

# 一次梅雨锋暴雨的模拟与诊断分析

李红莉<sup>1</sup> 沈桐立<sup>2</sup> 谢有才<sup>3</sup>

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所, 430074; 2. 南京气象学院大气科学系; 3. 91528 部队气象台)

## 提 要

运用双向嵌套的中尺度数值预报模式 MM5, 对 1999 年 6 月下旬长江中下游一次暴雨过程进行了数值模拟。结果表明, 该模式能较好地模拟这次暴雨过程。中  $\beta$  尺度低压涡旋是该暴雨的主要影响系统, 其稳定, 移动缓慢是暴雨发生的根本原因。高层大气辐散, 中低层强辐合, 垂直运动强烈, 低层有充足的水汽供应, 低层对流不稳定能量释放是低涡及暴雨维持和发展的动力机制。

**关键词:** 梅雨锋暴雨 MM5 数值模拟

## 引 言

梅雨是我国长江中下游地区独特的天气现象, 梅雨期间, 多尺度天气系统活动复杂, 中尺度系统地域性很强。对梅雨锋暴雨的研究已有许多工作, 张丙辰<sup>[1]</sup> 曾对长江中下游梅雨期暴雨做过系统的天气学分析研究。王建捷等<sup>[2]</sup> 对 1998 年 6 月的一次梅雨锋暴雨中尺度系统进行了模拟和诊断分析, 认为低层中尺度辐合线上强烈发展的梅雨锋暴雨中尺度对流系统是引发这次暴雨的主要系统。张小玲等<sup>[3]</sup> 的研究表明, 中尺度系统强烈发展引发了 1998 年 7 月梅雨锋突发性暴雨。王建捷等<sup>[4]</sup> 还对 1998 年 6 月暴雨时段的梅雨锋结构及梅雨锋的形成与维持进行了诊断分析, 确认了暴雨发生时期梅雨锋结构的一些普遍特征。王智等<sup>[5]</sup> 对一次西南涡及其伴随低空急流的发展演变进行了数值模拟, 揭示了西南涡和低空急流与 1999 年夏初江淮流域多日持续暴雨的关系。以上这些研究对于梅雨锋暴雨的中尺度对流系统有一定的认识和了解。由于梅雨锋暴雨对东部经济发达地区造成了巨大的经济损失和生命财产损失, 因此对于这类梅雨锋暴雨的研究也越来越重视, 但是基于研究方法的不完善和观测资料时空分辨率的局限性很大, 以往对于暴雨形成机制和各种物理量相互配置的研究仍

然缺乏深入的了解。

目前利用常规观测资料分析暴雨形成机制及其配置缺乏有效的时空分辨率, 我们希望通过数值模拟的方法, 对 1999 年 6 月 28 日 08 时至 29 日 08 时形成暴雨的系统的演变以及物理量进行分析, 以便能更加清楚详细地揭示梅雨锋暴雨形成机制, 有助于加深对此类暴雨的认识和研究。

## 1 模式与资料

本文运用 PSU/NCAR 联合研制的非静力中尺度模式 MM5, 对 1999 年 6 月 28 日 08 时~29 日 08 时的降水过程进行数值模拟。模式的垂直坐标  $\sigma = (p_0 - p_t)/(p_s - p_t)$ ,  $p_s$  和  $p_t$  分别为地面气压和模式层顶气压(10hPa),  $p_0$  为参考态气压, 垂直向为 26 层。选择 30°N、110°E 作为数值试验区域中心, 水平方向采用粗、细网格双向嵌套方案, 网格分辨率分别为 60km 和 20km, 格点数均为 79 × 79。模式物理过程选用简单冰相显式水汽方案、Blackadar 高分辨行星边界层方案、粗细网格分别采用 Anthes-Kuo 和 Grell 积云对流参数化方案。侧边界采用张弛逼近边界条件。资料采用国家气象中心业务模式 T106L19 的 6h 间隔分析场资料, 结合地面、探空观测资料进行客观分析, 得到  $p_0$  面中

尺度区域网格点上的分析场,由此分析场垂直插值到 $\sigma$ 层上,产生初始条件和边界条件。模式初始时刻为28日00UTC,积分时间步长为90s,共积分24小时。该模式的动力框架是非静力平衡的,还由于它加入了较详细的物理过程、辐射参数化方案、先进的初边值处理技术,因此可用来模拟强对流过程造成的区域降水特点。

## 2 模拟结果分析及讨论

### 2.1 模拟降水量与实况比较

由模式模拟的28日08时起每隔6h一

次的降水分布情况可知,整个过程中模式模拟的降水中心值逐渐增大,与实况相比,雨带位置接近,形状相似,但雨量中心值略偏小。图1中,12h实况降水主要出现在长江流域,有3个暴雨中心,最大暴雨中心集中在长江下游,中心值超过90mm。12h模拟降水分布与实况相比,位置接近,形状相似,只是最大降水中心略偏南,中心强度偏小,另两个小降水中心位置偏东,强度偏小。而24h降水分布比较可见,模拟的降水中心位置大致静止,雨量逐渐加大。模式较为成功地模拟出

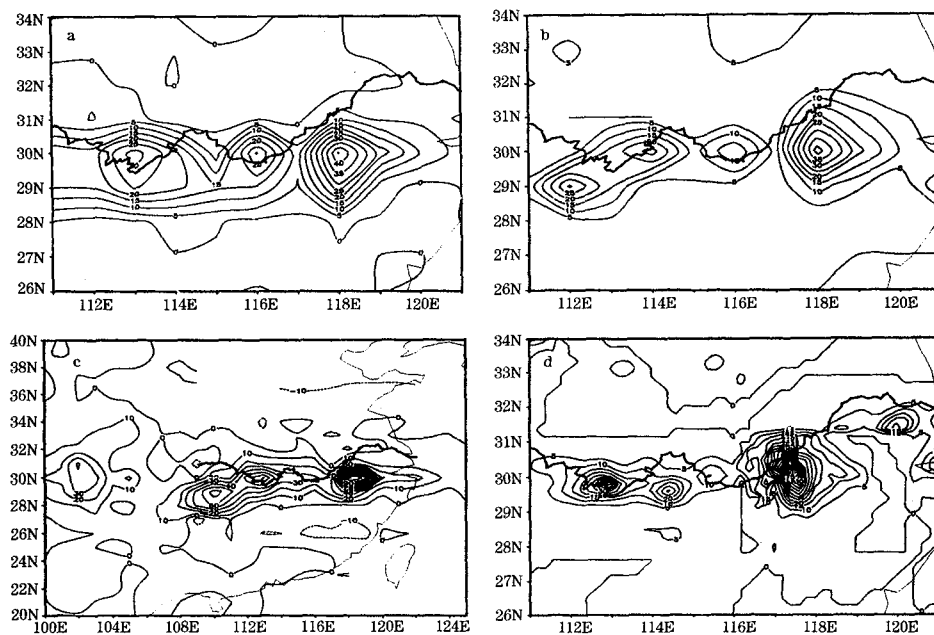


图1 1999年6月28日08时起的降水分布图

(a)12h实况;(b)12h数值模拟;(c)24h实况;(d)24h数值模拟

了这次降水过程。

### 2.2 流场分析

在对流层低层(850hPa)长江中下游梅雨锋上有一个中 $\beta$ 尺度低压的发展、移动过程。28日08时已有一气旋性涡旋在长江中下游生成(图2a),其水平尺度在100km左右,属于中 $\beta$ 尺度的涡旋,与降水的产生密切联系。之后数小时有所发展,并缓慢东移。在28日20时达到最强,形成明显的涡旋环流,涡旋的水平尺度明显增大(图2b),与模拟的降水区域扩大和强度增强相呼应。接下

来涡旋减弱东移,最后于29日02时东移入海(图略)。与实况相比较,低压系统的发展东移落后数小时,但伴随该中 $\beta$ 低压的发展东移过程,暴雨的发生发展及减弱的变化过程与之相对应。这表明,该850hPa中 $\beta$ 尺度低压是此次暴雨的中尺度影响系统。

初始时刻850hPa风场上,低空急流出现在暴雨中心西南区域,大风核位置在28°N、115°E,暴雨区正处于大风核的左前方。700hPa也有了类似的大风区,只是区域较小。这些配置都有利于西南暖湿气流向暴雨

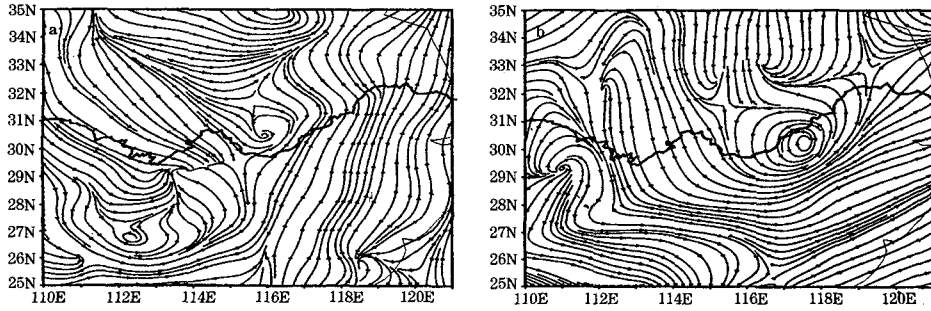


图2 模拟的850hPa流场  
(a) 28日08时; (b) 28日20时

区输送,并且低空急流轴线的左前方有利于上升运动,形成降水。500hPa风场上,暴雨区出现大范围的强西北气流。高层西北风带来强冷空气,低层西南风带来暖湿气流,暴雨区正处于冷暖空气交汇处,容易形成对流降水。20时这种配置仍然存在,只是850hPa风场上的大风更强,继续为对流的维持提供动力。

暴雨发生在边界层,因而边界层风场结构与暴雨形成机制之间必然存在密切的联系。强暴雨发生前,南风较弱(图3a),随后

南风明显加大。暴雨发生时刻,在暴雨点南北两侧有明显的南北风中心偶(图3b),南北风在此交汇,造成南北风辐合。同样,在 $u$ 分量图上,强暴雨发生时,东风加强,在暴雨点东西风交汇,造成该处东西风辐合(图3c)。随着对流系统减弱,长江中下游地区受东风控制(图3d)。可见,边界层内在暴雨点由于较强的东南风出现,造成中尺度的强辐合中心,同时由于东南气流与东北气流在此相汇合,从而引起正涡度明显加强及辐合加强。

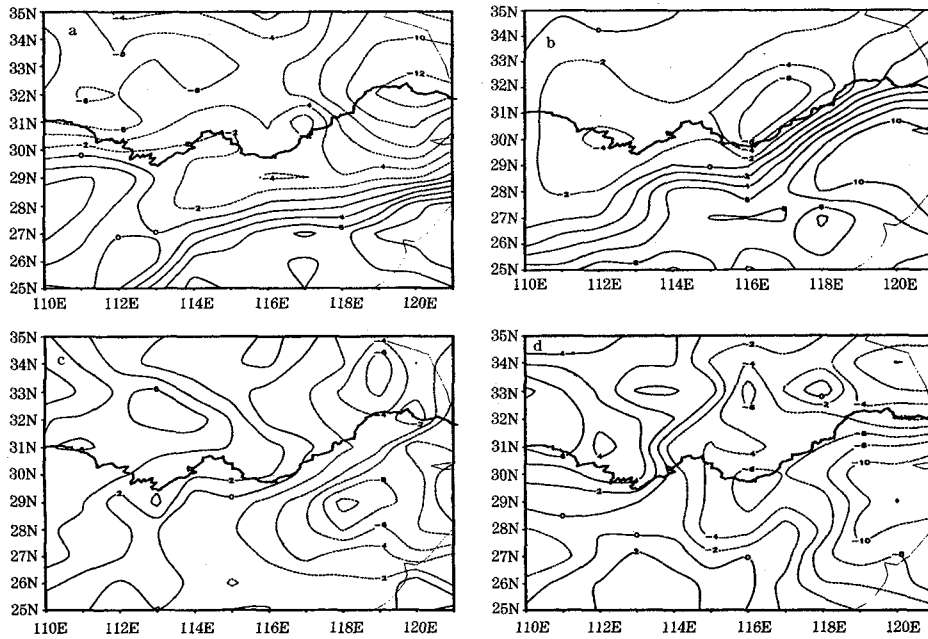


图3 模拟的 $0.97\sigma$ 高度上 $u$ 、 $v$ 分量等值线分布  
(a) 28日08时 $v$ 分量; (b) 28日20时 $v$ 分量; (c) 28日20时 $u$ 分量; (d) 29日02时 $u$ 分量

### 2.3 对流稳定性

由于初始时刻暴雨中心上空低空西南风转为高空西北风,低层为西南暖湿空气,而高层为西北干冷空气,这种上冷下暖的层结分布有利于层结不稳定和强对流的发生。从28日08时相当位温 $\theta_e$ 的经向垂直剖面图可知,低层950hPa到高空500hPa的 $\theta_e$ 随高度的增加而递减,说明暴雨区上空的中低层始终保持着强烈的层结不稳定。28日20时(图4a),在暴雨区以南上空800hPa~700hPa是一个低值区,在该区域以下950hPa~750hPa,相当位温随高度增高而递减,对应一个大气对流不稳定层结;而在暴雨区上空,等相当位温线几乎垂直分布,随高度增加不变,这是由于对流发生时,强上升运动造成大气上下强烈混合的结果。29日02时 $\theta_e$ 剖面图上,暴雨区上空600hPa出现一个高值中

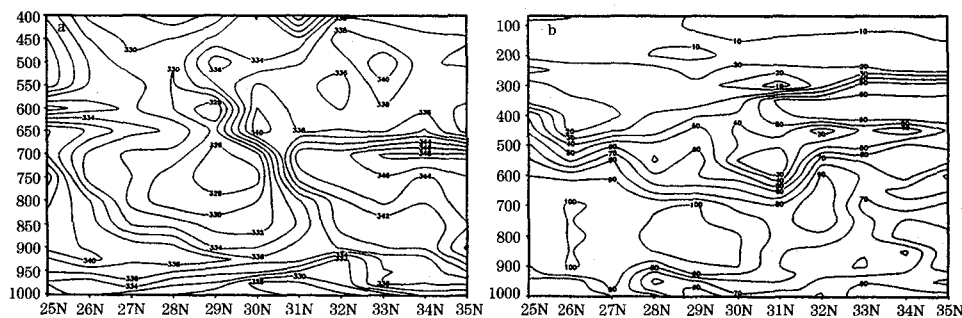


图4 模拟的28日20时沿118°E经向剖面图

(a) 相当位温; (b) 相对湿度

### 2.4 涡度、散度场垂直分布

沿118°E作涡度、散度经向垂直剖面图。28日08时,正负涡度区域相间分布,正涡度层较薄,且正涡度层随着降水的增强而增强,随着降水的减弱而减弱。20时在29~31°N范围,暴雨中心对应从地面伸展到300hPa的正涡度区,在800hPa和400hPa各存在一个主要正涡度中心,中心值超过 $80 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图5a)。在暴雨区上空中低层,温度线是略微上凸的,即暴雨区上空是暖区,这是由于暴雨中对流活动的垂直混合以及凝结潜热释放而造成。暴雨区上空正涡度增加与暖区配合一致,在一定程度上说明两者之间存在一种

心,其以下相当位温随高度增加而升高,说明强对流发生后,该层已经趋于稳定层结。28日20时的相对湿度经向垂直剖面图(图4b)上,低层从900hPa~700hPa相对湿度达到100%,中层600hPa~500hPa之间有一个小值中心,说明暴雨区低层水汽充足,空气潮湿,而中层空气干燥,进一步证实暴雨区的空气上干下湿。垂直速度场上(图略),低层850hPa面上,暴雨区对应负值区域,中心超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,说明低层存在强烈的上升运动;中层500hPa上也对应较强的上升运动;高层250hPa面上,对应正值区域,说明高层有下沉气流与低层的上升气流相配。由此三种物理量的高低配置可以看出,暴雨点低层空气非常潮湿,说明低层有充足的水汽供应,并且为一个对流不稳定区域。

正反馈机制,即中层增暖导致低层气压降低,正涡度增加,上升运动增强,而上升运动增强又进一步促进降水增加,凝结潜热释放,空气层增温。而散度分布显示,28日08时在暴雨区上空中低层有微弱辐合,辐合层比较单薄,600Pa以上出现辐散。随着系统的发展、加强,辐合层逐渐加厚,辐合中心加强。20时400hPa以下为辐合区,辐合最强出现在850hPa,辐合区域随高度也略微北倾,400hPa以上为辐散区(图5b)。由上可知,辐合中心与正涡度中心所处高度基本相同,且随高度均略微北倾,说明涡度场与散度场在垂直结构配置上一致。由上分析可得,梅雨

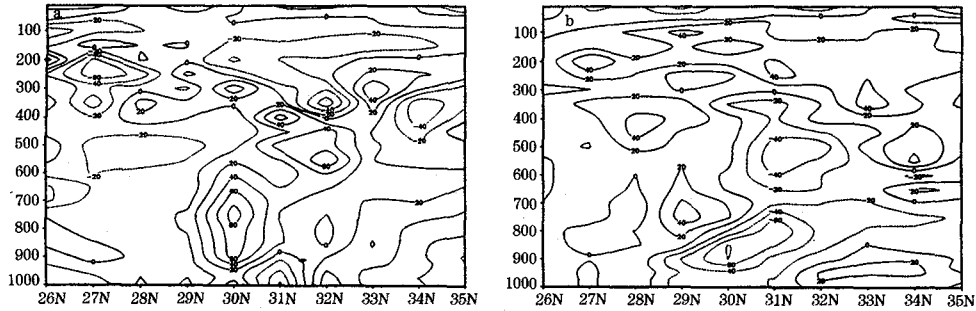


图5 模拟的28日20时沿118°E的经向剖面图

(a) 涡度(单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ ); (b) 散度(单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ )

暴雨所在地,是大尺度环境下有利于对流发展的低层强辐合而高层辐散的动力配置结构。

### 3 各种物理量与低涡的相互配置关系

本次强降水过程发生在对流层中低层为湿不稳定层结的大环境背景中。Charney 和 Eliassen<sup>[7]</sup>指出大尺度的低涡和积云对流之间存在正反馈机制。当低层850hPa气旋性涡旋发展到20时最强时,对应边界层风场东南和东北气流交汇辐合加强,对流层中低层不稳定能量释放,形成强上升气流区,在涡度、散度和湿度场上则对应着正涡度中心、辐合中心和湿度中心,显然强上升运动引起的潜热释放继续导致正涡度加大,辐合加强,流场气旋性弯曲越来越显著,促使低涡稳定,移动缓慢,是大暴雨发生的根本原因。

### 4 结论

本文采用MM5模式较为成功地模拟出一次梅雨锋暴雨,表明一个比较好的预报模式可能有助于揭示引发暴雨的中尺度系统的发展和形成机制。在当前观测资料不足的情况下,利用模式输出结果有助于详细探讨暴雨发生机制。由24h降雨量模拟结果可以看出,对于降水的落区和主要降水区中心降水强度,模式都作出了与实况较为接近的预报。

低空的中 $\beta$ 尺度低压是此次暴雨的主要影响系统。暴雨区低层是一个大气对流不稳定区,并且低层空气十分潮湿,对流不稳定能量一旦释放必然引起强烈的上升运动。

边界层东南气流与东北气流在暴雨点相

汇合,造成正涡度加强和辐合加强。对流系统最强时,中低层以强辐合为主,高层为辐散气流,涡度场上对应着从低层伸展到400hPa的正涡度区,其较强的垂直上升运动与散度场低层强辐和,高层辐散相伴随,这种有利的中尺度动力配置结构,不仅是与暴雨区和暴雨发生时段相对应,还是本次暴雨中尺度低涡发展和持续的动力机制。

对于这次强降水过程模式虽然作出了较为成功的预报,但仔细分析可以发现,强降水中心位置及强度等仍与实况存在明显的差距。这可能是由于模式中对于物理过程的描述较为粗糙,与实际大气中物理过程存在差异所致。这有待于进一步对于模式进行改进。

### 参考文献

- 1 张丙辰. 长江中下游梅雨锋暴雨的研究. 北京:气象出版社,1990:109~139.
- 2 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. 气象学报,2002,60(2):146~151.
- 3 张小玲,陶诗言,张庆云. 1998年7月20~21日武汉地区梅雨锋上突发性中 $\beta$ 系统的发生发展分析. 应用气象学报,2002,13(4):385~397.
- 4 王建捷,陶诗言. 1998梅雨锋的结构特征及形成与维持. 应用气象学报,2002,13(5):526~534.
- 5 王智,高坤,翟国庆. 一次与西南低涡相联系的低空急流的数值研究. 大气科学,2003,27(1):75~85.
- 6 张雁,丁一汇,马强. 持续性梅雨锋暴雨的环流特征分析. 气候与环境研究,2001,6(2):161~167.
- 7 Charney J G, Eliassen A. On the growth of the hurricane depression. J Atmos Sci, 1964, 21: 68~75.

# Simulation and Analysis of a Meiyu Heavy Rain

Li Hongli<sup>1,2</sup> Shen Tongli<sup>2</sup> Xie Youcai<sup>3</sup>

(1. Wuhan Institute of Heavy Rain, 430074; 2. Nanjing Institute of Meteorology,  
3. Meteorological Observatory of 91528 Army)

## Abstract

Using the two-way nested grid mesoscale model (MM5), a heavy rain event over the middle and the lower reaches of the Changjiang River on the last ten days of June in 1999 is simulated. It is shown that the MM5 model can successfully simulate the event. The slowly motion of the meso- $\beta$  vortex is the basic cause for the event. The high-level atmosphere divergence and the low-level atmosphere convergence, the strong vertical motion, the low-level plenty vapor source and the releasing of the convective unstable energy are of the dynamical mechanism of the vortex and of the maintaining and growing of the rain.

**Key Words:** Meiyu front heavy rain numerical simulation