

线性化物理过程对 GRAPES 4DVAR 同化的影响^{*}

刘永柱 龚建东 张林 陈起英

LIU Yongzhu GONG Jiandong ZHANG Lin CHEN Qiyong

中国气象局数值预报中心/国家气象中心,北京,100081

Numerical Weather Prediction Center of CMA, National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2018-05-02 收稿,2018-07-17 改回.

刘永柱,龚建东,张林,陈起英. 2019. 线性化物理过程对 GRAPES 4DVAR 同化的影响. 气象学报, 77(2):196-209

Liu Yongzhu, Gong Jiandong, Zhang Lin, Chen Qiyong. 2019. Influence of linearized physical processes on the GRAPES 4DVAR. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(2):196-209

Abstract The linearized physical processes can improve the convergence stability of the four-dimensional variational assimilation (4DVAR) minimization, and increase the significant description of the atmospheric physical processes and dynamics during the minimization. It is a very important component of the 4DVAR. In order to improve the analysis and forecast effect of GRAPES global 4DVAR, a set of linearized physical parameterizations have been developed for the GRAPES global model to improve the accuracy of the tangent linear model (TLM), especially the two moist linearized physical parameterizations. The development of the linearized physical parameterizations requires the simplification of those strong nonlinear terms in the nonlinear physical parameterizations and the regulation of the linearized physical parameterizations, and reduces the abnormal growth of the tangent linear perturbation. At present, the following linearized physical processes are described in GRAEPS global model: Subgrid-scale orographic effect, vertical diffusion, deep cumulus convection and large scale condensation. The test method for the TLM accuracy with the linearized physical parameterizations is to compare the zonal mean errors between the perturbation evolution in the nonlinear model including full physics and the perturbation evolution in the TLM including the linearized physical parameterizations. It is shown that for finite size perturbations (analysis increments), the inclusion of physics improves the fit to the non-linear model. Then based on the adiabatic TLM, the effect of these linearized physical processes is examined for summer and winter cases for 12 h forecasts. The experimental results show that by adding two dry linearized physical processes (vertical diffusion and subgrid-scale orographic effects), the abnormal growth near the surface in the adiabatic TLM can be effectively suppressed, and the accuracy of the tangential linear mode can be greatly improved. By adding two moist linearization physics processes, i. e., deep cumulus convection and large-scale condensation, the accuracy of the moisture and temperature increments in the TLM can be improved in the tropics and middle to high latitudes, and thus the analysis and forecast effect of GRAPES global 4DVAR can be improved.

Key words Linearized physical processes, Tangent linear model, GRAPES model, Four-dimensional variational assimilation

摘 要 线性化物理过程能够改善四维变分同化中极小化收敛的稳定性和增加极小化过程中对大气物理过程和动力更加精确的描述,它是四维变分同化中非常重要的一部分。通过在 GRAPES 全球模式中研究线性化物理过程,尤其是两个湿线性化物理过程,改善切线性模式预报精度,来提高 GRAPES 全球四维变分同化的分析和预报效果。线性化物理过程的开发首先需要简化原非线性化物理过程中的强非线性项,然后对线性化物理过程进行规约化,以抑制切线性扰动的异常增长。目前 GRAEPS 全球模式中的线性化物理过程主要包括次网格尺度地形参数化、垂直扩散、积云深对流和大尺度凝结。线性化物理

^{*} 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506003)、重大自然灾害监测预警与防范(2018YFC1506705)、中国气象局数值预报中心 GRAPES 发展专项(GRAPES-FZZX-2018)。

作者简介:刘永柱,主要从事资料同化和集合预报研究。E-mail: liuyzh@cma.gov.cn

过程预报精度的检验方法是通过选择合适大小的初始扰动(同化分析增量),来比较非线性模式和切线性模式中的扰动演化的纬向平均误差。然后以绝热版本的切线性模式为基础,通过冬、夏两个个例试验来分别检验 4 个线性化物理过程的 12 h 预报效果。试验结果表明,通过添加次网格地形参数化和垂直扩散两个干线性化物理过程方案,可以有效抑制住绝热版本切线性模式低层扰动的异常增长,大幅度改善切线性模式预报效果。通过添加积云深对流和大尺度凝结两个湿线性化物理过程,可以在热带区域和中、高纬度地区提高切线性模式中湿变量和温度变量的近似精度,提高 GRAPES 全球四维变分同化的分析和预报效果。

关键词 线性化物理过程,切线性模式,GRAPES 模式,四维变分同化

中图分类号 P435

1 引言

在近 30 多年里,切线性和伴随技术是气象与海洋等领域中解决最优化和敏感性问题的一个非常强大的工具(Errico,1997)。四维变分同化(Four-Dimensional Variational Data Assimilation, 4DVAR)方法能够充分有效利用高时、空分辨率的卫星观测资料,改善模式初始场,其中基于切线性和伴随技术的 4DVAR 是目前业务和研究中应用最为成功的方法之一(Rabier, et al,2000;龚建东等,1999)。在切线性模式(Tangent Linear Model, TLM)和伴随模式(ADjoint Model, ADM)中增加和优化线性化物理过程是提高 4DVAR 分析效果的一种有效方法(Mahfouf, et al,2000)。此外,基于切线性和伴随技术的奇异向量最优扰动方法是目前产生集合预报初始条件的最佳方法之一,它描述了线性相空间中动力最不稳定、增长最快的一组正交扰动(Molteni, et al,1996;刘永柱等,2013),通过增加和优化线性化物理过程可以更好地改善奇异向量最优扰动的空间结构(Mahfouf, 1999)。

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的集合数据同化(Ensemble of data assimilation, EDA)系统中对切线性模式和伴随模式的线性化物理过程的研究和应用是比较成功的(Bonavita, et al,2016)。Mahfouf(1999)详细描述了 ECMWF 全球预报系统中线性化物理过程:垂直扩散、次网格尺度地形参数化、大尺度凝结、积云深对流和长波辐射方案,可以有效地改善绝热版本切线性模式的预报效果,从而改善 ECMWF 的业务 4DVAR 系统的分析效果和奇异向量最优扰动结构。Fillion 等(2004)研究了一种 Kain-Fritsh 湿对流参数化方案的切线性和伴随版本,并成功应用到加拿大的 4DVAR 系统中。线性化物理过程的开发中存在着很多困难,如需要简化线性化物理过程中强非线性项,以及解决线性

化过程中“on-off”引起的不连续问题(Zou,1997)。

全球区域一体化同化预报系统 GRAPES (Global and Regional Assimilation PrEdiction system)是中国自主研发的一个非静力经纬度网格数值预报系统,动力框架采用两时间层的半隐式半拉格朗日算法,垂直方向采用地形跟随坐标(陈德辉等,2006)。GRAPES 全球非线性模式(NonLinear Model, NLM) 2.0 版本已经于 2016 年业务化运行(沈学顺等,2017),同化系统采用三维变分同化(Xue, et al, 2008)。为了发展分析效果更好的 GRAPES 全球 4DVAR 系统,刘永柱等(2017)基于 GRAPES 全球非线性模式 2.0 版本,发展了非静力的 GRAPES 全球切线性模式和伴随模式,详细介绍了 GRAPES 全球切线性模式的设计方法和并行效率,并研究了干线性化物理过程的 6 h 切线性演变的近似情况。目前 GRAPES 全球 4DVAR 采用增量分析方法,外循环采用高分辨率 GRAPES 全球非线性模式(水平分辨率 0.25°)进行新息向量的计算,内循环采用低分辨率的 GRAPES 全球切线性模式和伴随模式(水平分辨率 1°)进行目标泛函的极小化求解,因此,切线性模式和伴随模式的计算精度与计算效率是 GRAPES 全球 4DVAR 系统能否业务化的关键(刘永柱等,2017)。

许多研究表明增加线性化物理过程可以有效改善切线性模式的预报精度和时效(Verlinde, et al, 1993)。目前 GRAPES 全球切线性模式和伴随模式还不够完善,线性化物理过程的发展还比较缓慢,尤其是需要优化和改进湿线性化物理过程。本研究主要针对更长积分时间下线性化物理过程对 GRAPES 全球切线性模式预报的影响,然后重点分析新研发的两个湿线性化物理过程在热带区域和中、高纬度地区对切线性模式中湿物理变量扰动预报的精度改善,以及对温度扰动变量的影响。最后通过批量试验分析湿线性物理过程对 GRAPES 全

球 4DVAR 的分析和预报效果的改善情况,为长时间窗口的 GRAPES 全球 4DVAR 研发和 GRAPES 全球奇异向量最优扰动计算提供技术支持。

2 线性化物理过程

由于切线性模式和伴随模式计算非常耗时,一般基于切线性和伴随技术的最优化问题可以在较低分辨率下进行求解 (Errico, 1997)。目前在 GRAPES 全球 4DVAR 系统中采用的是增量变分同化方法,内循环中切线性模式和伴随模式的极小化的水平分辨率为 1.0° ,外循环中非线性模式的水平分辨率为 0.25° ;在 GRAPES 全球奇异向量集合预报系统中奇异向量最优扰动计算模块中的切线性模式和伴随模式的分辨率为 2.5° ,集合预报中非线性模式的分辨率为 0.5° 。因此切线性模式和伴随模式更关注大尺度的物理过程,同时尽可能减少物理过程的强非线性和不连续性导致的线性近似误差。开发一个线性化物理过程需要经过以下几个步骤:

第 1 步,非线性化物理过程的简化:对原非线性物理过程进行线性化的科学分析,在保留原非线性物理过程基本特征的情况下,简化其中的强非线性项,得到一个非线性物理过程简化方案;

第 2 步,切线性程序开发:针对非线性物理过程简化方案的源代码开发其切线性代码,首先进行单元测试,确保切线性代码的编写是正确和合理的,其次在切线性模式中进行整体测试,测试引入该切线性物理过程后的切线性模式的切线性近似;

第 3 步,切线性代码的规约化:虽然经过第 1 步的线性化分析的简化处理,线性化物理过程仍然可能会引起切线性模式的扰动异常增长,这个时候就需要对切线性代码进行规约化处理,寻找那些引起异常增长的切线性变量,然后对其进行限制,保证切线性模式的积分结果是合理的;

第 4 步,伴随程序的开发:基于第 3 步经过规约化后的切线性代码开发其伴随代码,然后进行单元测试以及在伴随模式中进行整体测试,确保该物理过程的伴随在伴随模式中的应用是正确的。

2.1 非线性物理过程

目前业务 GRAPES 全球非线性模式中所使用的非线性物理参数化过程主要有:

(1)RRTMG 长波和短波辐射方案,它是一种辐

射传输模型,利用相关 K 方法可以高效准确地计算长波或短波通量和有效加热率,以应用于大气环流模式 (Morcrette, et al, 2012; 杨学胜等, 2009)。

(2)CoLM 通用陆面过程,该模式仔细考虑了陆面的生态、水文等过程,对不同下垫面陆-气能量与物质的交换进行了较好的描述 (Dai, et al, 2003)。

(3)边界层方案,GRAPES 全球非线性模式中采用的是基于中期预报 (Medium-Range Forecast, MRF)非局地边界层方案 (Hong, et al, 1996),并针对 GRAPES 的 Charney-Phillips 跳点进行了协调设计 (陈炯, 2017)。

(4)次网格尺度地形重力波 (Gravity Wave Drag induced by Sub-grid Orography, GWD),该方案表示由于稳定层结气流过山地时积分的次网格尺度重力波引起的水平动量传输到波动被耗散或被吸收的区域,产生天气尺度强迫,形成地形重力波拖曳 (Alpert, 1988; 徐国强等, 2010)。

(5)NSAS 积云对流方案,该方案是 Han 等 (2006)在 NCEP 模式中在简化荒川-舒伯特对流参数化方案 (Simplified Arakawa-Shubert, SAS)的基础上进行多方面改进后的 NCEP SAS 质量通量参数化方案 (简称 NSAS 方案)。

(6)双参数云微物理方案,在原有云微物理方案的基础上,将次网格对流过程的影响作为源汇项,加入到云水、云冰和总云量的预报方程中,可以有效改善 GRAPES 全球模式预报在赤道及低纬度地区的云和格点降水 (谭超等, 2013)。

2.2 线性化物理过程

由于 GRAPES 全球非线性模式中的 RRTMG 长波和短波辐射方案非常复杂,且是一个缓变过程,对切线性模式中扰动演化影响较小,非线性模式中的 CoLM (Common Land Model)方案也非常复杂,由此,目前 GRAPES 全球切线性模式中没有开发它们的切线和伴随代码。GRAEPS 全球切线性模式中的线性化物理过程主要有垂直扩散、次网格尺度地形参数化、积云深对流和大尺度凝结方案,下面进行详细介绍。

2.2.1 次网格尺度地形参数化

GRAPES 全球切线性模式中的次网格尺度地形参数化线性化方案是在次网格尺度地形重力波方案 (Alpert, 1988)的基础上,只对其中地形阻塞流拖曳部分进行线性化开发的。

风向量 U 的地形阻塞流拖曳公式的半隐式求解方案为

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = -\frac{\beta}{1 + \beta} \frac{U^n}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, Δt 为积分时间间隔, n 为模式积分步, $\beta = 1 - 0.18\gamma - 0.04\gamma^2$ 为山脉各向异性系数 (γ) 的函数。基于风向量扰动 (U') 的地形阻塞流拖曳公式半隐式求解方案的切线性控制方程为

$$\frac{U'^{n+1} - U'^n}{\Delta t} = -\frac{\beta'}{(1 + \beta)^2} \frac{U'^n}{\Delta t} - \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{U'^n}{\Delta t} \quad (2)$$

2.2.2 垂直扩散

在 GRAPES 全球切线性模式中的垂直扩散 (Vertical Diffusion, VDIF) 线性化方案是基于 MRF 非局地边界层方案中只包含自由大气的湍流扩散过程开发的 (Hong, et al, 1996), 湍流扩散方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (3)$$

式中, C 为模式物理量经向风 (u)、纬向风 (v)、位温 (θ) 或比湿 (q), K 为湍流扩散系数。在 MRF 方案中, 自由大气中的湍流扩散系数 $K = l^2 f(Ri) \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|$, 其中 l 为摩擦长度, $f(Ri)$ 为依据理查森系数计算得到的稳定度函数, $\left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|$ 是风垂直切变。湍流扩散的切线性控制方程则为

$$\frac{\partial C'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial C'}{\partial z}) \quad (4)$$

为了阻止该垂直扩散切线性方案在 GRAPES 全球切线性模式中扰动的异常增长, 对其规约化以忽略地表动量通量、热量通量和扩散系数的扰动 (张林, 2008)。

2.2.3 积云深对流

GRAPES 全球切线性模式的积云深对流线性化方案是在 NSAS 质量通量参数化的深对流方案的基础上简化后进行线性化开发的。

NSAS 质量通量参数化方案中, 对流诱发的气压梯度力与云内质量通量和风场切变的乘积成正比, 可通过风场的垂直切变来对气压梯度力的影响进行参数化, 由上升气流引发的气压梯度力与风场的垂直切变存在较明显的线性相关, 因此, 可以通过风场的垂直切变来对水平气压梯度力进行参数化, 对流中的上升气流对水平风场的影响则可表示为

(Han, et al, 2006)

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = (1 - C) M_u \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} + \delta (V_u - \bar{V}) \quad (5)$$

式中, \bar{V} 为水平网格平均风, t 为积分时间, M_u 为上升气流的质量通量, ρ 为空气密度, V_u 为上升气流的水平平均风, δ 为云体侧边界的质量卷出, C 为正的经验常数, GRAPES 全球非线性模式中的 C 为 0.55。

通过对 NSAS 的深对流方案线性化的科学分析, 保证简化后的对流参数化方案的基本特征 (如闭合条件、夹卷作用以及深对流触发) 与 NSAS 方案一致, 对质量通量方案略作修改, 包括忽略对动量的贡献、简化降水过程 (仅考虑雨水、质量通量与物理守恒量解除耦合) (龚建东等, 2018)。

2.2.4 大尺度凝结

GRAPES 全球切线性模式中的旧版本是以 ECMWF 的 EC87 方案为基础开发的大尺度凝结线性化方案 (张林, 2009), 该方案仅考虑因水物质相变造成的变量温度和湿度的物理倾向变化, 比较简单, 缺少云信息。文中重新基于 Tompkins 等 (2004) 发展的简化大尺度云和降水方案开发一个新的大尺度凝结线性化方案, 该方案更全面地描述了对流里湿过程和云的关系, 着眼于未来 4DVAR 中同化云和降水资料。

大尺度凝结过程对温度和湿度的控制方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\ell + E_{\text{prec}} + \mathcal{D}_{\text{conv}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \mathcal{L}(\ell - E_{\text{prec}} - \mathcal{D}_{\text{conv}}) + \mathcal{L}_f(\mathcal{Q} - \mathcal{M}) \quad (7)$$

式中, ℓ 为大尺度过程中云的凝结或蒸发过程, E_{prec} 为降水蒸发对水汽的变化, $\mathcal{D}_{\text{conv}}$ 为此网格对流卷出对水汽的源项, \mathcal{Q} 和 \mathcal{M} 分别为雨水的冻结和雪的融化, \mathcal{L} 为蒸发/升华的潜热系数, \mathcal{L}_f 为冻结和融化的潜热系数。

与之对应的大尺度凝结切线性方案中产生的温度和湿度的控制方程为

$$\frac{\partial q'}{\partial t} = -\ell' + E'_{\text{prec}} + \mathcal{D}'_{\text{conv}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = \mathcal{L}'(\ell' - E'_{\text{prec}} - \mathcal{D}'_{\text{conv}}) + \mathcal{L}'_f(\mathcal{Q}' - \mathcal{M}') \quad (9)$$

为了避免一些虚假的扰动在切线性模式中的异常增长, 在 GRAPES 全球切线性模式中需要对大尺

度凝结切线性方案中大尺度层云云量参数(c_{strat})的切线性量(c'_{strat})进行约束, c_{strat} 是式(6)、(7)中 c 项和蒸发项(E_{prec})的重要物理参数

$$c_{\text{strat}} = 1 - \sqrt{\frac{1 - \text{RH}}{1 - \text{RH}_{\text{crit}} - \kappa(\text{RH} - \text{RH}_{\text{crit}})}} \quad (10)$$

式中, κ 为一个经验系数,RH为网格内的平均相对湿度, RH_{crit} 是临界相对湿度阈值。那么 c'_{strat} 采用类似ECMWF的规约化处理方案(ECMWF, 2017)

$$c'_{\text{strat}} = c'_{\text{strat}} \times \begin{cases} -1.2c_{\text{strat}} + 0.94 & 0.2 < c_{\text{strat}} < 0.7 \\ -0.1 & 0.7 \leq c_{\text{strat}} < 0.95 \\ -0.1\sqrt{\frac{1 - c_{\text{strat}}}{0.05}} & c_{\text{strat}} \geq 0.95 \end{cases} \quad (11)$$

通过对 c'_{strat} 的规约化来约束式(6)和(7)中的 c 项和 $\varepsilon'_{\text{prec}}$ 项的异常虚假增长。同时需要对流卷出项($\mathcal{D}_{\text{conv}}$)的切线性变量(\mathcal{D}')进行规约化处理,即 $\mathcal{D}' = \mathcal{D} \times 0.01$,来限制式(8)和(9)中 $\mathcal{D}'_{\text{conv}}$ 的异常虚假增长。

表1 线性化物理过程的切线性模式(TLM)预报试验的设置和描述

Table 1 Configurations and descriptions of TLM experiments for linearized physical processes

试验名	试验描述	试验目的
NLM_PHYS	基于全物理过程 NLM 的非线性扰动试验	对照试验,用于切线性扰动试验的对比。
TLM_ADIAB	基于绝热版本(无线性化物理过程) TLM 的切线性扰动试验	与 NLM_PHYS 做对比,测试绝热版本 TLM 的预报精度。
TLM_GWD	引入次网格尺度地形参数化 TLM 的切线性扰动试验	与 TLM_ADIAB 做对比,测试引入次网格尺度地形参数对 TLM 预报精度的影响。
TLM_VDIF_GWD	在 TLM_GWD 上引入垂直扩散的切线性扰动试验	与 TLM_GWD 试验做对比,测试引入垂直扩散对 TLM 预报精度的影响。
TLM_NSAS_DRY	在 TLM_VDIF_GWD 上引入 NSAS 积云深对流的切线性扰动试验	与干线性化物理过程试验(TLM_VDIF_GWD)做对比,测试引入 NSAS 对 TLM 预报精度的影响,尤其是对热带区域湿变量和温度变量的改善。
TLM_LC_NSAS_DRY	在 TLM_NSAS_DRY 上引入大尺度凝结的切线性扰动试验	与 TLM_NSAS_DRY 试验做对比,测试引入大尺度凝结对 TLM 预报精度的影响,尤其是中、高纬度地区湿变量的改善。

3.2 线性化物理过程的诊断方法

文中采用定量的方式来诊断线性化物理过程对切线性模式预报效果的影响,评估不同线性化参数化物理过程的重要性。对照试验的非线性扰动预报是从两个不同的初始条件 \mathbf{x}_a 和 \mathbf{x}_b 起报的非线性模式的预报结果的差,即 $\Delta \mathcal{M}(\delta \mathbf{x}) = \mathcal{M}(\mathbf{x}_a) - \mathcal{M}(\mathbf{x}_b)$,相应需要对比测试的切线性扰动预报为 $L(\delta \mathbf{x})$,这里 \mathcal{M} 为非线性模式, L 为切线性模式。

3 切线性物理过程的分析 and 诊断

3.1 试验设计

文中以 GRAPES 全球模式 2.0 版本为试验平台,研究这 4 个线性化物理过程分别对 GRAPES 全球切线性模式预报效果的影响,试验水平分辨率为 1.0° ,垂直分辨率为 60 层,预报时间为 12 h,积分步长为 900 s。非线性扰动基准试验为两个采用 2.1 节中的全物理过程的 GRAPES 全球非线性模式 12 h 预报的差:其中之一以背景场 \mathbf{x}_b (6 h 预报场)为模式起报的初始场,另一个以分析场 \mathbf{x}_a 为模式起报的初始场。切线性扰动试验的初始扰动场采用同化系统的分析增量 $\delta \mathbf{x}$ ($\delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b$),模式轨迹计算是以背景场(\mathbf{x}_b)为初始场,采用全物理过程 GRAPES 全球非线性模式计算。试验分别选择一个冬季测试个例(起报时间为 2017 年 2 月 7 日 12 时)(世界时,下同)和一个夏季测试个例(起报时间为 2017 年 5 月 15 日 12 时)。具体的试验设置和描述见表 1。

为了分析不同线性化物理过程下切线性模式在不同纬度(如热带区域、南北半球中高纬度地区)上的扰动预报精度,对切线性近似效果的诊断方法是比较切线性扰动预报与非线性扰动预报绝对误差 $|L(\delta \mathbf{x}) - \Delta \mathcal{M}(\delta \mathbf{x})|$ 的纬向平均分布。不同线性化物理过程的全球平均绝对误差为(Mahfouf, 1999)

$$\epsilon_i = \overline{|L(\delta \mathbf{x})_i - \Delta \mathcal{M}(\delta \mathbf{x})|} \quad (12)$$

式中, i 为不同线性化物理过程的结果,如果 ϵ_i 变小

说明该线性化物理过程使切线性模式的预报效果变好,反之变差。

下面在 GRAPES 全球切线性模式中逐步引入 2.2.2 节中的 4 个线性化物理过程,通过试验(表 1)来比较其扰动预报的绝对误差减少量 ($|L(\delta x)_{i+1} - \Delta_{\text{NL}}(\delta x)| - |L(\delta x)_i - \Delta_{\text{NL}}(\delta x)|$) 的纬向平均分布来评判引入的线性化物理过程对切线性模式预报的影响。

3.3 干线性化物理过程的切线性模式预报影响

GRAPES 全球切线性模式中的干线性化物理过程主要包含 2.2 节中介绍的次网格尺度地形参数和垂直扩散线性化方案,目的是为了改善切线性模式在边界层附近的预报精度。

图 1 给出了 TLM_ ADIAB 试验与 NLM_ PHYS 试验 12 h 预报的纬向风绝对误差的纬向分布。冬季试验(图 1a)的纬向风扰动预报全球平均绝对误差为 0.35 m/s,一部分较大的误差分布在模式边界层,尤其是南、北半球中纬度地区,误差可达

到 1 m/s,误差主要来源是由于绝热版本的 GRAPES 全球切线性模式缺少边界层的线性化物理过程,无法准确描述 GRAPES 全球非线性模式中地面摩擦等边界层过程对非线性扰动预报的作用,导致切线性扰动预报在边界层附近增长过快;另外一部分较大的误差分布在热带区域的模式 35 层(约 9.5 km)—50 层(约 17 km)的对流层上层区域,误差可达 1 m/s,主要是由热带区域在对流层上层的急流和气流抬升等强非线性特征所导致。夏季试验(图 1b)的纬向风扰动预报全球平均绝对误差为 0.34 m/s,误差分布与冬季试验(图 1a)很相似,只是南半球高纬度边界层的扰动预报误差也很大,误差来源与冬季试验也是一致的。试验结果表明绝热版本下的 GRAPES 全球切线性模式预报误差来源主要集中于中纬度模式边界层和热带区域的高层,需要引入相应的线性化物理过程来改善切线性模式预报效果。

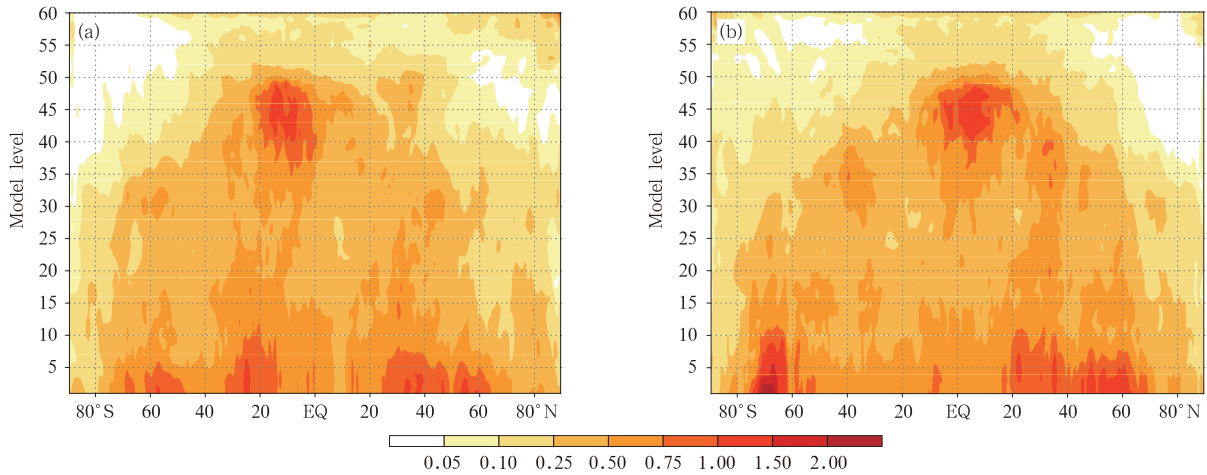


图 1 绝热版本 GRAPES 全球切线性模式与全物理过程非线性模式(预报 12 h)的纬向风(单位:m/s)扰动的平均绝对误差

(a. 冬季 2017 年 2 月 7 日 00 时试验, b. 夏季 2017 年 5 月 15 日 00 时试验)

Fig. 1 Mean absolute errors of zonal wind (unit:m/s) between the adiabatic GRAPES global TLM and NLM with full physics (12 h forecast)

(a. winter experiment (00: 00 UTC 7 Feb 2017), b. summer experiment (00: 00 UTC 15 May 2017))

图 2 给出了在 GRAPES 全球切线性模式引入次网格尺度地形参数线性化方案(见 2.2.1 节)后的 TLM_GWD 试验相对于 TLM_ ADIAB 试验的 12 h 扰动预报的误差改善情况。从图 2a 冬季试验可以看出,引入该线性化方案后,切线性模式在北半球

中、高纬度低层的纬向风扰动预报误差明显减小(图中负值表示改善,正值表示变差,后面各误差减少图都是一样的),纬向风扰动的全球平均绝对误差可以提高 4.22%;夏季试验(图 2b)也显示引入该线性化方案后,切线性模式在北半球中、高纬度和南半球高

纬度低层的纬向风扰动预报误差明显减小,纬向风扰动的全球平均绝对误差可以提高 4.26%。试验结果表明,在 GRAPES 全球切线性模式中引入了次网格尺度地形参数线性化方案,可以有效改善切线性模式边界层预报效果。

图 3 给出了 GRAPES 全球切线性模式引入了垂直扩散线性化方案(见 2.2.2 节)后的 TLM_VDIF_GWD 试验相对于 TLM_GWD 试验的 12 h 扰动预报的误差改善情况。从冬季(图 3a)和夏季(图 3b)试验可以看出,引入该线性化方案后,切线

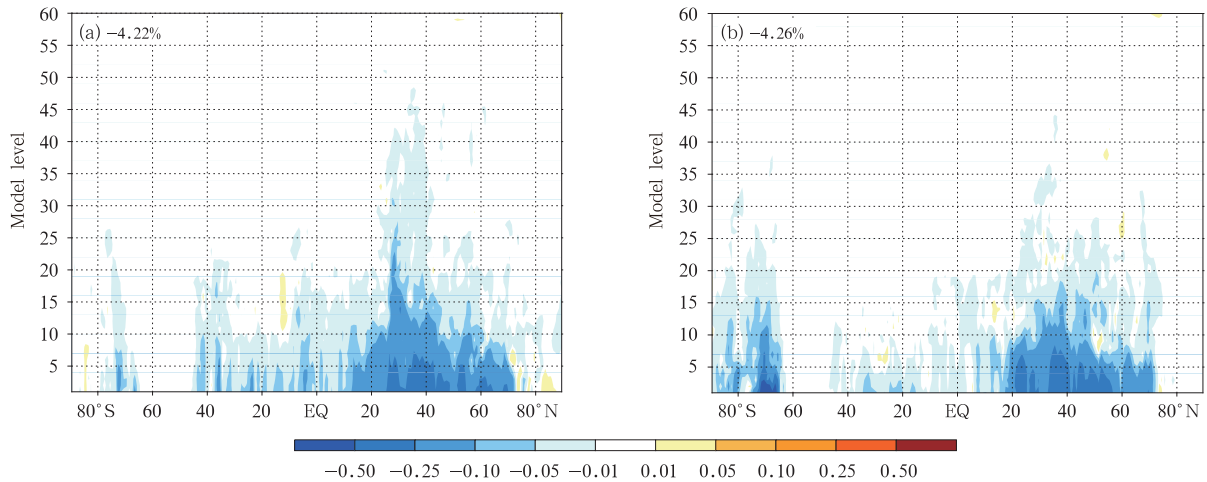


图 2 GRAPES 全球切线性模式中引入次网格尺度地形参数线性化方案后的纬向风扰动(单位:m/s)相对于绝热版本的改善(预报 12 h)(a. 冬季 2017 年 2 月 7 日 00 时试验, b. 夏季 2017 年 5 月 15 日 00 时试验)

Fig. 2 Improvements in zonal wind simulation (unit:m/s) after the introduction of the tangent-linear subgrid-scale orography parameterization (GWD) into GRAPES global TLM compared with an adiabatic TLM (ADIAB) (12 h forecast) (a. winter experiment (00: 00 UTC 7 Feb 2017), b. summer experiment (00: 00 UTC 15 May 2017))

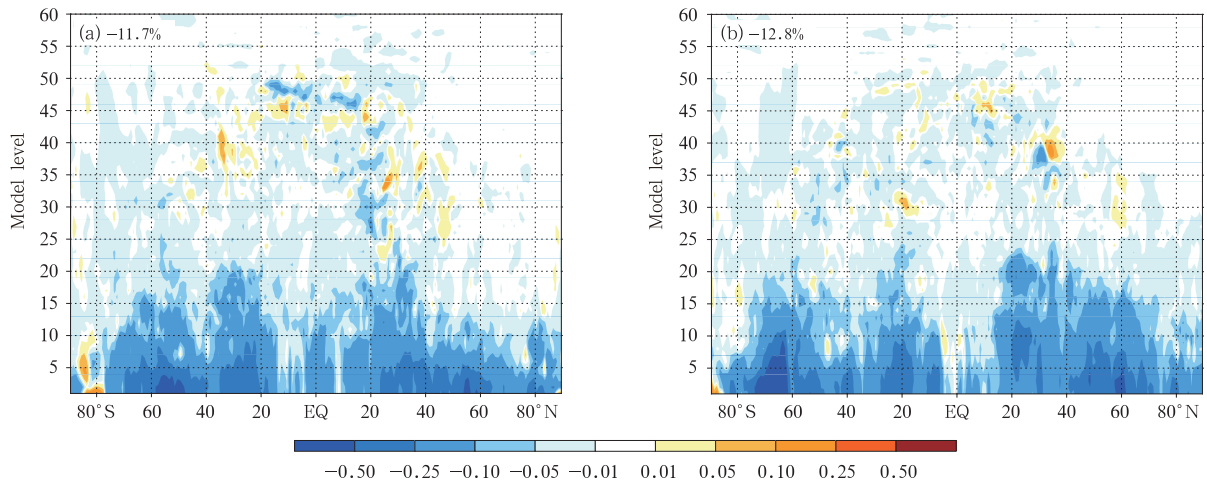


图 3 GRAPES 全球切线性模式中引入垂直扩散线性化方案后的纬向风扰动(单位:m/s)相对于次网格尺度地形参数的改善(预报 12 h)

(a. 冬季 2017 年 2 月 7 日 00 时试验, b. 夏季 2017 年 5 月 15 日 00 时试验)

Fig. 3 Improvements in zonal wind simulation (unit:m/s) after the introduction of the tangent-linear vertical diffusion (VDIF) into GRAPES global TLM compared with the TLM with GWD (12 h forecast) (a. winter experiment (00: 00 UTC 7 Feb 2017), b. summer experiment (00: 00 UTC 15 May 2017))

性模式在整个模式低层的纬向风扰动预报误差明显减小,纬向风扰动的全球平均绝对误差(ϵ)分别再次提高 11.7%和 12.8%。试验结果表明,引入垂直扩散线性化方案能够有效抑制切线性模式预报在边界层附近异常快速增长,与非线性扰动增长更加接近。因此,两个干线性化物理过程可以大幅度改善 GRAPES 全球切线性模式在模式低层的预报效果。

3.4 湿线性化物理过程的切线性模式预报影响

GRAPES 全球切线性模式中的湿线性化物理过程主要包含 2.2 节中介绍的积云深对流和大尺度凝结线性化方案,目的是为了改善切线性模式湿变

量和温度的预报精度。

图 4 给出了 TLM_GWD_VDIF 试验与 NLM_PHYS 试验 12 h 预报的比湿扰动和位温扰动绝对误差的纬向分布。冬季试验(图 4a)和夏季试验(图 4b)的比湿扰动预报全球平均绝对误差分别为 0.076 和 0.073 g/kg,其中较大的误差(>0.3 g/kg)主要分布在热带区域的模式 25 层(约 5 km)与 12 层(约 1 km)之间,即对流层中层和下层,主要是由于热带大气在对流层下部处于不稳定状态,一遇外界扰动(例如地面加热等)便可以有积云对流发展,因而缺少积云对流线性化方案的切线

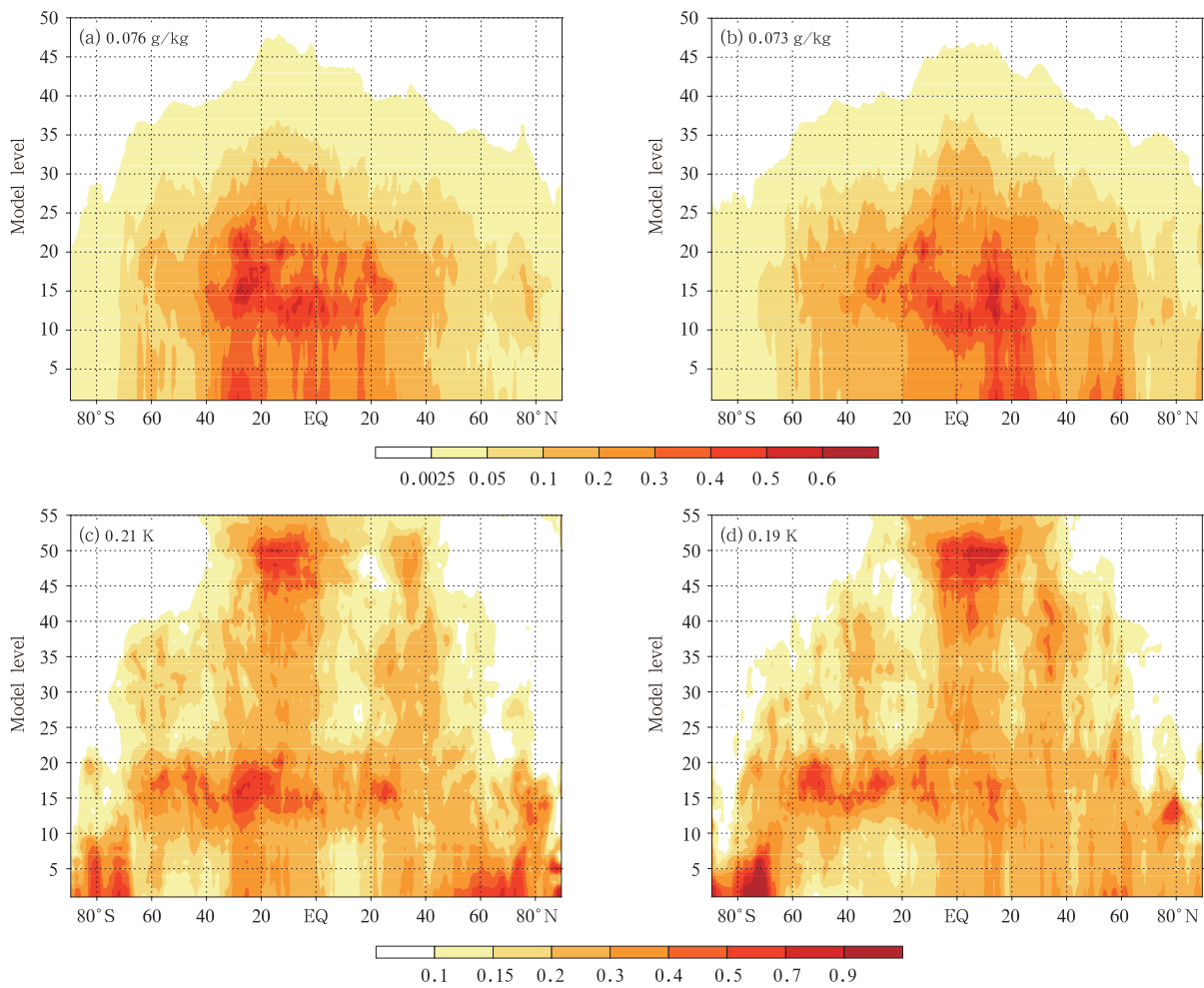


图 4 干线性化物理过程 GRAPES 全球切线性模式与全物理过程非线性模式(预报 12 h)的比湿扰动(a,b,单位:g/kg)和位温扰动(c,d,单位:K)的平均绝对误差
(a,c.冬季 2017 年 2 月 7 日 00 时试验,b,d.夏季 2017 年 5 月 15 日 00 时试验)

Fig. 4 Mean absolute errors of specific humidity (a,b; unit: g/kg) and potential temperature (c,d; unit: K) between the dry linearization physics (DRY) GRAPES global TLM and NLM with full physics (12 h forecast) (a,c. winter experiment (00: 00 UTC 7 Feb 2017), b,d. summer experiment (00: 00 UTC 15 May 2017))

性模式难以捕捉这类非线性扰动。冬季试验(图4c)和夏季试验(图4d)的位温扰动预报全球平均绝对误差分别为0.21和0.19 K,较大的误差(>0.3 K)主要分布在3个区域:(a)位于中、低纬度的对流层下层和上层区域,其原因是该区域的误差较大的湿变量扰动导致的;(b)位于低纬度地区模式40层(约11 km)和50层(约17 km)之间的对流层上层区域,其原因来自于热带区域对流层层顶热力结构变化和对流不稳定性;(c)位于高纬度底层区域,其原因来自于南北极区域的边界层。试验结果表明,干线性化物理过程切线性模式的湿变量扰动和温度扰

动预报误差主要位于热带区域的对流层,需要引入相应的湿线性化物理过程来描述非线性模式里湿变量扰动演化特征,改善切线性模式预报效果。

图5给出了GRAPES全球切线性模式引入NSAS深对流积云线性化方案(见2.2.3节)后的TLM_NSAS_DRY试验相对于TLM_VDIF_GWD试验12 h扰动预报的误差改善情况。从冬季(图5a)和夏季(图5b)试验可以看出,引入该线性化方案后,切线性模式比湿扰动预报在热带区域对流层中、低层的误差明显减小,在中纬度也略有改善,比湿扰动的全球平均绝对误差分布可以提高2.89%和

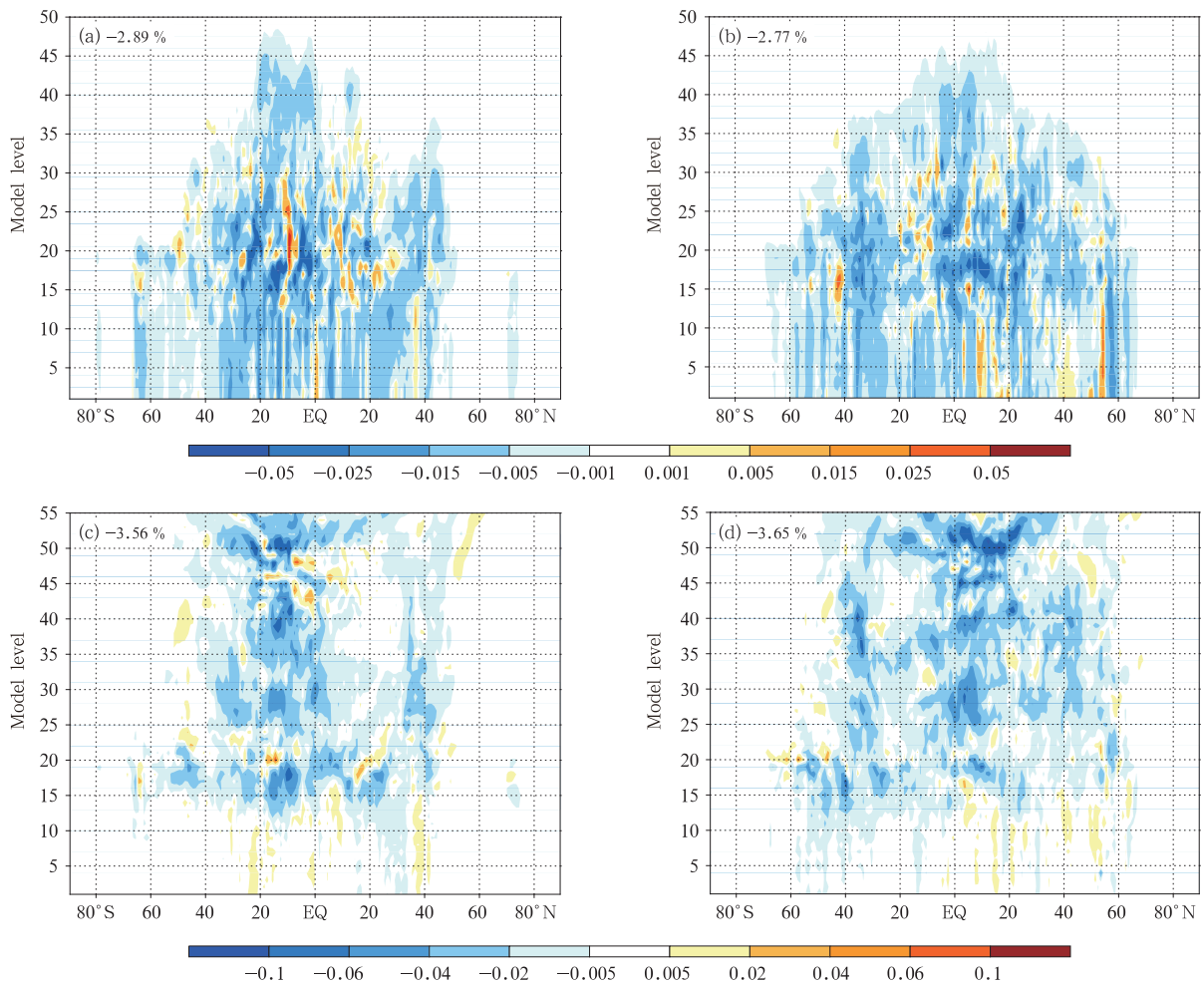


图5 GRAPES全球切线性模式中引入积云深对流线性化方案后的比湿扰动(a,b)和位温扰动(c,d)相对于干线性化物理过程的改善(预报12 h)(a,c.冬季2017年2月7日00时试验, b,d.夏季2017年5月15日00时试验)

Fig. 5 Improvements in specific humidity (a,b) and potential temperature (c,d) after the introduction of the tangent-linear deep convection processes (CONV) into GRAPES global TLM compared with the TLM with DRY (12 h forecast) (a,c. winter experiment (00:00 UTC 7 Feb 2017), b,d. summer experiment (00:00 UTC 15 May 2017))

2.77%。同时,切线性模式位温扰动预报在热带区域对流层中、高层的误差明显减小,位温扰动的全球平均绝对误差分布均提高 3.65%。试验结果表明,由于 NSAS 深对流积云线性化方案仅是在 NSAS 方案中深对流简化方案上开发的,并不能完全模拟 NSAS 在非线性的模式中的扰动预报特征,因此个别区域的误差反而增大了,但总体上还是能够改善 GRAPES 全球切线性模式湿变量的预报精度,提高温度变量的预报效果。

图 6 给出了 GRAPES 全球切线性模式引入大尺度凝结线性化方案(见 2.2.4 节)后的 TLM_LC_NSAS_DRY 试验相对于 TLM_NSAS_DRY 试验 12 h 扰动预报的误差改善情况。从冬季(图 6a)和

夏季(图 6b)试验可以看出,引入该线性化方案后,切线性模式比湿扰动预报在中、高纬度区域对流层中、低层的误差明显减小,也有个别区域变差,比湿扰动的全球平均绝对误差分布可以提高 5.46%和 4.99%,相应的切线性模式温度扰动的预报效果也会随着略微改善。试验结果表明,由于目前 GRAPES 全球切线性模式中大尺度凝结方案与 NLM 中的双参数云微物理方案(2.1 节)在考虑水物质相变和物理尺度等方面具有比较大的差异,所以,基于大尺度凝结线性化方案的切线性模式切线性扰动只能部分模拟出非线性模式中双参数云微物理方案导致的温、湿度扰动演变特征,但足以满足高分辨率的 4DVAR 极小化和奇异向量计算需求。

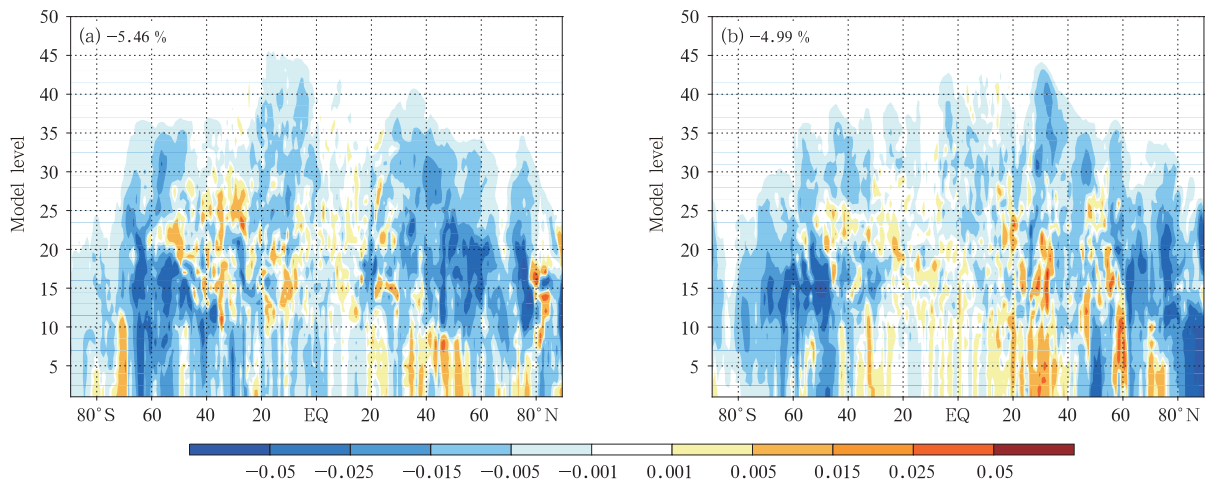


图 6 GRAPES 全球切线性模式中引入大尺度凝结线性化方案后的比湿扰动相对于积云深对流的改善
(预报 12 h; a. 冬季 2017 年 2 月 7 日 00 时试验, b. 夏季 2017 年 5 月 15 日 00 时试验)

Fig. 6 Improvements in specific humidity after the introduction of the tangent-linear large-scale condensation (COND) into GRAPES global TLM compared with the TLM with CONV (12 h forecast)
(a. winter experiment (00: 00 UTC 7 Feb 2017), b. summer experiment (00: 00 UTC 15 May 2017))

3.5 线性化物理过程的影响

表 2 给出了绝热、干和全线性化物理化过程

GRAPES 全球切线性模式扰动预报相对于全物理过程非线性模式扰动预报(12 h, 水平分辨率 1°)的

表 2 绝热、干和全线性化物理化过程在 GRAPES 全球切线性模式中的全球平均绝对误差比较
(12 h 预报, 水平分辨率 1°)

Table 2 Comparison of global mean absolute errors of adiabatic, dry and full linearized physical processes in GRAPES Global TLM (12 h forecast, 1° horizontal resolution)

GRAPES 全球切线性模式	U(m/s)		V(m/s)		θ (K)		q(g/kg)	
	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
无线性化物理过程	0.34	0.32	0.35	0.34	0.24	0.23	0.084	0.080
干线性化物理过程	0.28	0.27	0.30	0.28	0.21	0.19	0.076	0.073
全线性化物理过程	0.27	0.25	0.28	0.26	0.20	0.18	0.070	0.068

全球平均绝对误差(分别是经向风、纬向风、位温和比湿)。如表 2 所示,引入干线性化物理过程方案后,可以有效抑制住绝热版本 GRAPES 全球切线性模式低层扰动的异常增长,使切线性模式的预报精度提高 16%左右。在干线性化物理过程切线性模式中再引入湿线性化物理过程方案,可以改善切线性模式中、高纬度和热带区域湿变量的近似效果,使切线性模式的湿变量预报精度提高 8%左右。

表 3 给出了绝热、干和全线性化物理过程 GRAPES 全球切线性模式扰动预报相对于全物理过程非线性模式扰动预报(48 h,水平分辨率 2.5°)

的全球平均绝对误差(分别是经向风、纬向风、位温和比湿),目的是为了测试引入线性化物理过程的切线性模式在长时间间隔的预报精度改善情况,是否能满足 48 h 最优时间间隔的 GRAPES 全球奇异向量计算精度。如表 3 所示,引入干线性化物理过程方案,可以有效抑制住绝热版本 GRAPES 全球切线性模式低层扰动的异常增长,使切线性模式的精度提高 35%左右。在干线性化物理过程切线性模式中再引入湿线性化物理过程方案,可以改善切线性模式中、高纬度和热带区域湿变量的近似效果,使切线性模式的湿变量预报精度提高 10%左右。

表 3 绝热、干和全线性化物理过程在 GRAPES 全球切线性模式中的全球平均绝对误差比较
(48 h 预报,水平分辨率 2.5°)

Table 3 Comparison of global mean absolute errors of adiabatic, dry, and full linearized physical processes in GRAPES Global TLM
(48 h forecast, 2.5° horizontal resolution)

GRAPES 全球切线性模式	U(m/s)		V(m/s)		$\theta(K)$		q(g/kg)	
	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
无线性化物理过程	0.69	0.56	0.69	0.59	0.55	0.60	0.153	0.142
干线性化物理过程	0.43	0.42	0.44	0.43	0.33	0.32	0.094	0.089
全线性化物理过程	0.41	0.40	0.43	0.42	0.32	0.31	0.084	0.080

4 湿线性物理过程在 4DVAR 中的影响

为了进一步分析湿线性化物理过程在 GRAPES 全球 4DVAR 系统中的应用效果,文中开展了一个月循环预报同化试验,时间为 2016 年 6 月 1 日 09 时—30 日 09 时,所同化的资料为:常规观测资料、NOAA15 AMSUA、NOAA18 AMSUA、NOAA19 AMSUA、MeTop-A AMSUA、MeTop-B AMSUA、EOS HIRS、GNSSRO 掩星、洋面散射仪等卫星观测。试验的 4DVAR 同化时间窗为 6 h,每 30 min 同化一次观测资料,外循环的水平分辨率是 0.25°,积分步长是 300 s,内循环分辨率分为 1.0°,积分步长为 900 s,垂直分层都为 60 层。设计了下面两组试验:

干试验:4DVAR 内循环的切线性模式和伴随模式采用 2.2 节两个干线性化物理过程;

湿试验:4DVAR 内循环的切线性模式和伴随模式采用 2.2 节两个干线性化物理过程和两个湿线

性化物理过程。

为了减少试验的分析和预报效果受到初始场的影响,这里选择循环同化试验后 21 d 的结果进行统计分析(2016 年 6 月 10—30 日)。图 7 给出了两组循环同化试验的背景场与 ECMWF 再分析资料(Dee, et al, 2011)的均方根误差的时间平均,从热带区域的位势高度的统计结果(图 7a)可以看出,湿试验在热带区域对流层上层(250—70 hPa)要明显好于干试验,在对流层中层(500—250 hPa)略差于干试验,但对流层中层(500—250 hPa)的温度(图 7c)要好于干试验。同样,湿试验在东亚区域(300—70 hPa)的位势高度的统计结果(图 7b)要明显好于干试验,东亚区域(500—200 hPa)的温度(图 7d)要明显好于干试验。批量试验结果表明,在 GRAPES 全球 4DVAR 中添加了两个湿线性化物理过程后,通过对温度变量和湿变量的分析精度的改善,能有效提高 4DVAR 的分析和预报效果。

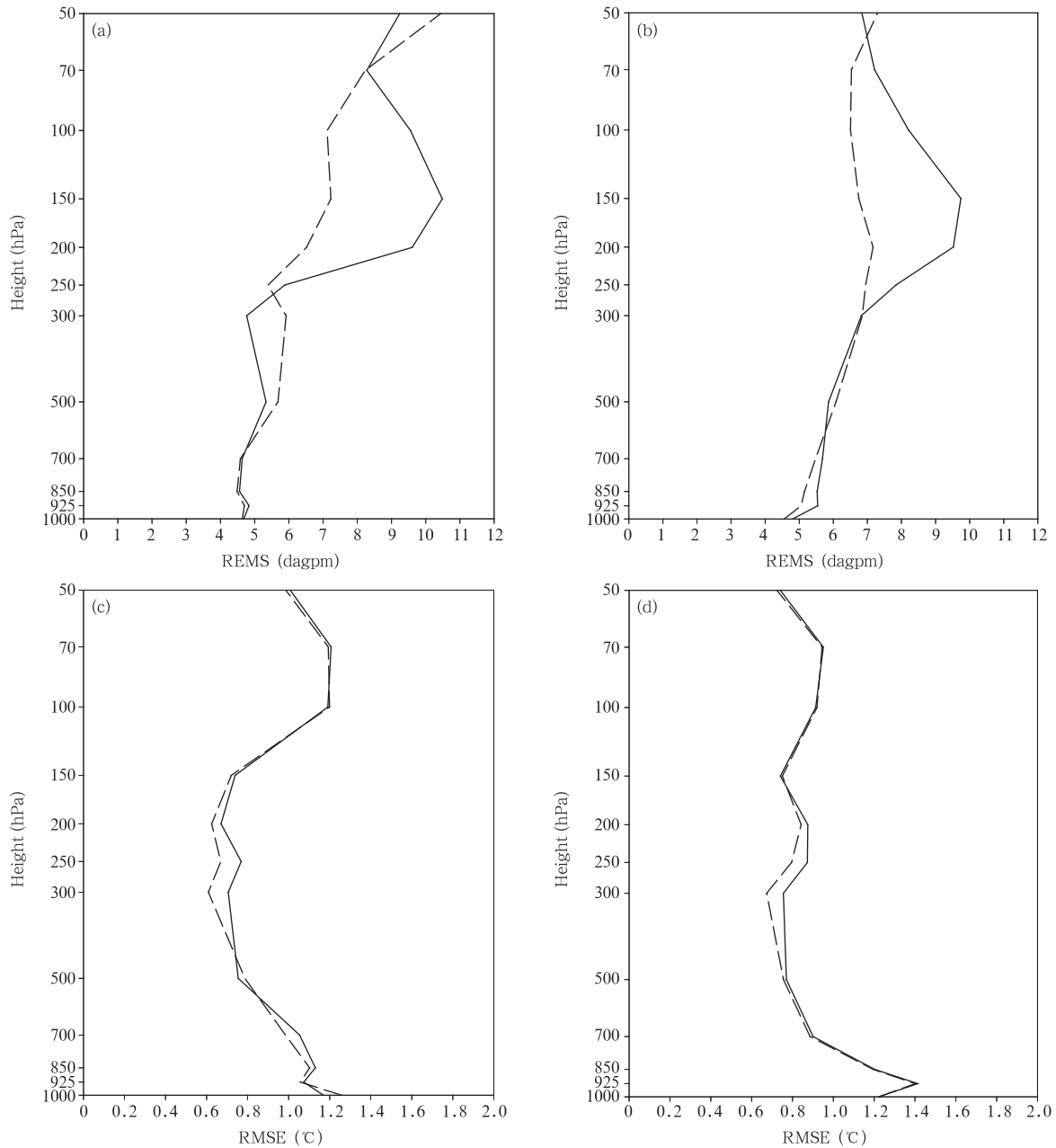


图 7 循环同化的背景场与 ECMWF 再分析资料的均方根误差的时间平均
 (a. 热带区域的位势高度, b. 东亚区域的位势高度, c. 热带区域的温度,
 d. 东亚区域的温度; 实线为干试验, 虚线为湿试验)

Fig. 7 The root mean square errors between cycling assimilation background and ECMWF reanalysis
 (a. geopotential height in the tropics, b. geopotential height in East Asia, c. temperature in the tropics,
 d. temperature in East Asia; solid line; dry experiment, dashed curve; moist experiment)

5 总结和讨论

文中主要讨论了线性化物理过程的开发和在 GRAPES 全球切线性模式中的预报效果改善, 得到以下结论:

(1) 线性化物理过程的开发是一个复杂的过程, 既需要科学线性化分析, 又需要大量的代码开发和测试工作。

(2) 垂直扩散方案和次网格尺度地形参数两个干线性化物理过程, 可以有效抑制住绝热版本切线

性模式低层扰动的异常增长,可以大幅度改善切线性模式的预报效果,是切线性模式应用中必不可少的。

(3)积云深对流和大尺度凝结两个湿线性化物理过程,可以提高赤道区域和中、高纬度湿变量和温度变量的切线性近似精度,可以在干线性化物理过程基础上改善切线性模式的预报效果。

(4)在4DVAR中引入湿线性化物理过程能有效提高4DVAR的分析和预报效果,尤其是热带区域和东亚区域。

线性化物理过程在GRAPES全球4DVAR和GRAPES全球奇异向量计算中的效果的优化和改善是一个长期反复的过程。限于篇幅,文中未能给出湿线性化物理过程在4DVAR中的更长时间循环同化和更多详细的分析和结果,此外,湿线性化物理过程在GRAPES全球奇异向量中的影响还在研发和试验中。未来随着4DVAR分辨率的进一步提高(外循环 0.125° ,内循环 0.5°),切线性模式和伴随模式,以及线性化物理过程尚需更多更细的研究和优化工作。

致谢:在研发积云深对流和大尺度凝结两个湿线性化物理过程中,清华大学张广俊教授在线性化方案简化过程的正确性和合理性方面给出了很好的建议。

参考文献

- 陈德辉,沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展. 应用气象学报, 17(6): 773-777. Chen D H, Shen X S. 2006. Recent progress on GRAPES research and application. J Appl Meteor Sci, 17(6): 773-777 (in Chinese)
- 陈炯, 马占山, 苏勇. 2017. 适用于 GRAPES 模式 C-P 边界层方案的设计和实现. 应用气象学报, 28(1): 52-61. Boundary layer coupling to Charney-Phillips vertical grid in GRAPES Model. J Appl Meteor Sci, 28(1): 52-61 (in Chinese)
- 龚建东, 邱崇践, 王强等. 1999. 区域四维变分资料同化的数值试验. 气象学报, 57(2): 131-142. Gong J D, Qiu C J, Wang Q, et al. 1999. The numerical experiment in area four-dimensional variational data assimilation. Acta Meteor Sinica, 57(2): 131-142 (in Chinese)
- 龚建东, 刘永柱, 张林. 2019. 面向四维变分资料同化的 NSAS 积云深对流参数化方案的简化及线性化研究. 77: doi:10.11676/qxxb2019.048 (待刊). Gong J D, Liu Y Z, Zhang L. 2019. The researches on Simplification and Linearization of NSAS Deep Convection Cumulus Parameterization Scheme for 4DVar. Acta Meteor Sinica, 77: doi: 10.11676/qxxb2019.048 (in press) (in Chinese)
- 刘永柱, 沈学顺, 李晓莉. 2013. 基于总能量模的 GRAPES 全球模

- 式奇异向量扰动研究. 气象学报, 71(3): 517-526. Liu Y Z, Shen X S, Li X L. 2013. Research on the singular vector perturbation of the GRAPES global model based on the total energy norm. Acta Meteor Sinica, 71(3): 517-526 (in Chinese)
- 刘永柱, 张林, 金之雁. 2017. GRAPES 全球切线性模式和伴随模式的调优. 应用气象学报, 28(1): 62-71. Liu Y Z, Zhang L, Jin Z Y. 2017. The optimization of GRAPES global tangent linear model and adjoint model. J Appl Meteor Sci, 28(1): 62-71 (in Chinese)
- 沈学顺, 苏勇, 胡江林等. 2017. GRAPES_GFS 全球中期预报系统的研发和业务化. 应用气象学报, 28(1): 1-10. Shen X S, Su Y, Hu J L, et al. 2017. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system. J Appl Meteor Sci, 8(1): 1-10 (in Chinese)
- 谭超, 刘奇俊, 马占山. 2013. GRAPES 全球模式次网格对流过程对云预报的影响研究. 气象学报, 71(5): 867-878. Tan C, Liu Q J, Ma Z S. 2013. Influences of sub-grid convective processes on cloud forecast in the GRAPES global model. Acta Meteor Sinica, 71(5): 867-878 (in Chinese)
- 徐国强, 杨学胜, 黄丽萍等. 2010. GRAPES 中地形重力波拖曳物理过程的引进和应用试验. 气象学报, 68(5): 631-639. Xu G Q, Yang X S, Hang L P, et al. 2010. Introducing and application testing of the orographic gravity wave drag parameterization physics in the GRAPES. Acta Meteor Sinica, 68(5): 631-639 (in Chinese)
- 杨学胜, 沈元芳, 徐国强. 2009. 辐射方案对 GRAPES 全球模式的影响. 大气科学, 33(3): 593-599. Yang X S, Shen Y F, Xu G Q. 2009. The impacts of radiation schemes on the GRAPES global model. Chinese J Atmos Sci, 33(3): 593-599 (in Chinese)
- 张林, 朱宗申. 2008. GRAPES 模式切线性垂直扩散方案的误差分析和改进. 应用气象学报, 19(2): 194-200. Zhang L, Zhu Z S. 2008. Estimation of linearized vertical diffusion scheme in GRAPES model. J Appl Meteor Sci, 19(2): 194-200 (in Chinese)
- 张林, 朱宗申. 2009. GRAPES 四维变分同化系统中线性大尺度凝结方案的开发与实验//中国气象学会全国数值预报发展与应用研讨会, 北京: 气象出版社: 75-85. Zhang L, Zhu Z S. 2013. Development and test of the linearized large-scale condensation scheme in GRAPES 4DVAR system//National Numerical Forecast Development and Application Seminar of Chinese Meteorological Society. Beijing: China Meteorological Press: 75-85 (in Chinese)
- Alpert J C. 1988. Sub-grid scale mountain blocking at NCEP//Proceedings of the 20th Conf. WAF/16 Conf. NWP P2. 4. Camp Springs, Maryland: NOAA/NWS/NCEP
- Bonavita M, Hölm E, Isaksen L, et al. 2016. The evolution of the ECMWF hybrid data assimilation system. Quart J Roy Meteor Soc, 142(694): 287-303
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land

- model. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(8): 1013-1024
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(656): 553-597
- ECMWF. 2017. Part II: Data assimilation// IFS Documentation - Cy43r3 Operational Implementation. Shinfield, England: ECMWF
- Errico R M. 1997. What is an adjoint model?. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(11): 2577-2592
- Fillion L, Bélair S. 2004. Tangent linear aspects of the Kain-Fritsch moist convective parameterization scheme. *Mon Wea Rev*, 132(10): 2477-2494.
- Han J, Pan H L. 2006. Sensitivity of hurricane intensity forecast to convective momentum transport parameterization. *Mon Wea Rev*, 134(2): 664-674.
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon Wea Rev*, 124(10): 2322-2339
- Mahfouf J F. 1999. Influence of physical processes on the tangent-linear approximation. *Tellus A*, 51(2): 147-166
- Mahfouf J F, Rabier F. 2000. The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. II: Experimental results with improved physics. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(564): 1171-1190
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system; Methodology and validation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(529): 73-119
- Morcrette J J, Barker H W, Cole J N S, et al. 2012. Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF integrated forecasting system. *Mon Wea Rev*, 136(12): 4773-4798
- Rabier F, Järvinen H, Klinker E, et al. 2000. The ECMWF operational implementation of four - dimensional variational assimilation. I: Experimental results with simplified physics. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(564): 1143-1170
- Tompkins A M, Janisková M. 2004. A cloud scheme for data assimilation: Description and initial tests. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130(602): 2495-2517.
- Verlinde J, Cotton W R. 1993. Fitting microphysical observations of nonsteady convective clouds to a numerical model: An application of the adjoint technique of data assimilation to a kinematic model. *Mon Wea Rev*, 121(10): 2776-2793
- Xue J S, Zhuang S Y, Zhu G F, et al. 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional variational data assimilation system of GRAPES. *Chinese Sci Bull*, 53(22): 3446-3457
- Zou X. 1997. Tangent linear and adjoint of "on-off" processes and their feasibility for use in 4-dimensional variational data assimilation. *Tellus A*, 49(1): 3-31