生, 程明虎. “96·8”特大暴雨和中尺度系统发展结构的非静力数值模拟[J]. 气象学报, 2001, 59(3): 294-307.
- [11] 王建捷, 李泽椿. 1998 年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析[J]. 气象学报, 2002, 60(2): 146-155.
- [12] 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究[J]. 大气科学, 2000, 24(3): 381-392.
- [13] 孙健, 赵平. 用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比分析[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 692-701.
- [14] 侯建忠, 宁志谦, 陈高峰, 等. WRF 模式 2005 年汛期在陕西应用与分析[J]. 陕西气象, 2006(1): 22-26.
- [15] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 675-691.
- [16] 王欢, 倪允琪. 2003 年淮河汛期一次中尺度强暴雨过程的诊断分析和数值模拟研究[J]. 气象学报, 2006, 64(6): 734-742.

(责任编辑: 张 勇)