黄刚,胡开明. 利用大气环流模式讨论舍入误差对东亚和西北太平洋夏季气候模拟的影响[J]. 南京气象学院学报,2009,32(2):155-163.

利用大气环流模式讨论舍入误差对东亚和西北太平洋夏季气候模拟的影响

黄刚[1],胡开明[2,3]

(1. 中国科学院 大气物理研究所 东亚区域气候环境重点实验室,北京 100029;
2. 中国科学院 大气物理研究所 季风系统研究中心,北京 100190;3. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

摘要:采用单精度和双精度编译的大气环流模式对东亚以及西北太平洋气候进行集合模拟,分析舍入误差对大气环流模式在东亚和西北太平洋区域夏季气候模拟的影响,结果表明采用双精度编译的模式在 850 hPa 环流场比单精度模式模拟效果要好。为了进一步分析双精度模式模拟效果优于单精度模式的原因,集中研究了 850 hPa 纬向风场的模拟情况。结果表明,双精度模式对东亚以及西太平洋 850 hPa 纬向风场第 1 模态有着更好的模拟,而且第 2 模态的时间序列与再分析资料 850 hPa 纬向风场的第 2 模态时间序列有着更好的相关。这些结果表明,由于舍入误差的影响使得该区域大气内部噪音更强烈,从而使得海温强迫导致的气候变率变弱,进而使得双精度编译的模式对东亚和西北太平洋区域气候的模拟要优于单精度模式。

关键词:舍入误差;西北太平洋;东亚气候;大气环流模式
中图分类号:P435 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-2022(2009)02-0155-09

Influence of Round-off Error on Simulation of Summer Climate in the Northwestern Pacific and East Asia in an AGCM

HUANG Gang[1], HU Kai-ming[2,3]

(1. RCE-TEA, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The influence of round-off error on summer climate simulation in the northwestern Pacific and East Asia has been investigated by using AGCM(atmospheric general circulation model) which is compiled by single precision and double precision. It is found that double precision computation has better skill than single precision one when simulating zonal wind at 850 hPa in the region. And the reason is also investigated, and the simulating results of 850 hPa zonal wind are mainly studied. The first empirical orthogonal function(EOF) mode of 850 hPa zonal wind simulated by double precision computation is better than that by single precision one, and the second mode time series of the double precision computations has a higher correlation coefficient with the second EOF mode time series of observations. Results show that the round-off error may result in higher atmospheric internal noise in the northwestern Pacific and East Asia, which can weaken the model simulation skill, therefore the double precision computation can better simulate climate than single precision one in this region.

Key words: round-off error; northwestern Pacific; climate in East Asian; AGCM

0 引言

东亚的气候有着独特的特征,是典型的季风气候。由于季风的年际变化导致的洪涝灾害给东亚各国带来严重的经济损失。Huang 等[1-2]和 Nitta[3]指出了菲律宾附近海域上空的对流活动对东亚气候的

收稿日期:2009-01-05;**改回日期**:2009-02-26
基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418300;2006CB400500);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-220);国家自然科学基金资助项目(40775051;U0733002);中国科学院知识创新工程领域前沿项目(IAP07314;IAP07119)
作者简介:黄刚(1971—),男,北京人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为季风动力学、全球变化及区域响应、数值模拟,hg@mail.iap.ac.cn.

影响,因此需要将东亚以及西北太平洋作为一个整体来研究。很多学者研究了热带西北太平洋和东亚夏季气候的变化规律。Wang 等[4-7]研究了热带西北太平洋夏季季风的变化规律以及对东亚夏季风的影响,指出热带西北太平洋夏季风(Western North Pacific summer monsoon,WPSM)在 850 hPa 风场上有很好的表现,当 WPSM 弱的时候在 850 hPa 风场上表现出一个异常反气旋环流,并且反气旋环流西侧的西南风会加强东亚夏季风。Chang 等[8]也研究了西北太平洋以及东亚区域低层风场对东亚夏季风降水的影响。

数值模式是研究气候系统的一个重要手段,很多学者用数值模式对东亚气候做了分析。Kang 等[9]比较了 10 个大气环流模式对东亚气候的模拟,指出模式的参数化过程对东亚气候模拟有很大的影响。Lu 等[10]用 Rowell 的方法[11]对东亚夏季气候的外部变率和内部变率做了研究,研究表明东亚以及西北太平洋 850 hPa 纬向风场的 EOF 分析第 1 模态为海温强迫的模态,能够被模式很好地模拟,而第 2 模态是大气内部变率模态,模式模拟有很大的随机性。他们的研究揭示了模式模拟东亚夏季气候的一些规律。但模式是一种计算机程序,它不仅在物理过程上与实际有偏差,还存在差分算法产生的截断误差和由于浮点有效位数导致的舍入误差[12-14]。

前人对数值模式舍入误差做了一些分析。李建平等[13-14]、王鹏飞等[12,15]及 Wang 等[16]用简单的数学模型分析得到,在单精度和双精度计算条件下,舍入误差对非线性系统的计算有很重要的影响。王鹏飞等[15]进一步分析了舍入误差对大气环流模式气候模拟的影响,得到模式在双精度计算时能够在一定程度上改进模式模拟结果,并且舍入误差是模式一种重要的随机误差来源。前人的研究揭示了舍入误差对模式模拟结果的影响,但舍入误差如何影响到气候系统特别是东亚区域气候还不是很明确。本文针对以上问题,探讨了舍入误差是如何影响东亚以及西北太平洋夏季气候模拟的。

本文的章节安排如下:第 1 节为模式、数据以及试验介绍;第 2 节为单精度模式和双精度模式模拟结果的比较;第 3 节为单精度模式和双精度模式对东亚夏季气候潜在可预报性比较;第 4 节为单精度和双精度模式模拟东亚以及西太平洋气候差异的原因分析;第 5 节为结论和讨论。

1 资料和试验介绍

本文用到的大气环流模式为 SAMIL 模式,它是中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(简称 LASG)发展改进的大气环流谱模式,其中最早的版本由澳大利亚墨尔本大学引入,分辨率为 R15L9。经过多年的发展,在模式的动力过程、物理方案方面做了许多调整,如引入参考大气、与简化的简单生物圈陆面模式耦合等。近年来提高了其水平和垂直分辨率,并从模式的标准化、模块化、并行化上对模式做了进一步的发展;特别是通过模块化过程,对不同的物理过程可引入多个处理方案,这样可以在同一个模式框架下方便地实现不同方案的比较。对 SAMIL 的基本模拟特征已有了初步的分析,结果表明该模式对亚洲季风有着较好的模拟能力[17]。

用以上大气环流模式分别进行单精度和双精度编译。单精度编译的各种浮点计算以及浮点型数据的有效位数为 4 位,而双精度编译的模式的浮点计算以及小数的有效位数为 8 位。用 AMIP2 海温分别强迫单精度模式和双精度模式,积分时间为 1956 年 1 月—1995 年 12 月。在这里单精度模式的试验称之为 AMIPr4,双精度模式的结果为 AMIPr8。AMIPr4 试验用不同的初值做了 10 个样本的集合试验,同样地 AMIPr8 试验也做了 10 个样本的集合试验。

本文用的再分析资料为欧洲中期数值预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)提供的 45 a(1957 年 9 月 1 日—2002 年 8 月 31 日)逐月平均的再分析资料 ERA-40,该资料水平网格距为 2.5° × 2.5°,垂直方向共有 23 层。本文主要用到其中的 850 hPa 纬向风资料[18]。降水使用了 1979—2002 的 CMAP 资料[19]。

2 单精度模式和双精度模式模拟结果的比较

2.1 单精度模式和双精度模式对东亚区域夏季气候态模拟的比较

东亚夏季风和西北太平洋夏季风对东亚气候有重要影响。Wang 等[5]、Chang 等[8]、Lu 等[10]研究指出,850 hPa 风场在该区域中有着重要地位,一方面它给东亚区域带来大量水汽,另一方面它能反映西北太平洋夏季风的强弱。Lu 等[20]针对东亚 850 hPa 纬向风场做了模态分析,并指出 850 hPa 风

场能表征东亚夏季气候的变率,并且可以很好地表征副热带高压的活动状态。

东亚夏季降水异常能导致旱涝灾害,并且它是东亚夏季风气候的主要表现形式[21]。热带西北太平洋的降水异常和上空对流活动密切相关,并且对东亚大陆降水以及副热带高压活动有着重要的影响[22]。因此降水在上述区域有很重要的地位。这一节主要针对降水和 850 hPa 风场这两个量来进行分析。

将单精度模式模拟的 40 a 850 hPa 风场和降水场做夏季气候平均得到图 1b 和 1a,同理将双精度模式模拟的 850 hPa 风场和降水场做气候平均得到图 1d 和 1c。为了将单精度和双精度模式模拟结果和观测资料做对比(再分析资料和卫星反演资料),将 ERA-40 再分析资料中 1958—1995 年的 850 hPa 风场做夏季平均得到图 1f,将 CMAP 资料中的 1979—2002 年降水场资料做夏季平均得到图 1e。

比较图 1a、1c 和 1e 得到单精度模式和双精度模式都能模拟出热带西太平洋和孟加拉湾两个降水极值区,也能模拟出热带南印度洋的降水大值区。在东亚区域,模式能模拟出沿着东亚沿岸从热带向高纬伸展的降水大值区。这说明模式能模拟出东亚夏季的季风降水。但无论单精度模式还是双精度模式,西北太平洋的降水模拟有正偏差,在热带中太平洋和南亚以及青藏高原南侧模式模拟的降水也有正偏差。这些差异可能是模式物理过程的参数化导致的[9]。比较图 1a 和 1c 可以发现,单精度模式与双精度模式模拟的降水之间存在着较大差异,单精度模式在中国南海以及菲律宾海区域的降水模拟偏弱,而双精度模式在该区域的降水模拟得到改善。

图 1b、1d 和 1f 分别表示单精度模式、双精度模式以及 ERA-40 再分析资料夏季气候态 850 hPa 风场。单精度模式和双精度模式都能很好地模拟出热带太平洋的东风和热带北印度洋的西风以及索马里的越赤道气流。在北太平洋,模式也能很好地模拟出副热带高压的位置和环流形势。但与观测资料相比,模式模拟的热带太平洋东风偏强,在东亚区域模拟的南风也偏强。比较单精度和双精度模式的模拟结果,两种精度下模式模拟的风场类似,但在东亚区域单精度模式的 850 hPa 南风分量偏强。

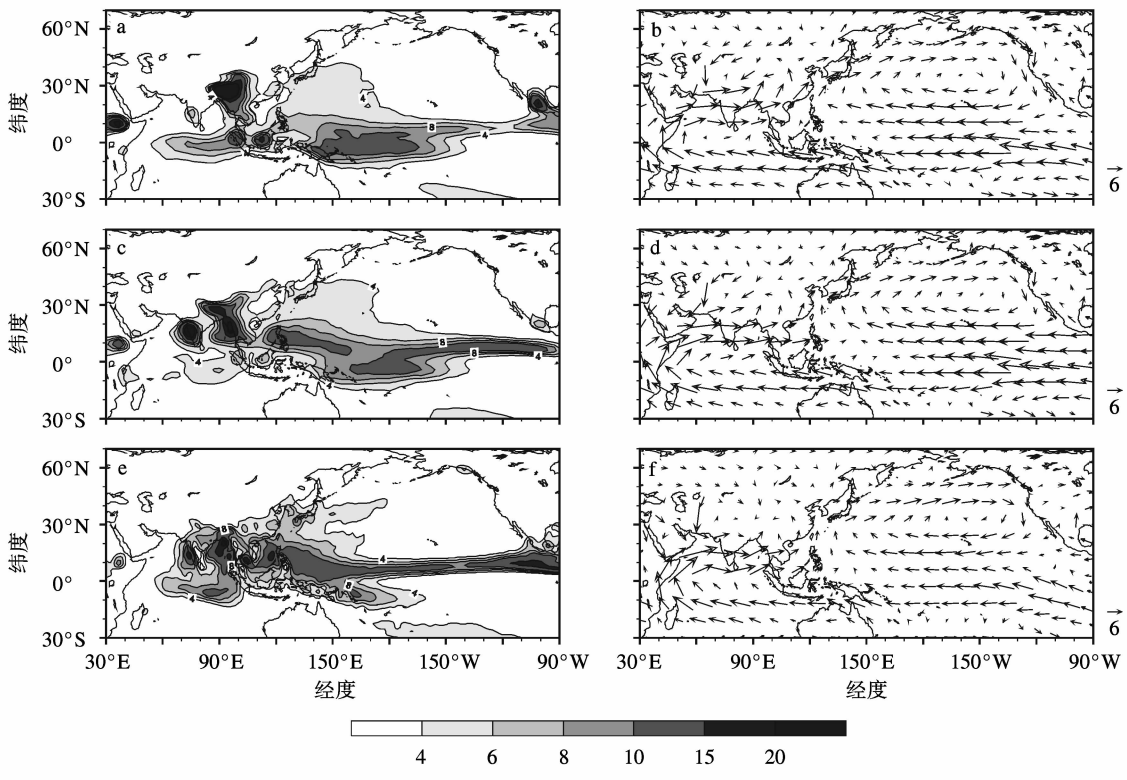

图 1　夏季降水(mm/d)和 850 hPa 风场(m/s)的气候态分布(a,b:单精度模式;c,d:双精度模式;e,f:CMAP 降水和 ERA-40 风场)

Fig. 1　Climatology distributions of (a,c,e) summer precipitation(mm/d) and (b,d,f) 850 hPa wind(m/s) (a,b:simulations with single precision;c,d:simulations with double precision;e:precipitation field from CMAP;f:wind field from ERA-40)

从以上分析可以看出,无论双精度模式还是单精度模式都能模拟出印太地区大的降水中心以及850 hPa 的环流场,并且对东亚区域的夏季季风降水也有一定模拟能力。但模式结果与实际观测资料存在着一些偏差,关于偏差的原因前人做了一些工作[9]。比较单精度模式和双精度模式模拟结果的差别时发现,模式的舍入误差对模式的模拟结果也有着较大影响。

2.2 单精度模式和双精度模式对东亚区域气候年际变率的模拟

AMIPr4 和 AMIPr8 试验都是用实际观测海温(AMIP2 海温)来强迫的。由于东亚区域主要地处中纬,大气的内部变率比较强[10],而且这块区域是典型的季风气候,当前的数值模式对该区域模拟结果都不理想[9],尤其是对降水的模拟效果较差。本节主要通过检测不同精度模式模拟的 850 hPa 纬向风场的差别来分析由于舍入误差导致的模式对东亚区域模拟能力的变化。

图 2a 表示的是单精度模式模拟 850 hPa 夏季纬向风场和 ERA-40 再分析资料的 850 hPa 夏季纬向风场在 1958 年到 1995 年共 38 a 相关系数的空间分布。同样对双精度模式模拟的 850 hPa 纬向风场作了同样的分析(图 2b)。由图 2a 和 2b 可看出,模式能很好地模拟出热带地区的 850 hPa 纬向风场的年际变化,并且这种模拟能力大致随着纬度的升高而减弱。这种减弱可能是由于中高纬度大气内部变率比较强导致的[10],也有可能与模式自身的物理过程误差有关[9]。在中国南方,模式对 850 hPa 风场也有较好的模拟能力,说明数值模式对东亚区域的气候有较好的模拟能力。但比较这两张图可以看出,在热带西北太平洋和中国南部双精度模拟结果与实际观测场的相关系数要高于单精度模式。为了进一步比较双精度模式和单精度模式的模拟效果,将图 2b 和 2a 作差值分析,得到图 2c。由图 2c 可清楚看出,双精度模式在热带西北太平洋和中国南部的模拟结果得到了改善;而高纬度地区的模拟结果反而变得更差,这可能是由于模式在高纬模拟较差导致的。

3 单精度模式和双精度模式在东亚夏季气候潜在可预报性的比较

3.1 方法介绍

为了定量地研究由海表温度(sea surface temperature,SST)强迫导致的变率和大气自身的内部变率,本文应用了 Rowell 提出的方差分析方法[11]。该方法是将总的变率分成两个部分:外部强迫引起的变率和模式产生的大气内部随机变率。所有的集合预报成员都是用相同的海温场强迫的,这样各个成员之间的偏差程度($\hat{\sigma}^2_{\mathrm{INT}}$)代表了内部随机变率,而各个样本集合平均的方差($\hat{\sigma}^2_{\mathrm{EM}}$)代表海表温度(SST)强迫导致的变率。文献[11]对由海表温度导致的变率做了无偏订正,订正后海温强迫的变率为$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{SST}}$。它们的计算公式如下:

$$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{INT}} = \frac{1}{N(n-1)}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_i)^2; \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{EM}} = \frac{1}{N(n-1)}\sum_{i=1}^{N}(\bar{x}_i-\bar{\bar{x}})^2; \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{SST}} = \hat{\sigma}^2_{\mathrm{EM}} - \frac{1}{n}\hat{\sigma}^2_{\mathrm{INT}}。 \quad (3)$$

式中:N 表示年数;n 表示集合样本数;x_{ij}代表第 i 年和第 j 个样本的数值;$\bar{x}_i$ 是第 i 年的集合平均;$\bar{\bar{x}}$是所有年份和所有样本的平均。海表温度强迫的变率($\hat{\sigma}^2_{\mathrm{SST}}$)与总的变率($\hat{\sigma}^2_{\mathrm{TOT}}$)的比值来衡量潜在的可预报性($\hat{R}$)。

$$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{TOT}} = \hat{\sigma}^2_{\mathrm{SST}} + \hat{\sigma}^2_{\mathrm{INT}}; \quad (4)$$

$$\hat{R} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{SST}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{TOT}}}。 \quad (5)$$

3.2 不同精度数值模式的潜在可预报性的比较

第 2.2 节探讨了不同精度模式的模拟能力,得到在西北太平洋以及中国南部双精度模式的模拟能力优于单精度模式的结论。本节将进一步分析舍入误差对东亚区域潜在可预报性的影响。

AMIPr4 总共有 40 a 10 个样本。用(1)~(5)式计算得到单精度模式 850 hPa 纬向风场在东亚区域的夏季潜在可预报性分布(图 3a),同理对 AMIPr8 试验结果处理得到图 3b。图 3a 和 3b 中模式潜在可预报性分布类似,都是从热带向中高纬度逐步递减。在东亚大陆沿岸和在中国南海区域的 850 hPa 纬向风场潜在可预报性存在着一个向高纬伸展的大值区,这可能是由于夏季东亚西南季风的推进使得该区域气候有着一部分热带气候性质,因此潜在可预报性要稍高于周边区域。虽然图 3a 和 3b 类似,但还是可以看出东亚区域夏季双精度模式的潜在可预报性要大于单精度模式。为了更直观地分析,将图 3b 和 3a 相减得到图 3c。图 3c 中竖线阴影部分表示为大于 0 的部分,在那些区域双精度模式的可预报性要强于单精度模式。由此可见,东亚以及热带太平洋 850 hPa 的潜在可预报性,双精度

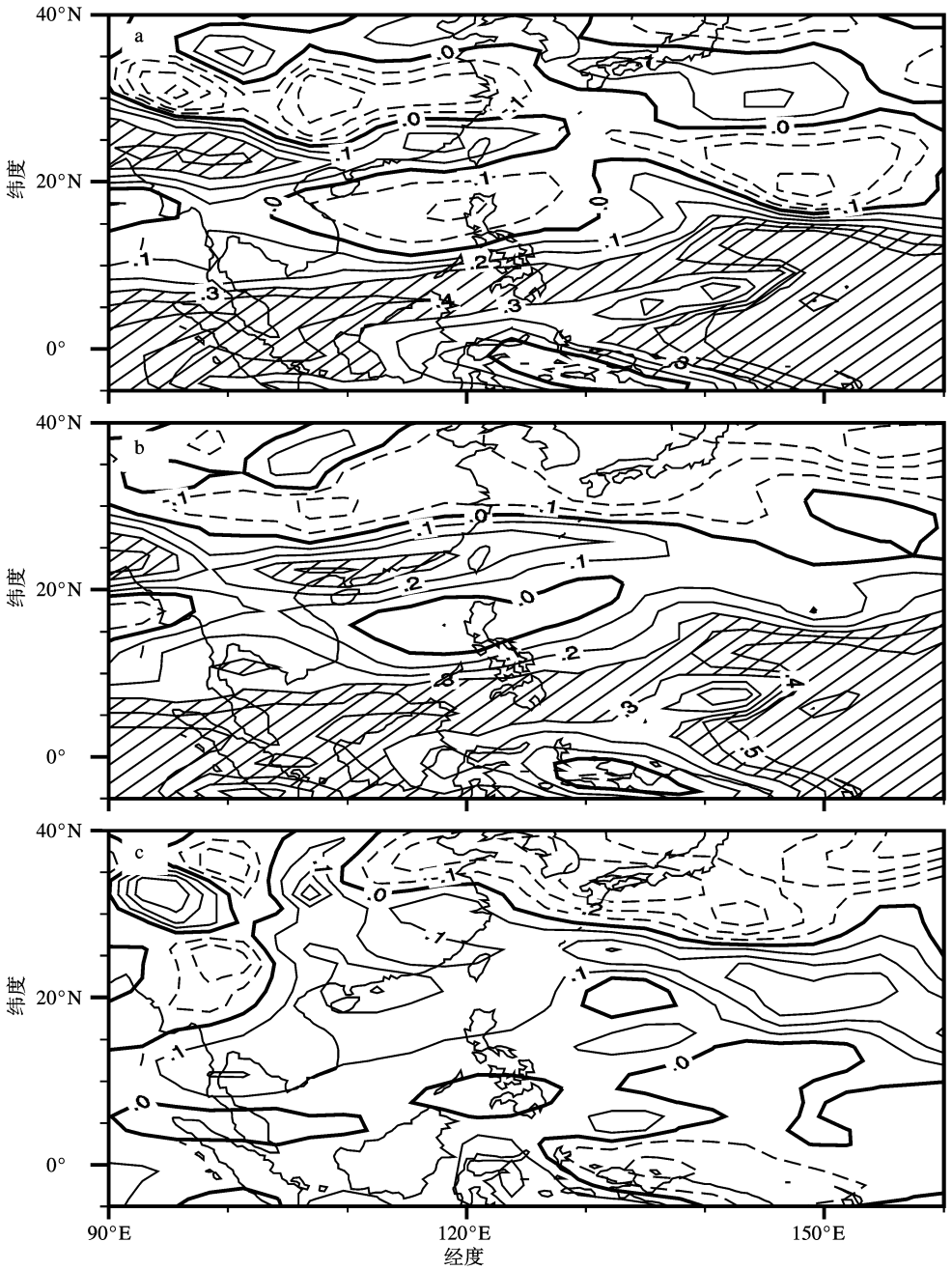

图 2　ERA-40 再分析资料与 SAMIL 单精度模式(a)、双精度模式(b)的夏季 850 hPa 纬向风场的相关分布(斜划线区域表示通过 0.05 显著性水平检验)及其差值分布(c;图 b 减图 a)

Fig. 2　Correlation distributions of the summer 850 hPa zonal wind between observations and (a) AMIPr4 simulations and (b) AMIPr8 simulations, and (c) their differences (Fig. 2b minus Fig. 2a) (Regions marked with oblique lines indicate the 0.05 significance level)

模式要高于单精度模式。这些结论和第 2 节中双精度模式在中国南部以及西北太平洋的可模拟性要高于单精度模式的结论一致。

由上述结果可看出,双精度模式对东亚区域夏季 850 hPa 纬向风场模拟的潜在可预报性要高于单精度模式。当用 500 hPa 高度场和海表面气压场做同样的分析时,得到类似结果,由于篇幅原因这里只是给出了 850 hPa 纬向风场的分析结果。王鹏飞等[15]也指出,双精度模式在 500 hPa 高度场的差别要小于单精度模式。这些结论可能是由于双精度模式舍入误差更小所致。舍入误差的减小使得模式在该区域模拟的外部变率增大,从而导致模式有更高的可预报性。

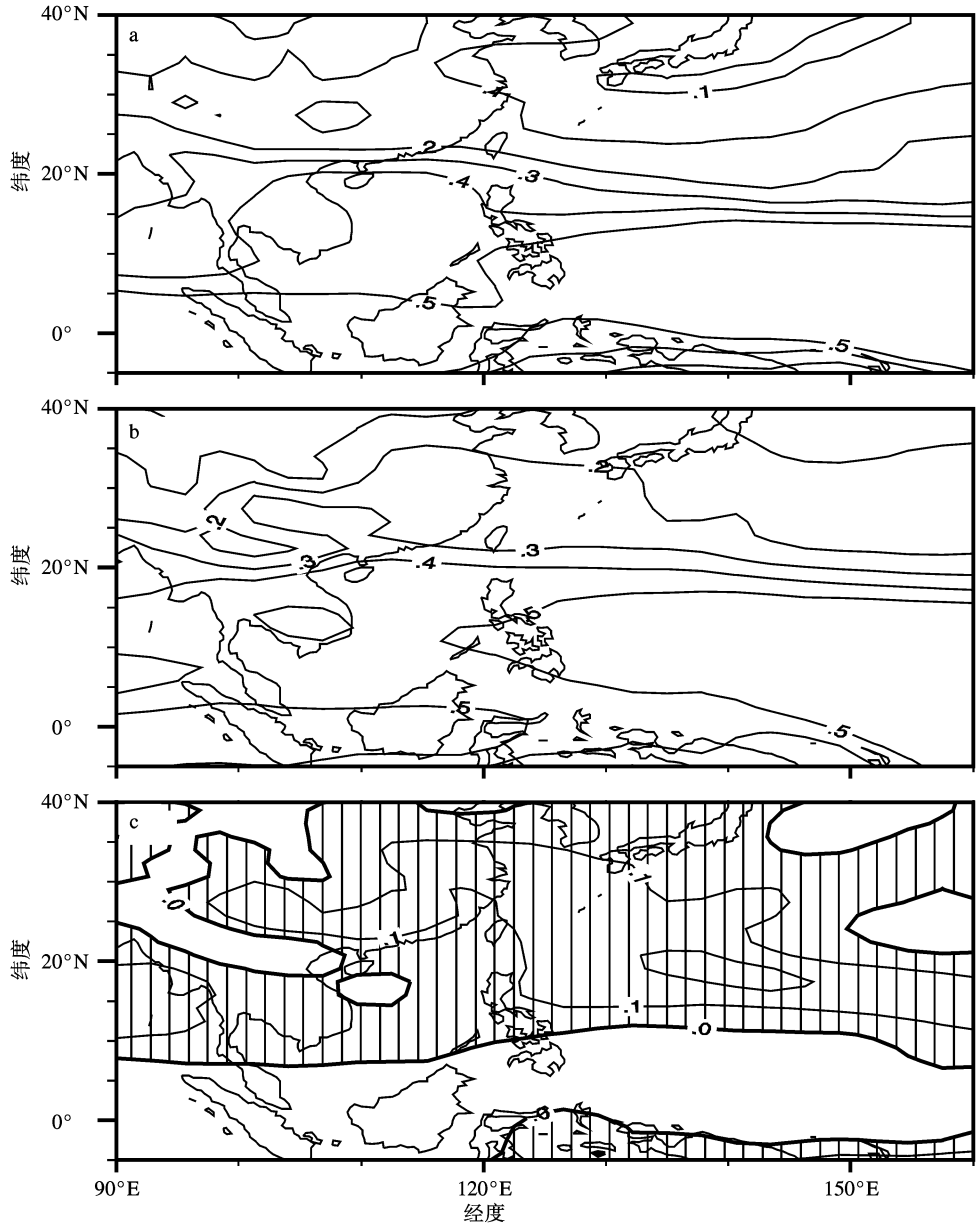

图 3 单精度模式(a)和双精度模式(b)潜在可预报性的空间分布及其差值分布(c;图 b 减图 a;竖划线区域表示通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 3 Distributions of potential predictability (i. e. variance percentage) of summer 850 hPa zonal wind obtained from (a) AMIPr4 and (b) AMIPr8, and (c) their differences (Fig. 3b minus Fig. 3a; Regions marked with vertical lines indicate the 0.05 significance level)

4 单精度模式和双精度模式模拟东亚以及西太平洋气候差异的原因分析

本文第 2 节和第 3 节分别介绍了模式模拟能力和模式的潜在可预报性,得到双精度模式在中国南部以及西北太平洋区域的夏季气候 850 hPa 纬向风场的模拟能力和潜在可预报性要优于单精度模式的结论。模式舍入误差是如何影响到模拟结果的呢?本节主要通过分析 850 hPa 的纬向风场来研究舍入误差对模拟结果的影响。

对 AMIPr4、AMIPr8 试验分别做集合平均,并对(90°E ~ 180°,20° S ~ 60°N)区域 1958—1995 年的夏季 850 hPa 纬向风场做 EOF 分析,分别得到图 4 和图 5。文中选用的区域和 Lu 等[10]做 EOF 的区域一致。同理对 ERA-40 再分析资料 850 hPa 纬向风场做 EOF 分析得到图 6。图 6a 为 ERA-40 再分析资料 850 hPa 纬向风场经 EOF 分析的第 1 模态,而图 6b 表示的是第 2 模态。与 Lu 等[10]的分析结果

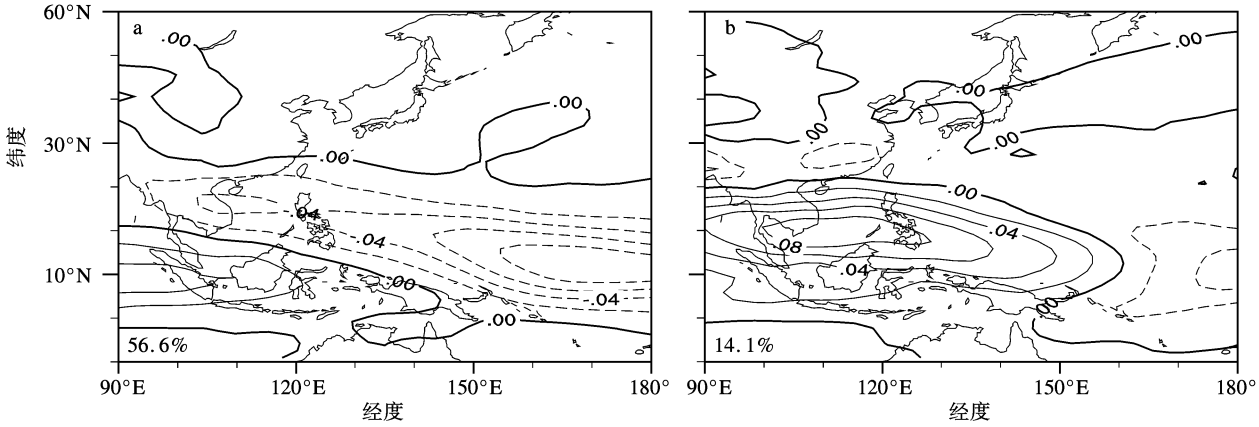

图 4　单精度模式(90°E ~ 180°,20° S ~ 60°N)区域夏季平均 850 hPa 纬向风场的 EOF 第 1 模态(a)和第 2 模态(b)

Fig. 4　(a) The first and (b) second EOF modes of JJA-mean 850 hPa zonal wind over the region(20° S—60°N,90°E—180°) in the AMIPr4 experiment

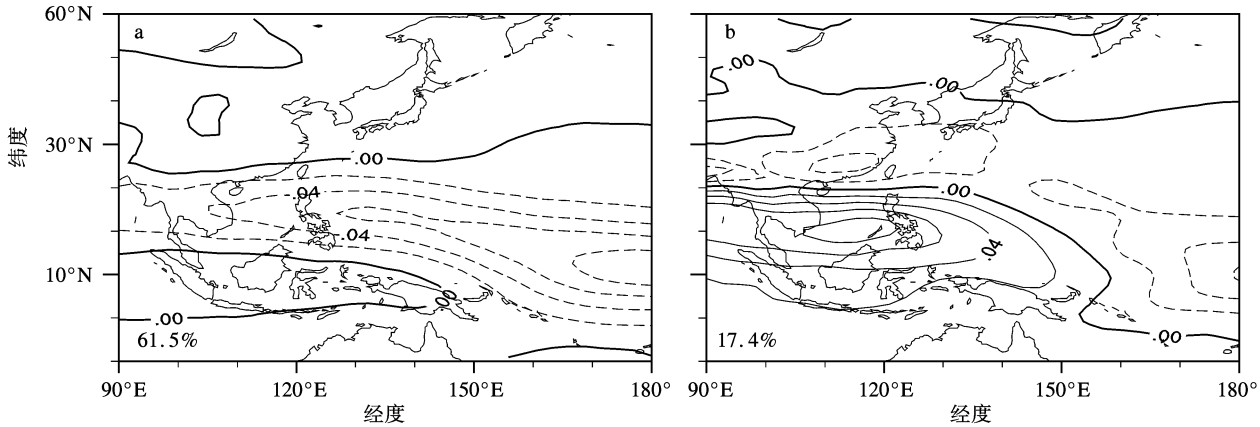

图 5　双精度模式(90°E ~ 180°,20° S ~ 60°N)区域夏季平均 850 hPa 纬向风场的 EOF 第 1 模态(a)和第 2 模态(b)

Fig. 5　(a) The first and (b) second EOF modes of JJA-mean 850 hPa zonal wind over the region(20° S—60°N,90°E—180°) in the AMIPr8 experiment

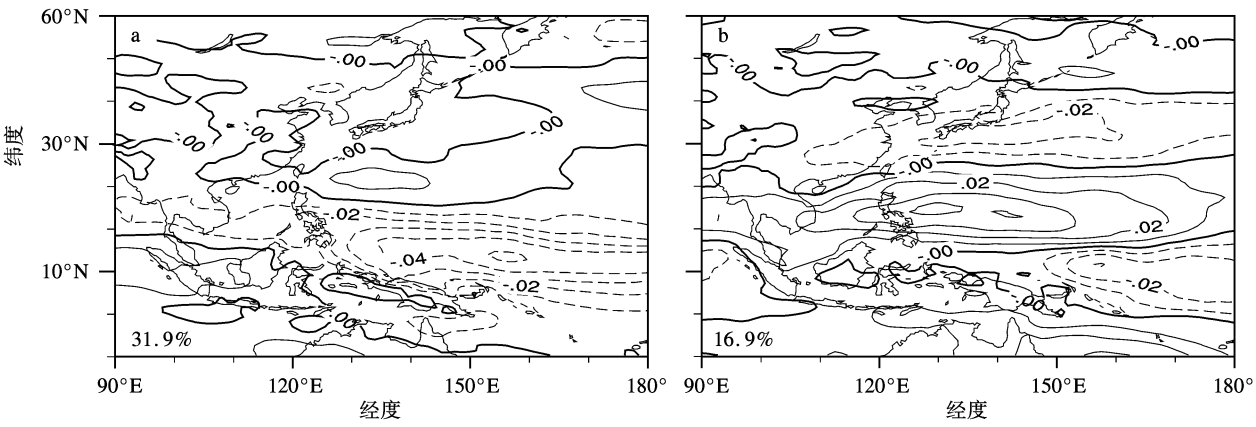

图 6　ERA-40 资料(90°E ~ 180°,20° S ~ 60°N)区域夏季平均 850 hPa 纬向风场的 EOF 第 1 模态(a)和第 2 模态(b)

Fig. 6　(a) The first and (b) second EOF modes of JJA-mean 850 hPa zonal wind over the region(20° S—60°N,90°E—180°) in the ERA-40 data

类似,图 6a 表征的是西北太平洋反气旋模态,图 6b 表征的是纬向波列模态。比较图 4a、5a 和 6a 得知,单精度和双精度模式模拟的第 1 模态和再分析资料 850 hPa 纬向风场第 1 模态类似,当 PC1 处于正位相时,有一支西风从赤道西太平洋向西北伸展到中国南海,而在东亚大陆南部和热带东印度洋有东风。Lu 等[10]分析这种模态并指出,它主要代表了夏季西北太平洋低层的异常反气旋,因此这种模态的时间序列与 Wang 等[6]定义的西北太平洋季风指数有很好的相关。他们指出,这种模态一方面反映西北太平洋夏季风的变化,另一方面反映了反气旋西侧的西南风异常对东亚夏季风有很重要的影响。不管是双精度模式还是单精度模式都能比较好地模拟出这种模态。图 7 给出了 AMIPr8 的集合平均 850 hPa 纬向风场的 PC1 和 ERA-40 再分析资料的 PC1 的时间序列曲线。由图 7 可以看出,双精度模式模拟的 PC1 和 ERA-40 的 PC1 拟合得很好,并且在 20 世纪 70 年代后期均有振幅增加。单精度模式的模拟结果与双精度类似。

表 1 给出了几个时间序列之间的相关系数。AMIPr8 PC1、AMIPr4 PC1 与 ERA-40 PC1 的相关系数分别为 0.75 和 0.73,AMIPr8 PC1 与 AMIPr4 PC1 的相关系数为 0.97。这说明模式能很好地模拟东亚以和西北太平洋 850 hPa 纬向风场的第 1 模态及其年际变化,且双精度模式优于单精度模式。AMIPr8 中第 1 模态的解释方差为 61.5%,而 AMIPr4 试验第 1 模态的解释方差为 56.6%。Lu 等[10]指出该第 1 模态主要因海温强迫所致,故称为外部模态。由此可见,双精度和单精度模式都能模拟出这种因海温强迫所致的模态,但双精度模拟的模态所占方差大于单精度模式。该结论与第 3.2 节中双精度模式在中国南部和西北太平洋的潜在可预报性及模拟能力上高于单精度模式的结论一致。这也说明可能是由于单精度舍入误差更大从而导致模式内部噪音加强,从而使得这种海温强迫的模态在模式模拟中所占方差比率减小,这种减小使得模式在西北太平洋和中国南部的模拟能力遭到削弱。

表 1 单精度模式结果(r4)、双精度模式结果(r8)和 ERA-40 再分析资料的(90°E ~ 180°,20° S ~ 60°N)区域 850 hPa 风场经 EOF 分析的前 2 个模态时间序列间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of time series of the first or second EOF modes of JJA-mean 850 hPa zonal wind over the region (20° S—60°N, 90°E—180°) among AMIPr4 simulations, AMIPr8 simulations, and ERA-40 data

	r4 PC1	r8 PC1
ERA PC1	0.73	0.75
r4 PC1		0.97
	r4 PC2	r8 PC2
ERA PC2	0.17	0.32
r4 PC2		0.76

比较图 4b、5b 以及 6b 可见,模式模拟的第 2 模态也与 ERA-40 再分析资料的第 2 模态相似。正位相时,有西风从赤道东印度洋延伸到中国南海,而东风出现在热带西太平洋和 30°N 附近的东亚大陆和海洋上。Lu 等[10]指出该模态主要因大气内部变率

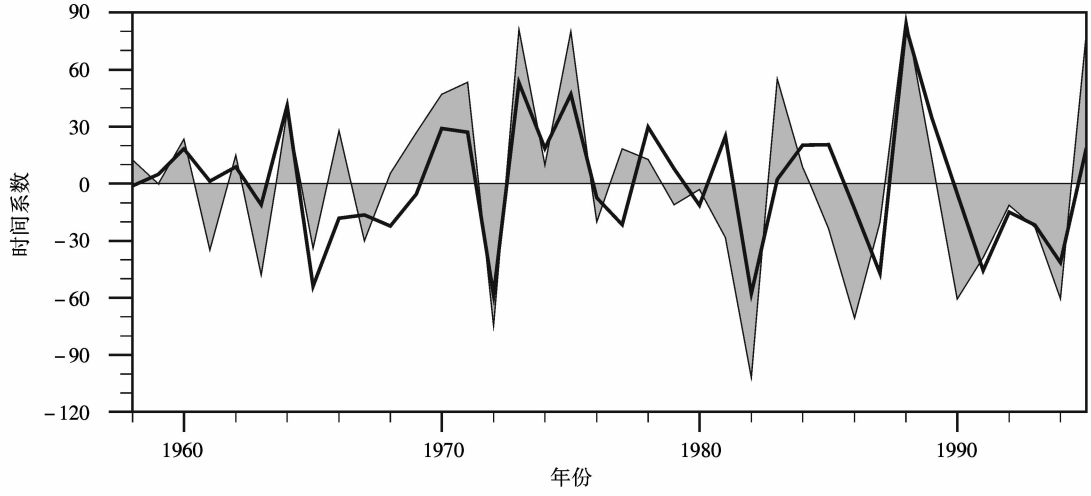

图 7 东亚和西太平洋区域(90°E ~ 180°,20° S ~ 60°N)夏季平均 850 hPa 纬向风场 EOF 第 1 模态的时间序列(粗实线为双精度模式结果,阴影部分为 ERA 再分析资料结果)

Fig. 7 Time series of the first EOF modes of JJA-mean 850 hPa zonal wind over the region (20° S—60°N, 90°E—180°) in the AMIPr8 experiment (thick and black line) and ERA-40 data (shadings)

所致。这说明本文选取的大气环流模式不管是单精度还是双精度版本,都能在一定程度上刻画这种大气内部变率的模态变化。表 1 给出 AMIPr8 PC2、AMIPr4 PC2 与 ERA-40 PC2 的相关系数分别为 0.32 和 0.17,可知在年际变率上,双精度模式比单精度模式能更好地刻画出大气内部变率的模态。

5　结论和讨论

利用中国科学院大气物理研究所计算地球流体国家重点实验室发展的 SAMIL 大气环流模式来研究舍入误差对模拟东亚以及西太平洋夏季气候的影响,得到双精度模式对中国南部以及西北太平洋区域的模拟能力以及潜在可预报性上要优于单精度模式,这在 500 hPa 位势高度场、海平面气压场以及 850 hPa 纬向风场上都有体现。进一步用 850 hPa 纬向风场来分析舍入误差对该区域夏季气候模拟的影响,得到舍入误差的增大使得模式内部的噪音变率增大,从而使得模拟的第 1 模态所占方差比率减小的结论。而第 1 模态是由海温强迫的外部变率模态,这种模态所占方差比率的减小会使得模式在该区域潜在可预报性减弱。

在东亚和西太平洋区域气候内部变率的模拟上,单精度和双精度模式都能模拟出与再分析资料类似的内部变率模态。虽然单精度和双精度模式都不能很好地模拟出该内部变率模态的年际变率,但双精度模式仍优于单精度模式,这可能会导致双精度模式在该区域的模拟能力高于单精度模式。

从以上研究来看,减少模式舍入误差可能会使模式内部的随机误差变得更小,使模式能更好地模拟出大气中由海温强迫的变率,从而使模式能更好地模拟西北太平洋和东亚区域的夏季气候变化。

参考文献:

[1] Huang R H, Li W J. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]//Proceedings of the International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, 1987: 40-51.

[2] Huang R H, Lu L. Numerical simulation of the relationship between the anomaly of subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific [J]. Adv Atmos Sci, 1989, 6(2): 202-214.

[3] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation [J]. J Meteor Soc Japan, 1987, 65(3): 373-390.

[4] Wang B, Wu R G, Lau K M. Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific-east Asian monsoons [J]. J Climate, 2001, 14(20): 4073-4090.

[5] Wang B, Wu R G, Li T. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation [J]. J Climate, 2003, 16(8): 1195-1211.

[6] Wang B, Wu R G, Fu X H. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J Climate, 2000, 13(9): 1517-1536.

[7] Wang B, Zhang Q. Pacific-east Asian teleconnection. Part Ⅱ: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Nino development [J]. J Climate, 2002, 15(22): 3252-3265.

[8] Chang C P, Zhang Y S, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part Ⅰ: Roles of the subtropical ridge [J]. J Climate, 2000, 13(24): 4310-4325.

[9] Kang I S, Jin K, Wang B, et al. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs [J]. Climate Dynamics, 2002, 19(5/6): 383-395.

[10] Lu R Y, Li Y, Dong B W. External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia [J]. J Meteor Soc Japan, 2006, 84(3): 447-462.

[11] Rowell D P. Variability of summer rainfall over tropical north Africa (1906—92): Observations and modelling——Further analysis of simulated interdecadal and interannual variability of summer rainfall over tropical north Africa—Reply [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1996, 122(532): 1007-1013.

[12] 王鹏飞,黄刚. 数值模式预报时效对计算精度和时间步长的依赖关系[J]. 气候与环境研究,2006,11(3):395-403.

[13] 李建平,曾庆存,丑纪范. 非线性常微分方程的计算不确定性原理——Ⅰ. 数值结果[J]. 中国科学:E 辑,2000,30(5):403-412.

[14] 李建平,曾庆存,丑纪范. 非线性常微分方程的计算不确定性原理——Ⅱ. 理论分析[J]. 中国科学:E 辑,2000,30(6):550-567.

[15] 王鹏飞,王在志,黄刚. 舍入误差对大气环流模式模拟结果的影响[J]. 大气科学,2007,31(5):815-825.

[16] Wang P F, Huang G, Wang Z Z. Analysis and application of multiple-precision computation and round-off error for nonlinear dynamical systems [J]. Adv Atmos Sci, 2006, 23(5): 758-766.

[17] 王在志,吴国雄,刘平,等. 全球海—陆—气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 Ⅰ[J]. 热带气象学报,2005,21(3):225-237.

[18] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 reanalysis [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2005, 131(612): 2961-3012.

[19] Xie P P, Arkin P A. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions [J]. J Climate, 1996, 9(4): 840-858.

[20] Lu R Y, Li Y, Ryu C S. Relationship between the zonal displacement of the western Pacific subtropical high and the dominant modes of low-tropospheric circulation in summer [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(2): 161-165.

[21] 黄荣辉. 关于气候灾害及其成因与预测的研究[J]. 地球科学进展,1990(5):59-63.

[22] Huang G. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. Adv Atmos Sci, 2004, 21(1): 41-52.

(责任编辑:倪东鸿)