

# 梅雨锋中尺度切变线雨带的动力结构分析\*

寿绍文 励申申 张诚忠\*\* 范可\*\*\*

(南京气象学院, 南京, 210044)

## 摘要

利用密集的地面观测网资料以及中尺度数值预报模式输出产品, 分析了1991年7月8~9日江淮地区梅雨锋中尺度切变线雨带的中尺度动力结构。发现沿切变线走向有一条中尺度涡管, 位于对流层中低层, 高度呈波状起伏。波峰处有较强经向环流, 强降水位于波峰附近的经向垂直环流之下。降水强度与涡管强度密切相关, 涡管增强时降水增强。涡管强度与中低空的条件性对称不稳定有关。

关键词: 梅雨锋, 中尺度切变线, 中尺度涡管, 条件性对称不稳定。

## 1 引言

在梅雨锋大片雨区中, 强降水常集中在若干中- $\beta$  尺度雨带或雨团上。与这些梅雨锋上的中- $\beta$  尺度雨带或雨团联系最密切的两类常见的中尺度流场系统是中尺度气旋和中尺度切变线。为了揭示这些中尺度系统的结构特征和演变过程以及它们的发生发展与暴雨之间的关系, 利用时空较为密集的地面观测资料和中尺度数值模式(MM4)的输出产品, 在模拟效果较理想的前提下, 进行中尺度分析。文献[1]已经对中尺度气旋暴雨过程作过个例分析, 文中主要分析了1991年7月8日20时到9日20时在长江中下游地区出现的一次梅雨锋暴雨过程, 这是一个典型的中尺度切变线暴雨实例。它发生时的天气尺度形势是: 在500 hPa 高空图上, 华北有低槽, 东南沿海副热带高压脊稳定维持在22°N左右; 在850 hPa 高空图上, 江淮地区有冷性切变, 其南侧为持续的偏南气流。通过对上述暴雨过程实例分析, 以增进对江淮地区梅雨锋中尺度切变线雨带的中尺度动力结构的了解。

## 2 资料及模式

地面资料包括豫鄂皖苏4个省境内288个地面观测站的每小时风、雨量资料。高空资料为常规探空观测资料。为了分析中尺度系统的三维结构以及它们的发生、发展和演变过程, 使用了美国 PSU/NCAR 中尺度数值模式 MM4输出的各种具有较高分辨率和动力协

\* 初稿时间: 2000年3月30日; 修改稿时间: 2001年4月21日。  
资助课题: 国家自然科学基金项目(49775259, 40075009)。

\*\* 现在地址: 广西省气象局。

\*\*\* 现在地址: 云南大学。

调性的网格资料。计算模式的基本参量为  $P_T = 100 \text{ hPa}$ ,  $K_{\delta} = 11$  (总体 PBL); 水平域格点数  $46 \times 61$ , 水平格距  $60 \text{ km}$ , 时间步长  $95 \text{ s}$ ; 侧边界为时变海绵边界; 地面物理过程包括有非均一地表的热通量、水汽通量和动量通量; 地面温度是由薄层模式和有云效应的能量通量收支方程预报获得; 积云对流参数化采用 Kuo-Anthes 型参数化方案。对于非对流参数化, 饱和以后的凝结以降水形式降落, 而其潜热加入热力方程, 在未饱和层内无蒸发。从 1991 年 7 月 8 日 08 时开始, 积分  $36 \text{ h}$ , 并按每隔  $3 \text{ h}$  一次输出模拟的基本要素场( 位势高度、 $u-v$  风场、温度、露点温度和降水量), 用以进行诊断分析。为了避免在模式预报范围的边界附近预报误差较大的影响, 只选以大别山区为中心的  $30 \times 30$  格点的正方形网格区域, 作为研究范围。从模拟结果看, 该模式能较好地模拟主要系统的变化。例如模拟的流场形势图和相应的实况图表明, 槽的位置以及槽前的气流辐合带的位置十分一致。模式输出的降水范围、降水中心位置也基本与实况一致, 但模拟的雨量一般要比实况的弱。

### 3 降水量和地面风场分析

1991 年 7 月 8 ~ 9 日 24 h 的降水区呈东北-西南走向的带状, 主要的强降水中心分别在湖北东部到大别山区和江苏境内, 雨量极大值分别为  $190 \text{ mm}$ ,  $101 \text{ mm}$ ; 9 日 08 时至 10 日 08 时的雨量极大值仍然在大别山区一带, 中心强度为  $187 \text{ mm}$ , 雨带走向与  $850 \text{ hPa}$  高空图上的切变线走向一致。从 7 月 8 日至 9 日的每小时降水量图显示, 7 月 8 日降水最早是从湖北中部开始的, 初时呈小块和零散分布, 9 日 03 时后连成雨带, 横贯鄂皖等地。雨带长约  $500 \sim$

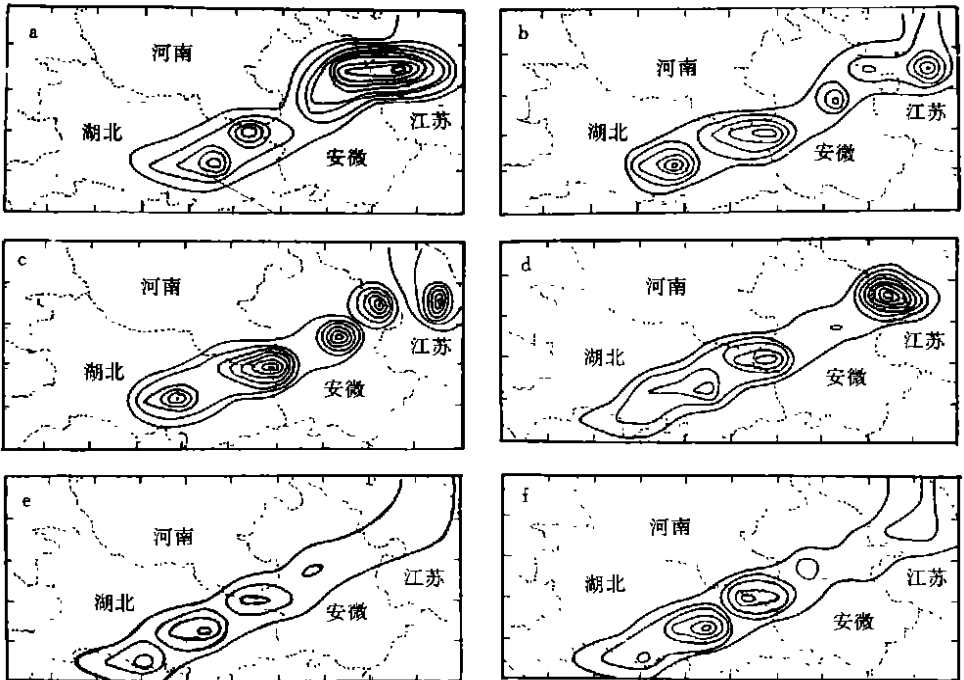


图1 1991年7月9日06时至11时的每小时降雨量

(最外围等雨量线为  $2.5 \text{ mm}$ )

600 km, 宽约100 ~ 200 km, 雨带上包含多个雨团, 它们沿雨带间隔排列, 位置比较稳定(图1), 特别在鄂皖交界处的一个雨团稳定10余小时, 使该地成为主要暴雨中心之一。通过逐时雨量分布的分析还可看出, 在8日08时至20时这阶段, 降雨量较小; 在8日20时至9日03时, 雨区有所扩大, 降水中心主要维持于孝感、大别山以及九江一带, 但强度仍不很大; 到9日03时后, 降水强度逐渐增强, 08 ~ 14时前后达到高峰; 9日17时后降水强度开始衰减。由这些事实, 可把该暴雨过程粗分为3个大的阶段: 第1段由8日08时至9日02时, 该段中小系统生命史较短, 降水强度较小, 降水中心位置多变, 此阶段称为暴雨增幅前期; 第2阶段由9日03时至9日16时, 称为暴雨增幅期, 该阶段中降水系统的生命史较长, 降水中心位置稳定少变, 导致局地雨量的显著增大; 第3阶段是在9日17时以后, 降水减弱并趋消失。从逐时的地面风场分析可见, 中尺度雨带和中尺度切变线相联系, 中尺度切变线位于中尺度雨带的南部边沿。以9日09时的情况为例(如图2所示), 地面风场上西南风和东北风之间形成的中尺度切变线(与雨带南侧的最外围等雨量线位置基本一致) 正处在江淮之间, 在大别山一带有一暴雨中心, 其东部有气旋性涡度(雨带南侧为西风, 北侧为东风), 西部则有反气旋涡度(雨带南侧东风强, 北侧东风弱)。

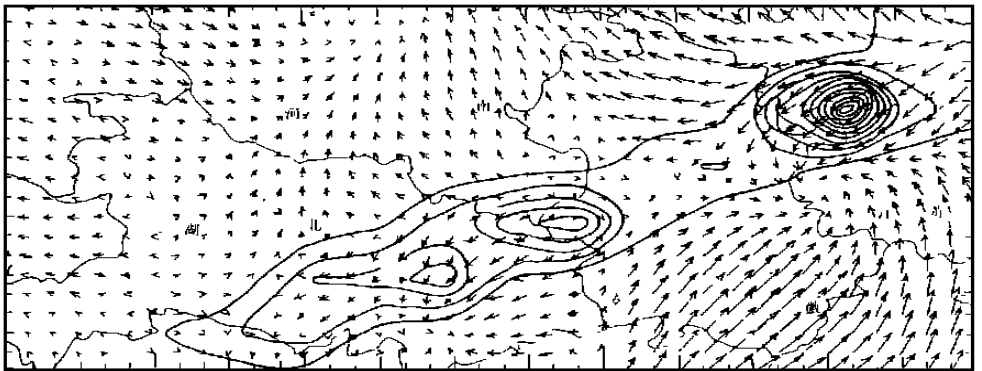


图2 1991年7月9日09时雨带与切变线的相互配置  
(箭头线表示地面风, 细实线表示每小时雨量等值线)

#### 4 梅雨锋上中尺度切变线的动力结构及其与暴雨增幅的关系

在暴雨增幅前期, 由8日20时沿112.8 E的涡度经向剖面图(图3a)可见, 在雨带上空有一从地面至450 hPa的正涡度区, 极大值中心位于750 hPa上, 量值为 $5.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 在450 hPa以上, 均为负的涡度。在雨带两侧的低层全为负涡度。在同一时刻, 沿114.7 E的涡度剖面图的特征与图3a的基本相同, 只是正涡度中心强度的较小, 为 $3.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 沿116.5 E的涡度剖面图特征也与前两图类似(图略)。在该时刻在沿112.8 E的 $Q$ 矢量散度经向剖面图上, 雨带上空对应一窄的 $Q$ 矢量散度的辐合区, 但强度较弱, 最大强度仅为 $-10.4 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} / \text{ s}^3$ , 在850 hPa以下的低空, 雨带两侧的均为辐散区。根据 $Q$ 矢量辐合(散)对应上升(下沉)运动的关系, 由 $Q$ 矢量散度的分布和强度可以看出在降水带两侧存在正反两个强度较弱的垂直环流圈。

在暴雨增幅期, 7月9日14时沿114.8 E的涡度经向剖面图(图3b)上, 暴雨区上空形成

强的正涡度区, 其上部伸展至400 hPa 以上, 中心位于850 hPa 以下, 强度达  $14.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。雨带两侧, 在低层均是负涡度区; 在沿112.8 E, 116.5 E 的剖面图(图略)上形势基本与图3b 相同, 只是随着经度的增加, 剖面图中的正涡度值区稍微向北偏移, 反映了雨带略呈东北-西南走向的特征。而由该时沿114.7 E 的  $Q$  矢量散度垂直分布图(图3c)可见, 在雨区上空, 对应地有一较强的  $Q$  矢量辐合区, 中心位于650 hPa 层上, 强度约为  $-12.1 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^3$ , 而在300 hPa 以上则表现为一强的  $Q$  矢量辐散区, 中心在200 hPa 上, 强度为  $27.1 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^3$ , 雨区上空的低层  $Q$  矢量辐合对应上升运动, 有利于增强降水。在雨带北侧, 低层为  $Q$  矢量辐散区, 因此为晴好天气; 总之, 可以发现暴雨增幅期和暴雨增幅前期一样, 雨带上空低层为上升气流, 上层支流向南北流出并转为下沉气流, 从而都构成南北两个不对称的垂直环流圈, 不同的是在暴雨增幅期的垂直环流显著增强了。

通过上面的分析, 可以发现汉口至皖南的雨带在暴雨增期前后具有以下特征: (1) 雨带上空都对应着一个闭合的正涡度区, 但涡度中心高度和强度随着暴雨的强度而变化, 在暴雨增幅期正涡度中心的所在高度较低, 强度较强; (2) 雨带南北两侧都各有一正反环流形成, 但在暴雨增幅期雨带上空  $Q$  矢量辐合和雨带两侧的  $Q$  矢量辐散都有明显的增强, 表明雨带附近的垂直环流比暴雨增幅前期有明显的增强。

上面所说的雨带南北两侧的不对称环流圈及其演变, 也可以通过对风场的二维环流分析来进一步证实。在暴雨增幅前期, 7月8日23时沿112.8 E 的剖面图(图略)上, 由垂直速度  $\omega$  (单位:  $\times 10^3 \text{ hPa/s}$ ) 和南北向的非地转风  $v_a$  两者所合成的二维气流的分布显示, 在暴雨区上空低层为上升气流, 到上层约700 hPa 高度上发生分枝, 雨带北侧为一支向北倾斜的上升气流, 然后转为下沉, 从而构成一个正环流之间。在雨带南侧, 上升气流向南流出

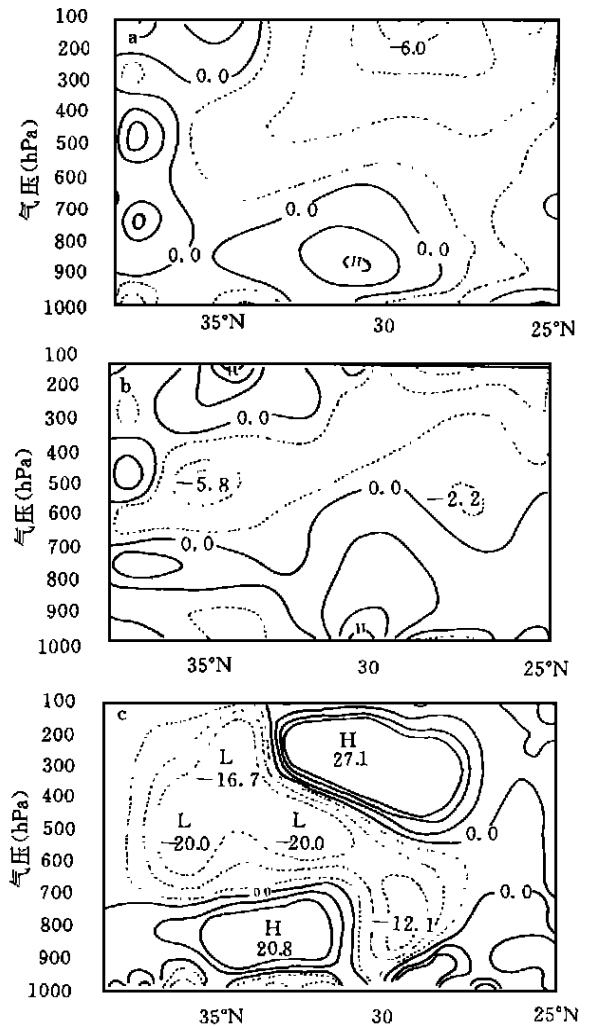


图3 涡度经向剖面图

(a. 7月8日20时沿112.8 E 的涡度,

b. 7月9日14时沿114.7 E 的涡度,

c. 7月9日14时沿114.7 E 的  $\nabla \cdot Q$  剖面图)

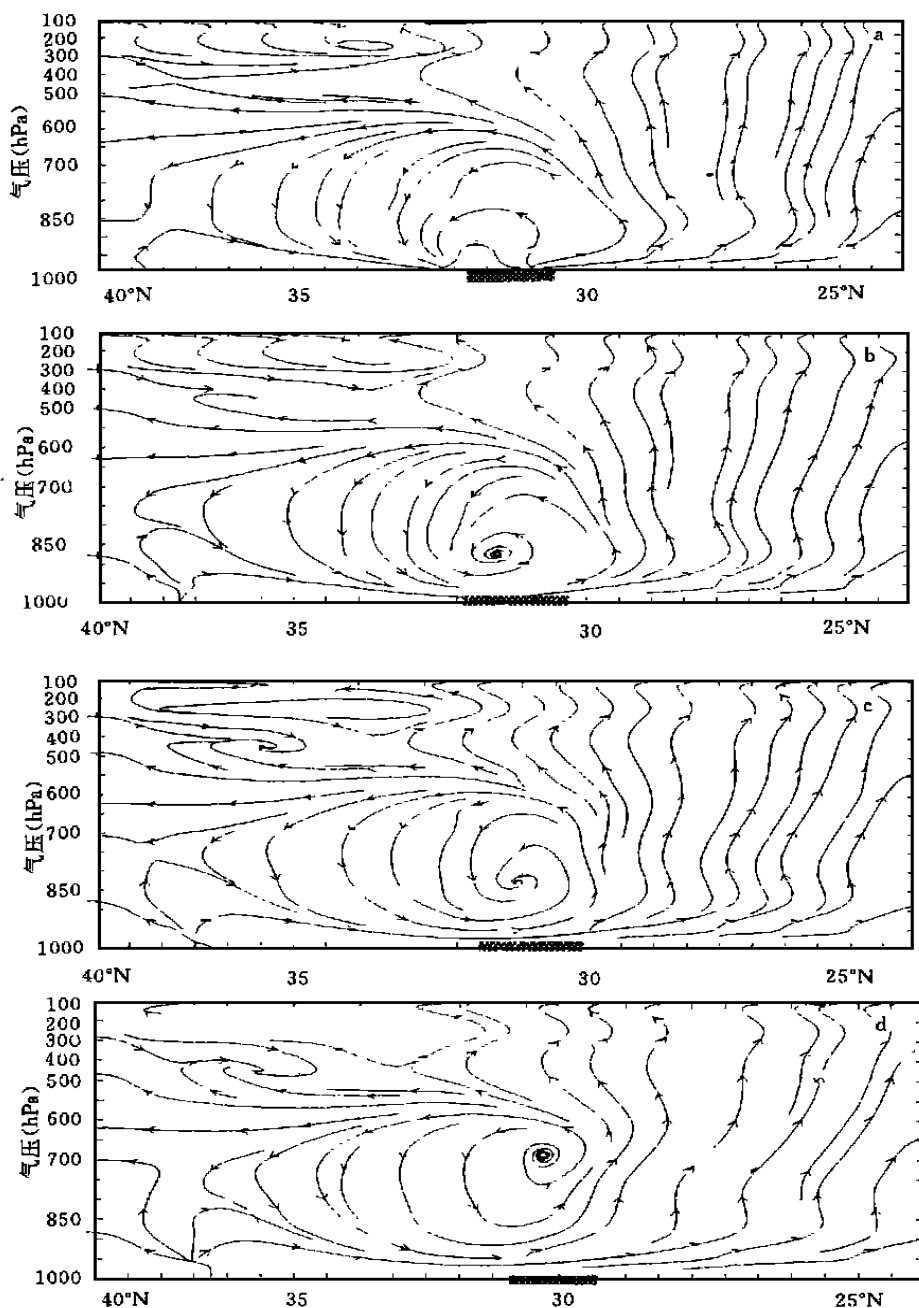


图4 7月9日14时沿不同经度的垂直环流剖面  
(a. 沿114.9 E, b. 沿115.5 E, c. 沿115.8 E, d. 沿116.1 E)

后转下沉构成一个反环流圈。到暴雨增幅期(以7月9日14时的情况为代表),南北向的二维环流分布特征如下:沿112.8 E,雨带上空气流向北斜升,之后下沉与低层的偏北气流汇合向南流入雨区,与雨带南侧附近偏南气流辐合形成上升,达500 hPa高度后又向南下沉,也构成一反环流圈。同一时刻在沿115.8 E的二维气流分布图上的形势与沿112.8 E的情

况基本相似。

综合以上分析可见:在暴雨增幅前期(较弱降水期),雨带上维持一上升气流,且雨带两侧各有一正反环流圈存在;在暴雨增幅期(强降水期),雨带上空总有一向北斜升波动气流,且雨带两侧同样各有一正反环流圈存在,但强度更强些。这表明暴雨增幅期与其前期雨带附近的环流结构基本上是一样的,说明由雨带附近的正环流的上升枝输送暖湿不稳定空气是雨带发生的必要条件,而正环流加强引起的暖湿不稳定上升气流加强,又是使雨带强盛的重要条件;同时,上升区南北两侧的下沉气流的维持、增强又是使辐合上升及对流运动得到激发、维持和增强的不可缺少的因素。

为了更清楚地表现中尺度系统的动力结构,这里再利用原来60 km 格点上的气象要素,经过具有订正方案的高斯权重插值方法将资料内插入格距为30 km 的网格上,从而形成了以大别山主峰(31 N, 116 E)为中心点的 $26 \times 37$ 个格点的研究范围。随后再作通过雨带的二维环流图。图4为9日14时自汉口至安庆一线的每隔30 km 一张剖面图的系列图组。由图4可明显地看到,从114.2 E 到116.2 E 之间,沿雨带都对应着一个正环流圈;在115.5 E 的图上,环流中心稍有上抬,环流中心已上升至850 hPa 层上;在沿115.8 E 的图上,形势与115.5 E 的相同;到116.1 E 以及116.2 E 的图上,环流中心已上跃至700 hPa 上。综合这几张图,首先在暴雨增幅期,从汉口至116.3 E 之间对应雨带有一连续性的正环流涡管存在,该涡管长为300~400 km;其次,还可看出沿雨带的环流中心高度的分布是高低不平的,这意味着涡管高度是呈波动状起伏的;特别是在115.8 E 与116.2 E 之间,环流中心有明显的上跃。结合此时的雨量实况看,这区域的雨量明显较大。由以上分析可以得到一个在梅雨锋中尺度切变线附近的中尺度涡管的三维结构的概念模型(图5)。由此模型可见,中尺度涡管基本沿切变线走向,位于对流层中低层,高度呈波状。波峰处有较强经向环流,波峰两侧的地面分别为中尺度气旋和反气旋环流。暴雨区位于波峰附近经向垂直环流之下及地面中尺度气旋和反气旋环流之间。降水强度与涡管强度密切相关,涡管增强时降水增强。

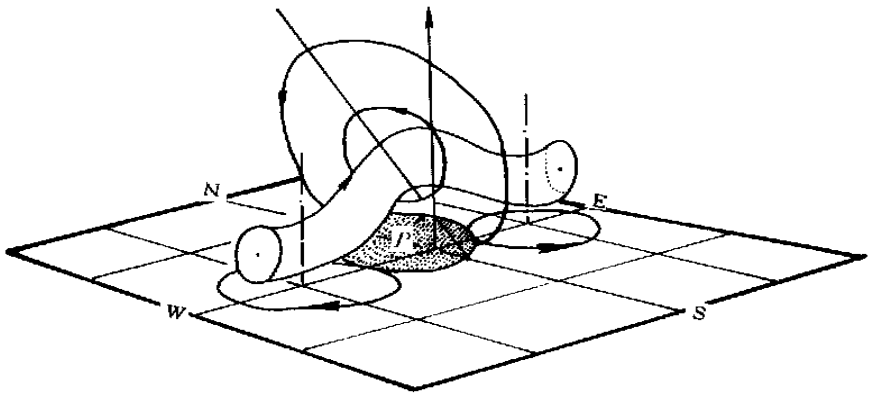


图5 中尺度涡管的概念模型(标“P”的阴影区为降水区)

## 5 条件性对称不稳定与涡管强度的关系

对称不稳定是一种浮力-惯性不稳定。关于对称不稳定条件的判据有:位涡  $q$  小于零,或里查孙数  $Ri < 0$ ,或等位温( $\theta$ )面斜率大于等绝对动量( $M$ )面斜率等。Bennetts 和

Hoskins 研究了在潮湿大气中对称不稳定的可能性, 得出条件性对称不稳定的概念, 他们指出湿位涡  $q_w < 0$  是大气发生条件性对称不稳定 (CSI) 的条件。湿位涡在剖面图上的分布, 可以比较直观地反映 CSI 的空间分布, 有助于揭示中尺度系统与 CSI 的联系。因此我们利用中尺度数值模式 MM4 输出的每隔 3 h 的基本要素场作湿位涡的剖面分析。在暴雨增幅前期 (以 8 日 23 时代表), 沿 112.8 E 位涡剖面图 (图略) 上, 雨带上空低层有  $q_w > 0$  区; 在中上层 700 hPa 到 300 hPa 之间,  $q_w$  的值均小于 0; 负中心在雨带北侧约 350 km 处上空 350 hPa 附近, 强度约为  $-1.5 \times 10^{-13} (\text{m}^2/\text{s}^4) \cdot \text{hPa}^{-1}$ , 在这高度以上  $q_w$  值又转成正值。在沿 112.8 E 的剖面上, 形势与沿 114.7 E 的剖面类似。由此可以认为, 在暴雨增幅前期湿对称不稳定主要在高层, 它可能是有利于降水的机制之一, 然而引起降水的主要动力学机制还是低空辐合线的强迫抬升。在暴雨增幅前期 (以 9 日 14 时为代表), 从经过暴雨中心的沿 114.7 E 剖面图 (图 6) 上看,  $q_w$  的负值中心已下伸至 700 ~ 500 hPa 之间的中低空, 强度则增至  $-2.1 \times 10^{-13} (\text{m}^2/\text{s}^4) \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。这个中低空负值中心可能是造成低层涡度管增强及暴雨增强的重要原因。在暴雨消亡期 (以 9 日 17 时为代表), 在沿 114.7 E 的剖面图上,  $q_w$  的负值中心又上缩至 350 hPa 附近的高空。由此可见中低空的  $q_w$  负值中心与低层涡度管增强及暴雨增幅确实存在十分密切的联系。从  $q_w$  的平面分布图上也可以看出种关系。从暴雨增幅期 (以 9 日 08 时为代表) 700 hPa 的  $q_w$  分布图 (图 7) 可见, 从襄樊、信阳一带有一  $q_w$  负值中心, 整个  $q_w$  负值区呈东北-西南向的带状, 而未来的雨区 (带) 恰好出现在其南部。所以 700 hPa 的  $q_w$  分布能很好预示暴雨的落区。

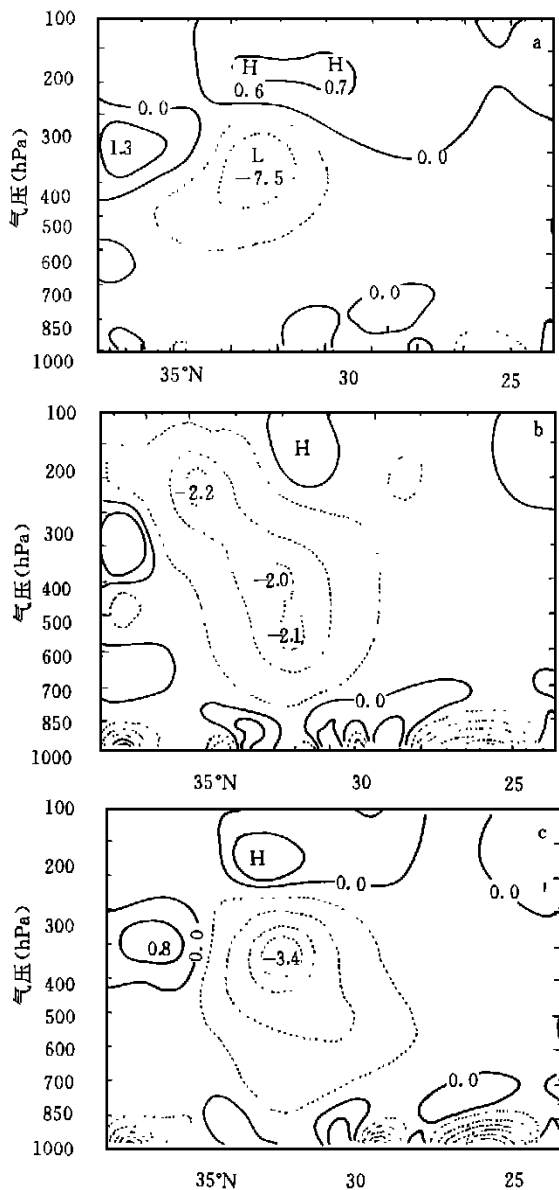


图6 沿114.7 E 的湿位涡  $q_w$  经向剖面

(a. 8日23时, b. 9日14时, c. 9日17时)

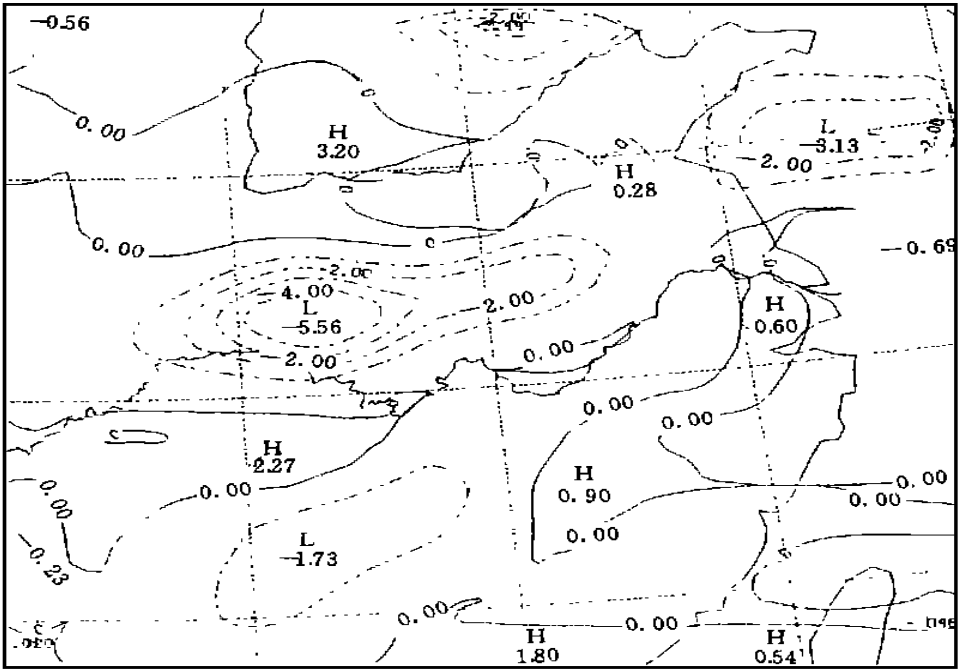


图7 9日08时700 hPa 的湿位涡分布

## 6 结论

以上利用豫、鄂、皖、苏4省境内密集的地面观测资料,以及 PSU/NCAR 中尺度数值模式 MM4 输出产品,对1991年7月8~9日江淮地区梅雨锋上的一条典型的中尺度切变线雨带的中尺度动力结构进行了分析。结果表明中尺度雨带沿中尺度切变线走向,位于中尺度切变线北侧,雨带上空对流层中低层有一条中尺度涡管,其轴线高度呈波状起伏,波峰处有较强经向环流,暴雨中心位于波峰附近的经向垂直环流之下。降水强度与涡管强度密切相关,涡管增强时降水增强。同时,涡管强度与中低空的条件性对称不稳定的发展密切相关。

## 参考文献

- 1 寿绍文, 励申申, 林开平等. 一次江淮暴雨过程中  $\beta$  尺度分析. 应用气象学报, 1994, 5(2): 257~265
- 2 张丙辰. 长江中下游梅雨锋暴雨的研究. 北京, 气象出版社, 1990, 269pp
- 3 丁一汇, 沈新勇. 对称不稳定理论及其应用问题: (二) 非线性理论. 应用气象学报, 1994, 5(4): 470~476
- 4 寿绍文. 中尺度天气动力学. 北京: 气象出版社, 1993, 117~134



# THE DYNAMICAL STRUCTURE OF A MESOSCALE SHEAR-LINE RAIN BELT ON MEIYU-FRONT

Shou Shaowen Li Shenshen Zhang Chengzhong Fan Ke

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

## Abstract

Based on the products of the mesoscale numerical model MM4 and surface observational data, the dynamical structure of a typical mesoscale shear-line rain belt occurring on Meiyu-front in the Changjiang-Huaihe River Basin during July 8-9, 1991 has been analyzed in this paper. The results showed that there was a mesoscale vortex tube along the mesoscale shear-line on the middle-low troposphere, and its altitude varied in a wave-shape. There was stronger longitudinal circulation near the wave peak. The surface mesoscale cyclonic and anti-cyclonic circulations were located at east and west sides of the wave peak respectively. Heavy rain area located under the vertical longitudinal circulation near the wave peak. The precipitation intensity was closely related with the intensity of the vortex tube. The latter was closely related with the conditional symmetric instability in the middle-low troposphere.

**Key words:** Meiyu front, Mesoscale shear-line, Mesoscale vortex tube, Conditional symmetric instability.