

模式输出结果分析了干冷空气侵入对此次暴雨过程的重要影响。本文利用新一代中尺度预报模式 WRF 模式的输出资料, 对此次强暴雨过程进行诊断分析, 以揭示中尺度天气系统发生发展的物理机制, 检验 WRF 模式对这次暴雨中尺度系统的预报能力, 为提高预报的准确率提供信息。

\$ %模式特点

本文采用了 WRF(Weather Research and Forecasting)模式输出结果。该模式是由 NCAR、NCEP 等多个部门共同研发的新一代中尺度预报模式, 它集 MM5、RAMS、ETA 等模式优势为一体, 提供了一个研究和业务数值天气预报的通用框架, 既可用于分辨率在 1~10 km 的系统模拟, 又可用于分辨率较低的业务预报。本文主要是检验该模式对此次暴雨的模拟情况, 并进行诊断分析。模式中所选的积分区域为 103.1~128.9 E, 21~40 N; 区域中心为 116.0 E, 30.5 N, 水平网格点数为 716×528, 网格距为 4 km; 垂直方向为 12 层, 模式顶气压为 50 hPa, 积分时间从 2003 年 7 月 4 日 20 时~7 月 5 日 20 时, 模式每 1 h 输出一次结果。

& 暴雨过程的特征及形成

此次大暴雨过程表现出对流性强、短时间强降水明显的特征。在 7 月 4 日 20 时~6 日 08 时的整个降水过程中, 江苏省有 32 个市县总雨量超过 100 mm, 11 个市县超过 200 mm, 其中强降水主要集中在 7 月 4 日 20 时~7 月 5 日 20 时。7 月 4 日 20 时~5 日 20 时, 江浦 24 h 降水量达 301.4 mm, 超过了历史日降水量的最高值; 南京市达 207.2 mm, 超过了 1931 年的 198.5 mm, 创南京自有气象资料以来日降水量之最; 滁州降水量高达 357.1 mm。

此次暴雨过程发生在典型的双阻型梅雨环流形势下。暴雨发生时, 高纬度乌拉尔山至西西伯利亚地区和俄罗斯远东至鄂霍茨克海地区分别为强大稳定的阻塞高压, 西伯利亚上空为一大低涡控制, 极地冷空气强, 环流的径向梯度很大; 中低纬地区, 带状副热带高压位于日本以南西北太平洋至我国东南沿海地区, 脊线位于 22°N 附近。副高西北侧盛行的西南低空急流将海上大量暖湿空气不断地输送到江淮地区, 与从极涡中分裂南下的干冷空气相遇, 从而为暴雨的产生提供了极其有利的条件。低层 850 hPa 上, 四川盆地 7 月 4 日 08 时有西南涡形成, 在绵阳、南阳地区有一东-西走向切变线。到 7 月

5 日 08 时(图 1), 该低涡已东移到了长江中游武汉地区, 切变线随之南压到安徽、湖北南部; 与此同时, 江淮地区高空(200 hPa)有强烈的辐散运动, 有效支配着低层(850 hPa)的辐合运动(图 2), 从而产生强烈的上升运动, 为暴雨的产生提供有利的动力条件。

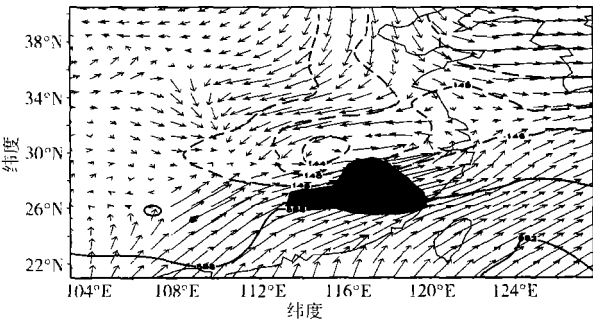


图 1 2003 年 7 月 5 日 08 时 850 hPa 风场 (阴影区表示风速大于 12 m s⁻¹; 虚等值线为 850 hPa 低涡中心, 实等值线为 500 hPa 位势高度, 单位: dagpm)

Fig 1 Wind field at 0800BST, July 5, 2003 on 850 hPa (shaded area wind above 12 m s⁻¹; solid line geopotential height contour on 500 hPa dash line geopotential height contour on 850 hPa units dagpm)

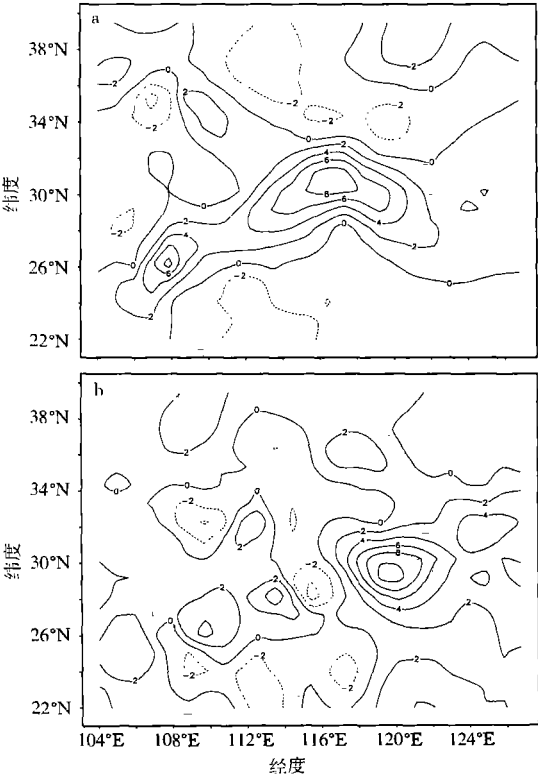


图 2 2003 年 7 月 5 日 08 时 850 hPa 涡度 (a) 和 200 hPa 散度 (b) 实况 (单位: 10⁻⁵ s⁻¹)

Fig 2 Vorticity on 850 hPa (a) and divergence on 200 hPa (b) at 0800BST, July 5, 2003 (units 10⁻⁵ s⁻¹)

有利的大气环流形势以及高低空系统的有效配置使得江淮地区再次出现了特大降水过程。

模拟结果

(# 降水量

比较 4 日 20 时 5 日 20 时的降水量实况 (图 3a) 和模拟图 (图 3b) 可看出, 模式对雨带位置的模拟比较好。模拟图 (图 3b) 中显示雨带整体呈东北-西南走向, 主体位于东北部 (118~121 E, 31~33 N), 随着雨带的向西南延伸降水量也逐渐减小, 强降水区 (雨量大于 100 mm) 主要位于 118~

121 E、32.5 N 附近。对比实况 (图 3a) 可以看出, 模拟雨带基本显现了这次强降水过程的主要特征, 客观地模拟出了这次强降水的主要落区及强度。但对雨带强降水中心的模拟有偏移, 实况超过 50 mm 的暴雨区位于 118~120.5 E、32~32.5 N; 暴雨中心位于 118.3 E、32.3 N, 降水量为 350 mm; 而模拟雨带中出现了两个暴雨中心, 一个在 119.5 E、32.5 N 附近, 比实况略偏东, 强度为 200 mm 比实况偏小; 另一个在 117~118 E、31.1~31.4 N, 降水量最大值为 140 mm。从总体上来看, 该模式对此次强降水过程的模拟还是比较理想的。

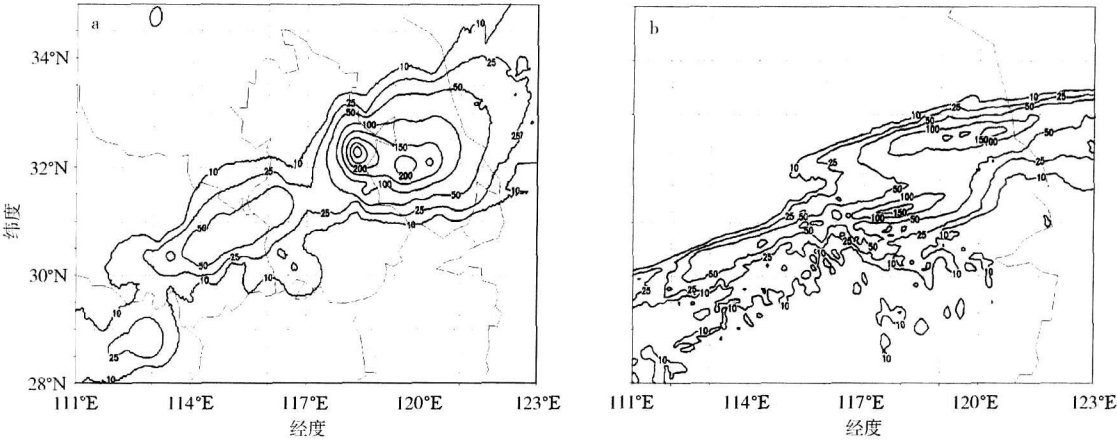


图 3 2003 年 7 月 4 日 20 时 7 月 5 日 20 时的降水量实况 (a) 和模拟值 (b) (单位: mm)

Fig 3 Precipitation fields from 2000BST July 4 to 2000BST July 5 (units: mm)

a observed b simulated

(& 诊断分析与实况的对比

3.2.1 涡度与散度

从模拟高低空涡度、散度的配置来看, 暴雨初始时刻 (7 月 4 日 22 时), 低层 850 hPa 涡度的强度、

范围都较小, 中层 500 hPa 为弱辐散区; 5 日 03 时, 850 hPa 涡度明显增大, 500 hPa 仍为弱辐散区, 但高层 200 hPa 上辐散增强; 5 日 04 时, 850 hPa 上涡度显著增强并达到最大值 (图 4), 中心位于

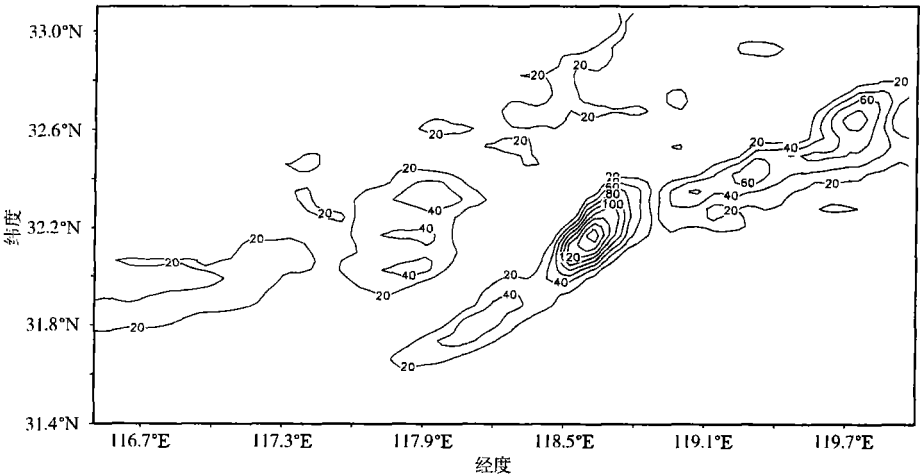


图 4 2003 年 7 月 5 日 04 时 850 hPa 涡度分布 (单位: $10^{-5} s^{-1}$)

Fig 4 Vorticity at 0400BST July 5, 2003 on 850 hPa (units $10^{-5} s^{-1}$)

118.6°E, 32.2°N, 的正涡度区一直向高层延伸到 200 hPa 在暴雨区形成了一个从上到下的正涡管 (图 5), 促使强对流发展。这与实况 (图略, 强降水过程在 5 日 08 时发展到鼎盛时期) 相比提前了约 4 h。

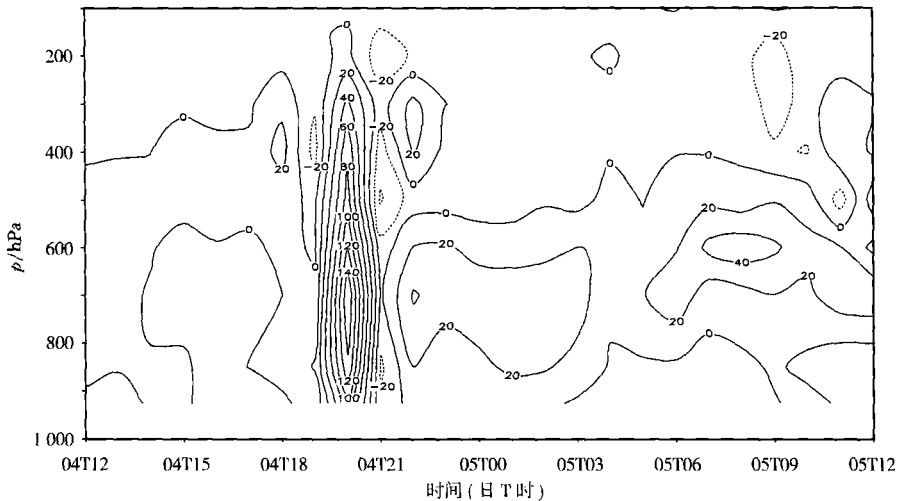


图 5 2003 年 7 月 4-5 日 118.6°E, 32.2°N 涡度的时间-高度剖面 (单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig 5 Time-altitude cross section of vorticity at 118.6°E, 32.2°N (units 10^{-5} s^{-1})

3.2.2 垂直运动

大气中能量的转换主要是通过垂直运动得以实现。垂直运动对水汽、热量、动量、涡度等物理量的输送对天气系统的发展起着极为重要的作用^[8]。500 hPa 是对流发展中间层, 其垂直运动速度大小反映着系统低层运动情况并影响高层的上升运动。模拟结果的诊断分析发现, 在暴雨初始时刻 (7 月 4 日 22 时), 500 hPa 上升运动不明显; 2 h 后, 垂直运动开始发展, 32.5°N 上升运动开始增强, 低涡逐渐发展。5 日 03 时, 垂直运动发展迅速 (图 6a), 500 hPa 上升运动的强度和范围都显著增强, 出现了两个最大值中心, 中心值均为 4.5 cm/s 。04 时运

动发展到了最强时期, 带状走向的垂直运动高值区开始断裂, 中心已分离出来 (图 6b)。这比实况的 5 日 08 时上升运动达到最旺盛的时间仍提前了 4 h (图略) 且中心强度偏小, 位置比实况偏西偏北。强烈的垂直运动使得大气层结不稳定能量释放, 形成了旺盛的对流天气, 暴雨中尺度低涡系统发展到了最强盛的时期。

3.2.3 水汽

在整个强降水过程中, 江淮流域一直存在着东北-西南向的水汽输送带。模拟结果显示, 7 月 4 日 20 时该水汽通带就已非常明显。4 h 后, 850 hPa 水汽通带中出现了显著高值区, 之后一直有源源不

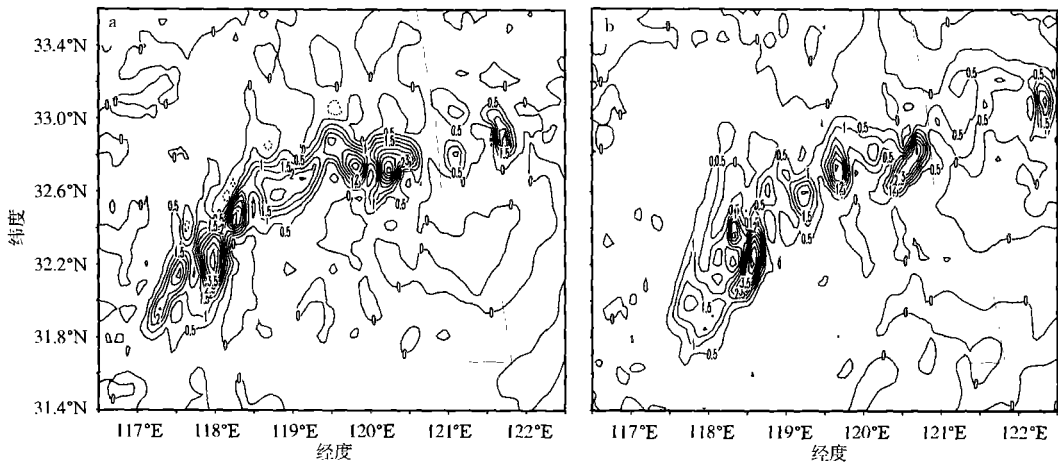
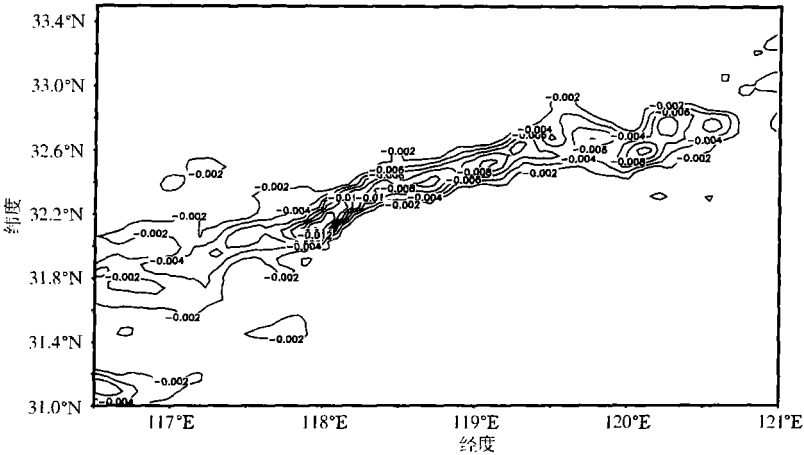


图 6 7 月 5 日 03 时 (a) 和 04 时 (b) 500 hPa 垂直速度 (单位: cm s^{-1})

Fig 6 500 hPa vertical velocity at 0300 (a) and 0400 (b) BST, July 5 (units cm s^{-1})

断的水汽向暴雨区输送,使暴雨区低空形成了高温高湿环境,为对流的不稳定增长创造了条件。但暴雨产生还需要水汽在暴雨区的汇聚辐合,水汽通量散度反映的正是该项。7月 5 日 00 时,850 hPa 上开始出现水汽辐合区,到 03 时(图 7),模拟显示江淮流域上空 850 hPa 上已出现了一条明显的水汽辐合带,与实况相比,该通道更加明显,但位置偏北。从 03 时水气通量散度沿 118 E 的纬度 高度剖面

(图略)中可清楚地看到水汽辐合带在 500 hPa 以下非常显著,且随高度增加水汽辐合带向北倾斜,一直向上延伸到高空 450 hPa 上,在暴雨区形成了从低到高统一深厚的高湿环境,为对流的不稳定增长以及暴雨的产生提供了必要的条件,该结果与文献 [1] 中给出的 7 月 5 日 08 时观测的 850 hPa 水汽通量散度图非常相似。



不同时刻的垂直径向剖面图可看出, 在暴雨过程中, 低层对流不稳定、锋区直立、锋区附近等值线密集度都随着时间的变化而变化。

） 小 结

(1) 将 7 月 4 日 22 时—5 日 06 时的各物理量中心极值列在表 1。由表 1 看出, WRF 模式基本模拟出了此次暴雨发生、发展和衰减过程。引起暴雨的中尺度低涡系统在 7 月 4 日 22 时开始发展, 但各物理量特征不明显, 5 h 后(5 日 03 时)低涡系统达强盛期, 之后系统逐渐减弱。03 时, 除 850 hPa 涡

度还在继续增大外, 其他要素都已达到最大值。所以, 尽管低层辐合运动还在发展增强, 但高空辐散已达到最强并开始减弱, 对流发展逐渐减缓, 系统开始衰减。

(2) 对比实况发现, WRF 模式对该次强降水雨带位置和走向有较好的模拟, 模拟出了这次强降水的主要落区及强度, 但对雨带强降水中心的模拟有些偏移。其次, 实况观测的此次暴雨系统在 7 月 5 日 08 时达到最强盛, 而模拟中尺度系统在 5 日 04 时左右就发展到最强, 比实况提前约 4 h。另外, 模式对各物理量场的模拟位置比实况偏北, 强度偏弱。

表 # 中尺度低涡系统发展过程各物理量中心极值

Table 1 Central maximum values of various physical quantities in the development process of the mesoscale vortex system

时间	850 hPa 涡度 / (10^{-5} s^{-1})	200 hPa 散度 / (10^{-5} s^{-1})	500 hPa 垂直速度 / (cm/s)	850 hPa 水汽通量 / ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{hPa})$)	850 hPa 水汽通量散度 / ($10^{-3} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$)
7 月 4 日 22 时	20	15	0.2	0.016	-0.5
7 月 5 日 00 时	30	70	3.0	0.016	-6
7 月 5 日 03 时	100	160	4.5	0.016	-12
7 月 5 日 04 时	160	100	3.5	0.016	-10
7 月 5 日 06 时	80	60	2.0	0.016	-7

参考文献:

[1] 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

[2] 励申申, 寿绍文, 潘宁. 1991 年梅雨锋暴雨与锋生环流的诊断分析 [J]. 南京气象学院学报, 1996, 19(3): 364-369

[3] 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, 2003, 60(2): 146-155

[4] 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): 382-391

[5] 张艳玲, 廖胜石, 寿绍文. 2003 年 7 月 4—6 日江淮特大暴雨的诊断分析 [C]. 气象科技创新与大气科学发展 (7). 北京: 气象出版社, 2003: 197-200

[6] 周斌, 王建捷. 0374 大暴雨的初步诊断分析 [C]. 气象科技创新与大气科学发展 (7). 北京: 气象出版社, 2003: 185-188

[7] 阎凤霞, 张艳玲, 寿绍文. 一次特大暴雨过程中干侵入的数值模拟和诊断分析 [C]. 气象科技创新与大气科学发展 (7). 北京: 气象出版社, 2003: 239-242

[8] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1992: 872

[9] 赵世发, 周军元, 王俊, 等. 一次罕见的特大暴雨物理量场的特征分析 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 271-276