

气候数值模拟研究中初始场衰减理论的理解和应用*

王鹏飞¹ 李建平¹ 顾雷²
WANG Pengfei¹ LI Jianping¹ GU Lei²

1. 中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029
2. 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心(CMSR), 北京, 100029

1. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
 2. CMSR, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
- 2007-07-25 收稿, 2007-10-15 改回.

Wang Pengfei, Li Jianping, Gu Lei. 2009. Understanding and application of the decay theory of initial condition effect in numerical climate simulation studies. Acta Meteorologica Sinica, 67(2): 218 - 226

Abstract The complete dynamical equations of the atmospheric motion and the qualitative theory of nonlinear atmosphere with dissipation and external forcing in Hilbert space suggest that the initial condition will not affect the status of a long-time numerical simulation with AGCMs. In this research, we first introduce the key points for understanding the decay of initial condition effect, and then employ two atmospheric general circulation models (AGCM), SAMIL and ECHAM, to investigate the effect of initial condition on the simulation results in an actual computing environment with round-off errors. The round-off error mean ensemble (REME) experiments are conducted to reduce the uncertainty caused by round-off errors. The results indicate that in the actual computing environment, a big initial condition error/spread will lead to a small fluctuating final error. But for a tiny initial condition error/spread, it will lead to the same magnitude final fluctuating error. This is against the theoretical analysis. However, the discrepancy can be explained by the existence of the round-off errors which are not considered in the theoretical analysis. The final error balance is consistent with the error saturation property indicated by the nonlinear error growth theory. The initial error decay curves of SAMIL and ECHAM are obtained, from which we find that the initial condition error in the two AGCMs decays to the final error within about 40 - 60 days of integration. At last, we used the initial error decay theory to conclude that the initial mean ensemble (IME) is capable of reducing the error in climate simulation studies.

Key words Initial condition, Error, Climate, Atmospheric general circulation model (AGCM), Ensemble forecast

摘要 根据对大气原始方程的定性理论和相空间的理论研究, 初始场对数值模拟的作用会随着时间增长而逐步衰减。文章分析初始场作用衰减理论的关键问题, 通过对大气环流谱模式 SAMIL 和 ECHAM 的数值试验, 在实际的计算环境中研究其初始场作用的变化情况。研究中使用到对舍入误差干扰的一种集合消减方法 (REME), 保证了验证试验所受舍入误差的影响小于给定的范围。结果表明有舍入误差存在的计算环境中, 当初始差别较大时, 其逐步衰减到一个波动值。而对于特别微小的初始场差别, 其长期影响也应是衰减的, 但由于计算精度有限, 可能会出现增大到一个波动值的现象, 这些结果与非线性误差理论所描述的误差饱和现象一致。试验得到了具体模式的衰减速率曲线, 发现衰减需要的时间范围大约为 40—60 d。文中还利用初始场作用衰减的理论探讨了如何解释初始场集合预报 (IME) 能够减少模拟结果误差的现象。

关键词 初始场, 误差, 气候, 大气环流模式, 集合预报

中图分类号 P435

* 资助课题: 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 (40730952), 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (IAP07119), 中国气象局成都高原气象研究所科研业务专项项目 (BROP200709)。

作者简介: 王鹏飞, 主要从事数值分析、非线性可预报性、并行计算、大气科学数据信息系统等方面的研究。E-mail: wpf@mail.iap.ac.cn

1 引言

在气候数值模拟的过程中存在各种随机误差是影响模拟结果的一个重要因素。Miyakoda 等(1972)的研究表明可预报的能力不仅依赖于误差的增长速率而且有着明显的区域分布,随后 Shukla (1985), Kalnay 等(1987), Dalcher 等(1987)的进一步研究发现误差的变化和增长与纬度、季节、尺度分布有明显的函数关系。Reynolds 等(1994)通过研究 NMC (National Meteorological Center) 的中期预报模式中随机误差的增长,发现模式的随机误差增长可以分为内部误差和外部误差两部分,并且通过数值试验研究了内部与外部误差的具体分布形势。随机误差的产生原因很多,既可能是由于求解问题的非线性造成误差的增长,也可能由模式偏差造成误差的增长。在实际的浮点计算环境中,舍入误差是随机误差的一个重要来源,由于浮点舍入误差的存在,数值模式的模拟结果会受到一定的影响。

很多研究从物理机制的角度对小初始误差的增长进行过讨论。早在 20 世纪 40 年代, Kolmogorov (1941)就指出,小的初始误差会引起大气状态的显著不同, Lorenz (1965)对大气中误差的增长率进行了较为系统的研究,此后 Smagorinsky (1969)、Lorenz(1982)对初始误差如何影响天气预报的可预报性问题做了研究。在中国也有相关的研究,李志锦等(1995)对谱预报方程采用局部扰动方法,得出了轨线稳定的判据,而且给出了误差增长方程。穆穆等(2002)根据实际需要提出了 3 类可预报性研究的问题。

另外一些研究从计算的机制上对误差的增长进行讨论。李建平等(2000a, 2000b)讨论了非线性常微分系统受舍入误差的影响,他们的研究改变了以往对舍入误差影响重要程度的认识,发现了某些非线性系统即使初值完全准确,由于舍入误差的存在,系统的计算也存在最大有效计算时间。而且他们还首次将舍入误差的影响研究提为“计算不确定问题”,这无疑是对计算本质的非常重要的新观点。王鹏飞等(2006a, 2006c)利用多精度计算的方法,进一步研究了非线性系统受舍入误差影响的程度,讨论了简单系统预报期限和计算步长及计算精度的依赖关系,提出了拓展短期预报计算期限的一种方法。

复杂的数值模式中舍入误差是否会对模拟结果

产生影响,如何产生影响,以及产生多大的影响是值得研究的问题。Walter(1969)使用简单的两层预报模式,研究过舍入误差在模式积分中的影响。Williamson 等(1973)使用 NCAR 早期的 GCM 预报模式,研究过舍入误差对模拟结果的影响。Rosinski 等(1997)对 NCAR 通用气候模式(CCM2)所受的舍入误差影响进行了研究,提供检测计算结果差别程度的方法。王鹏飞(2007)在对数值模式受舍入误差影响的研究中,系统的讨论了并行/串行差异检测,单/双精度差异检测,不同种计算机之间的差异等,指出对舍入误差扰动的集合方法能够用于研究一些气候问题。

气候数值模拟研究与短期的天气预报不同,气候态对初始误差的响应也与天气研究中不同。早期, Epstein 等(1969)研究了天气系统中初始误差的影响,指出由于动力系统的统计等概率性质,不同的初始场模拟结果可以进行集合预报,得到较长时间的预报,但是这些结论主要是对天气时间尺度的集合预报较为适用。在气候问题的研究中,丑纪范(1983)通过对大气运动方程组的定性分析,指出初始场影响随着时间的推移将逐步衰减,对于气候模拟等长期积分来说,初始场不会对结果有本质的影响。

本文在有限的计算精度条件下,利用大气环流模式 SAMIL (spectral Atmosphere Model of IAP/LASG)和 ECHAM 进行不同的初始场对模拟结果影响程度的对比试验,验证初始场的衰减理论,研究衰减速率。然后利用此理论对气候集合预报中的一些问题进行讨论。

2 初始场作用衰减理论理解

丑纪范在 1983 年利用大尺度的动力学原始方程,推导出初始场作用衰减的理论。在球面坐标系 (λ, ϕ, p, t) 中,大气运动方程组可以写为

$$\frac{\partial}{\partial t} + \left(2 \cos \phi + \frac{ctg \phi}{a} \right) + \frac{1}{a \sin \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \left(2 \cos \phi + \frac{ctg \phi}{a} \right) + \frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = - \frac{R}{p} T \quad (3)$$

$$\frac{1}{a \sin} \left(\frac{\partial}{\partial} + \frac{\partial \sin}{\partial} \right) + \frac{\partial}{\partial p} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{R^2}{C^2} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{R^2}{C^2} T - \frac{R}{p} = \frac{R^2}{C^2} F_T + \frac{R^2}{C^2} \frac{1}{c_p} Q \quad (5)$$

其中

$$= \frac{\partial}{a \sin} \frac{\partial}{\partial} + \frac{\partial}{a} \frac{\partial}{\partial} + \frac{\partial}{\partial p}$$

$$C^2 = \frac{R^2 T}{g} \left(\frac{\partial}{\partial} - \right)$$

为了节省篇幅, F , F , F_T 及其他各符号的含义请参考丑纪范文章(1983)。

边界条件为:

地表面 $p = P_s$ (P_s 为地表面气压),

$$V = V = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial p} = s (T_s - T)$$

T_s 为地表面温度, s 是与湍流导热率有关的参数。

在大气顶层,

$$\frac{\partial V}{\partial p} = \frac{\partial V}{\partial p} = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial p} = 0$$

初始条件为:

$$(V, V, T) |_{t=0} = (V^{(0)}, V^{(0)}, T^{(0)})$$

大气运动方程组可以化为希尔伯特空间的一个算子方程

$$B \frac{\partial}{\partial t} + (N + L) = \quad (6)$$

其中 \mathbf{V} 为向量函数, B 、 N 、 L 为算子, 各符号的含义参考丑纪范文章(1983)。

通过对式(6)及其伴随问题的研究, 丑纪范发现, 系统的长期状态演变由初值影响、外源影响和边界影响决定, 而且初值影响的项会随着时间的增加而趋于 0, 这就是初始场作用的衰减。

在理解初始场衰减作用时, 要注意初始场衰减的条件:

首先是满足方程(1) —(5)的方程组, 以及与方程(1) —(5)等价的方程, 或写成直角坐标等其他形式, 都有初始场作用衰减的特性。对于要描述大气长期行为的简化方程应具有此性质, 否则这种简化是不适当的, 但对于其他问题, 简化方程是否存在此性质, 仍需要具体分析。

另外一个限定条件是模式长时间积分, 由于方程的复杂性, 衰减时间没有统一的计算公式, 但可以用试验的办法近似得到。后面的试验表明在现有的常用计算条件下, 时间达到 40—60 天之后, 初始场作用的影响衰减到可以忽略。因此虽然初始场作用

衰减理论对短期天气预报等短时间的数值模拟也适用, 但由于短期预报的时间范围一般小于 2 周, 初始场作用的影响虽然衰减, 但仍然对结果有相当大的影响。

由于原始方程具有初始场作用衰减的性质, 丑纪范指出原始方程的化简应保持此性质, 而且离散化处理时最好能够保持此性质。

初始场衰减理论描述了一个气候研究中理想的状态, 在实际计算环境中是否成立还需要进一步的试验证明。而且衰减速率是怎样的还需要进一步研究。当初始场作用衰减到一个时刻后, 其后的计算结果受初始场的影响差别小于一个阈值, 可以认为不再受初始场影响, 这个时刻的时间范围大概是多少? 能否得到? 针对这些问题我们进行初始场作用衰减验证试验。

3 研究初始场作用衰减的数值试验

3.1 模式简介

SAMIL 是在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气候谱模式, 其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、并行化的要求对模式作了进一步的发展; 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。王在志等(2005a, 2005b)、周天军等(2005)对 SAMIL 的基本模拟特征已有了初步的分析, 发现模式水平和垂直分辨率的提高对模拟结果有很大改进。而且模式对亚洲季风也有较好的模拟能力 (Wang, et al, 2004)。

ECHAM5 模式是德国马普气象研究所 (Max Planck Institute for Meteorology) 发展的第 5 代 ECHAM 大气环流模式, 它的设计和性能可参考 Roeckner 等文章(2003, 2006)。ECHAM 是在欧洲中期天气预报中心的天气预报谱模式 (ECMWF) 基础上发展的, 最新版本为 5.3 版。ECHAM 模式是一种谱模式, 它有很多水平分辨率和垂直分辨率可供用户方便的使用。目前可以使用水平分辨率 T21, T31, T42, T63, T85, T106, T255, T319, 垂直分辨率 L19, L39, L60, L90 等选项。通过修改

模式选项使其可模拟的大气顶层到达 10 hPa 而研究对流层大气,也可以使顶层达到 0.01 hPa 而研究中层大气。ECHAM 大气环流模式参加了一系列的国际气候模拟比较计划,其中包括 IPCC。国内外很多学者对它的性能做了评估,总体来讲它的性能比较优良,得到国际上的认可。2005 年中国科学院大气物理研究所季风中心获得授权引进了马普气象研究所发展的模式,包括海气耦合模式,大气环流模式,气溶胶-大气环流模式等。并且将 ECHAM5 大气环流模式在 IBM-P690 大型机上安装成功,并做了一些数值试验,结果表明它能较好地模拟东亚季风系统的一些特征,相关数值研究仍在继续。

为了能够研究初始场的作用,减弱舍入误差对结果的影响,我们使用舍入误差的集合 REME (Round-off error mean ensemble) 方法。REME 与对初值的集合 (IME, Initial condition mean ensemble) 有明显的不同。REME 使用相同的初值和步长、分辨率等计算条件,但在计算过程中,持续保持随机小扰动(扰动小到与舍入误差同量级),然后进行多组计算试验。由于小扰动的随机性,在长时间计算之后,就可以得到多个计算结果,这些结果做算术平均就能减小舍入误差的影响。

REME 的持续小扰动不会改变计算的物理本质,否则计算时每步的舍入误差都改变物理本质,气候模拟将不成立。REME 的思想来源于王鹏飞(2007)对数值模式长期积分中舍入误差的研究。

3.2 试验设计

为了研究初始场的变化,本文设计 3 组数值试验:试验 1:选取差异较大的初始场进行计算,研究冬季的情况。试验 2:选取差异较大的初始场进行计算,研究夏季的情况。试验 3:选取差异足够小的初始场进行计算,以冬季情况为例。

具体的实现方法如下:用 SAMIL 稳定积分 60 年(control run),此时使用的是模式气候平均海温。为了研究初始场作用的变化,我们选取这 60 年中的第 30 和 31 年的结果作为不同的初始场进行计算。这两个初始场有较大的差异,但是由于舍入误差影响的存在,仅用单个模拟结果不能研究两者差别随着时间的变化。此时需要一种有效地减小舍入误差影响的集合方法来进行研究,REME 能够满足这种需求。用 ECHAM5 进行同样的试验,取得数据,进行对比分析。

REME 的实现可以有多种方案,实际使用时,我们用的是改变并行计算时累加顺序的办法,可参考王鹏飞(2006b)文章。例如:将 $U = (A + B) + C$,变为 $U = A + (B + C)$,理论上说,求和时满足结合律,求和时的计算顺序不会改变求和的理论值。但实际计算时会有不同,这种试验并非算法发生了改变,只是计算机随机舍入的结果发生了变化,因此主要带来的是随机的影响。试验中逐日输出计算结果。

为了衡量计算结果的差别,定义表示模拟结果的差别程度的量为 RMS (Root Mean Square error, 空间均方根误差):

$$Z_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (Z_1(i, j) - Z_2(i, j))^2}{M \times N}}$$

其中, M 、 N 为纬圈、经圈方向的网格数, Z_1 、 Z_2 为两个不同初始场模拟得到的 500 hPa 位势高度场(可以对不同的气候场计算 RMS,作为说明问题的例子,本文仅选取 500 hPa 位势高度场的结果计算 RMS 进行比较)。特别要注意的是,当进行 REME

试验时, $Z_1(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^n Z_{1,k}(i, j)}{n}$,其中 n 为 REME 所使用的样本总数, $Z_{1,k}(i, j)$ 为第 k 个样本。

4 试验结果与分析

图 1 为使用 SAMIL 模拟得到的两组 REME 试验 500 hPa 位势高度场结果之间的均方根误差随着时间的变化,用来检查初始场差别随着时间的衰减趋势和衰减速度。第 1、2 组 REME 试验的初始场分别为第 30 年 1 月 1 日和第 31 年 1 月 1 日,代表了初始场取在冬季的情形。从图 1 可以明显地看到试验开始时刻有较大的初始场差别,随着时间的增大,差别有减小的趋势,单精度的计算结果在 40 天以后不再减小开始小幅度震动变化,并且一直持续。图 1a 中虚线为选取 10 个样本做 REME 后再计算 RMS 的结果,实线为 20 个样本的情况,可以看出,增加 REME 计算样本的数量,能够将最后结果差异的值减小。图 1b 为同样的试验,但使用双精度的计算结果,在双精度的结果中,60 天左右时达到平衡,随后两个试验的差别在小的范围内振动。图 1b 中使用 20 个样本做 REME 再计算 RMS 的结果比使用 10 个样本得到的 RMS 结果最后差异的值要小。

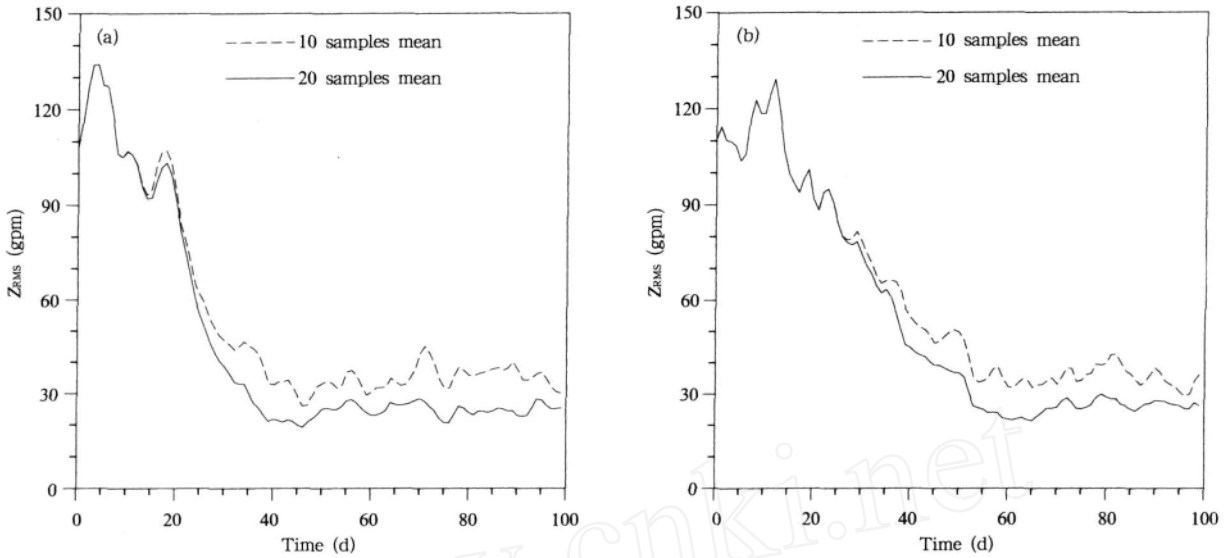


图 1 由 SAMIL 模拟得到的两组 REME 试验的 500 hPa 位势高度场结果之间的均方根误差随时间的变化 (第 1、2 组 REME 试验的初始场分别为第 30 年 1 月 1 日和第 31 年 1 月 1 日; a. 单精度试验结果, b. 双精度试验结果)

Fig. 1 Temporal evolution of the RMS (unit :gpm) of 500 hPa geopotential height between two SAMIL REME experiments under the computational mode of (a) single precision and (b) double precision and with initial conditions taken from those on the 1st day of the 30th and 31st integration year of a 60 years stable climate simulation (control run)

为了与冬季的初始场作对比,选取两个位于夏季的初始场进行相似的试验。图 2 是初始场选为第 30 年 6 月 1 日(以下简称 0601,同样 1 月 1 日简记为 0101)和第 31 年 0601 的试验,图 2a 中曲线变化的细节虽然与图 1 不完全相同,但总体趋势相似,也

能明显看出初始场的作用在逐步衰减。图 2b 与图 2a 的区别是积分使用的时步长为 600 s,在图 2b 中误差变化的总体趋势也是逐渐减小,并且最后平衡的误差区间也相同,但衰减速度与图 2a 稍有不同。

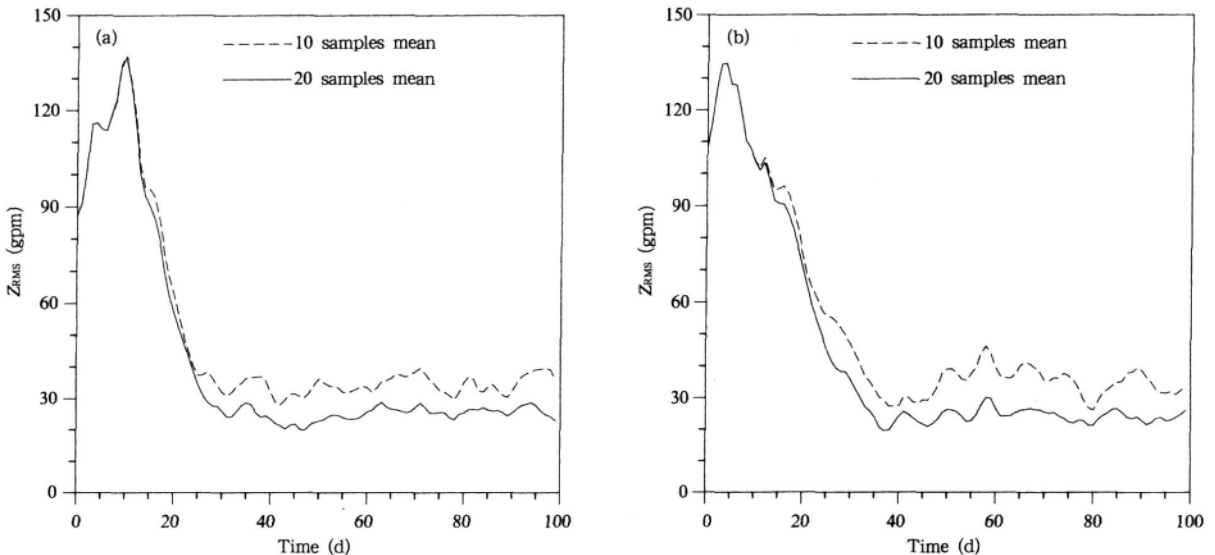


图 2 由 SAMIL 模拟得到的两组 REME 试验 500 hPa 位势高度场结果之间的均方根误差随时间的变化 (第 1、2 组 REME 试验的初始场分别为第 30 年 6 月 1 日和第 31 年 6 月 1 日; a. 积分时间步长为 900 s, b. 积分时间步长为 600 s)

Fig. 2 Temporal evolution of the RMS (unit :gpm) of 500 hPa geopotential height between two SAMIL REME experiments under a time step of (a) 900 s (b) 600 s, and with initial conditions taken from those on the 1st day of June of the 30th and 31st integration year of a 60 years stable climate simulation (control run)

图 1、2 两组试验选取的是较大的初始场差别,观察计算场差别随时间的变化。图 3 的试验中,在选取初始场的差别足够小($Z_{RMS}(t=0) \rightarrow 0$)的情况下考察两个计算场的差别随时间的变化。产生小差别有多种方法,本文将这种小差别减小到 0,然后总共计算 20 个试验,分别选取前 10 个样本做 REME 和后 10 个样本做 REME,再计算 RMS,然后比较计算差别。前 10 个样本的选取,是从总样本 20 中随机选取的,剩下的作为后 10 个样本,因此在统计上前 10 个样本和后 10 个样本的选取没有特性上的差异。

从图 3a 可以看出,小差别的初始场,使用 10 个样本做 REME 后再计算 RMS 的结果,计算差别在初期很小,然后逐步增大,最后到达一个稳定的差别值附近,随后小幅度振动变化。比较明显的差别出现是在第 7 到 10 天。图 3b 为双精度的结果,总体

趋势同图 3a 相似,但要注意,双精度结果时,差别增加到比较明显是在 20 天之后,比单精度所需的时间要长。

对比图 3 中虚线和实线,在 REME 个数相同时,大的初始场差别会减弱到一个固定的差别,随后小幅度振动变化,微小的初始场差别会增大到同样一个固定的差别,随后小幅度振动变化。这表明在舍入误差存在的计算环境中初始场作用的形式。这个相对固定的差别是与 REME 中使用的计算个数有关系的,而且有随着 REME 个数增加而减小的趋势。

值得注意的是,图 3 中试验的结果是对以往各种初值误差增长试验的一个补充,即当初值误差为 0 时(具体地说就是用两个完全相同的初始场计算,但每次计算时计算次序不同),由于舍入误差的存在,不同计算条件下的模拟结果误差也会增长。

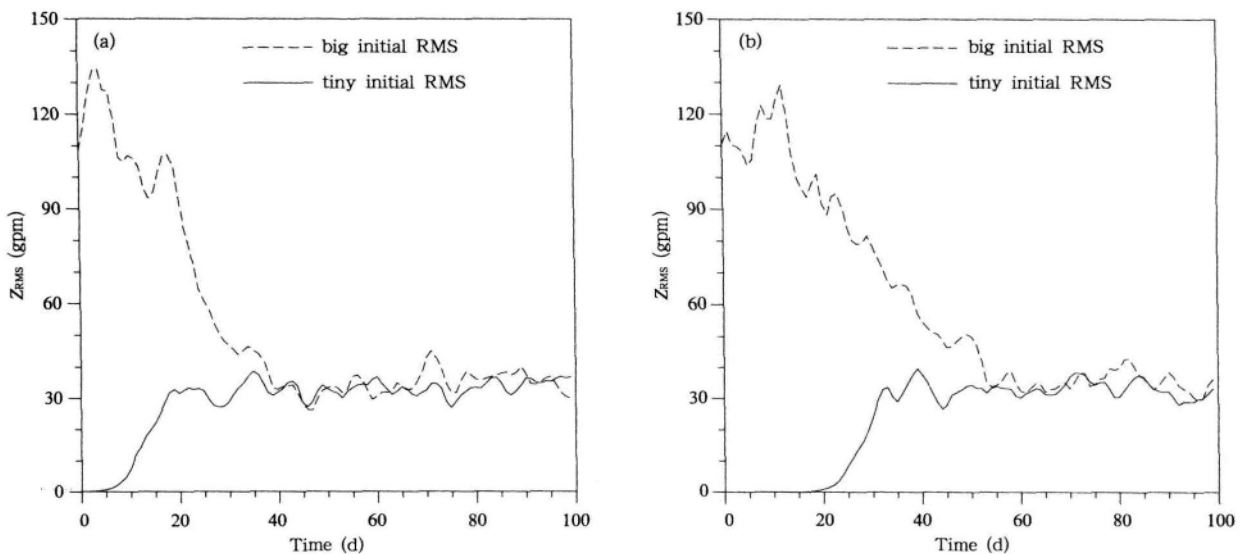


图 3 由 SAMIL 模拟得到的两组 REME 试验 500 hPa 位势高度场结果之间的均方根误差随时间的变化 (a. 单精度结果, b. 双精度结果; 虚线是每个初始场选 10 个样本做 REME 得到的结果,第 1、2 组 REME 试验的初始场分别为第 30 年 1 月 1 日和第 31 年 1 月 1 日。实线是第 30 年 1 月 1 日的试验前 10 个样本 REME 试验和后 10 个样本 REME 试验结果之间的 RMS 差别)

Fig. 3 Same as Fig. 1 except that the solid line in (a) and (b) represents the difference in the RMS of two REME experiments, each using 10 randomly selected Samples. This configuration is for the purpose of obtaining a tiny initial RMS, i. e., $Z_{RMS}(t=0) \rightarrow 0$

为了说明初始场衰减现象是气候模拟的固有特点,而非 SAMIL 模式所独有的现象,我们选取 ECHAM5 模式重复前面的试验。与图 1 的计算过程类似,从用 ECHAM5 模式得到的两组 REME 试

验 500 hPa 位势高度场结果之间的均方根误差随时间的变化(图 4)可以看到, ECHAM5 试验结果在开始时刻有较大的初始场差别,随着时间的增大,差别有减小的趋势,计算结果在 40 天以后不再减小开始

小幅度振动变化,并且一直持续。图4中虚线为10个样本做REME后再计算RMS的结果,实线为20

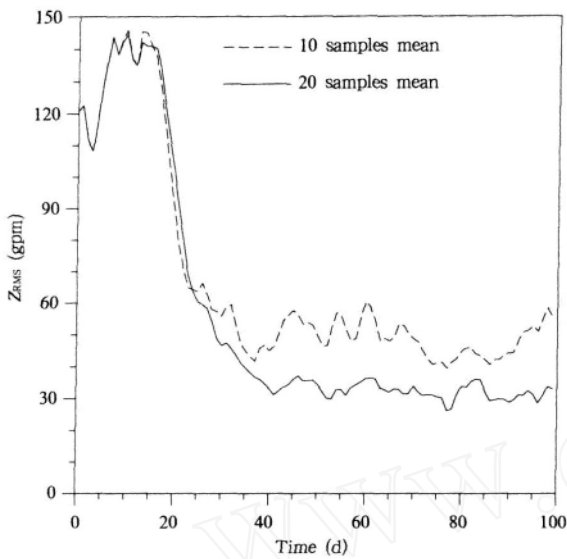


图4 由ECHAM5模拟得到的两组REME试验500 hPa位势高度场结果之间的均方根误差随时间的变化(第1,2组REME试验的初始场分别为第30年1月1日和第31年1月1日;虚线是每组REME试验选取10个样本得到的结果,实线同虚线但REME试验样本数为20)
Fig. 4 Same as Fig. 1 but for ECHAM5 experiments

个样本的情况,可以看出,增加REME计算的数量,能够将最后结果差异的值减小。

图5是由ECHAM5模拟得到的两组REME试验500 hPa位势高度场结果之间的均方根误差随时间的变化,它的试验设计方案与图3类似。从图5a中的实线可以看出,小差别的初始场,使用10个样本做REME后再计算RMS的结果,计算差别在初期很小,然后逐步增大,最后到达一个稳定的差别值附近,随后小幅度振动变化。而对于较大的初始场差别图5b,初期计算结果差别较大,逐步减小,最后到达一个稳定的差别值附近,随后小幅度振动变化。

通过利用实际的大气环流模式SAMIL和ECHAM研究了初始场对气候模拟的影响,发现有舍入误差存在的计算环境下,初始场的衰减作用当初始差别较大时,其逐步衰减到一个波动值。而对于特别微小的初始场差别,理论上讲其长期影响也是衰减的,但由于计算精度有限,可能会增大到一个波动值。无论初始场差别大小,最后稳定的误差波动范围是比较一致的。

由于初始作用的衰减速度较快(试验表明在一定时间内(40—60 d),不同的模式稍有不同),不同初始场的计算结果在一年以后的差别趋于稳定的小

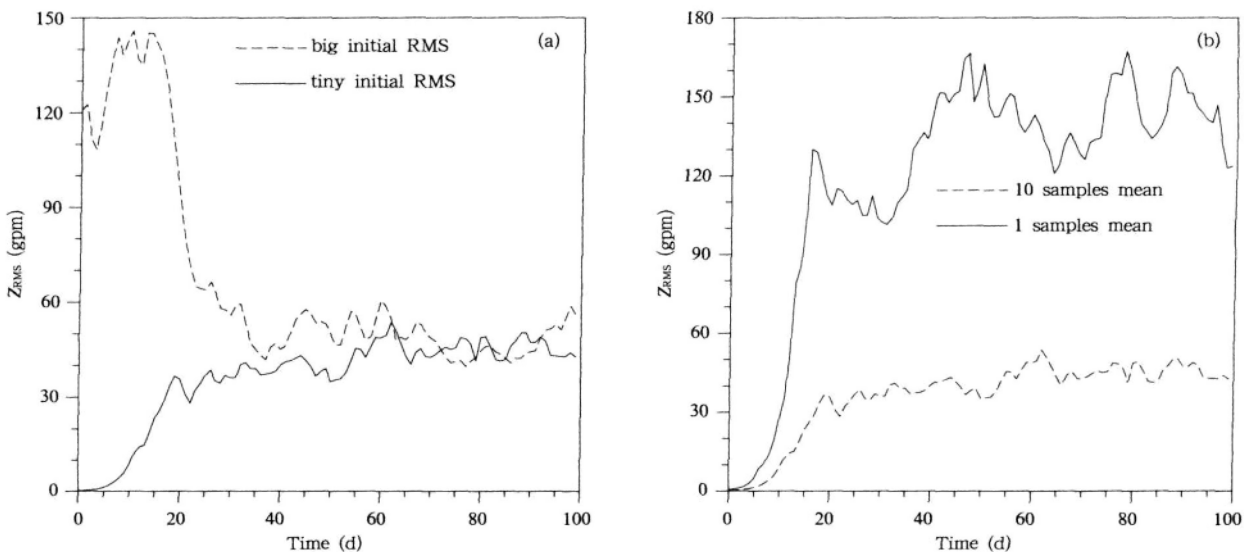


图5 由ECHAM5模拟得到的两组REME试验500 hPa位势高度场结果之间的均方根误差随时间的变化
(a. 虚线是每个初始场选10个样本做REME得到的结果,第1,2组REME试验的初始场分别为第30年1月1日和第31年1月1日,实线是第30年1月1日的试验前10个样本REME试验和后10个样本REME试验结果之间的RMS差别; b. 虚线是第30年1月1日的试验前10个样本REME试验和后10个样本REME试验结果之间的RMS差别,实线同虚线,但样本个数为1)

Fig. 5 Same as Fig. 3 except that in (b) the solid line represents the difference in the RMS of two REME experiments, each using only 1 sample, and the dashed line represents the same but with 10 samples

差别。因此在去除模式最初一段时间(如一年)的结果后,利用不同的初始场得到的结果是没有本质区别的。而且利用不同初始场的结果进行算术平均同样可以起到减小舍入误差的影响的作用。

5 结论和讨论

本文通过实际的大气环流模式 SAMIL 和 ECHAM 研究了初始场对气候模拟的影响,验证了气候数值模拟中,初始场作用是逐步衰减的,此结果为丑纪范的理论分析提供了数值试验支持;得到了具体模式的衰减速率曲线和衰减需要的时间范围;指出了实际的计算环境中,无论初值差别大小,最后都将趋于一个平衡的误差,然后围绕这个误差做随机振动,通过集合平均,可以将这个平衡的误差值减小。

值得注意的是,根据李建平等(2006)及丁瑞强等(2007)的理论研究,将线性的误差增长理论拓展为非线性的误差增长理论,可以得到误差在一定时间后趋于饱和的结论,这无疑与本文的结论相吻合。

可以把初值集合预报和气候平均场的使用建立在初始场作用衰减的理论基础之上。当去除模式最初一段时间(如一年)的结果后,月平均的数值可以看成是具有一定数量(一个月中的天数)初值的一种集合预报,可以用来讨论年变化。通过月平均得到的年平均可以看成是样本数为 12 的集合预报,可以用来讨论年际变化。对于气候模拟,初始场的集合预报之所以成立,是由于初始场作用是衰减的;初始场的集合预报之所以有效,是因为实际计算环境中存在由于舍入误差带来的饱和误差。

在完成本文的试验和对初始场作用衰减理论有了进一步认识之后,可以加深对气候集合预报问题的理解。气候集合预报有两大作用,一是减小误差,二是找出分叉(即找到可能的气候态)。

在减小误差的集合预报中第 1 类为减小舍入误差,第 2 类影响离散误差(如改变步长和模式分辨率等)。在第 1 类中包含了几小类问题:(1) 改变舍入误差型集合预报,(2) 改变初始场型集合预报,(3) 气候多年平均。这几种集合的办法即可以分别使用也可以结合在一起使用。例如在研究年际变化时,仅使用一次计算得到的结果,季节平均的误差变动范围较大,此时可以再加入一层 REME 或 IME 的集合(20 个样本左右),就能将季节平均的误差变动控制在较小的范围内。

改变模式的分辨率和时间步长等能够影响到离散误差,改变物理过程也会对离散误差造成影响,因此模式不同分辨率的模拟结果的集合预报和不同模式模拟结果的集合预报(超级集合预报),可以看作是同时减小离散误差和舍入误差的一种方法。本文的讨论未考虑分叉的影响,也没有考虑模式的具体物理过程,这是今后有待研究的问题。

致谢:作者对长期从事 SAMIL 和 ECHAM 数值模式研发的团队表示感谢。

References

- Chou J F. 1983. Some properties of operators and the effect of initial condition. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 41(4): 385-392
- Dalcher A, Kalnay E. 1987. Error growth and predictability operational ECMWF forecasts. *Tellus*, 39A: 474-491
- Ding R Q. 2007. *Nonlinear Error Dynamics and Predictability Study [D]* (in Chinese). Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
- Epstein E S. 1969. The role of initial uncertainties in prediction. *J Applied Meteor*, 8(2): 190-198
- Kalnay E, Dallavalle P J, Epstein E S. 1987. Hedging perfect prog forecasts towards climatology. *Camp Spring*, 197-201
- Kolmogoroff A N. 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *C R Acad Sci USSR*, 30: 301-305
- Li J P, Zeng Q C, Chou J F. 2000. Computational uncertainty principle in nonlinear ordinary differential equations: Numerical Results. *Sci China (Series E)* (in Chinese), 43(5): 449-461
- Li J P, Zeng Q C, Chou J F. 2001. Computational uncertainty principle in nonlinear ordinary differential equations: Theoretical analysis. *Sci China (Series E)* (in Chinese), 44(1): 55-74
- Li Z J, Ji L R. 1995. Instability of trajectory and error growth. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 53(2): 138-147
- Li J P, Ding R Q, Chen B H. 2006. Review and prospect on the study of atmospheric predictability. *Frontier and Prospect of Atmospheric Sciences at the Beginning of the 21th Century* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 96-104
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17: 321-333
- Lorenz E N. 1982. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 34: 505-513
- Miyakoda K, Hembree G D, Strickler R F, et al. 1972. Cumulative results of extended forecast experiments I: Model performance for winter cases. *Mon Wea Rev*, 100(12): 836-855
- Mu M, Li J P, Chou J F, et al. 2002. Theoretical research on the predictability of climate system. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 7(2): 227-235
- Reynolds C A, Webster P J. 1994. Random error growth in NMC's global

- forecasts. *Mon Wea Rev*, 122(6) : 1281-1305
- Roeckner E, et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. Max Planck Institute for Meteorology Rep, 349, 127 pp
- Roeckner E, Brokopf R, Esch M, et al. 2006. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J Climate*, 19(16) : 3771-3791
- Rosinski J M, Williamson D L. 1997. The accumulation of rounding errors and port validation for global atmospheric models. *SIAM J Scientific Computing*, 18 (2) : 552-564
- Shukla J. 1985. Predictability, Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere. Academic Press, 87-122
- Smagorinsky J. 1969. Problems and promises of deterministic extended range forecasting. *Bull Amer Meteor Soc*, 50: 286-311
- Thompson P D. 1957. Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns. *Tellus*, 9: 275-295
- Walter J K. 1969. Note on the accumulated error in the numerical integration of a simple forecast model. *Mon Wea Rev*, 97 (12) : 896-901
- Wang P F, Huang G. 2006a. A study on the dependency of maximum prediction time on computation precision and time step-size in numerical model. *Clim Environ Res (in Chinese)*, 11(3) :395-403
- Wang P F, Wang Z Z. 2006b. A parallelization scheme for atmospheric general circulation model. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 30(3) : 519-525
- Wang P F, Huang G, Wang Z Z. 2006c. Analysis and application of multiple precision computation and round-off error for nonlinear dynamical systems. *Adv Atmos Sci*, 23 (5) : 758-766
- Wang P F, Wang Z Z, Huang G. 2007. The influence of round-off error on the atmospheric general circulation model. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 31(5) : 815-825
- Wang Z Z, Wu G X, Wu T W, et al. 2004. Simulation of Asian monsoon seasonal variations with climate model R42L9/LASG. *Adv Atmos Sci*, 21: 879-889
- Wang Z Z, Wu G X, Li P. 2005a. The development of COALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation I: The influences of horizontal resolution. *J Tropical Meteor (in Chinese)*, 21: 225-237
- Wang Z Z, Yu R C, Wang P F, et al. 2005b. The development of COALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation :The increase of vertical resolution and its influences. *J Tropical Meteor (in Chinese)*, 21: 238-247
- Williamson D L, Washington W M. 1973. On the importance of precision for short-range forecasting and climate simulation. *J Appl Meteor*, 12 (8) : 1254-1258
- Zhou T J, Yu R C, Wang Z Z, et al. 2005. The General Circulation Atmosphere Model SAMIL and Its Coupled Model FGOALS-s (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 288pp

附中文参考文献

- 丑纪范. 1983. 初始场作用的衰减与算子的特征. *气象学报*, 41(4) : 385-392
- 丁瑞强. 2007. 非线性误差增长理论和可预报性研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所
- 李志锦, 纪立人. 1995. 轨线不稳定与误差增长. *气象学报*, 53(2) :138-147
- 李建平, 曾庆存, 丑纪范. 2000a. 非线性常微分方程的计算不确定原理. 数值结果. *中国科学 (E辑)*, 30(5) : 403-412
- 李建平, 曾庆存, 丑纪范. 2000b. 非线性常微分方程的计算不确定原理. 理论分析. *中国科学(E辑)*, 30(6) : 550-567
- 李建平, 丁瑞强, 陈宝花. 2006. 大气可预报性研究的回顾与展望. 21世纪初大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 96-104
- 穆穆, 李建平, 丑纪范等. 2002. 气候系统可预报性理论研究. *气候与环境研究*, 7(2) :227-235
- 王鹏飞, 黄刚. 2006a. 数值模式预报时效对计算精度和时间步长的依赖关系. *气候与环境研究*, 11(3) : 395-403
- 王鹏飞, 王在志. 2006b. 大气环流数值模式的一种并行化方案. *大气科学*, 30(3) : 519-525
- 王鹏飞, 王在志, 黄刚. 2007. 舍入误差对大气环流模式模拟结果的影响. *大气科学*, 31(5) :815-825
- 王在志, 吴国雄, 刘平等. 2005a. 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: 水平分辨率的影响. *热带气象学报*, 21: 225-237
- 王在志, 宇如聪, 王鹏飞等. 2005b. 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 II: 垂直分辨率的提高及其影响. *热带气象学报*, 21: 238-247
- 周天军, 宇如聪, 王在志等. 2005. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s. 北京: 气象出版社, 288pp