

# 2003 年 6 月 24~25 日江南特大暴雨 数值模拟和诊断分析

张芳华<sup>1</sup> 马旭林<sup>2</sup> 杨克明<sup>1</sup>

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 南京气象学院大气科学系)

## 提 要

采用 NCAR、NCEP 和 FSL/NOAA 等共同研制的新一代细网格 WRF 中尺度数值模式, 对 2003 年 6 月 24~25 日江南地区出现的一次特大暴雨过程进行了数值模拟, 并利用模式输出的高分辨率动力协调资料进行了初步诊断分析。结果表明: WRF 模式比较成功地再现了高低空环流形势的演变及暴雨带的分布特征; 低层切变线上分布不均匀的辐合区, 中低层正涡度区、高层负涡度区的配置有利于造成较强烈的中尺度上升运动; 同时有很强的湿度锋区, 大气处于不稳定状态。分析发现, 沿 850hPa 切变线的局地风暴相对螺旋度与暴雨有很好的对应关系。

**关键词:** 中尺度 WRF 模式 特大暴雨 数值模拟 诊断分析

## 引 言

2003 年 6 月下旬至 7 月下旬初, 江淮地区发生了继 1991 年以来最为严重的一次大范围洪涝灾害, 给社会经济和人民生活带来巨大损失。暴雨强度大, 骤发性强, 先兆特征不明显, 落区离散, 时空分布很不均匀, 加之目前观测资料的时空分辨率较低, 使得对引发暴雨的中小尺度系统的认识仍十分薄弱。近 10 年来, 中尺度数值模式的应用为揭示强降水天气的成因提供了有效的途径, 以往的模拟研究多采用 MM5 模式<sup>[1~3]</sup>, 本文利用 WRF 模式对 2003 年 6 月 24~25 日江南北部出现的一次特大暴雨过程进行数值模拟和诊断分析, 以揭示中尺度天气系统发生发展的物理机制, 检验 WRF 模式的预报能力, 提高暴雨预报的准确率。

### 1 雨情概况和环流形势演变

2003 年 6 月 24~25 日, 湖北南部、湖南北部、江西北部、浙江中南部和福建北部的部分地区出现了暴雨和大暴雨, 局部地区特大暴雨, 其中江西经历了 2003 年入汛以来最强的暴雨过程。24 日 08 时至 25 日 08 时(北

京时, 下同), 赣北有 43 个县市雨量超过 50mm, 其中 23 个县市超过 100mm, 高安和南昌县分别达到 294mm 和 282mm, 24 日 14 时至 25 日 14 时南昌县雨量高达 400mm, 南昌市为 309mm。其降水强度之大、雨势之猛、大暴雨之集中为历史同期所罕见, 并造成了严重的洪涝灾害。

这次特大暴雨过程发生在欧亚中高纬两槽一脊的阻塞经向环流条件下, 两个长波槽分别位于 20~60°E 和 90~135°E, 它们之间的西西伯利亚平原到中西伯利亚为强大的阻塞高压。

6 月 21 日, 从欧洲大槽中分裂一短波槽沿阻高底部经西西伯利亚南部、巴尔喀什湖、我国新疆北部和青藏高原北部逐日东移, 同时有一个强高空冷涡盘踞在我国东北地区到朝鲜半岛上空。冷涡西部的华北高压异常强盛, 为同期少见。

华北高压和副高之间的切变线连接着冷涡槽线和高原涡的暖切变线, 形成一条横贯我国长江流域至朝鲜半岛的 NE—SW 向的切变线。伴随着短波槽沿青藏高原东侧南下

和朝鲜半岛高空冷涡的东移减弱,副高逐步加强北抬,致使副高西北侧西南气流、华北高压西南侧东南气流显著增强,长江中下游冷切变线变成暖切变线。24日08时,长江流域建立了低涡切变形势。在低涡切变线东南侧和南侧的江南北部产生了本次特大暴雨天气过程。

## 2 模式简介

本文采用的WRF(Weather Research and Forecasting)模式是由NCAR、NCEP和FSL/NOAA等联合开发研制的新一代细网格中尺度数值模式。它的网格设计分辨率可达1~10km,模式采用全可压、非静力学方程,分为欧拉高度坐标和欧拉质量坐标两种坐标体系,水平格点采用Arakawa C类格点。

本文模拟试验中选用欧拉质量坐标和Runge-Kutta 3rd时间积分方案,微物理过程运用Ferrier 2-class方案,积云对流参数化方案采用具有浅对流并包含水汽、云和水相态的Kain-Fritsch方案,同时采用了MRF边界

层方案、Dudhia短波辐射和RRTM长波辐射方案等。

模式的初始条件和侧边界条件均采用NCEP每6小时一次的全球再分析资料,积分区域中心为28.5°N、116.0°E,网格点数为251×241,网格距为12km,包括了15~40°N、97~135°E,垂直方向积分层为35个不等距的 $\sigma$ 层,模式顶气压为50hPa。积分时间从2003年6月24日08时到25日20时,模式结果每3小时输出一次。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 500hPa高度场的模拟

图1给出了模式积分24小时后(6月25日08时)输出的500hPa高度场(a)与同时次的NCEP再分析高度场(b)。对比发现,对位于34~40°N、102~105°E和22~30°N、107°E附近的高空槽、位于朝鲜半岛的高空冷涡和控制我国华北、黄淮和江淮地区的高压脊以及5840gpm等高线的模拟与实况非常接近,表明模式有很好的模拟能力。

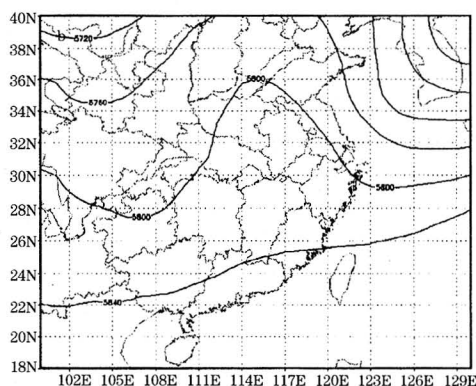
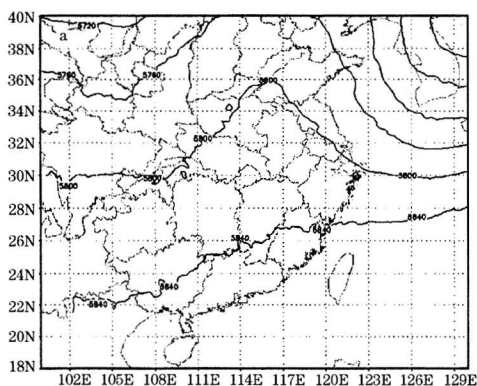


图1 模拟的2003年6月25日08时500hPa高度场与实况场

a. 模式积分24小时输出场 b. NCEP再分析场 等值线间隔:40gpm

### 3.2 低涡切变形势和低空急流的模拟

从6月25日08时850hPa风场和低空急流的模式输出场(图2a)及NCEP再分析场(图2b)中可看出,模式能很好地再现长江流域准E—W向的切变线及切变线上的中尺度低涡(中心位于106°E附近地区),对黄淮西部的小高压也能较清楚地反映出。在实况图上,在105°E以东、29°N以南有NE—

SW向的西南低空急流,大约在24~28°N、108~114°E范围内的急流轴上存在强风速中心,最大风速中心达 $19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。模拟的低空急流区域(阴影区)与实况比较相似,24~28°N、108~114°E的强风速中心区同实况吻合,最大风速值为 $21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,较实况仅差 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明该模式有较强的模拟能力。正是这些在急流轴上不断发展东移的急流核带来丰

沛的水汽,当上游的低涡系统逼近时,可引起较强的天气尺度上升气流,触发不稳定能量

释放,产生小尺度的强上升运动,造成强降雨。

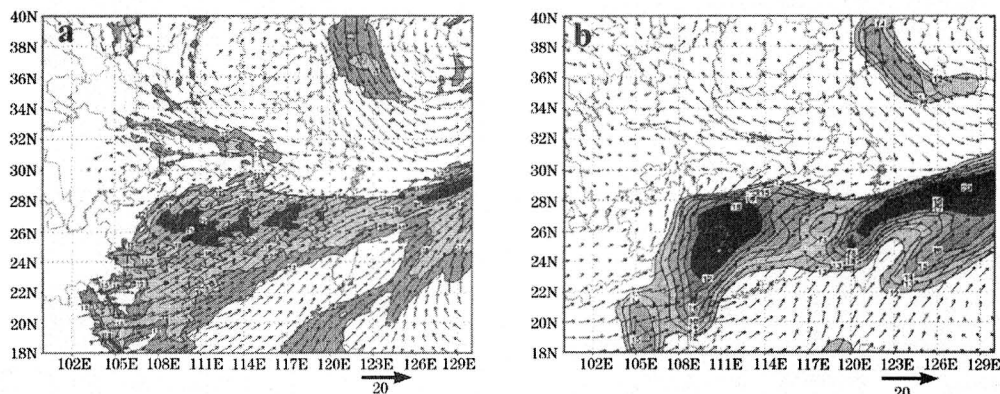


图2 模拟的2003年6月25日08时850hPa风场、低空急流与实况场(阴影区表示低空急流)

a. 模式积分24小时输出场,全风速等值线间隔  $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  b. NCEP再分析场,全风速等值线间隔  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

### 3.3 降水量的模拟

评价一个中尺度天气模式的好坏,主要是看它对降水的模拟和预报能力。6月24日08时至25日08时24小时的降水量实况和模拟结果如图3所示。为了便于比较,把加密实况降水量插值到  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  等经纬度网格点上得到实况降水分布,最大雨量中心的数值有所减小。对比发现,模式对  $110^\circ \sim 122^\circ \text{E}$  范围内雨带的走向和位置模拟得较好,对于  $28.4^\circ \text{N}$ 、 $115.4^\circ \text{E}$  附近的特大暴雨中心(实况值  $294\text{mm}$ ),模拟的中心位置约在  $29.2^\circ \text{N}$ 、 $115.1^\circ \text{E}$ ,比实况偏西北约  $85\text{km}$ ,降水量为  $222\text{mm}$ ,比实况稍偏小;对于  $28.6^\circ$

$\text{N}$ 、 $116^\circ \text{E}$  处的特大暴雨中心(实况值  $282\text{mm}$ ),模拟的中心位于  $28.6^\circ \text{N}$ 、 $116.2^\circ \text{E}$ ,偏东约  $20\text{km}$ ,降水量为  $191\text{mm}$ ,比实况约小  $90\text{mm}$ ;对于  $27.9^\circ \text{N}$ 、 $118.5^\circ \text{E}$  附近的强降水模拟得更好,与实况落区完全吻合,中心最大降水量为  $180\text{mm}$ ,比实况  $226\text{mm}$  略偏小。由此可见,WRF模式对本个例中特大暴雨中心模拟的位置比较准确,雨量略偏小。但是它对整个强降水落区模拟偏大,而且在  $29^\circ \text{N}$ 、 $113^\circ \sim 114^\circ \text{E}$  稍偏北处报了一个中心值达  $240\text{mm}$  的强降水落区,有失客观。不过,总体上来看,该模式对这次大暴雨过程的模拟是成功的。

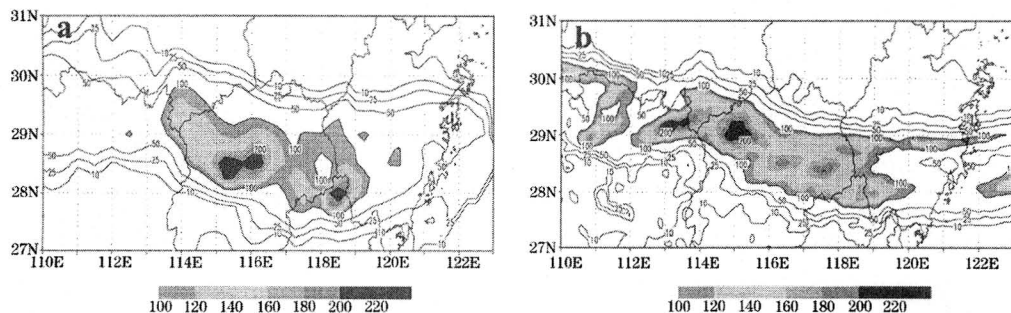


图3 2003年6月24日08时至25日08时24小时降水量的实况(a)和模拟结果(b),单位:mm

## 4 模拟结果的初步诊断分析

### 4.1 涡度场和散度场的分析

从模式输出的逐3小时850hPa散度场

可清楚地看到,6月24日08时到25日14时,沿长江中下游地区的切变线有一条明显的辐合带,其上有几个中尺度辐合中心对应

着实况降水中心,东部辐合中心逐渐南压,与强降水带的变化趋势一致。以24日11时850hPa散度场(图4a)为例加以说明:有3个辐合中心分别位于 $29.7^{\circ}\text{N}$ 、 $114\sim 115^{\circ}\text{E}$ ,  $29.0^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\text{E}$ 附近和 $28.8^{\circ}\text{N}$ 、 $118\sim 120^{\circ}\text{E}$ ,强度都约为 $-20\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ,它们依次对应着位于湖北南部、江西北部 and 浙江中部的强降水中心。25日14时后,原来有组织的辐合带逐渐变得零散,上述地区的强降水暂告结

束。由此可见,切变线降水分布极不均匀,仅在水平辐合强的地方才有强降水发生。

850hPa涡度分布与散度吻合,同降水的对应关系更为明显。在24日11时的850hPa涡度场(图4b)上,上述3个地区有3个中尺度正涡度中心,数值依次达到了 $20\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 、 $30\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 和 $40\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 以上,对应24日08~14时的6小时雨量自西向东也是递增的。

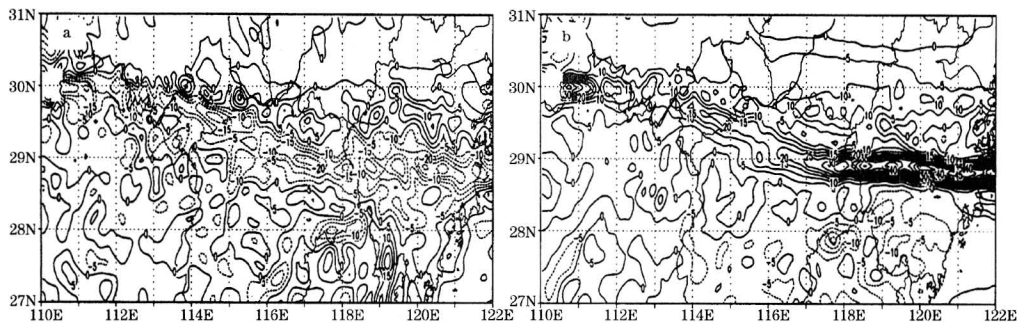


图4 2003年6月24日11时850hPa散度场(a)和涡度场(b),单位均为 $10^{-5}\text{s}^{-1}$

6月24日14时以后,主要暴雨区缓慢南压。我们给出了江西修水、南昌、贵溪、浙江龙泉和福建浦城等5站逐6小时降水量(图略)。由图可知,就平均状况而言,6月24~25日上述地区的强降水可以分为24日14~20时和25日02~14时两个主要发展阶段。

为了更清楚直观地了解暴雨区涡度和散度场特征,我们分析了暴雨集中区( $28\sim 29.5^{\circ}\text{N}$ 、 $113\sim 119^{\circ}\text{E}$ )面积平均散度和涡度的时空变化(图略),发现涡度与降水的对应关系比散度略好。在整个积分时段内,暴雨集中区低层都为正涡度区,高层为负涡度区,有利于低层辐合上升运动增强。24日17时,在集中区内低层有强烈的正涡度发展,中心位于850hPa附近,强度达 $6\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ;高层有负涡度发展,在300hPa以上形成了 $-4\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的中心。在暴雨发展的第二个时段,低层正涡度发展得更加强烈,中心位于边界层内,强度达 $8\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ,而且向上伸展到300hPa。低层正涡度的发展加强预示暴雨将增幅,对暴雨预报有一定的指示意义。

#### 4.2 水汽和不稳定条件的分析

本次过程是一次典型的梅雨锋暴雨过程。从25日08时850hPa上温度露点差的分布图(图略)上可看出,在 $29\sim 31.5^{\circ}\text{N}$ 、 $112\sim 123^{\circ}\text{E}$ 的狭长区域内存在一条梯度很大的湿度锋区,锋面两侧大气的湿度相差很大,其温度露点差数值的差异大于 $20^{\circ}\text{C}$ 。同时,在南昌附近温度露点差只有 $1^{\circ}\text{C}$ ,属于饱和区,已具备产生强降水的水汽条件。

K指数 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的不稳定区一直控制着江南大部分地区(图略),25日02时之前,该不稳定区的东段缓慢南压,沿着梅雨锋呈NW—SE走向;之后整体缓慢向北移动,南北梯度明显加大,梯度最大的区域最后出现在苏皖南部,反映出梅雨锋南北摆动的特征,26~27日梅雨锋上主雨带北抬到淮河流域。

#### 4.3 螺旋度的分析

螺旋度是衡量风暴入流强弱及沿入流方向的涡度水平分量大小的物理量。它数值越大,表示该环境中垂直风切变越大,就会产生水平方向上的涡管。只要沿着这一涡度方向的相对风速达到一定程度,将有利于强对流

天气发生发展。风暴相对螺旋度反映了一定气层厚度(一般是3km)内环境风场旋转的程度和输入到对流体内部环境涡度的大小。局地风暴相对螺旋度又称为螺旋度密度,可以表示为:

$$H_D = \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (1)$$

对于强对流天气,由于涡度垂直分量比风垂直切变要小一个量级以上,所以可以忽略涡度的垂直分量。上式简化为:

$$H_D = -k \cdot \left[ (\mathbf{V}_H - \mathbf{C}) \times \frac{\partial \mathbf{V}_H}{\partial z} dz \right] \quad (2)$$

其中风暴速度  $\mathbf{C}$  是以 850~400hPa 气层中的平均风风向向右偏  $30^\circ$ , 风速大小的 75% 作为该点的风暴速度。

计算中采用的是 Davies-Jones, R. 等<sup>[4]</sup>用探空资料根据解析几何性质得出的计算公式:

$$H_D = \frac{1}{h_{n+1} - h_n} [(u_{n+1} - c_x)(v_n - c_y) - (u_n - c_x)(v_{n+1} - c_y)] \quad (3)$$

我们计算了 1000~700hPa 气层内各层的局地风暴相对螺旋度,并沿着切变线所在纬度(约  $29^\circ\text{N}$ )做时间-经度剖面图,发现 850hPa 螺旋度(图 5)与暴雨的对应关系最好:在  $114^\circ\text{E} \sim 117^\circ\text{E}$  范围内,分别在 24 日 20 时、25 日 02 时前后及 25 日 08 至 14 时出现了 3 个强局地螺旋度的中心,数值在  $30 \times$

$10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \sim 40 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  之间,基本上反映了切变线上暴雨雨团发展的特征,尤其是较好地表现出了 25 日 08~14 时南昌附近地区的局地强降水。

## 5 小结

本文采用 WRF 中尺度数值模式对 2003 年 6 月 24~25 日江南北部一次特大暴雨天气过程进行了数值模拟,并对模式结果进行了天气动力学诊断分析。得到如下结果:

(1)本次特大暴雨天气过程发生在欧亚中高纬为两槽一脊的阻塞经向环流条件下,西风槽和低涡切变线是主要的影响天气系统。

(2)WRF 模式能较好地模拟出高低空环流形势场特征和降水带的分布、走向及暴雨落区,并且提供了进一步诊断分析的高分辨率资料。

(3)中尺度物理量诊断结果表明,低层切变线上分布不均匀的辐合区、中低层正涡度区、高层负涡度区的配置有利于造成较强烈的中尺度上升运动;同时江南北部有很强的湿度锋区,850hPa 温度露点差  $\leq 3^\circ\text{C}$ , 并且 K 指数  $\geq 35^\circ\text{C}$ , 大气处于不稳定状态。因此具备了产生强降水的基本条件。

(4)低涡切变线上局地风暴相对螺旋度大值中心对应强降水中心,对预报有一定的指示意义。

## 参考文献

- 1 程麟生,冯伍虎. "98.7"突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟. 大气科学, 2001, 25(4): 465~478.
- 2 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. 大气科学, 2000, 24(3): 381~392.
- 3 李天富. MM5 对南海一次特大暴雨过程的模拟. 气象, 2003, 29(1): 3~6.
- 4 Davies-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints. 16th Conf. on Severe Local Storms, A. M. S., 1990: 588~592.

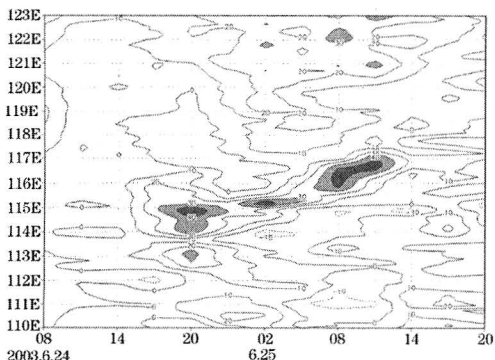


图 5 沿低层切变线( $29^\circ\text{N}$ )局地风暴相对螺旋度的时间-经度剖面图,单位:  $10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

# Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of a Heavy Rainfall in Jiangnan Area during 24—25 June 2003

Zhang Fanghua<sup>1</sup> Ma Xulin<sup>2</sup> Yang Keming<sup>1</sup>

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081;

2. Department of Atmospheric Science, Nanjing Institute of Meteorology)

## Abstract

A heavy rainfall during 24—25 June 2003 in the Jiangnan area is simulated by the fine-meshed WRF mesoscale numerical model developed by NACR, NCEP, FSL/NOAA et al. . Analysis of the output data indicate that WRF model successfully reveals the circulation's evolution and the distribution of rainfall belt. The convergence field non-homogeneously located on the low-level shear line and the vorticity (positive at middle-low level and negative at upper level) contribute to the strong ascending motion. The air is rather unstable near the moisture frontal zone. Results also show the positive centers of local helicity along the shear line match the heavy rainfall centers quite well.

**Key Words:** WRF mesoscale model heavy rainfall numerical simulation diagnostic analysis