doi:10.11676/qxxb2016.026 气象学报

GRAPES全球三维变分同化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*

王金成[1,2] 龚建东[1,2] 王瑞春[1,2]
WANG Jincheng[1,2] GONG Jiandong[1,2] WANG Ruichun[1,2]

1. 国家气象中心,北京,100081
2. 中国气象局数值预报中心,北京,100081
1. *National Meteorological Center*, *CMA*, *Beijing* 100081, *China*
2. *Numerical Weather Prediction Center of CMA*, *Beijing* 100081, *China*

2015-12-04 收稿,2016-02-29 改回.

王金成,龚建东,王瑞春. 2016. GRAPES全球三维变分同化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, 74(3):397-409

Wang Jincheng, Gong Jiandong, Wang Ruichun. 2016. Estimation of background error for brightness temperature in GRAPES 3DVar and its application in radiance data background quality control. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(3):397-409

Abstract Background errors (BEs) for observable quantities are valuable for diagnostic analysis of the response of the data assimilation system to these observable quantities and play an important role in improving the variational data assimilation system. BEs are widely applied to assess impacts of observable quantities on analysis. The condition number of the Hessian matrix is determined by background errors for observable quantities, observation errors and observation count number. The background errors of observable quantities can also be used in the procedure of background check in data quality control. However, the background errors are specified in terms of those quantities that lead to a compact formulation of the background term $\boldsymbol{J}_b$, i.e. the balanced stream function, unbalanced Exner pressure, velocity potential and specific humidity in GRAPES 3DVar system. It is not clear how the magnitudes of these background errors can be compared with various observation errors. The formulations of control variable randomization method in GRAPES are illustrated by applying the observation operators of GRAPES 3DVar system to a set of random vectors drawn from a population whose probability density function is given by an assumed background error covariance. This method is applied to estimate the background error for AMSU-A radiance data in grid-point space. The background error for radiance data is then applied in its quality control scheme. The results of forecast experiments show that more radiance data are assimilated using the new quality control scheme, which has a positive effect on geopotential height forecast in both the southern and northern Hemisphere. A statistically significant improvement in the anomaly correlation scores for geopotential height simulation in the southern Hemisphere at all forecast time is obtained. More than 0.2 day of forecast skill of geopotential height at 500 hPa is obtained in southern Hemisphere.

Key words Background error of observable quantity, Brightness temperature, Data quality control, GRAPES-GFS 3DVar

摘 要 模式变量背景误差在观测空间的投影,也即观测变量的背景误差包含了变分同化系统的重要信息,其在诊断和分析变分同化系统中资料的影响等方面具有重要作用,特别是在背景场检查质量控制中。在GRAPES全球三维变分同化(3DVar)系统中仅给定了控制变量的背景误差,并未直接给定观测变量的背景误差。为了能够对GRAPES全球3DVar进行

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406011)、国家国际科技合作专项(2011DFG23210)、国家自然科学基金面上项目(41375013)。
作者简介:王金成,主要从事资料同化和数值天气预报研究。E-mail: wangjc@cma.gov.cn

全面的诊断和分析,改进卫星微波温度计资料的质量控制,推导出 GRAPES 全球 3DVar 同化系统控制变量随机扰动方法估计观测变量的背景误差的公式,为分析和改进 GRAPES 全球 3DVar 提供了一个有力工具,并进而估计了 AMSU-A 亮温的背景误差,分析了 AMSU-A 不同通道亮温的背景误差特征,将其应用于 GRAPES 全球 3DVar 的 AMSU-A 亮温的背景场检查质量控制中。结果表明,控制变量随机扰动方法估计的 GRAPES 全球 3DVar 同化系统 AMSU-A 亮温的背景误差正确合理。同化循环预报试验结果表明,亮温的背景误差在背景场检查中的应用显著提高了 GRAPES 全球 3DVar 同化的亮温资料的数量,显著提高了 GRAPES 南半球对流层中高层位势高度场的预报技巧。在 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中推导和实现的控制变量扰动方法为诊断和分析 GRAPES 全球 3DVar 观测资料同化效果提供了有力工具。

关键词 观测变量的背景误差,亮温,质量控制,GRAPES 全球 3DVar

中图法分类号 P435

1 引 言

背景误差是变分资料同化系统中的关键参数之一,它与观测误差的比率决定了观测资料的相对权重(Lorenc,1986;Daley,1991)。在变分同化系统中,仅当背景误差和观测误差均精确给定时才能获得最优的分析结果(Lorenc, 1986)。故背景误差的估计是变分同化系统建立和调谐过程中最重要的一个方面,采用变分同化系统的数值天气预报中心在背景误差的估计方面做了大量工作(Rabier, et al, 1998; Wu, et al, 2002; 龚建东等,2006a, 2006b; 王金成等,2014)。新息增量法(Innovation method of Hollingsworth and Lönnberg, 简称 H-L 方法)(Hollingsworth, et al, 1986; Xu, et al, 2001)和 NMC(National Meteorological Center)方法(Rabier, et al, 1998; Wu, et al, 2002)是估计背景误差的常用方法。H-L 方法能够同时估计观测误差和背景误差,但此方法计算的是观测变量在观测空间的新息增量,因此 H-L 方法仅能应用于探空等观测稠密的大陆地区(龚建东等,2006a, 2006b)。而 NMC 方法能够估计三维的背景误差而被各数值天气预报业务中心广泛使用(Rabier, et al, 1998; Wu, et al, 2002; 王金成等,2014)。

观测变量的背景误差(背景误差在观测变量空间中的投影)在变分资料同化系统的优化和观测资料应用中都具有重要意义。首先,通过比较观测变量的背景误差与观测误差,有利于理解和分析不同类型观测变量对分析场的影响;其次,可以计算变分资料同化中极小化问题的条件数,从而判定极小化问题的收敛特征,如 Anderson 等 (2000)利用估计的卫星湿度计亮温的背景误差,发现了在撒哈拉沙漠地区湿度计背景误差较大是造成欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集成预报系统(IFS)四维变分同化(4DVar)出现不收敛个例的原因;观测变量的背景误差还可以直接用于观测资料质量控制中的背景场检查((Järvinen, et al,1997; Cardinali, et al, 2003)。

变分资料同化系统可以直接同化卫星观测的亮温等非常规观测资料(Anderson, et al, 1994; McNally, et al, 2000)。但在变分同化系统中,仅给定 NMC 方法估计的目标函数背景项中控制变量的背景误差,在 GRAPES 全球三维变分同化(3DVar)中,分析变量是流函数、势函数、非平衡的 Exner 气压和比湿(王金成等,2014),并且非常规观测变量与分析变量的关系是非线性的,很难直观比较观测变量的观测误差和系统中的背景误差,给非常规观测的观测误差调谐带来了困难。随机变量扰动方法,即蒙特卡罗方法被广泛应用于数值天气预报领域,如集合预报(Leith, 1974; Toth, et al, 1997)和集合卡曼滤波同化方法(Anderson, et al, 1999)。Anderson 等(2000)提出了一种基于蒙特卡罗技术的控制变量随机扰动技术(Fisher, et al, 1995),将分析变量的背景误差转化为观测变量的背景误差,用于估计变分同化系统中所有相关大气变量和观测变量的背景误差,这里简称为控制变量扰动法。这种方法利用变分同化系统中的观测算子及同化系统中各种平衡关系和变量变换,利用较小的修改工作和较少的计算量便能估计出与系统中使用的背景误差相对应的观测变量背景误差。

背景场检查是变分资料同化系统中一种重要的资料质量控制方法,可以有效剔除和背景场偏离太大的离群资料,避免造成分析场与模式不协调问题,目前已经被广泛应用于各种观测资料的质量控制(Järvinen, et al, 1997; Bouttier, 2001; Cardinali, et al, 2003; Bormann, et al, 2013)。背景场质量控制的基本做法是,某个观测资料,其与背景场的差

(OMB)的绝对值与背景场误差和观测误差之和($\sqrt{\sigma_o^2+\sigma_b^2}$)的比值如果超过给定的阈值,则剔除该资料。故在背景场检查质量控制中需要给定观测变量的背景误差。

GRAPES全球3DVar中同化了大量的卫星观测资料,特别是微波温度计(AMSU-A)资料。GRAPES全球3DVar同化AMSU-A资料采用了简化的背景场检查质量控制方案,其中假设亮温的背景误差和观测误差相同,用观测误差来代替背景误差,这种假设存在明显的问题。这使得在背景误差较大的区域,许多有用的观测数据被剔除了。另外,GRAPES全球3DVar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(王金成等,2014)。

为了深入分析AMSU-A亮温资料在GRAPES全球3DVar中的作用和影响,诊断AMSU-A亮温的观测误差和背景误差的比率与合理性,基于蒙特卡罗技术,推导了GRAPES全球3DVar分析系统中控制变量随机扰动方法的表达式,并采用控制变量随机扰动方法估计了GRAPES全球3DVar的AMSU-A亮温的背景误差,将其应用于AMSU-A亮温资料的背景场检查质量控制方案中,以期提高GRAPES全球3DVar的分析精度和GRAPES全球同化循环系统的预报技巧。

2 GRAPES全球3DVar中控制变量随机扰动方法

GRAPES全球3DVar采用增量分析方案(薛纪善等,2008;庄世宇等,2005),其目标函数表达式为

$$\boldsymbol{J}(\delta\boldsymbol{x})=\frac{1}{2}\delta\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{-1}\delta\boldsymbol{x}+\frac{1}{2}(\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x}+\boldsymbol{d})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}(\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x}+\boldsymbol{d})=\boldsymbol{J}_{\mathrm{b}}(\delta\boldsymbol{x})+\boldsymbol{J}_{\mathrm{o}}(\delta\boldsymbol{x}) \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{B}$是背景误差协方差矩阵,$\boldsymbol{R}$是观测误差协方差矩阵,$\boldsymbol{H}$是观测算子H的切线性算子,$\delta\boldsymbol{x}$为模式变量的分析增量向量

$$\delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_{\mathrm{b}} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{x}$是分析变量向量,$\boldsymbol{x}_{\mathrm{b}}$是背景场向量,设观测数据向量用$\boldsymbol{y}$表示,新息向量$\boldsymbol{d}$

$$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{y}-\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{b}}) \tag{3}$$

在GRAPES变分同化过程中有两类变量:分析变量与经物理变换的控制变量。GRAPES全球3DVar分析系统选用标准化气压π或位温θ,风的纬向分量u,经向分量v以及比湿q作为基本大气状态变量,也就是需要分析的变量,称之为分析变量。由于GRAPES全球3DVar选用增量分析方案,因此定义增量形式的分析变量向量

$$\delta\boldsymbol{x}=(\delta u,\delta v,\delta\pi,\delta q) \tag{4}$$

GRAPES全球3DVar分析系统中,选取物理变换、预条件变换等后的流函数ψ、非平衡的速度势函数χ、非平衡的无量纲气压π_{u}和比湿q作为控制变量,定义为

$$\boldsymbol{w}=(\delta\psi,\delta\chi,\delta\pi_{\mathrm{u}},\delta q) \tag{5}$$

GRAPES全球3DVar的目标函数(式(1))对分析向量$\delta\boldsymbol{x}$的极小化问题被转化为对控制变量$\boldsymbol{w}$的极小化问题进行求解。控制变量$\boldsymbol{w}$与格点空间的模式分析向量$\delta\boldsymbol{x}$的关系可以表达为

$$\delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{w} \tag{6}$$

式中,变量变换算子$\boldsymbol{U}^{-1}$满足

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

在式(6)中,算子$\boldsymbol{U}$代表背景误差协方差$\boldsymbol{B}$的一系列计算,包括物理变换、格谱变换和预条件变换等。利用Fisher等(1995)提出的估计3DVar系统中有效背景误差的方法,根据控制变量的性质

$$\langle\boldsymbol{w}\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\rangle=\boldsymbol{E} \tag{8}$$

其中,$\langle\cdot\rangle$表示期望,$\boldsymbol{E}$是单位矩阵。故

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{E}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{U}\langle\boldsymbol{w}\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\rangle\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

GRAPES全球3DVar中格点空间中有效的背景误差协方差矩阵可以采用下式进行估计

$$\boldsymbol{B}\approx\hat{\boldsymbol{B}}=\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}(\boldsymbol{U}\boldsymbol{\varepsilon}_i)(\boldsymbol{U}\boldsymbol{\varepsilon}_i)^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{\varepsilon}_i$是控制变量空间$\boldsymbol{w}$中的$K$个随机向量,任意随机向量的每个元素都是相互独立的,且满足均值为0且方差为1的高斯分布随机数。此方法估计的背景误差协方差矩阵$\hat{\boldsymbol{B}}$的对角元素即为背景误差方差的重现。

根据式(9)、(10)可得

$$\boldsymbol{H}\boldsymbol{B}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\approx\boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}=\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{U}\boldsymbol{\varepsilon}_i)(\boldsymbol{H}\boldsymbol{U}\boldsymbol{\varepsilon}_i)^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

式(11)可将GRAPES全球3DVar变分同化系统中的背景误差方差投影到观测变量空间,即可以采用蒙特卡罗方法产生若干个均值为0、方差为1

且满足高斯分布的控制变量 $\boldsymbol{w}$ 的样本 $\boldsymbol{\varepsilon}_i$，采用式(11)计算观测变量的背景误差，其中，GRAPES 全球 3DVar 系统中算子 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 均是已经存在的实际算子。对于卫星亮温资料，$\boldsymbol{H}$ 是辐射传输算子的切线性算子，GRAPES 全球 3DVar 采用的是 RTTOV9.0(the Radiative Transfer for TOVS)的切线性模式。这个方法的噪声来源主要是采样，噪声大小由样本数量 K 决定，其噪声的估计标准差为 $1/\sqrt{2K}$(Barlow，1989)。本研究估计使用的样本数量 $K=100$，其噪声大小为 $1/\sqrt{2K}=7\%$。

3 亮温的背景误差估计

采用最新的 GRAPES 全球模式版本，垂直方向有 60 层，水平分辨率是 0.25°×0.25°。3DVar 中采用 NMC 方法估计气候态的背景误差，估计值随纬度和高度变化。

AMSU-A 亮温主要由大气温度廓线决定。在 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中，根据静力平衡关系，温度扰动量与背景标准化气压及其扰动量具有如下关系

$$\delta T=\theta\delta\pi+\frac{c_p\pi\theta^2}{g}\left(\frac{\partial\delta\pi}{\partial z}\right) \tag{12}$$

式中，δT 是温度扰动量，$\delta\pi$ 是标准化气压的扰动量，π 与 θ 是背景标准化气压和位温，z 是高度，c_p 和 g 分别是大气摩尔等压热容和重力加速度。另外，在 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中，标准化气压扰动量被分解为与流函数扰动量的平衡部分和不平衡部分

$$\delta\pi=N\delta\psi+\delta\pi_u \tag{13}$$

式中，$\delta\psi$ 是流函数扰动量，$\delta\pi_u$ 是非平衡的标准化气压扰动量，N 是流函数扰动量与标准化气压的平衡关系算子(地转平衡)。

式(12)、(13)表明 AMSU-A 亮温的背景误差主要由流函数和非平衡标准化气压的背景误差决定。图 1a、b 分别是独立状态变量流函数 ψ 和非平衡的标准化气压 π_u 的背景误差。从图 1b 可以看

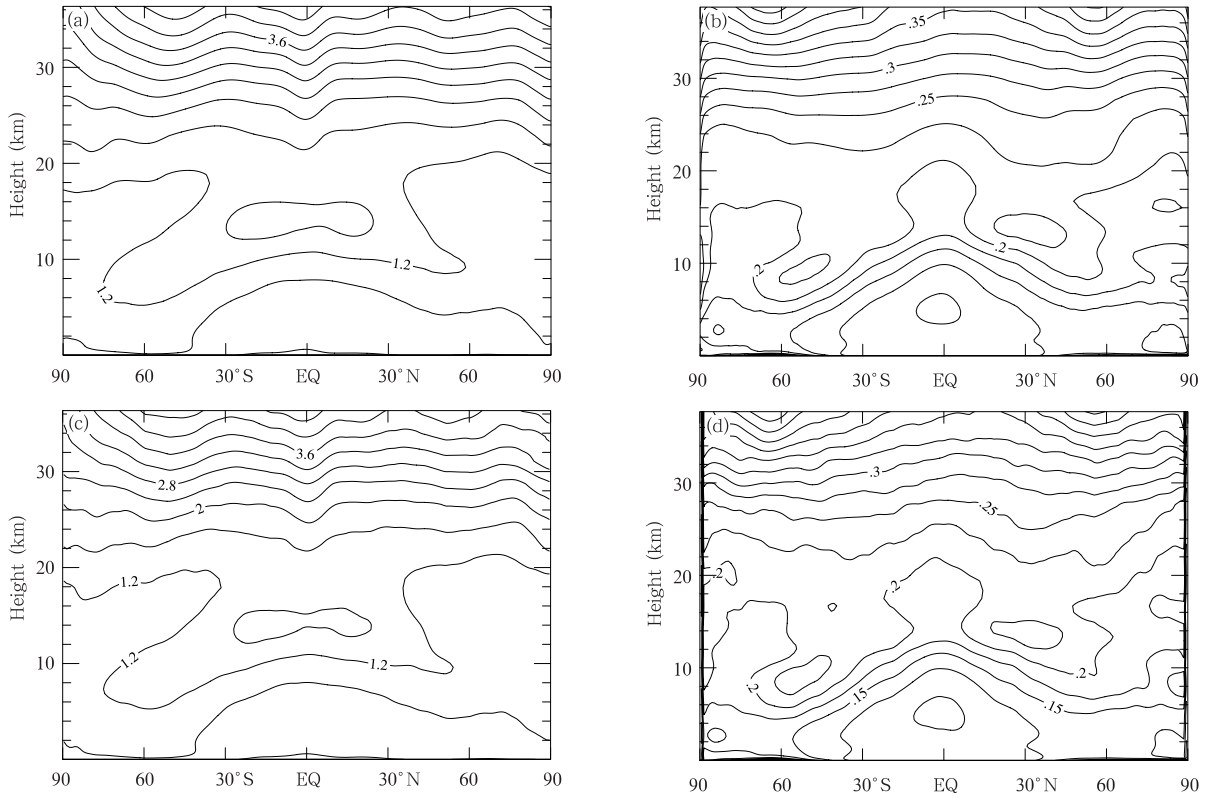


图 1 GRAPES 全球 3DVar 中采用的(a、b)背景误差均方根和控制变量扰动方法再现的(c、d)背景误差均方根

(a、c. 流函数 ψ，单位：10^6 m/s^2；b、d. 非平衡的标准化气压 π_u，单位：10^{-3})

Fig. 1 (a, b) Background error standard deviation used in GRAPES 3DVar, and (c, d) re-calculated background error standard deviation by control variable randomization method

(a, c. stream function ψ, unit: 10^6 m/s^2; b, d. unbalanced Exner pressure π_u, unit: 10^{-3})

出,对于非平衡的标准化气压的背景误差在热带地区上空约 5 km 高度存在极小值中心,在南北纬 60°上空的 10 km 高度附近存在极大值中心,其分布型与热力对流层顶的分布类似;总体上讲,非平衡的标准化气压的背景误差随着高度的升高而增大;在 20 km以下的对流层,非平衡的标准化气压背景误差随纬度变化非常明显,20 km 以上随纬度变化较小。从图 1a 可以看出,流函数的背景误差具有明显的随高度变化规律,流函数的背景误差随着高度的升高而增大,但在热带地区的对流层顶附近(14 km)存在极小值中心;在 20 km 以下的对流层和平流层低层,流函数背景误差具有显著的随纬度变化特征,但 20 km 以上随纬度变化较小。图 1b 表明,势函数的背景误差总体上也是随着高度升高而增大,并且具有显著的随纬度变化规律,在南北极的 20 km 高度附近存在极小值中心。

图 1c、d 是采用控制变量扰动法估计的 GRAPES 全球 3DVar 中流函数和非平衡标准化气压的背景误差,对比图 1a、b,控制变量扰动法计算的流函数与非平衡标准化气压的背景误差与 GRAPES 全球 3DVar 中给定的背景误差几乎完全一致,表明 GRAPES 全球 3DVar 的控制变量扰动方法的正确性。

根据 AMSU-A 的权重函数(图 2,Zhu, et al, 2002),AMSU-A 通道 1—3、15 是近地面通道,4—14 是大气探测通道。GRAPES 全球 3DVar 中同化了 AMSU-A 的 5—11 通道,均为大气探测通道,其权重函数峰值所在的高度分别约为 5.1、8.4、11.5、13.3、17.5、21.2 和 25.7 km。因此,通道 5 主要探测的是对流层中低层,通道 6—7 主要探测的是对流层中高层,通道 8 主要探测的是对流层高层和平流层低层,通道 9—11 主要探测的是平流层中低层。

图 2 是采用控制变量扰动方法估计的 Metop-A 卫星搭载的 AMSU-A 亮温的背景误差的水平分布,图 2a—g 分别对应通道 5—11。可以看出,5—11 通道亮温的背景误差具有显著的随纬度变化特征,赤道地区最小,中高纬度地区最大,而在两极地区略有减小;从图 2a—f 中可以发现,南半球的通道 5—10 亮温背景误差比北半球大,通道 11 相反;对比图 2a—f,不同通道亮温的背景误差有较大差异,并且随着通道号的增大而增大。总之,亮温背景误差随纬度和通道具有显著变化,这与控制变量的背景误差随纬度和高度具有显著变化的特征一致。图 1 表明,GRAPES 全球 3DVar 中控制变量的背景误差仅随纬度和高度变化,因此从理论上讲,AMSU-A 亮温的背景误差应该仅随纬度和通道变化。从图 2 中不难发现,亮温的背景误差随经度也有一定波动,特别是在南、北半球高纬度地区。经过分析,造成 AMSU-A 亮温的背景误差随经度波动的可能原因有 3 个:大地形的原因、随机扰动的取样噪声和亮温模拟的非线性。从图 2 中可以看出,通道 5—6 有部分的权重函数位于大地形之下,因此地表辐射率的误差会造成很大的亮温模拟噪声,图 2a 中青藏高原地区(25°—40°N,70°—105°E),图 2a、b 的南极部分地区(70°—90°S,0°—140°E)。从图 2 中可以发现,各通道亮温的背景误差在赤道地区随经度有较小的变化,这可能是由于取样噪声引起的。各通道亮温的背景误差在中高纬度地区随经度变化较赤道地区要明显,这主要是由亮温与大气温度廓线的非线性关系造成的。由于非线性关系的存在,在对观测算子做线性化时需要使用背景温度作为基态,基态在同一纬度上的变化会反映到模拟得到的亮温的背景误差中。在中高纬度地区,同一纬度带上槽脊交替分布,温度变化显著大于热带地区,因而模拟得到的亮温的背景误差随经度的变化也更加明显。

图 2 和图 3 均表明,GRAPES 全球 3DVar 中 AMSU-A 通道 5—11 亮温的背景误差在赤道地区都相对较小,最小约 0.1 K。造成赤道地区亮温的背景误差较小的可能原因有 3 个方面:(1)GRAPES 全球 3DVar 中,22 km 以下流函数,非平衡标准化气压的背景误差本身较小(图 1),并且在赤道地区,地转平衡关系不再适用,与流函数平衡的标准化气压很小,因此造成了赤道地区温度(图略)的背景误差较小,也就使得亮温的背景误差较小;(2)由于热带地区温度本身的变化率较小,GRAPES 温度的背景误差本身就会较小;(3)NMC 方法估计的背景误差在观测较少地区(如赤道地区和南北极地区)偏小(龚建东等,2006a)。

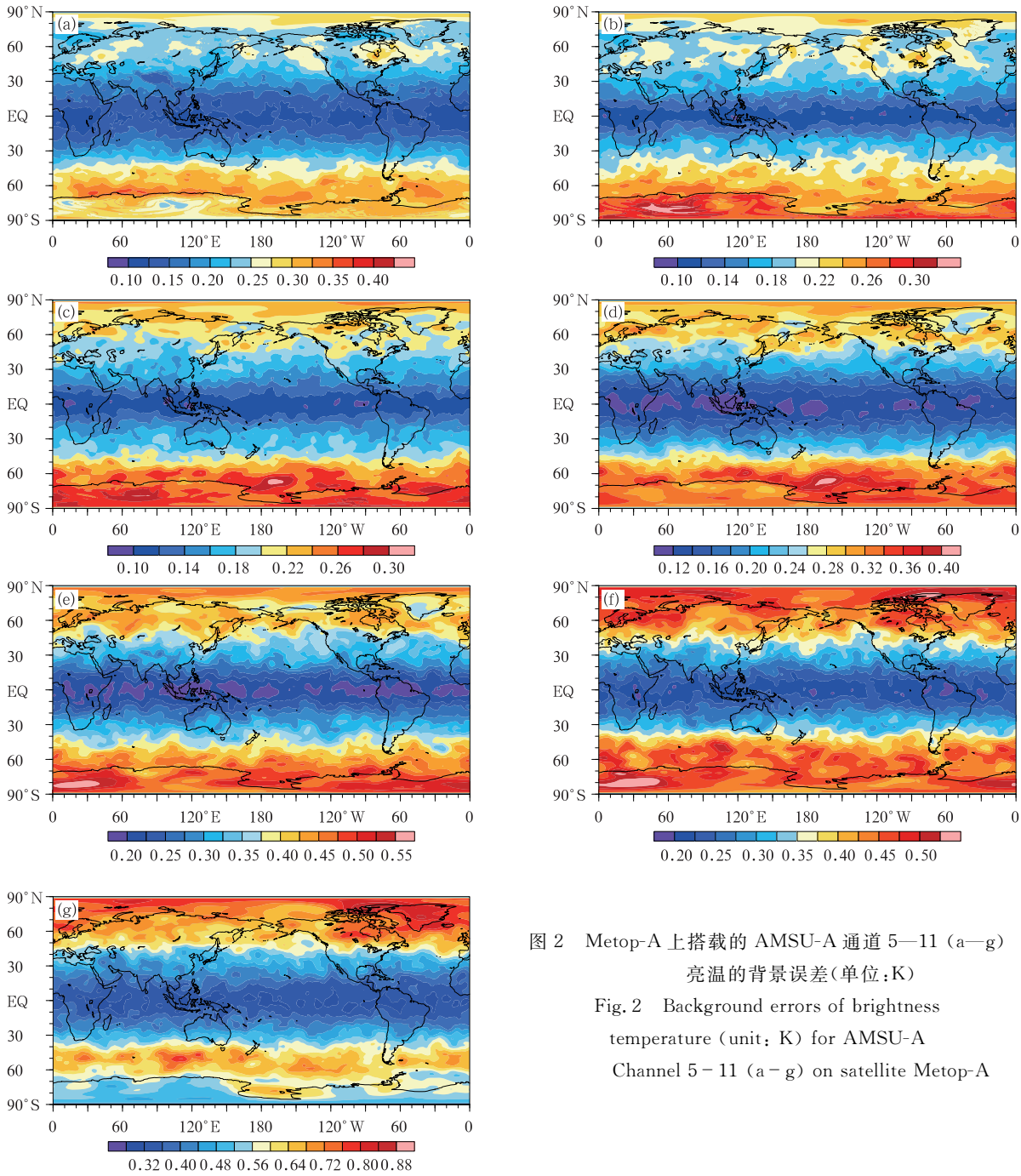


图 2 Metop-A 上搭载的 AMSU-A 通道 5—11 (a—g) 亮温的背景误差(单位:K)

Fig. 2 Background errors of brightness temperature (unit: K) for AMSU-A Channel 5 - 11 (a - g) on satellite Metop-A

4 亮温的背景误差在 GRAPES 全球 3DVar 质量控制中的应用

4.1 背景场检查

根据变分同化理论(Lorenc, 1986),新息增量 O-B 应服从标准正态分布,则其概率密度可以表示为

$$p(d)=\frac{1}{\sqrt{2\Pi}}\exp\left[-\frac{d^2}{\sigma_d^2}\right] \tag{14}$$

式中,$d=[y-H(x_b)]$称为新息增量,此处为式(3)的变量形式,一般也称为 OMB ,y 是观测变量,此处代表亮温观测;x_b 是分析变量的背景值;H 是观测算子,Π 是圆周率,σ_d 是 d 的标准差。式(14)给出了 OMB 出现的概率密度,在背景场检查中,一般

设定 d 发生概率小于某个值时被定义为有问题数据。按照理论公式,新息增量的方差等于观测误差方差和背景误差方差之和

$$\sigma_d^2 = \sigma_o^2 + \sigma_b^2 \tag{15}$$

式中,σ_o 是观测误差,即亮温的观测误差;σ_b 是观测变量的背景误差,即亮温的背景误差。因此背景场检查是变分资料同化中资料质量控制的重要步骤,常规的背景场检查(Järvinen, et al,1997; Cardinali, et al, 2003)是将满足如下标准的观测剔除

$$[y - H(x_b)]^2 \geqslant \alpha(\sigma_o^2 + \sigma_b^2) \tag{16}$$

式中,α 为阈值参数。根据式(14)—(16),背景误差在背景场检查中保证了背景场检查后的观测资料满足方差为新息增量方差的高斯分布。

4.2 GRAPES 全球 3DVar 中背景场检查方案

GRAPES 全球 3DVar 中,同化 AMSU-A 亮温资料也采用了如上的背景场检查方案,但由于没有提出和建立估计 GRAPES 全球 3DVar 亮温等非常规观测变量的背景误差的方法,使得估计亮温等非常规观测变量背景误差存在一定困难,故对上述方案进行了近似简化,即假设亮温的背景场误差和观测误差相同,背景场检查简化为如下形式

$$[y - H(x_b)]^2 \geqslant \beta\sigma_d^2 \tag{17}$$

GRAPES 全球 3DVar 中设置了严格的阈值参数 $\beta=4$。由于式(17)中采用观测误差近似背景误差,其实质是忽略了背景误差随高度、纬度和时间的变化等重要特征,存在两个方面的问题:(1)标准偏小,大量好观测被剔除(按照高斯分布的概率密度函数,约 32%的观测资料会被剔除),这在观测资料短缺的南半球相当可观;(2)由于背景误差随纬度和高度等有显著变化,而观测误差一般不随高度和纬度而变化,通过式(17)质量控制后的观测资料不再满足方差为 σ_d^2 的高斯分布。因此,本研究提出的估计非常规观测变量的背景误差的控制变量随机扰动方法解决了 GRAPES 全球 3DVar 资料的质量控制中的上述不足,对亮温等非常规观测资料的同化应用效果的改进具有重要作用。

表 1 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中使用的 AMSU-A 通道 5—11 亮温的观测误差
Table 1 Observational errors of brightness temperature for AMSU-A in GRAPES 3DVar system

通道	5	6	7	8	9	10	11
观测误差 (K)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.4	0.4	0.5

表 1 是 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中使用的亮温的观测误差,亮温的观测误差仅随通道变化。对比表 1 和图 2 可以看出,GRAPES 全球 3DVar 中亮温的背景误差只有在南北半球 30°附近与观测误差相近,赤道地区的背景误差明显小于观测误差,而南北半球中高纬度的背景误差明显大于观测误差。因此观测误差与背景误差相等的假设在大部分地区不成立。采用式(17)作为背景场检查标准造成的结果是在 GRAPES 全球 3DVar 旧的背景场检查中,大量的 AMSU-A 好资料被剔除,特别是在南半球中高纬度地区。而南半球中高纬度地区几乎没有常规观测资料,AMSU-A 亮温资料是南半球最重要的观测资料,对南半球的分析和预报起着决定作用。GRAPES 全球同化循环系统在 5 月和 9 月的季节转换期间容易出现积分溢出的情况,这给 GRAPES 全球模式业务化带来巨大挑战。经过分析,5 月和 9 月是南半球的季节转换期,GRAPES 模式预报误差增大,也即 3DVar 同化分析中背景场的误差会较大,这就使新息增量 O-B 的值较大,而 3DVar 中 AMSU-A 亮温的背景场检查采用的式(17),造成 AMSU-A 资料的大部分都被剔除了,导致同化循环系统南半球的误差会越来越大,最终导致模式积分溢出。因此,为了提高 GRAPES 全球 3DVar 中 AMSU-A 资料的使用率和同化效果,特别是在背景误差较大的南半球地区,减小南半球的分析误差和减少 GRAPES 全球同化循环系统的溢出,迫切需要改进 GRAPES 全球 3DVar 中 AMSU-A 亮温资料的背景场检查。

4.3 背景场检查方案的改进

GRAPES 全球 3DVar 中,同化的卫星亮温资料有 NOAA-15、16、18、19、Metop-A、B 的 AMSU-A 资料,同化的通道是 5—11,其中通道 5—6 仅同化海洋上空的资料,而通道 7—11 同化全球资料,并且 5—7 通道仅同化晴空区的资料。

GRAPES 全球 3DVar 中采用的背景误差仅随高度和纬度变化;另外,从图 2 可以看出,采用控制变量扰动方法估计的亮温背景误差随经度变化远小于随纬度变化,可以忽略。因此,在 AMSU-A 亮温

的背景场检查中采用随纬度和通道变化的亮温背景误差能够保证与独立状态变量的背景误差一致。即式(17)中,亮温背景误差 σ_b 可以表达为如下形式

$$\sigma_b = \sigma_b(c,\varphi) \tag{18}$$

式中,c 是卫星通道号,φ 是纬度。

将图 2 中估计的 AMSU-A 亮温背景误差进行经向平均,为了降低由于取样产生的小尺度噪声,在纬向方向进行 5 点滑动平均(图 3)。从图 3 可以看出,AMSU-A 通道 5—11 亮温背景误差具有显著的随纬度变化特征,中高纬度值最大,而赤道地区值最小,最大值是最小值的 3—4 倍;AMSU-A 不同通道的亮温背景误差也显著不同,随着通道号的增大而增大,特别是通道 8—11,而通道 5—7 的背景误差差别较小,综合分析图 1 和图 3 发现,亮温背景误差随通道的变化规律与独立状态变量随高度的变化规律一致,如通道 5—7 主要探测的是 12 km 以下的对流层通道,而独立状态变量的背景误差在对流层内随高度变化较小(图 1),故通道 5—7 的亮温背景误差差别也很小(图 3),再次表明控制变量扰动方法估计的亮温背景误差的正确性与合理性。

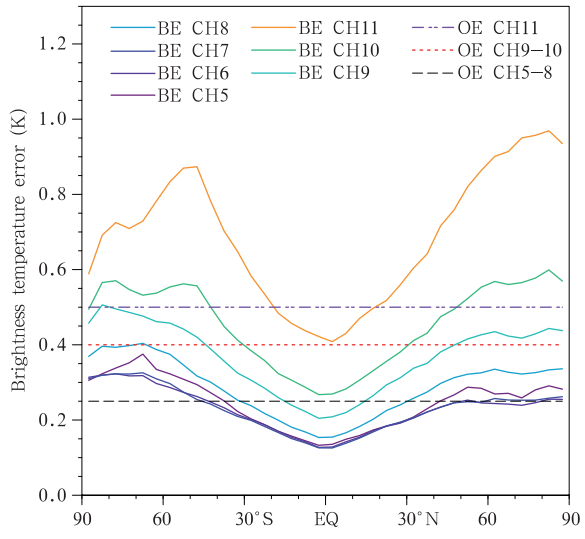


图 3 经向平均的 AMSU-A 亮温背景误差(实线)和观测误差(虚线)(其中 BE 代表背景误差,OE 代表观测误差;CH 代表通道)

Fig. 3 Zonalmean background errors (solid line) and observational errors (dashed line) for brightness temperature of AMSU-A Channel 5 – 11 (BE represents background error and OE represents observation error; CH represents channel)

从图 3 中还可以发现,通道 5—7 亮温的背景误差在 45°N 以北与观测误差相当,而在 45°S 以南地区比观测误差大,在 45°S—45°N 比观测误差小;通道 8 的亮温背景误差在 30°S—30°N 比观测误差小,在南北半球中高纬度地区比观测误差大;通道 9 的亮温背景误差在 45°S—45°N 比观测误差小,在南北半球中高纬度地区比观测误差大;通道 10 的亮温背景误差在 30°S—30°N 比观测误差小,而在其他的南北半球中高纬度地区比观测误差大;通道 11 的亮温的背景误差在 20°S—20°N 的热带地区比观测误差略小,其他区域均大于观测误差,特别是南、北极地区。

将图 3 计算的随纬度变化的背景误差应用于 GRAPES 全球 3DVar 亮温同化中的背景场检查质量控制,即将式(18)代入式(16)。图 4 是新的背景场检查标准与旧的背景场检查标准的比值,即 $\sqrt{(\sigma_o^2+\sigma_b^2)/\sigma_o^2}$。在 GRAPES 全球 3DVar 中,新的背景场检查阈值 $\alpha=4$,与旧阈值相同,在 O-B 满足高斯分布情况下,大约有 5%的资料被剔除。从图 4 可以发现,新的标准是旧标准的 1.1—2.0 倍,采用新的背景场检查标准将大大提高亮温资料的使用率。

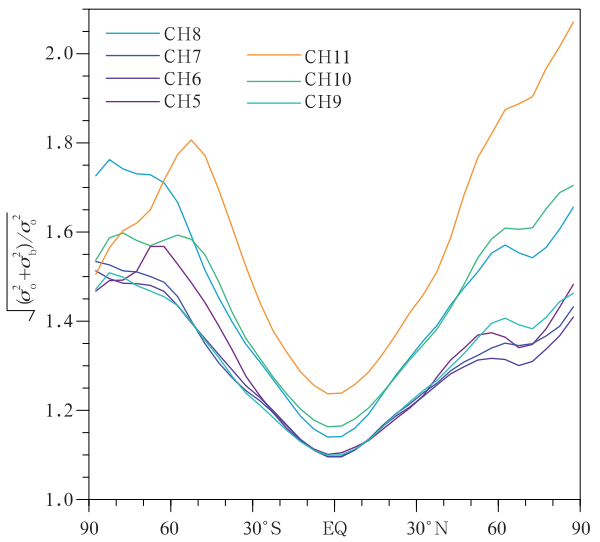


图 4 亮温新的背景场检查标准与旧标准的比值 $\sqrt{(\sigma_o^2+\sigma_b^2)/\sigma_o^2}$

Fig. 4 The ratio of $\sqrt{(\sigma_o^2+\sigma_b^2)}$ and σ_o

4.4 批量试验及结果分析

GRAPES 全球 3DVar 同化系统中同化的观测资料包括探空、地面报、船舶报和飞机报等常规观测,GNSS/RO(Global Navigation Satellite System

Radio Occultation)折射率,云导风和 NOAA-15、16、18、19,Metop-A、B 卫星的 AMSU-A 亮温等非常规观测。为了检验新的背景场检查标准的合理性和对同化预报的影响,设计了两组试验。两组试验均同化上述所有观测资料:(1) Ctrl 试验:AMSU-A 亮温资料同化中采用式(17)的背景场检查方案;(2)AMAQC 试验:AMSU-A 亮温资料同化中采用式(16)的背景场检查方案,其中亮温背景误差使用控制变量随机扰动方法估计的结果(图 3)。

两组试验均从 2013 年 5 月 1 日 06 时开始进行同化循环预报,历时两个月。图 5 是两组试验逐日同化的 AMSU-A 亮温资料在不同区域的资料数目(通道 6、7、9 的结果与通道 5、8 相似,通道 10 的结果与通道 11 相似,图略)。从图 5 可以看出,相比 Ctrl 试验,AMAQC 试验同化的亮温资料数量在不同的区域和通道均有不同程度的增多。图 5a、b 表明 AMAQC 试验同化的通道 5—8 亮温资料数量在南半球增加较多,其次为北半球,最后为热带地区;图 5c 表明 AMAQC 试验同化的通道 10、11 的亮温资料数量在北半球增加较多,其次是南半球,热带地区增加较少;同化资料的增加率与图 4 中两组试验采用的背景场检查标准差别相对应。AMAQC 试验相比 Ctrl 试验,同化的通道 11 亮温资料的数量增加量最多,其次是通道8,通道9的亮温资料数量

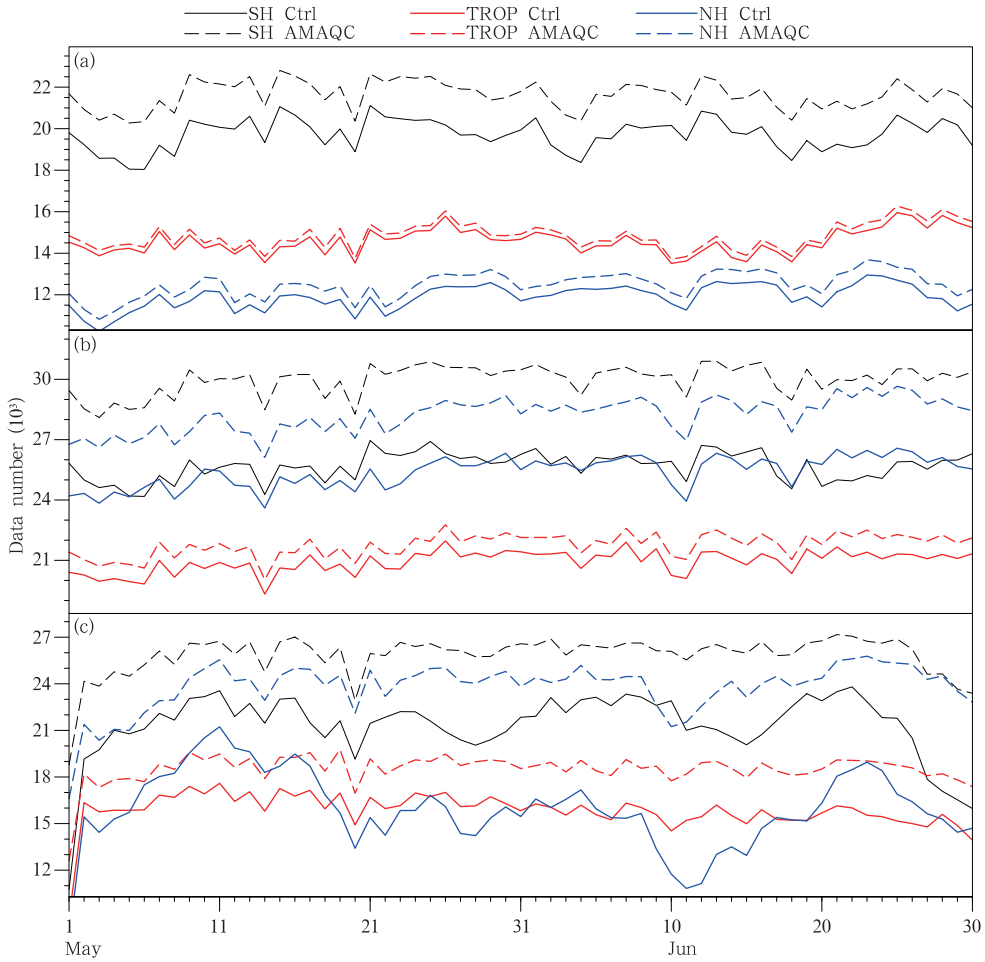


图 5 2013 年 5 月 1 日—6 月 30 日 Ctrl(实线)和 AMAQC(虚线)试验逐日同化使用的 AMSU-A 亮温资料数量

(a. 通道 5, b. 通道 8, c. 通道 11;NH 表示北半球,SH 表示南半球,TROP 表示热带地区)

Fig. 5 Data counts of brightness temperature from AMSU-A Channels 5 – 11 assimilated per day in Experiments Ctrl (solid line) and AMAQC (dashed line) during 1 May 2013 and 30 June 2013

(a. Channels 5, b. Channels 8, c. Channels 11; NH represents the northern hemisphere, SH represents the southern hemisphere, TROP represents tropical)

增加的最少。表 2 给出了两组试验中同化的 AMSU-A 通道 5—11 亮温数量差(AMAQC－Ctrl)以及新背景场检查 AMAQC 试验同化亮温资料的增加率。表 2 表明，AMAQC 试验同化的通道 11 亮温资料数量在南半球增加了 21.15%，北半球增加了 48.94%，热带地区增加了 16.68%；同化的通道 9 亮温资料数量在南半球仅仅增加了 1.15%，热带地区增加了 0.22%，北半球增加了 0.31%。图 5 和表 2 均表明，采用新的背景场检查标准显著增加了 AMSU-A 亮温资料的同化数量，特别是在南半球和北半球，同化的亮温资料总量增长了约 10%。

图6a是控制试验不同层次和预报时效的全球

表 2 两组试验中同化的 AMSU-A 通道 5—11 亮温数量差(AMAQC－Ctrl)以及新背景场检查试验 AMAQC 同化亮温资料的增加率

Table 2 Amount and ratio of data increases of AMSU-A brightness temperature assimilated by GRAPES 3DVar in Experiment AMAQC compared to that in Experiment Ctrl

通道号	区域	5	6	7	8	9	10	11
两组试验同化的亮温数据数量差(AMAQC－Ctrl)	南半球	115226	44835	81789	261341	22920	56897	274394
	热带	16012	5373	11297	50575	3386	13636	160994
	北半球	35799	11976	27416	172026	5787	61214	475401
AMAQC 同化资料数量的增加率(%)	南半球	9.62	3.42	7.45	16.75	1.15	2.91	21.15
	热带	1.80	0.59	1.44	3.97	0.22	0.92	16.68
	北半球	4.95	1.57	3.50	11.14	0.31	3.35	48.94

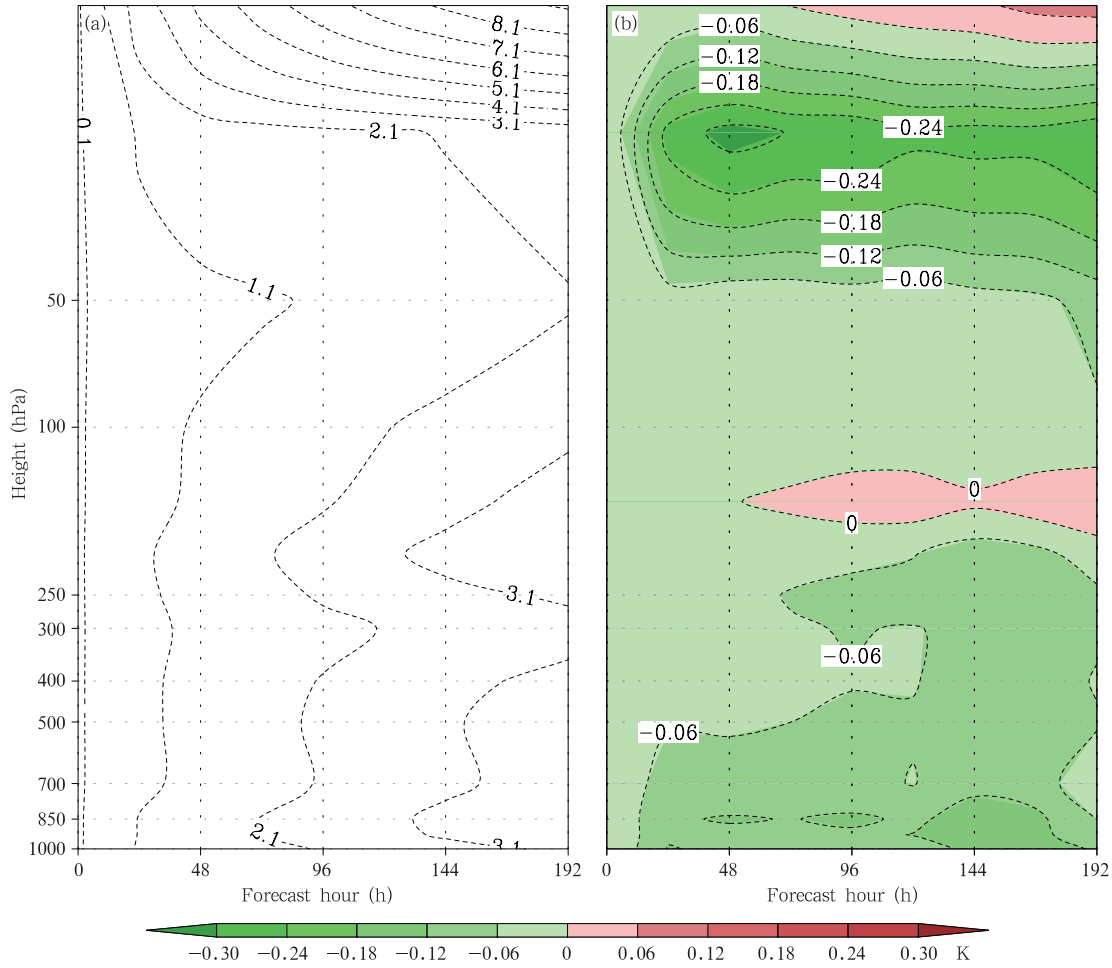


图 6 Ctrl 试验的全球温度预报误差(a)和 AMAQC 试验预报误差与 Ctrl 试验预报误差的差值(b)

Fig. 6 (a) Global temperature forecast error in Experiment Ctrl, (b) the difference in temperature forecast errors between the two experiments AMAQC and Ctrl

平均的温度预报误差,图 6b 是两组试验全球温度预报误差的差值(AMAQC - Ctrl)。从图 6b 可以看出,除在 150 hPa 附近预报时效 48 h 以后以及平流层 10 hPa 附近预报误差略有增大外,AMAQC 试验温度的预报误差在所有层次和预报时效均有明显减小。特别是在对流层中低层(对应通道 5—7)和平流层中低层区域(对应通道 9—11)。经过计算,预报误差的减小率(图略)最大可达 20%,平均达到约 2%。高度场与风场的结果与温度场非常相似(图略)。这表明新的质量控制方案显著减小了分析和预报误差。

图 7a、b分别是南、北半球500hPa平均位势

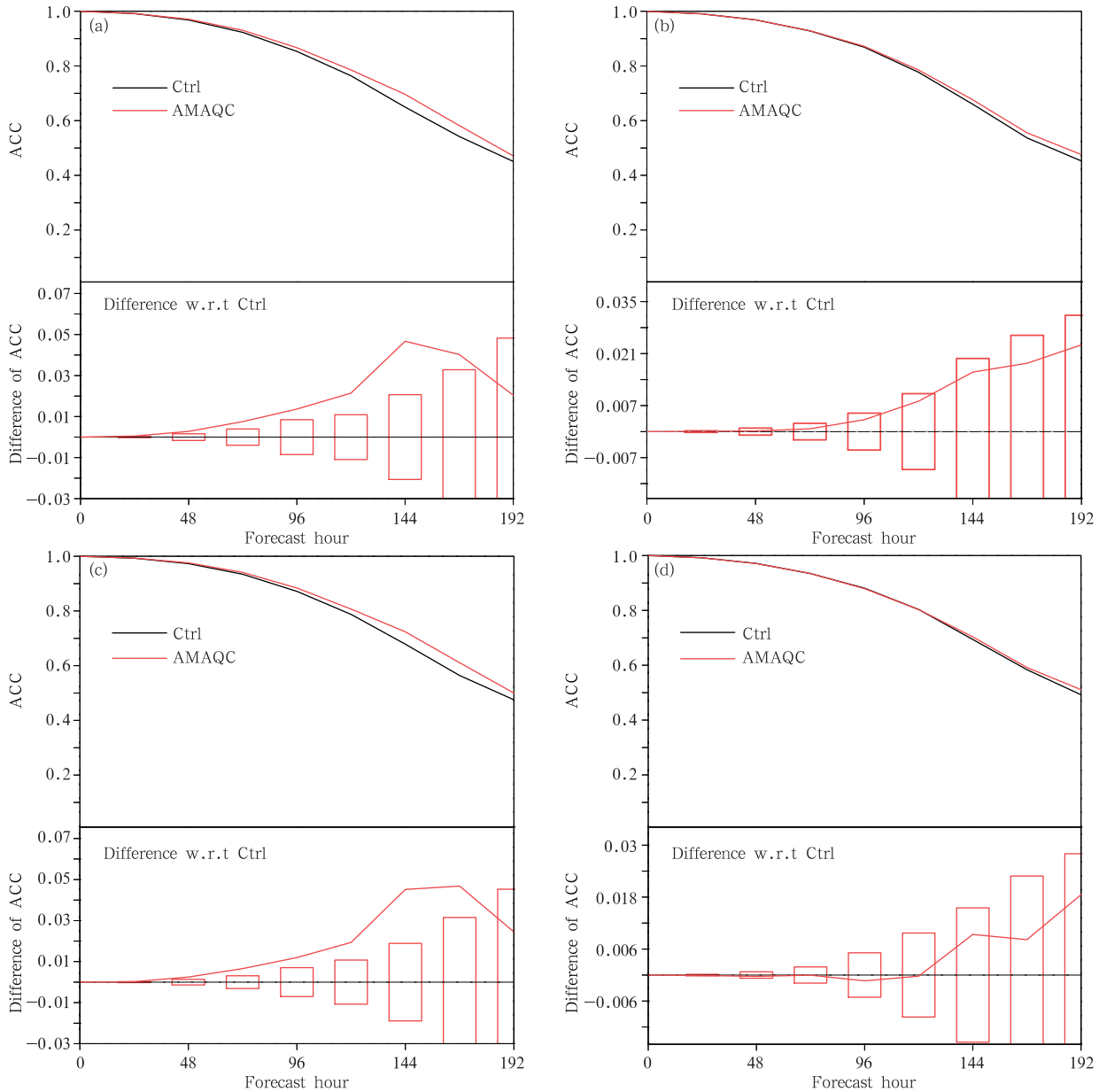


图 7 Ctrl 试验(黑线)与 AMAQC 试验(红线)2 个月(2013 年 5 月 1 日 06 时—6 月 30 日 18 时)平均的位势高度预报场的距平相关系数(a、c. 南半球(20°—90°N),b、d. 北半球(90°—20°S),a、b. 500 hPa,c、d. 250 hPa;图的下半部表示 AMAQC 试验的距平相关系数相对 Ctrl 试验的差值,正值表示预报结果有改进,超出方框区表示超过 95%置信度的统计检验)

Fig. 7 Averaged anomaly correlation score of geopotential height for Experiment Ctrl (black) and AMAQC (red) over (a), (c) the southern hemisphere and (b), (d) the northern hemisphere at (a), (b) 500 hPa and (c), (d) 250 hPa during the period from 06:00 UTC 1 May 2013 to 18:00 UTC 30 June 2013 (Bottom panels show differences with AMAQC respect to Ctrl, with positive values indicating an improvement. Bars show limits of statistical significance at the 95% confidence level; values above bars are statistically significant)

高度预报场的距平相关系数(ACC),从图 7a 可以看出,AMAQC 试验 500 hPa 平均高度预报场的距平相关系数都增大了,特别是南半球,所有预报时效的距平相关系数增长量均超过了 95%的信度检验,南半球的预报时效延长近 0.2 d。因此,相比原背景场检查标准,新背景场检查标准的使用提高了南、北半球 500 hPa 位势高度预报场的预报技巧,特别是显著提高了南半球 500 hPa 位势高度的预报技巧。图 7c、d 分别是南、北半球 250 hPa 平均位势高度预报场的距平相关系数,结论与图 7a、b 相同,即相比原背景场检查标准,新背景场检查标准的使用提高了南、北半球 250 hPa 位势高度预报场的预报技巧,特别是显著提高了南半球 250 hPa 位势高度的预报技巧,南半球的预报时效延长了约 0.2 d。总体上讲,新背景场检查标准提高了 GRAPES 全球变分同化系统的预报技巧,特别是显著提高了南半球 500 和 250 hPa 的预报技巧,其原因是新的背景场检查标准使得 GRAPES 全球 3DVar 同化的 AMSU-A 资料显著增多,特别是在南半球(图 5)。

5 总结和讨论

在 GRAPES 全球 3DVar 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,为分析和改进 GRAPES 全球 3DVar 提供了一个有力工具。用此方法估计了 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中 AMSU-A 亮温的背景误差,分析了 AMSU-A 亮温的背景误差随通道和纬度的变化特征,通过与 AMSU-A 亮温观测误差的比较,发现南、北半球中高纬度地区亮温的背景误差大于观测误差,而在热带地区则小于观测误差,这表明 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中,南、北半球中高纬度地区亮温观测的权重大于背景场的权重,热带地区反之。将估计的 AMSU-A 亮温的背景误差应用于亮温资料的背景场检查质量控制中,2 个月的批量试验结果表明,其显著提高了同化的 AMSU-A 亮温资料数量,特别是在南半球;从而提高了温度和高度等变量的分析和预报误差,同时提高了 GRAPES 全球模式 500 和 250 hPa 位势高度场的预报技巧,特别是显著提高了南半球的预报技巧,南半球预报时效提高了约 0.2 d。

本研究为未来采用随流型变化的背景误差的集合与变分混合的同化系统中背景场检查质量控制奠定了基础,但仅估计了 AMSU-A 亮温的背景误差,为了更深入的分析 GRAPES 全球 3DVar 同化系统,随后将采用控制变量随机扰动方法估计 GNSS/RO 掩星折射率的背景误差,以及其他同化的所有观测变量的背景误差,以期进一步认识每种观测资料在同化系统中的相对背景场的权重以及对分析场的影响大小,并发现和改进 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中可能存在的问题,改进 GRAPES 全球 3DVar 同化系统中背景场检查质量控制方案,进而提高 GRAPES 全球预报系统的预报技巧。

参考文献

龚建东,魏丽,陶士伟等. 2006a. 全球资料同化中误差协方差三维结构的准确估计与应用Ⅰ:观测空间协方差的准确估计. 气象学报,64(6):669-683, doi: 10.11676/qxxb2006.065. Gong J D, Wei L, Tao S W, et al. 2006a. Accurate estimation and application of 3-D error covariance structure in global data assimilation. Part Ⅰ: Accurate estimation of error covariance in observation space. Acta Meteor Sinica, 64(6): 669-683, doi: 10.11676/qxxb2006.065 (in Chinese)

龚建东,赵刚. 2006b. 全球资料同化中误差协方差三维结构的准确估计与应用Ⅱ:背景误差协方差调整与数值试验分析. 气象学报,64(6):684-698, doi: 10.11676/qxxb2006.066. Gong J D, Zhao G. 2006b. Accurate estimation and application of 3-D error covariance structures in global data assimilation. Part Ⅱ: Background error covariance structure adjustment and numerical experiments. Acta Meteor Sinica, 64(6): 684-698, doi: 10.11676/qxxb2006.066 (in Chinese)

王金成,庄照荣,韩威等. 2014. 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,72(1): 62-78, doi: 10.11676/qxxb2015.005. Wang J C, Zhuang Z R, Han W, et al. 2014. An improved background error covariance in the global GRAPES variational data assimilation and its impact on the analysis and prediction: Statistics of the three-dimensional structure of background error covariance. Acta Meteor Sinica, 72(1): 62-78, doi: 10.11676/qxxb2015.005 (in Chinese)

薛纪善,陈德辉. 2008. 数值天气预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京:科学出版社,1-61. Xue J S, Chen D H. 2008. Scientific Design and Application of Numerical Prediction System GRAPES. Beijing: Science Press, 1-61 (in Chinese)

庄世宇,薛纪善,朱国富等. 2005. 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,29(6): 872-884. Zhuang S Y, Xue J S, Zhu G F, et al. 2005. GRAPES Global 3D-Var system: Basic design and ideal experiments. Chinese J Atmos Sci, 29(6): 872-884 (in Chinese)

Anderson E, Pailleux J, Thépaut J N, et al. 1994. Use of cloud-cleared radiances in three/four-dimensional variational data as-

similation. Quart J Roy Meteor Soc, 120(517): 627-653

Anderson E, Fisher M, Munro R, et al. 2000. Diagnosis of background errors for radiances and other observable quantities in a variational data assimilation scheme, and the explanation of a case of poor convergence. Quart J Roy Meteor Soc, 126(565): 1455-1472

Anderson J L, Anderson S L. 1999. A Monte Carlo implementation of the nonlinear filtering problem to produce ensemble assimilations and forecasts. Mon Wea Rev, 127(12):2714-2758

Barlow R J. 1989. Statistics: A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences. New York: John Wiley and Sons Ltd, 78pp

Bormann N, Fouilloux A, Bell W. 2013. Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system. J Geophys Res, 118 (23): 12970-12980, doi: 10.1002/2013JD020325

Bouttier F. 2001. The use of profiler data at ECMWF. Meteor Zeitschr, 10(6):497-510

Cardinali C, Isaksen L, Andersson E. 2003. Use and impact of automated aircraft data in a Global 4DVAR data assimilation system. Mon Wea Rev, 131(8): 1865-1877, doi: 10.1175//2569.1

Daley R. 1991. Atmospheric Data Analysis: Cambridge Atmospheric and Space Sciences Series. Cambridge: Cambridge University Press

Fisher M, Courtier P. 1995. Estimating the Covariance Matrices of Analysis and Forecast Error in Variational Data Assimilation. ECMWF Technical Memorandum 220, Reading, Berkshire, UK:ECMWF

Hollingsworth A, Lönnberg P. 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part I: The wind field. Tellus A, 38A(2): 111-136

Järvinen H, Undén P. 1997. Observation Screening and Background Quality Control in the ECMWF 3DVar Data Assimilation System. ECMWF Research Department Technical Memorandum no. 236, Shinfield Park, Reading, UK: ECMWF

Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. Mon Wea Rev, 102(6): 409-418

Lorenc A C. 1986. Analysis methods for numerical weather prediction. Quart J Roy Meteor Soc, 112(474): 1177-1194

McNally A P, Derber J C, Wu W, et al. 2000. The use of TOVS level-1B radiances in the NCEP SSI analysis system. Quart J Roy Meteor Soc, 126(563): 689-724

Rabier F, McNally A, Anderson E, et al. 1998. The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). II: Structure functions. Quart J Roy Meteor Soc, 124 (550):1809-1829

Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP: the breeding method. Mon Wea Rev, 125(12):3297-3318

Wu W S, Rurser R J, Parrish D F. 2002. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. Mon Wea Rev, 130(12): 2905-2916

Xu Q, Wei L, Van Tuyl A, et al. 2001. Estimation of three-dimensional error covariances. Part I: Analysis of height innovation vectors. Mon Wea Rev, 129(8):2126-2135

Zhu T, Zhang D L, Weng F Z. 2002. Impact of the advanced microwave sounding unit measurements on hurricane prediction. Mon Wea Rev, 130(10):2416-2432