

美国 WRF 模式的进展和应用前景

章国材

(中国气象局预测减灾司, 北京 100081)

提 要

WRF (Weather Research Forecast) 模式系统是美国气象界联合开发的新一代中尺度预报模式和同化系统, 2004 年 6 月对外发布了第二版和三维变分同化系统。这个模式采用高度模块化、并行化和分层设计技术, 集成了迄今为止在中尺度方面的研究成果。模拟和实时预报试验表明, WRF 模式系统在预报各种天气中都具有较好的性能, 同时实现在线完全嵌套大气化学模式, 不仅具有较好的天气预报水平, 而且具有预报空气质量的能力, 具有广阔的应用前景。

关键词: 天气研究和预报 模式 进展

引 言

WRF (Weather Research Forecast) 模式系统是由美国研究、业务及大学的科学家共同参与开发研究的新一代中尺度预报模式和同化系统。WRF 模式系统的开发计划是 1997 年由美国国家大气研究中心 (NCAR) 中小尺度气象处、国家环境预报中心 (NCEP) 环境模拟中心、预报系统实验室 (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单位联合发起建立的, 由国家自然科学基金和国家海洋大气局 (NOAA) 共同支持。该项计划发起后, 得到其它研究部门、大学、美国宇航局 (NASA)、美国空军和海军、环保局等单位的响应, 并共同参与开发研究工作, 为新的科研成果运用于科研和业务、促进各单位的合作, 正在起到积极的作用。

WRF 模式作为一个公共模式, 免费对外发布, 第一版在 2000 年 10 月发布, 此后又多次发布改进版本。2004 年 6 月发布了第二版, 包括多重区域, 灵活的比率, 单重和双重嵌套, 与之协调的 3DVAR 也将释放, 选择的初始化从 MM5 预处理得到, 将会有更完备的文档, 包括用户指南和技术说明等。

1 WRF 模式基本结构^[1~3]

WRF 模式采用高度模块化和分层设计, 分为驱动层、中间层和模式层, 用户只需与模式层打交道; 在模式层中, 动力框架和物理过程都是可插拔, 为用户采用各种不同的选择、比较模式性能和进行集合预报提供了极大的便利。它的软件设计和开发充分考虑适应可见的并行平台在大规模并行计算环境中的有效性, 可在分布式内存和共享内存两种计算机上实现加工的并行运算, 模式的耦合架构容易整合进入新地球系统模式框架中。

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 1~10km。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、与模式本身相协调的先进的资料同化系统。WRF 模式有两个版本, 一个是在 NCAR 的 MM5 模式基础上发展, 另一个是由 NCEP Eta 模式发展而来。

表 1 是这两个方案动力框架的对比表。

WRF 动力框架的两个方案主要不同之处在于垂直坐标和格点格式的选择, 通量的空间差分 NCAR 方案精度更高, 但需要的计

表 1 WRF 动力框架

质量坐标框架(NCAR)	非静力中尺度模式框架 (NMM, NCEP)
地形跟随静力气压垂直坐标	地形跟随混合 σ 垂直坐标
Arakawa G 格点, 双向嵌套	Arakawa E 格点, 单向嵌套
3 阶 Runge-Kutta 分裂显式时间差分	显式 Adams-Bashforth 时间差分
平流 5 阶或 6 阶差分	
质量守恒、动量、干熵和标量 利用通量形式的预报方程	动能守恒, 熵和动量利用 2 阶 有限差分

算时间也要多一些。物理方案两者虽有所不同, 但是两者都互有物理接口, 因此从总体来讲二者的物理方案是兼容的。表 2 给出了 WRF 物理方案的各种不同选择, 它们来自 MM5、Eta 和 RUC, 为用户提供了各种选择的

表 2 WRF 物理方案

微物理	Kessler 类型(没有冰), Hong 等人 Lin 等人(包括霰), Hall 等人 NCEP 云 3 和云 5, Ferrier
积云对流	新 Kain-Fritsch, Grell 集合 Bett's-Miller-Janjic
短波辐射	Dudhia(MM5), Goddard, GFDL
长波辐射	RRTM, GFDL
扰动	预报 TKE Smagorinsky, 稳定扩散
边界层	MRF, MYJ, YSU
地面层	相似理论, MYJ
陆面	5 层土壤模式, RUC 陆面模式, Noah 统一的 陆面模式

基本的 WRF 三维变分同化(3DVAR) 系统能同化广阔的常规和卫星资料, 有调整后的背景误差统计功能, 并行版本已向 WRF 社会释放, 第一次 WRF 3DVAR 指导班 2003 年 6 月在 NCAR 举行。下一步计划要实现 3DVAR 周期更新, 包括同化新的观测资料, 例如 IR/MW 辐射资料、雷达反射率、GPS 折射率资料等, 变分算法要增加天气尺度背景误差的估计, 研究版本 2004 年将向社会释放。

WRF 模式系统的业务流程见图 1。

预报系统实验室(FSL) 为 WRF 的初始化提供了一个标准平台^[4], 包括三种功能:

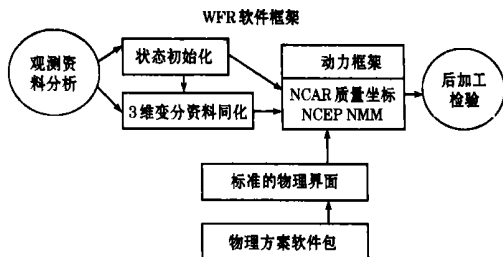


图 1 WRF 模式系统业务流程

定义和定位三维格点, 详细说明陆面、水面和植被的地面状态特性, 提供初值和边界文件。原 FSL 的局地资料分析预报系统(LAPS) 的定位码是 WRF 标准初始化(SI) 的基础。为了使复杂的初始化过程简化, FSL 发展了一个平台 GUI, 用户不需要知道如何运行 SI。只需在选择新区域栏中键入预报区域名称, 在投影(建议兰伯特投影) 栏中键入预报区域中心纬度、经度, 水平 X 维和 Y 维、格点距离以及预报区域北界纬度 1 和南界纬度 2 以及标准经度, 在周期(Cycle) 栏目中键入资料截断时间, 运行之间的小时数等就行了, 操作起来十分方便。SI GUI 1. 3. 2 版本已于 2003 年 8 月 20 日释放, 2004 年 6 月发布了第二版。

2 模拟和实时预报

WRF 模式基本框架开发完成之后, 开发组对 WRF 模式进行了各种尺度多种模拟实验, 包括边界层大涡旋模拟(PBL Les, $\Delta X = 50\text{m}$), 密度流模拟($\Delta X = 100\text{m}$), 超级单体雷暴模拟($\Delta X = 1\text{km}$), 山地波模拟($\Delta X = 20\text{km}$), 斜压波模拟($\Delta X = 100\text{km}$), 都取得了好的效果。为了测试 WRF 模式的性能, 在 NCAR 专门设立了开发测试平台中心^[5]。

已经进行的实时预报试验包括 NCAR 对美国大陆(11km 和 22km 分辨率)。美国中部地区(4km 分辨率, BAMEX), 2003 年 9 月在美国登陆的飓风 Isabel (4km 分辨率) 的预报试验; NCEP 对美国西部、中部、东部分别用以上两种框架所作的预报试验; 国家强风暴实验室(NSSL) 对美国大陆(12km)、区

域(3km)的预报试验;预报系统实验室(FSL)在美国东北部(10km)的预报试验;美国空军对美国大陆(15km)的预报试验和伊利诺斯州立大学在美国中西部(25km)的预报试验等。下面简要介绍一些主要试验的结果。

2.1 对流天气系统模拟^[6,7]

在 2002 年的国际水计划中,用 WRF 和 MM5 进行对流天气系统模拟,对于对流的开始得出一些混淆的结果,特别是出流边界,但模式通常对干线和锋预报较好,飑线和逆尺度(upscale)增长模式报得相当好,孤立的超级单体风暴作出了出乎意料的预报;当具有明确的地面边界强迫时,模式预报是成功的,但当出现难以捉摸或不明显的边界强迫时,风暴难以预报,预报对流增长遇到困难,除非初值十分强;对于抬升的对流,模式预报其演变成降水系统有困难,对 WRF 和 MM5 都是如此。Jankov 等人还进行不同物理方案比较^[8],认为最敏感的是对流方案,对于弱降水边界层和微物理方案的敏感性是相当的,而对于强降水,微物理方案敏感。

2.2 天气要素预报

Welsh 等人^[9]用 WRF 模式和 LAPS 同化本地资料进行了佛罗里达大拐弯及周边地区 2003 年夏季(6 月 1 日~10 月 8 日)的天气预报,初步评价结果是:对雾、能见度、风、初始深对流和热带系统的预报有进步,降水评分与 Eta 模式相当,风预报明显好于 Eta 模式,最高气温预报有大的冷偏差,比 Eta 模式差,最低温度预报比较好,与 Eta 相当,相对湿度偏差比 Eta 大(正偏差),雾的预报比其它模式好。

2.3 涡旋中尺度对流系统预报

Weisman 等人^[10]利用弓形回波和中尺度对流涡旋实验(BAMEX)获得的外场加密观测资料(2003 年 5 月 20 日~6 月 6 日),利用 WRF 模式(水平分辨率 4km)作 36 小时

预报。将中尺度对流系统(MCS,邻近 100km 持续存在大于 35dBz 的回波)分为两类:类型 I:在 35dBz 中嵌入 45dBz 回波,类型 II:邻近 100km 回波强度为 45dBz。预报成功的标准定义为:在 440km 内和 3 小时预报与观测一致。评价 3~36 小时成功率,结果见表 3。

表 3 WRF 模式 3~36 小时预报中尺度对流系统成功率

		观测			
		类型 1		类型 2	
		是	否	是	否
预报	是	123	47	61	25
	否	90		16	21
命中率		58%		79%	
空报率		28%		29%	
临界成功指数		0.47		0.59	
位置误差(E)		MCS 个数	CSI		
< 3°		113	0.44		
< 2°		88	0.30		
< 1°		36	0.14		

由上表可以看出,类型 1 约 58% 的 MCS 的预报与观测相符,符合不好的个例是后半夜到凌晨。位置误差< 4°的临界成功指数为 0.47,类型 2 的 MCS CSI 更高,达 0.59。WRF 模式对强降水预报范围偏大,对层状云预报范围偏小,少数个例 MCS 持续时间太长。

2.4 陆面模式检验

M. Tewari 等人^[11]对 WRF 中的 Noah 统一陆面模式进行了检验,用 2002 年 5~6 月和 2003 年 3 月的 9 个 IHOP/NCAR 地面土壤和生态站的资料和 Purcell 的探空资料进行检验,结果表明,模式能较好地捕捉地面不均匀特征,土壤湿度和适当初值能进一步改善结果,Agrmet 与 Edas 土壤条件相结合比仅用单个方案效果更好,对于雪暴个例,统一的 Noah 陆面模式由于能反映雪融化和雪深变化因而能产生更好的结果。

2.5 降雨模拟^[12]

用 WSR-88D 雷达反射率资料推断降水

量,与 WRF 模式模拟的降雨量进行比较,比较的时段是 2003 年 6~8 月。结果发现:在许多极端降雨事件中,降雨的量值和位置,模拟与观测是类似的,降水总量从德克萨斯沿岸的北面向东北方向扩展;局地降雨频率的最大值,模拟与观测也是类似的,这些最大值都出现在山区,模拟比观测似乎更直接与山的位相联系,这种微小差异可能是由于 WRF 模式夸大了与太阳加热有关的低层辐合,也可能是由于 WSR-88D 雷达网在西部山区覆盖不足。降水频率的日变化强度和总的空间分布,模拟与观测是类似的;对于弱降水,对全国许多地区模拟与观测是一致的,但降雨频率模拟比观测大,可能是模式积云参数化产生小雨太频繁或者是在仅有微弱不稳定的环境中降雨持续时间过长。对于全国大多数地区降雨日变化的位相,模拟与观测粗略类似,每日降雨量在许多地区是下午和傍晚最频繁,高海拔出现时间早一点,低海拔出现时间晚一点,模拟情况也差不多,但不像观测那么明显,模式产生的峰值比观测稍早一点;模拟与观测最显著的差异在大平原的夜雨, WRF 模式常常低估了这种夜间出现的降雨强度和面积,即不能抓住大平原夜间降雨的优势。

2.6 WRF 中的大气化学模式^[13]

在 WRF 模式中,大气化学模式是在线完全耦合的,包括传输、干沉降、气相化学、生物所产生的放射、气溶胶参数化和光解频率等。WRF/化学模式从统计上讲预报 O_3 比 MM5/化学模式更有技巧,预报与观测差异不显著;预报 O_3 的前驱物 CO 和 NO_y (除船舶站外)也有较好技巧,但是 WRF/化学模式对这些前驱物和光一氧化物的预报偏差比 MM5/化学模式大,常比观测大,其原因可能与两个模式中垂直输送差有关,特别是在不同的边界层物理参数化对待底部少数几层的参数化上。

3 下一步开发计划和应用前景

WRF 模式系统下一步开发的内容非常广泛,包括先进的雷暴尺度的数值预报 NWP 技术,高分辨率 NWP 新的检验方法,四维变分同化和集合卡尔曼滤波技术,为飓风的研究和预报 WRF 与海洋模式的耦合,为大气化学和空气质量方面的应用与大气化学模式 (WRF-Chem) 的耦合,使 WRF 的框架和物理方案也能适应区域气候的研究,评估 WRF 用于全球预报的可行性。

WRF 模式已经用于并将继续用于许多科研机构 and 大学的研究工作,业务上的最大用户是 NCEP 和美国空军和海军。NCEP 的计划是^[14]:2004 年 10 月用 WRF 作集合预报,2005 年用 WRF 作北美的预报,2006 年用于飓风预报业务,2007 年用于多初值、多模式的短期集合预报业务,同时实现 WRF 模式版本的更新。

图 2 给出了 NCEP 短期集合预报示意图。图中地球系统模拟框架是美国海洋大气局(NOAA)与国家宇航局(NASA)联合发起的一个项目,旨在研制一个通用的标准耦合平台为地球系统各种不同的分量(同化系统、模式系统等)的应用提供一很好的环境和执行的移植性。

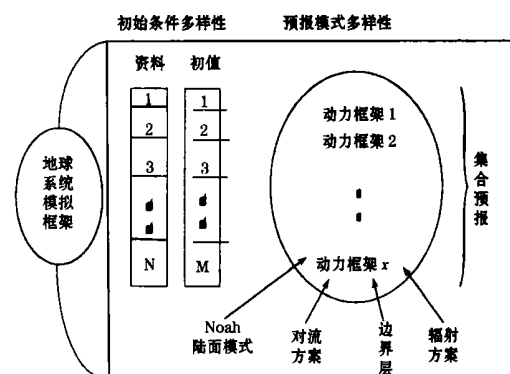


图2 NCEP 短期集合预报示意图

美国空军 2001 年 5 月已开始运行 WRF V1.0, 目前运行 WRF V1.2、1.3 作回报实验^[15];美国海军也参与了 WRF 的开发,并

开始使用 WRF 模式^[16]。到 2004 年 1 月份为止^[1], WRF 用户共有 1640 个, 包括原合作伙伴 128 个, 美国大学 308 个, 美国政府实验室 166 个, 私人机构 185 个, 国外用户 853 个。由于它的通用性和优良性能, 必将得到更为广泛的应用。

参考文献

- 1 Joseph B. Klemp. Weather Research and Forecasting Model: A technical Overview, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 2 Zavisla I. Janjic. The NCEP WRF Core, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 3 Geoff Dimego. WRF Development Activities at NCEP, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 4 Paula T. McCaslin at al. WRF SI GUI, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 5 Bob Gall. Developmental Tested Center, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 6 Steve Koch at al. Realtime Applications of the WRF Model at the Forecast Systems Laboratory, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 7 Edward J. at al. Examination of the Performance of Several Mesoscale Models for Convective Forecasting during IHOP, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 8 Isidora Jankov at al. An Investigation of IHOP Convective System Predictability Using a Matrix of 19 WRF Members, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 9 P. Welsh at al. Implementing the Weather Research and Forecast (WRF) Model with Local Data Assimilation in a NWS WFO, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 10 Morris Weisman at al. Realtime Explicit Convective Forecasts Using the WRF Model during the BAMEX Field Program, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 11 M. Tewari, at al. Implementation and Verification of the Unified Noah Land Surface Model in the WRF Model, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 12 Jason C. Knierel at al. The Diurnal Mode of Summer Rainfall Across the Conterminous United States in 10 km Simulation by the WRF Model. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 13 George A. GRELL et al. Fully Coupled "Online" Chemistry within the WRF Model. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 14 Stephen. Lord. WRF Status at NCEP and Plans for Future Transition to WRF, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 15 Mark T. Surmeier et al. Optimization of the Air Force Weather Weapons System's next Generation NWP Model: Weather Research and Forecast, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.
- 16 Richard M. Hodur, et al. The NAVY Role in WRF, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U.S.A. Jan. 10—15, 2004.

Progress of Weather Research and Forecast (WRF) Model and Application in the United States

Zhang Guocai

(China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract

WRF model system is a new generation mesoscale numerical weather forecast model and data assimilation system which is made by meteorological community of U. S. A. 3DAR and WRF V. 20 will be released this year. There are highly modular, transportable, and efficient in massively Parallel Computing environment, numerous physics options in the model, advanced data assimilation system developed in tandem with the model itself. The simulations and real time forecasting show that WRF model has good property for forecasting many kind of weather. The WRF model fully coupled "online" chemistry, therefore WRF model system has broad application not only in weather forecasts, but also in air quality forecasts.

Key Words: weather research forecast model progress