

周玉淑, 李柏. 2010. 2003年7月8~9日江淮流域暴雨过程中涡旋的结构特征分析 [J]. 大气科学, 34 (3): 629-639. Zhou Yushu, Li Bai. 2010. Structural analyses of vortex causing torrential rain over the Changjiang-Huaihe River basin during 8 and 9 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 629-639.

## 2003年7月8~9日江淮流域暴雨过程中 涡旋的结构特征分析

周玉淑<sup>1</sup> 李柏<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**摘要** 2003年淮河流域梅雨期(6月29日~7月11日)的强降水过程有三次: 6月29日~7月1日、7月3~5日及7月8~11日。本文对7月8日12时~9日12时期间湖南、安徽和江苏发生的强降水过程的中尺度数值模式MM5的输出资料进行了诊断分析。分析结果表明: 除大尺度系统的配置有利于此次降水的发生以外, 此次降水主要发生在由西南及偏南暖湿气流与偏北气流辐合形成的梅雨锋切变线上, 切变线上辐合中心处生成并发展的两个中尺度低涡是造成降水的直接系统。低空西南风急流形成了从孟加拉湾、南海至华东地区的强水汽输送带以及湖南、安徽和江苏的水汽辐合中心, 为暴雨创造了十分有利的水汽条件。在低层切变线的辐合中心处有两个低涡分别生成或发展, 并沿切变线向东北方向移动, 这两个低涡生成的位置是低空急流左前侧急流达到极值的区域(也是正涡度中心区), 其生成可能与低空急流的加强有关。在低涡附近, 低层水汽辐合较强, 且对流层中低层形成了强正涡度中心和强散度中心相耦合的动力结构, 并有强上升运动维持, 使得低层辐合的水汽被抬升到对流层高层, 有利于暴雨的发生。

**关键词** 切变线 低涡 结构分析

**文章编号** 1006-9895(2010)03-0629-11

**中图分类号** P426

**文献标识码** A

## Structural Analyses of Vortex Causing Torrential Rain over the Changjiang-Huaihe River Basin during 8 and 9 July 2003

ZHOU Yushu<sup>1</sup> and LI Bai<sup>2</sup>

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081*

**Abstract** There were three torrential rain processes during the Meiyu period of 2003 over the Changjiang-Huaihe River basin, namely, from 29 June to 1 July, from 3 to 5 July, and from 8 to 11 July, respectively. Utilizing the numerical simulation data outputted by MM5 on the torrential rain process occurring over the Hunan, Anhui and Jiangsu provinces during 8-9 July 2003, the structure of vortex, which caused the torrential rain directly, was analyzed. Analyses from the simulation results indicated that the configuration of large-scale systems was favorable for the development of the precipitation, the direct raining system was two mesoscale vortexes at the convergence cen-

**收稿日期** 2009-04-27, 2009-11-04 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目2009CB421505, 科技部公益性行业(气象)科研专项项目GYHY200906004, 国家自然科学基金资助项目40975034, 国家科技支撑计划项目2008BAC37B01。

**作者简介** 周玉淑, 女, 1971年出生, 博士, 研究方向: 中尺度动力诊断分析和数值模拟。E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

ters along a shear line of the Meiyu front. The shear line consisted of the convergence of warm and moist southerly flow and the relative dry northerly flow. The southwesterly jet at lower levels contributed the strong water-vapor transport belt from the Bay of Bengal and the South China Sea to East China and the water-vapor convergence centers in Hunan, Anhui and Jiangsu provinces, which provided the sufficient water-vapor content. At the convergence centers along the shear line at lower levels, two vortexes formed or developed, and then moved northeastward along the shear line. Furthermore, the two vortexes were located at the left-forward position of the maximum zone of the jet (it is also the positive vorticity center). Near the vortexes, there was strong convergence of water vapor at lower levels, and the coupling dynamical structure of positive vorticity region and the divergence center formed, which caused strong upward motion in the lower and middle troposphere, and had the convergent water vapor at the lower level lifted to the high level, it was beneficial for the occurrence and development of heavy rainfall.

**Key words** shear line, vortex, structural analysis

## 1 引言

暴雨是一种中尺度现象,它的形成与中尺度对流系统的发生发展有着密切关系。因此,在研究暴雨过程时,不仅要研究暴雨发生环境的大尺度天气系统,更要研究直接形成暴雨的中尺度对流系统。在国内,江淮流域的梅雨锋暴雨一直是气象学家研究的热点问题之一。有关梅雨锋中尺度对流系统的研究已经做了很多,并形成了一定的理论。副热带高压的强度和位置、南海季风涌、中高纬度的环流形势以及从青藏高原东移的中尺度对流系统等与长江流域对流系统的发生发展都有密切联系(陶诗言等,2001)。梅雨锋中尺度对流系统是以梅雨锋为依托背景的,梅雨锋南部低空急流为对流系统的发展和维持提供了足够的水汽、动量、热量等。长江中下游的梅雨暴雨过程多与梅雨锋和切变线上自西向东移经江淮流域的低涡有直接关联,因此,涡旋的发生、发展、演变是研究梅雨暴雨时人们关注和研究的重点。不少学者对梅雨锋上的中尺度系统进行过研究。胡伯威和潘鄂芬等(1996)认为梅雨锋上强降水绝大多数伴随低涡的活动,低涡活动对梅雨期的暴雨起十分重要的作用;程麟生和冯伍虎(2001)采用MM5模式模拟了“98·7”暴雨,发现特大暴雨与700 hPa上一个 $\beta$ 中尺度低涡的生成和强烈发展直接关联;高坤和徐亚梅(2001)、陈丽芳和高坤(2007)对1999年6月下旬长江中下游梅雨锋结构及锋上低涡扰动的结构特征进行了模拟和诊断分析;翟国庆等(2003)则分析了长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演变的特点;高守亭等(2002)和Gao et al. (2002)对1999年长江流域强梅雨期低涡系统中的湿位涡异常及2003年淮河流

域暴雨期广义位涡的分布(Gao et al., 2004)作了诊断分析,发现广义位涡异常易发生在梅雨锋上水汽梯度大值区;孙建华等(2004)采用常规观测和“973”中国暴雨试验资料,对2002年6月22~23日一次由中尺度对流系统(MCS)发展而产生的低涡,以及伴随其发生发展的对流系统进行了分析和模拟研究。Zhou et al. (2004, 2005)和周玉淑等(2003, 2005)分析了1998年7月下旬长江流域“二度梅”期间的环流形势、水汽输送以及对应区域的水汽收支以及不稳定条件,认为梅雨期时,江淮流域这种区域性的暴雨仍然与半球范围的水汽输送和集中有关。针对2003年淮河流域大暴雨,孙建华等(2006)利用探空、雷达、卫星等观测资料分析了7月3~5日暴雨过程中的中尺度系统结构,认为这次大范围的降水主要是由 $\alpha$ 中尺度系统的发生发展引起,而局地强降雨是由 $\beta$ 中尺度直接造成。周海光和郭富德(2007)使用双多普勒雷达三维风场反演技术对6月26~27日合肥和马鞍山多普勒雷达探测到的江淮梅雨锋大暴雨资料进行了三维风场反演后,对其中 $\beta$ 中尺度和 $\gamma$ 中尺度系统的三维动力结构进行了研究,认为中低层的 $\beta$ 中尺度辐合线对暴雨的触发、发展、维持具有重要作用, $\beta$ 中尺度对流系统及其上的 $\gamma$ 中尺度对流云团是造成暴雨的主要系统。最近,在研究了广义湿位温守恒性特性及其与饱和大气湿位温比较的基础上(Zhou et al., 2009),周玉淑(2009)还利用广义湿位温推导得到的广义湿位涡及其倾向方程探讨了其在江淮流域暴雨分析和预报中的应用。总之,以往的研究用各种手段和方法,对不同江淮暴雨系统个例的分析得到了很多研究成果,但由于暴雨系统及其结构的多样性,对暴雨个例系统的结构分析和认识还需

要继续加强, 对这种与低涡切变线和梅雨锋上扰动有关的强暴雨过程及低涡系统进行数值模拟和分析研究仍十分必要。

2003年江淮流域发生了严重的洪涝灾害, 其中6月下旬到7月上旬的大暴雨过程中, 梅雨锋持续稳定在江淮流域, 梅雨锋上的中尺度低涡系统活动频繁, 是造成暴雨洪涝的直接因子。在江淮地区6月下旬到7月上旬的持续性降雨天气中, 降水强度大, 雨量集中, 主要的雨带在淮河流域长期停滞, 呈准静止状态。特大暴雨导致了淮河流域水位暴涨, 由此造成的灾情严重, 苏、皖、豫三省的直接经济损失达350多亿元。从6月下旬初至7月下旬初整整一个月的时间内, 江淮流域降水过程频繁, 一共出现了6次暴雨过程。而在6月底到7月上旬期间, 淮河流域共出现了3次强降水过程: 6月29日~7月1日、7月3~5日、7月8~10日。其中, 7月8日, 淮河流域的区域平均降水量接近50 mm, 湖南西部~江苏中部(雨带呈西南-东北走向)出现宽度超过100 km的暴雨带。9~10日, 暴雨带仍然维持在安徽、江苏南部地区。这次降雨径流与干流洪水会合叠加, 洪泽湖水位超过警戒水位0.64 m, 出现新中国成立以来第二高水位, 仅次于1954年(张庆云等, 2004), 正是这三次持续性的强降水才导致了2003年夏季淮河流域出现了自1991年以来最严重的洪涝灾害。

利用时间尺度密集的长沙、常德、合肥、连云港、南昌、南京、武汉和宜昌共8个站的新一代天气雷达(CINRAD-SA雷达)观测反演资料、常规

探空和地面观测资料、NCEP分析资料与中尺度MM5模式相结合, 以NCEP格点资料作为大尺度背景静场, 加入3h间隔的常规地面观测资料和1h间隔的雷达反演风廓线资料, 李柏等(2007)对2003年7月8日12时~9日12时(协调世界时, 下同)期间发生在湖南、安徽和江苏的暴雨过程进行了全程四维同化模拟。通过对模拟降水和风场与实况的对比分析, 认为模拟结果与实况较接近, 可用模拟资料对造成暴雨的系统进行分析。本文正是利用李柏等(2007)的模拟资料, 对此次暴雨过程中的切变线和低涡系统进行结构分析。

## 2 模拟风场与实况对比

李柏等(2007)对模拟降水和风场与实况做了详细的对比分析, 鉴于本文关注的是直接导致降水的低涡系统的结构分析, 因此, 本节把模拟的风场分布与实况再作一个简单的对比, 以保证模拟资料对低涡系统结构反映的准确性。

2003年7月8日12时~9日12时期间, 梅雨锋呈西南东北走向维持在淮河流域, 梅雨锋雨带有一个由西北向东南移的过程, 对应的低涡系统沿梅雨锋南部边缘从西南向东北方向移动。从7月9日18时实况图(图1a)上可见, 850 hPa上, 一条西南东北走向的切变线从西南向东北方向延伸, 在湖南南部、湖北、安徽和江苏有明显的西南风和东北风的交汇, 也是低涡发生的区域。江淮地区有一支较强的西南风急流, 急流在湖北和江苏附近有极大值20 m/s。对比7月9日18时850 hPa上模拟的

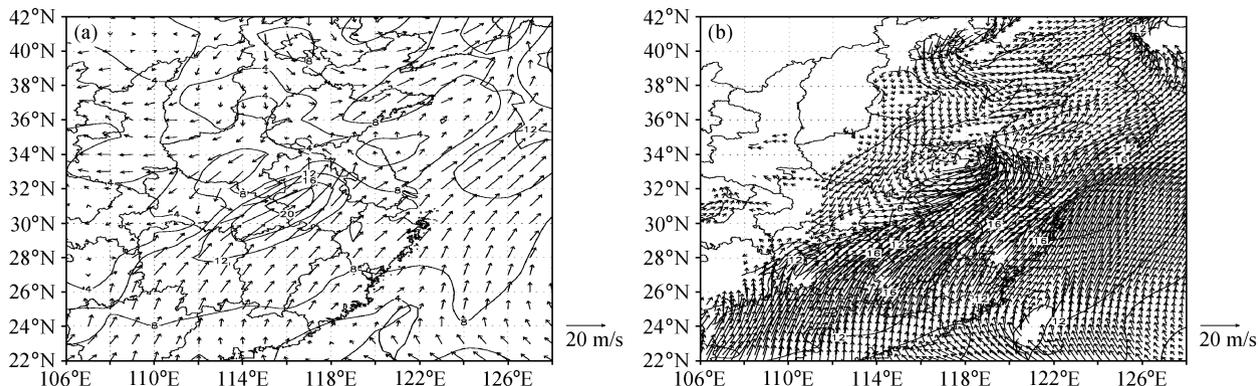


图1 2003年7月8日18时850 hPa风矢量分布(等值线为等风速线, 单位: m/s): (a) 实况; (b) 模拟(空白区为海拔高度超过1500 m的区域)

Fig. 1 The distributions of (a) observed and (b) simulated wind vector at 850 hPa at 1800 UTC 8 Jul 2003 (contour: wind velocity). The blank in (b) represents the altitude higher than 1500 m

风场(图 1b)来看,模拟结果较好地模拟出了西南低空急流,湖北和江苏附近的低涡位置与实况接近,且低涡环流更明显。模拟出的西南低空急流也在湖北和江苏附近达到最大值,与实况也是一致的。由其它气压面层的分析以及其它时次的对比(图略)也表明模拟结果与实况都比较接近,可用时空尺度都更高的模拟资料对低涡进行结构特征的分析。

### 3 梅雨锋强度变化及等压面上的水汽和风矢量分布特征

此次暴雨发生与梅雨锋在江淮流域维持并缓慢移动有关,在梅雨锋附近形成了一条明显的水平风的辐合线(切变线),强降水基本都是发生在这条切变线上。因此,首先对梅雨锋的强度变化做简单的分析后,再分析造成暴雨的切变线及其结构特点。

#### 3.1 梅雨锋强度变化

2003 年 7 月 8 日 12 时~9 日 12 时期间,梅雨锋呈西南东北走向维持在淮河流域,梅雨锋雨带有一个由西北向东南移的过程,对应的中尺度降水系统沿梅雨锋南部边缘从西南向东北方向移动。850 hPa 上,西太平洋副热带高压(图略)已经西伸北进到  $105^{\circ}\text{E}$  以西和  $30^{\circ}\text{N}$ ,基本控制了我国的华南地区和华东大部分地区。一条西南东北走向的切变线从青藏高原东南角向东北方向延伸,在湖南

北部、湖北、安徽和江苏有明显的西南风和东北风的交汇,是对流容易发生的地区。长江中下游地区有一支较强的西南风急流,急流在安徽和江苏南部有极大值,具体的大尺度环流分析见李柏等(2007)。由于模拟时段处在一次梅雨锋由西北向东南缓慢移动的过程中,在此,首先分析合肥附近梅雨锋强度的变化。

在 08:12~09:12 时段内,梅雨锋呈西南-东北走向(图略),在长江中游地区位于  $31^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$  附近,以下分析用相当位温( $\theta_e$ )梯度来表示梅雨锋的强度, $\theta_e$ 梯度越大表明梅雨锋越强。图 2a 是整个模拟过程中合肥附近区域( $31.3^{\circ}\text{N}\sim 32.3^{\circ}\text{N}$ ,  $116.6^{\circ}\text{E}\sim 117.6^{\circ}\text{E}$ )平均的  $\theta_e$ 梯度的时间-气压剖面,反映了梅雨锋强度的垂直分布随时间的变化情况。在图 2a 中, $\theta_e$ 梯度的最大值主要体现在 900~500 hPa 之间,锋面在 700~600 hPa 附近最强。其中,在模拟开始初期的 8 日 12 时~17 时期间, $\theta_e$ 梯度较小,都小于  $1\text{ K/km}$ ,从 18 时开始增强,在 19 时为  $2.7\text{ K/km}$  到 23 时达到  $3.0\text{ K/km}$ ,表明锋面从 18 时开始强度加大,在合肥站附近有梅雨锋的锋生,也可以说是梅雨锋此时过境合肥。从 9 日 00 时后又逐渐减小,表明锋面已移过合肥附近。与合肥站的逐时观测降水(李柏等,2007)比较后就可以发现,合肥站的降水时段主要出现在锋前,随着锋面过境,降水也逐渐减小。图 2b 所示的合肥站地面  $\theta_e$ 梯度的变化趋势也表明,在此次合肥附

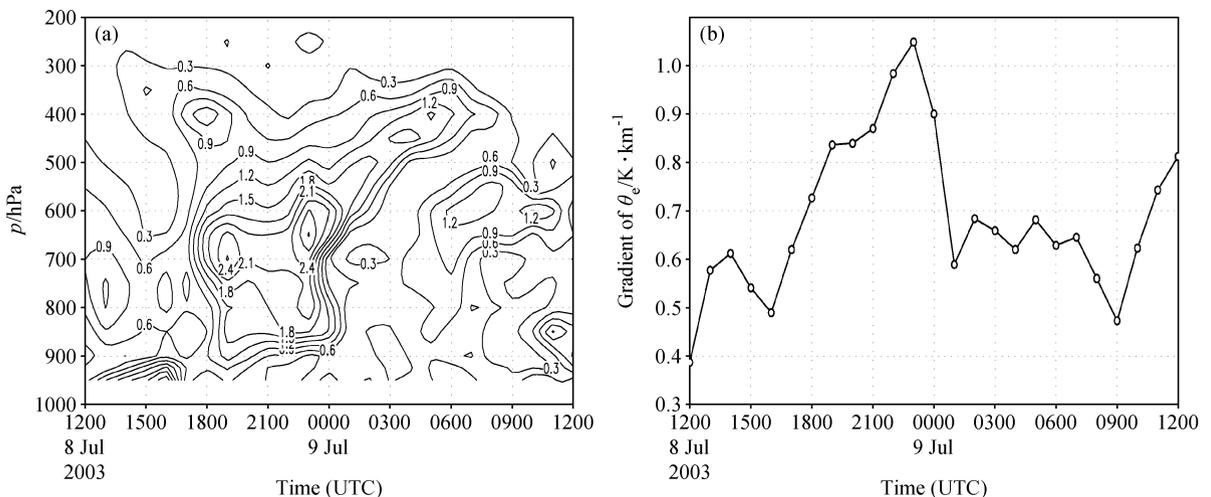


图 2 (a) 合肥附近区域 ( $31.3^{\circ}\text{N}\sim 32.3^{\circ}\text{N}$ ,  $116.6^{\circ}\text{E}\sim 117.6^{\circ}\text{E}$ ) 平均相当位温梯度(单位:  $\text{K/km}$ )的时间-气压剖面; (b) 合肥站地面相当位温梯度的时间演变

Fig. 2 (a) The time - pressure cross section of gradient of equivalent potential temperature averaged near Hefei ( $31.3^{\circ}\text{N} - 32.3^{\circ}\text{N}$ ,  $116.6^{\circ}\text{E} - 117.6^{\circ}\text{E}$ ); (b) the variation of gradient of equivalent potential temperature at the surface of Hefei station

近的降水时段内有一个梅雨锋移过合肥的过程, 锋面过境出现在8日18时~9日00时之间, 锋面最强时间在8日22~23时之间, 整个模拟的锋面强度变化与实况降水变化基本是一一对应的。

### 3.2 等压面上的水汽及风矢量分布

在梅雨锋缓慢移动的过程中, 其南侧有一条低空急流, 此低空急流在梅雨锋东段的安徽和江苏附近有最大值, 中心达到20 m/s。安徽及江苏的强降水就是由一个沿切变线东北移的低涡造成的。对流层低层有明显的水平风矢量的辐合, 表现为一条明显的切变线。模拟期间, 湖南附近也有一个中尺度低涡在切变线上的辐合中心逐渐形成, 这两个低涡都生成或基本维持在低空急流的左侧或左前侧急流相对强的极值区, 模拟期间的降水主要都发生在这两个沿切变线东北移的低涡控制的地区, 切变线为这次大范围降水发生提供了有利的环境。

分析850 hPa相对湿度和水汽通量散度分布发现, 暴雨发生时期, 与低空偏南风急流对应的是一条从孟加拉湾及南海延伸至湖南、安徽中南部和江苏南部的强水汽输送辐合带, 梅雨锋以南的大部分地区相对湿度都在80%以上, 中心相对湿度甚至达到100%, 说明这次暴雨过程中南方大范围地区水汽含量非常充沛, 形成一条西南向东北伸展的狭窄的湿舌(图3a), 而且向上一直延伸到350 hPa高度左右(见图6、图7、图8的c图), 说明这里是一个深厚的高湿层。此外, 沿锋面走向也出现了一条

西南—东北走向的水汽辐合带, 辐合中心分别位于贵州和湖南交界处、湖南中部和安徽及江苏交界地区(图3a阴影)。从图3b可见, 南来的暖湿气流和相对干冷的偏北风之间的水平风矢量之间的辐合带附近有明显的水平风切变, 在低空急流极值区左前侧(安徽附近)有一个 $\alpha$ 中尺度的低涡, 1小时的最大累计降水就发生在低空急流极值区左前侧、低涡右侧的位置(图3b阴影区, 中心大于15 mm)。另外, 在贵州和湖南交界附近, 低空急流有一个向北的大值区(中心达到16 m/s), 紧靠这个大值区的北边有一个明显的辐合中心, 在辐合中心附近已有小的降水出现。与图3a阴影表示的水汽通量散度辐合区的位置对比可见, 水汽辐合中心区位于切变线附近, 最大值在低空急流左前侧, 与暴雨区基本重叠。大于12 m/s的西南低空急流(图3b实线)出现在切变线偏东南一侧, 也是西南—东北走向。对照图3a和图3b可见, 低空西南风急流不仅将南部洋面的水汽向东北输送至湖南、安徽及江苏, 还在低空急流左侧形成了一条有极值中心的强水汽辐合带。所以, 低空急流的水汽输送和切变线上的水汽辐合中心为此次暴雨过程提供了充沛的水汽条件。

3小时以后, 从图4可见, 水汽及风场形势的分布结构与图3还是类似, 但随着低涡沿切变线向东北方向的移动, 到了7月8日19时, 最大的水汽辐合中心也随之从安徽江苏交界地区完全移入江苏

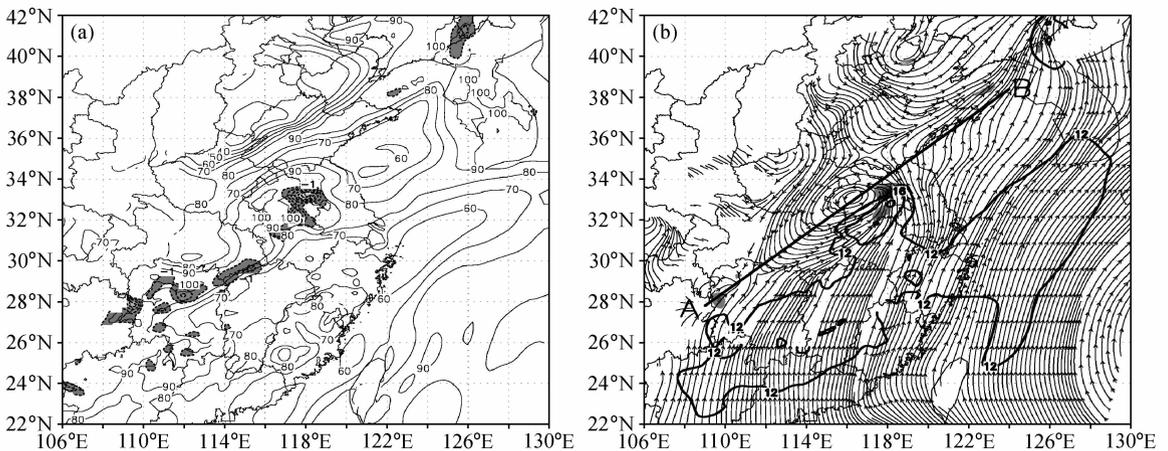


图3 2003年7月8日16时850 hPa要素场:(a)相对湿度(%, 实线)和水汽通量辐合区(阴影, 单位:  $10^{-6} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); (b)水平流线和1小时降水量大于5 mm区域(阴影, 单位: mm)以及风速大于12 m/s等值线(实线, 单位: m/s)

Fig. 3 Distributions of (a) relative humidity (solid line) and moist flux convergence region (shaded, units:  $10^{-6} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and (b) horizontal streamline, areas with 1-h rainfall more than 5 mm (shaded), and wind velocity more than 12 m/s (solid line) at 850 hPa at 1600 UTC 8 Jul 2003

界内(图 4a 阴影),但锋面以南的地区仍维持高湿特点,最大相对湿度在水汽辐合中心区仍然维持着 100% (图 4a)。切变线也还是西南—东北走向,位置少动,但其左前侧的低涡已完全移入到江苏界内。低空急流范围在几个小时之内出现了明显的扩展和加强,其范围比 16 时要大,大值区从基本的 12 m/s 加强到大范围的 16 m/s (图 4b 实线),达到 20 m/s 的急流中心极值区也相应扩大,对应的 1 小时降水区(图 4b 阴影)仍然在切变线上,1 小时降水极值中心达到 45 mm,出现在低涡的东南部,也是急流左前侧位置,进一步说明低空急流发展加强及其对应的水汽输送辐合和低涡移动发展在这次的梅雨锋暴雨过程中有重要作用。

此外,湖南附近的低空急流大值区也随低空急流的扩展而北移,与之对应的之前在贵州湖南交界处的辐合中心已经发展成为一个中尺度低涡并沿切

变线向东北方向移到湖南的东北部。这个低涡是生成在低空急流相对强的左侧位置,而安徽江苏附近的低涡也是一直维持在低空急流极值区左前侧的位置,因此,低空急流除了输送水汽外,其与低涡的形成和发展应该也有一定作用,这其中的动力机制还需要我们进一步深入探讨。

到了 8 日 22 时,从图 5 可见,大范围的水汽辐合及风场形势的分布没有太大变化,湖南东北部的低涡位置稍微北移,而江苏界内的低涡已开始入海,最大水汽辐合中心也随之出现在江苏东部和黄海上(图 5a 中阴影区),水汽辐合中心附近相对湿度仍然维持在 100% (图 5a)。低空急流继续维持,但强度没有加强,极值中心仍然是 20 m/s 的(图 5b 中实线),低涡仍然是在其左前侧位置处,进一步说明低空急流及其对应的水汽输送辐合对低涡维持及暴雨有重要作用。

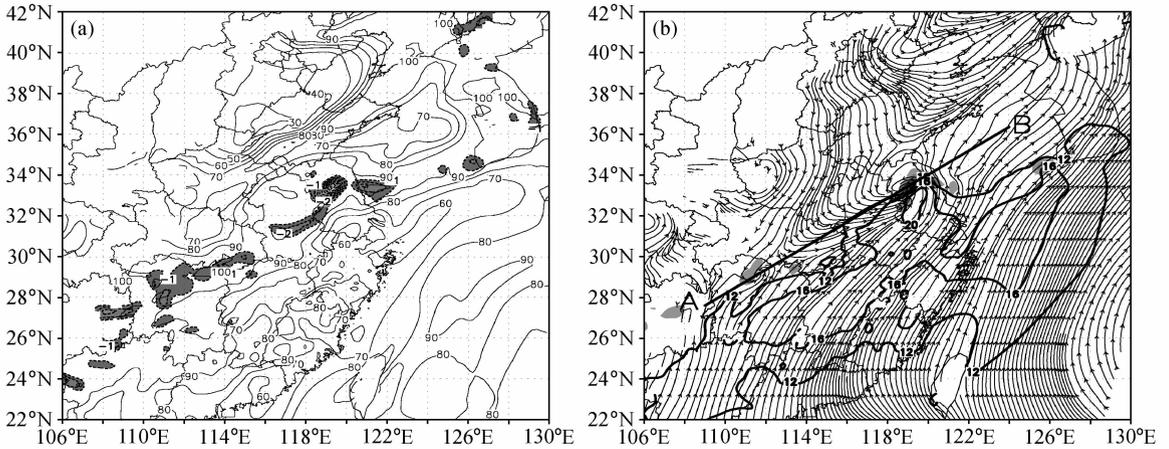


图 4 同图 3, 但为 7 月 8 日 19 时

Fig. 4 Same as Fig. 3, except for 1900 UTC 8 Jul

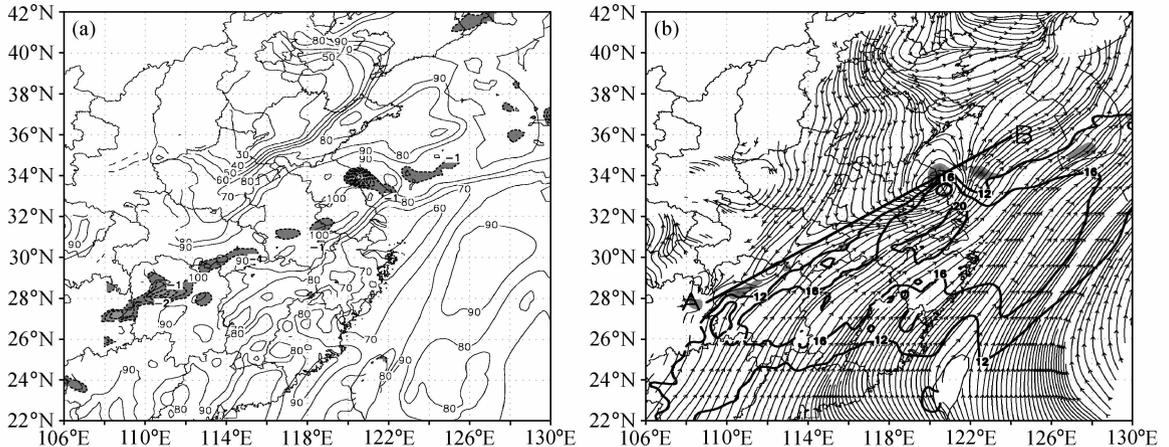


图 5 同图 3, 但为 7 月 8 日 22 时

Fig. 5 Same as Fig. 3, except for 2200 UTC 8 Jul

### 4 切变线及低涡结构分析

从3.2节中水平风的流线分布及对应时刻水汽辐合中心和降水区的分布可见, 降水区和水汽辐合带都位于水平风辐合形成的切变线上。切变线上有中尺度低涡生成或维持, 并沿切变线往东北方向移动。水汽辐合大值区和降水区都随低涡的移动也往东北方向移动。这两个低涡是造成暴雨的直接系统, 所以本节重点分析沿切变线上两个低涡的垂直剖面分布, 尤其是低涡的三维动热力结构配置和水汽分布特点。

图6是8日16时过图3b的AB线(也就是沿

切变线, 过湖南附近辐合中心及安徽界内低涡中心)各个物理量场的气压剖面。图6a为涡度(阴影区表示正涡度)和散度(虚线表示辐合), 图6b为水平风与垂直风的流线及垂直速度(实线表示上升, 虚线表示下沉), 图6c为相当位温和水汽比湿, 图6d为涡度平流。从图6a可见, 与水平流场上湖南附近辐合区对应的是一个正涡度区, 正涡度已向上发展到近600 hPa, 从975 hPa到750 hPa都是辐合层, 辐合中心在850 hPa附近, 也就是对应低层有明显的辐合。而湖北附近的低涡上空的正涡度区已发展接近到500 hPa, 辐合区主要在117°E附近, 在950 hPa~800 hPa之间, 另一个弱的辐合区

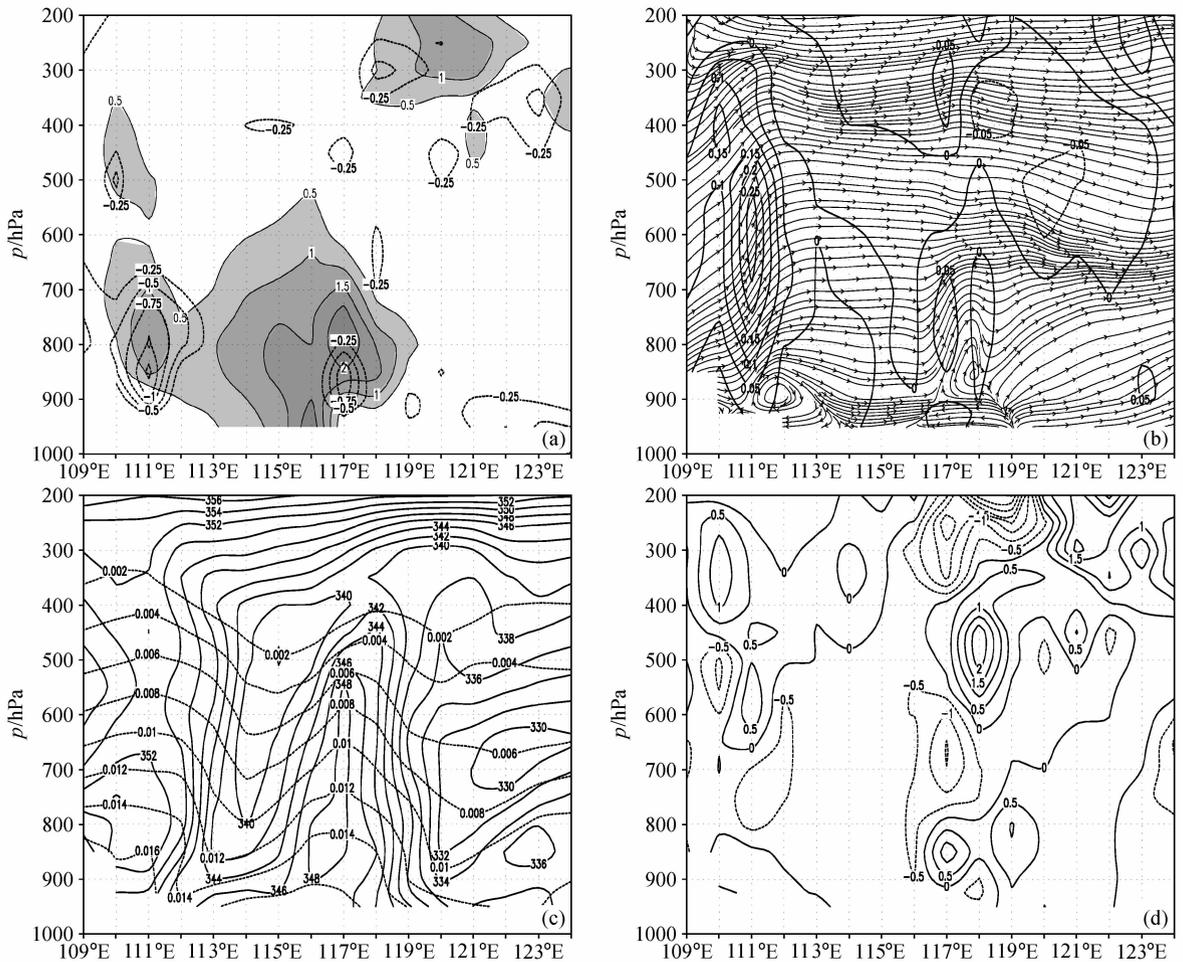


图6 2003年7月8日16时沿图3b中AB线段的垂直剖面: (a) 正涡度(阴影, 单位:  $10^{-4} s^{-1}$ )和散度(虚线为辐合, 单位:  $10^{-4} s^{-1}$ ); (b) 沿切变线的水平风与垂直速度(放大100倍)的流线和垂直速度(单位: m/s); (c) 相当位温(实线, 单位: K)和水汽比湿(虚线, 单位: g/kg); (d) 涡度平流(单位:  $10^{-8} s^{-2}$ )

Fig. 6 Vertical cross sections along line AB in Fig. 3b for (a) positive vorticity (shaded, units:  $10^{-4} s^{-1}$ ) and divergence (dashed line, units:  $10^{-4} s^{-1}$ ), (b) streamline of horizontal wind along line AB with vertical velocity (enlarged by 100 times) and vertical velocity (units: m/s), (c) equivalent potential temperature (solid line, units: K) and specific humidity (dashed line, units: g/kg), and (d) horizontal vorticity advection (units:  $10^{-8} s^{-2}$ ) at 1600 UTC 8 Jul 2003

在  $118^{\circ}\text{E}$  附近, 在  $700\text{ hPa}\sim 600\text{ hPa}$  之间, 低层的辐合区跟正涡度中心区基本也是重合的。与两个正涡度和低层辐合区相对应的都是明显的上升运动 (图 6b 实线), 且在上升运动区东北方向低层  $850\text{ hPa}$  以下有两个明显的垂直闭合环流系统 (图 6b 流线)。与上升运动和低层辐合相对应的, 是比湿在垂直剖面上也出现两个高值区 (图 6c 虚线), 是由于上升运动把低层辐合的水汽向上抬升造成的, 且这两个高水汽区对应的低层是明显的对流不稳定区, 有  $\partial\theta_c/\partial p > 0$  (图 6c 中实线), 不稳定区在湖南附近在  $800\text{ hPa}$  以下, 而在安徽附近则到达  $600\text{ hPa}$ 。在这个时刻, 湖南附件低层没有明显的正涡度平流, 但中高层已有明显的正涡度平流出现在其上, 而安徽上空  $500\text{ hPa}$  附近以及  $850\text{ hPa}$  附近都有明显的西南风正涡度平流的输送 (图 6d), 预示着这个区域的涡度可能会进一步加强。

到了 7 月 8 日 19 时, 也就是 3 小时以后, 随着低空急流的发展, 切变线上低涡附近对流层中低层的涡度和散度都有了明显的加强和东北移, 湖南附近正涡度中心低层已从  $111^{\circ}\text{E}$  移到  $112^{\circ}\text{E}$ , 正涡度区向上发展到  $250\text{ hPa}$  高度 (图 7a 阴影), 而辐合中心区也从 16 时的  $-1.0\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  加强到  $-2.0\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  (图 7a 虚线), 对应的垂直运动发展强盛, 上升运动从底层发展到了  $300\text{ hPa}$  (图 7b)。与安徽附近低涡对应的则是明显的正涡度的集中和发展, 从低层到高层, 正涡度区加强发展成一个明显的正涡柱, 涡柱中心移到  $119^{\circ}\text{E}$ , 强度也出现了明显加强, 中心值从  $2.0\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  加强到  $6.5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  (图 7a 阴影), 而且中低层的辐合区已经打通 (图 7a 虚线), 上升运动则超过了  $200\text{ hPa}$  (图 7b)。在  $700\text{ hPa}$  以下, 两个低涡区上空对应的都是正涡度中心与强散度中心交叠, 在对流层中低层形成了

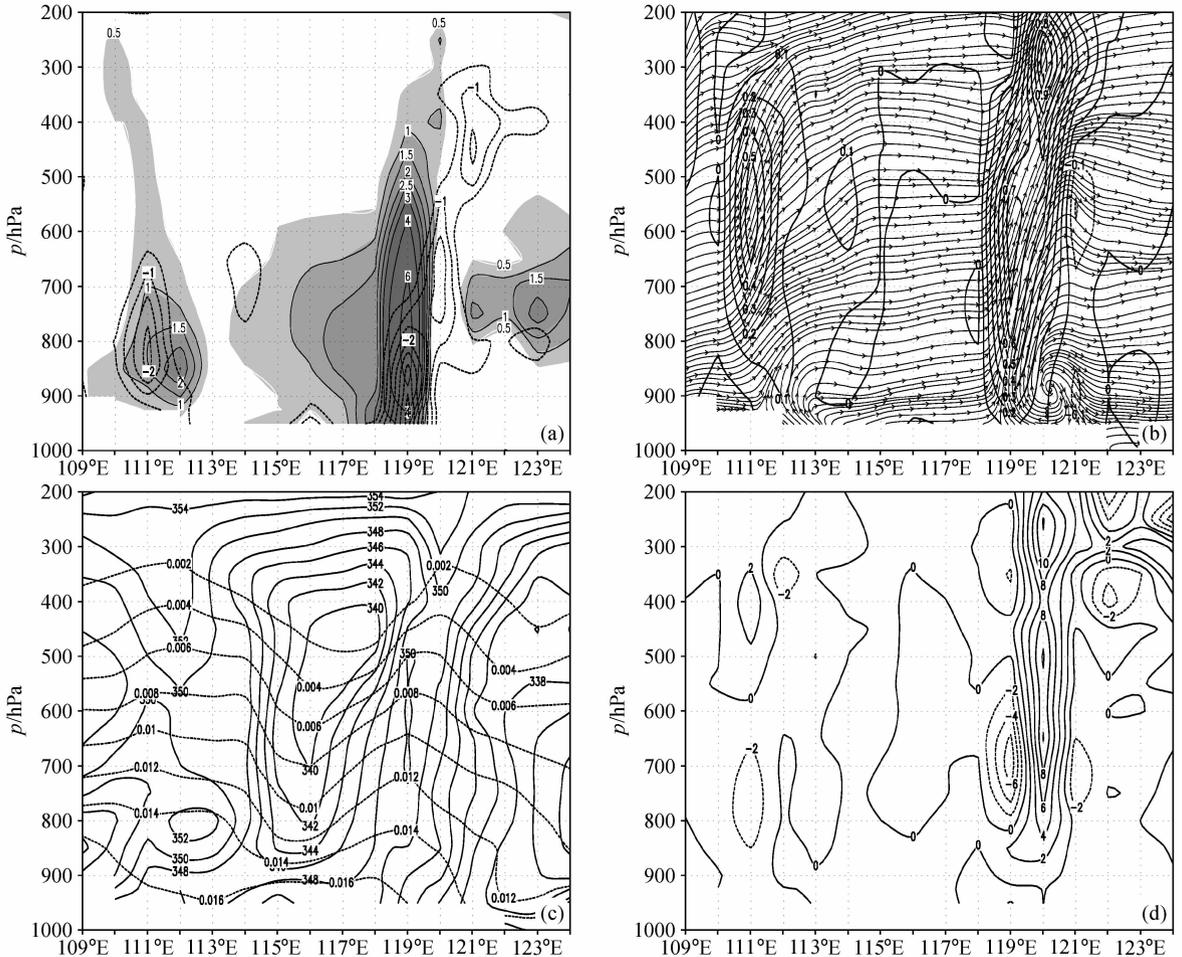


图 7 同图 6, 但为 7 月 8 日 19 时过图 4b 中 AB 线段的剖面

Fig. 7 Same as Fig. 5, except for 1900 UTC 8 Jul and along line AB in Fig. 4b

正涡度中心和强散度中心相耦合的动力结构, 并有强烈的上升运动相配合, 也是安徽江苏附近暴雨发展的强盛阶段。这个阶段的水汽抬升继续维持, 低涡上空仍然是水汽比湿高值区 (图 7c 虚线), 中低层仍然是对流中性和不稳定层结 (图 7c 实线)。与正涡度增强发展对应的是, 涡度最强的区域与之前的正涡度平流区基本一致, 安徽和江苏附近上空出现了整层的西南风正涡度平流 (图 7d), 表明西南季风盛行, 其涡度平流对涡度输送有较大作用, 也是局地涡度得以整层加强的原因之一。

到了 7 月 8 日 22 时, 湖南附近的低涡区对应的都是正涡度中心与强散度中心交叠, 在对流层中低层维持着正涡度中心和散度中心相耦合的动力结构, 但涡度和散度都有明显削弱, 正涡度中心的高度降低到 400 hPa 附近, 散度中心值也从  $-2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  减弱到  $-0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  (图 8a), 对应的上升运动出现了断裂, 不再是整层组织性的垂直上升

(图 8b), 而江苏附近低涡的正涡度中心与散度中心不再完全重合, 正涡度中心移到  $120^\circ\text{E}$ , 而辐合中心出现了随高度向东北方向的倾斜, 600 hPa 以下的辐合中心在  $121^\circ\text{E}$ , 这个时刻出现了散度中心移到涡度中心东北侧的动力配置。正涡度发展高度还维持在 250 hPa 附近, 但由于涡度平流输送的变化, 使得正涡度区不再是垂直的, 而是在中高层出现了向东北方向的倾斜。上升运动虽然还是从低层维持到 200 hPa, 但速度有所减弱 (图 8b)。所以, 即使低涡附近上空的水汽比湿高值区还维持着 (图 8c), 但随着上升运动的减弱, 可以预计未来的水汽抬升也会减弱。从低层水汽比湿值来看,  $0.016 \text{ g/kg}$  等值线出现断裂, 也说明低层水汽含量较 19 时减小。从涡度平流来看, 虽然也还是有明显的整层西南风正涡度平流输送, 但 400~500 hPa 之间出现的正涡度平流中心比低层偏东, 使得低涡附近的涡度平流分布随高度也出现了向东北方向的倾

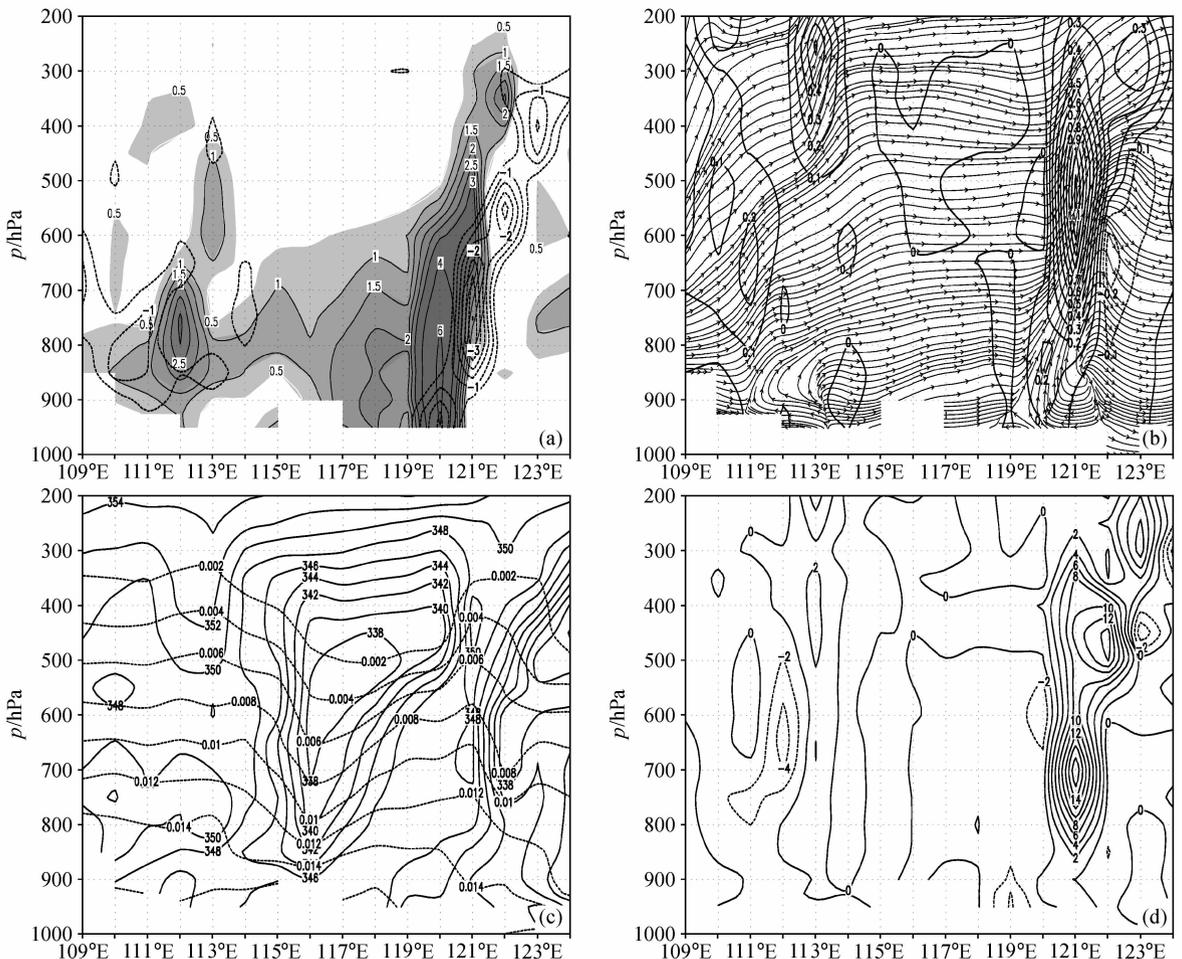


图 8 同图 6, 但为 7 月 8 日 22 时过图 5b 中 AB 线段的剖面

Fig. 8 Same as Fig. 6, except for 22 UTC 8 Jul and along line AB in Fig. 5b

斜,表明中层的涡度平流加强快于低层(图 8d),不利于低涡上空整层正涡度的发展。从动力配置和水汽条件来看,切变线上的两个低涡都处于减弱阶段,对应的降水也明显减小(见图 3b、图 4b、图 5b 中的阴影)。

由以上切变线上过两个低涡发生发展过程的剖面分析可见,在西南低空急流输送水汽的基础上,这次的暴雨主要是由这两个沿切变线移动发展的低涡造成的。低涡发展强盛时期,对应的都是正涡度中心与强散度中心交叠,在对流层中低层形成了正涡度中心和强散度中心相耦合的动力结构,并造成强烈的上升运动将低层辐合的水汽往高层输送。

## 5 小结和讨论

由以上分析,可得如下结论:

(1) 此次降水主要发生在由西南及偏南暖湿气流与偏北气流辐合形成的切变线上,切变线上辐合中心处形成并发展的低涡是造成降水的直接系统。低空西南风急流形成了从孟加拉湾、南海至华东地区的强水汽输送带,并在湖南、安徽和江苏附近形成了水汽辐合中心,为暴雨发生创造了十分有利的水汽条件。

(2) 由于切变线附近水平风矢量的强辐合与强切变,沿切变线主要表现为上升运动,而在低层辐合中心处有两个低涡分别生成并沿切变线移动发展,这两个低涡也都分别是形成或发展于低空急流左前侧急流达到极值的区域,这个位置也正好处于强的正涡度中心附近。

(3) 强降水出现在低涡附近,对流层中低层形成了正涡度中心和强散度中心相耦合的动力结构,并有强上升运动维持,使得低层辐合的水汽被抬升到对流层高层,在低涡附近的中低层则维持着不稳定和中性层结。

从生成位置来看,低涡形成主要位于切变线上,并伴有低空急流的加强。因此,未来类似的梅雨锋切变线上的暴雨预报,可以重点关注切变线附近低空急流变化相对较大的区域。在这个区域附近,低涡等对流系统生成的可能性较大,暴雨发生的几率也相应较大。此外,虽然我们从模拟资料中分析出低涡生成和发展于低空急流左前侧的极值区,但其中的机理尚不清晰,还需要进一步从动力上进行探讨。

## 参考文献 (References)

- 陈丽芳,高坤. 2007. 梅雨锋结构特征与锋上涡旋扰动关系的诊断分析 [J]. 大气科学, 31: 863 - 875. Chen Lifang, Gao Kun. The structure of Meiyu front and the relationship between the front and the vortex disturbance along it [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31: 863 - 875.
- 程麟生,冯伍虎. 2001. “987” 突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟 [J]. 大气科学, 25: 465 - 478. Cheng Linsheng, Feng Wuhu. 2001. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 2001, 25: 465 - 478.
- 高坤,徐亚梅. 2001. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究 [J]. 大气科学, 25: 740 - 756. Gao Kun, Xu Yamei. 2001. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22 - 30 June 1999 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 25: 740 - 756.
- 高守亭,雷霆,周玉淑,等. 2002. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析 [J]. 应用气象学报, 13: 662 - 670. Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu. 2002. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13: 662 - 670.
- Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu. 2002. Moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcings in torrential rain systems [J]. Chinese Physics Letters, 19 (6): 878 - 880.
- Gao S, Wang X, Zhou Y. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophysical Research Letters, 31, L12113, doi: 10.1029/2003GL019152.
- 胡伯威,潘鄂芬. 1996. 梅雨期长江流域两类气旋性扰动和暴雨 [J]. 应用气象学报, 7: 139 - 144. Hu Bowei, Pan Efung. 1996. Two kinds of cyclonic disturbances and their accompanied heavy rain in the Yangtze River valley during the Meiyu period [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 7: 139 - 144.
- 李柏,周玉淑,张沛源. 2007. 新一代天气雷达资料在 2003 年淮河流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比 [J]. 大气科学, 31: 826 - 838. Li Bai, Zhou Yushu, Zhang Peiyuan. 2007. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Yangtze River-Jianghuai River basin in 2003: Contrast of precipitation and wind [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31: 826 - 838.
- 孙建华,张小玲,齐琳琳,等. 2004. 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, 28: 675 - 691. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 28: 675 - 691.

- 孙建华, 周海光, 赵思雄. 2006. 2003 年 7 月 3~5 日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析 [J]. 大气科学, 30: 1103 - 1118.
- Sun Jianhua, Zhou Haiguang, Zhao Sixiong. 2006. An observational study of mesoscale convective systems production severe heavy rainfall in the Huaihe River basin during 3 - 5 July 2003 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 30: 1103 - 1118.
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄. 等. 2001. 1998 夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M]. 北京: 气象出版社, 43 - 100. Tao Shiyang, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. 2001. The Mechanism and Forecast of 1998 Summer Heavy Rainfall in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 43 - 100.
- 翟国庆, 王智, 何斌. 2003. 长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演变分析 [J]. 气象学报, 61: 661 - 672. Zhai Guoqing, Wang Zhi, He Bin. 2003. Formation and evolution analysis of the mesoscale vortex group in the middle and lower reaches during Meiyu of the Yangtze River [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61: 661 - 672.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖. 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究——2003[M]. 北京: 气象出版社, 170pp. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui. et al. 2004. 2003; Studies on the Causes of Anomalous Weather and Climate over China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 170pp.
- 周海光, 郭富德. 2007. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统结构模型的双多普勒雷达研究 [J]. 南京气象学院学报, 30: 1 - 8. Zhou Haiguang, Guo Fude. 2007. Meso- $\beta$  and - $\gamma$ -scale structure of heavy rain on Meiyu front detected by dual-doppler radar [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30: 1 - 8.
- 周玉淑, 邓国, 黄仪虹. 2003. 长江流域一次暴雨过程中的不稳定条件分析 [J]. 气象学报, 61: 323 - 333. Zhou Yushu, Deng Guo, Huang Yihong. 2003. Analysis on instability condition during a torrential rain over Yangtze River basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61: 323 - 333.
- Zhou Y, Gao S, Shen S S P. 2004. A diagnostic study of formation and structures of the Meiyu front system over East Asia [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 81: 1565 - 1576.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 29: 195 - 204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huanhe River basins in 2003 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 29: 195 - 204.
- Zhou Yushu, Deng Guo, Chen Huailiang. et al. 2005. Synoptic features of the second Meiyu period in 1998 over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 19: 31 - 43.
- Zhou Y, Liu L, Deng G. 2009. Comparisons of the generalized potential temperature in moist atmosphere with the equivalent potential temperature in saturated moist atmosphere [J]. Advances in Meteorology, doi: 10.1155/2009/105265.
- 周玉淑. 2009. 广义湿位涡在江淮流域暴雨分析和预报中的应用 [J]. 大气科学, 33 (5): 1101 - 1110. Zhou Yushu. 2009. Application of generalized moist potential vorticity to analysis and forecast of the torrential rain over the Changjiang-Huaihe River basin [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 33 (5): 1101 - 1110.