

段旭,王曼,陈新梅,等. 中尺度 WRF 数值模式系统本地化业务试验[J]. 气象,2011,37(1):39-47.

中尺度 WRF 数值模式系统本地化业务试验^{*1}

段 旭 王 曼 陈新梅 刘建宇 符 睿

云南省气象科学研究所,昆明 650034

提 要: 利用中尺度 WRF 数值模式及 WRF 三维变分同化系统,在对比试验的基础上,选取了适合本地的积云过程、微物理过程和辐射过程的方案组合;选择了 NCEP/GFS 作为模式的背景场;统计计算了以云南为中心的区域背景误差协方差并替换了三维变分同化系统中原有的背景误差协方差;同时,考虑模式底层高度与地面观测站高度的差异,进行了地面资料地形订正。通过上述试验研究,建立了本地化的中尺度 WRF 数值预报业务系统,该系统能较好地刻画本地下垫面的动力和热力状况,预报能力有明显改善。

关键词: WRF 模式,本地化,业务试验,参数化方案,三维变分同化

Localization of Operational Experiment on the WRF Mesoscale Numerical Modeling System

DUAN Xu WANG Man CHEN Xinmei LIU Jianyu FU Rui

Meteorological Institute of Yunnan Province, Kunming 650034

Abstract: Using the WRF mesoscale numerical model and WRF three-dimensional variational data assimilation (3D-Var), a combined scheme of cumulus process, micro-physical processes and radiation processes for local area is selected based on comparison experiments and the NCEP/GFS data are chosen as background field of the model; the background error covariance over the region centered in Yunnan is computed statistically and replaces the primary background error covariance in 3D-Var; At the same time, considering the elevation difference between model bottom layer and surface observing station, the topography in surface data is corrected. Through the above study the localized WRF mesoscale numerical forecast system has been established, which could be better to characterize the dynamic and thermodynamic conditions in the local underlying surface, and has a significant improvement in forecast capability.

Key words: WRF (Weather Research and Forecasting) model, localization, operational experiment, parameterized scheme, 3D-Var (3-dimensional variation) assimilation

引 言

2004 年 12 月 MM5 模式发布了 3.7 版本以后,该模式的发展基本就停止了。现在研究应用较多的 AREM 模式、GRAPES 模式还在不断发展完善的阶段。美国气象界联合开发新一代中尺度预报模式和同化系统 WRF(Weather Research and Forecasting)模式系统^[1],重点是解决 1~10 km,60 小时

时效预报问题,自 2000 年 10 月发布第一版本以来,分别于 2004 年 6 月对外发布了第二版和三维变分同化系统、2008 年 4 月发布了第三版本。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。国外开展的数值模拟和实时预报试验表明^[2-6],WRF 模式系统在预报对流天气系统、涡旋中尺度对流系统、天气要素预报、降雨模拟、陆面模式试验等方面都具有较好的性能,同时实现完全嵌套大气化学模式,不仅具有较好的

* 云南省科技攻关及高新技术计划(2006SG25)和云南省应用基础研究面上项目(2009CD145)共同资助
2009 年 9 月 2 日收稿; 2010 年 3 月 30 日收修定稿
第一作者:段旭,主要从事天气气候研究。Email:ynmodx@sina.com

天气预报水平,而且具有预报空气质量的能力。在国内,许多人利用 WRF 或 MM5 模式对一些强天气过程进行了数值模拟分析^[7-18,29],从中得到了常规资料“捕捉”不到的一些中小尺度天气系统的变化,以及发生、发展、消亡机理;也有一些学者通过对模式初始场进行多种资料的三维变分同化^[19-21]以及对其中的地面资料同化方案进行改进^[22-23,30-31],来改善中尺度模式的预报效果。

国内一些省份已经开展了 WRF 模式的业务化试验和研究,但从目前情况看,对该模式的本地化工作开展较少。无论 MM5 或 WRF 模式,都是国际上流行和通用的中尺度数值模式,可以在网站上免费下载使用。重要的是如何把它本地化,本地化程度越高,越能刻画本地地下垫面的动力和热力状况,相应地提高预报效果。本文将通过大量的对比试验,选取适合本地的积云过程、微物理过程和辐射过程的方案组合,选择适当的全球模式输出产品作为 WRF 模式的背景场,统计计算以云南为中心的区域背景误差协方差并替换三维变分同化系统中原有的背景误差协方差。同时,考虑模式底层高度与地面观测站高度的差异,进行地面资料地形订正。

1 WRF 模式参数化方案试验

1.1 模式试验方案

作者曾针对低纬高原地区,对中尺度 MM5v3 模式进行了不同参数化方案降水模拟试验^[24],并在此基础上建立了“云南 MM5 中尺度模式预报业务系统”,业务运行至今。本文利用 WRF2.2 版本,参照 MM5v3 模式试验方案选择方法,组合 6 种方案(表 1,表 2)进行对比试验,模式背景场取 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,降水试验时段为 2007 年

5 月 1 日至 10 月 31 日(雨季),温度试验为 2006 年 11 月至 2007 年 4 月(干季)。

表 1 模式试验基本参数

| 项目 | 方案 |
|-------|------------------------------------------------------------------|
| 区域范围 | 嵌套:三重,格距:90 km,30 km,10 km; 中心:26°N,99°E;格点:60×70,61×61,97×97 |
| 垂直层数 | 35 |
| 积云参数化 | Betts-Miller-Janjic, Kain-Fritsch, Grell-Devenyi ensemble |
| 边界层 | YSU scheme |
| 辐射 | Dudhia 短波和 RRTM 长波 |
| 地面通量 | isflux=1 |

表 2 对比试验方案

| 方案 | 云微物理过程方案 |
|----|---------------------------------------|
| A | Kessler scheme |
| B | Lin et al. scheme |
| C | WSM 3-class simple ice scheme |
| D | WSM 5-class scheme |
| E | Ferrier (new Eta) microphysics scheme |
| F | WSM 6-class graupel scheme |

1.2 降水预报试验结果

图 1 为 WRF 模式模拟的降水预报平均 TS 评分。小雨 TS,6 个方案均在 65% 以上,其中方案 B 最高,为 67.8%。其次是方案 C,为 67.5%,方案 A 最低,为 64.6%。相对差别为 4.7%。中雨 TS,方案 C 最高,为 16.1%。其次是方案 F,为 15.9%。方案 A 最低,为 13.4%,相对差别为 19%。大雨 TS,方案 B 和 C 最高,为 6.5%,其次是方案 F 为 6.4%,方案 A 最低,为 5.0%,相对差别为 30%。暴雨 TS,方案 B 较高,为 3.4%。方案 C 最低,为 2.8%。相对差别为 21%。除小雨外,相对差别均较大,说明各试验方案预报能力差别较明显。

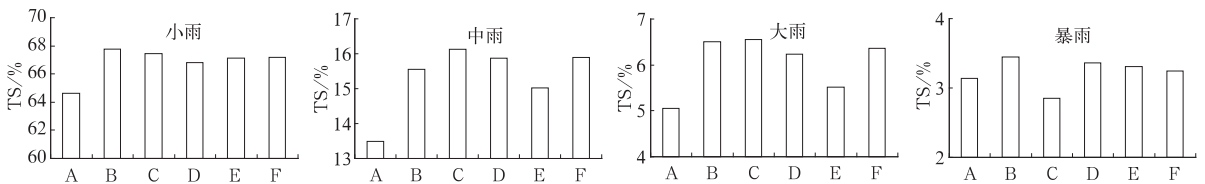


图 1 2007 年 5 月 1 日至 10 月 31 日 WRF 模式各试验方案降水预报 TS 评分

Fig. 1 TS scores of precipitation prediction for different numerical experiments of WRF model from 1 May to 31 October 2007

图 2 给出了 4 个等级降水 Tse(公平 TS)评分。各方案对 4 个等级降水均为正值,说明所有的预报都具有技巧。小雨 Tse 所有方案在 0.5 左右,方案 B、D 和 F 相对稍高,方案 A 稍低。中雨 Tse,方

案 F 最高,为 0.115,方案 A 最低,为 0.096。大雨 Tse,方案 F 较高,方案 A 较低。暴雨 Tse,方案 F 最高,其次是方案 D,方案 C 最低。综合看,方案 F 预报技巧相对最高。

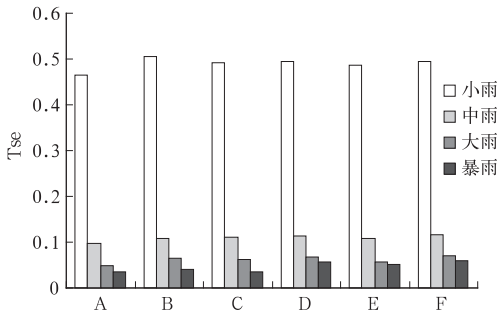


图 2 2007 年 5 月 1 日至 10 月 31 日 WRF 模式各试验方案降水预报 Tse 评分
Fig. 2 Tse scores of precipitation prediction for different numerical experiments of WRF model from 1 May to 31 October 2007

从预报偏差 Bias 评分(图 3)看,各试验方案小雨预报偏差在 1.5~1.6 之间,差别不大。中雨预报偏差,方案 A 偏小在 2.0 以下,其他方案都在 2.2 左右。大雨预报偏差方案 C 最接近 1.0,方案 F 偏差最大为 1.58。暴雨预报偏差方案 C 偏差最小,为 1.08,方案 B 偏差最大为 1.3。

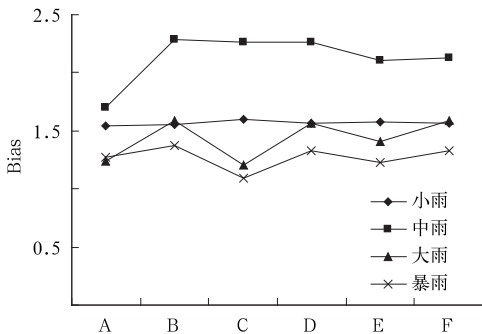


图 3 2007 年 5 月 1 日至 10 月 31 日 WRF 模式各试验方案降水预报偏差
Fig. 3 Bias scores of precipitation prediction for different numerical experiments of WRF model from 1 May to 31 October 2007

综合各等级降水不同评分方法对比,小雨方案 B 相对较好,中雨、大雨和暴雨方案 F 稍优。

1.3 温度预报试验结果

为了了解 WRF 模式在云南省的温度预报模拟水平,对 2006 年 11 月至 2007 年 4 月进行模拟试验。图 4 给出试验结果,最高温度平均均方根误差,方案 C 最小为 3.929 °C,其次是方案 E 为 3.953 °C,方案 A 最大 3.977 °C,其他方案在 3.96~3.97 °C 之间。最低温度平均均方根误差,方案 E 最小

5.527 °C,方案 C 最大为 5.597 °C。综合最高和最低温度均方根误差,方案 E 模拟效果最好。

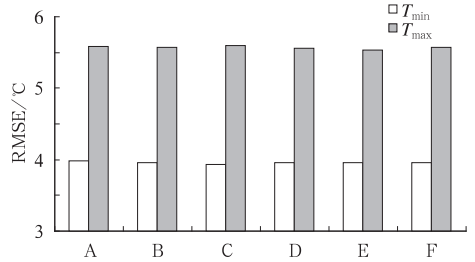


图 4 2006 年 11 月至 2007 年 4 月 WRF 模式各试验方案温度预报平均均方根误差(单位: °C)
Fig. 4 Root mean square errors of temperature prediction for different numerical experiments of WRF model from November 2006 to April 2007(unit: °C)

2 初始场和边界条件影响试验

WRF 模式参数化方案选定(雨季 F 方案,干季 E 方案)后,分别用 NCEP/GFS(Globe Forecast System)和 T213L31 全球模式提供的间隔 3 小时的预报场作为模式的初始场和边界条件,对 2008 年 6—10 月进行预报试验,比较其优劣。

2008 年 6 月 16 日 20 时至 17 日 20 时(北京时,下同)受冷锋切变线和西南暖湿气流的影响,云南出现了 35 站大雨、5 站暴雨的强降水天气过程,强降水主要集中在滇南和滇西地区(图 5a)。图 5b 为 NCEP/GFS 初始场的降水预报。与实况相比,滇南和滇西雨带基本吻合,滇西大暴雨中心和滇中雨带空报。图 5c 为 T213 资料初始场的降水预报。与实况相比,滇西雨带范围偏小且中心值偏大,滇南雨带偏东。比较看,NCEP/GFS 作为初始场的降水预报更接近实况。

2008 年 6 月 26 日 20 时至 27 日 20 时受低槽切变线和西南暖湿气流的影响,云南出现了 35 站大雨、5 站暴雨和 1 站大暴雨的强降水天气过程,强降水主要集中在滇中及以西、以南地区(图 6a)。图 6b 为 NCEP/GFS 初始场的降水预报。与实况相比,滇东南至滇中的雨带及强降水中心,滇西雨带稍偏南,德宏大暴雨中心漏报。图 6c 为 T213 资料初始场的降水预报,两条雨带基本上没有预报。相对看,NCEP/GFS 作为初始场的降水预报更能反映此次强降水过程。

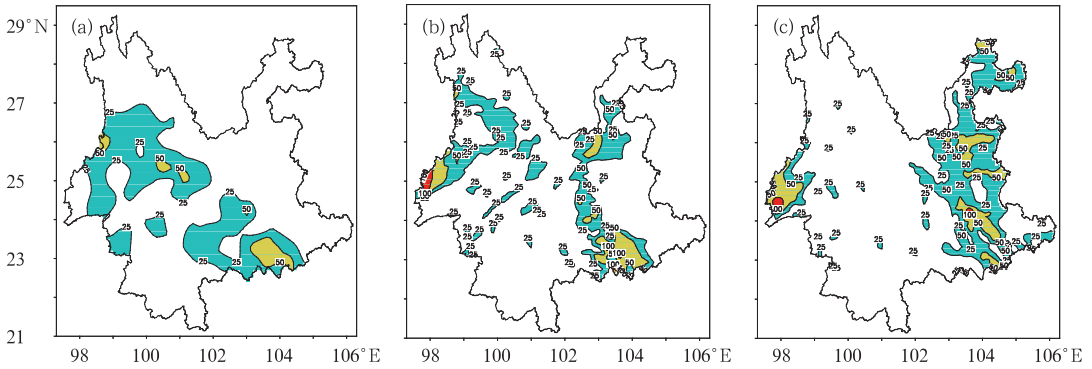


图 5 2008 年 6 月 16 日 20 时至 17 日 20 时降水实况和数值模拟(单位:mm)

(a) 实况; (b) NCEP/GFS 初始场数值模拟; (c) T213 初始场数值模拟

Fig. 5 The precipitation from 20 BT 16 June to 20 BT 17 June 2008 (unit:mm)

(a) observation, (b) numerical simulation taking NCEP/GFS as the initial field,

(c) numerical simulation taking T213 as the initial field

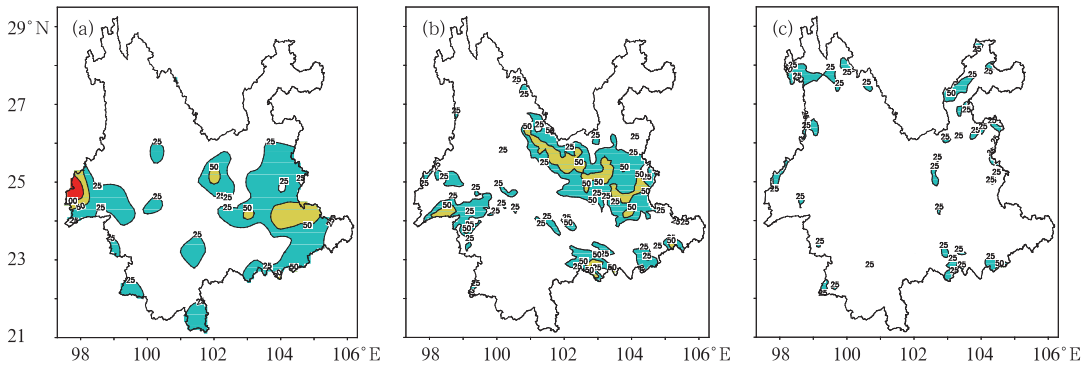


图 6 2008 年 6 月 26 日 20 时至 27 日 20 时降水实况和预报场(单位:mm)

(a) 实况; (b) NCEP/GFS 初始场数值模拟; (c) T213 初始场数值模拟

Fig. 6 The precipitation from 20 BT 26 to 20 BT 27 June 2008 (unit:mm)

(a) observation, (b) numerical simulation taking NCEP/GFS as the initial field,

(c) numerical simulation taking T213 as the initial field

2008 年 8 月 30 日 20 时至 31 日 20 时受低槽切变线和副高外围西南气流的影响,云南出现了 17 站大雨、4 站暴雨和 1 站大暴雨的强降水天气过程,强降水主要集中在滇中、滇南以及滇西南(图 7a)。图 7b 为 NCEP/GFS 初始场的降水预报。与实况相

比,除了滇西北的分散雨带空报外,其他区域雨带预报与实况基本一致。图 7c 为 T213 资料初始场的降水预报,总体预报效果也不错,只是主要雨带与实况相比位置偏东。

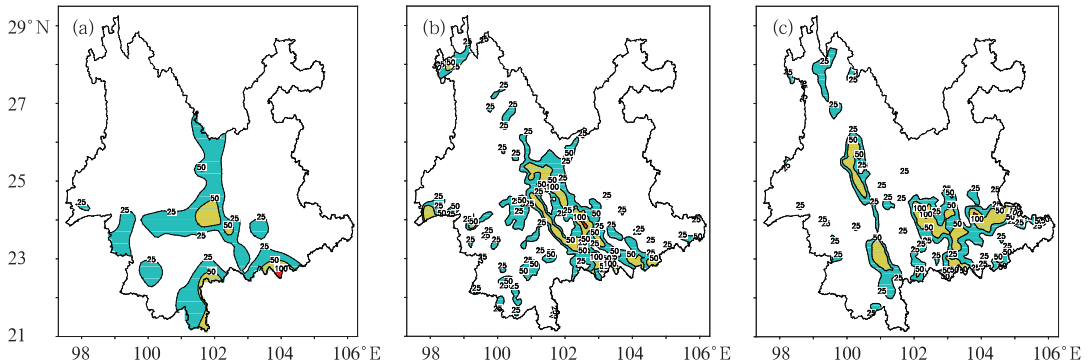


图 7 2008 年 8 月 30 日 20 时至 31 日 20 时降水实况和预报场(单位:mm)

(a) 实况; (b) NCEP/GFS 初始场数值模拟; (c) T213 初始场数值模拟

Fig. 7 The precipitation from 20 BT 30 to 20 BT 31 August 2008 (unit:mm)

(a) observation, (b) numerical simulation taking NCEP/GFS as the initial field,

(c) numerical simulation taking T213 as the initial field

对于上述 3 个强降水过程而言, NCEP/GFS 作为初始场的数值模拟结果优于 T213。为了进一步比较 NCEP/GFS 和 T213 作为模式初始场的预报效果, 对 2008 年 6—10 月进行逐日模拟试验, 把预报结果插值到站点上进行预报 TS 评分。

从 TS 评分上看(图 8), 两种不同初始场模式的降水预报, NCEP/GFS 预报效果好于 T213。NCEP/GFS 作为初始场的数值模拟结果, 小雨、中雨、大雨和暴雨分别比 T213 高 1.4、0.2、1.2 和 1.4 个百分点。尤其是大雨和暴雨, 增幅达 22.6% 和 82.4%。

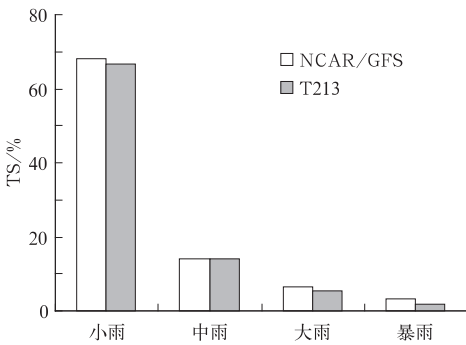


图 8 2008 年 6—10 月 WRF 模式两种不同初始场的降水预报 TS 评分

Fig. 8 TS scores of precipitation prediction for two different initial fields of WRF model from June to October 2008

通过强降水过程落区和站点定量评分结果分析, NCEP/GFS 作为初始场的 WRF 模式预报效果比 T213 作为初始场的预报效果好。

3 常规资料的三维变分同化

数值天气预报 NWP (numerical weather prediction) 是已知一个现时大气状态(背景场和观测值)的估计, 用模式(描写天气演变过程的流体力学和热力学方程较高精度的数值解)来模拟(预报)其演变。对于一个预报模式而言, 初始条件(现时大气状态)的确定既是非常重要的, 也是非常复杂的问题。

3.1 区域背景误差协方差统计

本文利用 2009 年 4 月 9 日发布的最新 WRF-DA V3.1 版本提供背景误差统计文件, 统计计算了

以云南为中心的区域背景误差协方差并替换了同化系统中原有的背景误差协方差值。

Lorenz 于 1986 年指出^[25], 可以用变分方法寻求一个使得度量背景场和观测场之间的距离的目标函数极小的分析值, 即

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}[H(x) - x^r]^T R^{-1}[H(x) - x^r] \quad (1)$$

式中 $J(x)$, x , x^b , x^r , H , B 和 R 分别表示目标函数、变量场、背景场、观测场、观测算子、背景误差协方差和观测误差协方差。

用增量的形式表示式(1), 即对 $J(x)$ 求一阶导数, 得

$$J(x)' = B^{-1}(x - x^b) + (-H)^T R^{-1} \times [x^r - H(x^b) - H(x - x^b)] \quad (2)$$

式(2)形式上就是三维变分分析(3D-Var)问题的解, 如果 $J(x)$ 在 $x = x^a$ 时有极小值, 即

$$J(x^a)' = 0 \quad (3)$$

利用式(2)和(3), 可以得到目标函数极小值时分析场为

$$x^a = x^b + BH^T (HBH^T + R)^{-1} [x^r - H(x^b)] \quad (4)$$

大气数值预报模拟可表示为

$$x'_{i+1} = M(x'_i) + \epsilon_i \quad (5)$$

式中 $M(x'_i)$ 和 ϵ_i 分别为大气运动数值模拟和模式误差。如果用分析场作为真值的最优估计场, 即忽略模式误差, 则实际的数值预报模拟可表示为

$$x^f_{i+1} = M(x^a_i) \quad (6)$$

式中 x^f_{i+1} 为预报场。按照 NWP 业务中数据同化连续循环的思路, 式(4)可以改写为

$$x^a_{i+1} = x^f_{i+1} + BH^T (HBH^T + R)^{-1} \times [x^r_{i+1} - H(x^f_{i+1})] \quad (7)$$

显然, 在式(7)中只要已知 B 和 R , 即可得到初值场(分析场)。在 WRFDA 中, 系统均提供了 B 和 R 。由于观测误差协方差具有普遍通用性, 而背景误差协方差 B 仅是一个全球模式统计值, 对于不同区域和不同模式(或同一模式不同物理过程), B 都需要重新统计估算。因此, 只需统计区域 B 即可进行资料的三维变分同化工作。

区域统计估算取 2008 年 6—7 月逐日的 WRF 模式输出资料, 采用 NMC 方法^[26], 用同一时刻的 24 小时预报减去 12 小时预报作为背景误差来统计 B , 统

计区域分别为模式所取的三重嵌套范围(见表 1)。

3.2 地面资料地形订正

考虑到模式地形高度和实际观测地形高度之间存在着差异,在将地面资料引入模式同化系统前需要进行地形订正,为了确保订正要素直接受地表的影响,只提取高于地面 1000 m 以内的各层资料进行计算。

由于云南地处低纬高原地区,境内海拔高度大部地区超过 1500 m,仅在东北部、西部和南部的边缘地区出现低于 1500 m 的区域,海拔最高处出现在与青藏高原相连的西北部地区;西部为横断山脉纵谷区,中部的哀牢山山脉呈西北—东南走向,东部高原区有轿子山、乌蒙山等一系列山脉,全省海拔超过 2500 m 的山峰有 30 座,地形起伏较大。而在云南临近的地区地形梯度较大,西北部陡峭上升,其他方向则急速下降。因此,在进行气象要素地形订正时需要考虑不同海拔高度近地边界层内要素的垂直变化。

取云南及其周边地区 2000—2007 年 5—10 月 12 个探空站 08 时和 20 时观测资料,按地形高度分为小于 500 m、500~1000 m、1000~1500 m、1500~1800 m、1800~2100 m 以及大于 2100 m 等 6 种不同地形高度类型来进行统计分析。

气压和风场订正按照 Ruggiero 同化方案^[27],即大气静力学方程中的压高关系和风场相似理论中假设的风廓线的对数规律。温度和比湿订正则利用温度递减率和比湿随高度变化与相当位温随高度变化的关系得到。

用最小二乘法统计一元线性回归方程得到不同地形高度类型气温和比湿地形订正方案(表 3)。

表 3 不同地形高度类型气温和比湿地形订正方案

Table 3 The topographically revised program of temperature and specific humidity in different types of terrain heights

| 不同地形高度类型 | 地形订正方案 |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ≤500 m | $-\partial T/\partial z = -0.1217\partial\theta_e/\partial z + 0.2114$ $\partial q/\partial z = (0.2744\partial\theta_e/\partial z - 0.2902) \cdot 10^{-3}$ |
| 500~1000 m | $-\partial T/\partial z = -0.3702\partial\theta_e/\partial z + 0.2718$ $\partial q/\partial z = (0.204\partial\theta_e/\partial z - 0.2636) \cdot 10^{-3}$ |
| 1000~1500 m | $-\partial T/\partial z = -0.3829\partial\theta_e/\partial z + 0.2241$ $\partial q/\partial z = (0.1817\partial\theta_e/\partial z - 0.2724) \cdot 10^{-3}$ |
| 1500~1800 m | $-\partial T/\partial z = -0.3232\partial\theta_e/\partial z + 0.4728$ $\partial q/\partial z = (0.2183\partial\theta_e/\partial z - 0.1819) \cdot 10^{-3}$ |
| 1800~2100 m | $-\partial T/\partial z = -0.2475\partial\theta_e/\partial z + 0.2508$ $\partial q/\partial z = (0.2227\partial\theta_e/\partial z - 0.277) \cdot 10^{-3}$ |
| ≥2100 m | $-\partial T/\partial z = -0.1955\partial\theta_e/\partial z + 0.3744$ $\partial q/\partial z = (0.148\partial\theta_e/\partial z - 0.1444) \cdot 10^{-3}$ |

3.3 同化效果检验

前面分别就 WRF 三维变分同化的原理、实现过程、背景误差协方差计算以及地面资料地形订正等进行了简单讨论,详细的分析试验过程见论著^[28],这里就不赘述了。下面利用 2008 年 6—10 月逐日模式预报结果对同化效果进行检验,同化的观测资料为常规地面和高空资料。

图 9 给出了 2008 年 6—10 月 WRF 模式降水预报评分。从各量级降水 TS 评分(图 9a)看,同化后的结果均比未同化(只用了 NCEP/GFS 作为初始场和边界条件,没有把地面和高空观测资料同化到初始场中)的结果好,其中小雨、中雨、大雨、暴雨分别提高 1.6、1.2、0.7、1.3 个百分点。预报偏差(图 9b)除小雨外,各量级降水预报同化后比未同化稍大。Tse 评分(图 9c)各量级降水预报同化后比未同化结果好。总体看,常规资料同化对模式的预报水平有明显改善作用。

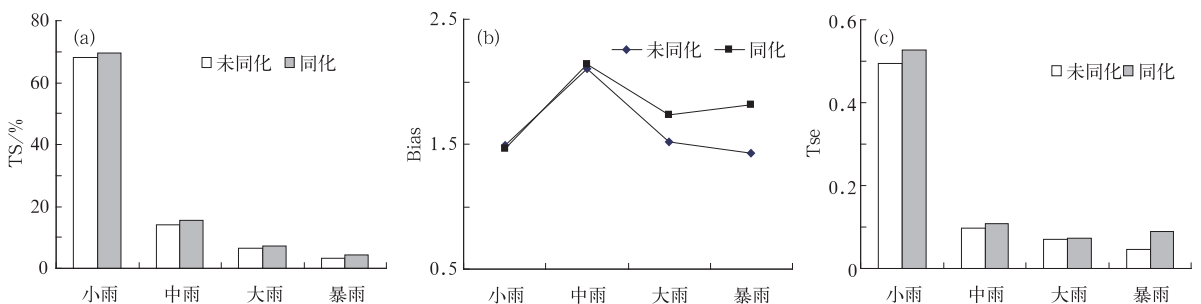


图 9 2008 年 6—10 月 WRF 模式降水预报评分

(a) 各量级 TS 评分; (b) 预报偏差; (c) Tse 评分

Fig. 9 The scores of precipitation prediction of WRF model from June to October 2008

(a) TS score, (b) bias score, and (c) Tse score

4 WRF 模式业务化

4.1 WRF 模式与 MM5 业务模式比较

前面从参数化方案试验、背景场选择、常规资料同化、地面资料地形订正等方面介绍了云南 WRF 模式的本地化工作。如果业务化,还必须与现在业务运行的“云南 MM5 中尺度模式预报业务系统”预报水平做比较。

MM5 模式是 2005 年投入业务的,当时也进行了大量的统计试验,优选了最佳的参数化方案^[24],三重嵌套分辨率与本文中 WRF 模式一致,初始场取 T213 数值预报产品客观分析场。由于 MM5 业务模式初始场使用的是 T213,因此,在与 WRF 模式比较之前,先进行 MM5 模式在 T213 和 NCEP/GFS 两种不同初值的比较。

从图 10 给出的统计结果看,仍是 NCAR/GFS 作为初始场的 MM5 模式预报效果优于 T213 作为初始场的预报效果。

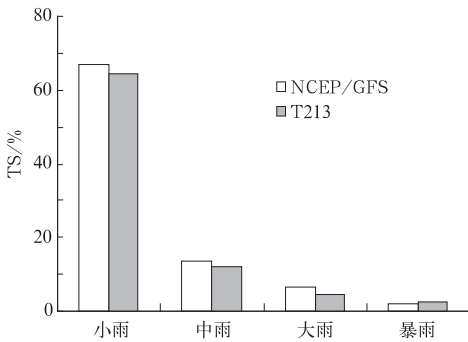


图 10 2007 年 5—10 月 MM5 模式两种不同初始场的降水预报 TS 评分
Fig. 10 TS score of precipitation prediction for two different initial fields of MM5 model from May to October 2007

利用 2007—2009 年资料对 MM5 和 WRF 模式进行反算,统一使用 NCEP/GFS 预报场作为模式的初始场和边界条件。从图 11 和图 12 看,无论降水还是温度预报,WRF 模式均优于 MM5 业务模式。

4.2 WRF 模式业务化

通过与现行 MM5 业务模式的比较,各项指标优于 MM5 模式,经过有关专家论证,“中尺度 WRF 数值预报系统”已于 2009 年 5 月 1 日起正式投入业

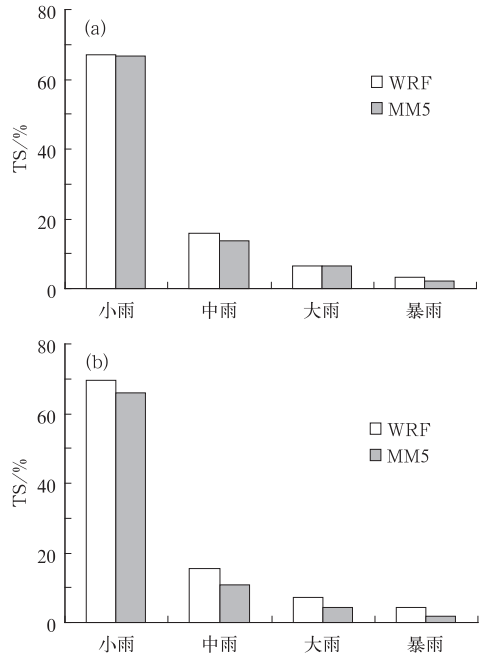


图 11 WRF 模式与 MM5 模式降水模拟比较
(a)2007 年 5—10 月逐日降水模拟 TS 评分;
(b)2008 年 6—8 月逐日降水模拟 TS 评分

Fig. 11 Comparisons of WRF model and MM5 model for precipitation prediction
(a) TS score of precipitation prediction from May to October 2007, (b) TS score of precipitation prediction from June to August 2008

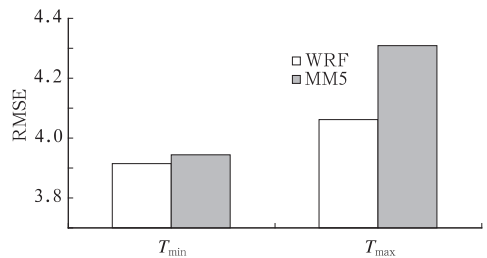


图 12 2008 年 11 至 2009 年 4 月 WRF 和 MM5 模式温度预报平均均方根误差(单位: °C)
Fig. 12 Root mean square errors of temperature prediction for WRF model and MM5 model from November 2008 to April 2009(unit: °C)

务试运行,其预报产品向云南省各级气象台站发布。该系统在 SGI 0350 小型机上业务运行(图 13),包括前处理、资料同化、模式积分以及后处理等整个过程约需 115 分钟。每天可定时生成格点和站点格式的降水、温度模式预报产品,其产品格式与现行的 MM5 模式业务产品一致,预报产品时效为 48 小时,预报范围为云南区域(20.46°~29.96°N、96.9°

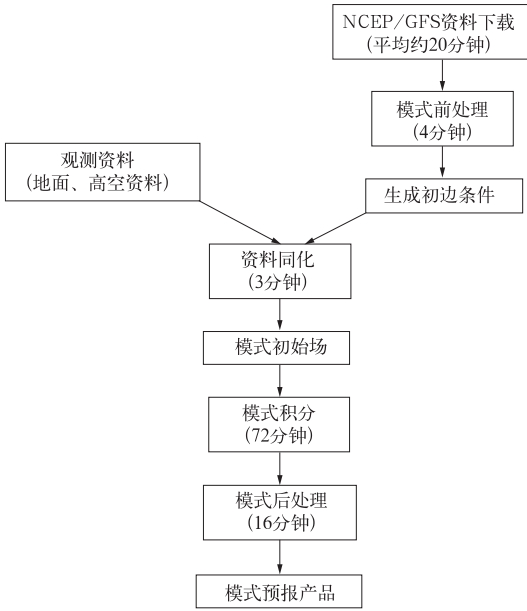


图 13 基于 SGI 0350 小型机的中尺度 WRF 数值预报系统业务流程
 Fig. 13 The running process of WRF mesoscale numerical forecast system based on an SGI 0350 mini-computer

~107.52°E), 时间分辨率为 1 小时, 空间水平分辨率为 10 km。

4.3 业务试运行情况

图 14 给出了云南雨季开始以来最强的一次降水过程实况及模式预报结果。这次过程主要出现了南、北两条雨带(图 14a), 较强的一条雨带位于丽江东部、昆明北部至曲靖大部, 较弱的一条位于普洱北部至文山西部。WRF 模式对这两条雨带做出了较吻合的预报, 曲靖暴雨中心的强度也模拟较好。相比之下, MM5 模式模拟较差(图 14c)。

图 15 给出了 WRF 模式业务试运行以来 2 个月的预报评分以及与业务 MM5 模式的比较, 从中可以看出, 降水、温度预报效果 WRF 均好于 MM5, 特别是中雨以上降水更加明显。

5 小 结

无论 MM5 或 WRF 模式, 都是国际上流行和通

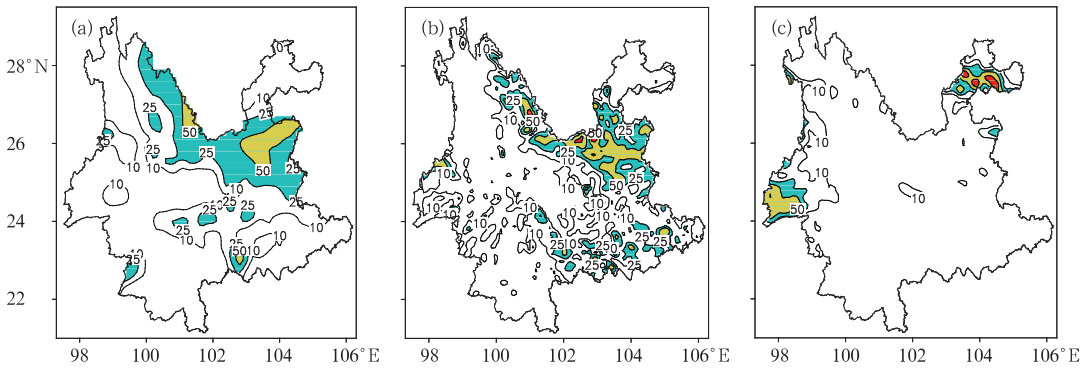


图 14 2009 年 6 月 21 日 20 时至 22 日 20 时降水过程

(a) 实况; (b) WRF 模式预报; (c) MM5 模式预报

Fig. 14 The precipitation from 20 BT 21 to 20 BT 22 June 2009

(a) observation, (b) the prediction for WRF model, (c) the prediction for MM5 model

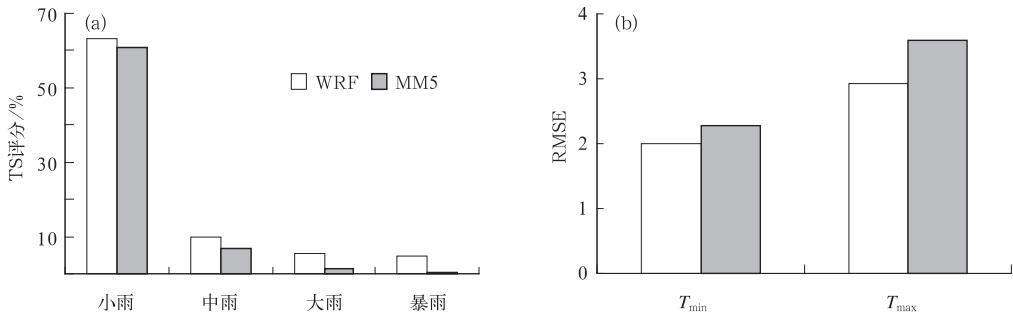


图 15 2009 年 5—6 月降水、温度预报

(a) 24 小时降水预报准确率; (b) 温度预报平均均方根误差

Fig. 15 TS scores of precipitation (a) and root mean square errors of temperature (b) prediction from May to June 2009

用的中尺度数值模式,可以在网站上免费下载使用。重要的是如何把它本地化,本地化程度越高、越能刻画本地下垫面的动力和热力状况,相对地提高预报效果。本文在模式的本地化研究中,通过大量的对比试验,选取了适合本地的积云过程、微物理过程和辐射过程的方案组合;选择了 NCEP/GFS 作为模式的背景场;统计计算了以云南为中心的区域背景误差协方差并替换了三维变分同化系统中原有的背景误差协方差。同时,考虑模式底层高度与地面观测站高度的差异,进行了地面资料地形订正。

在 WRF 模式本地化试验研究基础上建立的预报系统,其预报能力有显著提高,证明模式的本地化程度较高。

数据同化对改善模式初值进而提高数值模式水平至关重要,本项工作仅开展了对常规资料的同化,今后将开展对非常规资料同化的试验研究,进一步提高数值模式的预报能力。

参考文献

- [1] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象, 2004, 30(12): 27-31.
- [2] Steve Koch, et al. Real-time Applications of the WRF Model at the Forecast Systems Laboratory[C]. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A. Jan. , 10-15, 2004.
- [3] Edward J, et al. Examination of the Performance of Several Mesoscale Models for Convective Forecasting during IHOP[C]. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A. Jan. , 10-15, 2004.
- [4] Isidora Jankov, et al. An Investigation of IHOP Convective System Predictability Using a Matrix of 19 WRF Members[C]. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A. Jan. , 10-15, 2004.
- [5] P. Welsh, et al. Implementing the Weather Research and Forecast (WRF) Model with Local Data Assimilation in a NWS WFO[C]. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A. Jan. 10-15, 2004.
- [6] Moriss Weisman, et al. Real-time Explicit Convective Forecasts Using the WRF Model during the BAMEX Field Program[C]. 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A. Jan. , 10-15, 2004.
- [7] 崔宜少, 张丰启, 李建华, 等. 2005 年山东半岛连续三次冷流暴雪过程的分析[J]. 气象科学, 2008, 28(4): 395-401.
- [8] 岳彩军, 寿绍文, 曾刚, 等. “海棠”(Haitang)台风降水非对称分布成因初步研究[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1333-1342.
- [9] 莫毅, 潘晓滨, 臧增亮, 等. 资料同化对一次华南暴雨影响的数值试验研究[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(4): 289-294.
- [10] 王珏, 沈新勇, 寿绍文, 等. 06·6 福建大暴雨的数值模拟及复杂地形影响试验[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 546-554.
- [11] 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.
- [12] 王曼, 李华宏, 段旭, 等. 2006 年初夏登陆孟加拉湾风暴的结构分析与数值模拟[J]. 气象科技, 2009, 37(1): 11-18.
- [13] 周小珊, 杨森, 张立祥. 中尺度数值模式(MM5V3)在沈阳区域气象中心的试用[J]. 气象, 2001, 27(8): 28-32.
- [14] 许美玲, 孙绩华. MM5 中尺度非静力模式对云南省降水预报检验[J]. 气象, 2002, 28(12): 24-27.
- [15] 王东勇, 刘勇, 周昆. 2004 年末黄淮暴雪的特点分析数值模拟[J]. 气象, 2004, 32(1): 30-35.
- [16] 秦华锋, 金荣花. “0703”东北暴雪成因的数值模拟研究[J]. 气象, 2008, 34(4): 31-38.
- [17] 刘诗军, 王庆, 迟竹萍. MM5 模式移植及业务应用系统[J]. 气象, 2004, 30(3): 43-47.
- [18] 郭建侠, 杜继稳, 郑有飞. MM5V3. 5 模式对陕北地区中尺度系统的模拟能力实验[J]. 气象, 2003, 29(9): 13-17.
- [19] 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.
- [20] 范水勇, 张朝林, 仲跻芹, 等. MM5 三维变分系统在北京地区冷暖季背景场误差的对比分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 855-861.
- [21] 张朝林, 陈敏, 范水勇, 等. “00. 7”北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 922-932.
- [22] 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 复杂地形下地面观测资料同化 I. 模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 222-232.
- [23] 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 复杂地形下地面观测资料同化 II. 模式地形与观测站地形高度差异代表性误差[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 449-458.
- [24] 段旭, 王曼, 刘建宇, 等. 低纬高原地区 MM5v3 不同参数化方案降水模拟试验[J]. 气象, 2006, 32(4): 16-23.
- [25] Lorenc A. Analysis methods for numerical weather prediction [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1986, 112: 1177-1194.
- [26] Parrish D F and Derber J C. The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system[J]. Monthly Weather Review, 1992, 120: 1747-1763.
- [27] Ruggiero F H, Sashegyi K D, Madala R V, et al. The use of surface observations in four-dimensional data assimilation using a mesoscale model [J]. Mon Wea Rev, 1996, 124(5): 1018-1033.
- [28] 段旭, 许美玲, 王曼, 等. 云南省精细化天气预报技术研究与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [29] 尤红, 肖子牛, 王曼, 等. 2008 年“7. 02”滇中大暴雨的成因诊断与数值模拟[J]. 气象, 2010, 36(1): 7-16.
- [30] 郭锐, 李泽椿, 张国平. ATOVS 资料在淮河暴雨预报中的同化应用研究[J]. 气象, 2010, 36(2): 1-12.
- [31] 陶士伟, 郝民, 薛纪善, 等. 数值预报同化系统中观测资料误差分析[J]. 气象, 2008, 34(7): 34-40.