

Study on Applicable Parameterization Schemes of WRF in the Jinshajiang River Basin

Zijun Mai, Xiaofan Zeng*, Jianzhong Zhou, Hairong Zhang

School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan Hubei
Email: *zengxiaofan@hust.edu.cn

Received: Jul. 25th, 2016; accepted: Aug. 8th, 2016; published: Aug. 16th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

To select applicable parameterization schemes combinations of WRF for rainfall simulation and forecasting in the Jinshajiang River basin, different combinations of microphysics, boundary layer and cumulus convection parameterization schemes and different nesting frameworks of WRF are evaluated in this research, by simulating four typical daily rainfall events in flood period. Based on TS and the spatial distributions, the results show that WRF with selective parameterization schemes is suitable for rainfall simulation in the Jinshajiang River basin. The impacts of microphysics and boundary layer schemes are relative bigger than those of cumulus convection scheme, and optimal combinations of microphysics and boundary layer schemes can achieve a better simulation. When microphysics, boundary layer and cumulus convection parameterization schemes apply combinations of WRF Single-Moment 3-class, YSU, Kain-Fritsch (new Eta) or combinations of Ferrier (new Eta), Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE and Kain-Fritsch (new Eta), the magnitude and the spatial distributions of the simulated rainfall by WRF are more consistent with the observed rainfall.

Keywords

WRF, Parameterization Scheme, Rainfall Simulation, The Jinshajiang River Basin

适用于金沙江流域降水模拟的WRF模式参数化方案研究

麦紫君, 曾小凡*, 周建中, 张海荣

华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉

作者简介: 麦紫君(1992-), 女, 研究生, 主要从事水文水资源与水电优化运行等工作。

*通讯作者。

Email: *zengxiaofan@hust.edu.cn

收稿日期: 2016年7月25日; 录用日期: 2016年8月8日; 发布日期: 2016年8月16日

摘要

为确定适宜于金沙江流域降水模拟及预报的WRF模式参数化方案组合, 针对流域四场典型降水过程, 通过构造WRF模式中不同微物理过程、边界层和积云对流参数化方案组合, 对WRF模式在金沙江流域的降水模拟进行了试验研究。基于TS评分和降水空间分布的比较, 研究表明, 优选参数化方案组合的WRF模式适用于金沙江流域降水模拟及预报, 且微物理过程和边界层方案的选择对降水模拟影响较大, 两者之间的适宜组合能达到较好的模拟效果, 而积云对流参数化方案的影响相对较小。当微物理过程、边界层、积云对流参数化方案采用WRF Single-Moment 3-class、YSU、Kain-Fritsch (new Eta)组合或Ferrier (new Eta)、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE、Kain-Fritsch (new Eta)组合, WRF模式模拟降水与实测降水的量级及空间分布更为相符。

关键词

WRF模式, 参数化方案, 降水模拟, 金沙江流域

1. 引言

金沙江流域作为我国最大的水电基地, 是“西电东送”主力, 水能资源蕴藏量达 1.124 亿千瓦, 主要位于青藏高原东侧地区, 而青藏高原东侧作为高原大地形与我国东部平原的过渡区, 受热带季风、副热带季风以及高原季风的影响, 气候非常复杂[1]。对金沙江流域开展短期降水模拟和预报研究, 可有效提高该地区降水预报精度, 并为流域水文预报和水电能源科学调控提供有效参考。

目前研究中, 针对区域降水事件及其模拟和预报, 主要是利用高分辨率的中尺度气象模式进行分析[2]-[4]。研究表明, 中尺度数值模式不同参数化方案的选择, 对降水的模拟和预报结果有很大影响[5]-[11]。数值天气预报模式 WRF (Weather Research and Forecasting)是由美国国家大气研究中心、美国国家海洋大气管理局、美国天气预报系统实验室和 Oklahoma 大学的暴雨分析预报中心等美国多家科研机构联合发展的天气研究和预报模式, 是继 MM5 模式之后的新一代非静力平衡的中尺度预报和资料同化模式[12]。对 WRF 模式模拟和预报降水而言, 不同区域所适合的参数化方案存在区别, 需根据具体地区选择合适的参数化方案及其组合[13]-[16]。

为此, 本文以金沙江流域为研究对象, 研究 WRF 模式不同物理过程参数化方案组合对该流域降水模拟的影响, 以确定适用于该地区的 WRF 模式参数化方案组合, 从而使 WRF 模式用于金沙江流域降水预报时具有较好的预报精度。

2. 研究区及数据

金沙江流域位于长江流域上游地区, 地处青藏高原、云贵高原和四川盆地西部边缘, 自江源至四川宜宾全长 3496 km, 流域面积约 47 万 km²。金沙江流域流经青藏高原、川西高原、横断山区、云贵高原、川西南山地五大地形地貌单元, 气候类型多样, 降雨具有明显的季节变化和区域差异, 冬季最低, 夏季最高。

为分析 WRF 模式在金沙江流域的降水模拟效果, 本文采用典型降雨过程的实测雨量数据与模式模拟结果进行比较。其中, 实测雨量数据来源于金沙江流域及周边 60 个观测雨量站的逐日降水资料, 其地理位置见图 1。

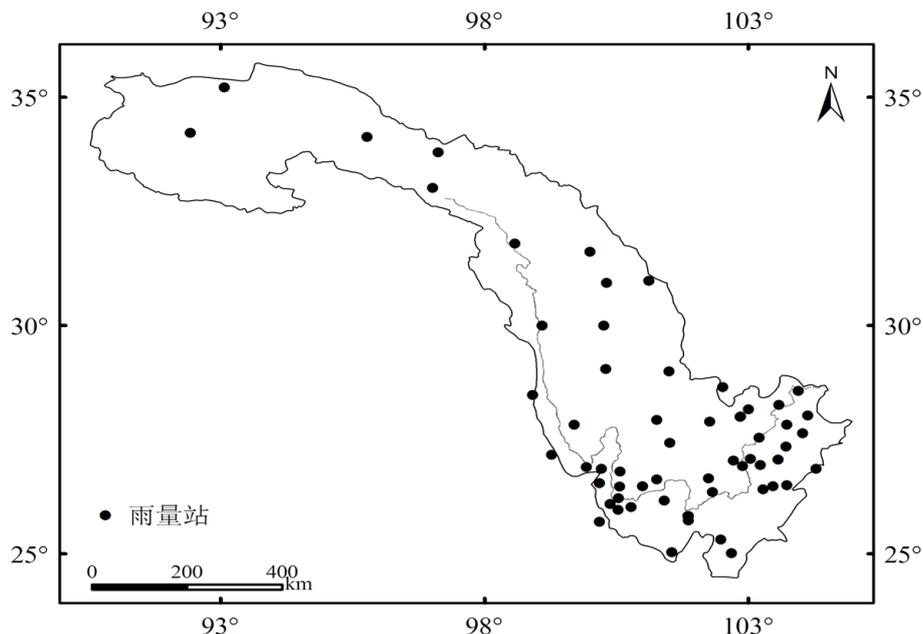


Figure 1. Locations of rainfall stations in the Jinshajiang River basin and its adjacent area
图 1. 金沙江流域及周边 60 个观测雨量站

3. 试验方案建立

本文利用 WRFV3.3 建立模拟金沙江流域降水的数值天气模式。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，垂直方向都采用 η 坐标，分为 27 层。本研究中长波辐射方案为 RRTM 方案，短波辐射方案为 Goddard 方案，近地面层方案为 Eta similarity 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，边界更新时间为 6 h。WRF 模式在区域嵌套设置上有多重嵌套选择，也可以采用未嵌套技术。考虑到模式的计算运行效率及结构简化，本研究采用 WRF 模式的未嵌套结构，计算区域的中心点坐标为 29.21°N 、 99.08°E ，投影方式为兰伯特投影，水平分辨率为 10 km，网格数为 349×236 ，网格范围基本覆盖长江上游干流的主要天气系统。

由于 WRF 模式不同参数化方案对降水模拟的影响较大，其中，陆面过程、微物理过程、边界层和积云对流参数化方案的选择对降水模拟结果更为明显。王红丽等研究表明，在西南地区使用 Noah 方案的 WRF 模式对于降水过程的模拟具有一定的精度[17]。针对陆面过程的研究相对成熟，而且采用为 Noah 方案通常能够取得较好的效果[18][19]，因此本文中 WRF 模式陆面过程也选用 Noah 方案。此外，对于 WRF 模式，通常认为积云参数适用于大于 10 km 的粗网格，网格距小于 5 km 时不适用积云参数，网格距在 5 至 20 km 时为“灰色区”，可以考虑使用积云参数[13][20]。因此，结合 WRF 模式不同参数化方案的物理意义和本研究中的模式网格距设置，在金沙江流域初步选取 5 种微物理过程方案、3 种边界层方案和 3 种积云对流的参数化方案进行方案组合，共组成 45 种备选参数化方案组合，以分析 WRFV3.3 不同方案对金沙江流域降水模拟的影响。其中，微物理过程的备选方案包括：Kessler 方案、Lin et al.方案、WRF Single-Moment 3-class 方案、WRF Single-Moment 5-class 方案和 Ferrier (new Eta)方案；边界层备选方案包括：YSU 方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案和 ACM2 (Pleim)方案；积云对流参数化过程的备选方案包括：Kain-Fritsch (new Eta)方案、Betts-Miller-Janjic 方案和 Grell-Devenyi ensemble 方案。

另外，本文评估 WRF 模式降水模拟效果主要根据 TS 评分指标，因此需将 WRF 模式输出的格点降水匹配为实测站点的降水。本研究基于距离最近的原则，初步采用三种赋值方法将格点降水转换为邻近的雨量站点降水值，

包括：① 单点赋值法，即对于每个雨量站，找到 WRF 模式网格中与其距离最近的 1 个格点，将格点的降雨模拟值直接赋给该雨量站；② 算术平均法，即对于每个雨量站，找到与其距离最近的 3 个模式格点，将三个格点的降雨进行算术平均后赋值为该雨量站的降水；③ 反距离权重法，即对于每个雨量站，找到与其距离最近的 3 个模式格点，以不同格点到该雨量站的距离平方的倒数为权重，将各格点的权重系数乘以各格点降水并求和后赋值给该雨量站。本研究中比较三种赋值方法得到的 TS 评分发现，三种赋值方法对模拟结果的 TS 评分影响相差不大，总体上算术平均法的 TS 评分结果略高于其他两种，本研究直接采用反距离插值法将格点降水匹配到站点降水。

其中，采用的 TS 评分方法将降水分为 4 个不同的量级，即 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。对模拟的不同量级降水，分别计算 TS 评分。TS 反映了对降水有效预报的准确程度，评分在 0~1 之间。当 TS = 1 时，预报与实况完全吻合；当 TS = 0 时，预报与实况完全不符合。其计算公式如下，其中 NA、NB、NC 的定义见表 1。

$$\text{TS 评分公式: } \text{TS} = \frac{\text{NA}}{\text{NA} + \text{NB} + \text{NC}}。$$

4. 模拟结果及分析

4.1. 典型降水过程

为与 NCEP-FNL 资料的可获取时段一致，本文分析了金沙江流域 1999~2010 年实测降雨资料，并选取四次流域日平均降雨量最大的降雨过程，以通过 WRF 模式进行降水模拟分析。四次典型降水过程分别为 2001 年 7 月 28 日、2002 年 8 月 9 日、2003 年 6 月 6 日和 2007 年 7 月 20 日，均发生在流域主汛期 6~8 月，且暴雨中心主要位于金沙江流域中下游地区。与四场典型降水过程相对应且为了避免出现模式初期的 Spin-up 问题，WRF 模式的模拟期分别为 2001 年 7 月 27 日 00 时至 2001 年 7 月 29 日 00 时、2002 年 8 月 8 日 00 时至 2002 年 8 月 10 日 00 时、2003 年 6 月 5 日 00 时至 2003 年 6 月 7 日 00 时、2007 年 7 月 19 日 00 时至 2007 年 7 月 21 日 00 时(均为世界时)，时间步长设定为 90 s，每 1 h 输出 1 次模拟结果。

4.2. 参数化方案组合的初步选择

本研究中选取 5 种微物理过程方案、3 种边界层方案和 3 种积云对流过程参数化方案，通过不同方案组合共组成 45 种备选参数化方案集。为初步选取适合金沙江流域的 WRF 模式参数化方案组合，针对四次典型降水过程，采用未嵌套结构模拟 45 种方案下的流域降水，计算 45 种备选参数化方案集的 TS 评分，并根据 TS 评分结果选出六种评分较高的方案，这些方案基本上在四场降水模拟中的模拟结果均较好。

初步选出的六种降水模拟效果较好的微物理过程、边界层、积云对流参数化方案集包括：① Lin et al. scheme 方案、YSU 方案、Kain-Fritsch (new Eta)方案组合(称为组合 1)；② WRF Single-Moment 3-class 方案、YSU 方案、Kain-Fritsch (new Eta)方案组合(称为组合 2)；③ Lin et al. scheme 方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案、Grell-Devenyi ensemble 方案组合(称为组合 3)；④ Lin et al. scheme 方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案、Kain-Fritsch (new Eta)方案组合(称为组合 4)；⑤ Lin et al. scheme 方案、ACM2 (Pleim)方案、Kain-Fritsch (new Eta)方案组合(称为组合 5)；⑥ Ferrier (new Eta)方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案、Kain-Fritsch (new Eta)方案组合(称为组合 6)。以小雨以上等级为例，六种方案在未嵌套结构下的 TS 评分结果见表 2。

4.3. 优选参数化方案组合

进一步根据表 2 对 WRF 模式采用未嵌套结构时模拟的小雨以上等级的 TS 评分进行排序(见表 3)，可以发现：针对四次典型降水过程的模拟，组合 2 即微物理过程、边界层、积云对流参数化方案分别为 WRF Single-Moment 3-class 方案、YSU 方案、Kain-Fritsch (new Eta)方案，在排名前 2 位的出现次数最多，为 4 次；

Table 1. The definition of NA, NB and NC
表 1. NA、NB 和 NC 定义

实况	预报	
	有降水	无降水
有降水	NA	NC
无降水	NB	ND

Table 2. TS score of accumulated light rain grade under unnesting framework for six schemes
表 2. 六种方案在未嵌套结构下小雨以上等级的 TS 评分

降水过程	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6
2001 年 7 月 28 日	0.857	0.896	0.898	0.898	0.896	0.898
2002 年 8 月 9 日	0.936	0.936	0.896	0.917	0.957	0.915
2003 年 6 月 6 日	0.936	0.957	0.936	0.936	0.936	0.956
2007 年 7 月 20 日	0.946	0.930	0.946	0.930	0.929	0.946

Table 3. Ranking of TS score of accumulated light rain grade for six schemes
表 3. 六种方案根据小雨以上等级的 TS 评分排序

降水过程	排名 1	排名 2
2001 年 7 月 28 日	组合 3、4、6	组合 2、5
2002 年 8 月 9 日	组合 5	组合 1、2
2003 年 6 月 6 日	组合 2	组合 6
2007 年 7 月 20 日	组合 1、3、6	组合 2、4

其次是组合 6 即微物理过程、边界层、积云对流参数化方案分别为 Ferrier (new Eta) 方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案、Kain-Fritsch (new Eta) 方案, 为 3 次; 其他几种组合则次数一致, 均为 2 次。

为此, 将 WRF 模式应用于金沙江流域进行降水模拟及预报时, 对微物理过程、边界层、积云对流参数化方案的组合可主要考虑采用 WRF Single-Moment 3-class 方案、YSU 方案、Kain-Fritsch (new Eta) 方案的组合或 Ferrier (new Eta) 方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案、Kain-Fritsch (new Eta) 方案的组合。

4.4. 优选组合下的降水模拟空间特征

基于优选出的参数化方案组合 2 和组合 6, 以 2001 年 7 月 28 日的降水过程为例, 将两种组合模拟的格点降水通过反距离权重法进行空间插值后在 ArcMap 中显示(见图 2(b)、图 2(c)), 并将其与实测降水过程的空间分布特征(见图 2(a))进行比较, 得到模拟降水与实测降水的空间差异分布(见图 2(d)、图 2(e))。

可以看出, 组合 2 与组合 6 模拟的降水空间分布较为一致, 降水中心位于金沙江流域干流中下游, 两种组合模拟降水与实测降水的空间差异也比较一致, 均主要表现为模拟降水在流域道孚、新龙一带偏高, 且组合 6 模拟降水比实测降水偏高的地区比组合 2 要大。整体而言, 除小部分地区模拟降水比实测值偏高 10 mm 以上, 两种组合模拟降水与实测降水的相差不大, 绝大部分地区差值幅度不超过 10 mm。

4.5. 优选参数化方案组合分析

由上文可知, TS 评分排名前六的组合中有 5 个组合的积云对流参数化方案均为 Kain-Fritsch (new Eta) 方案, 包括组合 2 和组合 6。可以认为在金沙江流域, 不论微物理过程和边界层方案采用 WRF Single-Moment 3-class

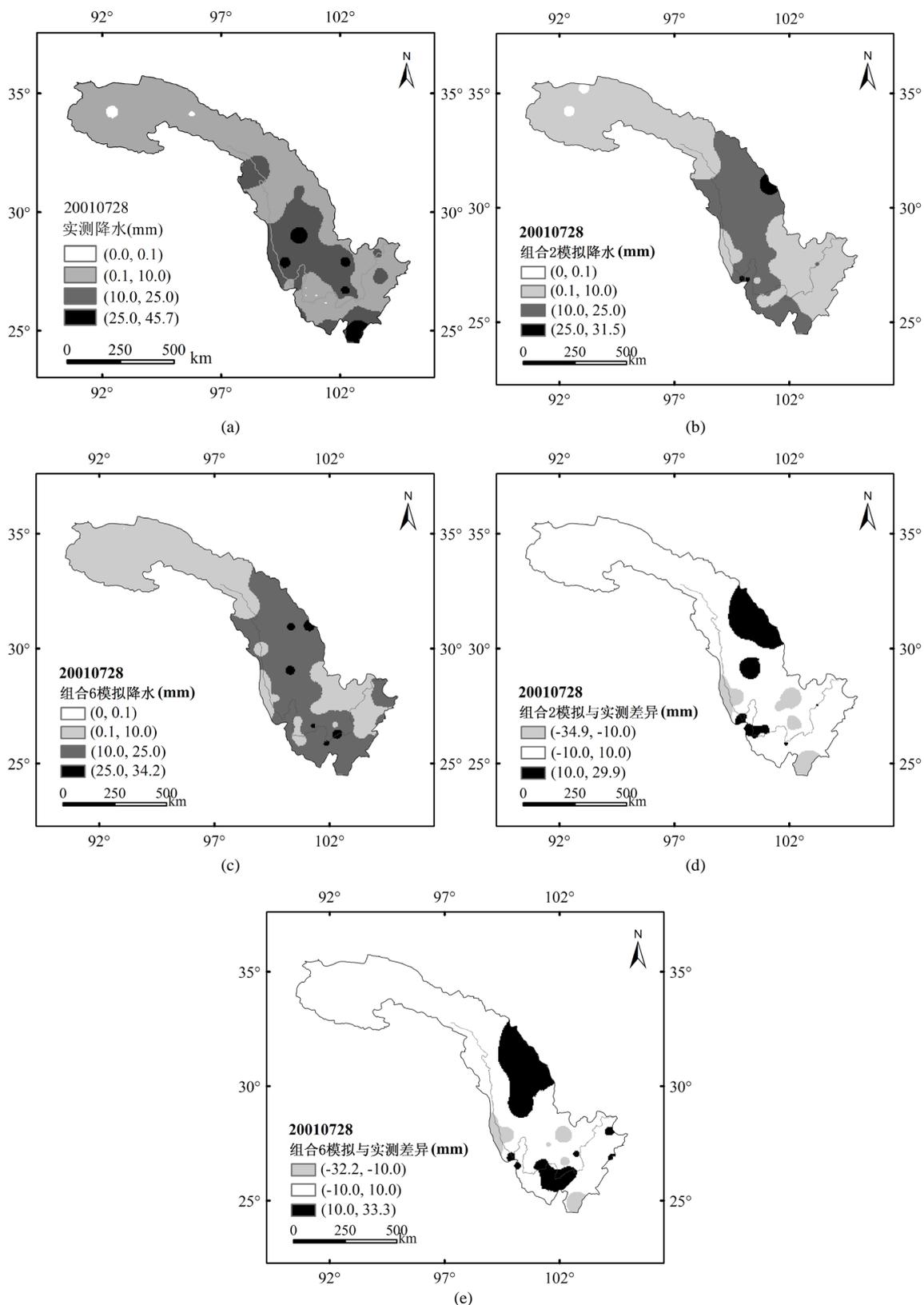


Figure 2. Simulated rainfalls and difference with observed rainfall under different parameterization schemes of WRF
 图 2. WRF 模式不同参数化方案组合的模拟降水及其与实测降水差异

方案、YSU 方案组合或 Ferrier (new Eta)方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案组合, 积云对流参数化方案均配合采用 Kain-Fritsch (new Eta)方案时模拟降水效果较好。

对四次典型降水过程的模拟结果表明, 在金沙江流域, WRF 模式中微物理过程和边界层方案的选择对流域降水模拟的影响比较敏感, 而且两者之间的适宜组合才有助于提高降水模拟的精度, 如微物理过程 Lin et al. scheme 方案虽然在初步选出的六种组合中出现次数较多, 但在方案组合的选择上并不具有突出优势。当微物理过程和边界层方案以及积云对流参数化方案的组合整体上符合金沙江流域汛期天气的发生发展机制时, WRF 模式的模拟降水基本上能把握实测降水的空间分布与雨量等级。

5. 结论

本文以金沙江流域为研究区域, 选择流域 4 次汛期典型降雨过程, 利用中尺度天气模式 WRFV3.3 模拟流域降水情势, 通过构造模式中不同微物理过程、边界层和积云对流参数化方案组合, 对 WRF 模式在金沙江流域的降水模拟进行了试验研究, 以选择适合金沙江流域降水模拟及预报的 WRF 模式参数化方案组合。主要结论为:

1) 通过利用 WRF 模式 45 种参数化方案组合对四次典型降水过程的模拟及 TS 评分表明, WRF 模式总体上够应用于金沙江流域的降水模拟及预报, 模拟结果具有一定精度, 其中小雨以上等级的 TS 评分约在 .85 以上。在优选参数化方案组合的基础上, WRF 模式模拟降水与实测降水在大部分地区的差值在 10 mm 以内。

2) 在金沙江流域, 微物理过程和边界层方案的选择对降水模拟的影响比较大, 而且两者之间的适宜组合才能达到较好的模拟效果, 积云对流参数化方案的影响相对较小。根据对四次典型降水过程的模拟结果分析可知, 当微物理过程和边界层方案采用 WRF Single-Moment 3-class 方案、YSU 方案组合或 Ferrier (new Eta)方案、Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE 方案组合, 积云对流参数化方案均配合采用 Kain-Fritsch (new Eta)方案时, WRF 模式在金沙江流域的模拟降水与实测降水的空间特征、雨量等级更为相符。

本研究表明, 优选参数化方案组合及模式结构的 WRF 模式适用于金沙江流域降水模拟及预报, 可以为金沙江流域的高精度水文预报作业提供重要的降水信息, 延长水文预报的预见期, 对金沙江流域的发电调度具有重要意义。本文只选取 4 次典型降水过程进行模拟, 不能完全代表金沙江流域的降水特性, 还有待于挑选更多场次的降水过程。而金沙江流域所在的西南地区, 地形极为复杂, 未来工作中应进一步研究改进后的陆面过程和其他陆面过程对模拟的影响。同时, 对 WRF 模式不同参数化方案组合的集合预报也值得深入研究。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51239004, 91547208, 51309105)。

参考文献 (References)

- [1] CAO, J., HU, J. M. and TAO, Y. An index for the interface between the Indian summer monsoon and the East Asian summer monsoon. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(D18): 108.
- [2] 王欢, 倪允琪. 2003 年淮河汛期一次中尺度暴雨过程的诊断分析和数值模拟研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(6): 734-742. WANG Huan, NI Yunqi. Diagnostic analysis and numerical simulation of a mesoscale torrential rain system in the Huaihe valley during the rainy season in 2003. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(6): 734-742. (in Chinese)
- [3] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 赵思雄. 梅雨期暴雨个例模拟及其中小尺度结构特征分析研究[J]. *大气科学*, 2007, 31(1): 1-18. SUN Jing, LOU Xiaofeng, HU Zhijin and ZHAO Sixiong. A numerical simulation on torrential rain during the Meiyu period and analysis of mesoscale and microscale structure of convective systems. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(1): 1-18. (in Chinese)
- [4] 马红云, 郭品文, 宋洁. 耦合不同陆面方案的 WRF 模式对 2007 年 7 月江淮强降水过程的模拟[J]. *大气科学*, 2009, 33(3): 557-567. MA Hongyun, GUO Pinwen and SONG Jie. Simulation of "2007.7" heavy rainfall case in the Changjiang-Huaihe valley using the WRF model with different land surface schemes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(3): 557-567. (in Chinese)

- [5] 陈静. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 203-218.
CHEN Jing. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(2): 203-218. (in Chinese)
- [6] 伍红雨, 陈德辉, 徐国强. 不同物理过程参数化方案对贵州降水预报的敏感性试验[J]. 气象, 2007, 33(4): 23-28.
WU Hongyu, CHEN Dehui and XU Guoqiang. Sensitive experiments of various parameterization schemes in different physical processes on Guizhou precipitation. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(4): 23-28. (in Chinese)
- [7] 徐国强, 梁旭东, 余晖, 黄丽萍, 薛纪善. 不同云降水方案对一次登陆台风的降水模拟[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 891-900.
XU Guoqiang, LIANG Xudong, YU Hui, HUANG Liping and XUE Jishan. Precipitation simulation using different cloud-precipitation schemes for a landfall typhoon. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(5): 891-900. (in Chinese)
- [8] DEB, S. K., SRIVASTAVA, T. P. and KISHTAWAL, C. M. The WRF model performance for the simulation of heavy precipitating events over Ahmedabad during August 2006. *Journal of Earth System Science*, 2008, 117(5): 589-602.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12040-008-0055-5>
- [9] RAJU, P. V. S., JAYARAMAN, P. and MOHANTY, U. C. Sensitivity of physical parameterizations on prediction of tropical cyclone Nargis over the bay of Bengal using WRF model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2011, 113(3): 125-137.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00703-011-0151-y>
- [10] JASON, P., EVANS, M. E. and FEI, J. Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia. *Climate Dynamics*, 2012, 39(6): 1241-1258. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1244-5>
- [11] 何由, 阳坤, 姚檀栋, 何杰. 基于 WRF 模式对青藏高原一次强降水的模拟[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1183-1191.
HE You, YANG Kun, YAO Tandong and HE Jie. Numerical simulation of a heavy precipitation in Qinghai-Xizang Plateau based on WRF model. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(5): 1183-1191. (in Chinese)
- [12] 程兴宏, 徐祥德, 丁国安, 李德平. MM5/WRF 气象场模拟差异对 CMAQ 空气质量预报效果的影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(12): 1411-1419.
CHENG Xinghong, XU Xiangde, DING Guoan and LI Deping. Differences in MM5 and WRF meteorological field simulations and impact on air quality forecasting by CMAQ model. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(12): 1411-1419. (in Chinese)
- [13] 廖镜彪, 王雪梅, 夏北成, 王体健, 王志铭. WRF 模式中微物理和积云参数化方案的对比试验[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 461-470.
LIAO Jingbiao, WANG Xuemei, XIA Beicheng, WANG Tijian and WANG Zhiming. The effects of different physics and cumulus parameterization schemes in WRF on heavy rainfall simulation in PRD. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(4): 461-470. (in Chinese)
- [14] 邱贵强, 李华, 张宇, 罗斯琼, 王少影, 尚伦宇. 高寒草原地区边界层参数化方案的适用性评估[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 46-55.
QIU Guiqiang, LI Hua, ZHANG Yu, LUO Siqiong, WANG Shaoying and SHANG Lunyu. Applicability research of planetary boundary layer parameterization scheme in WRF model over the alpine grassland area. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(1): 46-55. (in Chinese)
- [15] 周强, 李国平. 边界层参数化方案对高原低涡东移模拟的影响[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 334-344.
ZHOU Qiang, LI Guoping. Impact of the different boundary layer parameterization schemes on numerical simulation of plateau vortex moving eastward. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(2): 334-344. (in Chinese)
- [16] 王腾蛟, 张镞, 胡向军, 赵世强, 王瑾. WRF 模式对黄土高原丘陵地形条件下夏季边界层结构的数值模拟[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1261-1271.
WANG Tengjiao, ZHANG Lei, HU Xiangjun, ZHAO Shiqiang and WANG Jin. Numerical simulation of summer boundary layer structure over undulating topography of loess plateau simulated by WRF model. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(5): 1261-1271. (in Chinese)
- [17] 王红丽, 廖留峰. WRF 模式对西南地区干旱事件的模拟研究[J]. 贵州气象, 2015, 39(6): 1-5.
WANG Hongli, LIAO Liufeng. WRF model's simulation study on the drought in Southwest China. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2015, 39(6): 1-5. (in Chinese)
- [18] 张瑛, 肖安, 马力, 王欢, 马中元, 周芳. WRF 耦合 4 个陆面过程对“6.19”暴雨过程的模拟研究[J]. 气象, 2011, 37(9): 1060-1055.
ZHANG Ying, XIAO An, MA Li, WANG Huan, MA Zhongyuan and ZHOU Fang. Simulation of the “19 June 2010” heavy rainfall event by using WRF coupled with four land surface processes. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(9): 1060-1055. (in Chinese)
- [19] 李安泰, 何宏让, 张云. WRF 模式陆面参数扰动对一次西北暴雨影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 65-75.

- LI Antai, HE Hongrang and ZHANG Yun. Numerical simulation of effect of WRF land surface parameter disturbance on a rainstorm in Northwest China. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(1): 65-75. (in Chinese)
- [20] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 548-561.
ZHANG Dalin. Roles of various diabatic physical processes in mesoscale models. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4): 548-561. (in Chinese)