

王晓君,马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展 2011 26(11):1 191-199. [Wang Xiaojun, Ma Hao. Progress of application of the Weather Research and Forecast (WRF) model in China[J]. Advances in Earth Science 2011 26(11):1 191-199.]

新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展

王晓君^{1,2}, 马浩³

(1. 中国海洋大学物理海洋实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋—大气相互作用与气候实验室, 山东 青岛 266100; 3. 浙江省气候中心, 浙江 杭州 310017)

摘要: 随着中尺度大气模式的不断发展, 新一代中尺度天气研究和预报模式 WRF 因其完全开放、可移植性强、更新快等特点在国内外得到了广泛应用。从物理参数化方案研究、实时个例模拟研究及与中尺度大气模式 MM5 的对比研究 3 个方面介绍近 10 年来 WRF 模式在国内的发展和应 用概况, 阐明 WRF 模式在中尺度模拟中的普适性和优越性, 展望 WRF 模式在国内的两大发展前景: 一是在已有基础上研究能够同时模拟天气尺度和气候尺度现象的通用模式 CWRF, 二是与区域海洋模式耦合构建高分辨率区域耦合模式。通过对 WRF 模式在国内的应用现状进行归纳与梳理, 以及对模式未来发展趋势的展望, 需求为 WRF 模式的研究和使用者提供必要的参考。

关键词: WRF 模式; 物理过程; 模拟与预报; 气候模拟

中图分类号: P456.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2011)11-191-09

1 引言

中尺度大气数值模式在 20 世纪 80、90 年代已有相当发展, 如美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)用于业务预报的 ETA(η)模式, 美国宾夕法尼亚大学和国家大气研究中心(Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research, PSU/NCAR)合作研制的 MM5(Mesoscale Model 5)模式, 科罗拉多州立大学(Colorado State University, CSU)研发的区域大气模拟系统——RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)等中尺度模式, 已经发展得非常成熟。其中 MM5 模式是目前全球用户最多的中尺度大气模式, 但由于其开发时间较早, 动力学框架陈旧, 程序规范化、标准化程度不高, 一直未被美国最大的用户 NCEP 采用; ETA 模式虽然作为 NCEP 的业务预报模式, 但难以及时吸收各所科研部门和大

学的优秀研究成果^[1], 因此其推广也受到限制。为了继承各个研究机构的最新研究成果, 自 1997 年以来, 美国多所科研机构的科学家们共同研发了业务与研究共用的新一代高分辨率中尺度预报模式——WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF Model)。WRF 模式是一种完全可压非静力模式, 采用 Arakawa C 网格, 集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体的模式系统, 能够更好地改善对中尺度天气的模拟和预报^[2], 目前主要应用于有限区域的天气研究和业务预报。

WRF 模式自 2000 年推出第一个版本后又陆续改进更新, 推出了多个版本^[3]。2004 年 5 月发布的第二版 WRF V2.0 包含了单重和双重嵌套以及三维变分数据同化系统(3-Dimensional Variational data Assimilation System, 3DVAR)。随后 WRF V2.2 提出 WRF 的预处理系统(WRF Preprocessing System, WPS), 以期取代 WRF 标准初始化模块(WRF

① 收稿日期: 2011-05-30; 修回日期: 2011-09-29。

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“北太平洋副热带环流变异及其对我国近海动力环境的影响”(编号: 2007CB411800)资助。

作者简介: 王晓君(1986-), 女, 山东临朐人, 硕士研究生, 主要从事中尺度气象学及区域海气相互作用研究。

E-mail: nmxiaojun@163.com

Standard Initialization, WRF SI) ,直到 WRF V3 版本中 WPS 才得到正式使用。目前最新版本是 2011 年 3 月推出的 WRF V3.3 ,它更新了 4DVAR。

目前 ,国外对 WRF 模式的应用日趋广泛 ,研究也愈加深入 ,国内基于 WRF 模式的中尺度数值模拟研究也逐渐展开 ,主要分为 3 个方面 ,首先是对模式内部不同物理参数化方案的对比检验 ,以寻求在后期模拟中取得最佳效果;其次是在选用合理物理参数化方案基础上针对不同天气形势进行实时模拟与预报 ,验证模式的模拟效果;再次是与 MM5 模式的对比模拟 ,探讨 WRF 模式的优势与不足。

目前对 WRF 模式国内应用现状进行全面梳理的综述性文献还较为缺乏 ,研究者对 WRF 模式的应用情况难以获取较为宏观的全局性认识。本文将从物理参数化方案研究、实时模拟研究及与 MM5 模式对比研究 3 个方面介绍近 10 年来 WRF 模式在国内的发展和应用。

2 物理参数化方案研究

WRF 模式内部参数化方案较其他中尺度模式丰富 ,考虑的物理过程也更为细致。目前 ,国内对于 WRF 模式的研究主要是围绕不同物理参数化方案的选择问题展开的 ,究竟运用何种参数化方案能够达到最优模拟效果 ,不同天气形势下参数化方案的选取对模式的模拟能力有多大影响?

WRF 模式中引入的物理参数化方案主要包括微物理过程方案、积云对流方案、边界层方案及陆面方案等^[2]。

2.1 微物理过程方案

WRF V3 版本中提供了 7 种微物理过程方案。其中 ,Kessler 方案是一种简单的暖云方案; Purdue Lin 方案^[4] 是 WRF 模式中相对比较复杂、成熟的一种方案; WSM3、WSM5 及 WSM6 方案是在简单冰方案的基础上延伸发展出来的 3 种方案; Eta Ferrier 方案在进行大时间步长积分时计算结果比较稳定; Thompson 方案则是为了提高冻雨事件的预报水平、为飞机安全预警服务而设计的^[5]。

微物理过程可以通过调整温湿场结构及过程中水汽相变潜热的释放、降水粒子的拖曳作用 ,影响积云对流发生发展的条件 ,进而影响积云降水的预报 ,这在一定程度上说明了微物理过程方案选取的重要性^[5]。在多种微物理方案中 ,究竟哪种方案的模拟效果较好 ,闫之辉等^[6] 和李嘉鹏等^[7] 分别针对不同的天气个例进行模拟试验 ,结果都表明由于 Lin 方

案更精细地刻画了云中水汽、云水、降水及云冰等微物理过程 ,为降水模拟提供了更为科学的物理机制 ,使其在模拟降水落区、降水量和降水强度等方面较接近实况 ,优于其他微物理过程方案。

2.2 积云对流参数化方案

WRF V3 版本中积云对流参数化方案包括: Kain-Fritsch (KF) 方案、Betts-Miller-Janjic (BMJ) 方案、Grell-Devenyi (GD) 集合方案、Grell-3 方案。其中 ,Grell-3 方案是 WRF V3 版本中提出的新方案 ,目前在很多物理场景中的试验效果不太理想 ,所以应用很少^[2]。

在暴雨等强降水过程的模拟和预报中 ,积云对流过程非常重要 ,选择合适的积云对流参数化方案可以有效地改善预报效果。前人已对日本谱模式 (Japanese Spectrum Model , JSM) ^[8]、MM5 模式^[9]、CAM (Community Atmospheric Model) ^[10] 等模式中的对流参数化方案进行了对比试验 ,目前对 WRF 模式中对流方案的研究也已经展开。闫之辉等^[6] 针对 WRF V2.0 模式中的 BMJ、KF 和 GD 方案做了对比试验 ,结果表明: KF 方案的预报效果相对较好 , GD 方案预报的雨带位置偏北 , BMJ 方案预报的降雨带则偏弱 ,且这 2 种方案预报的中心最大降水强度偏强。伍华平等^[11] 采用 7 种微物理方案与 3 种积云对流参数化方案 (表 1) 组合对 2007 年 6 月 1 ~ 2 日湖南南部的暴雨过程的降水 ETS (Equitable Threat Score) 评分进行了对比试验 ,也发现 KF 方案的模拟效果较好 ,其中有 5 次 ETS 评分高于另外 2 种积云方案。

表 1 各微物理方案及积云对流方案对暴雨预报 ETS 评分^[11]

Table 1 ETS for predicting rainstorm for all kinds of microphysics and cumulus parameterization schemes^[11]

方案	KF	BMJ	GD
Kessler	0.058	0.085	0.080
Lin , <i>et al</i>	0.178	0.115	0.063
WSM3	0.165	0.045	0.082
WSM5	0.154	0.042	0.058
Ferrier (new Eta)	0.057	0.039	0.112
WSM6	0.125	0.008	0.052
Thompson	0.155	0.099	0.074

对 3 种积云对流参数化方案模拟的降水量进行对比 ,结果显示: 虽然 3 种方案都模拟出了暴雨的大体范围 ,但 BMJ 方案模拟的强降水范围偏大、强度偏强; 此外 GD 方案下强降水范围和强度都偏小 ,只

有 KF 方案对强降水位置和强度的模拟与实况比较接近, 从而进一步说明采用 KF 方案能较好地反映观测实况。分析原因, 伍华平等^[11]认为, KF 方案是专为水平分辨率约为 20 km 的中尺度模式设计的, 在该分辨率下, 其模拟效果会优于其他方案, 这在某种程度上说明模式的水平分辨率也将直接影响积云对流参数化方案的效果^[12]。

2.3 边界层参数化方案

边界层在大气模式中的地位十分重要, 它不仅影响低层大气要素, 通过边界层的垂直输送也能对高层大气产生影响。WRF V3 版本中边界层参数化方案有 4 种选择^[2], 其中 MRF(Medium Range Forecast Model)^[13]及 YSU(Yonsei University) 边界层参数化方案都采用了 K 闭合技术, MYJ(Mellor-Yamada-Janjic) 方案采用的则是 TKE(Turbulent Kinetic Energy) 闭合技术, ACM2(Asymmetrical Convective Model version 2) 方案是在简单突变模式 ACM 的基础上发展而来的, 是 WRF V3 版本的新增方案。

陈炯等^[14]通过模拟 2003 年江淮暴雨个例发现采用边界层方案能大大改善降水模拟结果, 边界层物理过程对格点尺度降水的影响不大, 但对对流性降水的影响却很明显。研究还指出各种边界层参数化方案虽然原理上有所不同, 但采用不同的边界层方案并没有显著的差别。

2.4 陆面过程方案

WRF 模式比较细致地考虑了陆面过程(Land Surface Model, LSM), 给出的参数化方案也有多种^[2], 包括 5 层热扩散方案、Noah 陆面方案^[15]、RUC 模式陆面方案(Rapid Update Cycle Model)、Pleim-Xiu LSM、城市冠层模式(Urban Canopy Model, UCM) 和海洋混合层模式(Ocean Mixed-Layer Model) 等。

马红云等^[16]研究表明: 采用耦合陆面方案可以有效改善降水模拟结果; 但是由于不同陆面方案考虑的要素和物理过程存在一定差异, 它们对降水的模拟各有所长, 综合比较各试验结果, Noah 方案的模拟效果较其他方案更为稳定与合理。当考虑城市下垫面时, UCM 方案的模拟效果略优于其他方案, 说明是否考虑城市地区的影响应当成为选择陆面方案的依据之一。在具体选择陆面方案时要综合考虑各方面的因素。

2.5 集合预报

模拟结果的优越性依赖于各种物理过程参数化方案的协同贡献, 因此不能认为一次成功的模拟仅

仅是模式中某类参数化方案中某个选项的贡献, 要实现准确的模拟预报必须综合考虑各种方案的优缺点, 扬长避短, 找到使模拟达到最优的各种物理过程参数化方案的优化组合。集合预报就是一种能够产生更加稳定和准确预报结果的试验方法, 它基于多个样本进行多次预报, 从而在概率意义上保证了预报结果的准确性。李刚等^[17]选用 WRF V3.0 模式中的物理参数化方案: 5 种微物理过程方案、3 种积云对流参数化方案及 3 种边界层方案, 构造了含有 20 个成员的模式扰动集合预报, 验证了通过组合模式中的不同参数化方案制作集合预报的可行性, 集合平均也在一定程度上改善了模拟结果。他们还在集合预报的基础之上, 进一步研究得出: 在不同量级降水的 Ts(Threat score) 和 Bs(Bias score) 评分中, 不同积云对流参数化方案和边界层方案对降水的影响程度也各不相同。

对于不同天气形势, 模拟过程中所依赖的参数化方案也不尽相同, 正确选择参数化方案有助于提高模拟精度, 使预报结果更加准确。

3 个例模拟应用

就 WRF 模式的应用现状来看, 对不同中尺度天气形势进行个例模拟成为其应用最广泛的一个领域, 包括对各种降水过程(如区域性强降雨、降雪过程、深对流系统引起的降水等) 和台风个例的模拟, 此外近几年海雾的研究工具也由 RAMS 模式和 MM5 模式逐渐转向 WRF 模式。

首先, 对于降水过程的模拟。侯建忠等^[18]和宋自福等^[19]用 WRF 模式分别模拟了 2005 年陕西汛期和 2008 年焦作汛期降水, 结果都表明 WRF 模式能够很好地模拟出暴雨落区和降水强度, 且准确率相对比较稳定, 对于在日常预报业务中制作短期降水预报具有一定的指导作用, 可作为未来客观预报转折性天气及暴雨天气的一种新技术工具。此外, 侯建忠等^[20]基于 WRF 模式对陕西地区的 2 次区域性秋季暴雨进行了模拟, 发现在暴雨雨带走向、暴雨落区、中心强度以及降雨时间等诸多方面, 模式结果都与实况基本吻合, 同时 WRF 模式还能够对不同类型的暴雨进行机理分析和研究。沈桐立等^[21]利用 WRF 模式对 2006 年 6 月 6~7 日福建特大暴雨进行了数值模拟和诊断分析, 也成功地模拟出了强降水中心的分布和演变。然而, 由于目前大雨以上量级降水的实况个例较少, 检验结果存在一定的偶然性^[19]。

近年来,极端天气事件频发,因此 WRF 模式也被用于模拟暴雪和冰冻天气事件^[22~24]。苗春生等^[25]利用 WRF 模式对 2008 年 1 月 25~29 日中国南方低温雨雪冰冻天气过程进行模拟,基本再现了实际降水情况。与 MICAPS 实况相比(图 1),WRF 模拟的 108 h 累积降水量虽然区域范围比实况稍大,但是模拟出的中心雨带与实况较为一致,都呈西南—东北走向的带状分布,模拟的最大值降水量也与实况一致。关于流场的模拟,从图 1c 和图 1d 可以看出实况和模拟结果都存在一条很强的东西向切变线,切变线以南为西南风,以北为西北风。比较来看,模拟的切变线位置(湖南广西交界、江西南部、浙江南部一线)和强度与实况相一致,模拟比实况的流线略密,但模拟结果基本能够反映出实况的流场。从降水量和流场的模拟效果都可以看出 WRF 较成功地模拟出了本次天气过程。

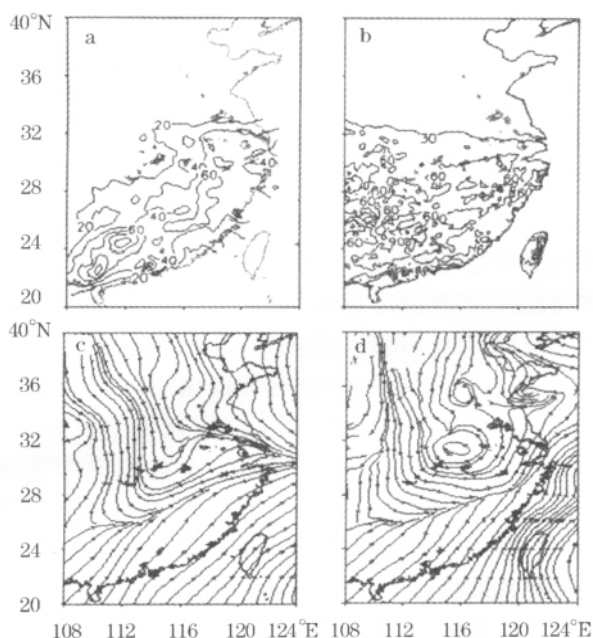


图 1 1 月 25 日 00 时~29 日 12 时 MICAPS 实况降水量 (a, mm)、细网格累积降水量 (b, mm) 和 1 月 28 日 12 时 850 hPa 实况流场 (c, m/s) 及模拟流场 (d, m/s)^[25]

Fig. 1 (a) MICAPS observed and (b) simulated cumulative precipitation (mm) from 00:00 UTC 25 th to 12:00 UTC 29 th January, and (c) observed and (d) simulated 850 hPa streamline fields (m/s) at 12:00 UTC 28 th January^[25]

其次,对于台风的模拟研究。虽然目前的主流研究工具仍是台风模式^[26~28],但现在也有研究者运用 WRF 模式开展对台风的模拟和预报。虽然 WRF

模式通过加载合适的风场^[29]或海表面温度场^[1],能够使模拟出的台风路径、降水落区及风场更接近实况,但因为台风是一种复杂的海—气相互作用现象^[30,31],仅用一种大气模式难以全面考虑下垫面的影响及海—气之间的反馈过程,因此 WRF 模式在一定程度上还只能作为预报与模拟台风的一种参考,全面刻画台风发生、发展、成熟和消衰的演变过程仍需借助动力学框架更为完备的台风模式。

除降水和台风过程外, WRF 模式也广泛用于海雾的模拟和预报。早期学者对海雾的研究多采用一维或二维模式。近年来,随着三维模式的发展, MM5 和 RAMS 模式逐渐被应用到海雾的模拟和预报中。近几年来, WRF 模式也在不断推广,基于 WRF 的海雾研究已经逐渐展开。黄彬等^[32]将海雾诊断程序耦合到 WRF 模式中,建立的黄渤海海雾数值预报系统能够较准确地预报海上能见度,对海雾的预报有较好的指示意义,尤其对大雾有很好的预报效果。张苏平等^[33]对 2008 年 5 月 2~3 日发生在黄海的 1 次海雾过程进行了观测分析和 WRF 数值模拟,结果表明 WRF 模式刻画的海雾范围、生消时间、能见度、温度以及湿度的垂直廓线与观测基本一致。

针对如何提高海雾拟初始场质量问题,高山红等^[34]利用 WRF 模式及其先进的 3DVAR 同化模块,设计构建了循环 3DVAR 同化方案,并基于此方案模拟了 2006 年 3 月 6~8 日的 1 次大范围黄海海雾过程。通过一系列 WRF 数值模拟对比试验,验证了循环 3DVAR 同化方案能有效改进黄海海雾模拟的初始场质量。

此外, WRF 模式能够描述弱强迫天气尺度系统中的中小尺度对流系统,捕捉到常规天气图上难以分辨出来的雷暴单体,为雷暴的分析预报提供了一条可行的途径^[35]。

以上众多的个例研究,无论是从模拟不同类型降水,还是对台风和海雾等的模拟,结果都展现了 WRF 模式较好的模拟性能。

4 WRF 与 MM5 模式应用对比

WRF 模式与 MM5、ETA 模式相比具有许多优势:首先, WRF 的计算网格形式采用 Arakawa C 网格;其次, WRF 模式支持更高的网格分辨率(1~10 km),采用比 ETA 模式更好的地形数据,并且在更长的时间步长下也能保证计算的稳定性;再次,模式源程序多采用 Fortran 90 编写,输出格式为 NetCDF

格式程序的通用性较好^[1]。然而,仅仅在计算环境方面具有优势是远远不够的,WRF 模式是否真正优于其他中尺度大气模式需要针对某些具体天气实例来进行模拟对比。近年来,国内学者就 WRF 与 MM5 模式的模拟能力展开了大量对比研究。

孙健等^[36]采用相同的初始场、边界条件以及物理参数化方案,分别用 WRF 和 MM5 模拟了 1998 年的 3 次强降水过程,模拟结果对比表明对于不同地区、不同性质的强降水过程,WRF 模式模拟的天气系统和降水落区明显优于 MM5 模式。虽然 2 个模式都模拟出了本次降水过程,但是与实况相比,MM5 模拟的强降水中心落区偏差较大,而相比之下,WRF 模拟的结果与实况基本吻合(图 2)。

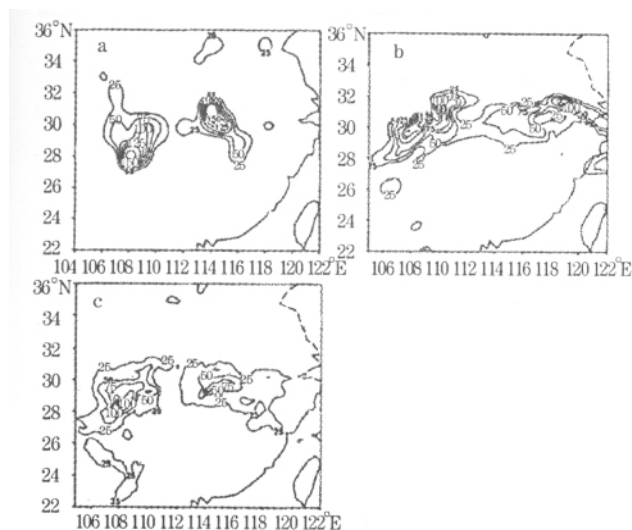


图 2 1998 年 7 月 20 日 12 时~21 日 12 时的降水量(mm)^[36]

Fig. 2 Precipitation (mm) from 12:00 UTC 20 to 12:00 UTC 21 July 1998^[36]

(a) 实况;(b) MM5;(c) WRF

(a) Observed, (b) MM5 and (c) WRF simulated

此后,许多学者展开了 MM5 和 WRF 模式对暴雨模拟能力的对比研究^[37,38],通过不同的暴雨个例模拟发现 WRF 对中尺度天气系统的高度场、风场、散度场、水汽通量场及垂直速度场等要素的模拟效果都好于 MM5。最近,何光碧等^[39]在模拟 2010 年 7 月 14~18 日四川大暴雨试验中也发现 WRF 模式的模拟性能优于 GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction System) 模式、AREM(Advanced Regional Eta-coordinate Model) 模式和 MM5 模式。此外,对大风过程的模拟能力^[40]、气温的预报^[41]以及东北冷涡雷暴天气过程中降水量的模拟^[42]等研究都表明 WRF 模拟结果较 MM5 都有一

定程度的改善。

综合以上各种对比试验结果,WRF 模式对中国地区天气过程有较好的模拟能力,因此运用 WRF 来研究中国地区天气过程是可行的。相比于 MM5 模式而言,WRF 模式是一个更便捷、更完善的模拟与预报系统,发展前景十分广阔。

5 WRF 应用前景展望

综上,通过对 WRF 模式在国内应用现状的概述,我们获得了如下认识:①就不同参数化方案的适用性而言,在微物理过程方案中,Lin 方案的模拟效果较好;在积云对流参数化方案中,KF 方案的模拟结果往往优于其他方案;采用边界层方案有助于改善模拟结果;各种陆面过程方案各有所长,综合而言 Noah 方案的模拟效果较为稳定与合理;集合平均能够在一定程度上改善模拟的结果。②就个例模拟而言,WRF 模式能够比较成功地再现中尺度过程中的环流形势演变和雨带分布特征以及中小尺度天气系统,可以应用于模拟和业务预报。③就中尺度模式之间的比较而言,WRF 的模拟效果普遍优于 MM5。总体而言,在选用合适的物理参数化方案下,WRF 模式具有较好的模拟和预报性能,体现了其在中尺度模拟中的普适性和优越性。

虽然 WRF 模式已达到较好的模拟效果,但也存在一些问题和不足,一是模式水平分辨率问题,二是单次模拟存在偶然性问题。WRF 模式中的多数参数化方案是从其他模式(如 MM5 模式、ETA 模式、RUC 等)中直接移植过来的,不同参数化方案对模式的分辨率要求不同,对于选定的 WRF 网格来说,可能未能同时达到各种参数化方案的分辨率要求,而模式的水平分辨率将直接影响积云对流参数化方案的效果,从而影响对降水等的模拟^[12],造成了模拟偏差。解决这一问题就需要研究开发机构对 WRF 模式的内部物理框架做进一步完善。对于第二个问题,集合预报^[43]则可以同时解决初值的不确定性及数值模式中物理过程的不确定性问题,从而提供更为可信的结果。通过研发部门的不懈努力,结合全球大量用户的意见反馈,WRF 模式的下一代版本对物理过程的考虑将更加全面,模式分辨率和模拟精度也将进一步提高,嵌套网格技术及现已实现的四维变分同化技术将更为完善。就 WRF 的功能而言,除了已经涉及的中小尺度降水预报、温度、风场等天气要素预报,以及台风、海雾等复杂天气形势预报,WRF 模式在空气质量预报^[44]、大气化学模

式^[45]、土壤的水热模拟^[46]等环境领域的应用也将逐渐展开。

未来,WRF 模式的应用领域将更加广泛,WRF 在中尺度模拟和预报中的优势也将更加突出,基于 WRF 的中尺度研究也将不断走向深入。今后,WRF 模式的应用发展有两大趋势:第一,向更长的时间尺度过渡,构建同时能模拟天气尺度和气候尺度现象的通用模式;第二,与区域海洋模式相耦合,构建高分辨率的区域耦合模式。

5.1 区域气候模拟

在全球变暖背景下,气候变化成为广受关注的科学问题^[47]。人们希望在更高精度上更为细致地刻画气候系统的演变规律,因此构建区域气候模式成为气候学研究的迫切需求,同时也是未来气候模式的发展方向^[48]。美国伊利诺伊州立大学水文研究所的 Liang 等^[49,50]在 WRF 的基础上于 2005 年发展了 CWRF (Climate-Weather Research and Forecasting Model),它不仅包含了 WRF 用于数值天气预报的所有功能,同时也能够应用于气候模拟,成为近期较有代表性的区域气候模式^[51]。随着 CWRF 在国外的应用和推广,国内也开始对 WRF 模式应用于区域气候模拟展开探索^[52]。但是,总体而言,国内运用 CWRF 模式进行区域气候方面的研究仍处于起步阶段,未来尚有很大发展空间。

5.2 区域耦合模式

地球气候系统是一个统一的整体,海洋和大气相互作用,两者之间无时无刻不在进行着动量、热量和水通量的交换^[53]。运用海—气耦合模式^[54,55]进行数值模拟已经成为研究海—气相互作用的基本方法。气候系统模式^[56]在近几十年中得到了长足的发展,其模拟结果成为政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)进行气候变化评估的主要工具。然而目前的气候系统模式分辨率普遍不高,仅能模拟出大尺度海—气相互作用中的主要现象,而对中尺度或更小尺度的天气现象,如热带气旋、风暴潮、海雾等,则基本不具备模拟能力。这一问题的解决,需要借助于中尺度海—气耦合模式。国外科学家对此展开了众多研究,已有研究将 WRF 模式与区域海洋模式 ROMS (Regional Ocean Modeling System) 相耦合^[57]来研究大西洋飓风^[58]和热带气旋^[59],发现相对于大尺度气候模式,中尺度模式的模拟效果更为真实。今后将 WRF 模式与其他海洋模式相耦合,在更加真实的动力环境下研究大气、陆地、海洋、海冰之间的相

互作用、构建中尺度数值预报系统是一种必然的趋势。

参考文献 (References):

- [1] Liu Xiang, Jiang Guorong, Zhuo Haifeng. Numerical experiment for the impact of SST to typhoon "Chanchu" [J]. *Marine Forecasts*, 2009, 26 (3): 1-11. [刘翔, 蒋国荣, 卓海峰. SST 对台风“珍珠”影响的数值试验 [J]. 海洋预报, 2009, 26 (3): 1-11.]
- [2] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF Version 3 [Z]. Ncar Technical Note, NCAR/TN-475 + STR, 2008.
- [3] Zhang Guocai. Progress of Weather Research and Forecast (WRF) model and application in the United States [J]. *Meteorology*, 2004, 30 (12): 27-31. [章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景 [J]. 气象, 2004, 30 (12): 27-31.]
- [4] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, (22): 1 065-1 092.
- [5] Niu Junli, Yan Zhihui. WRF microphysical model programs on the impact of heavy rainfall forecast [J]. *Science and Technology Information*, 2007, (23): 17-20. [牛俊丽, 闫之辉. WRF 模式微物理方案对强降水预报的影响 [J]. 科技信息, 2007, (23): 17-20.]
- [6] Yan Zhihui, Deng Liantang. Description of microphysical processes in WRF model and its prediction experiment [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2007, 1 (6): 1-6. [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.]
- [7] Li Jiapeng, Yin Yan, Jin Lianji, et al. A numerical study on deep tropical convection using WRF model [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25 (3): 287-294. [李嘉鹏, 银燕, 金莲姬, 等. WRF 模式对澳洲一次热带深对流系统的模拟研究 [J]. 热带气象学报, 2009, 25 (3): 287-294.]
- [8] Peng Xindong, Wu Xiaoming, Tsuboki Kazuhisa. Numerical test of convective parameterization on the simulation of a Meiyu-Front rainstorm [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18 (3): 451-461. [彭新东, 吴晓鸣, 坪木和久. 积云对流参数化对一次梅雨锋暴雨过程影响的模拟检验 [J]. 高原气象, 1999, 18 (3): 451-461.]
- [9] Wang Jianjie, Hu Xin, Guo Xiaorong. Comparison experiments on cumulus parameterization schemes of the MM5 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12 (1): 41-53. [王建捷, 胡欣, 郭肖容. MM5 模式中不同对流参数化方案的比较试验 [J]. 应用气象学报, 2001, 12 (1): 41-53.]
- [10] Chen Haoming, Zhou Tianjun, Neale R B, et al. Performance of the new NCAR CAM3.5 in east Asian Summer Monsoon simulations: Sensitivity to modifications of the convection scheme [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 3 657-3 675.
- [11] Wu Huaping, Shu Jiong, Gu Ying, et al. The effects of different cumulus parameterization schemes in WRF on heavy rainfall in

- Hunan province [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25(2): 175-180. [伍华平, 束炯, 顾莹, 等. 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, 2009, 25(2): 175-180.]
- [12] Zhou Tianjun, Qian Yongfu. Numerical experiments of effect of model horizontal resolution on cumulus parameterization [J]. *Plateau Meteorology*, 1996, 15(2): 204-211. [周天军, 钱永甫. 模式水平分辨率影响积云对流参数化效果的数值试验[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 204-211.]
- [13] Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Monthly Weather Review*, 1996, 124: 2 322-2 339.
- [14] Chen Jiong, Wang Jianjie. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(Suppl.): 11-17. [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(增刊): 11-17.]
- [15] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation [J]. *Monthly Weather Review* 2001, 129: 569-585.
- [16] Ma Hongyun, Guo Pinwen, Song Jie. Simulation of “2007. 7” heavy rainfall case in the Changjiang-Huaihe valley using the WRF model with different land surface schemes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(3): 557-567. [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.]
- [17] 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 [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2010, 11(1): 89-96. [李刚, 王铁, 谭言科, 等. WRF3.0 参数化敏感性及其集合预报试验[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2010, 11(1): 89-96.]
- [18] Hou Jianzhong, Ning Zhiqian, Chen Gaofeng, et al. The application and analysis by WRF in Shaanxi flood season in 2005 [J]. *Shaanxi Meteorology*, 2006(1): 22-26. [侯建忠, 宁志谦, 陈高峰, 等. WRF 模式 2005 年汛期在陕西应用与分析[J]. 陕西气象, 2006, 1(1): 22-26.]
- [19] Song Zifu, Li Yanhong, Li Qiuyuan, et al. Precipitation test by WRF model in Jiaozuo flood season in 2008 [J]. *Meteorological and Environmental Science*, 2009, 32(Suppl.): 23-26. [宋自福, 李艳红, 李秋元, 等. WRF 模式对焦作 2008 年汛期降水的检验[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(增刊): 23-26.]
- [20] Hou Jianzhong, Ning Zhiqian, Xie Shuangting, et al. Simulation and analysis of two regional autumn rainstorms in Shaanxi based on WRF model [J]. *Journal of Chengdu University of Information Meteorology*, 2007, 22(5): 648-653. [侯建忠, 宁志谦, 谢双亭, 等. 基于 WRF 模式的陕西两次区域性秋季暴雨的数值模拟[J]. 成都信息工程学院学报, 2007, 22(5): 648-653.]
- [21] Shen Tongli, Zeng Jinyu, Zhu Weijun, et al. Numerical simulation and diagnostic analysis of a heavy rain fall in Fujian during 6-7 June 2006 [J]. *Transaction of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(1): 14-24. [沈桐立, 曾瑾瑜, 朱伟军, 等. 2006 年 6 月 6-7 日福建特大暴雨数值模拟和诊断分析[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 14-24.]
- [22] Li Jianhua, Cui Yishao, Shan Baochen. Characteristics of low level cold airstream snowfall in Shandong Peninsula [J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(5): 49-55. [李建华, 崔宜少, 单宝臣. 山东半岛低空冷流降雪分析研究[J]. 气象, 2007, 33(5): 49-55.]
- [23] Tao Jianhong, Zhang Xinrong, Zhang Tiejun, et al. Simulation and analysis of heavy snowfall in the Hexi corridor with WRF model [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(1): 68-75. [陶健红, 张新荣, 张铁军, 等. WRF 模式对一次河西暴雪的数值模拟分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 68-75.]
- [24] Fan Yuanyue, Tang Jianping, Xu Shuangzhu. Diagnosis and simulation of the blizzard weather in Hubei [J]. *Scientia Meteorological Sinica*, 2010, 30(1): 111-115. [范元月, 汤剑平, 徐双柱. 一次湖北暴雪天气的诊断与模拟[J]. 气象科学, 2010, 30(1): 111-115.]
- [25] Miao Chunsheng, Zhao Yu, Wang Jianhong. Numerical simulation of 080125 cold air, freezing rain and snow in southern China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(1): 25-33. [苗春生, 赵瑜, 王坚红. 080125 南方低温雨雪冰冻天气持续降水的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 25-33.]
- [26] Liu Huanzhu, Chen Dehui, Teng Qiaobin. Researches on the influence of parameterization of physical process on modeling typhoon and its dynamical structure [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1998, 9(2): 141-150. [刘还珠, 陈德辉, 滕俏彬. 不同物理过程参数化对模式台风的影响及其动力结构的研究[J]. 应用气象学报, 1998, 9(2): 141-150.]
- [27] Wu Huiding, Yang Xuelian, Bai Shan. A baroclinic typhoon model with a moving multi-nested grid and variational adjustment initialization I. Numerical method [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(4): 38-46. [吴辉庭, 杨学联, 白珊. 三维斜压台风模式 I: 数值方法[J]. 海洋学报, 1998, 20(4): 38-46.]
- [28] Wu Huiding, Yang Xuelian, Bai Shan. A baroclinic typhoon model with a moving multi-nested grid and variational adjustment initialization II. Forecast experiments [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(5): 30-43. [吴辉庭, 杨学联, 白珊. 三维斜压台风模式 II: 预报试验[J]. 海洋学报, 1998, 20(5): 30-43.]
- [29] Kou Yuanyuan. The Comparative Study of Mesoscale Numerical Simulation of Cloud Drift Wind Data Assimilation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008. [寇媛媛. 云迹风资料同化在中尺度数值模拟中的对比研究(MM5 和 WRF 模式) [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.]
- [30] Huang Liwen, Wu Guoxiong, Yu Rucong. The effects of mesoscale air-sea interaction heavy rain in two typhoon processes [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(4): 455-467. [黄立文, 吴国雄, 宇如聪. 中尺度海-气相互作用对台风暴雨过程的影响[J]. 气象学报, 2005, 63(4): 455-467.]

- [31] Jiang Xiaoping, Liu Chunxia, Mo Haitao, *et al.* The impact of air-sea interactions on typhoon structure [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, 26(1): 55-59. [蒋小平, 刘春霞, 莫海涛, 等. 海气相互作用对台风结构的影响[J]. 热带气象学报, 2010 26(1): 55-59.]
- [32] Huang Bin, Chen Tao, Chen Jiong, *et al.* Simulation and test of sea fog numerical prediction system for Yellow Sea and Bohai Sea [J]. *Meteorological Science and Technology* 2009, 37(3): 271-275. [黄彬, 陈涛, 陈炯, 等. 黄渤海海雾数值预报系统及检验方法研究[J]. 气象科技 2009, 37(3): 271-275.]
- [33] Zhang Suping, Ren Zhaopeng. The influence of the thermal effect of underlying surface on the spring sea fog over the Yellow Sea: Observations and numerical simulations [J]. *Acta Meteorologica Sinica* 2010 68(4): 439-449. [张苏平, 任兆鹏. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响——观测与数值试验[J]. 气象学报 2010 68(4): 439-449.]
- [34] Gao Shanhong, Qi Yiling, Zhang Shoubao, *et al.* Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the Yellow Sea by using cycling 3DVAR Part I: WRF numerical experiments [J]. *Periodical of Ocean University of China* 2010 40(10): 1-9. [高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环 3DVAR 改进黄海海雾数值模拟初始场 I: WRF 数值试验[J]. 中国海洋大学学报 2010 40(10): 1-9.]
- [35] Fu Weiji, Lu Hancheng, Wang Liang, *et al.* A case study of forecasting thunderstorm in the weakly forced system with WRF model [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2009, 29(3): 322-329. [付伟基, 陆汉城, 王亮, 等. WRF 模式对弱强迫系统中雷暴预报个例研究[J]. 气象科学 2009 29(3): 323-329.]
- [36] 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. [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.]
- [37] Wang Shuchang, Ji Liang, Pan Xiaobin, *et al.* Contrasting analysis simulation of a Mei-yu-Front storm rainfall process [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* 2005, 25(6): 569-578. [王舒畅, 季亮, 潘晓滨, 等. 一次梅雨锋暴雨过程的中尺度对比模拟分析[J]. 气象科学 2005 25(6): 569-578.]
- [38] Liu Ningwei, 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. [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.]
- [39] He Guangbi, Tu Nini, Zhang Lihong, *et al.* Prediction capability analysis of limited-area numeric models on Sichuan heavy rain-storm process in Sichuan [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* 2010 30(4): 8-17. [何光碧, 屠妮妮, 张利红, 等. 2010 年 7 月 14~18 日四川大暴雨过程区域模式预报性能分析[J]. 高原山地气象研究 2010 30(4): 8-17.]
- [40] Zhao Hong, Yang Xuelian, Xing Jianyong, *et al.* The analysis of a yellow sea cyclone with WRF and MM5 [J]. *Marine Forecasts*, 2007 24(2): 1-8. [赵洪, 杨学联, 邢建勇, 等. WRF 与 MM5 对 2007 年 3 月初强冷空气数值预报结果的对比分析[J]. 海洋预报 2007 24(2): 1-8.]
- [41] Yan Xiaoying, Yao Ming, Wang Yajun. The analysis of temperature numerical prediction in June-September in 2008 with WRF and MM5 [J]. *Jilin Meteorology* 2009 4(4): 5-7 21. [晏晓英, 药明, 王雅君. WRF 和 MM5 对 2008 年 6—9 月温度数值预报结果的对比分析[J]. 吉林气象 2009 4(4): 5-7 21.]
- [42] Zou Xudong, Yang Hongbin. Simulation on the thunderstorm weather process caused by northeast cold vortex based on MM5 and WRF models [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2007 23(6): 20-25. [邹旭东, 杨洪斌. MM5 和 WRF 模拟东北冷涡雷暴天气过程对比分析[J]. 气象与环境学报 2007, 23(6): 20-25.]
- [43] Du Jun. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(1): 16-28. [杜钧. 集合预报的现状和前景[J]. 应用气象学报 2002 13(1): 16-28.]
- [44] Cheng Xinghong, Xu Xiangde, Ding Guoan, *et al.* Differences in MM5 and WRF meteorological field simulations and impact on air quality forecasting by CMAQ model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009 22(12): 1 411-1 419. [程兴宏, 徐祥德, 丁国安, 等. 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): 1 411-1 419.]
- [45] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, *et al.* Fully coupled "on-line" chemistry within the WRF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 6 957-6 975.
- [46] Wen Lijuan, Lü Shihua. Application of land surface data assimilation into the simulation of soil moisture and temperature of croplands in oasis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010 26(7): 60-65. [文莉娟, 吕世华. 陆面数据同化方法在绿洲农田土壤温湿度模拟中的应用[J]. 农业工程学报 2010 26(7): 60-65.]
- [47] Wang Shaowu, Ge Quansheng, Wang Fang, *et al.* Key issues on debating about the global warming [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(6): 656-665. [王绍武, 葛全胜, 王芳, 等. 全球气候变暖争议中的核心问题[J]. 地球科学进展 2010 25(6): 656-665.]
- [48] Hu Yamin, Ding Yihui. The progress of RCMs simulation on East Asia region [J]. *Advances in Earth Science*, 2006 21(9): 956-964. [胡娅敏, 丁一汇. 东亚地区区域气候模拟的研究进展[J]. 地球科学进展 2006 21(9): 956-964.]
- [49] Liang X Z, Choi H I, Kunkel K E, *et al.* Development of the regional Climate-Weather Research and Forecasting model (CWRF): Surface boundary conditions [J]. *Scientific Report, ISWS SR*, 2005 01: 1-32.
- [50] Liang X Z, Choi H I, Kunkel K E, *et al.* Surface boundary conditions for mesoscale regional climate models [J]. *Earth Interactions*, 2005 9: 1-28.
- [51] Pan Xiaoduo, Li Xin, Chao Zhenhua. Review of research of forcing data for regional scale hydrological model [J]. *Advances in Earth Science*, 2010 25(12): 1 314-1 324. [潘小多, 李新, 钞

- 振华. 区域尺度近地面气候要素驱动数据研制的研究综述[J]. 地球科学进展 2010 25(12): 1 314-1 324.]
- [52] Liu Shuyan , Liang Xinzong , Gao Wei , *et al.* Application of Climate-Weather Research and Forecasting model (CWRf) in China: Domain optimization [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* , 2008 32(3) : 457-468. [刘术艳, 梁信忠, 高伟, 等. 气候-天气研究及预报模式(CWRf) 在中国的应用: 区域优化[J]. 大气科学 2008 32(3) : 457-468.]
- [53] Zhou Tianjun , Zhang Xuehong , Yu Yongqiang. On the coupling procedure of air-sea freshwater exchange in climate system models [J]. *Chinese Science Bulletin* , 2001 46(1) : 83-85. [周天军, 张学洪, 俞永强. 气候系统模式中海气水通量交换的耦合方法[J]. 科学通报 2000 45(19) : 2 097-2 100.]
- [54] Li Bo , Zhou Tianjun , Lin Pengfei , *et al.* The wintertime North Pacific surface heat flux anomaly and air-sea interaction as simulated by the LASG/IAP ocean-atmosphere coupled model FGOALS_s1.0 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* 2011 69(1) : 52-63. [李博, 周天军, 林鹏飞, 等. 冬季北太平洋海面热通量异常和海气相互作用的耦合模式模拟[J]. 气象学报 2011 69(1) : 52-63.]
- [55] Wu Bo , Zhou Tianjun , Li Tim , *et al.* Interannual variability of the Asian-Australian monsoon and ENSO simulated by an ocean-atmosphere coupled model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* 2009 33(2) : 285-299. [吴波, 周天军, Li Tim, 等. 耦合模式 FGOALS_s 模拟的亚澳季风年际变率及 ENSO [J]. 大气科学 2009 33(2) : 285-299.]
- [56] Zhou Tianjun , Wang Zaizhi , Yu Rucong , *et al.* The climate system model FGOALS_s using LASG/IAP spectral AGCM SAMIL as its atmospheric component [J]. *Acta Meteorologica Sinica* , 2005 , 63(5) : 702-715. [周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式[J]. 气象学报 2005 63(5) : 702-715.]
- [57] Sun Yimei , Fei Jianfang , Cheng Xiaoping , *et al.* Introduction of mesoscale air-ocean coupled model: WRF-ROMS-1.2 [J]. *Marine Forecast* , 2010 27(2) : 82-88. [孙一妹, 费建芳, 程小平, 等. WRF-ROMS-1.2 中尺度海气耦合模式简介[J]. 海洋预报 2010 27(2) : 82-88.]
- [58] Saravanan R , Hsieh J S , Chang P , *et al.* Development of a high-resolution coupled regional climate model in the Atlantic sector for climate change studies [C] // Abstracts , 21st Conference on Climate Variability and Change. Phoenix: AMS 2009.
- [59] Hsieh J S , Li M K , Saravanan R , *et al.* Downscaling tropical cyclone activity using regional models: Impact of air-sea coupling on the frequency and intensity of Atlantic hurricanes [C] // American Geophysical Union , Fall Meeting , 2009 , abstract #A31H-06.

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

Wang Xiaojun^{1, 2} , Ma Hao³

(1. *Physical Oceanography Laboratory , Ocean University of China , Qingdao 266100 , China;*

2. *Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Laboratory , Ocean University of China , Qingdao 266100 , China;*

3. *Zhejiang Province Climate Center , Hangzhou 310017 , China)*

Abstract: With the development of mesoscale atmospheric model , the next generation mesoscale Weather Research and Forecast Model is widely used at home and abroad , primarily because of its complete openness , easy portability , and fast update. The application of WRF model in China in recent decade is introduced from three aspects: the physical parameterization scheme , real-time simulation and comparison with MM5 , which indicates the usefulness and advantage of WRF model in mesoscale simulation. Furthermore , two main prospects of WRF model in the near future are proposed: one is to develop Climate-Weather Research and Forecasting Model(CWRf) , aiming to simulate and predict both weather and climate at mesoscale level , and the other is to couple WRF model with regional ocean model and construct a regional coupled model with high resolution. It is hoped that our summary can provide some necessary helps for the users of WRF model.

Key words: WRF model; Physical progress; Simulation and forecast; Climate simulation.