

# 中尺度数值大气模式 WRF 在水文气象领域的研究

田济扬<sup>1,2</sup>, 刘佳<sup>1,2,3</sup>, 李传哲<sup>1,2,4</sup>, 于福亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 水利部 水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038; 3. 淮海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 4. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 近几年中尺度数值大气模式 WRF 迅速发展, 其应用越来越广。为阐释 WRF 模式的机理, 揭示其发展方向, 为相关领域的研究人员提供参考, 介绍了 WRF 模式系统构成, 探讨和总结了物理参数化方案、数据同化方法、以及合理的空间尺度对 WRF 模式在水文气象领域的模拟预报效果的影响。相关研究表明: (1) 针对不同区域、不同时段的研究应选取不同的物理参数化方案组合; (2) 目前 WRF 模式常用的数据同化方法是三维变分数据同化, 混合数据同化方法是改进 WRF 模式模拟预报效果的发展方向; (3) 并非水平分辨率越高, 模拟效果越好, 应依据实际情况选用合理的空间尺度; (4) WRF 模式的模拟效果好、预报精度高, 未来有着更加广阔的应用前景。

**关键词:** WRF 模式; 物理参数化方案; 数据同化; 空间尺度; 应用进展

**中图分类号:** P458.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1025-06

## Preliminary study on mesoscale numerical model WRF for hydrology and meteorology

TIAN Jiyang<sup>1,2</sup>, LIU Jia<sup>1,2,3</sup>, LI Chuazhe<sup>1,2,4</sup>, YU Fuliang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Engineering and Technology Research Center for Water resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** With the rapid development of mesoscale numerical atmospheric model WRF in recent years, its application is wider and wider. In order to explain the mechanism, reveal the development direction and provide reference for related fields researchers, WRF model system is introduced, it is discussed that the influence of parameterized physical processes, data assimilation and reasonable spatial scale on the simulation effect of WRF model. Related studies have shown that: (1) different parameterized physical processes need to be chosen in different region and different time; (2) the common data assimilation method is 3DVar data assimilation at present, hybrid data assimilation may be a better method to improve the simulation effect of WRF model; (3) reasonable spatial scales need to be chosen because not the higher horizontal resolution, the better simulation effect for all research; (4) WRF model has good simulation effect, high prediction accuracy, there is more wide application.

**Key words:** WRF model; parameterized physical processes; data assimilation; spatial scale; application progress

为解决区域性气象问题, 减少或避免中尺度天气造成的自然灾害, 到 20 世纪 80 年代, 中尺度数值大气模式逐渐成熟。20 世纪 90 年代, 部分中尺度数值大气模式已经非常先进, 比较有代表性的是美国的 Eta 模式、MM5 模式、

RAMS 模式、RSM 模式、COAMPS 模式以及 WRF 模式等, 英国的 UKMO 模式, 加拿大的 MC2 模式, 法国的 MESO-NH 模式, 日本的 JRSN 模式。近几年我国也在自主研发中尺度数值大气模式, 其中中科院大气物理研究所的 REM 模

收稿日期: 2015-02-16    修回日期: 2015-06-02    网络出版时间: 2015-11-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151103.1115.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51409270; 5109225); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2014490611); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金(2012B093); 科技部国家国际科技合作专项(2013DFG70990)

作者简介: 田济扬(1989), 男, 山西怀仁人, 博士研究生, 主要从事气象与水文模拟、流域水循环演变等方面的研究。E-mail: tjyshd@126.com

通讯作者: 刘佳(1983), 女, 河北石家庄人, 高级工程师, 博士, 主要从事流域水文模拟、实时洪水预报、中尺度数值大气模拟与数据同化技术研究。E-mail: jia.liu@iwhr.com

式和中国气象科学研究院的 GRAPES 模式应用较广。与全球模式和区域模式相比,中尺度数值大气模式的研究区域更小,网格距一般为 10 km 以下,能够更精细地模拟出局部地区动量和能量的湍流输送,提高局部地区气象要素的模拟精度,可用来描述局部强对流天气,如龙卷风、雷雨等。

在众多中尺度数值大气模式中,新一代中尺度数值大气模式 WRF 以其较高的预报精度和灵活的分辨率,且免费对外开放,在水文气象领域具有广阔的发展与应用前景<sup>[1]</sup>。与其前身 MM5 模式相比,WRF 模式拥有更多元化的模式动力框架和物理参数化方案,且同时支持单向和双向嵌套。在模拟和预报我国不同地区、不同性质的强降水过程中,WRF 模式的较早版本在模拟天气系统和降水落区上已明显优于 MM5 模式<sup>[2]</sup>,其对于高度场、风场等物理量的模拟效果也优于 MM5<sup>[3]</sup>。与其它中尺度大气模式相比,WRF 模式在预报各种天气中都具有较好的性能,能够比较成功地再现中尺度过程中环流形势的演变和雨带分布特征<sup>[4-5]</sup>。

WRF 模式结合先进的数值方法和资料同化技术,采用改进的物理过程方案,同时具有多重嵌套及易定位于不同地理位置的能力,已逐渐成为改进从云尺度到天气尺度等不同尺度重要天气特征预报精度的工具。但 WRF 模式在我国的研究与应用仍处于起步阶段,对其基本理论与应用方向认识不够全面。本文对 WRF 模式在物理参数化方案的选择、数据同化方法以及空间尺度上结合国内外研究进行了探讨和梳理,为 WRF 模式在水文气象领域的进一步应用提供参考。

## 1 WRF 模式介绍

WRF 模式是由美国国家大气研究中心(NCAR)、国家大气海洋局预报系统实验室(FSL)、国家环境预报中心(NCEP)、俄克拉荷马大学暴雨分析中心等科研单位共同研发的新一代中尺度数值大气模式,于 2000 年发布第一版,目前最新版是 2014 年发布的 V3. 6. 1。WRF 模式分为 ARW 和 NMM 两种,前者用于科学研究,后者用于实际业务,分别由 NCEP 和 NCAR 管理维持,本文仅探讨 WRF ARW。

WRF 模式是完全可压缩的非静力中尺度模式,由预处理系统、主程序、后处理三部分构成。通过收集外部数据,利用预处理系统对数据进行处理、控制与引导,最终形成 namelist. wps 文件,进而导入主程序进行计算,最终通过后处理辅助分析模拟结果,包括数据的可视化操作等。WRF 采用高度模块化和分层设计,用户可根据实际情况做出不同选择,使比较模式性能和进行集合预报成为可能。模式系统组成与流程分别见图 1、图 2。

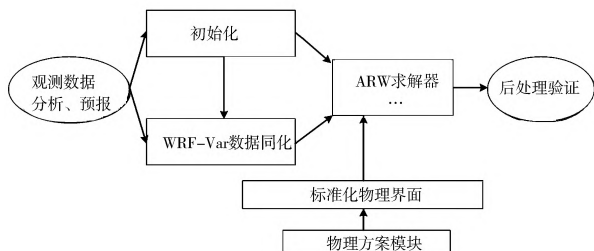


图 1 WRF 模式系统组成  
Fig. 1 WRF system constitution

从云尺度到天气尺度是 WRF 模式预报的重点,主要考虑 1~ 10 km 的水平分辨率。最新版 V3. 6. 1 水平方向采用

大气模式常用的 Arakawa C 网格,随着水平分辨率的提高,该网格优势更加凸显,垂直方向采用地形跟随的质量坐标(即从 0~ 1 的 eta 分层),时间积分采用时间分裂积分法,声波项采用时间分裂小步长方案,非声波项多采用三阶 Runge Kutta 算法,主要的控制方程有动量守恒方程、质量守恒方程、能量守恒方程、气体状态方程、水汽混合比守恒方程等,其控制方程以通量形式表达,均提高了模拟的准确性。更多 WRF 模式的相关机理介绍和适用说明可参考 NCAR 提供的 WRF 模式使用者手册<sup>[6]</sup>。

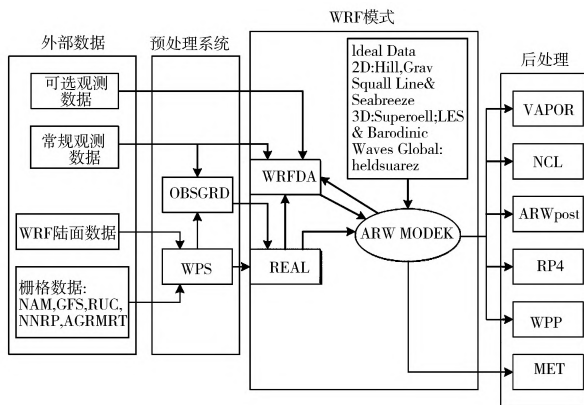


图 2 WRF ARW 模式系统流程  
Fig. 2 Flow chart of WRF ARW

## 2 物理参数化方案

WRF 模式包含的物理过程较多(主要物理过程见表 1),不同物理参数化方案的组合对模拟结果会产生较大影响,直接影响预报的准确性<sup>[7-8]</sup>,因此物理参数化方案的选择是 WRF 模式研究的重点。气象过程在不同地区、不同时段具有唯一性,目前气象学中的机理研究并不能完全准确地描述大气运动过程,目前对 WRF 模式物理参数化的研究需要进行对比试验,才能确定方案的优劣,缺乏机理分析。由于微物理过程、积云对流参数化过程、陆面过程、边界层对温度、湿度、气压、风速等主要气象因素以及降雨产生过程的影响比较显著,本文主要探讨这几个物理过程的参数化方案的选择。

表 1 WRF 模式主要物理过程参数化方案

Tab. 1 Main parameterized physical processes of WRF

物理过程	具体方案
微物理过程	Kessler, Lin, WSM 3、WSM5、WSM6、Eta Ferrier、Thompson、Goddard、M2M、New Thompson、WDM5、WDM6
积云对流参数化过程	Kair Fritsch (KF)、Betts Miller Janjic (BMJ)、Grell Devenyi (GD)、Grell 3、SAS
陆面过程	热扩散方案、Noah、Rapid Update Cycle Model (RUC)、Pleim Xiu LSM、Urban Canopy Model (UCM)、Ocean Mixed Layer Model
边界层	Medium Range Forecast Model (MRF)、Yonsei University (YSU)、Mellor Yamada Janjic (MYJ)、Asymmetrical Convective Model version 2 (ACM2)、Bougeault and Lacarrere (BL)、MYN

## 2.1 微物理过程

微物理过程主要是指云粒子的形成、增长以及产生降水的微观物理过程,涉及相变潜热的释放与吸收,其选取结果影响积云对流发生发展条件,从而影响积云降水预报,在 WRF 模式的模拟中对降水模拟结果的影响较大。各微物理过程在不同地区、不同场次、不同类型的降水模拟中,表现出不同的适用性。张少济等<sup>[9]</sup>采用 12 种微物理方案,对山西省一次强降雨过程进行模拟,表明不同微物理过程模拟的降水情况差别较大,WSM 6 方案、M2M 方案和 Thompson 方案较好地模拟了此次强降水过程;诸葛丰林等<sup>[10]</sup>利用 9 种微物理过程对江苏省里下河地区一次暴雨进行模拟,表明各方案基本模拟出了雨带的走向、降水落区,但降水强度以及降水中心均有不同程度的偏差;Kim 等<sup>[11]</sup>选用了 6 种微物理方案分析了其对降雨模拟的精确性的影响,结果表明 Lin 方案和 Thompson 方案模拟对雨流的精度不高;Efstathiou 等<sup>[12]</sup>选用不同的微物理方案对 Chalkidiki 半岛进行了暴雨分析,分析选用 YSU 边界层时,Eta 方案的模拟结果优于 Lin 方案;Rajeevan 等<sup>[13]</sup>选用了 4 种微物理方案对印度 Gardanki 地区的一次降水进行了模拟,结果表明 Thompson 方案的模拟结果略优于 Lin、WSM 6、Morrison 方案。

## 2.2 积云对流过程

积云对流过程伴随着云团生成、发展、旺盛以及由于温度不同时形成的对流,云团消失则降水结束,因此其与降水过程联系紧密,不同的积云对流方案对不同地区、不同场次的降水模拟效果不同。Jankov 等<sup>[14]</sup>通过对不同物理方案进行大量的模拟比较,认为模拟结果对积云对流方案是最敏感的,且不同积云对流方案中 KF 方案的模拟结果最优;Rama 等<sup>[15]</sup>对印度的三次暴雨进行了模拟,表明 BMJ 方案更好地模拟了暴雨的中心和强度;Biswas 等<sup>[16]</sup>选用了 3 种积云对流方案对大西洋和北太平洋东部的强降水进行了模拟,结果显示 SAS 方案更好完成预报;廖镜彪等<sup>[17]</sup>对广东一次降水进行模拟,结果表明积云对流参数化方案 KF 与微物理方案 Lin 组合条件下,模拟结果与实测结果最接近;屠妮妮等<sup>[18]</sup>选用 4 种积云对流参数化方案对四川省的一次区域性暴雨进行模拟,结果表明 KF 和 GD 总体预报效果好于 BMJ 和 SAS。

## 2.3 陆面过程

陆面过程直接影响地表水热通量,并通过影响模拟的低层大气环流和水汽辐合量,从而影响气温等气象要素和降雨的发生。模拟时应结合实际,选择合适的陆面过程。Jimenez 等<sup>[19]</sup>认为 WRF 的模拟结果一定程度上依赖于陆面过程方案;Khvorostyanov 等<sup>[20]</sup>选用了 4 种陆面方案对 Paris 地区进行了模拟对比,结果表明各方案的适用性不同;Jin 等<sup>[21]</sup>研究了 4 种不同陆面方案的选取对美国西部一段时期气温模拟的影响,发现结构最复杂的 CLM3 方案模拟效果优于 STD、Noah、RUC3 个方案;曾新民等<sup>[22]</sup>采用 3 种陆面方案对江南及华南地区的高温天气进行了模拟,结果表明模拟高温对不同陆面方案比较敏感,SLAB 方案模拟最好,RUC 次之,Noah 再次之;李安泰等<sup>[23]</sup>选取 3 种陆面方案对舟曲“8.8”暴雨天气过程进行了模拟,结果表明采用陆面方案明显优于不采用陆面方案,其中 PX 陆面方案比 SLAB、Noah 方案更接

近实况;张瑛等<sup>[24]</sup>采用 4 种陆面方案对江西省“6.19”暴雨过程进行了模拟研究,发现强降水的特性在无陆面方案情况下偏差较大,而 SLAB、Noah、RUC、PX 方案的模拟结果均较好的反映了降水的情况,模拟结果相差不大。

## 2.4 边界层

边界层在 WRF 模式中布局影响低层大气要素,而且通过垂直输送也可对高层大气产生影响,进而影响对温度、风速、湿度等主要气象要素的模拟,因而模拟时应根据具体的模拟要素,分析并选择合适的边界层参数化方案。Flaounas 等<sup>[25]</sup>对西非季风个例进行了模拟,研究发现选取不同的边界层参数化方案对温度的影响最大,YSU 方案模拟的温度较实测温度高,而 MYJ 方案模拟的温度相对较低;Cha 等<sup>[26]</sup>指出 YSU 方案降低了边界层的垂直混合作用,因此比 MRF 方案模拟效果好;Miglietta 等<sup>[27]</sup>用 2 种边界层参数化方案模拟地中海东部的一日风场,分析认为 YSU 方案优于 MYJ 方案;王子谦等<sup>[28]</sup>基于 4 种边界层参数化方案分别对东亚夏季风进行模拟研究,结果表明 BL 方案和 MYJ 方案对东亚夏季风及其降水的模拟优于 YSU 和 ACM2 方案;张龙等<sup>[29]</sup>利用 3 种边界层参数化方案对兰州冬季几个气象要素进行了模拟,结果表明总体上 MYJ 方案对低层风温、感热等模拟结果优于 YSU 和 ACM2;张小培等<sup>[30]</sup>对安徽黄山及周边复杂地形地区的气象要素进行了模拟,结果表明 YSU、ACM2、MYN、BL 方案对气温、露点温度、风速、湿度等的模拟各有优劣且误差均较小。

## 3 数据同化方法

数据同化的本质是利用不同类型、不同来源的数据生成时间、空间和物理一致性的数据集。数据同化方法大致经历了逐步订正法、最优差值法、三维变分法、四维变分法、卡尔曼滤波法和混合数据同化。对地观测技术和地球系统科学的发展很大程度上推动了数据同化技术,WRF 模式中含有两种数据同化方法,分别是三维数据同化和四维数据同化,使其能够利用不同的观测资料,提高模拟精度<sup>[31]</sup>。

刘佳等<sup>[32]</sup>对英国西南部的 Brue 流域发生的 4 场暴雨进行了模拟,结果表明采用三维变分同化技术对实时观测数据同化后,WRF 模式总体模拟效果得到了提升,但对于历时短、落区小的降雨作用不大;Maiello 等<sup>[33]</sup>对 Rome 城市的一次暴雨进行了模拟,采用了三维变分同化技术对多普勒气象雷达数据进行处理,使 WRF 模式的模拟效果有较大提升;Kumar 等<sup>[34]</sup>利用三维同化技术对卫星数据进行同化,提升了 WRF 模式对印度西海岸强降水的模拟效果;Ji Hyun Ha 等<sup>[35]</sup>利用三维变分同化技术对 GPS 无线电掩星数据进行了同化,发现 WRF 模式模拟的湿度和降水的空间分布更加精确;范水勇等<sup>[36]</sup>改进了北京地区的天气预报,在 WRF 三维变分同化里调节背景场误差和观测误差,提高了降水预报的效果;陈业国等<sup>[37]</sup>将 WRF 模式同化系统用于“碧利斯”台风暴雨数值模拟中,结果显示同化高空和地面实况资料后,降水落区和强度都更接近真实情况;刘春霞等<sup>[38]</sup>基于 WRF 采用三维变分同化技术同化散射计风场资料提升了对台风的模拟效果;王延东等<sup>[39]</sup>对闪电资料进行同化,更好地模拟出

川东地区的降水过程和强对流天气。

因计算量相对较小,目前较成熟、应用最广的是三维变分同化方法。四维变分同化方法在一些精度要求很高的地区已经取得了较好的应用效果<sup>[40]</sup>,但计算代价较大。为提高计算效率和计算精度,未来混合数据同化方法将成为 WRF 模式同化技术的发展方向<sup>[41]</sup>。

## 4 合理的空间尺度

采用 WRF 模式对不同地区进行模拟预报时,应选用合理的空间尺度。并非分辨率越高,模拟效果越好,只有在不断提高资料的精度和密度的条件下,提高分辨率才有一定的意义<sup>[42-43]</sup>。

单独使用 WRF 模式进行气象要素模拟时,需要选择合理的空间尺度来提升模拟效率和精度。史金丽等<sup>[44]</sup>对比了 27 km 和 9 km 水平分辨率下 WRF 模式对内蒙古地区降水和温度的预报准确率,结果表明 27 km 网格下模拟的降水落区和强度准确率更高,但漏报率增加,而温度的模拟对网格尺度变化不敏感;Done 等<sup>[45]</sup>对美国中部地区降水采用 WRF 模式进行了模拟,结果表明 4 km 水平分辨率比 10 km 水平分辨率的模拟效果好;Schwartz 等<sup>[46]</sup>对比了 2 km 和 4 km 水平分辨率下 WRF 模式对美国 3/4 的陆面区域进行了模拟,发现 2 km 分辨率下的降水预报相比 4 km 水平分辨率并没有优势,两者模拟结果差异不大;Ma 等<sup>[47]</sup>采用 10、20、40、80、160 km 的水平分辨率进行了模拟对比,发现水平分辨率越高,中尺度的涡流的模拟越精确。

能量平衡与水量平衡是研究气象与水文的基础理论,陆气耦合体现了水、热在地球圈层的系统性和统一性,研究表明该技术可以提升气象、水文要素的模拟精度。但一般大气模式的空间尺度与陆面模式或水文模型的空间尺度不匹配,因此选取合理的空间尺度可以提高陆气耦合对气象、水文要素的模拟精度。郝春沅等<sup>[48]</sup>采用 WRF 模式三层网格(45 km、15 km 和 5 km)嵌套划分方法与 WEP 水文模型耦合,进行了降水和径流过程的模拟,取得了较好的效果。彭艳等<sup>[49]</sup>采用 WRF 模式粗细网格(30 km 和 10 km)双重嵌套划分方法与 VIC 水文模型耦合,提高了降水预报以及洪水预报的精度;Wagner 等<sup>[50]</sup>采用 WRF 模式与 HMS 水文模型选取 10 km 网格进行双向耦合,对鄱阳湖流域进行了水量与能量的模拟,取得了很好的效果;Givati 等<sup>[51]</sup>采用 WRF 模式和 HYMKE 水文模型耦合对 Jordan 流域进行模拟,选用了 36、12、4、1.3 km 网格进行了对比分析,发现 1.3 km 网格的模拟结果最好。

## 5 WRF 模式的发展前景

WRF 模式与其他大气模式相比在很多方面具有较强的优势,因此该模式已经用于并将继续用于水文气象以及相关的领域。例如,近期的研究有:Hamill 等<sup>[52]</sup>对美国 Colorado 地区一次强降水进行模拟,表明 WRF 模式能够较好地模拟一次降水的过程以及降水的空间分布,并分析了该次降水形成的原因;高洋<sup>[53]</sup>选用 WRF 研究了 2008 年我国南方冻雨过程的热力异常及其形成原因;文小航等<sup>[54]</sup>的研究表明 WRF 模式能较好地模拟出下垫面土壤温度随时间变化的规

律,为东北半干旱区能量水分循环的研究提供依据;Jimenez 等<sup>[55]</sup>采用特定的方法,提高了 WRF 对地面风的模拟效果;崔琳琳等<sup>[56]</sup>利用 WRF 模式模拟了江苏省如东海域的气象要素,采用模拟结果分析了绿潮的变化。

在 WRF 模式未来的发展方向上:(1)水文方面,WRF 模式应寻求合适的陆面模式与之耦合,建立干旱预警体系和洪涝防御系统;(2)气象方面,WRF 模式需要进一步加强对一些灾害性天气进行模拟预报的研究,包括雷暴、飓风、台风等。相关技术的发展将使 WRF 模式的对水文、气象的模拟预报能力日益增强。四维变分同化、集合卡尔曼滤波以及混合数据同化技术伴随着计算机、雷达遥感等技术的发展将提高 WRF 模式的模拟预报精度和延长预报时效;此外,与陆面模式、海洋模式的耦合计算能够进一步拓展 WRF 模式在水文气象领域的应用前景。侯爱中等<sup>[57]</sup>基于 WRF 模式耦合城市冠层模型,提升了暴雨模拟的精度;朱坚等<sup>[58]</sup>将 WRF 模式和 NoahLSM 陆面模型耦合,较准确地模拟和评估了江苏省淮北地区的一次土壤旱情;赵求东<sup>[59]</sup>利用 WRF 驱动分布式水文模型 DHSVM 对天山北坡典型流域的融雪径流进行短期预报,效果较好;邱辉等<sup>[60]</sup>利用 WRF 模式与洪水预警相结合,搭建了山洪灾害预警平台;郑子彦等<sup>[61]</sup>将 WRF 模式的输出作为水文模型 XXT 的输入进行洪水模拟,效果较好;Warner 等<sup>[62]</sup>建立了海洋模式(ROMS)、大气模式(WRF)、波浪模式(SWAN)、沉积物模式(CSTMS)的耦合模型(COAWST),对于飓风等条件下的海浪的特性进行了模拟,取得较好的效果。

## 6 讨论与结论

(1)对于绝大多数气象要素,WRF 模式具有较高的模拟精度和运算效率,未来在水文气象领域有更广阔的应用前景。

(2)物理参数化方案和空间尺度的选取是 WRF 模式在应用过程中的重点和难点,不同地区、不同时段的气象要素模拟所适用的最优化的物理参数化方案不一定相同,水平分辨率也并非越高越好,尤其是与其他模型耦合时,应安排不同尺度组合方案进行试验,研究最优的耦合尺度。

(3)目前 WRF 模式最常用的数据同化方法是三维数据同化,可以大幅提升模式的模拟和预报精度,为能进一步兼顾计算效率和计算精度的提高,混合数据同化将成为未来 WRF 模式数据同化方法的发展趋势。

### 参考文献(References):

- [1] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version [Z]. NCAR Technical Notes, 2008.
- [2] 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[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(6): 692-701. (in Chinese))
- [3] 刘宁微,王奉安.WRF 和 MM5 模式对辽宁暴雨模拟的对比分析[J].气象科技,2006,34(4):364-369.(LIU Ning wei, WANG Feng an. Comparative analysis of heavy rainfall simulations with two mesoscale models in Liaoning province[J]. Meteorological Science and Technology, 2006, 34(4): 364-369. (in Chinese))

- [4] Welsh P, Wildman A, Shaw B, et al. Implementing the weather research and forecast (WRF) model with local data assimilation in a NWSWFO, Seattle, January 11-16, 2004[C]. USA: Seattle, 2004.
- [5] 张芳华, 马旭林, 杨克明. 2003年6月24日-25日江南特大暴雨数值模拟和诊断分析[J]. 气象, 2004, 30(1): 28-32. (ZHANG Fang hua, MA Xu lin, YANG Ke ming. Numerical simulation and diagnostic analysis of a heavy rainfall in Jiangnan area during 24-25 June 2003[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(1): 28-32. (in Chinese))
- [6] National Center for Atmospheric Research (NCAR) (2014), User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.6, [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3.6/ARWUsersGuideV3.6.1.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.6/ARWUsersGuideV3.6.1.pdf)
- [7] Gallus J W, Bresch J F. Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134: 2632-2641.
- [8] Evans J P, Ekstrom M, Ji F. Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South East Australia[J]. Climate Dynamics, 2012, 39: 1241-1258.
- [9] 张少济, 孙科, 张华, 等. WRF模式微物理方案对山西省一次强降雨过程模拟的影响[J]. 水利水电技术, 2013, 44(9): 8-11. (ZHANG Shaoji, SUN Ke, ZHANG Hua, et al. Impact from microphysical scheme of WRF model on simulation of a heavy rainfall process in Shanxi Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(9): 8-11. (in Chinese))
- [10] 诸葛丰林, 郑有飞, 吴荣军, 等. 江苏省里下河地区一次暴雨过程的模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 164-176. (ZHUGE Fenglin, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al. Study on simulation of a rain process in Lixia River area, Jiangsu Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 164-176. (in Chinese))
- [11] Kim J H, Shin D B, Kummerow C. Impacts of a priori databases using six WRF microphysics schemes on passive microwave rainfall retrievals[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30: 2367-2381.
- [12] Efsthathiou G A, Zoumakis N M, Melas D, et al. Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy rainfall event using different microphysical schemes[J]. Atmospheric Research, 2013, 132-133: 125-143.
- [13] Rajeevan M, Kesarkar A, Thampi S B, et al. Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over southeast India[J]. Annales Geophysicae, 2010, 28(2): 603-619.
- [14] Jankov, Isidora, et al. An investigation of IHOP convective system predictability using a matrix of 19 WRF Members[M]. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A Jan 10-15, 2004.
- [15] Rama R Y V, Hatwar H R, Kamal S A, et al. An experiment using the high resolution eta and WRF models to forecast heavy precipitation over India[J]. Pure & Applied Geophysics, 2007, 164(8): 1593-1615.
- [16] Biswas M K, Bernadet L, Dudhia J. Sensitivity of hurricane forecasts to cumulus parameterizations in the HWRF model[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(24): 9113-9119.
- [17] 廖镜彪, 王雪梅, 夏北成, 等. 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 Jing biao, WANG Xue mei, XIA Bei cheng, et al. The effects of different physics and cumulus parameterization schemes in WRF on heavy rainfall simulation in PRD[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(4): 461-470. (in Chinese))
- [18] 屠妮妮, 何光碧, 张利红. WRF模式中不同积云对流参数化方案对比试验[J]. 高原山地气象研究, 2011, 31(2): 18-25. (TU Ni ni, HE Guang bi, ZHANG Li hong. Simulation test on the effects of various cumulus parameterization schemes in WRF model[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2011, 31(2): 18-25. (in Chinese))
- [19] Jimenez P A, Dudhia J, Gonzalez Rouco J F, et al. A revised scheme for the WRF surface layer formulation[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(3): 898-918.
- [20] Khvorostyanov D V, Menut L, Dupont J C, et al. The role of WRF land surface schemes on weather simulations in Paris area[A]. Proceedings of ISARS 2010 conference[C]. 2010.
- [21] Jin J, Miller N L, Schlegel N. Sensitivity study of four land surface schemes in the WRF model[J]. Advances in Meteorology, 2010, 2010: 1-11.
- [22] 曾新民, 吴志皇, 熊仕焱, 等. WRF模式短期高温天气模拟对陆面方案的敏感性[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2011, 41(9): 1375-1384. (ZENG Xinmin, WU Zhihuang, XIONG Shiyang, et al. Sensitivity of simulated short range high temperature weather to land surface by WRF[J]. Sci China Earth Sci, 2011, 41(9): 1375-1384. (in Chinese))
- [23] 李安泰, 王亚明, 何宏让, 等. 耦合不同陆面方案的WRF模式对“8·8”舟曲暴雨过程的模拟[J]. 气象与减灾研究, 2014, 37(1): 21-28. (LI An tai, WANG Ya ming, HE Hong yang, et al. Numeric simulations of rainstorm in ZhouQu county on 8 august 2010 using the WRF model with different land surface schemes[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2014, 37(1): 21-28. (in Chinese))
- [24] 张瑛, 肖安, 马力, 等. 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): 1060-1069. (ZHANG Ying, XIAO An, MA Li, et al. Simulation of “19 June 2010” heavy rainfall by using WRF coupled with four land surface processes[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(9): 1060-1069. (in Chinese))
- [25] Flaounas E, Bastin S, Janicot S. Regional climate modelling of the 2006 West African monsoon: sensitivity to convection and planetary boundary layer parameterisation using WRF[J]. Climate Dynamics, 2011, 36: 1083-1105.
- [26] Cha D H, Lee D K, Hong S Y. Impact of boundary layer processes on seasonal simulation of the East Asian summer monsoon using a Regional Climate Model[J]. Meteorol Atmos Phys, 2008, 100: 53-72.
- [27] Miglietta M M, Zecchetto S, Biasio F D. WRF model and ASAR retrieved 10m wind field comparison in a case study over eastern Mediterranean Sea[J]. Adv Sci Res, 2010, 4: 83-88.
- [28] 王子谦, 段安民, 吴国雄. 边界层参数化方案及海气耦合对WRF模拟东亚夏季风的影响[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2014, 44(3): 548-562. (WANG Zi qian, DUAN An min, WU Guo xiong. Impacts of boundary layer parameterization schemes and air-sea coupling on WRF simulation of the East Asian summer monsoon[J]. Sci China Earth Sci, 2014, 44(3): 548-562. (in Chinese))
- [29] 张龙, 张镭, 王颖, 等. 基于WRF不同边界层方案的黄土高原

- 丘陵冬季地面气象要素日变化模拟分析[J]. 干旱气象, 2012, 30(2): 158-168. (ZHANG Long, ZHANG Lei, WANG Ying, et al. Simulation of daily variations about surface meteorological factor in loess plateau region in winter based on different PBL schemes of WRF[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(2): 158-168. (in Chinese))
- [30] 张小培, 银燕. 复杂地形地区 WRF 模式四种边界层参数化方案的评估[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 68-76. (ZHANG Xiaopei, YIN Yan. Evaluation of the four PBL schemes in WRF model over complex topographic areas[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(1): 68-76. (in Chinese))
- [31] Dimet F X L, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects[J]. Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography, 1986, 38A(2): 97-110.
- [32] Liu J, Bray M, Han D. Exploring the effect of data assimilation by WRF-3DVar for numerical rainfall prediction with different types of storm events[J]. Hydrological Processes, 2013, 27: 3627-3640.
- [33] Maiello I, Ferretti R, Gentile S, et al. Impact of radar data assimilation for the simulation of a heavy rainfall case in central Italy using WRF-3DVAR[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7: 2919-2935.
- [34] Kumar S, Routray A, Chauhan R, et al. Impact of parameterization schemes and 3DVAR data assimilation for simulation of heavy rainfall events along west coast of India with WRF modeling system[J]. International Journal of Earth and Atmospheric Science, 2014, 1(1): 18-34.
- [35] Ha J H, Lim G H, Choi S J. Assimilation of GPS radio occultation refractivity data with WRF 3DVAR and its impact on the prediction of a heavy rainfall event[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(6): 1381-1398.
- [36] 范水勇, 郭永润, 陈敏, 等. 高分辨率 WRF 三维变分同化在北京地区降水预报中的应用[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1181-1188. (FAN Shuyong, GUO Yongrun, CHEN Min, et al. Application of WRF 3DVar to a high resolution model over Beijing area[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(6): 1181-1188. (in Chinese))
- [37] 陈业国, 何冬燕. WRF 模式同化系统在“碧利斯”台风暴雨数值模拟中的应用[J]. 海洋预报, 2009, 26(1): 62-69. (CHEN Yeguo, HE Dongyan. An application of WRF assimilation system in the numerical simulation of heavy rains caused by typhoon “BILIS”[J]. Marine Forecasts, 2009, 26(1): 62-69. (in Chinese))
- [38] 刘春霞, 王静, 齐义泉, 等. 基于 WRF 模式同化 QuikSCAT 风场资料的初步试验[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(6): 69-74. (LIU Chunxia, WANG Jing, QI Yiquan, et al. A preliminary study on QuikSCAT wind data assimilation using model WRF[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(6): 69-74. (in Chinese))
- [39] 王延东, 周筠珺, 王喜阳, 等. 闪电资料在中尺度 WRF 模式中同化方法的研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(2): 281-292. (WANG Yandong, ZHOU Yujun, WANG Xiyang, et al. A study on the assimilation method of lightning data with mesoscale model WRF[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(2): 281-292. (in Chinese))
- [40] Clayton A M, Lorenc A C, Barker D M. Operational implementation of a hybrid ensemble/4D-Var global data assimilation system at the Met Office[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139: 1445-1461.
- [41] 马旭林, 陆续, 于明月, 等. 数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展[J]. 热带气象学报, 2014, 30(6): 1188-1195. (MA Xulin, LU Xu, YU Mingyue, et al. Progress on hybrid ensemble variational data assimilation in numerical weather prediction[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(6): 1188-1195. (in Chinese))
- [42] 廖洞贤. 论当前大气动力模式中存在的若干问题[J]. 应用气象学报, 1996, 7(2): 238-245. (LIAO Dongxian. The discussion of some problems existing in current atmospheric dynamic models[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1996, 7(2): 238-245. (in Chinese))
- [43] Bray M, Han D, Xuan Y, et al. Rainfall uncertainty from NWP downscaling model[J]. Hydrological Processes, 2010, 25: 1397-1406.
- [44] 史金丽, 闵锦忠, 苏丽娟, 等. WRF 模式不同分辨率模拟分析[J]. 内蒙古气象, 2012(5): 19-22. (SHI Jinli, MIN Jinzhong, SU Lijuan, et al. Simulation research of different resolution ratio on WRF model[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2012(5): 19-22. (in Chinese))
- [45] Done J, Davis C A, Weisman M. The next generation of NWP: explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model[J]. Atmospheric Science Letters, 2004, 5: 110-117.
- [46] Schwartz C S, Kain J S, Weiss S J, et al. Next day convection allowing WRF model guidance: a second look at 2 km versus 4 km grid spacing[J]. Monthly Weather Review, 2009, 137: 3351-3372.
- [47] Ma P L, Rasch P J, Fast J D, et al. Assessing the CAM5 physics suite in the WRF-Chem model: implementation, resolution sensitivity, and a first evaluation for a regional case study[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 7: 755-778.
- [48] 郝春洋, 贾仰文, 王浩. 气象水文模型耦合研究及其在渭河流域的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1041-1049. (HAO Chunyang, JIA Yangwen, WANG Hao. Atmospheric and hydrological models coupling and application in flood forecasting of the Weihe Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1041-1049. (in Chinese))
- [49] 彭艳, 周建中, 贾梦, 等. 三峡库区陆气耦合研究与应用[J]. 水文, 2014, 34(3): 11-16. (PENG Yan, ZHOU Jianzhong, JIA Meng, et al. A coupled atmospheric hydrological modeling system and its application for Three Gorges reservoir region[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3): 11-16. (in Chinese))
- [50] Wagner S, Fersch B, Kunstmann H, et al. Coupled atmospheric hydrological modeling for feedback investigations in the Poyang lake catchment, China[C]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2012.
- [51] Givati A, Lym B, Liu Y, et al. Using the WRF model in an operational streamflow forecast system for the Jordan river[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51: 285-299.
- [52] Hamill T M. Performance of operational model precipitation forecast guidance during the 2013 Colorado front range floods[J]. Monthly Weather Review, 2014, 142: 2609-2618.

(下转第 1050 页)

- 年气候变化特征及成因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 46-53. (RAN Jir jiang, JI Ming-xia, HUANG Jiarr ping, et al. Characteristics and factors of climate change in arid and semi-arid areas over northern China in the recent 60 years[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(1): 46-53. (in Chinese))
- [10] 王金红, 吕娟, 刘和平, 等. 1470-2008 年中国西北干旱地区旱涝变化特征分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 625-631. (WAN Jing-hong, LV Juan, LIU He ping, et al. Drought-flood variation characteristics and trends in arid northwestern China during 1470 to 2008[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 625-631. (in Chinese))
- [11] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65. (WANG Jir song, GUO Jiang yong, ZHOU Yue wu, et al. Progress and prospect on drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 60-65. (in Chinese))
- [12] 孙智辉, 雷延鹏, 曹雪梅, 等. 气象干旱精细化监测指数在陕西黄土高原的研究与应用[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 142-149. (SUN Zhi hui, LEI Yan peng, CAO Xue mei, et al. Study and application of prices index of meteorological drought to the loess plateau in Shanxi[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(1): 142-149. (in Chinese))
- [13] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 川中丘陵区参考作物蒸发蒸腾量近 60 年变化成因研究[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 183-189. (ZHAO Lu, LIANG Chuan, CUI Ning bo, et al. Attribution analyses of ET0 change in hilly area of central Sichuan in recent 60 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 183-189. (in Chinese))
- [14] GB/T 20481-2006. 气象干旱等级[S]. GB/T 20481-2006. Classification of Meteorological Drought[S]. (in Chinese)
- [15] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿润指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 85-92. (WANG Mingtian, WANG Xiang, HUANG Wanhua, et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in southwest of China based on relative moisture index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19): 85-92. (in Chinese))
- (上接第 1030 页)
- [53] 高洋. WRF 模式对 2008 年 1 月我国南方冻雨极端天气过程的数值模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011. (GAO Yang. WRF simulations of the freezing weather in Jan 2008 over the southern China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2011)
- [54] Jimenez P A, Dudhia J. Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(2): 300-316.
- [55] 文小航, 廖小罕, 袁文平, 等. 中国东北半干旱区能量水分循环的同化模拟[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2014, 44(12): 2768-2784. (WEN Xiaohang, LIAO Xiaohan, YUAN Wenping, et al. Numerical simulation and data assimilation of the water-energy cycle over semiarid northeastern China[J]. Sci China Earth Sci, 2014, 44(12): 2768-2784. (in Chinese))
- [56] 崔琳琳, 胡松, 杨红, 等. 绿潮早期聚集期间天气过程分析[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 941-946. (CHUI Linlin, HU Song, YANG Hong, et al. Weather process analysis for the period during the early aggregation of green tide[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 941-946. (in Chinese))
- [57] 侯爱中, 倪广恒, 丛振涛, 等. 耦合城市冠层模型对暴雨模拟精度的影响[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 31-35. (HOU Aizhong, NI Guangheng, CONG Zhengtao, et al. Impacts of coupling urban canopy model on storm simulation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 31-35. (in Chinese))
- [58] 朱坚, 杨涛, 黄丹青, 等. 基于 WRF-NoahLSM 耦合模型的江苏省淮北区土壤旱情评估[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 10-13. (ZHU Jian, YANG Tao, HUANG Danqing, et al. Soil drought assessment of Huaibei regions in Jiangsu province based on WRF-NoahLSM coupled model[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(10): 10-13. (in Chinese))
- [59] 赵求东. WRF+DHSVM 融雪径流预报模式研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2008. (ZHAO Quidong. The study of WRF+DHSVM snowmelt runoff forecasting model[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2008. (in Chinese))
- [60] 邱辉, 瞿丽. WRF 模型在山洪灾害预警预报中的试验应用[J]. 人民长江, 2013, 44(13): 5-9. (Qiu Hui, Qi Li. Trial application of WRF model in early warning and forecast of mountain torrent disaster[J]. Yangtze River, 2013, 44(13): 5-9. (in Chinese))
- [61] 郑子彦, 张万昌, 徐精文. 山区流域暴雨洪水的数值模拟[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 222-229. (ZHENG Ziyen, ZHANG Wan Chang, XU Jingwen. Numeric simulation of torrential rainfall and flash flood in a mountainous basin[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(2): 222-229. (in Chinese))
- [62] Warner J C, Armstrong B, He R, et al. Development of a coupled ocean atmosphere wave sediment transport (COAWST) modeling system[J]. Ocean Modeling, 2010, 35: 230-244.