用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比分析*

孙 健 赵 平

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

使用 NCAR 和 NOAA 的新一代中尺度模式 WRF(Weather Research and Forecast) 和 UCAR/PSU 的 MM5(v3) 模式, 对 1998 年发生在中国的三次强降水过程, 即 5 月的 1 次华南暴雨过程, 7 月初的 1 次淮河流域暴雨过程和 7 月下旬的 1 次长江流域暴雨过程进行了数值模拟。模拟结果表明, WRF 模式能够成功模拟这几次不同性质的降水过程; 与 MM5 对比, WRF 更好地模拟了引起这几次降水过程中的主要天气系统的位置和移动过程, 从而使 WRF 模拟的降水落区好于 MM5。但在这几次过程中 WRF 模拟的降水都较 MM5 为小, 也小于实况值, 分析可见, WRF 模拟的垂直速度明显小于 MM5 的模拟结果, 这可能是导致模拟的降水偏小的原因之一。

关键词: WRF, MM5, 暴雨, 模式对比。

1 引 言

为了提高中小尺度灾害性天气预报的准确率, 中尺度数值模拟的研究在最近 30 a 内得到了迅速的发展和重视[1,2], 其中比较引人注目的研究机构及其模式分别是 PSU/NCAR 的 MM4/MM5, CSU 的RAMS 以及日本的 JMA, 其中以 MM4/MM5 的应用最为广泛, 如中国国家气象中心使用的区域天气预报业务模式就是 MM5。

在 MM4/MM5 模式之后, 美国 NCAR, NOAA, FSL(the Forecast Systems Laboratory) 以及 Oklahoma 大学的 CAPS(the Center for Analysis and Prediction of Storms) 联合了多个科研机构开发了新一代中尺度数值模式 WRF, 并希望以此模式来代替和更新现行的如 NCAR 的 MM4/MM5, NCEP 的 ETA 和 NOAA/FSL 的 RUC 数值模拟和预报系统。现在许多机构如 NCAR, AFWA, FSL 和 Illinois 大学等都开展了 WRF 的实际业务和科研应用。2002 年 7 月, 中国中尺度数值模式研究领域的 40 多名气象学家和来自美国、日本等国的 10 多名专家在北京联合召开了第一届中美中尺度数值模式发展国际学术研讨会, 探讨了中、美、日各国在中尺度数值模式研究发展方面的最新进展, 以及中尺度模式 WRF 在热带气旋、空气质量与大气化学、区域气候模拟等方面的应用。

文中首先简要对比了 WRF 和 MM5 模式的不同特点, 然后使用 WRF 和 MM5 模式分别对 1998 年的 1 次华南暴雨、1 次长江流域暴雨和 1 次淮河流域暴雨过程进行了数值模拟和对比分析, 并在 WRF 和 MM5 中选择相同的物理过程方案, 以得到 WRF 对中国不同地区暴雨模拟和预报中的应用能力。目前 WRF 模式尚未在国内的科研和气象预报业务中得到大量应用, 此文的目的就是为进一步推广 WRF 模式在中国的使用。

2 模式和资料简介

2.1 WRF 简介

WRF 模式是由 NCAR, NOAA 联合一些大学和研究机构开发的, 它的研制是为了给理想化的动力学研究、全物理过程的天气预报、空气质量预报以及区域气候模拟提供一个公用的模式框架。WRF 的目标是分辨率为 10 km 左右的大气科学研究, 它最终将

* 初稿时间: 2003 年 3 月 10 日; 修改稿时间: 2003 年 6 月 3 日。
资助课题: 国家"十五"重点科技攻关计划"中国气象数值预报模式技术创新研究"(2001BA607B)。

代替那些复杂而又使用了许多年的区域模式。

WRF 的设计思路是要建立一个模块化、可移植、容易维护和扩展的、并且能够在不同类型的计算机上运行的软件结构, 同时还必须有足够的计算经济性。为此, WRF 使用了“层次软件结构(Hierarchical software architecture, 图 1)”。在这种层次结构中, 主要包括模式层(Model layer, 模式的动力框架、物理过程等真正属于模式计算的部分)、驱动层(Driver layer, 负责初始化、时间积分、并行计算等)以及中间层(或调解层, Mediation layer, 提供 Model layer 和 Driver layer 之间的接口), 使得模式本身与模式的计算机处理过程无关, 为物理模式的利用和扩展提供了方便。同时, WRF 使用了 Fortran90 的许多特性, 如模块化的程序设计使得增加物理过程的工作变得十分容易, 又如动态内存分配使得程序的运行效率得到提高等。在模式的输入输出部分 WRF 成功地利用了所谓的 netCDF 文件系统, 在数据存储与不同类型的计算机无关的同时, 提高了数据文件的读取速度, 减小了数据文件占据的磁盘空间。另外, WRF 将数据文件的输入输出部分设计成为模式的“外部程序包(External Packages)”, 使得更改数据文件的输入输出部分更加容易。

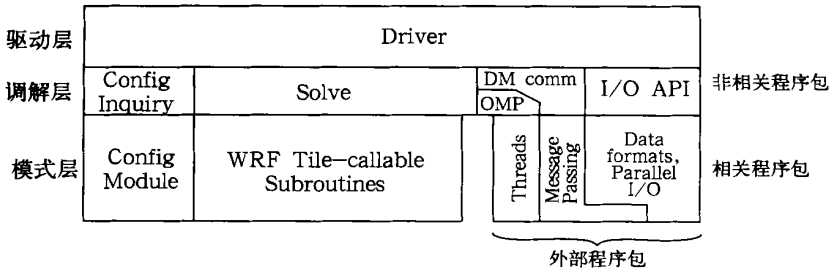


图 1　WRF 模式的层次软件结构

WRF 水平方向采用 Arakawa-C 坐标, 垂直方向 WRF 提供了两种选择, 一种为高度坐标(Eulerian height coordinate), 即地面为 0 m, 逐步上升到大气顶, 另外一种为质量坐标(Eulerian mass coordinate), 是在 σ 坐标的基础上建立的, 即地面为 1, 模式顶为 0。在时间积分方案上, WRF 推荐使用 Runge-Kutta 的 3 阶方案, 但也提供了 Runge-Kutta 的 2 阶方案作为选择。总体来说, WRF 建立的起点比较高, 具有许多新的而且方便使用的特点, 但到目前为止, 应该说 WRF 还不是一个十分成熟的中尺度模式, 如还没有完成不同网格的嵌套, 还没有足够多的物理过程方案可供选择, 当然最重要的是 WRF 还没有经过大量的数值模拟和实际业务预报来检验其性能。WRF 这些不成熟也需要我们从它建立伊始就学习和使用, 从而能够在中尺度模式方面做出新的贡献。

2.2　MM5 简介

本文使用的 MM5(v3) 是非静力模式, 垂直方向采用 σ 坐标, 水平为 Arakawa-B 坐标。MM5(v3) 具有以下特点: (1) 水平分辨显著提高; (2) 单向或双向多重网格嵌套能力的提高; (3) 随着模拟尺度的减小, 静力假定不再满足, 因而除原有的静力框架外, 又增加了非静力框架; (4) 对于对中尺度大气系统的发生和发展至关重要的有关水汽相变、长波短波辐射、行星边界层和陆面过程等物理过程的考虑, 趋于复杂逼真, 可供选择的参数化方案增多; (5) 四维资料同化功能的增加。这些特点使得 MM5 成为利用率较高的中尺度模式, 在科学研究和实际天气预报中都得到了大量的应用。

2.3　资料简介

1998 年 5 月华南暴雨的模拟中使用的是中国广州区域气象中心 TLAPS (Tropical Limited Area Assimilation and Prediction System) 模式输出的同化资料, 其范围为 10°S ~ 40°N, 70 ~ 140°E, 水平分辨率为 1° × 1°, 资料时间为 1998 年 5 ~ 8 月, 时间间隔为 6 h, 垂直方向共 11 层。由于处于“南海季风试验(SCSMEX)”和“华南暴雨试验(HUAMEX)”期间, TLAPS 使用了许多加密的地面和高空观测资料, 其中包括在南海海域上收集的观测资料, 这是本文选择 TLAPS 资料进行华南暴雨研究的原因。

但对于 1998 年长江流域和淮河流域暴雨而言, TLAPS 资料不能满足要求, 因为暴雨发生于 30°N 以北, 影响其降水的天气系统如高空西风急流等经常在 40°N 以北, 超过了 TLAPS 资料的范围, 因此

在进行长江流域暴雨和淮河流域暴雨的数值模拟时,选择了国家气象中心的T106全球格点再分析资料。其水平分辨率为1.125°×1.125°,时间间隔为6 h,垂直方向共17层。

3 1998年5月23~24日华南暴雨

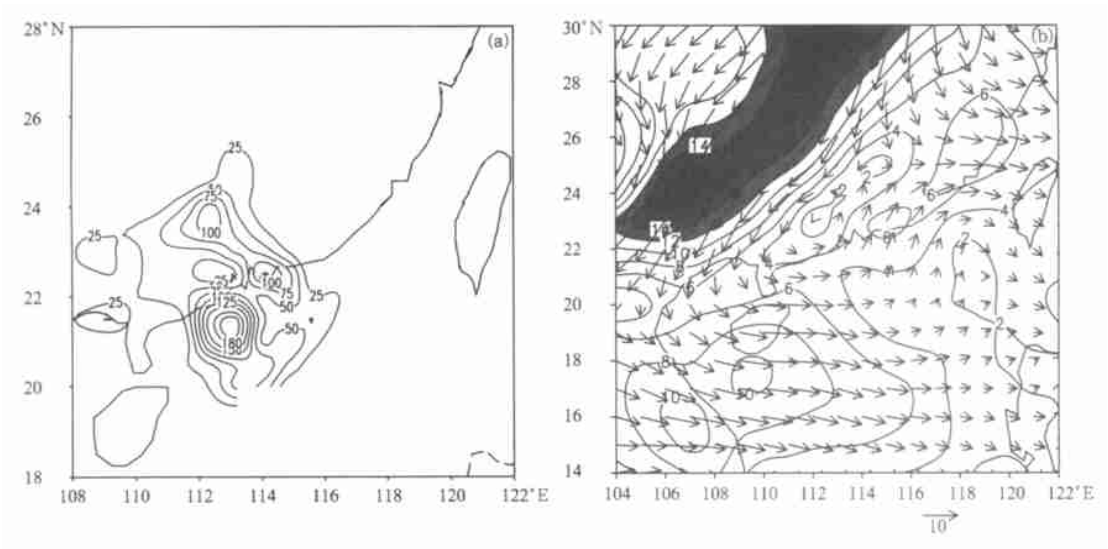
3.1 天气过程

1998年5月23日12时到24日12时,中国广东沿海地区出现了1次强降水过程(图2a),南面的强降水中心位于(22°N,113°E),最大降水量约180 mm,北面的降水中心位于(23°N,112°E),最大降水量约100 mm。从天气实况图上可以看到,1998年5月24日00时,850 hPa高度上从长江中游地区到广西地区为一支很强的南下冷空气,最大风速为14 m/s(图2b),在广东沿海为低压中心(图2c)。研究表明,这次降水过程与1次冷空气的南下密切相关,同时受在沿海地区形成的中尺度对流系统影响[4]。

值得指出的是,由于中尺度模式对其初始场和边界条件的依赖性,模式的前处理过程将影响到模式的模拟结果,因此本文进行资料的前处理时,对WRF和MM5而言都使用了相同的方法。经过对比,WRF和MM5的初始场和边界条件完全一样,将不会对模拟结果产生影响。另外,经过对模拟时选择的WRF和MM5的物理过程对比,可以发现相同的物理过程,几乎程序的编写也完全相同,因此也可以排除由于程序编制而导致的结果差别。

3.2 WRF和MM5模拟结果分析

为了对比分析WRF和MM5对华南地区暴雨的模拟能力,选择模式的模拟方案如下:使用TLAPS同化资料作为模式的背景场,加入两大试验的加密观测资料进行订正,经过插值后得到模式的初始场和边界条件。在相同的初始场和边界条件的情况下,使用WRF和MM5分别对1998年5月23~24日的暴雨进行模拟,积分时间由1998年5月



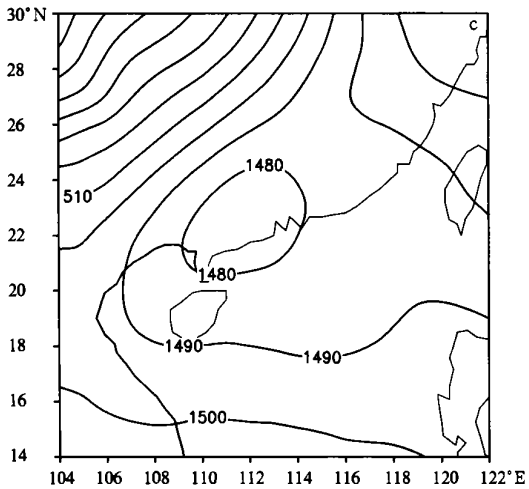


图2 1998年5月23日12时到24日12时的降雨实况(mm)(a),24日00时850 hPa上流场和风速(m/s)等值线(b),24日00时850 hPa上位势高度(m)(c)

23 日 12 时起, 至 24 日 12 时结束。并在 WRF 和 MM5 中选择了同样的物理过程, 即Betts-Mille 对流参数化方案, MRF 边界层参数化方案等, 水平分辨率为 30 km, 模式中心为实况降水中心, 总的格点数为60× 50(南北× 东西)。模拟结果从以下几点分别进行对比分析。

3.2.1　模拟降水

由图 3 可见, MM5 和WRF 模拟的 24 h 降水量都出现了华南沿海的中心, 但在降水分布和降水量上存在明显差别。MM5 的模拟结果, 广东省内降水比较大的区域成为相连的一片, 中心位于(22°N, 111.5°E) , 中心降水量超过 200 mm, 而 WRF 则不同, 出现了分别位于(23°N, 111°E) 和(22°N, 113°E) 的两个分开的降水中心, 北面的中心降水量为 50 mm, 南面的为 100 mm。

与实况观测的降水量进行对比, 可见WRF模拟的结果在降水落区上明显好于 MM5 的结果。但 WRF 模拟的中心降水量偏小, 两个中心分别比实况小了 50 mm 左右, 而 MM5 模拟的中心降水量则与实况接近。

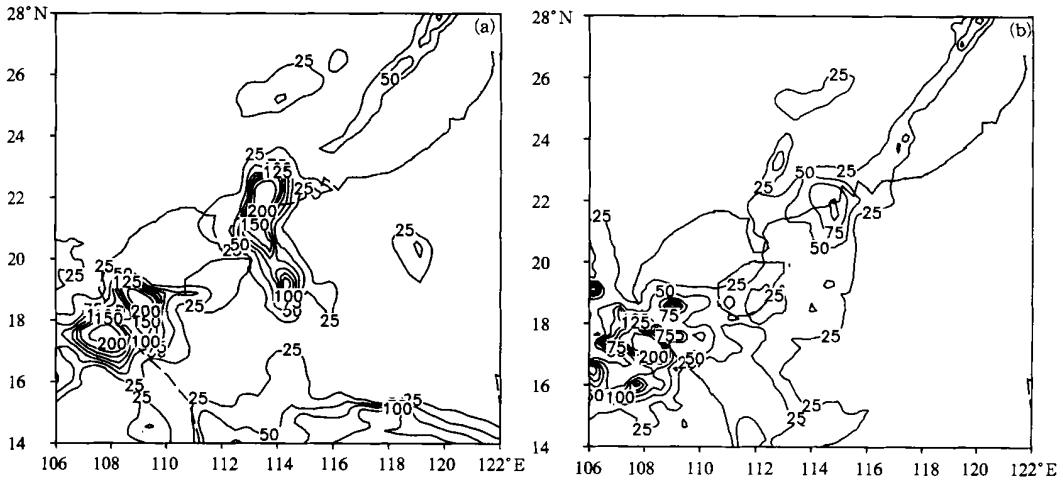


图 3　MM5(a) 和 WRF(b) 模拟的 1998 年 5 月 23 日 12 时~ 24 日 12 时降水量(mm)

3.2.2　模拟天气系统和中尺度结构

由于这次华南地区的降水是 1 次冷空气南下造成的, 因此能否正确模拟出冷空气的演变过程应该是能否正确模拟降水的关键。对比 MM5 和 WRF 模拟的 5 月 24 日 00 时的 850 hPa 风场(图 4) , 可以发现, WRF 模拟结果明显较 MM5 好, 冷空气风速

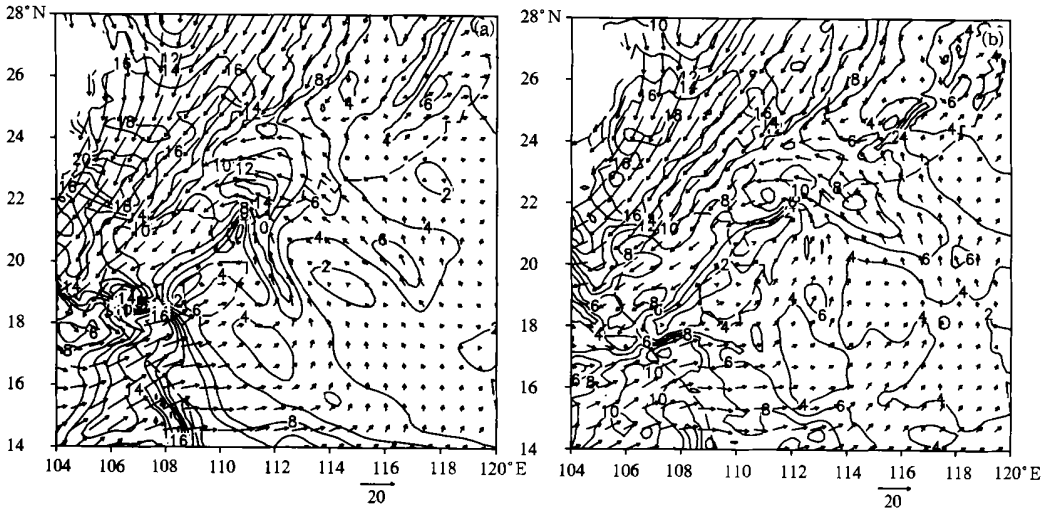


图 4　MM5(a) 和 WRF(b) 模拟的 5 月 24 日 00 时 850 hPa 上流场和风速(m/s) 等值线

的大小与超过 12 m/s 的范围基本与实况重合。而 MM5 的冷空气风速中心过于偏西南, 且强度太强, 为 20 m/s。

从图 5a, b 中可见, 在降水中心的结构上, WRF 与 MM5 模拟结果类似, 与吴庆丽等[4] 的结论相同, 这次降水是 1 次冷锋上的强对流降水过程, 降水中心位于锋面上, 大气低层冷暖空气的交汇出现强烈的上升, 导致出现短而强度大的降水过程。

但值得注意的是, 相比 MM5 的模拟结果, WRF 模拟的上升速度显著小于 MM5 的结果(图 5c, d) , 因为没有实际观测的垂直速度, 因此无法就具体的量值来进行两个模式的比较。但一般认为, 在形成暴雨的中尺度系统中, 最大的垂直速度应该能够达到 10^0 m/s 的量级, 而且就形成最终的降水量上来说, 由于 MM5 的降水较 WRF 更加接近实况, 因此可以认为 WRF 模拟的垂直上升速度偏小, 这可能是导致 WRF 模拟的降水偏小的原因之一。

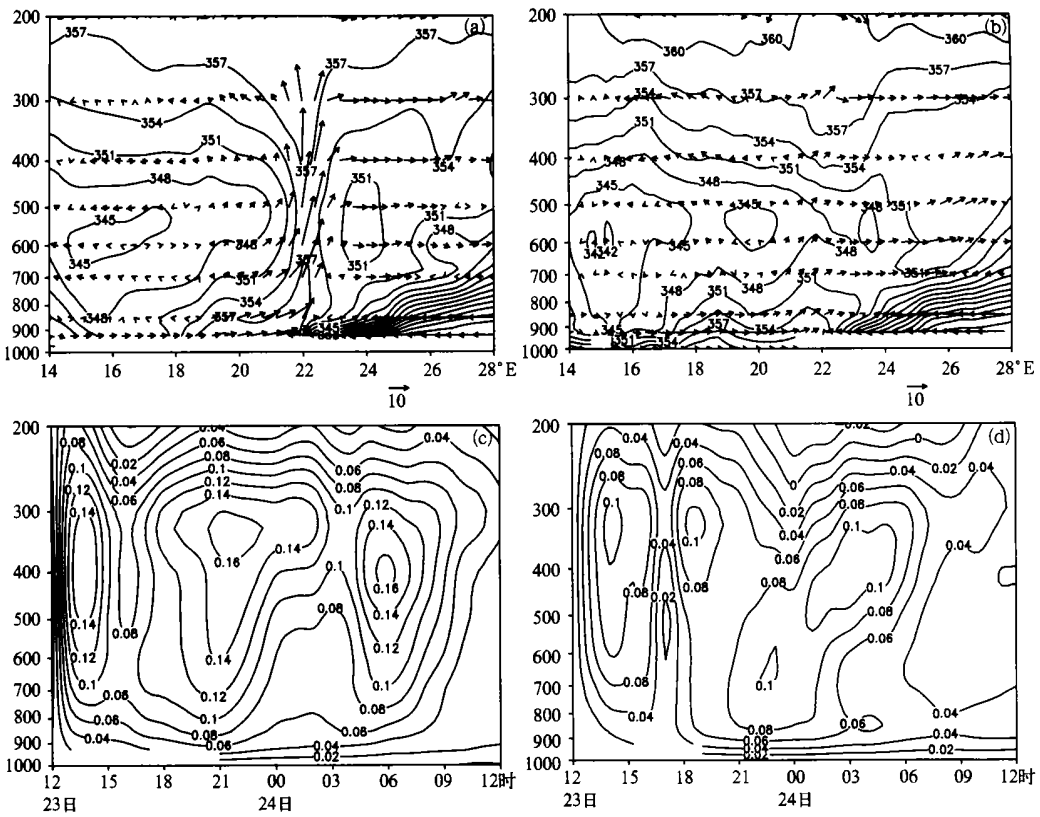


图 5 MM5(a) 和 WRF(b) 模拟的 5 月 23 日 22 时经过降水最大中心的南北剖面
(等值线为相当位温, K) , MM5(c) 和 WRF(d) 模拟的降水中心上空的垂直速度(m/s) 随时间变化

4 1998 年 7 月 20~ 21 日长江流域暴雨

4.1 天气过程

1998 年 7 月下旬“二度梅”期间, 湖北省武汉和黄石地区及长江中下游的其他地区先后出现了突发性的暴雨, 在 1998 年 7 月 20 日 12 时~ 7 月 21 日 12 时的 24 h 降水量图上(图 6a) , 大体出现了 2 个降水中心, 其中武汉与黄石为一片, 以武汉为中心, 其降水量超过 150 mm, 另外贵州省思南和湖南省桑植为一片, 以思南为中心, 其降水量也超过了 150 mm。可以看到, 这2 个降水中心都呈现降水地区集中的特点, 强降水范围非常小。

分析认为这次长江中下游的暴雨是 1 次梅雨锋降水过程, 与西南低涡的出现和维持密切相关, 同时受高、低空急流的共同影响(图略) 。其中位于(30°N, 107°E) 附近的西南低涡稳定少动, 24 h 仅向东移动了不到一个经度(图略) , 同时出现典型的西南低空急流, 武汉和黄石地区位于急流的西北侧, 而对流层高层出现西风急流, 长江中下游处于高空急流的西南侧, 这种低涡、高低空急流的配置极易引发强对流天气的产生[5] 。同时一个低压系统自西南向东北发展, 由贵州经湖南北部与西南低涡汇合, 导致贵

州思南和湖南桑植的降水。对这次天气进行了大量的诊断分析和数值模拟研究, 认为梅雨锋上不断出现的中尺度乃至更小尺度的对流天气系统是突发和短时暴雨产生的原因[6~8]。

4.2　WRF 和 MM5 模拟结果分析

使用 T106 资料作为模式的背景场, 积分从 1998 年 7 月 20 日 12 时起, 至 21 日 12 时结束。在 WRF 和 MM5 中选择了同样的物理过程, 即 Betts-Millor 对流参数化方案, MRF 边界层参数化方案等, 水平分辨率为 30 km, 模式中心为实况武汉降水中心, 采用了 30 km 的水平格距, 总的格点数为 100 × 100(南北 × 东西)。

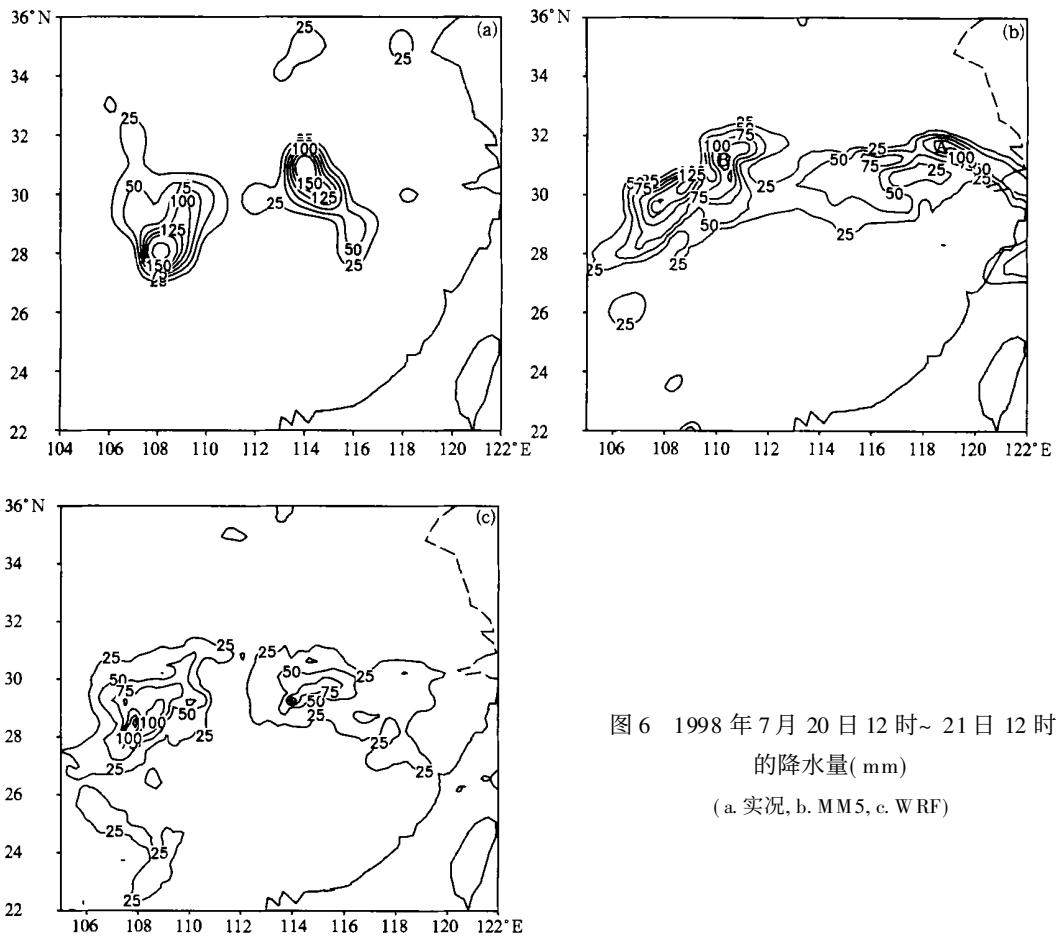


图 6　1998 年 7 月 20 日 12 时~ 21 日 12 时的降水量(mm)

(a. 实况, b. MM5, c. WRF)

4.2.1　24 h 降水对比

图6b, c 是 MM5 和 WRF 分别模拟的 24 h 降水量。两个模式都能够模拟出这次降水的大致分布, 但又存在明显的差别。从大范围来说, MM5 模拟的降水区明显偏大, 并出现了 3 个强降水中心, 且位置与实况相距甚远, 如图 6b 中的 A(100 mm, 距离实况中心偏西约 5 个经度)、B(100 mm, 距离实况中心偏北 2 个纬度)、C(125 mm, 距离实况中心偏北 2 个纬度) 等, 均无法与图中的降水区对应。而 WRF 则有较大的改善, 与实际降水落区对应较好, 出现了 2 个降水中心, 一个位于 29~ 30°N, 114~ 115°E, 中心值超过 100 mm, 与实况中武汉、黄石降水对应, 一个位于 28°N, 108°E, 中心值也超过 100 mm, 与实况中贵州思南降水对应。但值得注意的是, 在这两个模式的结果中, 中心降水量都明显偏小, 原因可能是模式水平分辨率不够或者背景场资料分辨率不够从而无法模拟小尺度的强降水系统。

4.2.2　模拟的天气系统对比

对比 WRF 与 MM5 对西南低涡移动过程的模拟结果(图 7), 可以清楚地看到 WRF 模拟降水优于 MM5 的原因。在初始场信息完全相同的情况下, MM5 模拟的西南低涡(图中 D 所指位置) 明显出现了向东的移动, 其中心由 20 日 12 时的(30°N, 107°E) 到 21 日 00 时的(30°N, 109°E) 再到 21 日 12 时的

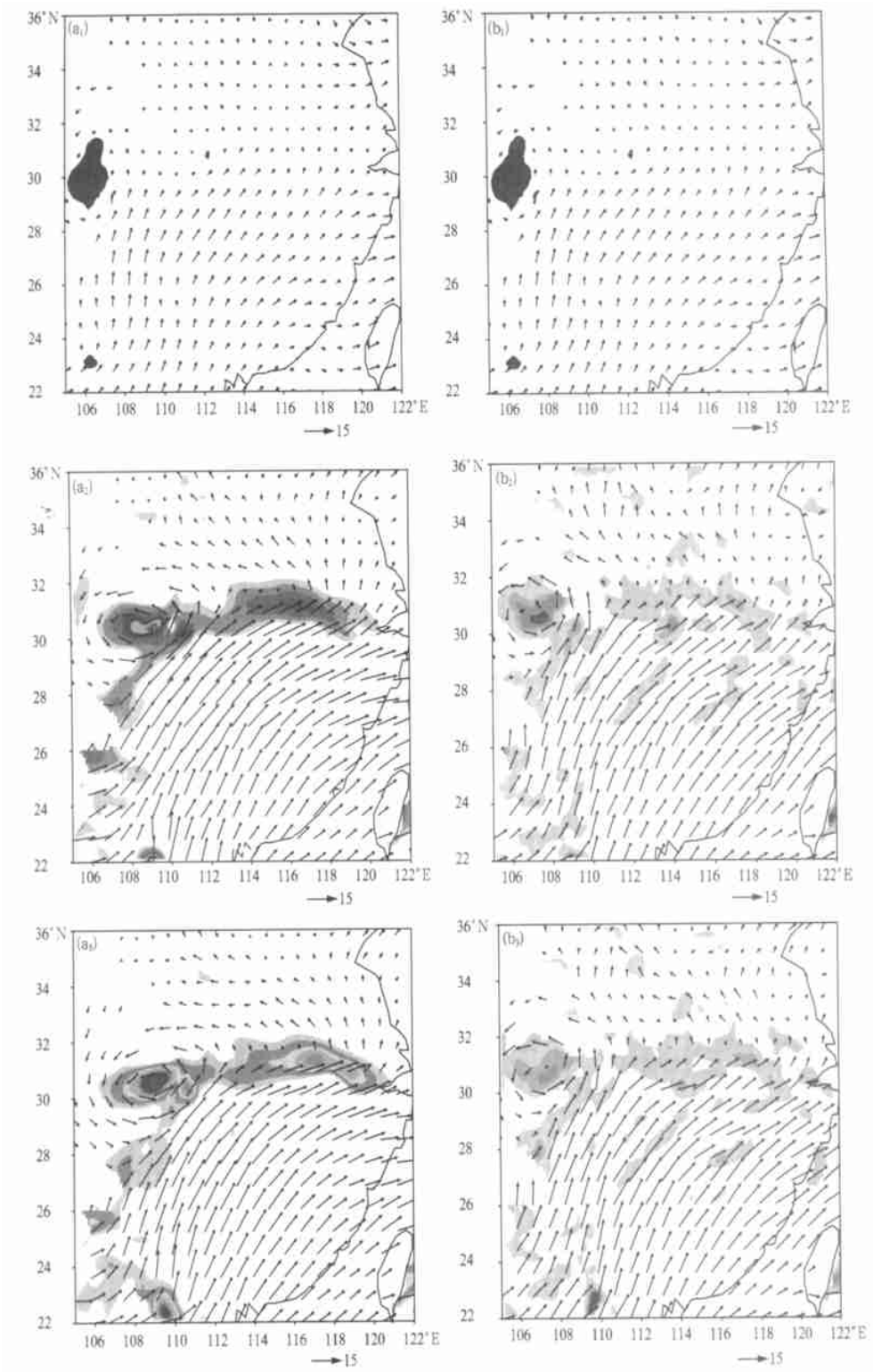


图7 1998年7月20日12时~21日12时850 hPa风矢量模拟

(a_1~a_3. MM5, b_1~b_3. WRF; a_1和b_1为7月20日12时, a_2和b_2为7月21日00时, a_1和b_3为7月21日12时; 阴影为涡度大于4×10^{-5}的区域)

(30°N, 110°E), 且中心强度也明显加强。而 WRF 则大不相同, 西南低涡的中心位置几乎维持在(30°N, 107°E), 24 h 向东移动不到 1 个经度, 强度也变化不大, 与实况中西南低涡的维持对应非常好。

由于西南低涡与西南低空急流的相互影响, 导致对西南低涡的模拟影响到了对低空急流的模拟, 从而直接关系到降水量及其强度的分布。从图 7 中可以看到, 总体来说 MM5 模拟的低空急流比 WRF 模拟的结果强, 而更重要的是, 模式积分 12 h 以后, 由于 MM5 模拟的西南低涡发生了向东的移动, 导致相应的低空急流轴线也发生了向北偏转, 而西南低涡谦强, 导致模拟的低空急流偏强, 因此在西南低涡的移动方向(同时也是低空急流的左前方) 出现了两个超过 100 mm 的降水中心(B 和 C) 。而由于 WRF 模拟的西南低涡位置的稳定和准确, 使得西南低空急流也比较稳定, 从图中可以看到, 急流的强度与位置也基本与实况一致, 从而使得最后模拟的降水也接近实况。

5　1998 年 7 月 1~ 2 日淮河流域暴雨

7 月 1 日 00 时~ 2 日 00 时, 淮河试验期间淮河流域出现强降水过程, 分析表明, 这是 1 次锋面降水过程, 与其中的中小尺度系统有关[9]。24 h 降水量分布见图 8a, 与引发降水的锋面对应, 是一条东北—西南走向的降水带, 其中存在 3 个强降水中心, 分别是(35°N, 118~ 120°E), (34°N, 116°E) 和(31°N, 110°E)。这里仅就 WRF 和 MM5 模拟的最终降水进行比较, 而不再详细对比其中的天气过程。同样使用相同的初始场, 并在模式中选用相同的物理参数化方案。

由图 8b, c 可见, MM5 的模拟结果中出现了非常凌乱的 4~ 5 个降水中心, 其最大的降水量中心 200 mm 出现在(34°N, 116°E), 基本与实况吻合, 但其他地区则与实况出入较大, 如(30°N, 110°E) 附近出现了几个与实况不一致的降水区, 而实况中的(35°N, 118~ 120°E) 的 100 mm 降水则没有体现, 模拟的降水与位于(34°N, 116°E) 的降水中心连成一片, 同时在沿海地区出现了沿海岸线的大范围的虚假降水区。WRF 则在降水的分布上比 MM5 有所改善, 除了(34°N, 116°E) 的 125 mm 的降水同样存在外, 在(31°N, 110°E) 出现了 75 mm 降水中心, 在(35°N, 118.5~ 120°E) 出现了 100 mm 的降水, 较好地模拟出了 3 个降水中心, 但模拟的 29.6°N, 110°E 的降水中心较实况(31°N, 110°E) 略偏南。同时在沿海地区没有出现任何虚假降水, 这些都比 MM5 的模拟结果要好。

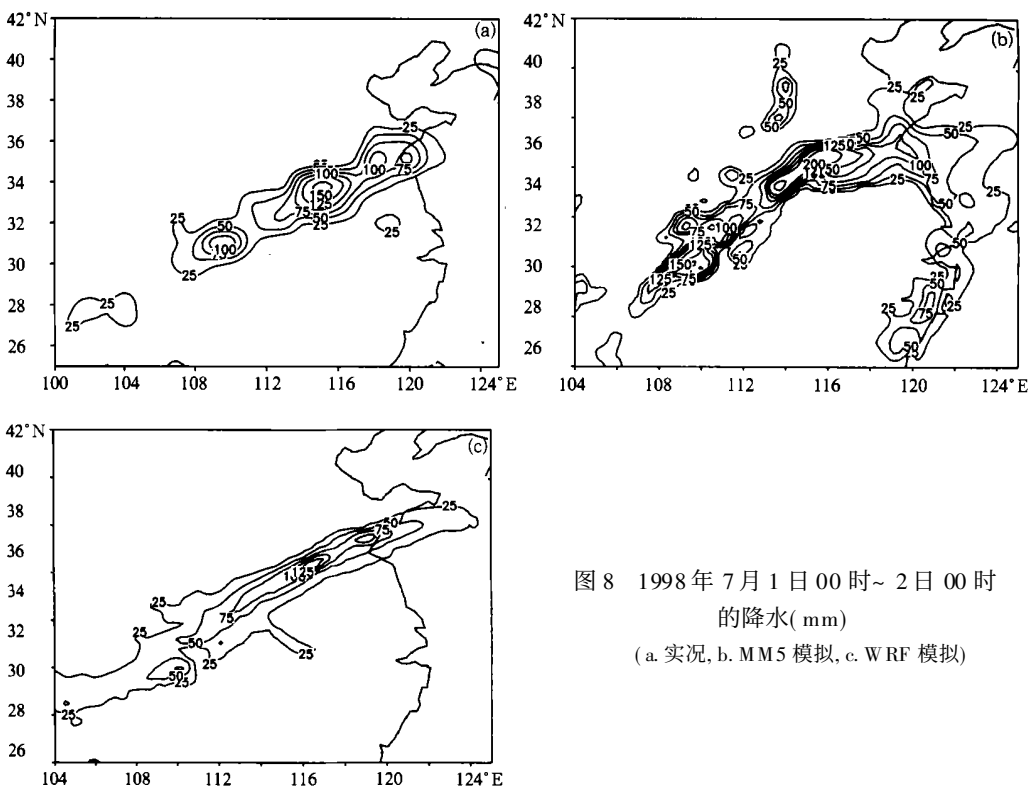


图 8　1998 年 7 月 1 日 00 时~ 2 日 00 时的降水(mm)

(a. 实况, b. MM5 模拟, c. WRF 模拟)

6 总结和讨论

WRF 是美国 NCAR 和 NOAA 的新一代中尺度模式, 到目前为止还没有在中国得到大量的运用, 本文的目的就是对 WRF 和 MM5 在中国的适用情况做一个对比分析。

对 1998 年三次受到广泛关注的强降水过程, 即 5月 23~ 24 日的 1 次华南暴雨、7 月 20~ 21 日的 1 次长江流域暴雨和 7 月 1~ 7 月 2 日的 1 次淮河流域暴雨, 对比 MM5 和 WRF 的模拟结果, 可以看到在这三次具有一定的代表性的中国不同地区、不同性质的强降水过程中, 在天气系统的模拟上 WRF 优于 MM5, 如本文选择的华南暴雨过程中冷空气南下的路径和强度、长江流域降水过程中西南低涡的演变和低空急流的移动等, 导致 WRF 模拟的降水落区明显好于 MM5 的结果。遗憾的是在最终的降水量上 WRF 模拟的比较小, 尽管如此, 由于 WRF 在模拟天气系统和降水落区上具有优越性, 因此可以预期随着 WRF 模式中物理过程的不断改进, 或者更多的物理参数化方案进入 WRF 模式, 对降水的模拟也将得到明显的改进。

本文仅就 WRF 和 MM5 的模拟结果进行了对比, 因为在进行模拟时选择了相同的物理参数化方案, 如前文指出的, 由于得到的模式的初始场和边界条件完全一致, 同时也可以排除对所选择的物理过程的程序编写方面的原因, 因此可能是 WRF 的动力框架的优越性导致了最终模拟结果的改善, 其中更加具体的原因, 则有待于进一步的研究。

参考文献

1 Pielke R A. Mesoscale meteorological modeling. New york: Academic Press, 1984. 612pp

2 Ninomiya K. Mesoscale Numerical Weather Prediction, Numerical Prediction of Mesoscale Severe Phenomena in Japan, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction. WMO/ IUGG NWP Symposium, Tokyo, 1986. 517~ 531

3 Michalakes J, Dudhia J, Gill D, et al. Design of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model, http://www.wrf- model.org 2001

4 吴庆丽, 陈敏, 王洪庆等. 暴雨雨团的中β尺度结构的数值模拟. 科学通报, 2002, 47(18) : 1437~ 1440

5 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄等. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001. 184pp

6 赵思雄, 孙建华, 陈红等. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究. 气候与环境研究, 1998, 3: 368~ 381

7 贝耐芳. “98. 7”突发强暴雨中尺度系统的诊断与模拟研究 [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2000

8 徐亚梅, 高坤. 1998 年 7月 22 日长江中游中-β低涡的数值模拟及初步分析. 气象学报, 2002, 60(1) : 85~ 95

9 刘淑媛, 王洪庆, 陶祖钰. 1998 年 6 月 28日~ 7 月 2 日淮河流域暴雨分析. 气象学报, 2002, 60(6) : 574~ 579

SIMULATION AND ANALYSIS OF THREE HEAVY RAINFALL PROCESSES IN 1998 WITH WRF AND MM5

Sun Jian　Zhao Ping

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Numerical simulations are made with the new generation numerical model - WRF (Weather Research and Forecast) and MM5 on three typical heavy rainfall processes happened in 1998. The three heavy rainfall processes happened respectively over South China in May, over Huaihe reach at the beginning of July and over Yangtze river reach at the end of July. It is clear that the different results of the new meso-scale model - WRF can successfully simulate the rainfall processes which have different characteristic. And to all these three processes, WRF makes much better simulations than MM5, not only about the distribution of the precipitation, but also about the major weather systems.

In all these processes, the movement of the major weather systems is simulated by WRF successfully, such as in the first process happened over South China, the cold air stream came from the North China and a vortex over the South China are both reproduced correctly by the model, and this good reproduction of the weather patterns could also be seen in the two other heavy rainfall process. It is clear that this is the main reason that WRF makes the better simulation of the distribution of the precipitation.

But unfortunately, the maximum values of the precipitation center are much less than the results of MM5, and also less than the observations. From the numerical results, we found that the respectively small vertical velocity simulated by WRF can be considered as the major factor for the small precipitation.

Key words: WRF, MM5, Heavy rainfall, Model comparing.