

The Application of Weather Forecast Model WRFV3.3 in the Three Gorges Reservoir Area and the Parameters Sensitivity Analytics*

Meng Jia, Jianzhong Zhou[#], Xiaofan Zeng, Yan Peng

School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan
Email: [#]jz.zhou@hust.edu.cn

Received: Feb. 6th, 2013; revised: Feb. 25th, 2013; accepted: Mar. 11th, 2013

Copyright © 2013 Meng Jia et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In order to achieve high accuracy for precipitation forecast in the Three Gorges Reservoir area, a new generation of numerical weather model WRFV3.3 was applied to simulate two typical precipitation events in the Three Gorges Reservoir area, for evaluating WRF's applicability in the research area. The impacts of different parameterization schemes combination on precipitation simulation were studied by adopting TS and variance analysis, for analyzing sensitivity of the physical process parameterization schemes. The results indicate that WRFV3.3 can simulate typical precipitation events well in the Three Gorges Reservoir area. When the micro-physical process scheme is Lin et al. and the cumulus convective parameterization scheme is Simplified Arakawa-Schubert, the simulation of WRF is better than other parameterization scheme combinations. Comparison of variance analysis shows that the impact of the micro-physical process parameterization schemes on precipitation is similar as the cumulus convective parameterization schemes when rain grade is 0.1 mm and 50 mm, while impact of the micro-physical process parameterization schemes is dominating when rain grade is 10 mm and 25 mm.

Keywords: WRFV3.3; Parameterization Schemes; The Three Gorges Reservoir Area; The TS Score

天气预报模式 WRFV3.3 在三峡库区的应用及参数敏感性试验研究*

贾 梦, 周建中[#], 曾小凡, 彭 艳

华中科技大学水电与数字化工程学院, 武汉
Email: [#]jz.zhou@hust.edu.cn

收稿日期: 2013 年 2 月 6 日; 修回日期: 2013 年 2 月 25 日; 录用日期: 2013 年 3 月 11 日

摘 要: 为实现长江三峡库区的高精度降水预报, 利用新一代天气预报模式 WRFV3.3 对三峡库区两场典型降水过程进行模拟试验, 并采用 TS 评分与极差分析法分析其不同参数化方案组合对降水模拟的影响, 以评估 WRF 模式在三峡库区的区域适用性以及物理过程参数敏感性。结果表明, WRFV3.3 能够较好地模拟三峡库区典型降水过程, 且当 WRF 模式中微物理过程为 Lin et al. 方案、积云对流参数化方案为 Simplified Arakawa-Schubert 方案时, 比其他参数化方案组合能得到更好的模拟效果; 通过

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51239004), 水利部公益性行业科研专项(201001080), 高等学校博士学科点专项科研基金(20100142110012)。

[#]通讯作者。

作者简介: 贾梦(1988-), 男, 汉族, 研究生, 主要从事陆气耦合分布式水文模型研究。

极差分析法比较发现, 对于小雨和暴雨量级的降水, 微物理过程方案和积云对流参数化方案的影响度接近, 但对于中雨和大雨量级的降水, 微物理过程方案的影响占主导地位。

关键词: WRFV3.3; 参数化方案; 三峡库区; TS 评分

1. 引言

长江三峡水库调度兼顾防洪、发电、供水、航运、生态等多方面, 其精确调度需要未来一定时段内的高时空分辨率和高精度降水预报信息。通过提高降水预报精度、提供具有一定预见期的降水信息驱动入库流量预报模型, 以提高入库流量预报精度和预见期, 对制定合理高效的水库调度方案具有极为重要的意义。

利用高分辨率的中尺度气象模式模拟和预报区域降水过程, 是目前降水预报的主要方法。WRF(Weather Research and Forecasting)是由美国开发的新一代中尺度气象研究与预报数值模式及同化系统。研究表明, WRF 模式物理过程参数化方案的优化和改进对数值模式预报准确率的提高起关键作用^[1]。

近年来, 国内外学者针对中尺度数值模式的物理参数化方案已展开相关研究, 闫之辉^[2]等研究不同微物理方案对降水预报的影响, 结果表明 Lin et al.方案的预报效果明显优于其他方案的预报。李刚^[3]等利用 WRFV3.0 对异常典型降水进行集合预报, 研究微物理过程方案、行星边界层方案及积云对流参数化方案对降水预报的影响, 结果表明, 短期预报中集合平均的结果要比各个成员稳定、可靠。陈炯^[4]等利用 WRFV 2.0 对一次江淮暴雨过程进行了模拟, 结果表明, 采用边界层方案的模拟效果更好。针对三峡库区的降水预报, 李强^[5]等通过修改 WRF 模式下垫面, 研究三峡地区长江水体和局地地形在降水和非降水事件中的局地效应, 结果表明, 区域下垫面对三峡地区天气的影响不能忽视。孙建^[6]等利用 WRF 模式和 MM5 模式对 1998 年发生在中国的三次暴雨过程进行了模拟, 结果表明, WRF 模式对降水落区的模拟要优于 MM5 模式。

目前 WRF 模式的发展日趋成熟, 与之相关的物理过程参数化方案也越来越完善^[7-9]。为此, 本文以 WRFV3.3 为试验模式, 对三峡库区的两场夏季典型降水过程进行模拟预报试验, 确定适用于该地区的 WRFV3.3 模式参数化方案组合, 以提高降水预报效

果, 并研究了不同参数化方案对降水预报的影响。

2. WRFV3.3 在三峡库区的应用

WRF 模式重点考虑从云尺度到天气尺度等重要天气的预报, 水平分辨率重点考虑 1~10 km。因此, 模式包含高分辨率非静力应用的优先级设计、大量的物理选择、以及与模式本身相协调的、先进的资料同化系统。本文采用 WRFV3.3 的 ARW 版本, 其动力框架采用完全可压缩欧拉非静力方程; 垂直坐标采用地形跟随静力气压坐标, 水平为荒川 C 网格, 时间为 3 阶龙格库塔分离格式。

考虑三峡库区所在的地理位置, 本文建立了双层嵌套的数值预报模型, 母域覆盖东亚地区, 子域主要涵盖三峡库区, 中心点均为 30.70N°、110E°, 投影方式为兰伯特投影。母域和子域的格距分别为 30 km、10 km, 网格数分别为 150 × 80、76 × 46, 粗网格采用 2 min 地形资料, 细网格采用 30 s 地形资料, 垂直方向采用 η 区域, 分为 27 层, 模拟区域如图 1 所示。

WRFV3.3 提供 13 种微物理过程方案, 9 种积云过程参数化方案。结合不同方案的物理意义及适用条件, 本研究对三峡库区初步选取 4 种微物理过程方案、3 种积云对流过程参数化方案进行方案组合, 以分析 WRFV3.3 不同参数化方案对库区降水模拟精度的影响以及参数敏感性。同时, 长波辐射方案为 RRTM 方案, 短波辐射方案为 Goddard 方案, 近地面层方案为

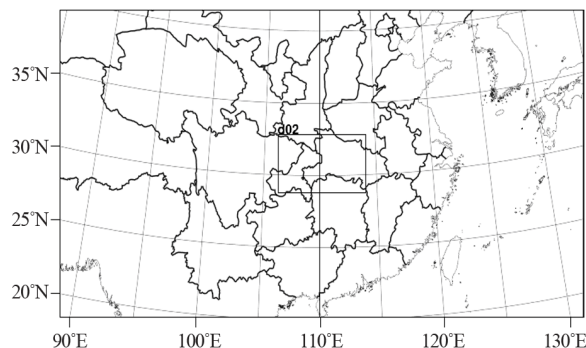


Figure 1. Double nested simulation area in WRFV3.3
图 1. WRFV3.3 双重嵌套模拟区域

Eta similarity 方案, 陆面过程方案为 Noah 方案, 边界层方案为 Mellor-Yamada-Janjic 方案。模式的初始场和侧边界条件由 NCEP 提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ FNL 资料生成, 边界更换时间为 6 h。研究工作以 2007 年 7 月 16 日 8 时至 2007 年 7 月 17 日 8 时、2007 年 7 月 19 日 8 时至 2007 年 7 月 20 日 8 时为两个典型模拟时段, 分别计算了 12 种备选参数化方案组合下的 WRF 模式模拟降水过程, 详见表 1。

3. 模拟效果分析

3.1. 分析方法

研究工作利用 TS 评分方法对结果进行检验分析。将降水分为 4 个不同的量级, 0.1 mm~10 mm 为小雨、10 mm~25 mm 为中雨、25 mm~50 mm 为大雨、大于 50 mm 为暴雨及以上量级。对 WRFV3.3 模拟的不同量级降水, 分别计算 TS 评分。其经典计算公式定义如下:

$$T_s = \frac{A_c}{A_f + A_o + A_c} \quad (1)$$

A_f 是模拟预报发生降水的格点数; A_o 为实况观测降水的格点数; A_c 为模拟和实况观测同时发生降水的格点数。

Table 1. Different combination of schemes in WRFV3.3
表 1. WRFV3.3 中不同参数化方案组合

编号	微物理过程	积云对流参数化方案
1	Kessler	Kain-Fritsch
2	Kessler	Betts-Miller-Janjic
3	Kessler	Simplified Arakawa-Schubert
4	Lin et al.	Kain-Fritsch
5	Lin et al.	Betts-Miller-Janjic
6	Lin et al.	Simplified Arakawa-Schubert
7	WRF Single-Moment 3-class	Kain-Fritsch
8	WRF Single-Moment 3-class	Betts-Miller-Janjic
9	WRF Single-Moment 3-class	Simplified Arakawa-Schubert
10	WRF Single-Moment 5-class	Kain-Fritsch
11	WRF Single-Moment 5-class	Betts-Miller-Janjic
12	WRF Single-Moment 5-class	Simplified Arakawa-Schubert

3.2. TS 结果分析与参数组选择

如表 2、表 3 所示。在小雨与中雨的评分中, 除 2 号成员外, 2007 年 7 月 16 日的评分均低于 2007 年 7 月 19 日的评分; 在大雨的评分中, 两场降水的评分结果不稳定, 部分成员在不同降水的评分上相差较大, 如 2007 年 7 月 16 日的 2 号成员评分为 0.414,

Table 2. The TS scores of WRF simulated precipitation on July 16, 2007 in Three Gorges Reservoir
表 2. 三峡库区 2007 年 7 月 16 日 WRF 模拟降水 TS 评分

编号	小雨	中雨	大雨	暴雨
1	0.936	0.506	0.235	0.032
2	0.936	0.54	0.414	0
3	0.936	0.506	0.131	0
4	0.936	0.533	0.211	0.023
5	0.936	0.506	0.239	0
6	0.936	0.5	0.169	0
7	0.936	0.513	0.235	0
8	0.936	0.514	0.319	0
9	0.936	0.506	0.18	0
10	0.936	0.513	0.197	0.025
11	0.936	0.506	0.25	0
12	0.936	0.506	0.22	0

Table 3. The TS scores of WRF simulated precipitation on July 19, 2007 in Three Gorges Reservoir
表 3. 三峡库区 2007 年 7 月 19 日 WRF 模拟降水 TS 评分

编号	小雨	中雨	大雨	暴雨
1	0.974	0.522	0.233	0.077
2	0.962	0.367	0.068	0.042
3	0.962	0.536	0.326	0.04
4	0.974	0.597	0.26	0.097
5	0.962	0.569	0.239	0.097
6	0.962	0.696	0.479	0.143
7	0.962	0.612	0.25	0.107
8	0.962	0.603	0.13	0.08
9	0.962	0.536	0.277	0.111
10	0.962	0.621	0.245	0.107
11	0.962	0.631	0.378	0.077
12	0.962	0.648	0.396	0.077

而 2007 年 7 月 19 日的 2 号成员评分仅为 0.068; 在暴雨的评分中, 2007 年 7 月 16 日有 9 组成员的评分出现了结果为 0 的情况, 模拟效果相对于 2007 年 7 月 19 日的评分结果较差。

以上分析表明, 降水模拟结果具有一定的不确定性, 同性质而不同时段降水过程在评分结果上会表现出一定的差异。为消除偶然因素带来的影响, 可以认为各场降水过程所受物理方案的影响是相同的。因此本研究采用等权重方法, 利用多场降水的平均 TS 评分对 WRFV3.3 的综合模拟效果进行检验, 即:

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (2)$$

其中: n 为降水场数; f_i 为同类组合预报成员 TS 评分; \bar{f} 为同类组合预报成员平均 TS 评分。

根据公式(2), 得到两场降水的平均 TS 评分并绘制评分图, 如图 2 所示。

根据表 4 绘制出两场降水各量级平均 TS 评分图, 如图 2 所示。综合比较发现, 6 号组合方案在所有成员中表现最好, 即微物理过程方案为 Lin et al. 方案、积云对流参数化方案为 Simplified Arakawa-Schubert 方案, 能够较好地模拟三峡库区两次典型降水过程。

3.3. 物理方案敏感性分析

上文比较分析了各预报成员对不同量级降水的平均 TS 评分, 其中引起各成员评分变化的根本原因是物理过程参数化方案的不同。为揭示不同物理过程参数化方案对降水预报精度的影响, 李刚^[3]等引入极差分析法, 深入研究了 WRFV3.0 积云参数化方案和行星边界层方案的敏感性并取得了较好效果。

本研究采用的 WRFV3.3 相对于 WRFV3.0 有较大改进, 物理过程参数化方案更为丰富。为了探究 WRFV3.3 在三峡库区应用中微物理过程方案与积云对流参数化方案对降水模拟的影响, 进而确定研究组合中影响降水模拟精度的主导方案, 本文在表 1 方案组合的基础上, 设计了不同的组合方案分别进行分析^[3]。为此, 将具有相同积云对流参数化方案的成员进行组合, 以分析微物理过程方案对降水过程的影响, 其中成员 1、4、7、10 为方案 a, 成员 2、5、8、11 为方案 b, 成员 3、6、9、12 为方案 c; 而将具有相同微物理过程方案的成员进行组合, 以分析积云对流参数化方案对降水过程的影响, 其中成员 1、2、3 为方案 d, 成员 4、5、6 为方案 e, 成员 7、8、9 为方案 f, 成员 10、11、12 为方案 g。组合方案详见表 4。

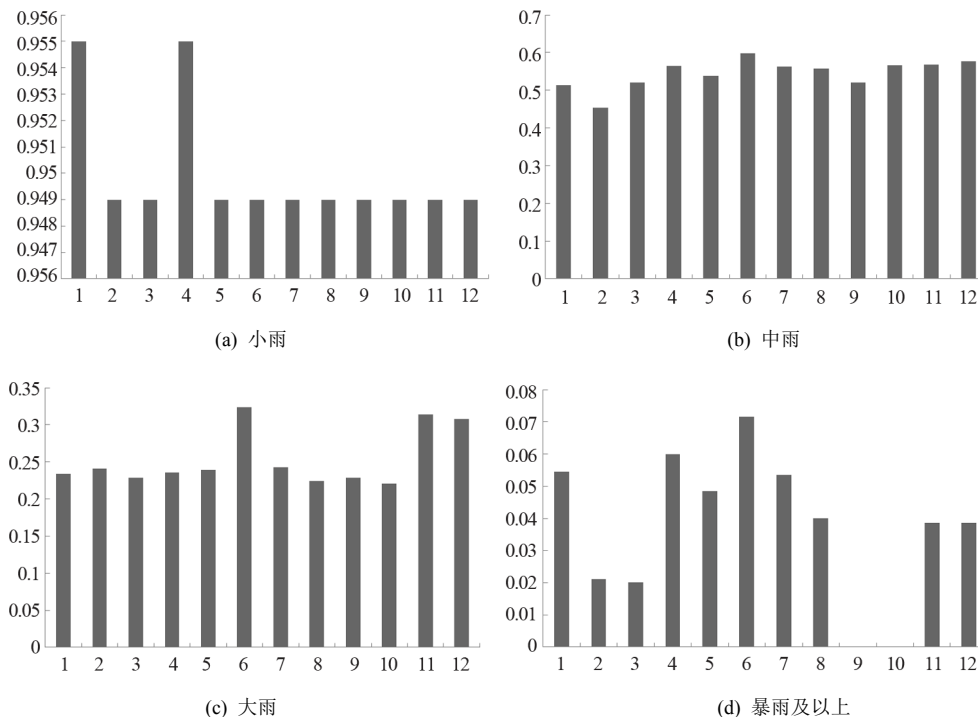


Figure 2. The average TS score of the two precipitation
图 2. 两场降水不同量级降水的平均 TS 评分

Table 4. The combination table of parameter sensitivity analysis
表 4. 参数敏感性分析组合表

编号	微物理过程组合方案	编号	积云对流参数化过程组合方案
a	1、4、7、10	d	1、2、3
b	2、5、8、11	e	4、5、6
c	3、6、9、12	f	7、8、9
		g	10、11、12

根据各预报成员对不同量级降水模拟的平均 TS 评分, 分别计算 7 组方案中各量级降水平均 TS 评分的极差, 其极差反映了相应的参数化方案对降水模拟的影响度^[3], 统计结果详见表 5、表 6。

由表 5 和表 6 可知, 对于小雨量级的降水, 微物理过程方案和积云对流参数化方案中各个方案的影响度分别为 0.002、0.0025, 表明微物理过程方案和积云对流参数化方案对该量级降水的影响差别较小; 对于中雨及大雨量级的降水, 微物理过程方案对降水的影响度大于积云对流参数化方案, 这说明 WRFV3.3 在中雨及大雨量级的降水模拟过程中, 微物理过程方案的影响占主导地位; 对暴雨及以上量级的降水, 微物理过程方案和积云对流参数化方案的影响度差值仅为 0.0061, 可见两类参数起共同主导作用。总体而言, 微物理过程方案对降水的影响要大于积云对流参数化方案对降水的影响, 产生这种状况的原因主要有两点: 1) 微物理过程的加热和冷却作用对云系动力场的结构、垂直气流强度有重要影响, 这种动力场的变化, 对水汽场、云场和降水的影响较大; 2) 研究过程中格距为 10 km 的细网格每 5 分钟调用一次积云对流参数化方案, 调用频率低于微物理过程方案的调用频率, 因此会降低积云对流参数化方案对各量级降水模拟的贡献率。由此可见, 加强对数值预报模式微物理过程方案的研究是提高降水预报精度的有效途径之一。

4. 结论

本文针对三峡库区 2007 年 7 月两次强降水过程, 以 WRFV3.3 作为数值预报试验模式, 选取模式中不同的微物理过程方案和不同的积云对流参数化方案进行组合, 对每场降水构造 12 个预报成员, 进行了模拟预报试验, 并通过 TS 评分与等权重方法进行模拟效果评估, 得到以下结论:

Table 5. The difference in the average TS score of MP
表 5. 微物理过程平均 TS 评分极差比较

降水量级	a	b	c	平均
小雨	0.006	0	0	0.002
中雨	0.053	0.115	0.077	0.0817
大雨	0.0085	0.0895	0.0955	0.09
暴雨及以上	0.0125	0.0275	0.0515	0.0305

Table 6. The difference in the average TS score of CU
表 6. 积云对流参数化方案平均 TS 评分极差比较

降水量级	d	e	f	g	平均
小雨	0.006	0.004	0	0	0.0025
中雨	0.0675	0.0605	0.0415	0.01	0.0449
大雨	0.0125	0.0885	0.018	0.107	0.0565
暴雨及以上	0.0345	0.023	0.0135	0.0275	0.0246

1) 试验结果表明, WRFV3.3 本土化运行是成功的。其中, 微物理过程方案为 Lin et al. 方案、积云对流参数化方案为 Simplified Arakawa-Schubert 方案时较其它方案表现更优, 可为长江三峡库区的高精度水文预报作业提供重要的降水信息。

2) 降水模拟具有一定的不确定性, 同性质而不同时段降水过程在评分结果上会表现出一定的差异。

3) 微物理过程方案与积云对流参数化方案对降水模拟具有不同的影响度。对于小雨和暴雨及以上量级的降水, 两方案的影响度接近; 而对于中雨和大雨量级的降水, 微物理过程方案的影响度要高于积云对流参数化方案, 主要原因是微物理过程的加热和冷却作用对水汽场、云场有影响, 并且积云对流参数化方案的调用频率限制也会对降水模拟产生一定影响。加强对微物理过程的研究有利于提高数值天气预报模式降水模拟精度。

研究模式中的子域格距仅为 10 km, 还可逐步提高空间分辨率。同时, 降水模拟只针对汛期两场典型的强降水过程, 不能完全代表三峡库区的降水特性。WRF 模式在三峡库区的合理应用和优化有待进一步深入研究和探索。

参考文献 (References)

- [1] 陈德辉, 薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气

- 象学报, 2004, 62(5): 623-633.
CHEN Dehui, XUE Jishan. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 623-633. (in Chinese)
- [2] 闫之辉, 邓莲堂. 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*, 2007, 1(6): 1-6.
YAN Zhihui, DENG Liantang. Description of microphysical processes in WRF model and its prediction experiment. *Desert and Oasis Meteorology*, 2007, 1(6): 1-6. (in Chinese)
- [3] 李刚, 王铁, 谭言科, 等. WRF3.0 参数化敏感性及集合预报试验[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 11(1): 89-96.
LI Gang, WANG Tie, TAN Yanke, et al. Impact of parameterization schemes in WRF3.0 model on numerical simulation of rainstorm and experiment of ensemble forecast. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 11(1): 89-96. (in Chinese)
- [4] 陈炯, 王建捷. 边界层参数化方案对降水预报的影响[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(z1): 11-17.
CHEN Jiong, WANG Jianjie. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(z1): 11-17. (in Chinese)
- [5] 李强, 刘德, 陈贵川, 李永华, 王中. 基于 WRF 三峡地区不同区域降水中下垫面效应数值试验研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 6: 739-748.
LI Qiang, LIU De, CHEN Guichuan, LI Yonghua and WANG Zhong. Numerical experimentation study of the local underlying surface effect on different regional precipitation in the Three Gorges Area based on WRF model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 6: 739-748. (in Chinese)
- [6] 孙健, 赵平. 用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比分析[J]. *气象学报*, 2003, 61(6): 692-701.
SUN Jian, ZHAO Ping. Simulation and analysis of three heavy rainfall processes in 1998 with WRF and MM5. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(6): 692-701. (in Chinese)
- [7] GRELL, G. A., DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14): 1693-0.
- [8] PLEIM, J. E. A combined local and non-local closure model for the atmospheric boundary layer. Part 1: Model description and testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(09): 1383-1395.
- [9] HONG, S. Y., DUDHIA, J, CHEN, S. H., et al. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 103-120.