

张梦, 王宏, 黄兴友. 2014. NASA/Goddard 长波辐射方案在 GRAPES\_Meso 模式中的应用研究 [J]. 大气科学, 38 (3): 603–614, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13165. Zhang Meng, Wang Hong, Huang Xingyou. 2014. Application research of the NASA/Goddard longwave radiative scheme in the GRAPES\_Meso model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 603–614.

# NASA/Goddard 长波辐射方案在 GRAPES\_Meso 模式中的应用研究

张梦<sup>1,2</sup> 王宏<sup>2</sup> 黄兴友<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

<sup>2</sup> 中国气象科学研究院大气成分研究所, 北京 100081

**摘 要** 本文将 NASA (National Aeronautics and Space Administration) /Goddard 长波辐射方案引入到 GRAPES\_Meso (Global/Regional Assimilation and Prediction System\_Meso) 模式中, 对 2006 年 4 月中国地区进行了一个月的模拟试验, 并与相应的 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析资料进行了对比分析。试验结果表明: 在模拟区域内, 使用 GRAPES\_Meso 模式进行 24 h、48 h 预报得到的晴空大气顶向外长波辐射通量 (the clear sky outgoing longwave radiation flux, OLRC)、地面接收到向下长波辐射通量 (the clear sky downward longwave radiation flux at ground, GLWC) 分布形势与 NCEP 再分析资料具有较好的对应关系; 模式预报 24 h、48 h OLRC 和 NCEP 再分析资料月平均误差百分比控制在  $-10\% \sim +10\%$  以内, GLWC 月平均误差百分比比 OLRC 略大, 但总体上两者误差都在合理和可接受范围之内。OLRC 和 GLWC 24 h、48 h 的预报和 NCEP 再分析资料的逐日距平相关系数及标准误差的对比显示, 模式 24 h 预报 OLRC、GLWC 的距平相关系数月平均值分别为 0.96、0.98, 标准误差月平均值分别为  $24.54 \text{ W m}^{-2}$ 、 $27.23 \text{ W m}^{-2}$ ; 模式 48 h 预报 OLRC、GLWC 的距平相关系数月平均值分别为 0.9521、0.9804, 标准误差月平均值分别为  $22.43 \text{ W m}^{-2}$ 、 $27.64 \text{ W m}^{-2}$ 。总体上, 模式 24 h、48 h 预报 OLRC 和 GLWC 的距平相关系数都在 0.93 以上, 标准误差都在  $31 \text{ W m}^{-2}$  以内, 且 GLWC 预报和 NCEP 再分析资料的相关性比 OLRC 略好, OLRC 预报与 NCEP 再分析资料的的标准误差比 GLWC 略小。通过和 RRTM 长波辐射方案对比可知, 两者的预报水平基本一致。本研究结果表明, 引入 NASA/Goddard 长波辐射方案后的 GRAPES\_Meso 模式整体上能够较好地预报 OLRC 和 GLWC, 该辐射方案可以作为模式 GRAPES\_Meso 的备选辐射方案之一。

**关键词** 长波辐射方案 GRAPES\_Meso 模式 晴空大气层顶向外长波辐射通量 (OLRC) 晴空地面接收到向下长波辐射通量 (GLWC)

文章编号 1006-9895(2014)03-0603-12

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13165

## Application Research of the NASA/Goddard Longwave Radiative Scheme in the GRAPES\_Meso Model

ZHANG Meng<sup>1,2</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>, and HUANG Xingyou<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Institute of Atmospheric Composition, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract** The National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard long-wave radiative scheme is

收稿日期 2013-05-02, 2013-09-08 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 2014CB441201, 国家自然科学基金项目 41275007, 中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目 2013Z007

作者简介 张梦, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事 GRAPES 模式应用研究。E-mail: zhangmengxiang218@126.com

通讯作者 王宏, E-mail: wangh@cma.gov.cn

integrated into the Global/Regional Assimilation and Prediction System Mesoscale (GRAPES\_Meso) model in this study. One month of simulation experiments conducted in China and its nearby areas are compared with the corresponding National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data recorded in April 2006. The results show that the distribution of the clear-sky outgoing longwave radiation flux (OLRC) at the top of atmosphere and downward long wave radiation flux at ground (GLWC) of 24- and 48-hour forecasts by using the GRAPES\_Meso model are in good agreement with the NCEP reanalysis data. The monthly average percentage error of the OLRC of these forecasts is within  $-10\%$  and  $10\%$ . Although the monthly average percentage error of the GLWC is slightly larger than that of the OLRC, both are within a reasonable and acceptable range. The comparison study of the daily averaged anomaly correlation coefficient and standard error of these fluxes of the both forecasts show that the monthly averaged anomaly correlation coefficients of the OLRC and the GLWC of the 24-hour forecast are 0.96 and 0.98, respectively, and that the monthly averaged standard errors are  $24.54 \text{ W m}^{-2}$  and  $27.23 \text{ W m}^{-2}$ , respectively. Those of the OLRC and the GLWC of the 48-hour forecast are 0.95 and 0.98 and  $22.43 \text{ W m}^{-2}$  and  $27.64 \text{ W m}^{-2}$ , respectively. Overall, the daily averaged anomaly correlation coefficient of the OLRC and the GLWC of both 24-hour and 48-hour forecasts are above 0.93, and the daily standard error is within  $31 \text{ W m}^{-2}$ . Moreover, the correlation of the GLWC and the NCEP reanalysis data is stronger than that of the OLRC, whereas the standard error of the OLRC and the NCEP reanalysis data is smaller than that of the GLWC. A comparison of the longwave radiative schemes of the rapid radiative transfer (RRTM) and the NASA/Goddard models reveal that the forecasting of the two schemes is essentially identical. The results of OLRC and the GLWC show that NASA/Goddard longwave radiative scheme may be appropriate for application to the GRAPES\_Meso model.

**Keywords** Longwave radiative scheme, GRAPES\_Meso model, Clear sky outgoing longwave radiation flux (OLRC), Clear sky downward longwave radiation flux at ground (GLWC)

## 1 引言

辐射过程是地气系统能量平衡不可缺少的重要过程之一,在影响天气、气候等方面起到至关重要的作用。最近几十年来,辐射过程的研究取得很多进展(Shi, 1984; 石广玉, 1998; 沈志宝和魏丽, 2000; 张华和石广玉, 2000; Zhang and Shi, 2002; Wang et al., 2004b; 王宏等, 2007; 石广玉等, 2008)。辐射参数化方案也被广泛用于中期天气预报模式和气候模式中(王标, 1996; Wang et al., 2004a; 王曼等, 2005; 沈元芳和胡江林, 2006; 刘玉芝等, 2007; 李剑东等, 2009; 杨学胜等, 2009)。

地气系统(包括云、大气和地表)反射了大气外界入射太阳辐射的 30% 左右,而吸收了剩余的部分,为了维持能量平衡状态,被地气系统所吸收的太阳辐射能必须重新向太空放射。正像太阳在所有频率上发射电磁辐射那样,地气系统也同样如此,而这种发射辐射称为长波辐射。一个精确、高效的长波辐射方案不仅是天气、气候数值模式中不可或缺的重要物理过程之一,而且对于模式性能和计算效率具有重要影响(Fels and Kaplan, 1975; Ramanathan et al., 1983; Luther et al., 1988; Ellingson et al., 1991; 沈元芳等, 2003, 2004)。在天气和气候数值模式模拟中,长波辐射通量的计算可能会花费总计算时间的三分之一或更多。当模式的时空分

辨率增加和物理过程的处理改进时,我们很清楚需要一个快速和精确的长波辐射参数化方案。

目前, GRAPES\_Meso (Global/Regional Assimilation and Prediction System\_Meso) 模式中包含很多短波辐射参数化方案,如简单短波辐射方案(Dudhia, 1989)、Goddard 短波辐射方案(Chou and Suarez, 1999)、GFDL (Geophysical Dynamics Laboratory) 短波辐射方案(Lacis and Hansen, 1974)、ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast) 短波辐射方案(Morcrette, 1990)等,而长波辐射方案相对较少,只有 GFDL 长波辐射方案(Schwarzkopf and Fels, 1991), ECMWF 长波辐射方案(Morcrette, 1990)和相关  $k$ -分布方法的 RRTM (Rapid Radiation Transfer Model) 长波辐射方案(Mlawer et al., 1997)。

本文拟将 NASA/Goddard  $k$ -分布长波辐射方案(Chou et al., 2001) 引入 GRAPES\_Meso 模式中。该方案采用  $k$ -分布法计算辐射通量和冷却率,是计算精度上可与逐线模式一致的快速辐射传输模式,已被广泛地应用于各种大气模式的大气辐射传输研究中。

## 2 模式系统介绍

### 2.1 GRAPES\_Meso 模式

GRAPES\_Meso 模式是中国气象科学研究院开

发的新一代区域非静力半隐式半拉格朗日中尺度数值预报模式(陈德辉和沈学顺, 2006)。该模式动力框架(Yang et al., 2008)采用了全可压方程、半隐式半拉格朗日的时间积分和平流方案、经纬度格点的网格设计、高度地形追随坐标和水平方向 Arakawa-C 跳点格式等设置。物理过程参数化方案(Xu et al., 2008)包括积云对流参数化、微物理、长波和短波辐射、近地面层参数化、边界层参数化、陆面参数化等。其中, 积云对流参数化方案包括 BMJ (Betts Miller Janjic) 方案、KFeta (Kain Fritsch eta) 方案、SAS (Simplified Arakawa Schubert) 方案, 微物理方案包括 Kessler 方案、Lin 方案、Ncep-3class (NCEP simple ice) 方案、Ncep-5class (NCEP mixed phase) 方案等, 长波辐射方案包括 RRTM 长波方案、ECMWF 长波方案、GFDL 长波方案, 短波辐射方案包括简单短波方案、Goddard 短波方案、GFDL 短波方案、ECMWF 短波方案等, 近地面层参数化方案包括 Monin-Obukhov 方案、MYJSFC (Mellor Yamada Janjic SFC) 方案, 边界层参数化方案包括 MRF (Medium Range Forecast Model) 方案、MYJ-PBL (Mellor Yamada Janjic PBL) 方案等, 陆面参数化方案包括热扩散方案等。

本文引进 NASA/Goddard 的  $k$ -分布长波辐射参数化, 可以使 GRAPES\_Meso 模式有一套完整的 Goddard 长、短波辐射参数化方案。微物理采用 Ncep-5class 方案, 考虑水汽 ( $q_v$ )、云水 ( $q_c$ )、雨水 ( $q_r$ )、云冰 ( $q_i$ ) 和雪水 ( $q_s$ ) 五种水物质。另外, 积云对流选择 BMJ 方案, 近地面和陆面过程分别为 Monin-Obukhov 和热扩散方案, 边界层参数化采用 MRF 方案。

GRAPES\_Meso 模式区域范围涵盖中国及周边地区 ( $15.125^{\circ}\text{N}\sim 64.875^{\circ}\text{N}$ ,  $70.00^{\circ}\text{E}\sim 149.75^{\circ}\text{E}$ ), 水平分辨率  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ , 垂直层数 32, 积分步长 300 秒, 辐射每小时计算一次。模式选用 NCEP  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 、26 层的分析资料作为初始场和侧边界进行预报, 积分时间为 72 小时, 起报时间为 00:00 (协调世界时, 下同)。

## 2.2 NASA/Goddard 长波辐射方案

Goddard 长波辐射方案是 Chou and Suarez (2001) 在 NASA/GSFC (NASA Goddard Space Flight Center) 气候和辐射分部研制的, 已用于 Goddard 大气试验室各种大气模式, 包括大气环流模式 (Koster and Suarez, 1986) 和云集合模式 (Tao

et al., 1996), 也应用于各大学和政府机构。它计算了由于水汽、 $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_3$  主要吸收带引起的吸收, 由于  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  和 CFC's (氯氟烃类化合物) 等次要微量气体引起的吸收, 以及由于云和气溶胶引起的吸收和散射。气溶胶光学性质由输入的参数确定。长波辐射的光谱按波数划分成 10 个带, 光谱波数从  $0\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 。这些长波辐射方案不仅在对流层和较低平流层, 而且也在中层 (一直到  $0.01\text{ hPa}$  层) 计算冷却率方面显示了精确性和有效性。Chou and Suarez (2001) 曾仔细地对本文使用的辐射方案与高分辨率逐线计算的精确计算作了验证, 通量可精确到高分辨率逐线计算的 1%之内, 而大气冷却率的计算精确性可从地表延伸到  $0.01\text{ hPa}$  层。

为了计算热红外辐射通量, 热红外辐射谱带分为 9 个带和 1 个次带。表 1 给出了 10 个谱带的谱域以及各带中包括的吸收体。水汽吸收线 ( $\text{H}_2\text{O}$  line) 吸收覆盖了整个红外谱, 而水汽吸收域 ( $\text{H}_2\text{O}$  continuum) 吸收在  $540\sim 1380\text{ cm}^{-1}$  谱域中。 $\text{CO}_2$  吸收在  $540\sim 800\text{ cm}^{-1}$  谱域中,  $\text{O}_3$  吸收在  $980\sim 1100$

表1 谱带、吸收体和透射参数化方法

Table 1 Spectral bands, absorbers, and transmittance parameterization

谱带	波数/ $\text{cm}^{-1}$	吸收体	透射参数化
			方法的选择 “low”/“high”
1	$0\sim 340$	水汽吸收线	K/T
2	$340\sim 540$	水汽吸收线	K/T
3a	$540\sim 620$	水汽吸收线	K/T
3b	$620\sim 720$	水汽吸收域	C/C
3c	$720\sim 800$	二氧化碳	K/T
4	$800\sim 980$	水汽吸收线	K/K
		水汽吸收域	C/C
		二氧化碳, 一氟三氯甲烷, 二氟二氯甲烷, 一氯二氟甲烷	K/K
5	$980\sim 1100$	水汽吸收线, 二氧化碳, 一氟三氯甲烷	K/K
		水汽吸收域	C/C
		臭氧	T/T
6	$1100\sim 1215$	水汽吸收线	K/K
		水汽吸收域	C/C
		水汽, 甲烷, 二氟二氯甲烷, 一氯二氟甲烷	K/K
7	$1215\sim 1380$	水汽吸收线, 一氧化二氮, 甲烷	K/K
		水汽吸收域	C/C
8	$1380\sim 1900$	水汽吸收线	K/T
9	$1900\sim 3000$	水汽吸收线	K/K
10	$540\sim 620$	水汽吸收线, 二氧化碳, 一氧化二氮	K/K
		水汽吸收域	C/C

$\text{cm}^{-1}$  谱域中。在 4~7 带  $800\sim 1380\text{ cm}^{-1}$  区域之间, 由于  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CFC's}$  和  $\text{CO}_2$  引起的次要吸收是分散的。由  $\text{N}_2\text{O}$  引起的吸收在 3a 次带, 这部分吸收被合并到 10 带中处理。表中列出“low”和“high”两种透射参数化方法, 提供程序中选择, 我们将在 GRAPES\_Meso 模式中的数值试验中选用“high”。

为了提高辐射通量透射计算的精度和速度, 根据不同吸收体和谱带, 采用 3 种不同的参数化方法: K 为吸收系数随气压线性变化的  $k$ -分布方法 ( $k$ -distribution method with linear pressure scaling), 应用于水汽和微量气体, 如果在中层大气 ( $p < 10\text{ hPa}$ ) 中不需要精确的冷却率计算, 那么这种方法也应用于带 3 中的  $\text{CO}_2$  吸收; T 为通过预先设置的查找表得到在不同气压和温度下的相关  $k$ -分布方法 (Table look-up with temperature and pressure scaling), 带 3 和 5 中  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_3$  吸收引起的透射可以从预先计算好的透射表中得到, 由于吸收系数随气压线性变化的  $k$ -分布方法低估了中层大气的水汽的冷却率, 如果在中层大气中需要水汽冷却率的精确计算, 那么 3 个最强的水汽吸收带 (带 1、2 和 8) 的透射也可从 1 预先计算好的透射表中得到; C 为水汽吸收域吸收的单参数温度换算的  $k$ -分布方法 (One-parameter temperature scaling for water vapor continuum absorption)。带 3~7 中由水汽吸收域由吸收引起的透射可以应用单参数的换算方法, 这些参数化应用于不同的谱带和吸收体, 如表 1 所示。

### 3 在 GRAPES\_Meso 模式中的数值试验

#### 3.1 数值试验设计

本文选用 2006 年 4 月 1 日至 4 月 30 日, 共计 30 天时间作为试验时段。每天的 00:00 进行 24 h 和 48 h 预报, 然后对每天的预报结果进行日平均。长波辐射传输方案对地气辐射平衡的影响在大气顶向外长波辐射和地面接收到的向下辐射通量两个变量上表现最为明显。为了剔除 GRAPES\_Meso 模式中云物理过程对辐射传输的影响, 单纯研究 NASA/Goddard 长波辐射传输方案在 GRAPES\_Meso 模式中的适应情况, 只对模式预报的晴空大气顶向外长波辐射通量 (OLRC) 及地面接收到的向下长波辐射通量 (GLWC) 进行了分析, 并与相

应的 NCEP 再分析资料进行逐日对比检验。本文主要在模拟区域对试验日期内 24 h、48 h 预报的 OLRC 和 GLWC 与 NCEP 月平均的相对误差百分比情况, 与 NCEP 日平均的距平相关系数、标准误差情况, 及其分布状况进行了分析。这里, 月平均误差百分比定义 (以 OLRC 为例) 为 GRAPES\_Meso 模式预报得出的 OLRC 月平均值与相应 NCEP 再分析资料所得 OLRC 月平均值之差, 再除以 NCEP 再分析资料所得 OLRC 月平均值。

#### 3.2 数值试验结果

图 1 给出了模拟区域内 OLRC 的 24 小时日平均预报结果与 NCEP 再分析资料的对比 (以 2006 年 4 月 10 日为例), 并将 30 天试验日期内 OLRC 月平均误差百分比进行了分析。GRAPES\_Meso 模式预报的 24 h OLRC 日平均值。在中国中东部, 有一个成西南—东北走向的 OLRC 高值区, 一直延伸到我国东北南部。在日本及其北部洋面有一个 OLRC 低值区, 并呈东北—西南走向延伸到我国台湾地区。在我国阿尔泰山地区及其东部地区, 分别有一个 OLRC 低值区。喜马拉雅山脉南侧地区, OLRC 等值线致密排列, 并在我国云南地区形成了一个西北—东南走向的 OLRC 低值区。图 1b 为 NCEP 再分析资料的 OLRC 日平均值, 在图 1b 中, 能很明显地找到与上述图 1a 中相似的特征。这说明, GRAPES\_Meso 模式预报的 24 h OLRC 能很好地反映 OLRC 等值线的分布情况。中国地区的 OLRC 的误差值大多数在  $-10\sim +30\text{ W m}^{-2}$  以内, 只是在喜马拉雅山脉南部的 OLRC 等值线致密地区和我国新疆北部地区误差较大。结合图 1c 所示 GRAPES\_Meso 模式 24 h 预报的 OLRC 与相应 NCEP 再分析资料 OLRC 的月平均误差百分比, 可知中国地区的误差百分比大多在  $-10\%\sim 10\%$  以内。喜马拉雅山脉南部的 OLRC 等值线致密地区和我国新疆地区误差百分比比较大, 但也在 20% 左右, 这是由于数值模式中, 地形坡度对长波辐射计算的影响造成的。在喜马拉雅山脉、昆仑山脉和天山山脉地区地形坡度大、模式分辨率高, 由此所计算的模式长波辐射就可因计算的面积和真实地表面面积的差异而产生较大误差 (陈斌等, 2006)。

图 2 a 和 b 所示为 GRAPES\_Meso 模式预报的 48 h OLRC 日平均和相应 NCEP 再分析资料的对比 (以 2006 年 4 月 10 日为例), 对照图 2b 可在图 2a 中找到与之相对应的特征。如我国东北北部的东西

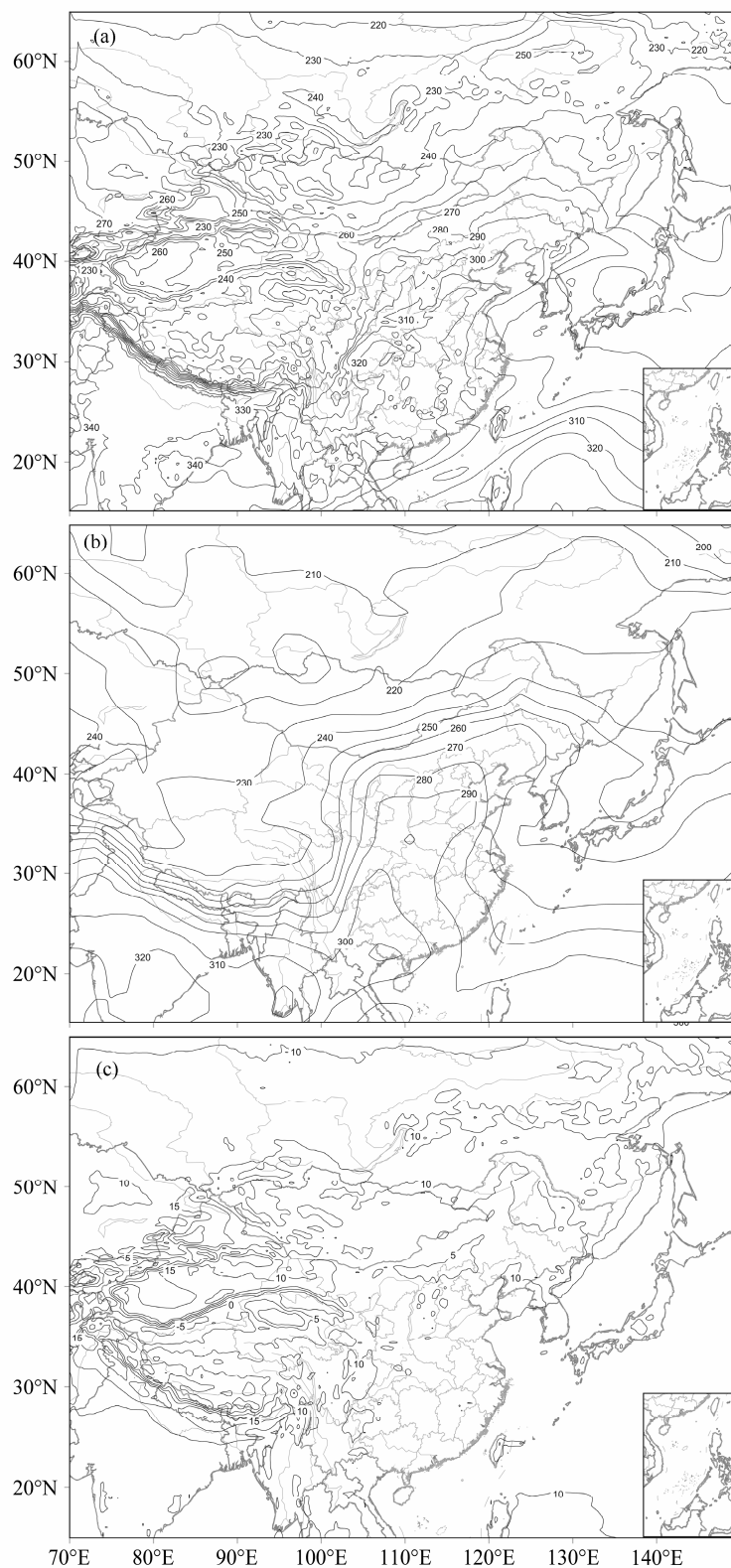


图1 2006年4月10日 (a) GRAPES\_Meso模式24 h预报、(b) NCEP再分析资料的OLRC日平均值(单位:  $\text{W m}^{-2}$ ); (c) GRAPES\_Meso模式24 h预报的OLRC的月平均误差百分比

Fig. 1 The daily average values of the clear sky outgoing long wave radiation flux (OLRC) on 10 April 2006 (unit is  $\text{W m}^{-2}$ ) from (a) the 24-h forecast of the GRAPES\_Meso model and (b) the NCEP reanalysis data; (c) the monthly average percentage error of the OLRC from the 24-h forecast of the GRAPES\_Meso model

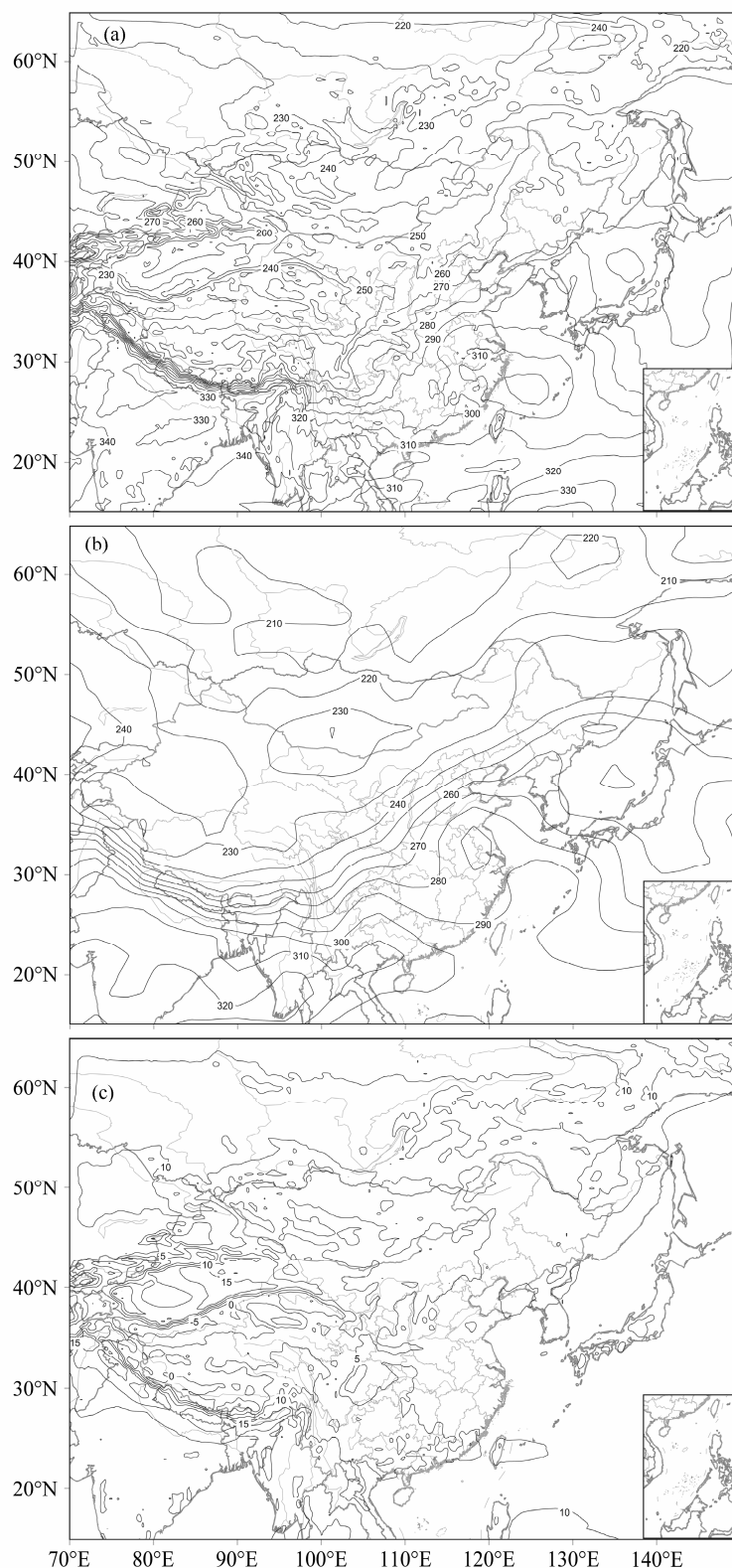


图2 (a) 2006年4月10日 GRAPES\_Meso 模式预报的48 h (11日00:00~12日00:00) OLR日平均值 (单位:  $W m^{-2}$ ); (b) 2006年4月11日 (11日00:00~12日00:00) NCEP 再分析资料的 OLR日平均值 (单位:  $W m^{-2}$ ); (c) GRAPES\_Meso 模式48 h 预报的 OLR月平均误差百分比  
Fig. 2 (a) The daily average value of the OLR on 10 April 2006 from 48-h forecast of the GRAPES\_Meso model (unit is  $W m^{-2}$ ), (b) the daily average value of the OLR on 11 April 2006 from the NCEP reanalysis data (unit is  $W m^{-2}$ ), (c) the monthly average percentage error of the OLR from the 48-h forecast of the GRAPES\_Meso model

伯利亚地区的 OLRC 高值区, 日本海洋面的低值区, 我国东南地区的高值区, 我国新疆附近地区的高值区, 喜马拉雅山脉南部的 OLRC 等值线致密地区等。中国地区的 OLRC 误差大多数在  $-20 \sim 20 \text{ W m}^{-2}$  以内, 只是在新疆地区的高值区和喜马拉雅山脉南部的 OLRC 等值线致密地区误差较大。结合图 2c, GRAPES\_Meso 模式 48 h 预报的 OLRC 月平均误差百分比可知, 大多数地区的 OLRC 误差百分比在  $-10\% \sim 10\%$  以内, 上述误差较大地区的误差百分比也在 20% 左右。

图 3a、b 中对比 GRAPES\_Meso 模式 24 h 预报 GLWC 的日平均值和相应的 NCEP 再分析资料的 GLWC 日平均值 (以 2006 年 4 月 10 日为例)。图 3a 中, 有和图 3b 相似的特征, 如新疆地区的 GLWC 高值区, 西藏青海地区的低值区、中国南海到日本海呈西南—东北走向的高值区、我国西南地区呈西北—东南走向的低值区等。结合图 3c, GRAPES\_Meso 模式 24 h 预报的 GLWC 月平均误差百分比, 可知预报值普遍比 NCEP 再分析资料要小, 大多数地区的 GLWC 误差百分比在  $-15\% \sim 0$  以内, 但在新疆地区的高值区、青藏高原地区的低值区和喜马拉雅山脉南部的等值线致密地区误差百分比比较大。

图 4a 和 b 为 GRAPES\_Meso 模式 48 h 预报 GLWC 的日平均值和相应的 NCEP 再分析资料 GLWC 的日平均值 (以 2006 年 4 月 10 日为例)。对比图 4a 和 b 可知, 两者有相似特征, 如贝加尔湖地区的 GLWC 低值区, 新疆地区的高值区, 西藏青海地区的低值区, 云南地区由西北向东南延伸的低值区, 我国东南地区向北延伸到华北地区的高值区, 日本地区由南向北延伸的高值区等。结合图 4c, GRAPES\_Meso 模式 48 h 预报的 GLWC 月平均误差百分比, 可知大多数地区的 GLWC 误差百分比在  $-15\% \sim 0$  以内。

为了方便比较 24 h、48 h GRAPES\_Meso 模式 OLRC、GLWC 预报结果和相应 NCEP 再分析资料, 图 5 分别作出了两者标准误差和距平相关系数随时间的变化。对图 5a、b 分析可知, 模式 24 h 预报 OLRC、GLWC 的距平相关系数月平均值分别为 0.96、0.98, 标准误差月平均值分别为  $24.54 \text{ W m}^{-2}$ 、 $27.23 \text{ W m}^{-2}$ ; 对图 5c、d 分析可知, 模式 48 h 预报 OLRC、GLWC 的距平相关系数月平均值分别为 0.95、0.98, 标准误差月平均值分别为  $22.43 \text{ W m}^{-2}$ 、 $27.64 \text{ W m}^{-2}$ 。总体来说, 24 h、48 h OLRC 和 GLWC

的距平相关系数都在 0.93 以上且标准误差在  $31 \text{ W m}^{-2}$  以内, 说明两者的预报结果和相应的 NCEP 再分析资料的相关性都比较好, 且 24 h 预报结果略好于 48 h 预报。虽然 GLWC 的标准误差比 OLRC 略高, 但与 NCEP 再分析资料的相关性却较好, 因为 OLRC 的距平相关系数波动比 GLWC 略大, 且比 GLWC 得到的结果略小, 所以引入 RRTM 长波辐射方案对 OLRC 进行对比。由图 5e 可知, RRTM 长波辐射方案得到 24 h 预报 OLRC 的距平相关系数月平均值为 0.96, 48 h 预报 OLRC 的距平相关系数月平均值为 0.95。图 5e 与图 5b、d 中 OLRC 进行对比可知, 两个方案的 OLRC 距平相关系数随时间的变化基本一致, 且距平相关系数值也基本相同。图中 4 月中旬 OLRC 都有一个明显的相关系数的极小值, 这是因为这期间东亚地区经历了一次典型的强沙尘暴天气过程。

## 4 结论

本文在 GRAPES\_Meso 模式中引入 NASA/Goddard 的长波辐射参数化方案, 并针对 2006 年 4 月 1~30 日进行了一个月的试验, 分别对中国地区 OLRC 和 GLWC 日平均值进行分析, 并分析试验时段内两变量的月平均误差百分比及标准误差、距平相关系数逐日变化。试验对比结果表明:

(1) 通过 GRAPES\_Meso 模式 24 h、48 h 预报的 OLRC、GLWC 和相应 NCEP 再分析资料日平均值对比, 可知引入 NASA/Goddard 长波辐射参数化方案后的 GRAPES\_Meso 模式能较好的预报 OLRC 和 GLWC 的分布情况。

(2) 分析 2006 年 4 月 GRAPES\_Meso 模式 24 h、48 h 预报的 OLRC 和 GLWC 月平均误差百分比可知, 大多数地区 24 h、48 h 预报的 OLRC 月平均误差百分比在  $-10\% \sim +10\%$  以内, 而 24 h、48 h 预报的 GLWC 月平均误差百分比要比 OLRC 较大。不过总体上, 引入 NASA/Goddard 长波辐射参数化方案后的 GRAPES\_Meso 模式预报 OLRC 和 GLWC 两变量的月平均误差比较理想。

(3) 对 2006 年 4 月中国地区的 OLRC、GLWC 和相应日平均 NCEP 再分析资料的距平相关系数及标准误差分析可知, 模式 24 h 预报 OLRC、GLWC 的距平相关系数月平均值分别为 0.96、0.98, 标准误差月平均值分别为  $24.54 \text{ W m}^{-2}$ 、 $27.23 \text{ W m}^{-2}$ ; 模式 48 h 预报 OLRC、GLWC 的距平相关系数月平

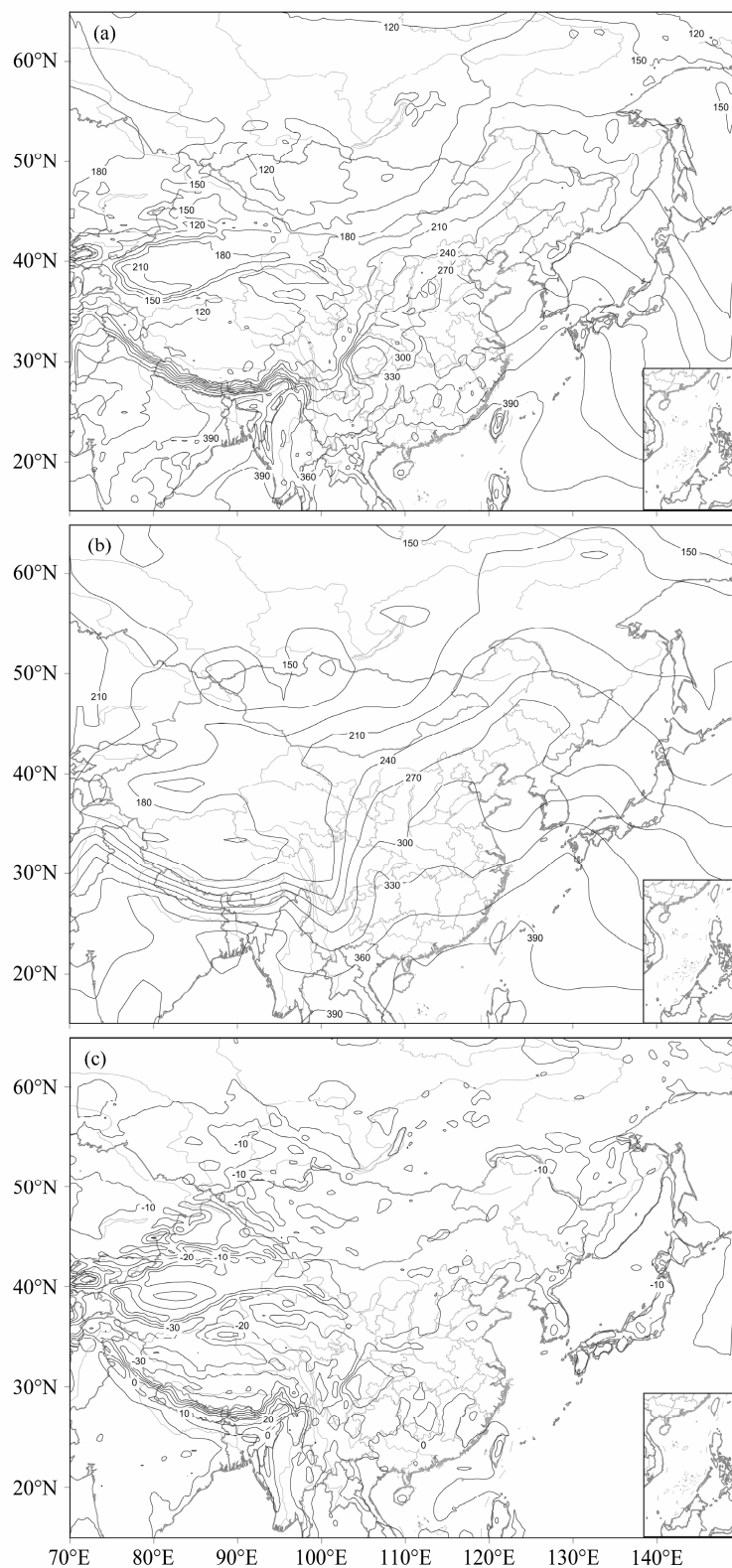


图3 2006年4月10日 (a) GRAPES\_Meso 模式 24 h 预报、(b) NCEP 再分析资料的 GLWC 日平均值 (单位:  $\text{W m}^{-2}$ ); (c) GRAPES\_Meso 模式 24 h 预报的 GLWC 月平均误差百分比

Fig. 3 The daily average value of the clear sky downward long wave radiation flux at ground (GLWC) on 10 April 2006 (unit is  $\text{W m}^{-2}$ ) from (a) the 24-h forecast of the GRAPES\_Meso model and (b) the NCEP reanalysis data; (c) the monthly average percentage error of the GLWC from the 24-h forecast of the GRAPES\_Meso model



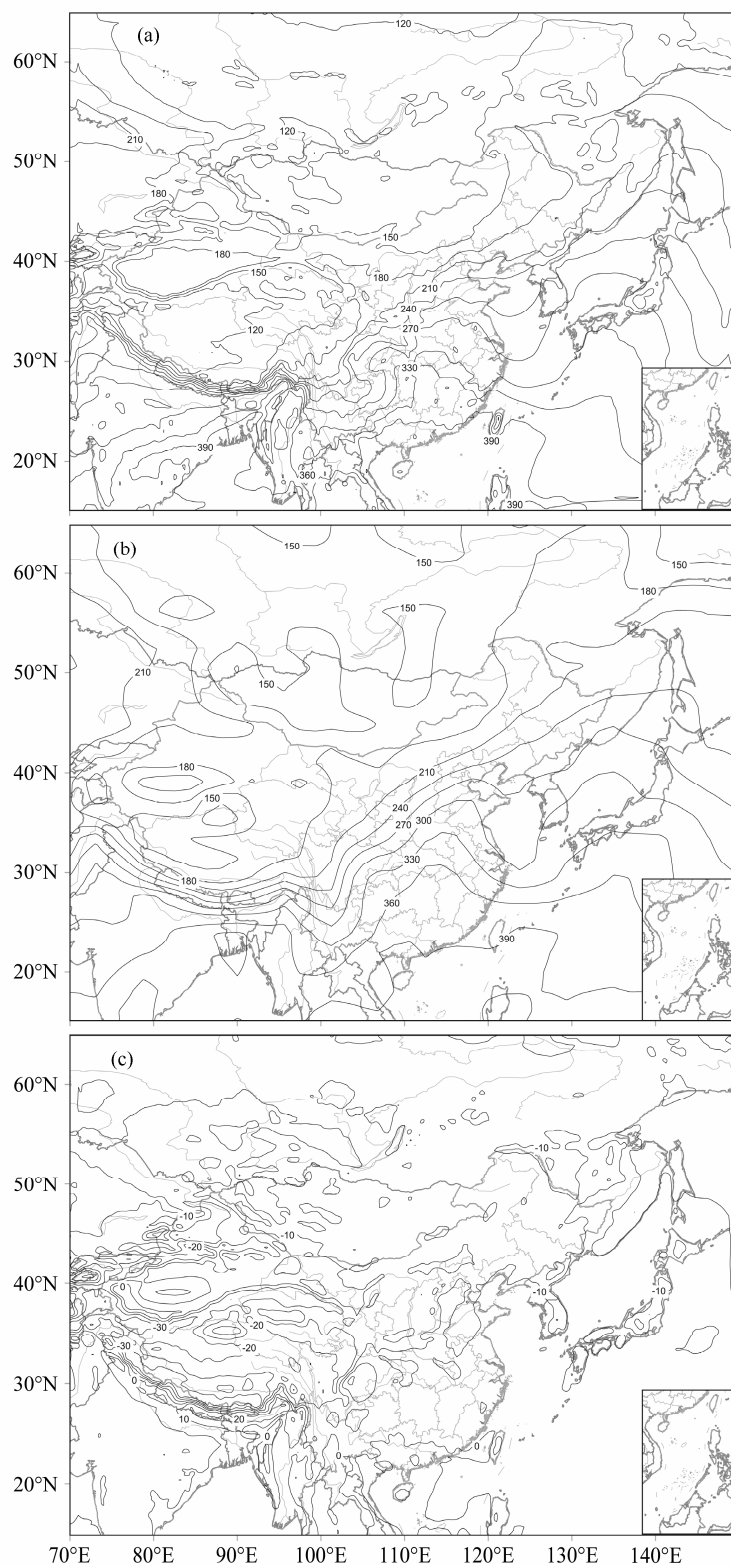


图4 (a) 2006年4月10日 GRAPES\_Meso 模式预报的48 h (11日00:00~12日00:00) GLWC日平均值(单位:  $\text{W m}^{-2}$ ); (b) 2006年4月11日 (11日00:00~12日00:00) NCEP再分析资料的 GLWC日平均值(单位:  $\text{W m}^{-2}$ ); (c) GRAPES\_Meso 模式48 h 预报的 GLWC月平均误差百分比  
Fig. 4 (a) The daily average value of the GLWC on 10 April 2006 from 48-h forecast of the GRAPES\_Meso model (unit is  $\text{W m}^{-2}$ ), (b) the daily average value of the GLWC on 11 April 2006 from the NCEP reanalysis data (unit is  $\text{W m}^{-2}$ ), (c) the monthly average percentage error of the GLWC from the 48-h forecast of the GRAPES\_Meso model

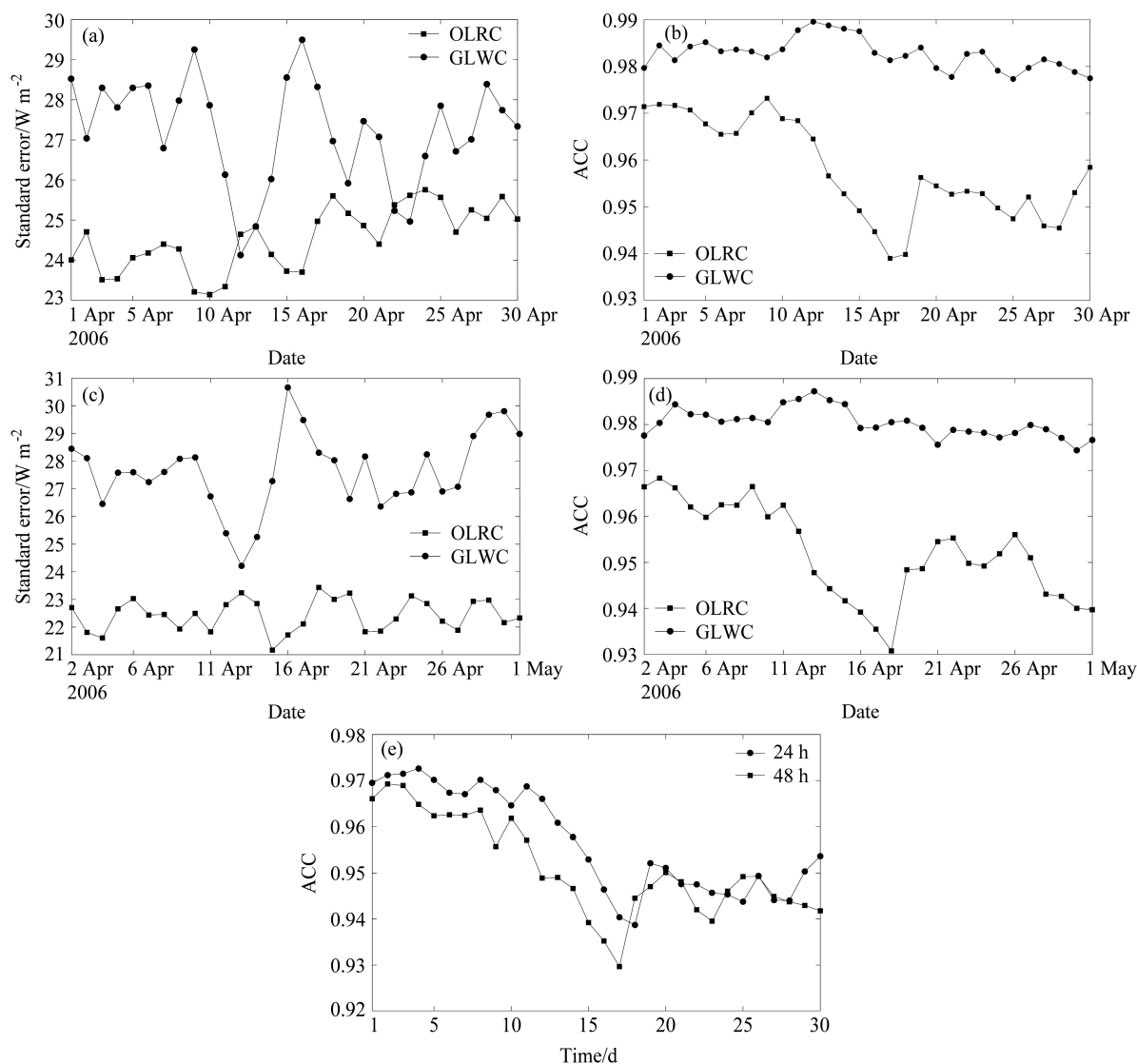


图5 2006年4月1~30日GRAPES\_Meso模式预报的OLRC、GLWC与相应NCEP再分析资料的(a、c)标准误差、(b、d)距平相关系数随时间的变化:(a、b)24h预报,(c、d)48h预报。(e)GRAPES\_Meso模式采用RRTM长波辐射方案得到24h、48h预报的OLRC与相应NCEP再分析资料的距平相关系数随时间的变化

Fig. 5 The evolution of (a, c) the standard error and (b, d) the anomaly correlation coefficient (ACC) for the OLRC and the GLWC from the GRAPES\_Meso model with the corresponding NCEP reanalysis data during 1–30 April 2006: (a, b) 24-h forecast, (c, d) 48-h forecast. (e) The evolution of the ACC for the OLRC from 24-h forecast and 48-h forecast of the GRAPES\_Meso model with the corresponding NCEP reanalysis data in April 2006, which adopts the RRTM longwave radiative scheme

均值分别为 0.95、0.98, 标准误差月平均值分别为  $22.43 W m^{-2}$ 、 $27.64 W m^{-2}$ 。无论模式 24 h 还是 48 h 预报 OLRC、GLWC 和 NCEP 再分析资料的相关系数都在 0.93 以上, 且标准误差都在  $31 W m^{-2}$  以内。24 h 预报二者相关性要好于 48 h, GLWC 的相关性比 OLRC 略好, 但 OLRC 的标准误差比 GLWC 小。

(4) 由上述三点及与 RRTM 长波辐射方案的对比得出, 在 GRAPES\_Meso 模式中引入 NASA/Goddard 的长波辐射参数化方案, 能较好地对中国

地区的 OLRC、GLWC 进行预报。NASA/Goddard 的长波辐射参数化可以作为 GRAPES\_Meso 模式备选方案之一。

对模式改进的检验, 应落实于地面场如气温和降水的模拟和预报效果。但本文的重点放在对长波辐射方案的讨论, 对长波辐射来说 OLRC 和 GLWC 辐射通量是两个重要的变量。地面场如气温的预报效果, 不仅和长波辐射有关, 还和短波辐射有关。降水预报效果所涉及因素更多, 不仅有辐射方

案, 还有微物理方案、积云对流参数化方案等。限于本文的重点和篇幅, 这部分工作将在今后做进一步研究。

## 参考文献 (References)

- 陈斌, 张耀存, 丁裕国. 2006. 地形起伏对模式地表长波辐射计算的影响 [J]. 高原气象, 25 (3): 406–412. Chen Bin, Zhang Yaocun, Ding Yugu. 2006. The effect of terrain fluctuation on the computed surface long-wave radiation in the models [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 406–412.
- 陈德辉, 沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 773–777. Chen Dehui, Shen Xueshun. 2006. Recent progress on GRAPES research and application [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 773–777.
- Chou M D, Suarez M J. 1999. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies [R]. NASA Tech. Memo., No. 10460, 15: 1–42.
- Chou M D, Suarez M J, Liang X Z, et al. 2001. A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies [R]. NASA Tech. Memo., No. 104606, 19: 1–55.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. J. Atmos. Sci., 46 (20): 3077–3107.
- Ellingson R G, Ellis J, Fels S B. 1991. The intercomparison of radiation codes used in climate models: Long wave results [J]. J. Geophys. Res., 96 (D5): 8929–8953.
- Fels S B, Kaplan L D. 1975. A test of the role of long wave radiative transfer in a general circulation model [J]. J. Atmos. Sci., 32 (4): 779–789.
- Koster R D, Suarez M J. 1986. Relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability [J]. J. Atmos. Sci., 43 (D7): 13775–13790.
- Lacis A A, Hansen J E. 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere [J]. J. Atmos. Sci., 31 (1): 118–133.
- 李剑东, 刘屹岷, 孙治安, 等. 2009. 辐射和积云对流过程对大气辐射通量的影响 [J]. 气象学报, 67 (3): 355–369. Li Jiandong, Liu Yimin, Sun Zhian, et al. 2009. The impacts of the radiation and cumulus convective parameterization on the radiation fluxes in SAMIL [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 355–369.
- 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 2007. 一维辐射对流模式对云-辐射强迫的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 31 (3): 486–494. Liu Yuzhi, Shi Guangyu, Zhao Jianqi. 2007. A study of the radiative forcing of clouds by using a one-dimensional radiative-convective model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 486–494.
- Luther F M, Ellingson R G, Fouquart Y, et al. 1988. Intercomparison of radiation codes in climate models (ICRCCM). Longwave clear-sky results—A workshop summary [J]. Bull. Am. Meteor. Soc., 69 (1): 40–48.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated- $k$  model for the longwave [J]. J. Geophys. Res., 102 (D14): 16663–16682.
- Morcrette J J. 1990. Impact of changes to the radiation transfer parameterizations plus cloud optical properties in the ECMWF model [J]. Mon. Wea. Rev., 118 (4): 847–873.
- Ramanathan V, Pitcher E J, Malone R C, et al. 1983. The response of a spectral general circulation model to refinements in radiative processes [J]. J. Atmos. Sci., 40 (3): 605–630.
- Schwarzkopf M D, Fels S B. 1991. The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes [J]. J. Geophys. Res., 96 (D5): 9075–9096.
- 沈元芳, 胡江林. 2006. GRAPES 模式中的坡地辐射方案及其对短期天气过程模拟的影响 [J]. 大气科学, 30 (6): 1129–1137. Shen Yuanfang, Hu Jianglin. 2006. Slope irradiance scheme in GRAPES and its effect on simulation of short-range weather processes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1129–1137.
- 沈元芳, Baer F, 王超. 2003. 初始场和长波辐射对气候模拟的影响 [J]. 应用气象学报, 14 (3): 266–276. Shen Yuanfang, Baer F, Wang Chao. 2003. Impact of initial field and long wave radiation on climate modeling [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (3): 266–276.
- 沈元芳, 黄丽萍, 徐国强, 等. 2004. 长波辐射对大气变化的敏感性和在 WRF 模式中的应用检验 [J]. 气象学报, 62 (2): 213–227. Shen Yuanfang, Huang Liping, Xu Guoqiang, et al. 2004. The sensitivity of long wave radiation to atmospheric changes and the simulating in the Weather Research and Forecast (WRF) Model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (2): 213–227.
- 沈志宝, 魏丽. 2000. 我国西北大气沙尘气溶胶的辐射效应 [J]. 大气科学, 24 (4): 541–548. Shen Zhibao, Wei Li. 2000. Radiative effects of atmospheric dust aerosol in Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 541–548.
- Shi G Y. 1984. Effect of atmospheric overlapping bands and their treatment on the calculation of thermal radiation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1 (2): 246–255.
- 石广玉. 1998. 大气辐射计算的吸收系数分布模式 [J]. 大气科学, 22 (4): 659–676. Shi Guangyu. 1998. On the  $K$ -distribution and correlated  $K$ -distribution models in the atmospheric radiation calculations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 659–676.
- 石广玉, 王标, 张华, 等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. 大气科学, 32 (4): 826–840. Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. 2008. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 826–840.
- Tao W K, Long S, Simpson J, et al. 1996. Mechanisms of cloud-radiation interaction in the tropics and midlatitudes [J]. J. Atmos. Sci., 53 (18): 2624–2651.
- 王标. 1996. 气候模拟中的辐射传输模式 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Wang Biao. 1996. On the radiation transfer models for climate simulation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, China Academy of Sciences.
- Wang B, Wan H, Ji Z Z, et al. 2004a. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods [J]. Science in China (Ser. A), 47 (Suppl.1): 4–21.
- Wang H, Shi G Y, Aoki T, et al. 2004b. Radiative forcing due to dust aerosol over East Asia–North Pacific region during spring, 2001 [J]. Chinese

- Science Bulletin, 49 (20): 2212–2219.
- 王宏, 石广玉, 王标, 等. 2007. 中国沙漠沙尘气溶胶对沙漠源区及北太平洋地区大气辐射加热的影响 [J]. 大气科学, 31 (3): 515–526.
- Wang Hong, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. 2007. The impacts of dust aerosol from deserts of China on the radiative heating rate over desert sources and the North Pacific region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 515–526.
- 王曼, 沈元芳, 韩慎友, 等. 2005. 两组辐射方案对中国短期天气过程影响的比较和探讨 [J]. 大气科学, 29 (4): 654–670. Wang Man, Shen Yuanfang, Han Shenyou, et al. 2005. Impact of two group radiation parameterization schemes on simulation of short-range weather process in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 654–670.
- Xu G Q, Chen D H, Xue J S, et al. 2008. The program structure designing and optimizing tests of GRAPES physics [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3470–3476.
- Yang X S, Hu J L, Chen D H, et al. 2008. Verification of GRAPES unified global and regional numerical weather prediction model dynamic core [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3458–3464.
- 杨学胜, 沈元芳, 徐国强. 2009. 辐射方案对 GRAPES 全球模式的影响 [J]. 大气科学, 33 (3): 593–599. Yang Xuesheng, Shen Yuanfang, Xu Guoqiang. 2009. The impacts of radiation schemes on the GRAPES global model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 593–599.
- 张华, 石广玉. 2000. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法 [J]. 大气科学, 24 (1): 111–121. Zhang Hua, Shi Guangyu. 2000. A fast and efficient line-by-line calculation method for atmospheric absorption [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (1): 111–121.
- Zhang H, Shi G Y. 2002. Numerical explanation for accurate radiative cooling rates resulting from the correlated *K*-distribution hypothesis [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 74 (3): 299–306.