

王金成, 陆慧娟, 韩威, 等. GRAPES 全球三维变分同化业务系统性能. 应用气象学报, 2017, 28(1): 11-24.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20170102

# GRAPES 全球三维变分同化业务系统性能

王金成\* 陆慧娟 韩威 刘艳 王瑞春 张华  
黄静 刘永柱 郝民 李娟 田伟红

(中国气象局数值预报中心, 北京 100081)

## 摘要

近年来, GRAPES 全球三维变分同化系统分析性能和稳定性有了长足进步。该文简要介绍了近两年 GRAPES 全球三维变分同化技术的发展与改进情况, 包括同化框架技术、资料同化应用技术与系统稳定性等方面。分析诊断了两年的同化循环试验结果, 以探空资料作为参考, 对 ERA-Interim 再分析场、NCEP FNL 分析场和 GRAPES 全球三维变分分析场的统计特征进行了比较; 以 ERA-Interim 再分析场作为参考, 对 NCEP FNL 分析场、T639 分析场和 GRAPES 全球三维变分分析场进行比较。结果表明: GRAPES 分析场的质量明显优于 T639 分析场, 性能上达到了业务化的要求, 但相比 NCEP FNL 分析场还有一定差距, 特别是对对流层内湿度分析场的误差还比较大。

**关键词:** 资料同化; GRAPES; 三维变分; 全球数值天气预报

## 引言

作为我国自主研发的数值天气预报系统, GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System, 全球区域一体化同化预报系统)自 2001 年立项开始<sup>[1-3]</sup>至 21 世纪初期完成了 GRAPES 基本的资料同化和模式预报系统的研发<sup>[3-8]</sup>。GRAPES 资料同化系统的目标是有效同化各种常规和非常规观测资料, 不断提高我国数值天气预报初值质量<sup>[9-11]</sup>。经过多方努力和技术攻关, 21 世纪初分别建立了 GRAPES 区域<sup>[9, 11]</sup>和全球<sup>[10]</sup>三维变分(3DVar)同化系统。2006 年 7 月 GRAPES 区域 3DVar 同化系统实现业务化, 2007 年开始 GRAPES 全球数值预报系统研发, 2009 年 7 月实现了 GRAPES 全球等压面 3DVar (GRAPES three-dimensional variational data assimilation system on the pressure level, 以下简称 G-P3DVar)准业务化运行<sup>[12]</sup>。虽然 G-P3DVar 的框架计

算精度、卫星资料同化应用水平和初值初始化精度均有明显改进, 但相比中国国家气象中心现有全球业务模式系统(采用 T639 模式, 同化系统采用 GSI(gridded statistical interpolation)格点统计插值系统, 以下简称 T639)的分析场还有一定差距<sup>[13]</sup>。

资料同化分析误差主要源自 3 个方面: 背景场误差、观测资料误差、同化系统模型本身误差。在 G-P3DVar 分析预报系统中, 最大的问题是同化系统的坐标<sup>[10-11]</sup>和变量定义与预报模式<sup>[11, 14]</sup>不一致, 不仅会引入额外的误差, 造成一些关键变量的求解在数学上不适定<sup>[15]</sup>, 还限制了 GRAPES 全球 4DVar 的发展。为此, 中国气象局数值预报中心于 2013 年完成了坐标与变量定义均与 GRAPES 预报模式完全匹配的模式面 3DVar 同化系统<sup>①</sup>, 即 GRAPES 全球模式面 3DVar (GRAPES three-dimensional variational data assimilation system on model level, 以下简称 G-M3DVar), 2014 年 G-M3DVar 开始了准业务化试验, 其分析质量已经超过 G-P3DVar, 于 2015 年底

2016-03-22 收到, 2016-10-12 收到再改稿。

资助项目: 中国气象局数值预报 GRAPES 发展专项 (GRAPES-FZZX-2016), 公益性行业(气象)科研专项 (GYHY201206007, GYHY2015-06003)

\* email: wangjc@cma.gov.cn

① 薛纪善, 刘艳, 张林, 等. GRAPES 全球三维变分同化系统模式变量分析版科学文档. 中国气象局数值预报中心内部技术手册, 2012.

通过业务化评审。

本文简要介绍了近两年 G-M3DVar 同化框架和资料应用等方面的技术进步,着重分析了业务化 GRAPES 三维变分同化系统的性能。采用业务化 GRAPES 同化循环预报系统进行了两年的同化循环预报试验;对其中 1 年的分析场进行了详细检验;采用多模式分析场资料和观测比较,检验 G-M3DVar 的分析场的精度和特征;通过与国外先进的数值预报中心等多种分析场的交叉比较,分析了 G-M3DVar 分析场精度及存在的不足和差距,初步探讨可能原因。

## 1 G-M3DVar 简介及近两年主要技术进步

### 1.1 G-M3DVar 简介

G-M3DVar 同 G-P3DVar 同化系统相同,仍然采用 Courtier 等<sup>[16]</sup>提出的增量分析方案<sup>[10]</sup>:

$$J(\delta\mathbf{x}) = J_b(\delta\mathbf{x}) + J_o(\delta\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\delta\mathbf{x}^T \mathbf{B}^{-1} \delta\mathbf{x} + \frac{1}{2}(\mathbf{H}\delta\mathbf{x} + \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H}\delta\mathbf{x} + \mathbf{d}). \quad (1)$$

式(1)中, $J(\delta\mathbf{x})$ 是目标函数,也称为代价函数, $\delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_b$ 是分析增量, $\mathbf{x}$ 是模式状态变量构成的分析变量, $\mathbf{x}_b$ 是 $\mathbf{x}$ 的先验估计,即背景场; $\mathbf{d} = \mathbf{H}(\mathbf{x}_b - \mathbf{y})$ 是观测余差向量, $\mathbf{y}$ 是观测值; $\mathbf{B}$ 是背景误差协方差矩阵, $\mathbf{R}$ 是观测误差协方差矩阵; $\mathbf{H}$ 是观测算子 $H$ 在 $\mathbf{x}_b$ 附近的切线性近似,称为切线性算子; $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置。

G-M3DVar 与 G-P3DVar 的最大不同是其坐标与变量定义均与 GRAPES 预报模式完全匹配<sup>[15]</sup>,G-M3DVar 的分析变量与模式的状态变量完全相同,

$$\mathbf{x} = (u, v, m, q)^T. \quad (2)$$

式(2)中, $u$ 和 $v$ 为水平风场, $m$ 为质量场(Exner 气压 $\pi$ 或位温 $\theta$ ), $q$ 为比湿。G-M3DVar 暂不考虑初始时刻的非静力平衡问题,分析变量 $\theta$ 由 $\pi$ 经静力平衡关系导出:

$$\frac{\partial\pi}{\partial z} = -\frac{g}{C_p\theta}, \quad (3)$$

式(3)中, $g$ 是重力加速度, $C_p$ 是气体的定压比热容。

数值天气预报模式变量维数十分巨大,自由度可以达到 $10^7$ 量级或更大,背景误差协方差矩阵 $\mathbf{B}$ 的维数达到了 $10^{14}$ ,其存储与求逆是不可能的<sup>[17]</sup>。

一般采用控制变量变换的方法将分析变量转化为变量间不相关的控制变量,以降低背景误差协方差的维数。G-M3DVar 的采用控制变量为

$$\mathbf{x}_u = (\psi, x_u, \pi_u, q)^T. \quad (4)$$

式(4)中, $\psi$ 为流函数, $x_u$ 和 $\pi_u$ 称为非平衡的速度势和非平衡的 Exner 气压。非平衡变量的定义<sup>[10,18]</sup>为

$$\begin{cases} \chi = M\psi + \chi_u, \\ \pi = N\psi + \pi_u. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $M$ 和 $N$ 分别是流函数 $\psi$ 与势函数 $\chi$ 之间、流函数 $\psi$ 与 Exner 气压 $\pi$ 之间的平衡约束算子。式(4)作为控制变量,变量间不相关,其背景误差协方差矩阵 $\mathbf{B}_u$ 是块对角矩阵,极大简化了变分问题<sup>[6]</sup>。G-M3DVar 假设控制变量水平方向自相关同质性和各向同性,相关模型采用二阶自回归模型<sup>[11]</sup>,垂直方向自相关模型取自中国国家气象中心 HLAFS 模式系统的最优内插(OI)方案<sup>[9]</sup>。

针对不同的观测,G-M3DVar 设计了相对应的观测算子,并根据变量属性,选择不同的插值方案。观测误差协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 是另一个关键参数,其与背景误差的相对大小直接影响了资料同化的效果。同时要对资料进行严格有效的质量控制,保证所同化的观测资料符合变分资料同化的假设条件,避免错误观测资料对同化效果的影响。对于某些存在偏差(包含观测算子引起的偏差)的观测资料,要对观测存在的偏差进行订正,如卫星辐射率资料。G-M3DVar 的改进工作主要围绕着上述框架和资料应用等几个方面展开。

### 1.2 G-M3DVar 同化框架的改进

随着 GRAPES 预报模式分辨率的提高,G-M3DVar 水平分辨率由 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 提高为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,垂直方向由 36 层增加到 60 层,模式层顶高度也由 32.5 km 提升至 36.4 km。

#### 1.2.1 静力平衡位温计算精度的改进

G-M3DVar 垂直坐标与 GRAPES 预报模式一致,采用 C-P 分布的垂直坐标。在原 G-M3DVar 系统中,采用一阶差分方案计算静力平衡条件下的整层位温。当模式分层均匀或层次厚度变化缓慢,一阶差分接近中央差分格式,可达二阶精度;当模式分层厚度变化剧烈,差分精度只有一阶,对于位温计算而言,误差较大。原 G-M3DVar 的垂直层次为 36 层,层次厚度变化较缓,一阶差分方案计算的位温误差较小。当模式垂直分辨率达到 60 层时,虽然垂直

分辨率有了提高,但由于对流层向平流层过渡时分层厚度有明显的改变,一阶差分计算温度误差最大可达 4 K,同化卫星辐射率资料的分析误差异常偏大。为此,静力平衡的位温计算采用了二阶精度的不等距差分方案<sup>[19]</sup>,位温计算精度有了明显改进,解决了同化卫星资料分析误差异常问题。

### 1.2.2 在模式面直接求解平衡方程

G-M3DVar 中物理变换包括风、压场间的动力平衡变换<sup>[10]</sup>,目前采用线性平衡方程表达。等压面线性平衡方程的水平微分沿水平等压面进行,但 GRAPES 模式的垂直坐标是地形追随高度坐标,在陡峭地形附近坐标面有很大坡度,方程会变得复杂,会出现垂直于水平的二阶混合导数,给求解带来很大困难。最初 G-M3DVar 版本中采用辅助等压面方案,即引入一组辅助等压面,在其上求解线性平衡方程,再将得到的平衡气压增量插值到模式面。该方案存在明显缺陷:增加了计算量和插值计算误差,在模式顶层与底层存在外插问题。为了克服上述缺点,推导并简化了地形追随高度坐标系下模式面线性平衡方程,实现线性平衡方程在模式面上直接求解。结果表明:在模式面上直接求解线性平衡方程方案,分析效果优于辅助等压面求解方案,计算效率提高了约一倍。具体技术详见文献①。

### 1.2.3 动力与统计混合平衡约束方案

G-M3DVar 采用的动力平衡方程稳健程度虽然较高,且能扩展至具有流依赖的非线性关系,但不适用于热带地区,会造成虚假平衡。目前国际上一些主流的区域和全球同化系统采用统计平衡方案,如 GSI<sup>[20]</sup>,其优点是计算简单,避免动力平衡方案在低纬度地区的虚假平衡,但其只能考虑变量间的线性关系。故综合上述两种方法,取长补短,建立了动力与统计相结合的混合方案<sup>[21-23]</sup>。首先在水平方向逐层求解线性平衡方程,并在垂直方向辅以统计约束,得到最终的与流函数平衡的 Exner 气压。

研究结果<sup>[23]</sup>表明:上述混合平衡方案成功实现了风、压场分析在热带地区的解耦,有效解决了热带地区动力平衡方程不适用问题,且部分反映了热带地区风、压场协相关由 Kelvin 波主导的特征。

### 1.2.4 背景误差协方差更新

GRAPES 全球预报模式在近两年有了显著改进,为了提高 G-M3DVar 中背景误差协方差的精度,采用美国 NMC(National Meteorological Center)方法重新估计了 G-M3DVar 背景场误差协方

差,提高了分析精度。完善了在模式空间统计估计背景误差协方差的估计系统,为 GRAPES 全球/区域一体化的三维变分系统提供了基本的背景误差协方差的三维结构<sup>[17]</sup>。

## 1.3 资料同化应用的进展

影响变分资料同化分析场精度的因素有很多,除同化框架的精度以外,各种资料的同化应用水平在很大程度上决定了分析场精度。资料应用水平的高低由观测算子的精度、资料质量控制和偏差订正等决定。近两年,G-M3DVar 在增加卫星资料种类的同时,还在资料应用技术细节上进行了优化。

### 1.3.1 有约束的卫星资料偏差订正方案

偏差订正在卫星辐射资料的同化中具有非常重要的作用,方法和效果直接影响到卫星资料对分析和预报的贡献。自 20 世纪 90 年代开始直接同化卫星辐射率资料以来,国际上主要的卫星偏差订正方法主要有两种:一是由 Harris 和 Kelly 提出的扫描角订正和气团订正<sup>[24]</sup>,二是变分偏差订正方法<sup>[25]</sup>。这两种方法均受模式偏差的影响,在模式预报偏差较大时,观测信息会被错误订正。借鉴数学反问题中极小模解的思想,采用卫星资料定标信息作为先验约束,在 G-M3DVar 中研发了有约束的偏差订正方案<sup>[26]</sup>。研究结果表明:有约束的偏差订正方法,减小了模式背景偏差对卫星辐射率资料偏差订正的影响,更好地利用了卫星观测信息,提高了分析精度。

### 1.3.2 AMSU-A 辐射率资料背景场质量控制改进

微波温度计(AMSU-A)辐射亮温资料是 G-M3DVar 同化的主要卫星资料之一。G-M3DVar 同化 AMSU-A 辐射率资料采用了背景场检查质量控制方案<sup>[15]</sup>,但由于原 G-M3DVar 中未估计亮温变量的背景误差的技术,故假设亮温的背景误差和观测误差相同,此假设存在明显问题,造成在背景误差较大的区域许多有用的观测数据被剔除。另外,G-M3DVar 中流函数、势函数、非平衡的 Exner 气压以及比湿的背景误差均随高度和纬度有显著变化<sup>[17]</sup>,意味着 G-M3DVar 的背景误差在 AMSU-A 观测空间中也有显著的空间变化。

在 G-M3DVar 同化系统中推导了控制变量随机扰动方法估计观测变量的背景误差的公式。将该方法估计的 G-M3DVar 中 AMSU-A 亮温的背景误

差应用于 AMSU-A 辐射资料的背景场检查,显著提高了同化的 AMSU-A 资料数量,特别是在南半球;减小了温度和高度等变量的分析和预报误差,提高了 GRAPES 全球模式中高层的预报技巧<sup>[27]</sup>。

### 1.3.3 GNSS/RO 折射率资料同化的改进

在 G-M3DVar 同化系统中已实现了对 GNSS/RO(Global Navigation Satellite System/Radio Occultation)折射率资料的有效同化应用<sup>[18]</sup>,但观测影响试验结果表明,同化该资料后位势高度分析场在对流层中高层和平流层低层的负偏差增大。将 GNSS/RO 折射率资料与 NCEP FNL 分析场和 ERA-Interim 再分析场进行比较,统计了 GNSS/RO 折射率观测偏差。统计结果表明:在对流层中高层和平流层低层,折射率存在  $-0.2\%$  负偏差。对 GNSS/RO 折射率资料进行偏差订正,减小了 GNSS/RO 折射率同化引起的高度场分析和预报偏差,显著提高了南半球的预报时效。

为了提高 GNSS/RO 折射率资料的同化效果,采用新息增量法(也称 H-L 方法),针对折射率局地观测算子,估计了 GNSS/RO 折射率资料的观测误差,研究了 COSMIC 折射率资料误差的季节变化和空间变化。新估计的折射率观测误差提高了 G-M3DVar 对折射率资料的同化效果<sup>[28]</sup>。

### 1.3.4 探空资料的变分质量控制

近些年,在 G-M3DVar 同化系统中,探空观测资料的信息对全球分析场的贡献很大<sup>[15]</sup>。为了提高探空资料的同化效果,于 2013 年在 G-M3DVar 中初步实现了探空资料变分质量控制方案<sup>[29]</sup>,一定程度上减小了南、北半球高度分析误差。

### 1.3.5 卫星资料应用

针对 G-M3DVar 中未同化的卫星资料,攻克了

一系列相关关键技术,增加了多种卫星观测资料的同化能力,包括 AIRS(atmospheric infrared sounder)红外高光谱辐射率资料、IASI(infrared atmospheric sounding interferometer)红外高光谱辐射率资料、ATMS(advanced technology microwave sounder)微波辐射率资料、ASCAT(advanced scatterometer)海面风场资料、Metop-B 搭载的 AMSU-A 资料、FY-3C 微波温度计和湿度计资料等。这些资料的加入提高了分析场的精度,特别是南半球分析场精度和预报技巧均有显著提高。

## 2 试验设置与资料说明

面向业务化应用,在 2015 年中期 G-M3DVar 集成了上述主要的研究成果,并与最新的 GRAPES 全球预报模式构成了新版的 GRAPES 全球同化循环预报系统。为了评价新版本的性能,评估 GRAPES 全球同化循环系统的业务能力与水平,进行 1 年的同化循环预报试验。

### 2.1 试验设置

GRAPES 全球分析预报系统水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,模式积分步长为 300 s。同化的观测资料如表 1 所示。由于该试验于 2015 年中期开始,未同化 IASI, ATMS, ASCAT, Metop-B 搭载的 AMSU-A 资料和 FY-3C 的微波温度计和湿度计资料。试验的同化时间窗为 6 h, G-M3DVar 内外循环分辨率均与模式分辨率相同。试验时间段为 2013 年 8 月 15 日 00:00(世界时,下同)—2014 年 8 月 31 日 18:00。试验冷启动的初始场采用 NCEP FNL 分析场插值获得,故试验系统运行前期需一定时间的调整,检验和评估时段从 9 月 1 日 00:00 开始。

表 1 试验中 G-M3DVar 同化的观测资料种类与要素  
Table 1 Observations assimilated in the experiment by G-M3DVar

资料种类	仪器	平台	同化要素
常规观测		探空	气压, $u$ 和 $v$ 风分量, 相对湿度
		地面	地表气压
		船舶	地表气压
		小球测风	$u$ 和 $v$ 风分量
		飞机	$u$ 和 $v$ 风分量, 温度
卫星	AMSU-A 微波温度计	NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, Metop-A	亮温
	AIRS 红外高光谱	AQUA	亮温
	GNSS 掩星	COSMIC, GRAS, GRACE-A, TerraSAR-X	折射率
	云导风		$u$ 和 $v$ 风分量

## 2.2 资料说明

为了评估 G-M3DVar 的分析性能和诊断可能存在的不足,使用相同时段的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的全球再分析场 ERA-Interim<sup>[30]</sup>,美国国家环境预测中心(NCEP)的全球分析资料(FNL)(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)以及中国国家气象中心全球业务模式 T639 的分析场。

## 3 基于探空观测的检验

探空观测资料是理解大气三维空间结构及演变的重要信息源,质量较高,不仅作为同化分析中可靠的资料来源,也常作为检验数值天气预报产品的参考标准<sup>[31]</sup>。为了评估 G-M3DVar 分析场的精度和可能存在的不足,计算了探空观测各变量与 ERA-Interim 再分析场观测相当量、NCEP FNL 分析场观测相当量和 G-M3DVar 分析场观测相当量之间的差,分别用 OMERA,OMFNL 和 OMGRP 表示。这里冬季和夏季分别指 2013 年 12 月—2014 年 2 月和 2014 年 6—8 月;北半球的范围为  $20^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ ,热带的范围是  $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ (不含  $20^{\circ}\text{S}$  和  $20^{\circ}\text{N}$ ),南半球的范围为  $20^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 。

图 1 是冬、夏标准化气压的结果,由图 1a 可以看出,对于冬季北半球气压场,OMERA 与 OMFNL 的标准差基本一致,平均值除在 500 hPa 以下有微小差别和 50 hPa 以上差异较大外,其余层次基本一致。OMERA 的平均值在 500 hPa 以下是负值而 OMFNL 表现为正值,500 hPa 以上对流层高层和平流层负值较大。OMGRP 的标准差明显小于 OMERA 和 OMFNL;OMGRP 的平均值除了在 250 hPa 和 50 hPa 附近为正值外,其余层次均近似为零,在对流层中高层到平流层均为明显负值。由图 1a 还可以看出,OMGRP 的平均值与 OMERA 和 OMFNL 的平均值在对流层中低层十分接近。相比探空资料,冬季北半球 ERA-Interim 与 NCEP FNL 的气压场在对流层中高层有明显正偏差,而 OMGRP 除了在 250 hPa 和 50 hPa 附近有较小的负偏差以外,其他层次偏差较小。表明冬季北半球 G-M3DVar 气压的分析场与探空观测一致性较好。

比较图 1b 发现,夏季北半球气压场 OMFNL,OMERA 和 OMGRP 的标准差与冬季情况相似,而 OMFNL 和 OMERA 的平均值与冬季情况正好相

反,除了 OMFNL 在 10 hPa 和 150 hPa 附近以外所有层次的平均值为正值。700 hPa 以上,OMFNL 和 OMERA 的平均值大小有明显不同,OMFNL 的平均值更接近于零。OMGRP 的平均值与冬季的平均值分布情况和数值非常接近。相比探空资料,夏季北半球 G-M3DVar 的分析场的偏差和标准差与冬季非常接近;而 ERA-Interim 再分析场的偏差在夏季有负偏差,与冬季正好相反。综合图 1a 和图 1b 的分析结果,冬季和夏季北半球 G-M3DVar 气压场在 500 hPa 以下与 ERA-Interim 再分析场和 NCEP FNL 分析场相比更靠近探空观测的气压场。

图 1c 与图 1d 是冬季和夏季热带地区气压场的 OMGRP,OMERA 和 OMFNL 的平均值和标准差。OMERA 与 OMFNL 标准差在冬季和夏季均非常一致,明显大于 OMGRP 的标准差。OMERA 和 OMFNL 平均值在所有层次均为较大的正值;夏季除 150 hPa 以上层次外,其余层次 OMERA 和 OMFNL 的平均值几乎相同;冬季 OMERA 的平均值为正值,但小于 OMFNL。热带地区气压场的 OMGRP 在冬季和夏季的平均值均与 OMERA 和 OMFNL 有较大差异,OMGRP 的平均值在 300 hPa 以下层次几乎为零,在 300 hPa 以上也是显著正值,但其数值要比 OMERA 和 OMFNL 小。由图 1c 和图 1d 的分析结果可以发现,对于热带地区气压场,ERA-Interim 再分析场与 NCEP FNL 分析场的特征更接近,而 G-M3DVar 与两者有较大不同,特别是偏差结构不同,G-M3DVar 的气压分析场相比 ERA-Interim 和 NCEP FNL 气压场更接近探空观测。

图 1e 和图 1f 是冬季和夏季南半球气压场 OMGRP,OMERA 和 OMFNL 的平均值和标准差,可以看到,OMERA 和 OMFNL 的标准差除了在 100 hPa 以上有较小差异以外,其余层次的标准差均非常接近。与北半球和热带地区情况类似,OMGRP 的标准差明显小于 OMERA 和 OMFNL。OMGRP,OMERA 和 OMFNL 南半球的平均值均为正值,且 OMERA 和 OMFNL 的平均值在 500 hPa 以上也有较明显的差别。OMERA 的平均值最大,在对流层中低层(250 hPa 以下)和 30 hPa 以上 OMGRP 的平均值最小,而在 30~250 hPa 的层次,OMFNL 的平均值最小。图 1e 和图 1f 的分析结果表明:南半球的气压场,ERA-Interim, NCEP FNL 和 G-M3DVar 的差异较北半球和热带地区大,特别

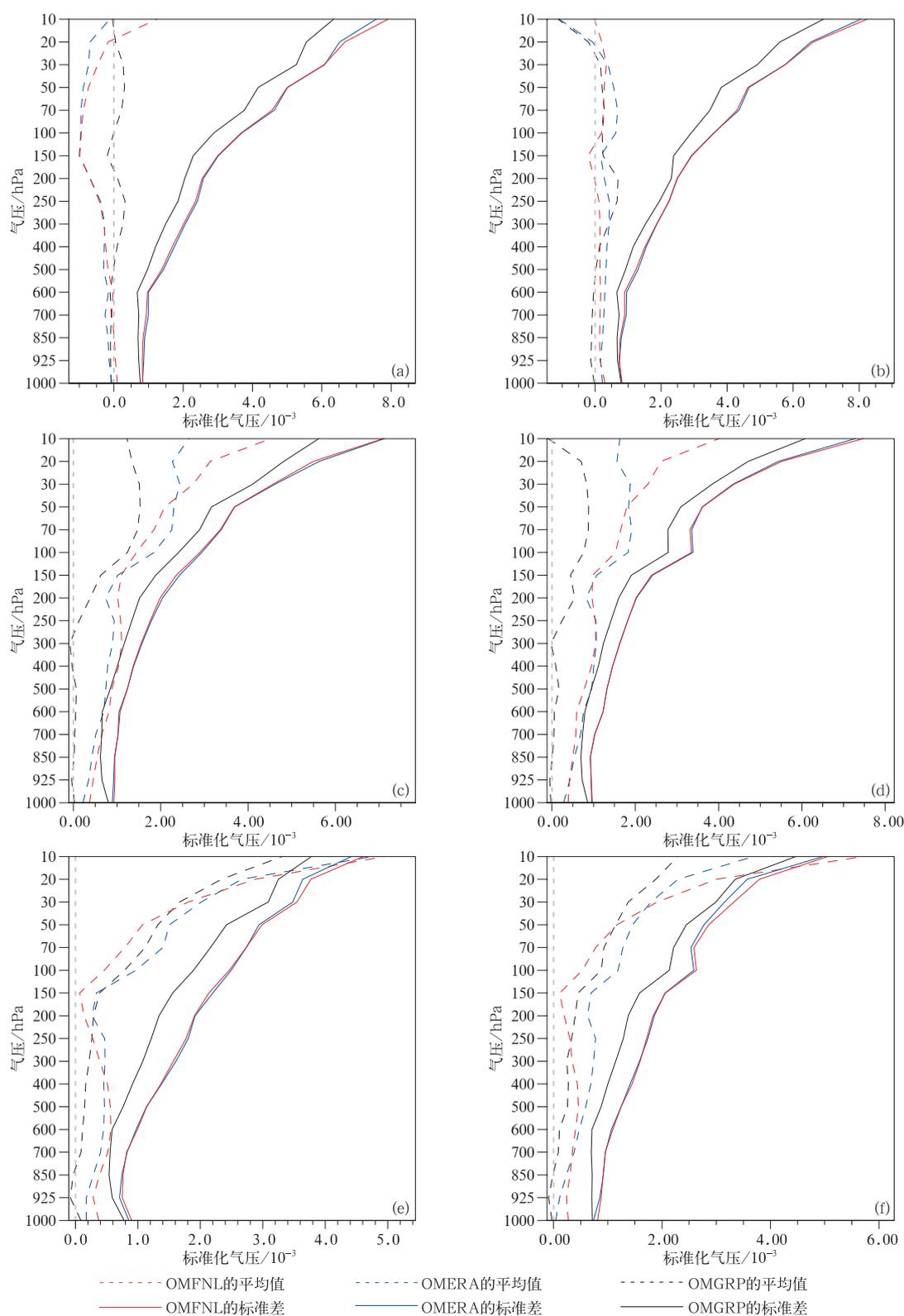


图 1 探空观测的气压变量与 ERA-Interim 再分析场、NCEP FNL 分析场和 G-M3DVar 分析场差别的平均值与标准差廓线  
(a)冬季,北半球,(b)夏季,北半球,(c)冬季,热带地区,(d)夏季,热带地区,(e)冬季,南半球,(f)夏季,南半球

Fig. 1 Mean and standard deviations of OMERa, OMEFNL and OMGRP on standard pressure  
in winter and summer over the North Hemisphere, the Tropics and the South Hemisphere  
(a)over the North Hemisphere in winter,(b)over the North Hemisphere in summer,(c)over the Tropics in winter,  
(d)over the Tropics in summer,(e)over the South Hemisphere in winter,(f)over the South Hemisphere in summer

是 ERA-Interim 和 NCEP FNL 的差异明显大于北半球和热带地区。

综合图 1 的分析结果,以探空观测的气压作为参考,G-M3DVar 的气压场分析更接近探空观测,而 ERA-Interim 再分析场和 NCEP FNL 分析场一致性较好。

图 2 为冬、夏探空观测的  $u$  风场。由图 2a 可以看出,对于冬季北半球  $u$  风场,OMGRP,OMERA 和 OMFNL 平均值均较小,OMGRP 的平均值在 600 hPa 以上层次非常接近于零,而在 600 hPa 以下对流层低层为负值;OMERA 和 OMFNL 在 250~600 hPa 和 20~150 hPa 为正值。250 hPa 以下 OMGRP 与 OMERa 的标准差比较接近,OMFNL 的标准差较小;而在 250 hPa 以上层次,OMFNL 与 OMERa 的标准差比较接近,OMFNL 的标准差较小。

由图 2b 可以看出,夏季北半球  $u$  风场在 100 hPa 以下的对流层内 OMGRP,OMERA 和 OMFNL 的平均值几乎整层为正值,且 OMERa 和 OMFNL 比较接近,在 100 hPa 以上,OMGRP 表现为负值。250 hPa 以下的对流层中低层 OMGRP 与 OMERa 的标准差相对更接近,OMFNL 标准差最小;250 hPa 以上,OMERA 和 OMFNL 的标准差大小相当,OMGRP 的标准差明显要小;在 250 hPa 附近,3 种分析场与探空观测的标准差均达到最大,OMERA 的标准差最大;600 hPa 附近标准差是 1 个极值中心。分析结果表明:冬季和夏季的北半球  $u$  风场与探空观测相比,G-M3DVar 分析场、ERA-Interim 再分析场和 NCEP FNL 分析场风场均方根误差比较接近,垂直分布型相似。

由图 2c 和图 2d 可以看出,对冬季和夏季热带地区  $u$  风场,925 hPa 以下 OMGRP,OMERA 和 OMFNL 的平均值为正值;冬季热带地区(图 2c)250~850 hPa OMGRP 的平均值为负值,而 OMERa 和 OMFNL 非常接近于零,100 hPa 以上三者的平均值以正值为主,特别是在 70 hPa,OMGRP 的平均值达到  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。夏季 200~850 hPa OMGRP,OMERA 和 OMFNL 的平均值几乎为零,非常接近;但在 150 hPa 以上,OMGRP 的平均值出现了正负相间的振荡,OMERA 与 OMFNL 没有该现象,这可能是 G-M3DVar 在热带地区 100 hPa 以上的

风场分析存在不足。由图 2c 和图 2d 还可以看出,250 hPa 以下 OMGRP 的标准差最大,OMERA 与 OMFNL 的标准差较接近,但 OMFNL 的标准差最小;100 hPa 三者的标准差均达到一个极大值,特别是 OMGRP 的标准差达到  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对  $u$  风场的分析结果表明:G-M3DVar 的分析场在热带地区的均方根误差明显大于 ERA-Interim 再分析场和 NCEP FNL 分析场,北半球对流层内与 ERA-Interim 再分析场的均方根误差相当,NCEP FNL 分析场的均方根误差较小;而在南半球 250 hPa 以下,G-M3DVar 的均方根误差最大,NCEP FNL 的均方根误差最小。

图 3 给出的是冬季和夏季 3 种分析资料的相对湿度变量与探空资料差别的平均值与标准差。由图 3a 可以发现,北半球冬季 OMGRP 的平均值整层均是较小的负值,OMERA 和 OMFNL 的平均值是十分明显的负值,且 OMERa 平均值的绝对值最大。在 600 hPa 以下,OMFNL 的平均值约为  $-8\%$ ,OMERA 的平均值约为  $-5\%$ ,而 OMGRP 的平均值仅为  $-3\%$  左右。且 OMERa 和 OMFNL 的平均值在 250~300 hPa 达到最小值,OMFNL 最小达到约  $-40\%$ 。OMGRP 的标准差最小,且几乎不随高度变化,在 500 hPa 以下与 OMERa 和 OMFNL 的标准差非常接近,但在 500 hPa 以上 OMERa 和 OMFNL 的标准差要明显大于 OMGRP。由图 3b 可以发现,北半球夏季相对湿度,OMGRP 的平均值与冬季十分相似;OMERA 的平均值 700 hPa 以下为正值,600 hPa 以上为负值;OMFNL 的平均值 600 hPa 非常接近于零,在 600 hPa 以上也为显著的负值,且 OMERa 平均值的绝对值最大。OMGRP 的标准差在 600 hPa 略大于 OMERa 和 OMFNL 的标准差,而在 300~600 hPa 相当,300 hPa 以上要明显比 OMERa 和 OMFNL 的标准差小。图 3c~图 3f 表明,热带地区和南半球相对湿度 OMGRP,OMERA 和 OMFNL 的平均值和标准差的分布与北半球十分相似。

图 3 表明:相比探空资料,G-M3DVar 分析场、ERA-Interim 再分析场和 NCEP FNL 分析场在 500 hPa 以上的对流层中上层均明显偏湿;北半球冬季对流层中低层,NCEP FNL 分析场偏湿最明显,达到约  $5\%$ ;而对于北半球夏季,热带地区冬季

和夏季对流层中低层,3种分析资料的偏差均较小。G-M3DVar 相对湿度分析场与探空资料相比,对流层

中高层的偏差最小,更接近探空观测;相比 ERA-Interim再分析场和NCEP FNL分析场,G-M3DVar

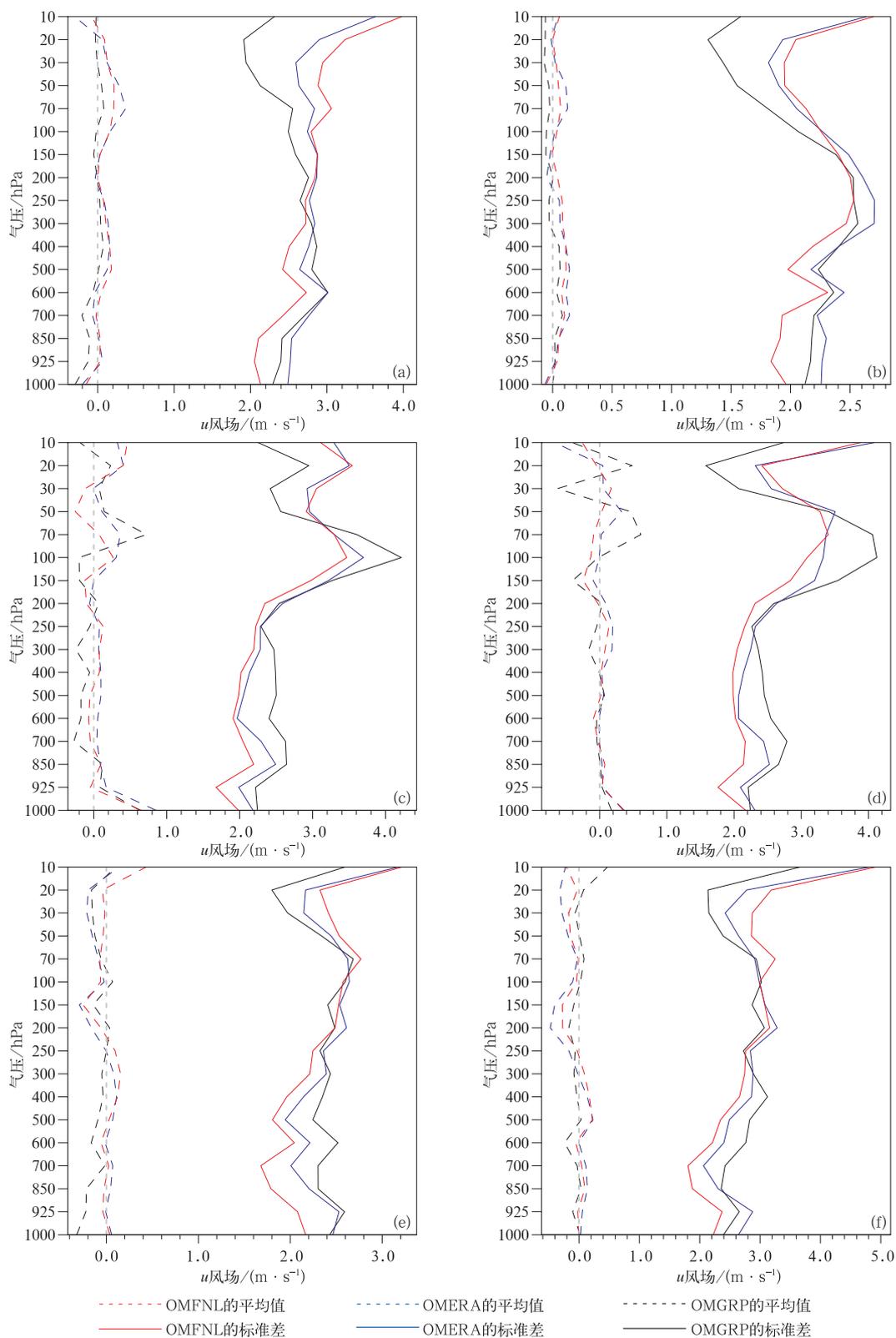


图2 同图1,但为  $u$  风场

Fig. 2 The same as in Fig. 1, but for  $u$  wind

分析场偏干非常明显,特别是在对流层中高层。

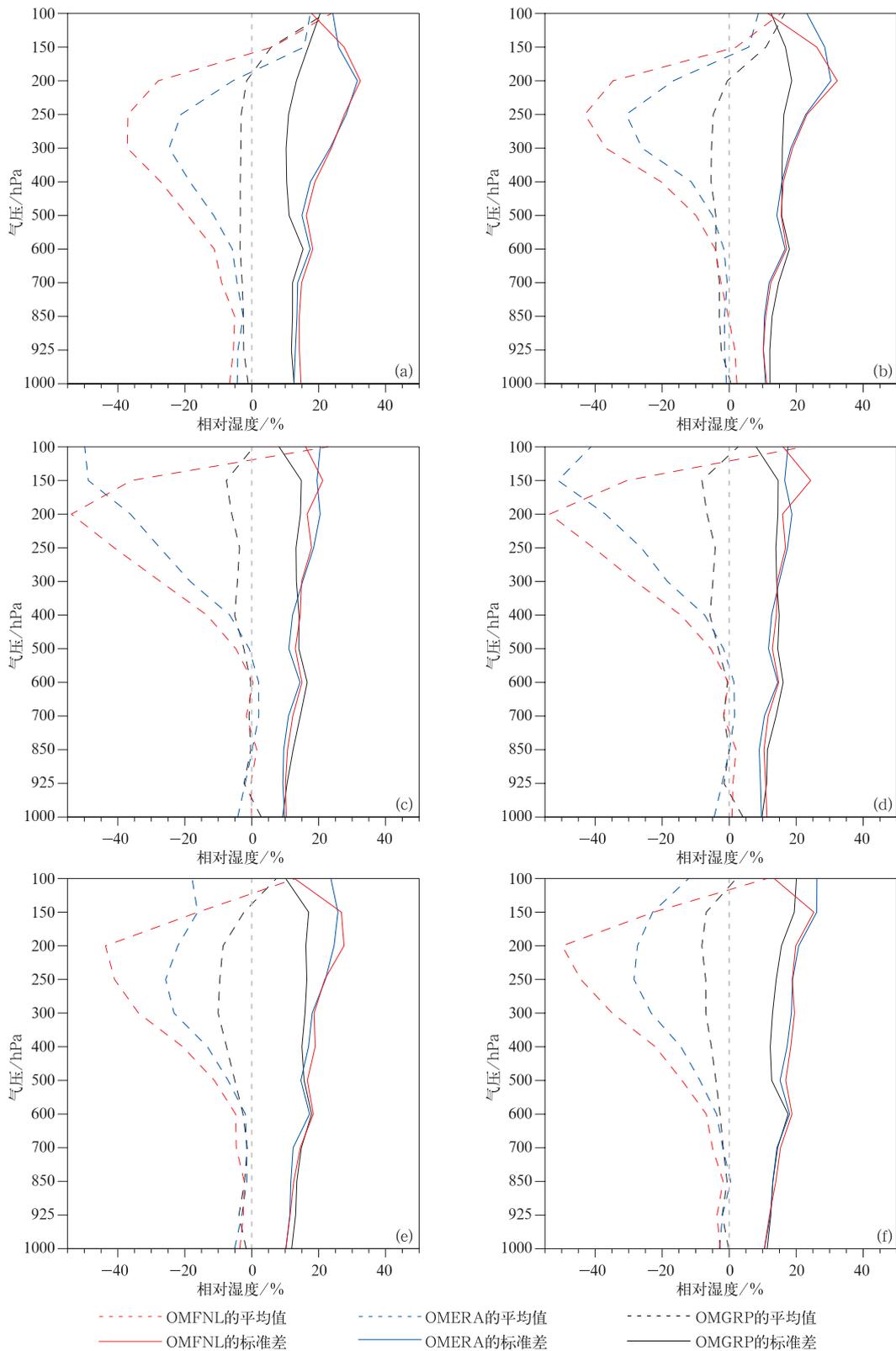


图 3 同图 1, 但为相对湿度

Fig. 3 The same as in Fig. 1, but for relative humidity

#### 4 基于 ERA-Interim 再分析场的检验

采用探空资料的评估检验分析场的误差存在两方面的问题:一是探空观测自身存在明显误差,特别是不同厂家生产的探空仪器误差特性不同;二是探空具有空间局限性,主要在陆地上,而在广大的洋面没有探空观测,南半球的探空观测十分有限。因此,第3章有些误差反映的是探空观测本身的误差,而不是分析场的误差。为了进一步评估 G-M3DVar 分析场的性能和可能存在的不足,采用 ECMWF 提供的 ERA-Interim 再分析场作为参考,对比 G-M3DVar 分析场、NCEP FNL 分析场和 T639 分析场的误差。

图4是以 ERA-Interim 再分析场作为参考的 G-M3DVar, NCEP FNL 和 T639 位势高度分析场1年平均的均方根误差。由图4a可以看出, NCEP FNL 的均方根误差在 50 hPa 以下仅为 5 gpm, 表明

NCEP FNL 分析场和 ERA-Interim 再分析场的位势高度场的差异非常小。G-M3DVar 的位势高度均方根误差比 NCEP FNL 分析场略大, 50 hPa 以下约为 7~8 gpm, 在 250 hPa 附近还有极大值, 约为 10 gpm。T639 位势高度场的均方根误差比 G-M3DVar 大, 特别是在对流层中高层和平流层内。由图4a可以看出, G-M3DVar 位势高度的均方根误差虽然比 NCEP FNL 大, 但 G-M3DVar 位势高度场分析误差精度已接近 NCEP FNL 分析场。已经发现, 25 hPa 的 G-M3DVar 均方根误差的极大值是由于飞机报温度资料分析的偏差引起的。比较图4b和图4a可以发现, 在热带地区 NCEP FNL 和 G-M3DVar 的均方根误差与北半球相似, 而 T639 在热带地区的分析误差却比北半球大很多, 特别是在平流层 10 hPa 附近, 平均均方根误差达到 90 gpm。由图4c可以发现, G-M3DVar 位势高度场在南半球的均方根误差比北半球略大, 而 NCEP FNL 在南半球的均方根误差与北半球相当。

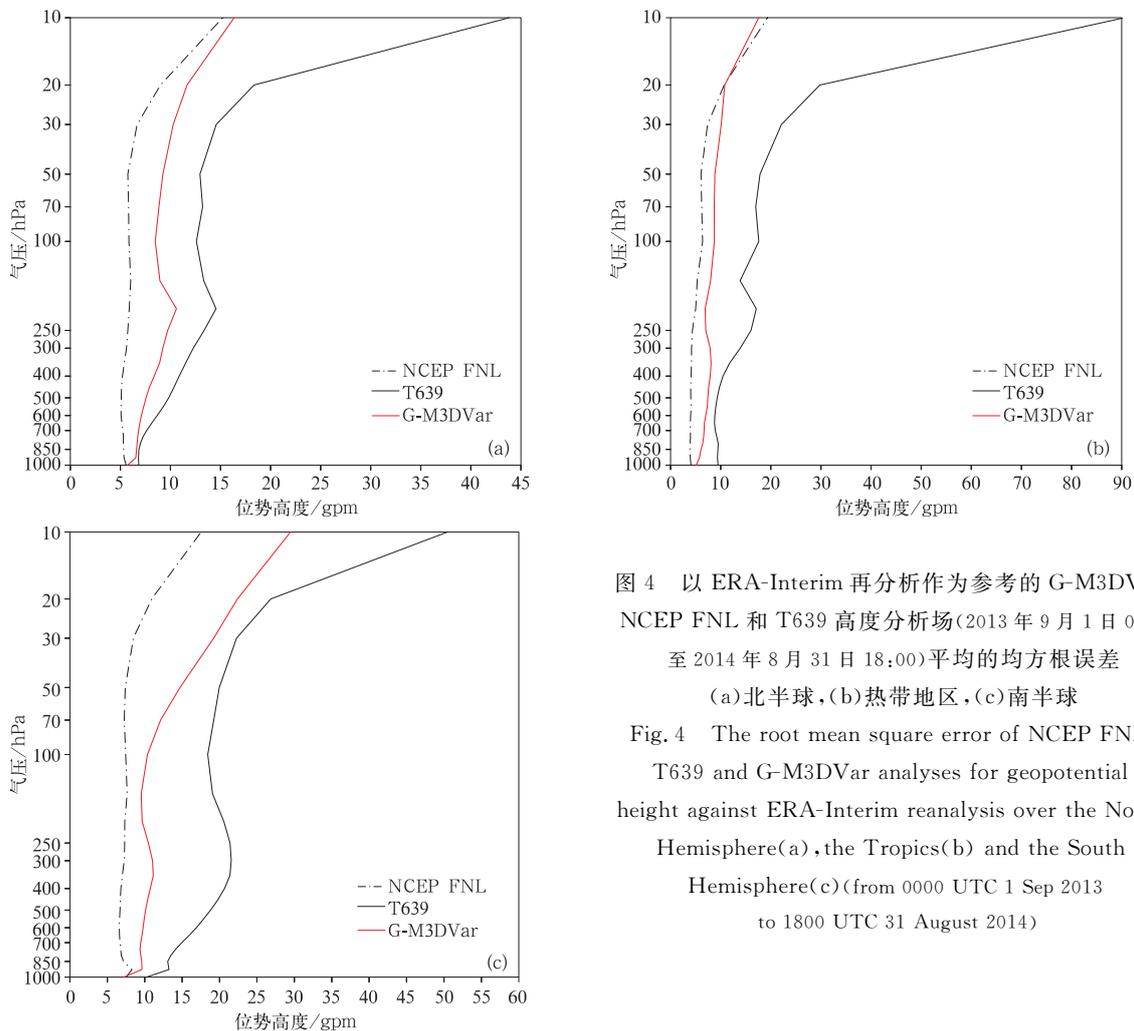


图4 以 ERA-Interim 再分析作为参考的 G-M3DVar, NCEP FNL 和 T639 高度分析场(2013年9月1日00:00至2014年8月31日18:00)平均的均方根误差  
(a)北半球, (b)热带地区, (c)南半球  
Fig. 4 The root mean square error of NCEP FNL, T639 and G-M3DVar analyses for geopotential height against ERA-Interim reanalysis over the North Hemisphere(a), the Tropics(b) and the South Hemisphere(c)(from 0000 UTC 1 Sep 2013 to 1800 UTC 31 August 2014)

图 5 是 G-M3DVar, NCEP FNL 和 T639  $u$  风场 1 年平均的均方根误差。由图 5a 可以看出, 3 种分析资料北半球  $u$  风场的均方根误差垂直分布非常一致, 即在 250~400 hPa 和 10 hPa 附近存在极大值, 呈 S 型。其中, NCEP FNL 的均方根误差约为  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而 G-M3DVar 的均方根误差大于 NCEP FNL, 平均约为  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而 T639 的均方根误差最大。由图 5b 可以发现, NCEP FNL 和 G-M3DVar 热带地区  $u$  风场的均方根误差垂直分布型也很相似, 从对流层低层到对流层顶逐渐增大, 在 150 hPa 附近有一个极大值, 在平流层内变化较

小; NCEP FNL 的分析误差最小, 最大为  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , G-M3DVar 的均方根误差最大约为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。T639 热带  $u$  风场的均方根误差最大, 同时在 100 hPa 存在极大值, 可达到  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在 10 hPa 也存在一个极大值, 达到  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这表明 T639 分析场在热带地区 100 hPa 和 10 hPa 可能存在问题。图 5c 表明, 3 种分析资料南半球  $u$  风场的均方根误差垂直分布型与北半球一致, 但比北半球均方根误差偏大  $0.5 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且 T639 均方根误差南北半球的差异较 NCEP FNL 和 G-M3DVar 大, 这可能是因为 T639 同化的卫星资料少于 NCEP FNL 和 G-M3DVar。 $v$  风场

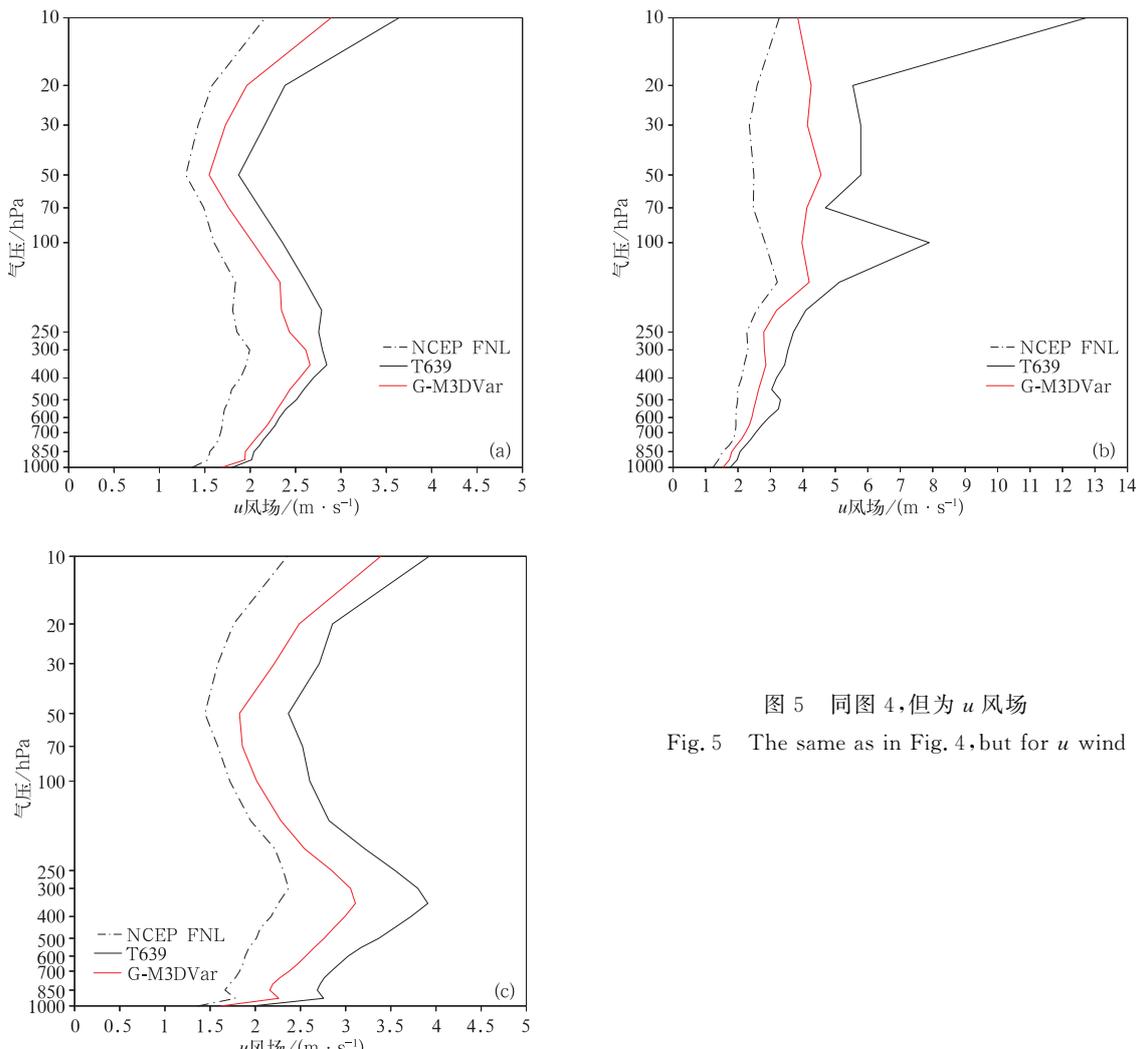


图 5 同图 4, 但为  $u$  风场  
Fig. 5 The same as in Fig. 4, but for  $u$  wind

的均方根误差与  $u$  风场一致(图略)。

图 6 是 G-M3DVar, NCEP FNL 和 T639 比湿 1 年平均的均方根误差。由图 6a 可以发现, NCEP FNL 比湿的均方根误差在 850 hPa 附近最大, 达到  $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; T639 比湿的均方根误差比 NCEP

大, 在 850 hPa 附近约为  $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; G-M3DVar 比湿的均方根误差最大, 850 hPa 达到  $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图 6b 表明, 在热带地区 NCEP FNL 的均方根误差比北半球大, 850 hPa 附近最大值达到  $1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , T639 和 G-M3DVar 比湿的均方根误差相当, 明显比 NCEP

FNL 均方根误差大,最大达到 $2.0\sim 2.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由图 6c 可以发现,NCEP FNL 比湿的均方根误差与北半球相当,T639 和 G-M3DVar 的均方根误差与北半

球也相当。图 6 表明,G-M3DVar 比湿分析场的均方根误差与 T639 相当。

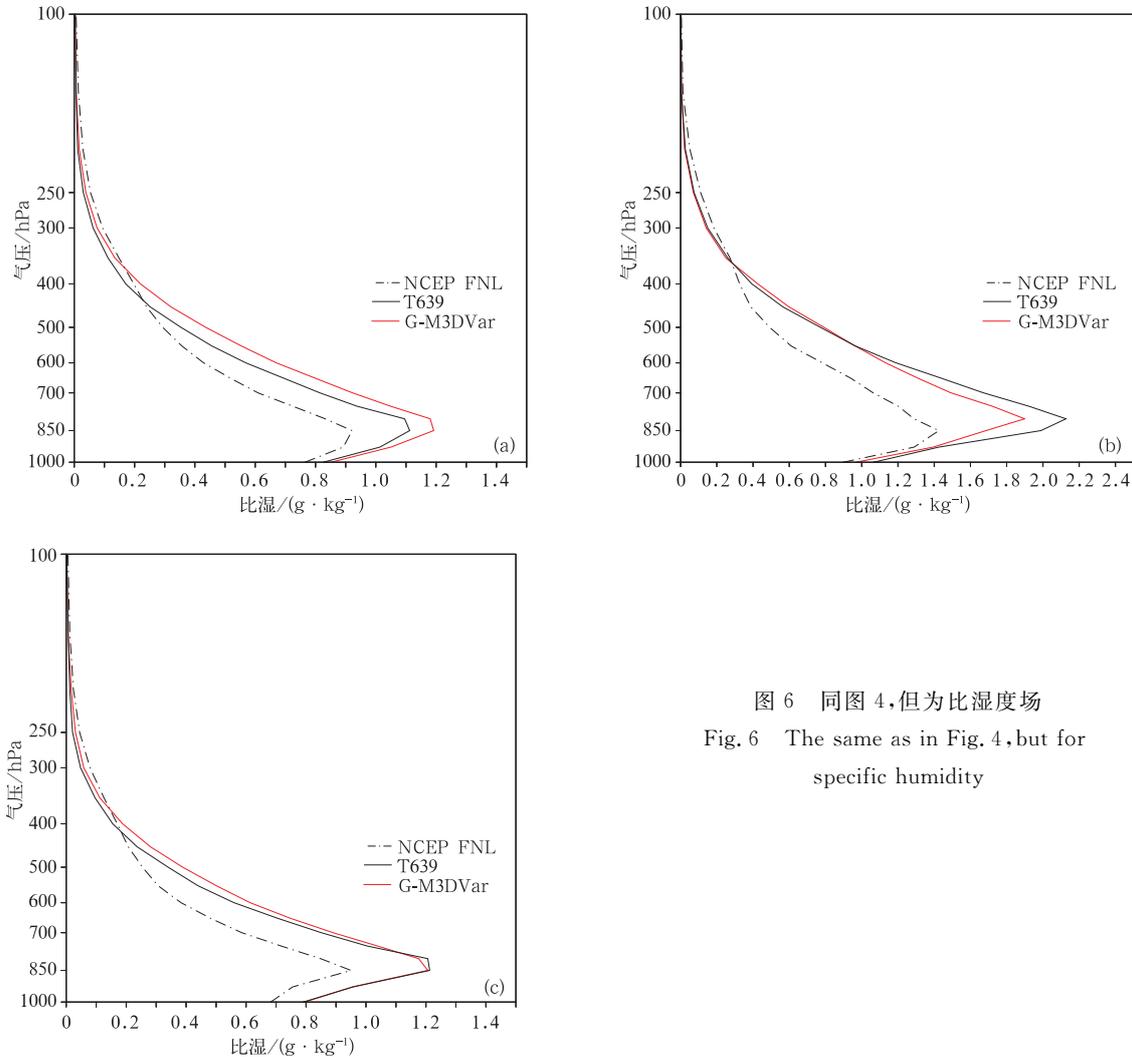


图 6 同图 4,但为比湿度场  
Fig. 6 The same as in Fig. 4, but for specific humidity

## 5 小 结

通过业务化验收的 GRAPES 全球同化循环系统两年的同化循环试验,针对 2013 年 9 月 1 日 00:00—2014 年 8 月 31 日 18:00 的试验结果进行了分析。以探空资料和 ERA-Interim 再分析场作为参考,分析了 G-M3DVar 分析场的性能,与 NCEP FNL 和 T639 分析场进行了初步对比,结果表明:

1) 相比 NCEP FNL 分析场和 ERA-Interim 再分析场,G-M3DVar 的分析场更接近探空观测,对流层风场除外。

2) 以 ERA-Interim 再分析资料作为参考,G-

M3DVar 分析场整体上合理。除湿度场外,G-M3DVar 的分析场的精度介于 NCEP FNL 分析场和 T639 分析场之间,明显优于 T639 分析场,满足了业务化的要求。

整体上 G-M3DVar 分析场的精度已有了很大改进,但相比国际先进数值预报中心的分析场精度还有一定差距,仍有许多方面需要改进:①背景误差协方差的精度亟需改进。目前 G-M3DVar 采用的是高度简化的二维的气候态背景误差方差,全球平均的水平相关尺度和模型化的全球均一的垂直相关结构,这些都严重阻碍了 GRAPES 分析精度的进一步提高。需要借鉴先进数值预报中心的发展经验,逐步发展随流型变化的背景误差方差和水平相关与

垂直相关可分离的相关结构。②各种观测资料的质量控制方案仍然有很大的改进空间。G-M3DVar 中观测资料质量控制有待进一步提高,如可以发展变分质量控制,提高极端天气过程中资料的使用数量和分析质量。③卫星资料偏差订正方案仍存在一些不足。虽然实现了有约束的偏差订正,但目前仍然是静态的和离线的简化方案,不能应对卫星观测偏差随时间漂移的问题。未来亟需发展变分偏差订正等先进的动态偏差订正方案。

### 参 考 文 献

- [1] 陈德辉,薛纪善.数值天气预报业务模式的现状与展望.气象学报,2004,62(5):623-633.
- [2] Xue Jishan. Progresses of researches on numerical weather prediction in China: 1999—2002. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 467-474.
- [3] 薛纪善.新世纪初我国数值天气预报的科技创新研究.应用气象学报,2006,17(5):602-610.
- [4] 陈德辉,沈学顺.新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展.应用气象学报,2006,17(6):773-777.
- [5] 张人禾,沈学顺.中国国家级新一代业务数值天气预报系统 GRAPES 的发展.科学通报,2008,53(20):2393-2395.
- [6] 薛纪善,庄世宇,朱国富,等. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究.科学通报,2008,53(20):2408-2417.
- [7] 杨学胜,胡江林,陈德辉,等.全球有限区域数值预报模式动力框架的试验验证.科学通报,2008,53(20):2418-2423.
- [8] 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究.科学通报,2008,53(20):2396-2407.
- [9] 张华,薛纪善,庄世宇,等. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验.气象学报,2004,62(1):31-41.
- [10] 庄世宇,薛纪善,朱国富,等. GRAPES 全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试验.大气科学,2005,29(6):872-884.
- [11] 薛纪善,陈德辉.数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用.北京:科学出版社,2008.
- [12] 陈贤. GRAPES 全球系统的研究发展.中国气象科学研究院年报,2008:35-37.
- [13] 庄照荣,薛纪善,陆慧娟,等.全球 GRAPES 等压面三维变分分析预报循环系统及试验.高原气象,2014,33(3):666-674.
- [14] 黄丽萍,伍湘君,金之雁. GRAPES 模式标准初始化方案设计与实现.应用气象学报,2005,16(3):374-384.
- [15] 刘艳,薛纪善,张林,等. GRAPES 全球三维变分同化系统的检验与诊断.应用气象学报,2016,27(1):1-15.
- [16] Courtier P, Thepaut J N, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-VAR, using an incremental approach. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 120: 1367-1387.
- [17] 王金成,庄照荣,韩威,等. GRAPES 全球变分同化背景误差协方差的改进及对分析预报的影响:背景误差协方差三维结构的估计.气象学报,2014,72(1):62-78.
- [18] Liu Yan, Xue Jishan. Assimilation of global navigation satellite radio occultation observations in GRAPES: Operational implementation. *J Meteor Res*, 2014, 28(6): 1061-1074, DOI: 10.1007/s13351-014-4028-0.
- [19] Fornberg B. Generation of finite difference formulas on arbitrary spaced grids. *Mathematics of Computations*, 1988, 51: 699-706.
- [20] Kleist D T, Parrish D F, Derber J C, et al. Introduction of the GSI into the NCEP global data assimilation system. *Wea Forecasting*, 2009, 24(6): 1691-1705.
- [21] 王瑞春,龚建东,张林. GRAPES 变分同化系统中动力平衡约束的统计求解.应用气象学报,2012,23(2):129-138.
- [22] 王瑞春,龚建东,张林,等.利用整层模式大气统计求解 GRAPES-3DVar 动力平衡约束的数值试验.热带气象学报,2014,30(4):633-642.
- [23] 王瑞春,龚建东,张林,等.热带风压场平衡特征及其对 GRAPES 系统中同化预报的影响研究 II:动力与统计混合平衡约束方案的应用.大气科学,2015,39(6):1225-1236.
- [24] Harris B A, Kelly G. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. *Q J R Meteorol Soc*, 2001, 127: 1453-1468.
- [25] Derber J, Wu W. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 2287-2299.
- [26] Han W. Constrained Variational Bias Correction for Satellite Radiance Assimilation. 19th International TOVS Study Conference, Korea, 2014.
- [27] 王金成,龚建东,王瑞春. GRAPES 全球 3D-Var 中卫星微波温度计亮温的背景误差及在质量控制中的应用.气象学报,2016,74(3):397-409.
- [28] 王金成,龚建东,赵滨.一种新的 COSMIC 大气折射率资料观测误差估计方法及在 GRAPES 全球三维变分同化中的应用.气象学报,2015,73(1):142-158.
- [29] 郝民,张华,陶士伟,等.变分质量控制对区域 GRAPES-3DVAR 中的应用研究.高原气象,2013,32(1):122-132.
- [30] Dee D P, Uppala S M. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performances of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc*, 2011, 137: 553-597.
- [31] 庄照荣,薛纪善,韩威,等.探空观测黑名单检查在变分同化系统中的应用.应用气象学报,2014,25(3):274-283.

## Improvements and Performances of the Operational GRAPES\_GFS 3DVar System

Wang Jincheng Lu Huijuan Han Wei Liu Yan Wang Ruichun Zhang Hua  
Huang Jing Liu Yongzhu Hao Min Li Juan Tian Weihong

(Numerical Weather Prediction Center of CMA, Beijing 100081)

### Abstract

In recent years, the capability and stability of GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) three-dimensional variation data assimilation system (3DVar) is upgraded and improved gradually in Numerical Weather Prediction Center of China Meteorological Administration. Improvements in analysis scheme and assimilating data technique for GRAPES 3DVar in the past two years are overviewed. Then the capability and performance of G-M3DVar latest version are evaluated by two-year length experiments. The accuracy and precision of G-M3DVar analyses is evaluated against radiosonde observation and ERA-Interim reanalysis and is compared with NCEP FNL and T639 analysis.

Taken radiosonde data as a reference, the root mean square error and bias of pressure analyses of G-M3DVar are smaller than ERA-Interim reanalysis and NCEP FNL analysis data in all domains in both winter and summer seasons. The root mean square error and bias of  $u$  wind analysis of G-M3DVar are larger than ERA-Interim reanalysis and NCEP FNL analysis in the Tropics. However, in the Northern Hemisphere, the root mean square error and bias of  $u$  wind of G-M3DVar are similar to ERA-Interim below 250 hPa. In the Southern Hemisphere, the root mean squared error of  $u$  wind of G-M3DVar is the largest compared to ERA-Interim reanalysis and NCEP FNL analysis. For humidity field, the bias of G-M3DVar analysis is smaller than ERA-Interim reanalysis and NCEP FNL analysis in the middle and high troposphere, which means that the humidity analysis of G-M3DVar is much drier than ERA-Interim and NCEP FNL data especially in the middle and high troposphere. Taken ERA-Interim reanalysis data as a reference, the root mean square error of G-M3DVar analysis is smaller than the T639 analysis but larger than NCEP FNL analysis data for all fields excluded the humidity. In conclusion, the quality of G-M3DVar analysis is better than T639 analysis and satisfies requirements of operational run.

In recent years, the gap of analyses between G-M3DVar and advanced numerical weather centers such as ECMWF keeps growing, although the accuracy of G-M3DVar analysis is improved significantly in the past two years. Much more focus and works should be paid in the following aspects. First, the background error covariance (BE) is estimated by National Meteorological Center of USA (NMC) method, which is static and climatological. The static and climatological BE is far from meeting requirements of the modern numerical weather prediction. Second, the quality control scheme for all observations in G-M3DVar is still relatively inexactly and incapable. Third, the bias correction scheme for microwave radiance in G-M3DVar is still static which has been proved to have some shortcomings.

**Key words:** data assimilation; GRAPES; three-dimensional variation data assimilation system; global numerical weather prediction model