马严枝, 陆昌根, 高守亭. 2012. 8.19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比试验 [J]. 大气科学, 36 (4): 835-850, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11159. Ma Yanzhi, Lu Changgen, Gao Shouting. 2012. The effects of different microphysical schemes in WRF on a heavy rainfall in North China during 18-19 August 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 835-850.

8.19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比试验

马严枝^{1,2} 陆昌根¹ 高守亭²

1 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044
 2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京 100029

摘 要 在中尺度模式多种物理过程中,微物理过程是一个非常关键的环节,其不仅直接影响降水预报,而且也 影响模式的动力过程。微物理方案有明确的物理基础,但是在实际暴雨模拟中,究竟采取哪一种方案的结果更理 想,需要深入比较,因为不同的微物理方案对降水模拟结果有着很大的差异。本文利用中尺度非静力模式 WRF (V3.2.1版本),采用 36 km、12 km 和 4 km 的格点分辨率,选用七种微物理方案,对 2010 年 8 月 18~19 日华北地 区的暴雨过程进行了敏感性试验。从降水落区和强度方面对总降水的预报性能进行了对比,模拟结果表明:选用 不同的微物理方案,可以不同程度地模拟这场暴雨的范围和强度,且选择合理的微物理方案对细网格(4 km)嵌 套的模拟也可以相应的提高,从而提高了暴雨模拟的分辨率,为暴雨中小尺度成因分析提供了参考。其中,水平 分辨率为 36 km 时,Lin 方案模拟的雨带范围和降水强度与实况拟合的最好;水平分辨率为 12 km 时,Thompson 方案模拟的强降水位置、强度与实况最为接近;而水平分辨率为 4 km 时,WSM6 方案模拟的强降水位置、强度与 实况拟合得较好。再结合垂直速度、涡度、散度和雨水混合比等基本物理量的诊断分析,可以更好地理解各微物 理方案对降雨预报的影响,所得的结论对我国华北暴雨强降水预报和中尺度模式微物理过程在业务和研究方面有 相当的参考价值。

关键词 WRF 模式 微物理方案 网格嵌套 文章编号 1006-9895 (2012)04-0835-16 中图分类号 P435 文献标识码 A doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11159

The Effects of Different Microphysical Schemes in WRF on a Heavy Rainfall in North China during 18–19 August 2010

MA Yanzhi^{1, 2}, LU Changgen¹, and GAO Shouting²

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract There are kinds of physical processes in the mesoscale model, in which, the microphysical process is of vital importance. It makes direct effect on the dynamical process of the model and the precipitation forecast as well. Different physical schemes have different physical basis, in the simulation of torrential rain, they will produce distinct results. It needs detailed comparison to justify which scheme has better performance in the heavy rain simulation. A heavy rainfall in North China during 18–19 August 2010 is simulated using the weather research and forecast modeling system (WRFV3.2.1 version). The study is carried out with seven microphysical schemes with the 36-km, 12-km, and 4-km resolutions, respectively. From the rainfall area and intensity of precipitation, forecast performances (model performance) are compared. The simulation results show that different microphysical schemes can result in different degrees of

收稿日期 2011-09-07, 2011-12-22 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41075043, 40921160379

作者简介 马严枝,女,1983年出生,硕士研究生,主要从事华北暴雨数值模拟的研究与诊断分析。E-mail: lubaby_36@126.com

simulation effect including the scope and intensity of the rain. Reasonable selection of microphysical schemes can also improve the fine-mesh (4 km) nested simulation accordingly, thereby improving the resolution of the rainstorm simulation, which provides reference in the analysis of small- and medium-scale rainstorm. The project with the grid size of 36 km indicates that: by comparison, the simulated rainfall location and intensity with the Lin scheme are closer to observed ones. For 12-km resolution, Thompson scheme performs better than other schemes in simulating both the heavy rainfall center and strength. When the grid resolution reduced to 4 km, WSM6 scheme performs best. Combined with the diagnosis of the basic physical quantities, such as vertical speed, vorticity, divergence, and the rain mixing ratio, the role that microphysical schemes play in the rainfall forecast can be better understood. The conclusion is of certain reference value in the rainfall forecast and the mesoscale model microphysical processes in operation and research.

Key words WRF model, microphysical schemes, grid nesting

1 引言

长期以来,暴雨的诊断分析与预报一直是天气 分析预报的难点,尤其是在业务预报中,很难把握 暴雨发生和持续的时间、落区以及降水强度,解决 这个问题的一个有效途径就是发展和完善中尺度 数值预报模式。20世纪80年代以来,中尺度大气数 值模式已得到了很大发展,到90年代,一些中尺度 模式模拟系统己相当先进,其中PSU/NCAR的各版 本MM4和MM5在世界各地得到了广泛运用。1997 年由NCAR中小尺度气象处、NCEP环境模拟中心、 FSL的预报研究处和奥克拉荷马大学的风暴分析 预报中心四部门联合发起,成立新一代中尺度 数值预报模式WRF (Weather Research&Forecasting Model),目前已推出WRFV3.3,表明中尺度数值天 气预报已成为灾害性天气预报的一个重要手段。在 传统的原始方程动力模式框架设计中,大多数预报 模式采用静力平衡近似。静力近似在垂直尺度与水 平尺度的比例较小时是成立的,但考虑水平尺度为 10 km或更小的运动时,静力假定就有问题了,通 常认为静力原始方程对中尺度模拟是不适合的,因 为当模式水平格距小于5 km时,非静力平衡动力过 程作用将是显著的、不可忽略的。国际上研究非静 力中尺度预报模式已有很多年了,主要的气象中心 最近几年也在纷纷发展非静力中尺度模式,如法国 气象局的MESONH模式,德国的LM模式,美国的 ARPS、MM5、WRF模式等。随着高性能计算机的 发展以及雷达、卫星等非常规资料的使用,使得非 静力中尺度模式的业务化成为可能,并取得了重要 进展。

在数值模式模拟天气过程时,往往由于模式分 辨率不足等原因,对次网格尺度的物理过程不能很

好的描述,需要诸如辐射、边界层、微物理等物理 过程参数化来完善模拟的效果。许多研究表明:云 微物理过程对描述降水过程和揭示降水的物理机 制是非常重要的 (牛俊丽和闫之辉, 2007)。云物理 过程是中尺度数值模式中最重要的非绝热加热物 理过程之一,成云降雨过程发生以后通过感热、潜 热和动量输送等反馈作用影响大尺度环流,并在决 定大气温度、湿度场的垂直结构中起着关键作用, 也是人们最为关心的降水预报的关键所在 (陈德辉 等,2004)。中尺度模式中云物理方案有很多的优势 和应用潜力,不同的微物理方案对降水模拟结果有 着很大的差异 (楼小凤等, 2004)。尽管微物理方案 有明确的物理基础,但在实际暴雨模拟中,究竟采 取哪一种方案结果会更理想,需要深入对比 (刘奇 俊和胡志晋, 2001)。许多中尺度模式的微物理过程 不如云模式的微物理过程完善和详细,一定程度上 会影响中尺度模式的微物理模拟能力并影响到动 力过程、降水等的模拟 (楼小凤等, 2003)。

Isidora et al. (2005) 采用三种积云对流参数方 案、三种微物理方案、两种边界层方案的十八种不 同组合方案对8个夏季MCS (即中尺度对流系统) 个例进行了模拟,结果表明,不同组合方案对不同 个例不同量级的降水模拟,其ETS 评分结果亦有差 异,没有一种方案明显优于其它方案,尽管不同微 物理和边界层方案对预报结果有明显作用,但对预 报结果产生最大影响的是积云对流参数方案的选 择:对于强降水模拟,Kain-Fritsch 积云方案的模 拟结果优于其它方案;Rama Rao et al. (2007) 应用 WRF模式模拟了发生在印度的三次暴雨过程,得出 使用Ferrier微物理方案及BMJ积云方案较其它方案 更能较好地模拟出暴雨的位置和强度。

伍华平等 (2009) 选用七种微物理方案及网格 嵌套技术分别与Kain-Fritsch (newEta)、Betts-MillerJanjic、Grell-Devenyi 三种积云对流参数方案匹配, 对湖南南部的暴雨进行了模拟,结果表明:选用Lin 等微物理方案和三种积云对流参数方案,采用20 km的格点分辨率,基本上可以模拟这场暴雨的范 围,且采用网格嵌套技术的模拟结果优于未采用嵌 套的模拟结果。其中,KF 方案模拟的强降水位置、 强度与实况比较接近; BMJ 方案模拟的强降水范 围偏大、强度偏强,位置偏南,上述两种方案都不 同程度地存在着虚假的暴雨中心。GD方案模拟的 强降水范围、强度均偏小。

本文所用的 WRF 为 2010 年 8 月 18 日发布的 WRF3.2.1 版本,文中首先对七种微物理方案做了简 要的介绍,采用网格嵌套技术,在 36 km、12 km 和 4 km 三种水平分辨率条件下,分别选用模式中 不同的微物理方案,对 2010 年 8 月 18~19 日(简 称 8.19)发生在华北中部的一次暴雨过程进行了敏 感性试验。由于对华北暴雨的云物理过程参数化模 拟对比较少,本文通过不同微物理方案对我国华北 中部一次强降水过程进行的模拟,结合降水预报效 果的对比分析,为合理选择和使用微物理方案提供 了科学依据。

2 模式物理过程方案简介及试验方 案设计

2.1 模式七种微物理方案简介

(1) Kessler 暖雨方案。来自于 COMMAS 模式 (Wicker and Wilhelmson, 1995),是一个简单的暖云 降水方案,方案中忽略了液体水与冰之间的相变过 程,考虑的微物理过程包括:雨水的产生、降落以 及蒸发,云水的增长,以及由凝结产生云水的过程, 微物理过程中显式预报水汽、云水和雨水,无冰相 过程。

(2) Purdue Lin方案。微物理过程中,包括了对 水汽、云水、雨、云冰、雪和霰的预报,在结冰点 以下,云水处理为云冰,雨水处理为雪。水物质各 种产生项的参数化方案主要是从Lin et al. (1983) 以及Rutledge and Hobbs (1983, 1984) 的参数化方 案的基础上得到的,某些地方稍有修改,饱和修正 方案采用Tao et al. (1989) 的方法。这个方案是WRF 模式中相对比较成熟的方案,适合于对实时资料的 高分辨率模拟,适合理论研究。

(3) Ferrier (new Eta) 方案。此方案是NECP模

式中的可操作微物理过程,考虑混合相变过程的简 单有效的方案。此方案预报模式平流项中水汽和总 凝结降水的变化。程序中用一个局域数组变量来保 存初始猜测场信息,然后从中分解出云水、雨水、 云冰以及降冰的变化的密度(冰的形式包括雪、霰 或冰雹)。降冰密度是根据存有冰的增长信息的局域 数组来估计,其中,冰的增长与水汽凝结和液态水 增长有关。沉降过程的处理是将降水时间平均通量 分离成格点单元的立体块。这种处理方法,伴随对 快速微物理过程处理方法的一些修改,使得方案在 大时间步长时计算结果稳定。根据Ryan (1996) 的观 测结果,冰的平均半径假定为温度函数。冰水混合 相仅在温度高于-10℃时考虑,而冰面饱和状态则 假定在云体低于-10℃。这个方案改变了模式中水 汽和冷凝物的平流输送。 在雪、霰或者冰雨形成 中,它可以提取局地云水、雨、云冰和冰水密度变 化的第一猜测信息。这样能够快速调整微物理过 程,以适应大时间积分步长。

837

(4) WRF Single-Moment 3-class (WSM3) 方 案。该方案来自于旧的NCEP3方案 (Hong et al., 2004) 的修正,包括冰的沉降和冰相的参数化。与 其它方案不同的是,诊断关系所使用冰的数浓度是 基于冰的质量含量而非温度。方案包括三类水物 质:水汽、云水或云冰、雨水或雪。在这种被称为 是简单的冰方案里面,云水和云冰被作为同一类来 计算。它们的区别在于温度,也就是说当温度低于 或等于凝结点时冰云存在,否则水云存在,雨水和 雪也是这样考虑的。该方案适合于中尺度网格大小 的模拟,对于业务模式来说已足够有效。

(5) WSM5 方案。比WSM3版本物理过程稍复 杂,它允许了混合相变过程和过冷却水的存在,对 NCEP5方案进行了修正,它代替了NCEP5版本。

(6) WSM6方案。该方案扩充了WSM5方案,它还包括有霰和与它关联的一些过程。这些过程的参数化大多数和Lin等 (Lin et al., 1983)的方案相似,在计算增长和其它参数上有些差别。为了增加垂直廓线的精度,在下降过程中会考虑凝结/融化过程。过程的顺序会最优化选择,是为了减少方案对模式时间步长的敏感性,和WSM3、WSM5一样,饱和度调节按照Dudhia (1989)和Hong et al. (1998)的方案分开处理冰和水的饱和过程,对计算的量级进行最优化处理,减小方案对模式时间步长的敏感

性,适合于高分辨的模拟。

(7) Thompson方案。一个考虑了冰、雪、霰过程的新物理方案,适合于高分辨率模拟研究。从3.0版本开始增加了一定数量的雨水密度,并在3.1版本中得到了更新。该方案改进了较早的Reisner方案(Reisner et al., 1998),还作了广泛的测试。该方案还被用来做理想试验研究和中纬度冬季观测资料的比较,被设计用来提高冻雨天气情况下航天安全保障的预报。

表1给出了各微物理方案的选项差别。

表1 微物理方案选项

Table 1 The incrophysical scheme options								
微物理方案	变量个数	冰相过程	混合相过程					
Kessler	3	Ν	Ν					
Lin et al.	6	Y	Y					
WSM 3	3	Y	Ν					
WSM 5	5	Y	Ν					
Ferrir (new Eta)	6	Y	Y					
WSM 6	2	Y	Y					
Thompson	7	Y	Y					

注:Y:包含此过程,N:不包含此过程。

关于微物理方案的详细介绍,请参阅胡向军等 (2008)的WRF模式物理过程参数化方案简介以及 闫之辉和邓莲堂 (2007)的WRF模式中的微物理过 程及其预报对比试验。

2.2 试验方案设计

为了检验在一定分辨率情况下,各个微物理过 程在强降水过程中的不同作用,选用了 8.19 降水过 程进行了个例预报对比试验。试验中初始场和侧边 界条件采用 NCEP 再分析格点资料, 侧边界采用松 弛边界,资料的水平分辨率为1°×1°,时间间隔为6 小时。模式框架选用了欧拉质量坐标 (非静力),模 式的水平分辨率分别为 36 km、12 km 和 4 km,水 平格点数分别为 D1 (130×110)、D2 (181×181)、D3 (277×277),模拟中心位置取为 (38°N, 115°E), 垂 直分为 28 层等 σ 面,模式层顶为 50 hPa,时间积 分方案采用三阶精度 Runge-Kutta 积分方案的时间 分裂方案,模式积分时间为 2010 年 8 月 17 日 12 时~19日00时(协调世界时,下同),共积分36小 时,每三小时输出一次结果,模式粗细网格的积分 步长分别为 180 秒、60 秒和 20 秒。为了排除模式 初始场误差和其他物理方案带来的不确定性可能

引起的降水预报误差,我们使用同一个 WRF 模式 和相同的初始场进行模拟,还选择了相同的除微物 理方案外的其他物理过程。模式中考虑的辐射过程 参数化方案包括:长波辐射采用了 rrtm 方案 (Mlawer et al., 1997), 短波辐射采用了 Dudhia 方案 (Dudhia, 1989), 陆面过程采用 Noah 方案 (Chen and Dudhia, 2001), 近地面层采用了 MYJ 方案 (Janjić, 1996), 边界层采用了 YSU 方案 (Hong et al., 2006)。 个例试验中,首先选定 Kain-Fritsch (new Eta)的积 云对流参数化方案 (Kain and Fritsch, 1990, 1993) 对微物理方案进行对比,其中水平分辨率为 4 km 时不考虑积云对流参数化的作用。在对比试验的基 础上,在其他物理过程完全相同的条件下,分别选 定了 (1) Kessler 方案、(2) Ferrier 方案、(3) WSM3 方案、(4) WSM5 方案、(5) WSM6 方案、(6) Lin 方 案、(7) Thompson 方案作为微物理方案,对 8.19 过 程进行了七次降水模拟,然后对比分析各方案模拟 的降水效果,最后通过基本物理量的诊断来进一步 判断各微物理方案对降水预报的影响。

3 过程概况

2010年8月18日00时~19日00时,受副高外围云 系及蒙古涡旋云系的共同影响,华北地区大部(山 西中部和南部、河北大部,北京和天津局部地区以 及河南北部)出现了暴雨天气(图1为主要台站过程 雨量分布),从西南到东北有一条降水云带,其中, 乡宁县累积24小时降水量达到了95 mm,廊坊市为 94 mm,内丘县为104 mm,淇县为138 mm,鹤壁市 为125 mm。

8月18日00时,在500 hPa高空图上,华北地区 上空为两槽一脊形式,一槽位于巴尔喀什湖,一槽 位于贝加尔湖和内蒙古中部,一脊位于15°N~35°N。 华北地区一直处于588线控制之下,即在副高的控 制之下,但受副高西侧的西南气流控制,暴雨落 区为沿着副高北上的暖湿空气与中纬度南下的冷 空气相交绥的地带。随着500 hPa图上两槽一脊的 缓慢东移,高空有低涡和对应的低槽沿着副高边 缘缓慢偏北收缩东移,不断引导冷空气沿着低槽 南下与副高边缘的西南气流交汇,造成此次降雨 过程的大范围和持续性;另外,700 hPa、850 hPa 高空有切变线长时间维持,也使得暴雨的持续和维 持。到8月18日18时,副高的范围和强度到最大,



图1 2010年8月18日00时~19日00时华北地区各台站累积24小时降水量 (单位: mm) Fig.1 Precipitation at stations of North China from 0000 UTC 18 Aug to 0000 UTC 19 Aug in 2010

暖湿气流源源不断的汇入华北地区,高空冷涡范围 扩大,造成冷暖空气的明显交绥,使得暴雨强度达 到最大。

4 试验结果分析

4.1 微物理过程方案对比试验

为了检验不同微物理方案对降水预报的影响, 积云对流方案采用了KF方案,在此基础上,我们选 择了Lin、WSM6、WSM3、Ferrier、Kessler、WSM5 和Thompson方案共7个微物理过程方案,分别对 8.19暴雨过程进行了模拟。图2是常规地面观测资料 经过插值处理后得到的相应时段累积24小时降水 量分布图,从图上我们可以看出此次降水雨带呈东 北一西南走向, 散落分布着13个较强降水中心, 分 别是A(37.5°N, 111°E)、B(36°N, 111°E)、C(37°N, 113°E), D(37.9°N, 112.7°E), E(35.5°N, 113°E), F (36°N, 114°E), G (38.5°N, 115.5°E), H (39.5°N, 116.5°E), I (39.5°N, 117.5°E), J (37°N, 116.9°E), K (37.3°N, 114.5°E), L (39°N, 114°E), M (40.5°N, 117°E),强降水中心最大降雨量分别为:80 mm、 100 mm, 70 mm, 60 mm, 90 mm, 130 mm, 80 mm, 90 mm, 60 mm, 60 mm, 60 mm, 50 mm, 50 mm. 为了便于分析比较,将实况图中 (35°N~40.5°N, 110°E~118°E) 范围内的东北一西南向雨带分为四 条狭长雨带,雨带一的范围为 (36.7°N~39.2°N, 110°E~114.5°E),包括的强降水中心有A、D、L;雨 带二的范围为 (35°N~37.5°N, 110.3°E~115°E), 包 括的强降水中心有B、C、K; 雨带三的范围为



110°E 111°E 112°E 113°E 114°E 115°E 116°E 117°E 118°E 图2 2010年8月18日00时~19日00时累积24降水量实况(单位: mm) Fig.2 The observed precipitation (mm) from 0000 UTC 18 Aug to 0000 UTC 19 Aug in 2010

(37.5°N~40.5°N, 115°E~118°E),包括的强降水中 心有G、H、I、M;雨带四的范围为 (35°N~37°N, 112.7°E~115°E),包括的强降水中心有E、F。

从36 km水平分辨率的模拟图上 (图略) 可以 看出,各微物理方案模拟的雨带的走向均是东北— 西南走向,由于分辨率较低,模拟的雨带范围和强 降水中心明显偏大,除了Lin方案模拟的雨量较接近 实况外,其他方案模拟雨量总体上均偏小。

下面,着重讨论在12 km分辨率的情况下,各 微物理方案模拟的相应时段累积24小时降水量对 比。图3给出了水平分辨率为12 km,7种微物理过 程分别模拟的相应时段的24小时累积降水量图。结 合实况图2,仔细对比雨带位置和强度以及最大降 水中心,我们可以发现,七种微物理方案基本上都 模拟出了这次暴雨的主要雨带范围以及走向。其 中, Lin方案 (图3a) 模拟的雨带偏窄而且走向较实 况偏陡,倾斜角度偏大,雨带一、二、三合为一条, 范围偏小,雨带四只是比较好地模拟出了F中心的 位置。整体而言, Lin方案模拟的雨带位置偏南, 范 围偏小,但是雨量较实况却偏大一倍之多;从WSM6 方案模拟的雨带走向和范围图 (图3b) 上,我们可 以看出四条比较明显的雨带,与实况走向和范围拟 合得较好,但是几个强降水中心范围均偏大,强度 较实况均偏大至少20 mm; WSM3方案 (图3c) 模拟 的雨带一和雨带二合为一条,雨量平均偏大40 mm 左右;雨带三位置拟合得比较好,但是强度和范围 略偏小, I 中心未模拟出来; 雨带四缩为大值中心 F,但位置偏西0.3°E,强度偏小40 mm;Ferrier方案 (图3d)模拟的雨带一不明显,雨带二位置和范围拟 合得较好,但是C、K中心强度明显偏大;雨带三的 走向和范围拟合较好, H中心强度偏大, G强度偏 大, M、I中心没有模拟出来; 雨带四范围和强度 均偏小,而且只模拟出了F中心;Kessler方案 (图3e) 模拟的雨带明显偏窄,雨带一、二、三合并为一条 细长、雨量偏大、延伸整个模拟经度范围的雨带, 而雨带四的范围和雨量均偏小; WSM5方案 (图3f) 和WSM6方案 (图3b) 模拟的雨量图很相似, 也比较 好地模拟出了和实况走向和范围拟合四条雨带,雨 量也偏大。其中B中心偏北0.1°N,强度偏小10 mm, C、K和L、D分别合成一条雨带,强度偏大,G、K 位置和强度拟合较好,A、M、I、J未模拟出,E中 心位置偏西强度偏小;Thompson方案(图3g)模拟 的包含A、B、C、D、K强降水中心在内合为一条 雨带,但是A、B、D位置偏南,C、K中心合为一 条,强度偏大;雨带三位置和范围拟合得较好,但 强度偏大,H中心不明显,I中心缺失;雨带四模拟 得较好,E位置偏北0.2°N,强度偏小20 mm,F位 置偏西0.2°E,范围略小,但强度一致。通过各微物 理方案模拟的相应时段24小时降雨量与实况图相 比较,总体上而言Thompson方案(图3g)模拟强降 水中心位置拟合得比较好,雨量略微偏大,整体效 果较好。

接下来对比分析水平分辨率为4 km时,各微物 理方案模拟的降雨量 (图4)。对比分析实况降水量 图2可以看出,各微物理方案都比较好地模拟出了 东北—西南走向的雨带,由于分辨率较高,雨带分 辨率不是很高,而且模拟出很多细小的降水中心和 虚假中心,整体上模拟的雨带范围有不同程度偏 小,但是雨量均偏大。其中:Lin方案 (图4a)模拟 的雨量强度整体偏大一倍,F强降水中心的雨量更 是高达320 mm以上,Lin方案对分辨率是很敏感的; 从WSM6方案 (图4b)模拟的降水图可以看出四个 比较明显的雨带,范围和位置与实况拟合得比较 好;WSM3方案 (图4c)模拟的降水区域偏小,雨 带分界不明显;Ferrier方案 (图4d)模拟出了比较明 显的三条雨带,除了雨量偏大外,与12 km分辨率 模拟较相近;Kessler方案 (图4e)模拟的雨带范围



图 3 水平分辨率为 12 km 时模拟的 2010 年 8 月 18 日 00 时~19 日 00 时累积 24 小时降水量(单位: mm): (a) Lin 方案; (b) WSM6 方案; (c) WSM3 方案; (d) Ferrier 方案; (e) Kessler 方案; (f) WSM5 方案; (g) Thompson 方案

Fig.3 Simulated precipitation (mm) from 0000 UTC 18 Aug to 0000 UTC 19 Aug in 2010 at the horizontal resolution of 12 km: (a) Lin scheme; (b) WSM6 scheme; (c) WSM3 scheme; (d) Ferrier scheme; (e) Kessler scheme; (f) WSM5 scheme; (g) Thompson scheme





Fig. 4 Same as Fig.4, but for 4-km horizontal resolution

明显偏小,而且只有一条较狭长的东北一西南向的 雨带;WSM5方案 (图4f)模拟出了四条雨带,但是 将实况中的雨带一和雨带二合为一条,雨带四分裂 为两条,雨带三拟合得较好,但范围略微偏小;从 Thompson方案模拟的雨量图 (图4g)上可以明显 地看出三条雨带,而且范围和强度偏大。综合以上 分析,我们可以发现,在高分辨的情况下,WSM6 方案的模拟效果是最好的。

4.2 检验方法

将 (35°N~43°N, 110°E~118°E) 模拟区域内造 成华北地区暴雨 (24小时降水量≥50 mm)的台站 的降水情况作为检验对象,统计暴雨的ETS评分。 ETS评分的计算公式:

$$ETS = \frac{N_{fc} - CH}{N_{f} + N_{o} - N_{fc} - CH},$$

其中, N_f为模拟暴雨的台站数, N_o为实况发生暴雨的台站数, N_{fc}为模拟暴雨准确的台站数, N为评分区域台站总数, CH=N_f /N × N_o。与TS评分(*TS*=N_{fc}/(N_f+N_o-N_{fc})相比, ETS评分消除了参加统计的台站的多少对TS评分影响,因为称为公平的TS评分(伍华平,2009)。表2给出了本次暴雨(包括大暴雨)过程的模拟中七种微物理方案的ETS评分结果。从表2可以看到,在水平分辨率为36 km时,对于暴雨预报,Lin方案的预报效果高于其他几种微物理方案,从前面分析得知,Lin方案的模拟暴雨效果也是最好的,ETS评分远高于其它方案;



表 2 各微物理方案对暴雨预报的 ETS 评分 Table 2 ETS scores of the heavy rain forecast for different microphysical schemes

分辨率	Lin	WSM6	WSM3	Ferrier	Kessler	WSM5	Thompson
36 km	0.154	0.0752	0.0794	0.072	0.0041	0.1026	0.0887
12 km	0.0961	0.1101	0.1095	0.096	0.0178	0.1128	0.1394
4 km	0.0998	0.1423	0.0963	0.0545	0.0229	0.0926	0.1296

在水平分辨率为12 km时,Thompson方案的ETS评分最高;而当水平分辨率提高到4 km时,WSM6方案的ETS评分最高。在整个模拟试验中,Lin方案在各分辨率的情况雨量均高于其他方案,从所包含的微物理过程来看,Lin方案比较细致地刻画了云中水汽、云水、降水云冰等微物理过程,而且进行了饱和调整等过程,其相对复杂的过程为降水模拟研究提供了更为科学的物理机制;在Thompson方案中预

报变量增加了冰的数浓度预报,由于数浓度不再通 过经验关系计算,微物理过程的计算更为准确,并 且该方案中雨滴分布函数依赖于雨水混合比,这样 就假定水滴经历一个从云滴尺度通过毛毛雨滴最 终变成雨滴的逐渐转换过程,使得雨滴的下落速度 较为连续、合理;而WSM6方案使水相物质的预报 量达到了6个,由于预报量的增加,微物理过程较 WSM5方案更为复杂,方案中基本微物理过程与Lin 相似,但碰并过程和一些经验参数的选择有所不同,也增加过程加热项的计算精度和计算稳定度。综合分析各分辨率的模拟情况,同时结合预报效果,在华北暴雨的数值模拟中,Lin方案、Thompson方案和WSM6方案是比较好的,而且随着分辨率的提高,WSM6方案的优势增加的比较明显。

4.3 水平分辨率对微物理方案的影响

对比各微物理方案在不同水平分别率的情况 下的模拟降水量,即对比图3与图4中各图,可以 明显的看到, 与较细网格(分辨率为 12 km) 试验 对比,细网格(分辨率为4km)试验模拟的降水中 心强度明显增强,模拟的雨带范围和走向随分辨率 提高变化很小。相比于图 3, 其中: Lin 方案模拟降 水量增幅最为明显,雨量至少偏大 70 mm (图 4a); WSM6 方案模拟出更多的小的强降水中心,雨量 偏大 60 mm 左右 (图 4b); WSM3 方案模拟效 较差,强降水中心雨量偏大40 mm 左右 (图 果 4c); Ferrier 方案的模拟效果没有较细网格好, 但模 拟效果较其他方案要好,而且强度偏大40mm左右 (图 4d); Kessler 方案的粗细网格模拟情况较为相似, 提高分辨率的影响不大 (图 4e); WSM5 方案模拟 的范围偏小,强降水中心雨量偏大 50 mm 左右 (图 4f); Thompson 方案粗细网格模拟效果相似,强 降水中心雨量偏大 30 mm 左右 (图 4g)。分析得出: 对于同一种方案,随着模式水平分辨率的提高,预 报的降水强度都有一定程度的增加,其中 Lin 方案、 WSM6、Ferrier 方案对分辨率比较敏感, Kessler、 Thompson 方案增强幅度不如其他方案明显。Ferrier 方案的细网格模拟效果较好,可以清晰地看到四条 雨带,并且位置和范围拟合得较好。WSM3 方案对 分辨率不是很敏感。

5 物理量诊断

从宏观物理条件来说,产生暴雨的主要物理条件是充足的、源源不断的水汽、强盛而持久的气流 上升运动和大气层结构的不稳定。因此,为了更好 地理解七种微物理方案对强降水预报结果的影响, 选取水平分辨率为12 km,通过模拟区域最多强降 水中心的114°E,并选择垂直运动、涡度、散度和 雨水混合比基本物理量做诊断分析。

5.1 垂直速度

图5a是由再分析资料得到的8月18日18时的垂

直速度沿114°E的剖面图,从图中可以看出,在降 雨发展最强阶段,强降水上空对应着一支强盛的斜 升气流,最大上升速度达到了0.6 Pa/s,上升运动向 上发展到了300 hPa附近。强降水中心南侧500 hPa 以下为强暖湿气流的输送,与来自北方的干冷空气 在降水区相遇,形成强烈的辐合抬升。从各微物理 方案模拟垂直速度剖面图上看出,降水区域上空也 对应着强烈的上升运动,但上升运动的强度要大于 实况,这也正好可以分析模拟雨量大于实况的原 因,其中WSM5方案(图5g)模拟的暴雨区上空垂 直速度达1.1 Pa/s,在其他方案中是最高的,之前的 模拟分析也可以看到其效果也是最好的; WSM6方 案(图5c)和Ferrier方案(图5d)模拟的垂直速度 为0.9 Pa/s, Kessler方案(图5f)、Thompson方案(图 5h)模拟的垂直速度为0.6 Pa/s,而WSM3方案(图 5d) 模拟的垂直速度最小,为0.3 Pa/s。可以看出各 微物理方案模拟的垂直运动差异很大,这可能与各 方案包含的物理过程有关(详见2.1节对各物理方 案过程的简介,这里不再赘述)。通过对垂直运动分 析,说明了不同的微物理方案所造成的垂直速度的 差异一般可导致模式对降水过程的模拟性能的优 势,同时也反映了选取适当的微物理方案对于降水 预报的重要性。

5.2 涡度及散度

图6为8月18日18时的涡度和散度沿114°E的剖 面图,从再分析资料得到的涡度剖面 (图6a1) 可以 看出,由于北方冷空气的入侵,有负涡度区从底层 契入,使得正涡度区从地面向上倾斜发展至300 hPa 附近,最大负涡度值为-8×10⁻⁵s⁻¹;从散度剖面(图 6a2) 可以看出,涡度与散度的高空配置是一致,底 层的辐合区向上倾斜发展延伸至了300 hPa附近,高 层辐散区也向低层扩展至450 hPa,强降水区上空的 辐散中心值大于低层辐合中心值。从微物理方案模 拟的高低空涡度和散度的配置来看,模拟的涡散度 比实况要偏大一个量级,这与模拟降水量大于实况 降水量是一致的,可能原因是由于再分析资料的分 辨率是1°×1°即100 km, 而模拟的分辨率为12 km, 所以模拟资料得到的涡散度要更细致,导致小范围 内的对流活动的可识别。其中: Lin方案 (图6b1、b2) 模拟的暴雨区上空的正涡度从地面延伸至100 hPa, 在500 hPa达到最大值10×10⁻⁴ s⁻¹,对应300 hPa有 强度为 4×10^{-4} s⁻¹的辐散区,高层有强烈的辐散作用,



图5 2010年8月18日18时过114°E的垂直速度(单位: Pa/s) 剖面: (a) 实况; (b) Lin方案; (c) WSM6方案; (d) WSM3方案; (e) Ferrier方案; (f) Kessler方案; (g) WSM5方案; (h) Thompson方案

Fig.5 Pressure-latitude sections (along 114°E) of vertical speed (units: Pa/s) at 1800 UTC 18 Aug 2010: (a) FNL data (NCEP Final Operational Global Analysis data); (b) Lin scheme; (c) WSM6 scheme; (d) WSM3 scheme; (e) Ferrier scheme; (f) Kessler scheme; (g) WSM5 scheme; (h) Thompson scheme

因此雨量也最大; WSM6方案 (图6c1、c2) 模拟的 暴雨上空700 hPa正涡度值达5×10⁻⁴ s⁻¹, 对应300 hPa散度值4×10⁻⁴ s⁻¹; WSM3方案 (图6d1、d2) 在 800 hPa最大涡度值为3×10⁻⁴ s⁻¹, 200 hPa最大散度 值3×10⁻⁴ s⁻¹; Ferrier方案 (图6e1、e2)模拟暴雨区 上空最大涡度值在700 hPa为3×10⁻⁴ s⁻¹, 对应 200 hPa最大散度8×10⁻⁴ s⁻¹; Kessler方案 (图6f1、f2) 和Thompson方案 (图6h1、h2)模拟的暴雨区上空



图6 2010年8月18日18时模拟的过114°E的涡度 (左側: a1-h1) 和散度垂直剖面 (右侧: a2-h2) (单位: $10^{-5}s^{-1}$): (a1, a2) 为FNL资料得到的实况涡度和 散度剖面图; (b1, b2) Lin方案; (c1, c2) WSM6方案; (d1,d2) WSM3方案; (e1,e2) Ferrier方案; (f1, f2) Kessler方案; (g1, g2) WSM5方案; (h1, h2) Thompson方案 Fig.6 Pressure-latitude sections (along 114°E) of vorticity (left) and divergence (right) (units: $10^{-5}s^{-1}$) at 1800 UTC 18 Aug 2010: (a1, a2) FNL data; (b1, b2) Lin scheme; (c1, c2) WSM6 scheme; (d1, d2) WSM3 scheme; (e1, e2) Ferrier scheme; (f1, f2) Kessler scheme; (g1, g2) WSM5 scheme; (h1, h2) Thompson scheme

最大涡度值在500 hPa为4×10⁻⁴ s⁻¹,最大散度值在 400 hPa为3×10⁻⁴ s⁻¹;WSM5方案(图6g1、g2)模 拟暴雨区最大涡度值在600 hPa为4×10⁻⁴ s⁻¹,对应 450 hPa最大散度4×10⁻⁴ s⁻¹。由此也说明,高层有强 烈的辐散作用造成的抽吸作用导致上升运动及底层

辐合的发展,有利于低空急流的形成和维持,为暴 雨区不断输送水汽,造成强降水,相反降水则较弱。

847

5.3 雨水混合比

从过114°E的雨水混合比垂直剖面图 (图7),可 以看出各微物理方案雨水混合比相差比较大,其中





图7 2010年8月18日18时模拟的过114°E的雨水混合比垂直剖面 (单位: g/kg): (a) Lin方案; (b) WSM6方案; (c) WSM3方案; (d) Ferrier方案; (e) Kessler 方案; (f) WSM5方案; (g1) Thompson方案

Fig.7 Pressure-latitude sections (along 114°E) of simulated rain water mixing ratio (units: g/kg) at 1800 UTC 18 Aug 2010: (a) Lin scheme; (b) WSM6 scheme; (c) WSM3 scheme; (d) Ferrier scheme; (e) Kessler scheme; (f) WSM5 scheme; (g) Thompson scheme

Lin方案 (图7a) 和Ferrier方案 (图7d) 模拟的雨水 混合比分别在650 hPa达到最大为2 g/kg, 对应降水 量也为最大; WSM6方案 (图7b) 和WSM5方案 (图 7f) 模拟的雨水混合比在700 hPa达到最大,分别为 1.4 g/kg和1.1 g/kg; Kessler方案 (图7e) 模拟的雨水 混合比在650 hPa达到最大为1.3 g/kg, Thompson方 案 (图7g) 为1 g/kg,此时WSM3方案模拟的雨水混 合比在400 hPa达到最大,为2.4 g/kg,这可能与其 物理过程中所包含的冰相过程和混合相过程有关。

通过上述物理量的分析可以看到,强降水区对 应的是较强的上升运动、较大的正涡度、散度及雨 水混合比,而各微物理参数化方案计算的物理量差 异正是暴雨不同模拟结果的客观写照(伍华平等, 2009)。

6 结论

本文在 36 km、12 km 和 4 km 三种水平分辨率 下,分别采用 WRF 模式中不同的微物理方案,对 2010 年 8 月 18~19 日发生华北地区的强降水过程 进行了敏感性试验,得到以下结论:

(1) 在粗分辨率 (36 km) 情况下, 七个方案 基本上都模拟出了相应时段 24 小时降水落区和 雨带走向,除了 Lin 方案模拟的降水强度与实况 最为接近外,其他方案都偏小 40 mm 左右。其中, Lin 方案模拟的雨带范围和降水强度与实况拟合 得最好, WSM6、新 Thompson 的冰雹方案在雨量 和中心位置模拟相对较好, Kessler 方案模拟的雨 带范围最窄。

(2) 在较细分辨率 (12 km) 情况下, 七种微物 理方案基本上都模拟出了这次暴雨的主要雨带范围 以及走向。其中, Lin方案模拟的雨带位置偏南, 范 围偏小, 但是雨量较实况却偏大一倍之多; Kessler 方案模拟的雨带明显偏窄, 效果最差; WSM5方案、 WSM6方案和WSM3方案模拟效果较好; Ferrier方 案和Lin方案次之。总体而言, Thompson方案模拟 雨带和强降水中心位置与实况拟合得最好。

(3) 在高分辨率 (4 km) 情况下,各微物理方案 都比较好地模拟出了东北一西南走向的雨带,由于 分辨率较低,雨带分辨率不是很高,而且模拟出很 多细小的降水中心,整体上模拟的雨带范围有不同程 度偏小,但是雨量均偏大。Lin方案模拟的雨量强 度整体偏大一倍,最大雨量高达320 mm以上; Kessler 方案模拟效果最差;WSM3方案模拟的降水区域偏小,雨带分界不明显;Etanew方案和Thompson方案 模拟效果与12km分辨率模拟较相近;WSM5方案 模拟较好,但范围略微偏小。在高分辨的情况下, WSM6方案的模拟效果是最好的。

849

(4) 通过各微物理方案的 ETS 评分可以知道, Lin 方案, Thompson 方案和 WSM6 方案在预报华 北暴雨的效果上是比较好的,随着分辨率的提高, WSM6 方案逐步显出优越性,但究竟选取哪一种有 待于更多个例的测试和验证。

(5) 对于同一种方案,随着模式水平分辨率的 提高,预报的降水强度都有一定程度的增加,其中 Lin 方案、WSM6、Ferrier 方案对分辨率比较敏感, Kessler、Thompson 方案增强幅度不如其他方案明 显。Ferrier 方案的细网格模拟效果较好,可以清晰 地看到四条雨带,并且位置和范围拟合得较好。 WSM3 方案对分辨率不是很敏感。

(6) 七种微物理方案模拟的垂直速度、涡度和 散度、雨水混合比存在较大的差别,其中 WSM5 方案的模拟结果可以较好地反应观测实况,也正是 这种差别导致了七种方案的暴雨预报能力产生了 差异。

以上只是对一次典型强降水个例的分析,研究 不同水平分辨率情况下的微物理方案对降水预报的 影响,结论只是初步的。高分辨率情况下,微物理方 案对这种类型的降水的预报性能还有待进行大量个 例的检验。

参考文献(References)

- 陈德辉, 胡志晋, 徐大海, 等. 2004. CAMS大气数值预报模式系统研究 [M]. 北京: 气象出版社, 35-66. Chen Dehui, Hu Zhijin, Xu Dahai, et al. 2004. Studies on the Atmospheric Numerical Prediction Model System (CAMS) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 35-66.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (1): 569–585.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. J. Atmos. Sci., 46 (20): 3077–3107.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 132 (1): 103–120.
- Hong S Y, Juang H M H, Zhao Q Y. 1998. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral Model [J]. Mon. Wea. Rev., 126

(10): 2621-2639

- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Mon. Wea. Rev., 134 (9): 2318–2341.
- 胡向军, 陶健红, 郑飞, 等. 2008. WRF模式物理过程参数化方案简介 [J]. 甘肃科技, 24 (20): 73-75. Hu Xiangjun, Tao Jianhong, Zheng Fei, et al. 2008. Introduction of the physical process parameter scheme in WRF mode [J]. Gansu Science and Technology (in Chinese), 24 (20): 73-75.
- Isidora J, Gallus W A J, Segal M, et al. 2005. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall [J]. Wea. Forecasting, 20 (6): 1048–1060.
- Janjić Z I. 1996. The surface layer in the NCEP Eta Model [C]. Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August, Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, 354–355.
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. J. Atmos. Sci., 47 (23): 2784–2802.
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, the representation of cumulus convection in numerical models [J]. Meteorological Monographs, 24: 165–170.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. J. Climate. Appl. Meteor., 22 (6): 1065–1092.
- 刘奇俊, 胡志晋. 2001. 中尺度模式湿物理过程和物理初始化方法 [J]. 气象科技, 29 (2): 1-11. Liu Qijun, Hu Zhijin. 2001. The wet physical process and physical initialize method of the mesoscale model [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 29 (2): 1-11.
- 楼小凤, 胡志晋, 王鹏云, 等. 2003. 中尺度模式云降水物理方案介绍 [J]. 应用气象学报, 14 (增刊): 49-59. Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, Wang Pengyun, et al. 2003. Introduction to microphysical schemes of mesoscale atmospheric models and cloud models [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (Supplement): 49-59.
- 楼小凤,周秀骥,胡志晋,等. 2004. MM5模式显式微物理方案的对比分 析 [J]. 气象科技, 32 (1): 6-12. Lou Xiaofeng, Zhou Xiuji, Hu Zhijin, et al. 2004. Comparison of explicit microphysical schemes in MM5 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 32 (1): 6-12.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for

inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. J. Geophys. Res., 102 (D14): 16663-16682.

- 牛俊丽, 闫之辉. 2007. WRF 模式微物理方案对强降水预报的影响 [J]. 科技信息, (23): 17-20. Niu Junli, Yan Zhihui. 2007. The effect of rainfall forecast by using microphysical scheme of WRF mode [J]. Science and Technology Information (in Chinese), (23): 17-20.
- Rama Rao Y V, Hatwar H R, Kamal Salah A, et al. 2007. An experiment using the high resolution eta and WRF models to forecast heavy precipitation over India [J]. Pure & Applied Geophysics, 164 (8-9): 1593–1615.
- Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. 1998. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124 (548): 1071–1107.
- Rutledge S A, Hobbs P V. 1983. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands [J]. J. Atmos. Sci., 40 (5): 1185–1206.
- Rutledge S A, Hobbs P V. 1984. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands [J]. J. Atmos. Sci., 41 (20): 2949–2972.
- Ryan B F. 1996. On the global variation of precipitating layer clouds [J]. Bull. Amer. Meteor., 77 (1): 53–70.
- Tao W K, Simpson J, McCumber M. 1989. An ice-water saturation adjustment [J]. Mon. Wea. Rev., 117 (1): 231–235.
- Wicker L J, Wilhelmson R B. 1995. Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm [J]. J. Atmos. Sci., 52 (15): 2675–2703.
- 伍华平, 束炯, 顾莹, 等. 2009. 暴雨模拟中积云对流参数化方案的对比 试验 [J]. 热带气象学报, 25 (2): 175-180. Wu Huaping, Shu Jiong, Gu Ying, et al. 2009. The effects of different cumulus parameterization schemes in WRF on heavy rainfall in Hunan Province [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (2): 175-180.
- 闫之辉,邓莲堂. 2007. WRF模式中的微物理过程及其预报对比试验
 [J]. 沙漠与绿洲气象,1 (6): 1-6. Yan Zhihui, Deng Liantang. 2007. Description of microphysical processes in WRF model and its prediction experiment [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 1 (6): 1-6.