

荆现文, 张华. 2012. McICA 云—辐射方案在国家气候中心全球气候模式中的应用与评估 [J]. 大气科学, 36 (5): 945–958, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11155. Jing Xianwen, Zhang Hua. 2012. Application and evaluation of McICA cloud–radiation framework in the AGCM of the National Climate Center [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 945–958.

McICA 云—辐射方案在国家气候中心全球气候模式中的应用与评估

荆现文^{1,2,3} 张华³

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 本文将一种新的、可以灵活给出云的次网格结构的蒙特卡洛独立气柱近似 (McICA) 云—辐射方案应用于国家气候中心全球气候模式 BCC_AGCM 2.0.1 中; 由于此方案会引入一定的随机误差, 本文对随机误差的特征和对所模拟的气候场的影响进行了分析和评估。结果表明, McICA 随机误差引起的模拟扰动很小, 随机误差对所模拟的各种气候变量影响也很小, 全球平均值与作为参考的精确独立气柱近似 (ICA) 计算的差别都在 0.01% 量级, 模拟结果的纬向分布、垂直分布和典型区域内的分布等气候特征都基本上与 ICA 一致。因此, 在国家气候中心全球气候模式 BCC_AGCM 2.0.1 中应用 McICA 云—辐射方案具有较高的可信度, 模拟性能的提升仍然主要取决于模式物理过程、动力框架等方面, 而不受随机误差的影响。考虑到 McICA 方案下云和辐射过程是各自独立的, 云的结构调整和辐射模式的改进都更为简便, 为模式在未来的进一步改进提供了很大便利和发展空间。

关键词 McICA ICA 云—辐射方案 气候模式

文章编号 1006-9895(2012)05-0945-14

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11155

Application and Evaluation of McICA Cloud–Radiation Framework in the AGCM of the National Climate Center

JING Xianwen^{1,2,3} and ZHANG Hua³

1 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

Abstract McICA, a new cloud–radiation framework that can easily define the sub-grid cloud structure, is incorporated into the National Climate Center’s Global Climate Model, called BCC_AGCM 2.0.1. As random noise is inevitably introduced by the scheme, it is important to evaluate and estimate how the noise behaves and whether the modeled climate will be degraded by the noise. Results show a minor perturbation of modeled climate within McICA samples, and the modeled climate fields are impacted very little by McICA noise, with the global mean bias at the order of 0.01% compared to the reference ICA (independent column approximation) results. Good agreement between McICA and ICA

收稿日期 2011-09-01, 2012-04-11 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41075056, 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB403405, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项课题 GYHY201106022

作者简介 荆现文, 男, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事气候模式、云—辐射相互作用研究。E-mail: jingxianwen@live.cn

通讯作者 张华, E-mail: huazhang@cma.gov.cn

results is also illustrated from zonal mean, vertical, and domain distributions of variables. So, it is highly reliable to use the McICA cloud-radiation scheme in BCC_AGCM 2.0.1 to do climate researches. Because random noises have little impact on the modeling, the modeling ability of BCC_AGCM 2.0.1 still depends on its physical parameterization and dynamic framework improvements. Considering that cloud and radiation processes are separately coded in the new scheme, it is now very easy to make improvement and progress in both cloud and radiation codes themselves, which facilitates and allows more space for the further development of the model.

Key words McICA, ICA, cloud-radiation scheme, climate models

1 引言

辐射过程是全球气候形成和变化的重要原因之一,其中云对调节局地以及全球辐射平衡起着至关重要的作用。当前主要气候模式的水平分辨率只有几十至几百公里,对于不能分辨的过程——包括云和辐射过程的处理一般采用较为粗略的参数化方法处理。云的结构粗略描述制约了辐射的精确计算,也增加了气候模拟的不确定性。要实现准确的辐射计算,就要建立能够描述更复杂云结构的次网格云结构模型。

Räisänen et al. (2004) 建立了一种次网格尺度的云产生器,它基于一定的数学和物理依据将模式网格平均的云量、云水/冰含量等信息分布到若干次网格柱上,以这些次网格柱的集合来实现复杂的云结构(包括云的水平变化和垂直重叠结构)。该云产生器的优点不仅在于可以给出复杂的次网格云结构,而且在于其实现方式非常方便,可以很容易地调整云结构以使云的结构更趋向某种真实的云结构特征,或者使模式达到某种辐射平衡状态。

通常,云产生器需要产生几十个次网格柱来得到足够精细的云结构。如果在每个次网格柱内进行全波段的辐射计算(这种方法称为独立柱近似,英文为 independent column approximation,简称 ICA),势必大大增加模式的运算时间。为了避免 ICA 计算带来的巨大计算机耗时,Pincus et al. (2003) 提出一种快速、弹性、近似的辐射算法,称为蒙特卡罗独立柱近似(Monte Carlo Independent Column Approximation,简称 McICA)。在云产生器基础上利用 McICA 进行辐射计算,使模式在实现云的复杂次网格结构的同时保证了辐射计算的高效和准确,这是一种有效的、不同于传统方案的新的云—辐射方案。

次网格云产生器和 McICA 辐射计算方法相结合的云—辐射方案(简称 McICA 云—辐射方案)相对传统云—辐射方案的最直接的优越性在于,其

能够通过云产生器给出任意复杂程度的次网格云结构,如云的重叠假定、云水的水平分布等,云的结构比传统方案更灵活、更接近实际分布(Räisänen et al., 2004);另一个重要的优越性在于,在模式中实现了对云的次网格结构的描述和辐射传输过程的分离,提供了一个更灵活的计算框架,这种框架下云次网格结构和辐射模式的调整都大大简化,从而为这两个物理过程在未来的改进和发展都提供了很大的便利和空间,也增加了模式的灵活性。

传统云—辐射方案的一个很明显的问题是,云的结构和辐射算法互相缠绕,云的结构往往需要在辐射计算的过程中进行设定;这使得云和辐射互相牵制,缺少灵活性,不利于其后续对两个过程的改进。而在上述新方案中,云的结构由云产生器来阐释,使辐射计算与对云结构的描述分离开来,大大简化了辐射计算。因此,从灵活性来看,这种新的云—辐射方案有着很好的应用前景。本文即在 McICA 框架下,将 Zhang et al. (2006a, 2006b) 发展的 K-分布辐射方案(Shi, 1981; 张华, 1999; Zhang et al., 2003) 应用于 BCC_AGCM 2.0.1 模式,有利于辐射模式的更新和替代。

McICA 云—辐射方案的模拟性能主要取决于其具体采用的云微物理和光学性质、云的重叠假定、辐射传输模式等,但是也受到其所引入的随机误差的一定影响。在对新方案的模拟性能进行评估之前,有必要对随机误差的影响有所了解。随机误差的影响是 McICA 方案不可避免的,因为计算实效性的要求,不能对所有次网格柱进行全波段的光谱积分,只能在每个光谱积分点上随机选取部分次网格云柱进行辐射计算。研究表明,虽然对于一次 McICA 辐射计算而言,其结果相对于精确的 ICA 计算可能偏差较大,但是对于多次计算的平均而言,其在统计意义上相对 ICA 计算是无偏的,McICA 是 ICA 的很好近似。利用不同模式、不同辐射方案的研究结果。模式模拟结果对 McICA 随机误差并不敏感,大尺度模式的区域和时间平均很好地平滑掉

了这种误差 (Räisänen et al., 2005; Pincus et al., 2006; Räisänen et al., 2007; Barker et al., 2008)。

除了在大尺度气候模式中得到应用, 最近, McICA 的优势在其他研究工作中也发挥出了较好作用, 比如 Pincus and Stevens (2009) 在次网格大涡旋的模拟中使用 McICA 辐射方案, 在提高涡旋分辨率的同时不至于使辐射计算 CPU 负担过重; Hill et al. (2011) 在一个低分辨率数值天气预报模式使用 McICA 方案, 相对传统方案, 提高了对温度场的预报能力。

为提高国家气候中心全球气候模式 BCC_AGCM 2.0.1 对云—辐射过程的模拟能力, McICA 方案是一个很好的选择。虽然以上研究工作都表明了 McICA 方法在解决次网格云—辐射计算问题上的优越性, 但是在将这种方法应用于新的气候模式和辐射模式时仍需谨慎, 因为 McICA 误差与辐射模式的光谱分辨率关系密切, 气候模式对随机误差的响应也因其分辨率、物理过程的不同而有差异。在把 McICA 引入一个新的大尺度模式时, 应首先检验 McICA 的误差水平以及其对气候模拟的影响如何。

本文将次网格云产生器和 McICA 辐射计算方法相结合的云—辐射方案应用于国家气候中心全球气候模式 BCC_AGCM 2.0.1 中, 并采用了 Zhang et al. (2006a, 2006b) 发展的相关 K 分布辐射模式。探讨了该方案的随机误差特征及其对所模拟的气候场的影响, 为其常规应用的可行性和有效性提供科学依据, 同时也发现其中可能存在的问题。对随机误差影响的评估是未来进行新方案模拟效果的检验和其他各项模拟研究的基础。

文章第一部分为研究背景介绍, 第二部分对所使用气候模式和辐射模式以及 McICA 云—辐射方案做简单介绍; 第三部分给出了 McICA 误差的优化方法, 并对其在气候模式中的表现进行了离线的诊断分析; 第四部分分析了 McICA 误差对所模拟的气候场的影响, 分别从气候场的水平分布、垂直廓线分布和区域气候特征几方面进行探讨。最后在第五部分进行总结和讨论。

2 模式和 McICA 方案介绍

2.1 BCC_AGCM 2.0.1 模式介绍

本文所用气候模式为中国气象局国家气候中心第二代大气环流模式 BCC_AGCM 2.0.1, 该模式

是在原国家气候中心模式基础上参考 NCAR CAM3 (Collins, 2004) 模式改进形成的。BCC_AGCM 2.0.1 采用 T42 水平分辨率 (近似于 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$), 垂直方向采用混合 σ -压力坐标系, 共 26 层, 最顶层高度约为 3.5 hPa。模式动力积分步长为 20 分钟, 辐射方案每小时 (3 个步长) 执行一次。相对于 NCAR CAM3 模式, 引入了新的参考大气和参考面气压, 在对流参数化 (Zhang and Mu, 2005)、雪盖参数化 (Wu and Wu, 2004)、干对流调整 (颜宏, 1987)、洋面潜热通量调整等方面作了改进 (董敏等, 2009)。对于 BCC_AGCM 2.0.1 更具体的介绍请参阅 Wu et al. (2010)。因为 BCC_AGCM 2.0.1 原有的气溶胶光学性质与本文辐射模式不相符, 所以在本文以下结果中暂未考虑气溶胶的影响。

2.2 辐射模式介绍

本文所用辐射模式为 Zhang et al. (2006a, 2006b) 发展的相关 K 分布模式。该模式计算精度相对精确的逐线积分误差不超过 3%, 同时也大大提高了辐射计算效率, 这对于 GCM 模拟是很重要的。短波包含 9 个带、共 26 个 K 分布积分点, 长波包含 8 个带、共 41 个积分点。利用 HITRAN 2000 光谱数据计算了 22 种气压、3 种大气温度条件下的 K 分布参数; 这 22 种气压分别为 0.01、0.0158、0.0215、0.0251、0.0464、0.1、0.158、0.215、0.398、0.464、1.0、2.15、4.64、10.0、21.5、46.4、100.0、220.0、340.0、460.0、700.0 和 1013.0 hPa, 三种温度分别为 200、260 和 320 K。在气候模式中, 对于任意气压和温度情况的 K 分布以线性插值方法得到。

重新计算了冰云的光学性质 (消光系数、单次散射比、非对称因子)。根据 Fu (1996) 的冰云粒子形状和谱分布数据、结合 Yang et al. (2005) 的相函数数据和 Baum et al. (2005) 的不同形状冰云的混合方法计算得到上述光学性质; 冰云有效半径用 Wyser (1998) 的温度和云水路径双参数方法代替原气候模式中的温度单一参数方法。

2.3 McICA 云—辐射方案介绍

蒙特卡洛独立气柱近似 (McICA) 是在独立气柱近似 (ICA) 基础上, 为充分利用多气柱的云结构、同时节省辐射计算时间而发展起来的一种网格平均的辐射通量计算方法。Pincus et al. (2003) 详细介绍了 McICA 方法的由来并简要探讨了其随机误差。Räisänen and Barker (2004) 在此基础上进一步发展了减小 McICA 误差的方法, 有效控制了

McICA 的随机误差。具体做法简单介绍如下。

假设在一个区域 R 内, 已知由多个次网格柱表示的云结构, 区域平均的辐射通量 $\langle F^{\text{ICA}} \rangle$ 可以精确地用 ICA 计算得到, 也就是对每个次网格柱进行全波段的辐射积分:

$$\langle F^{\text{ICA}} \rangle = \int S(\lambda) \left\{ \iint_R F(x, y, \lambda) dx dy \right\} d\lambda, \quad (1)$$

其中, x, y 表示次网格柱位置, $S(\lambda)$ 是波长 λ 处的光谱权重, $F(x, y, \lambda)$ 表示该次网格柱内 λ 波长处的辐射通量。

如果区域 R 内不是所有次网格柱都有云, 那么 $\langle F^{\text{ICA}} \rangle$ 可以对晴空和有云部分分别计算、并用云量 A_c 加权得到:

$$\begin{aligned} \langle F^{\text{ICA}} \rangle &= (1 - A_c) \int S(\lambda) F^{\text{clr}}(\lambda) d\lambda + \\ &A_c \int S(\lambda) \left\{ \iint_{R_{\text{cld}}} F^{\text{cld}}(x, y, \lambda) dx dy \right\} d\lambda \\ &= (1 - A_c) \langle F^{\text{clr}} \rangle + A_c \langle F^{\text{cld}} \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\langle F^{\text{clr}} \rangle$ 为晴空部分的平均辐射通量, $\langle F^{\text{cld}} \rangle$ 为有云部分的平均辐射通量。如果有云的次网格柱总数为 N , 在整个光谱段包含 M 个积分点, 那么在得到 $\langle F^{\text{cld}} \rangle$ 时就要进行 $N \times M$ 次辐射求解, 由于 N 通常有几十个, 这将使模式计算时间增加数十倍。

为了减少辐射计算时间, Pincus et al. (2003) 利用统计学里随机取样的思想提出了一种简化的处理方法。该方法在计算 $\langle F^{\text{cld}} \rangle$ 时, 对于每个光谱积分点, 不是在所有的有云次网格柱进行计算, 而是随机选取其中的一个, 这样原来对云柱和光谱的二维积分变为仅对光谱进行的一维积分, 总的辐射求解次数减少为 M 次:

$$\langle F^{\text{cld}} \rangle \approx \int S(\lambda) F^{\text{cld}}(S_{\text{md}}, \lambda) d\lambda, \quad (3)$$

其中, S_{md} 是对以 x, y 表示的次网格柱的一次随机取样。因为随机取样又称为蒙特卡洛取样, 所以这种方法就称为蒙特卡洛独立柱近似, 英文简称 McICA。

虽然 McICA 对于云柱的光谱积分是不完备的, 但是多次取样的平均趋向于精确的 ICA 结果, 相对于 ICA 是统计无偏的。尽管如此, McICA 带来的随机误差仍然是一个不容忽视的问题, 即使很小的误差也可能在气候模式中被放大, 从而影响所模拟的气候, 因此控制 McICA 误差就显得非常重要。

Räisänen and Barker (2004) 给出了两种控制 McICA 误差的方法, 一种是空间取样的优化, 另一种是对光谱取样的优化。对空间取样的优化即取样仅对有

云次网格柱进行, 这样避免了对晴空大气多次取样造成的不必要的计算浪费; 对光谱取样进行优化即在重要光谱点 (那些对云的辐射效应影响较大的积分点) 增加次网格柱取样次数, 从而减小随机误差。本文所用的基本形式的 McICA 即为空间优化的形式, 在此基础上应用第二种方法对 McICA 误差进行了控制, 并与基本形式进行了对比 (见第 3.1 小节)。

3 McICA 误差的优化和离线诊断分析

3.1 McICA 误差的光谱取样优化

以每个光谱点仅取一个次网格云柱的 McICA 方法为其基本形式, 记为 CLDS (意为对 Clouds 取样), 在本文辐射模式中, CLDS 一次全波段计算共需取样 67 个次网格气柱。在进行光谱取样优化时, 出于计算效率的考虑, 在 CLDS 基础上总取样数增加一倍 (共 134 次) 是比较适中的, 将此种 McICA 形式记为 SPEC1 (意为对 Spectrum 取样)。为了解光谱取样次数进一步增加对 McICA 误差的影响, 在 SPEC1 基础上再增加一倍取样 (共 201 次) 用来对比分析, 将此种 McICA 形式记为 SPEC2。

新增取样数并不是均匀分配于各个光谱点, 而是使相对重要的光谱点的取样数更多。采用 Räisänen and Barker (2004) 的方法来逐一确定新增取样的光谱位置, 其做法为: 在 CLDS 基础上, 每确定一个取样位置, 都要保证: 相比在别的位置增加取样, 在此位置增加取样能使 McICA 标准差达到最小。与 Räisänen and Barker (2004) 不同的是, 这里没有以云的辐射强迫 (即云对大气顶和地面辐射通量的影响) 为标准差判定对象, 而是以质量加权的整层气柱的辐射加热率作为标准差判定的对象, 这是因为云的辐射强迫反映的是云对大气顶或地面的单个表面辐射收支的作用, 而加热率反映的是每个模式层的净辐射收支, 质量加权的整层气柱辐射加热率代表了气柱总体辐射收支, 以此作为 McICA 随机误差判定标准能够保证气柱总体辐射收支的误差得到有效控制, 使大气热力结构的随机扰动降到最小。云的加热作用对于激发 MJO 等大气动力过程是很重要的 (查晶和罗德海, 2011)。考虑到热带大气对流最旺盛、云的垂直结构最复杂, 选取了模式中一个典型的热带大气廓线及其云量、云水信息, 进行以上误差优化计算, 其中短波计算时太阳高度角余弦固定为 0.7 (根据计算, 太

阳高度角变化对这里结果的影响很小)。

图 1 给出了质量加权的长波和短波加热率的 McICA 标准差随光谱取样数增加时的变化,虚线表示增加一倍取样的位置。可以看出,无论短波还是长波,增加两倍光谱取样使加热率的标准偏差降低了约 50%;但是绝大部分是由最初增加的一半取样数贡献的,随着取样数继续增加,每新增一个取样数对 McICA 误差的改进越来越小。

利用以上三种形式的 McICA 分别进行 10000 次计算,表 1 给出了主要的加热率、通量和计算时间的统计结果。可以看出,对于 SPEC1,在计算时间增加约 35%的情况下,长波和短波加热率标准差都减小了约 45%,同时长波辐射通量标准差也大大减小;然而短波辐射通量的标准差仍然控制得相对较弱,仅减小了 20%左右,这可能与短波辐射积分点较少有关。当取样数增加两倍时,除了以上已经有效优化的量得到进一步改进以外,短波辐射通量误差也有较大改进,但是计算时间增加了将近 3/4。综合来看, SPEC1 有效降低了误差,又没有过多增加计算时间,是在气候模式中控制 McICA 误差的最可行方法。

3.2 McICA 误差在 BCC_AGCM 2.0.1 中的离线分析

进一步将以上得到的 CLDS、SPEC1 和 SPEC2

形式的 McICA 应用于 BCC_AGCM 2.0.1 中,进行离线的误差诊断,定量分析 McICA 误差在本模式中的大小和分布。图 2 给出了离线误差诊断的流程图。以 BCC_AGCM 2.0.1 模式的云量、云水/冰含量作为云产生器的输入量,得到每个时步的次网格云结构,在此基础上连续进行 $T=20$ 次 McICA 辐射计算用以诊断该时步每个格点的 McICA 误差,这 20 次计算结果的平均值约等于 ICA 准确值,其标准差代表了 McICA 相对 ICA 的偏差程度,因此这里用 20 次计算的标准差表示 McICA 误差的大小。

表 1 一个典型热带大气条件下的 McICA 误差比较
Table 1 Comparison of McICA noises under a typical tropical atmosphere

	CLDS	SPEC1	SPEC2
长波辐射加热率/ $K \cdot d^{-1}$	0.194	0.108 (−44.3%)	0.095 (−51.0%)
短波辐射加热率/ $K \cdot d^{-1}$	0.309	0.169 (−45.3%)	0.134 (−56.6%)
大气顶净短波辐射通量/ $W \cdot m^{-2}$	61.89	50.85 (−17.8%)	38.26 (−38.2%)
大气顶净长波辐射通量/ $W \cdot m^{-2}$	4.19	2.39 (−43.0%)	2.01 (−52.0%)
地表净短波辐射通量/ $W \cdot m^{-2}$	68.88	53.37 (−22.5%)	40.48 (−41.2%)
地表净长波辐射通量/ $W \cdot m^{-2}$	9.42	5.29 (−43.8%)	4.53 (−51.9%)
计算时间/s	110.4	148.7 (+34.7%)	190.3 (+72.4%)

注:各气候变量的 McICA 误差以标准差表示,括号内数值为 SPEC1、SPEC2 相对于 CLDS 的变化百分比。

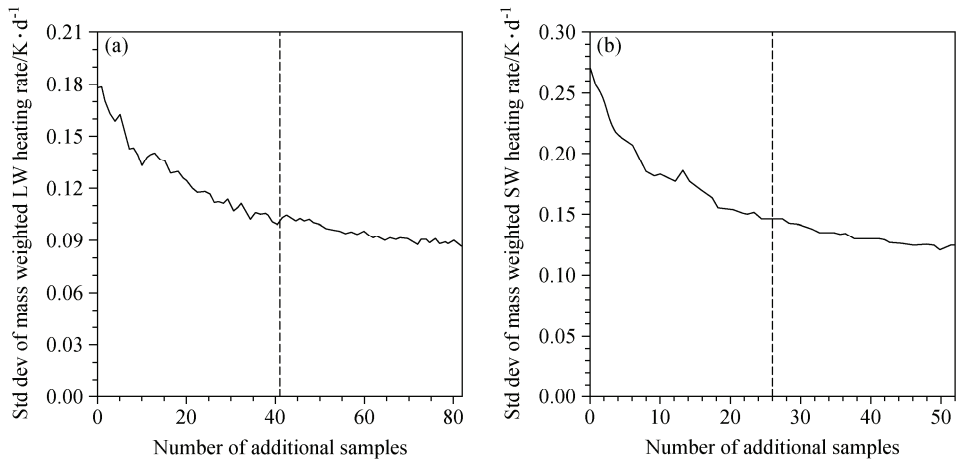


图 1 质量加权的长波 (a) 和短波 (b) 加热率的 McICA 标准差随光谱取样数增加时的变化。虚线: 取样数增加一倍的位置
Fig.1 Variation of McICA standard deviation of mass weighted (a) longwave heating rate and (b) shortwave heating rate with the increasing of spectral sample number. Dashed line: where spectral sample number has doubled

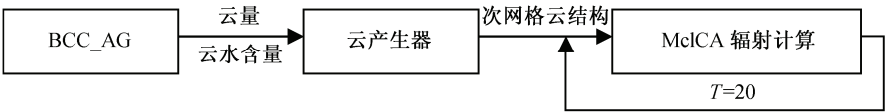


图 2 McICA 随机误差的离线诊断计算流程图
Fig.2 The flow chart of offline diagnosis of McICA random noise

表 2 是利用以上三种形式的 McICA 得到的各种辐射量的全球年平均标准差和均值,同时给出了精确的 ICA 计算结果作为参考。可以看出,从 CLDS 到 SPEC1,取样误差逐步减小,其中短波和长波加热率误差减小超过 1/3;从 SPEC1 到 SPEC2,短波辐射通量误差减小最显著,而加热率和长波辐射通量则减小较弱,这与表 1 的情形相似。与 Räisänen and Barker (2004)、Pincus et al. (2006)、Räisänen et al. (2008) 利用其他模式的研究结果相比,表 2 中的误差水平与之相当或者更低,其中加热率误差比所有以上研究都小得多,这对于所模拟的热力过程的稳定性是重要的。从均值来看,几种误差水平的 McICA 得到了与 ICA 结果几乎完全相同的辐射通量和加热率,说明这几种形式的 McICA 相对 ICA 计算都是统计无偏的,多次计算的均值趋向于 ICA 结果。

图 3 给出了大气顶净长、短波辐射通量误差的

纬向平均分布。长、短波辐射通量误差都在赤道附近最大,主要是因为这里对流旺盛,云层普遍比较深厚、次网格云的结构比较复杂,因此对云的次网格取样对辐射通量的影响也较大。短波辐射通量的 McICA 误差比长波辐射通量大得多,这一方面是因为云对大气顶长波辐射通量的影响主要是通过云顶高度和温度,而对短波辐射通量的影响与各个高度的云的光学性质都有关系;另一方面还与本文辐射模式积分点数在短波段较少、长波段较多有关。图 4 给出了长、短波加热率误差的垂直分布,可以看出,加热率误差在近地面层最大,以长波贡献为主;从 CLDS 到 SPEC1,加热率误差减小几乎 1/2,而从 SPEC1 到 SPEC2,其改进是非常小的。

在以往研究中,大尺度气候模式对这样的 McICA 误差水平有很好的容纳力。但是, McICA 误差对所模拟气候的影响依赖于特定的气候模式,因此要将 McICA 常规地应用于本文气候模式中,

表 2 三种形式 McICA 的离线误差诊断及其与 ICA 的比较

Table 2 Offline noise diagnosis of the three forms of McICA and the comparison with ICA (independent column approximation) results

	CLDS	SPEC1	SPEC2	ICA
大气顶净短波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	19.47 (237.84)	15.04 (237.84)	11.21 (237.84)	237.84
地表净短波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	20.76 (165.11)	15.56 (165.11)	11.59 (165.11)	165.11
大气顶净长波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	3.08 (238.14)	1.92 (238.14)	1.51 (238.14)	238.14
地表净长波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	3.59 (61.99)	2.14 (61.99)	1.76 (61.99)	61.99
长波辐射加热率/ $\text{K}\cdot\text{d}^{-1}$	0.21 (−1.53)	0.13 (−1.53)	0.10 (−1.53)	−1.53
短波辐射加热率/ $\text{K}\cdot\text{d}^{-1}$	0.09 (0.63)	0.05 (0.63)	0.04 (0.63)	0.63

注: 括号外数值为 CLDS、SPEC1、SPEC2 的 McICA 误差 (以标准差表示) 以及 ICA 的全球平均值; 括号内数值为三种形式 McICA 的全球年平均值。

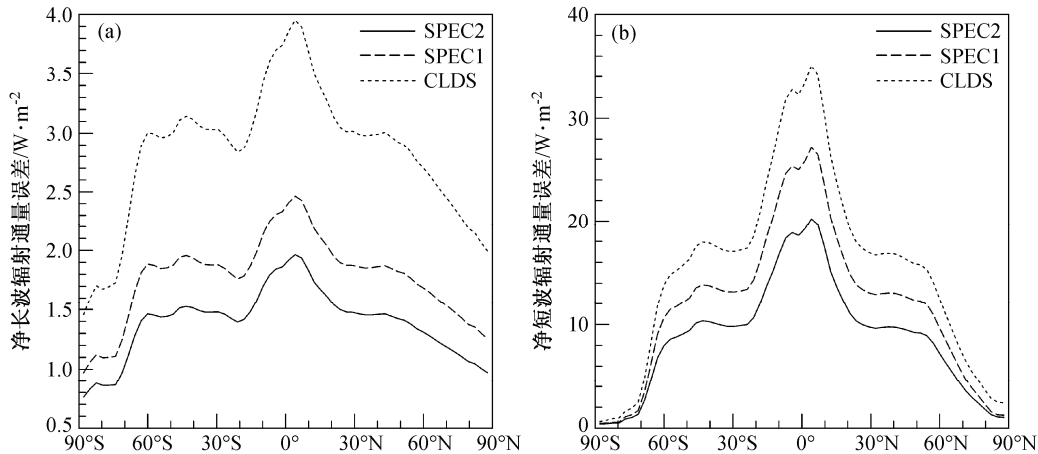


图 3 大气顶净长波 (a) 和净短波 (b) 辐射通量的 McICA 误差诊断 (单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig.3 Diagnosis of McICA noise for (a) net longwave flux and (b) net shortwave flux at the TOA (top of atmosphere)

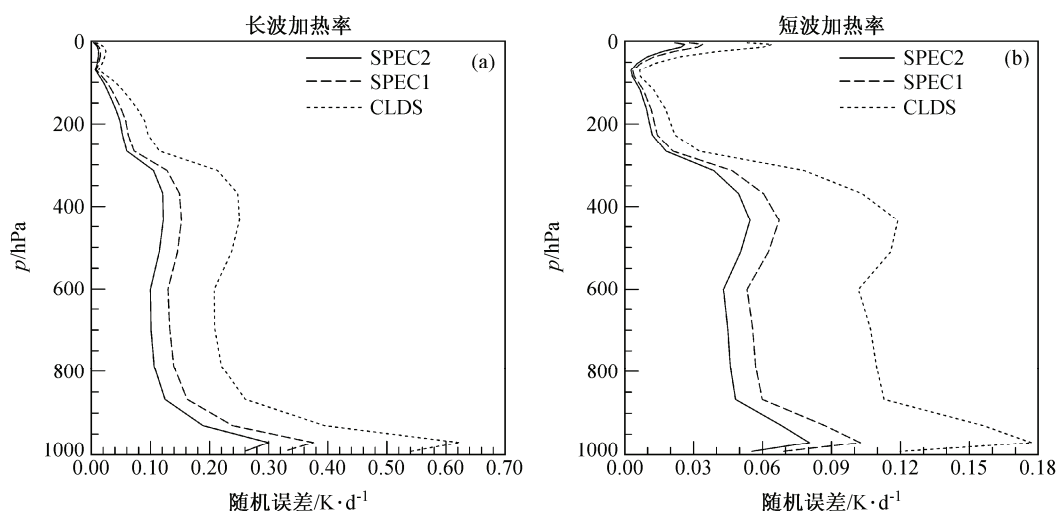


图4 大气长波 (a) 和短波 (b) 加热率廓线的 McICA 随机误差诊断

Fig.4 Diagnosis of McICA noise for atmospheric (a) longwave heating rate and (b) shortwave heating rate

仍需进行谨慎的检验和评估。

4 McICA 误差对模拟的气候场的影响

本章将上述 CLDS 和 SPEC1 两种误差水平的 McICA 应用于本文气候模式, 分析 McICA 误差对所模拟的气候场的影响。由于从 SPEC1 到 SPEC2 的误差消减并不明显, 因此本部分未讨论 SPEC2 的影响。在完全相同的初始条件下, 分别对两者进行 10 次随机模拟, 得到两组随机样本。模拟时间都从 1982 年 9 月 1 日至 1987 年 12 月 31 日, 取 1983 年 1 月 1 日之后的 5 年结果进行分析; 海温采用观测的同期月平均资料。在相同条件下进行了一次精确的 ICA 模拟, 作为标准来衡量 McICA 误差的影响。

4.1 McICA 误差对模拟的全球年平均气候场的影响

表 3 给出了两组 McICA 模拟样本平均的全球年平均气候场以及相对样本均值的最大正、负偏差的范围, 还给出了 ICA 的结果和 McICA 相对其的偏差。从表 3 中可以看出, 两组 McICA 模拟相对标准的 ICA 模拟的偏差都很小, 相对偏差都在 0.01% 的量级。虽然从统计上来看 CLDS 的多个量相对 ICA 的偏差都达到 0.05 或者 0.01 的显著性水平, 但是与模式中其他参数化过程带来的不确定性相比是很微小的; SPEC1 比 CLDS 更接近 ICA 结果, 且除了降水、云水含量等的偏差统计显著外, 其他量均是统计不显著的, 可见, 较小的随机误差对所

模拟气候的准确度是有利的。

对于随机误差的气候影响, 一个潜在的问题是: 随机误差的引入是否会使所模拟的气候场向某一方向发生偏移。从表 3 来看, 最显著的变化特征发生在与云和水循环相关的气候场上。两组 McICA 模拟的高、中、低云量相对 ICA 模拟都是减小的, CLDS 减小得最多且都达到了 0.05 的统计显著水平。两组模拟的降水量和云水含量的偏差也都达到统计显著的水平, 其中云中液水含量和降水量有一定增加, 而云中冰水含量则有所减少, 这可能意味着云中水分的垂直分布将更多地集中在中低对流层。这可能与加热率误差在近地表最大、向上递减有关。近地层的加热率误差可能促进地表温度的升高和地表水分的蒸发, 增大了近地层大气的水汽输入, 因此云中的含水量有略微的增加; 而在冰云出现的较高层大气, 低层云水的微量增加还不足以通过动力过程传输至高层, 高层本身的加热率误差又可能使这里温度升高, 冰云更难形成和维持, 因此高层云水有所减少。当然, 这是从全球平均来看, 具体局地云水的变化要复杂得多。但是水循环因素的这种偏移是很弱的, 反映在辐射场的改变上 (云的辐射强迫、大气顶和地面净辐射通量等) 也很弱, 可以说, 从全球来看这种偏移是可以忽略不计的。

4.2 McICA 误差对模拟的气候场水平分布的影响

图 5 给出了长、短波云辐射强迫和总降水量的纬向平均分布的比较, 虚线代表 CLDS 和 SPEC1 的样本平均, 灰色阴影表示在平均值基础上的正负

表 3 McICA 和 ICA 模拟的全球年平均场比较
Table 3 Comparison of modeled global annual mean fields by McICA and ICA

	CLDS		SPEC1		ICA
	平均	差值	平均	差值	
大气顶净短波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	234.57 (+0.12/−0.13)	0.05	234.51 (+0.11/−0.12)	−0.01	234.52
地表净短波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	162.96 (+0.15/−0.16)	0.04	162.89 (+0.12/−0.12)	−0.03	162.92
大气顶净长波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	236.93 (+0.08/−0.12)	0.08**	236.88 (+0.09/−0.13)	0.03	236.85
地表净长波辐射通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	63.05 (+0.07/−0.10)	0.05*	63.02 (+0.08/−0.07)	0.02	63.00
短波辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	−52.09 (+0.16/−0.13)	0.01	−52.13 (+0.07/−0.16)	−0.03	−52.10
长波辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	28.55 (+0.06/−0.06)	0.04*	28.58 (+0.05/−0.04)	−0.01	28.59
总云量	59.99 (+0.11/−0.07)	−0.03	60.02 (+0.07/−0.07)	0.00	60.02
低云量	39.61 (+0.10/−0.07)	−0.04*	39.63 (+0.07/−0.06)	−0.02	39.65
中云量	17.34 (+0.04/−0.03)	−0.02*	17.35 (+0.04/−0.03)	−0.01	17.36
高云量	38.70 (+0.06/−0.08)	−0.06**	38.73 (+0.09/−0.07)	−0.03	38.76
地表温度/K	287.87 (+0.06/−0.04)	0.01	287.87 (+0.02/−0.01)	0.01	287.86
总降水率/ $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	2.728 (+0.002/−0.002)	0.001*	2.727 (+0.005/−0.003)	0.002*	2.729
云冰水含量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	18.64 (+0.03/−0.06)	−0.06**	18.68 (+0.06/−0.03)	−0.02*	18.70
云液水含量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	139.02 (+0.47/−0.35)	0.25**	139.05 (+0.25/−0.25)	0.28**	138.77
可降水量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	23.52 (+0.04/−0.04)	0.00	23.53 (+0.03/−0.04)	0.01	23.52

注：括号外分别为 CLDS、SPEC1 和 ICA 模拟的全球平均值以及 CLDS、SPEC1 相对于 ICA 的平均偏差；括号内是 CLDS 和 SPEC1 样本相对于 ICA 模拟值的最大和最小偏差；*、**分别表示达到 0.5、0.01 的显著性水平。

标准差范围；实线表示 ICA 结果。从灰色阴影来看，无论长、短波云辐射强迫还是总降水量，两组 McICA 模拟结果的随机波动都很小，可以认为是比较稳定的。

McICA 和 ICA 云辐射强迫曲线（图 5a-d）在大部分纬度上都几乎重合，表明 McICA 是 ICA 的很好近似。但是在某些纬度上，McICA 辐射强迫与 ICA 结果仍有微小但很明显的偏差，如 40°N~50°N 的短波辐射强迫偏小、50°S（南极）附近的长波辐射强迫偏大（偏小）。这与云量的改变是相联系的，图 6 给出了低云量和高云量相对 ICA 的偏差分布，红、蓝阴影表示正、负偏差达到 0.01 显著性水平的区域。从图 6 中可以看出，40°N~50°N 的短波辐射强迫偏差主要是由这一纬度带上模拟的云量减少所致（主要是对短波辐射传输影响较大的低云量的减少）；50°S 附近的低云量和高云量总体是增多的，这是长波辐射强迫增大的原因，但是由于云量既有增加也有减小的区域，两者作用有一部分相抵消，使短波辐射强迫的增大不明显；南极附近的长波辐射强迫减少主要与高云量减少有关。而模式模拟与观测在云量和云辐射强迫的差别（图略）是远远大于这里随机误差所引起的模拟偏差的，因此在进行模拟和观测的对比分析时，McICA 随机误差的

影响是相当小的。

从图 5e、f 的总降水量纬向平均分布来看，两组 McICA 模拟样本的随机扰动以及其与 ICA 结果的偏差都较小。McICA 和 ICA 有明显偏差的一个区域是在赤道附近的热带地区，两个降水峰值之间的过渡带降水相对 ICA 有所增加，尤其以 CLDS 最为明显。图 7 进一步给出了 McICA 和 ICA 热带地区总降水量差值的分布（阴影）以及 ICA 总降水量分布（等值线）。从阴影来看，CLDS 和 SPEC1 随机误差对降水量分布的影响相似，等值线显示的东南亚和西太平洋降水量较大的区域，对应的 McICA 模拟偏差都为负值，而之间的过渡区域则为一条东西向的正偏差带；局地最大偏差不超过 2 mm/d。虽然全球平均来看降水量的模拟偏差很小（表 1），但是以上分析显示降水量的局地分布可能有较明显的差异。这可能是由于随机误差改变了大气的垂直热力结构，减小了热带辐合区的对流强度，从而减小了降水量。需要指出的是，全球气候模式对降水量分布的模拟是一个薄弱环节，McICA 随机误差的影响相对模式与观测资料的偏差是很小的，而且积云参数化方案等其他方案的选择对降水的影响很容易超过 McICA 随机误差的影响（张丽霞等，2011）。

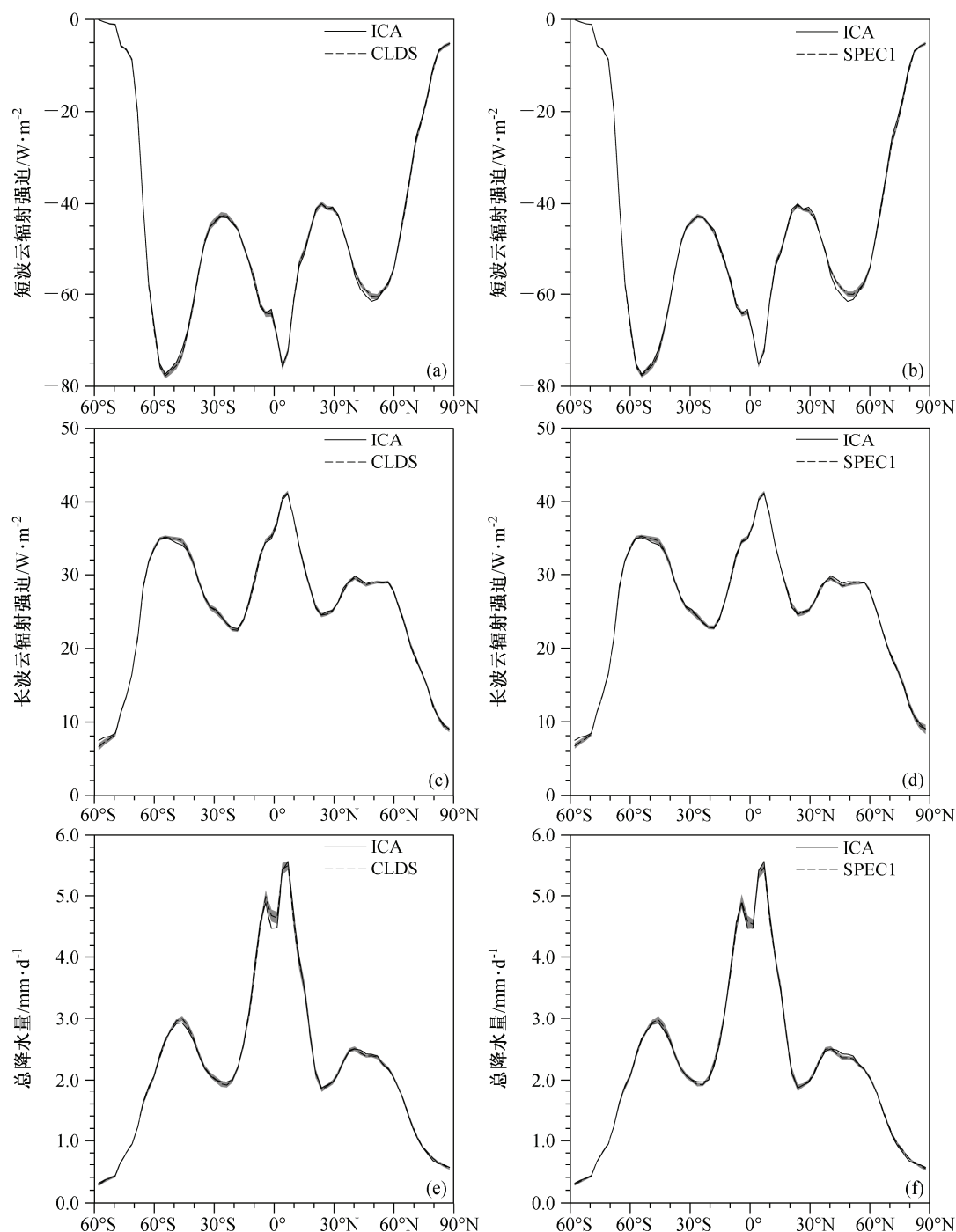


图5 McICA 样本平均和 ICA 模拟的短波云辐射强迫 (a、b)、长波云辐射强迫 (c、d) 和总降水量 (e、f) 的纬向平均分布: (a、c、e) CLDS 结果; (b、d、f) SPEC1 结果。灰色阴影表示相应 McICA 样本的正负标准差范围

Fig.5 Zonal means of McICA sample-mean and ICA (a, b) shortwave cloud radiative forcing, (c, d) longwave cloud radiative forcing, and (e, f) total precipitation: (a, c, e) CLDS results; (b, d, f) SPEC1 results. Gray shaded areas represent the ranges of $\pm$ standard deviation of McICA samples

对比图 6 中 CLDS 和 SPEC1 的低云量 (或高云量) 偏差分布, 可以发现两者非常相似, 虽然分布特征不像之前的一些研究结果那样, 偏差集中在热带洋面或其他某些特定的区域, 但是仍有其较固定的偏差分布型。虽然两组样本都是随机进行的,

且误差水平不同, 但是模拟的气候场分布并没有随机改变, 而是朝着某种确定的分布型变化, 也就是说, McICA 的随机误差对气候模拟的改变有一定的系统性。然而如前面分析的那样, 与气候场本身的基数和其他气候不确定性相比, 这种系统性的改

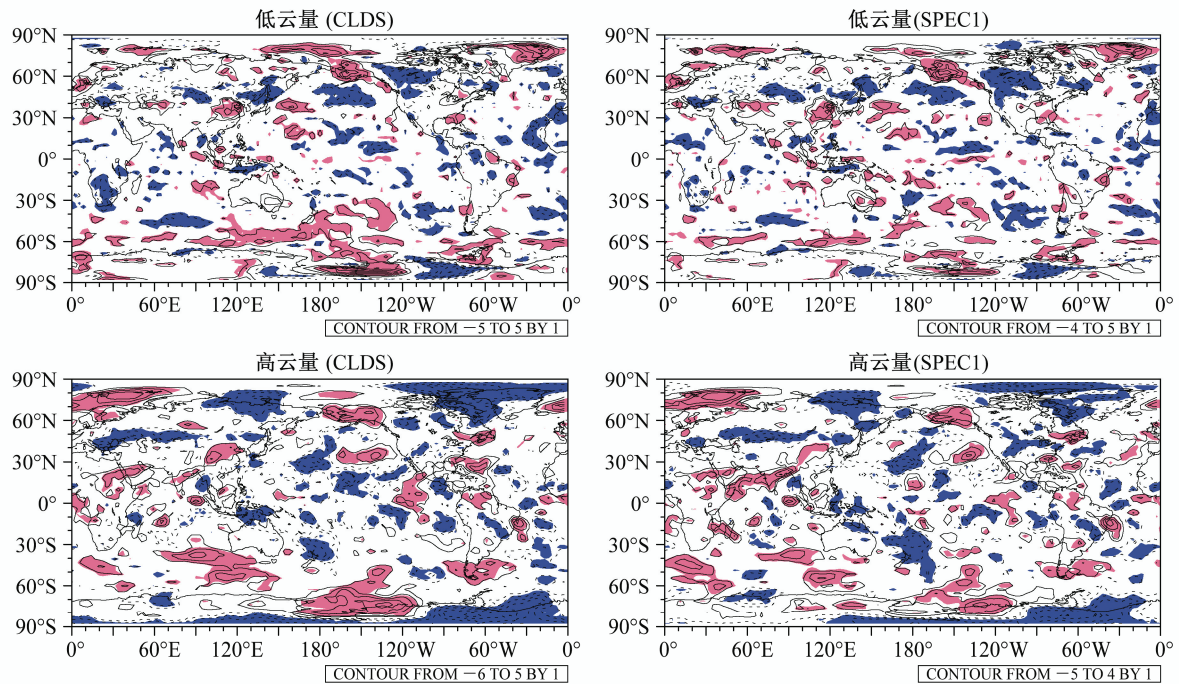


图6 McICA 样本平均的高云量和低云量与 ICA 结果的差值 (等值线)。红、蓝阴影: 正、负差值显著性水平达到 0.01 的区域; 等值线间隔为 1 (略去 0 等值线)

Fig.6 Differences of high and low cloud fractions between McICA sample-mean and ICA (contours with interval of 1, zero line omitted). Red (Blue) shaded areas mean the positive (negative) biases are below the 0.01 significance level

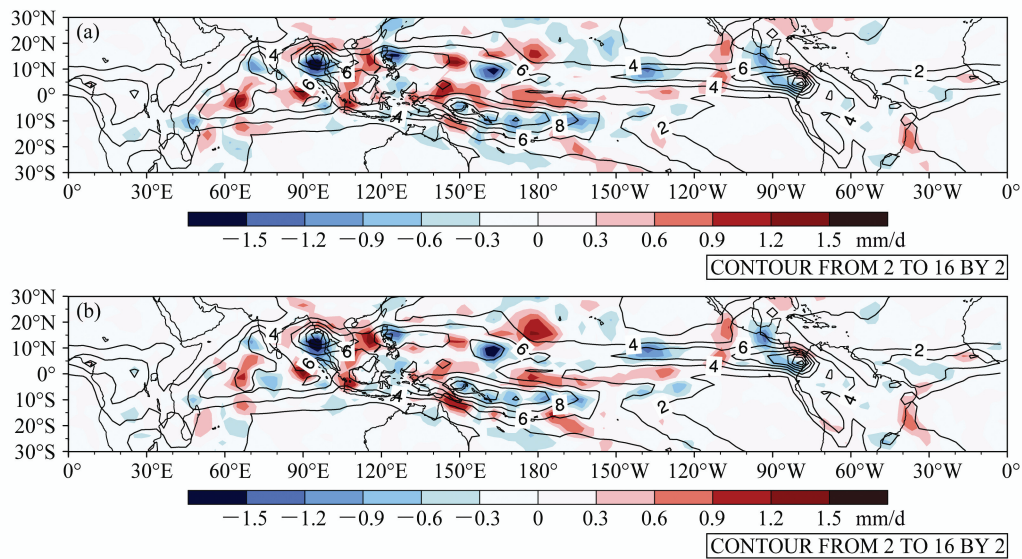


图7 热带地区 (a) CLDS、(b) SPEC1 样本平均的总降水量与 ICA 结果的差值 (阴影) 和 ICA 降水量在热带地区的分布 (等值线)。单位: mm/d; 等值线间隔: 2.0

Fig.7 The differences in total precipitation (a) between CLDS and ICA and (b) between SPEC1 and ICA (shadings). Contours in both panels are the total precipitation of ICA, and contour interval is 2.0 mm/d

变较小, 不至于改变所模拟气候的总体特征。

4.3 McICA 误差对模拟的大气温度和纬向风垂直分布的影响

图8给出了两组 McICA 实验和 ICA 的纬向平

均温度廓线差值的分布。温度与参考值的差异主要是在高纬度地区的 300 hPa 以上的对流层顶或平流层处, 两极附近达到最大正偏差, 约 1.2 K, 且达到 0.01 的显著性水平; 尤其是在南极高纬度地区,

这里中低对流层温度也有显著变化,但量值比高层小得多。这表明:McICA 误差的引入使模拟的两极地区高层大气温度向更暖的方向偏移。高纬度地区是气候敏感性较强的地区,对于扰动的响应往往比其他地区剧烈,云的反馈、冰面反照率反馈、动力反馈等都可能对高纬度地区气候产生比中低纬度地区更大的影响 (Holland and Bitz, 2003; Cai, 2005),上述 McICA 误差在高纬度地区的影响较大也与此有关。而在 $60^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 的中低纬地区温度变化从地面到模式顶都不明显,表明 McICA 误差的引入对这里温度场的影响较小。对于气候变化研究比较关注的近地面温度而言,McICA 误差的影响

很小。

温度场的改变将对大气环流产生一定的影响。图 9 给出了两组 McICA 和 ICA 年平均纬向风差异的纬度—高度分布。从图 9 中可以看出,纬向风的变化也主要在高纬度地区,中低纬度变化较小。这可能是因为 McICA 误差使高纬度地区南北温度梯度发生变化,进而经过一定热能—动能转换机制作用于风场,这种南北温度梯度对纬向风的影响作用在 Bordi et al. (2009) 中也做过研究。但是 McICA 引起的纬向风误差和纬向风的固有量级相比是比较小的,对流层最多不超过 1 米/秒,其他参数化方法的选择带来的风场变化很容易超过 McICA 随机

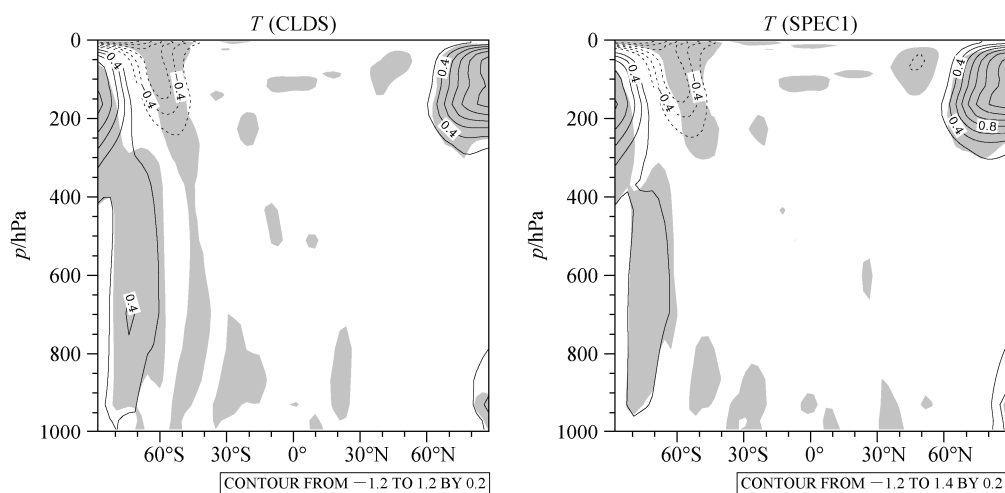


图 8 McICA 样本平均的纬向平均温度廓线与 ICA 结果的差值 (单位: K)。阴影: 差值达到 0.01 的显著性水平; 等值线间隔: 0.2 (略去 0 等值线)
Fig.8 Differences in zonal mean temperature profiles between McICA sample mean and ICA (contour interval: 0.2 K, zero line omitted). Shaded areas mean the differences are below the 0.01 significance level

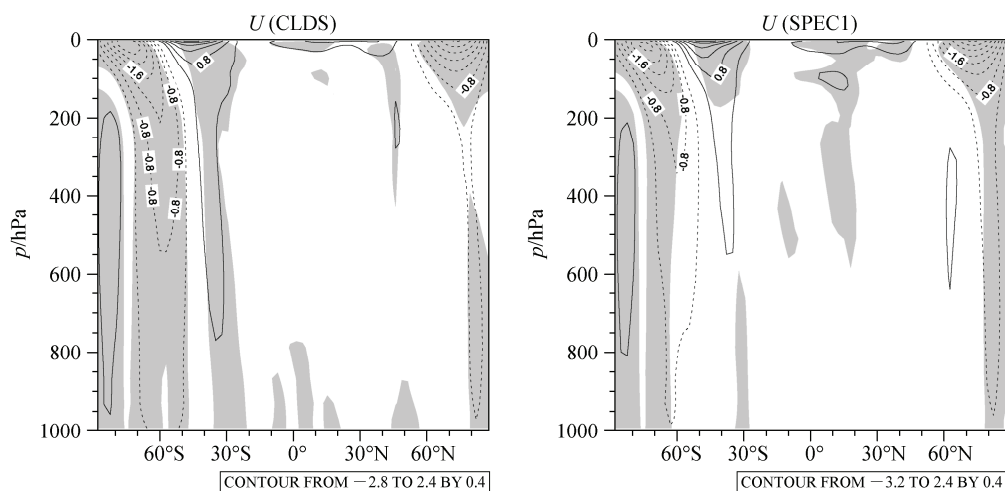


图 9 同图 8, 但是为纬向风 (向东方向为正)。单位: m/s, 等值线间隔: 0.4 (略去 0 等值线)

Fig.9 The same as Fig. 8, but for zonal wind (eastward is positive). Contour interval is 0.4 m/s with zero line omitted

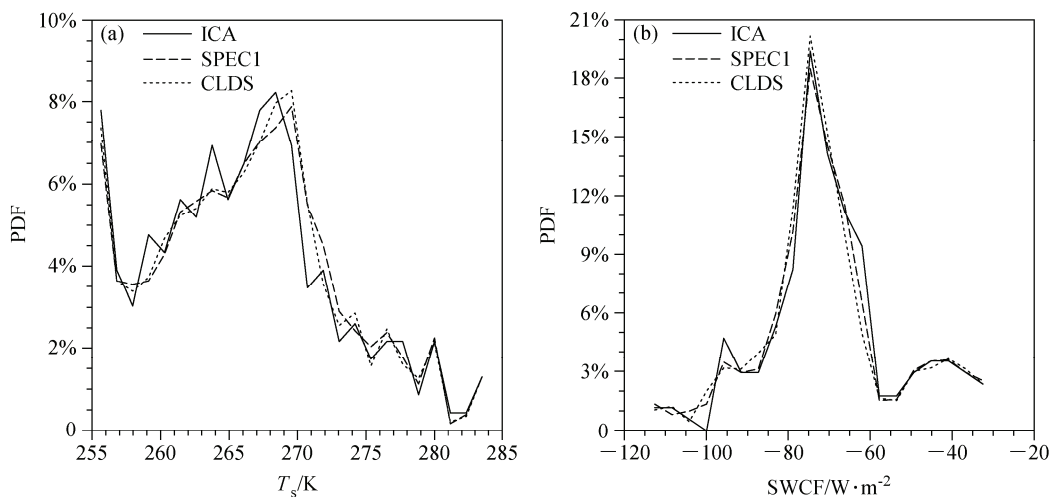


图 10 (a) 中高纬亚欧大陆 ($45^{\circ}N \sim 75^{\circ}N$, $60^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$) 地表温度和 (b) 西太平洋暖池 ($15^{\circ}S \sim 15^{\circ}N$, $110^{\circ}E \sim 160^{\circ}E$) 短波云辐射强迫的概率密度分布对比

Fig.10 Probability density function (PDF) of (a) surface temperature (T_s) in mid-high latitude Euro-Asia continent ($45^{\circ}N \sim 75^{\circ}N$, $60^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$) and (b) shortwave cloud radiative forcing (SWCF) in the western Pacific warm pool ($15^{\circ}S \sim 15^{\circ}N$, $110^{\circ}E \sim 160^{\circ}E$)

误差的影响 (Chun et al., 2004; Liu et al., 2009)。

4.4 McICA 误差对模拟的典型区域气候特征的影响

为进一步了解随机误差的引入对特定区域气候特征的影响,特选取两个典型区域进行分析: A 为中高纬亚欧大陆 ($45^{\circ}N \sim 75^{\circ}N$, $60^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$); B 为西太平洋暖池 ($15^{\circ}S \sim 15^{\circ}N$, $110^{\circ}E \sim 160^{\circ}E$)。

中高纬度陆地地表温度是一个敏感的气候变量,对气候变化的响应比较明显 (IPCC, 2007),因此也很可能受到随机误差的影响。图 10a 给出了区域 A 内的地表平均温度的概率密度分布图,大致体现了地表温度在区域 A 内的分布状况。可以看出,两组随机实验的地表温度的统计特征与参考值 ICA 结果基本一致,都以 266~271 K 的温度出现概率最大,257 K 以下的低温出现概率次大,而高温部分出现概率最小。可见,随机误差的引入对中高纬度大陆区域地表温度的影响是比较小的。

西太平洋暖池区域的环流和热力状况受太阳短波辐射影响明显,云的辐射强迫和云—气候反馈在其中起了重要作用 (李志强和俞永强, 2011)。图 10b 给出了区域 B 的短波云辐射强迫的概率密度分布,两组 McICA 实验表现出了与参考值很好的一致性,说明云的结构特征没有发生明显差异,随机误差的引入对暖池区域的云和辐射场的统计特征的影响也是比较小的。

5 总结和讨论

本文将 McICA 云—辐射方案和一种新的相关 K 分布辐射模式应用于国家气候中心全球气候模式 BCC_AGCM 2.0.1 中,重点分析了 McICA 云—辐射方案的随机误差的性质及其对所模拟的气候场的影响。

首先,在一个典型热带大气条件下得到 CLDS、SPEC1 和 SPEC2 三种不同误差水平的光谱取样方法。这三种 McICA 形式随后被用在本文全球气候模式中进行全球范围的离线误差诊断分析,发现三者误差水平与同类研究相当或者更小,其中 SPEC1 相对 CLDS 有较大改进,而 SPEC2 相对 SPEC1 的改进要小得多。

然后,从全球平均、水平分布、垂直温度和纬向风结构、区域气候特征等方面分析了 CLDS 和 SPEC1 的随机误差对模拟的气候场的影响。由于 SPEC2 相对耗时,且其相对 SPEC1 的改进不大,因此这里没有考虑 SPEC2。与精确的 ICA 结果比较发现,McICA 随机误差对各种气候变量的全球平均值的影响大多在 0.01%量级,微小的气候偏移主要表现为云量的减少、云中液水含量增加和冰水含量的减少。从纬向平均的云辐射强迫和降水量来看,McICA 模拟样本之间的扰动幅度是很小的,相对 ICA 结果的偏差在大多数纬度带上可以忽略不计;而在某些纬度带上 McICA 误差引起了系统性的偏差,如 $40^{\circ}N \sim 50^{\circ}N$ 的云量偏小使得短波辐射强迫整

体减小,再如赤道附近两个降水峰值之间的降水量增多,但是这些系统性的偏差与模式其他参数化过程的不确定性以及相对观测资料的偏差来看是很小的,整体特征上 McICA 与 ICA 模拟非常一致。从大气温度的垂直分布来看,McICA 误差的影响主要是使两极地区上空 300 hPa 以上的高层大气温度升高,而对近地面等中低对流层温度的影响很小。McICA 误差也没有明显改变欧亚大陆和西太平洋暖池这两个典型气候区区域内的气候统计特征,对前者的温度分布特征和后者的短波辐射分布特征的模拟都与 ICA 非常相近。另外,对比 CLDS 和 SPEC1 结果发现,两者的差别并不十分明显,虽然 SPEC1 误差水平在 CLDS 基础上有了较大优化,但是气候模式对随机误差表现出了较强的容纳能力,模式各种机制的反馈作用使两种 McICA 误差水平本身的差别变得不重要。

综合以上结果可知,在 BCC_AGCM 2.0.1 模式中利用 McICA 云—辐射方案进行气候模拟是具有较高的可信度的,方案本身的随机误差不至于影响所模拟气候的总体特征,模拟结果仍主要取决于模式的物理过程、动力框架等其他因素,这些是提升模拟能力应该关注的重点。而且,利用本方案可以分别处理云和辐射过程,进而有利于未来改进对云结构的描述及其辐射传输过程的模拟,为气候模式今后的发展提供了广阔的前景和空间。

参考文献 (References)

- Barker H W, Cole J N S, Morcrette et al. 2008. The Monte Carlo independent column approximation: An assessment using several global atmospheric models [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134 (635): 1463–1478.
- Baum B A, Heymsfield A J, Yang P, et al. 2005. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part I: Microphysical data and models [J]. *J. Appl. Meteor.*, 44: 1885–1895.
- Bordi I, Fraedrich K, Ghil M, et al. 2009. Zonal flow regime changes in a GCM and in a simple quasi-geostrophic model: The role of stratospheric dynamics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66 (5): 1366–1383.
- Cai M. 2005. Dynamical amplification of polar warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (22): L22710.
- 查晶, 罗德海. 2011. 层云加热对热带大气季节内振荡的影响 [J]. *大气科学*, 35 (4): 657–666.
- Cha Jing, Luo Dehai. 2011. The impact of the stratiform heating on Madden-Julian oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 657–666.
- Chun H Y, Song I S, Baik J J, et al. 2004. Impact of a convectively forced gravity wave drag parameterization in NCAR CCM3 [J]. *J. Climate*, 17 (18): 3530–3547.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3.0) [R]. NCAR Tech. Notes NCAR/TN-464+STR National Center for Atmosphere Research, Boulder, Colo.
- 董敏, 吴统文, 王在志, 等. 2009. 北京气候中心大气环流模式对季节内振荡的模拟 [J]. *气象学报*, 67 (6): 912–922.
- Dong Min, Wu Tongwen, Wang Zaizhi, et al. 2009. Simulations of the tropical intraseasonal oscillations by the AGCM of the Beijing Climate Center [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (6): 912–922.
- Fu Q. 1996. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models [J]. *J. Climate*, 9: 2058–2082.
- Hill P G, Manners J, Petch J C. 2011. Reducing noise associated with the Monte Carlo independent column approximation for weather forecasting models [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (654): 219–228, doi: 10.1002/qj.732.
- Holland M M, Bitz C M. 2003. Polar amplification of climate change in coupled models [J]. *Climate Dyn.*, 21 (3): 221–232.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability [M]. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 478.
- 李志强, 俞永强. 2011. 耦合模式热带太平洋云—气候反馈模拟误差评估 [J]. *大气科学*, 35 (3): 457–472.
- Li Zhiqiang, Yu Yongqiang. 2011. Assessment of cloud-climate feedback simulation bias of coupled ocean-atmosphere model in the tropical Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (3): 457–472.
- Liu H L, Sassi F, Garcia R R. 2009. Error growth in a whole atmosphere climate model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66 (1): 173–186.
- Pincus R, Barker H W, Morcrette J J. 2003. A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (13): 4376, doi: 10.1029/2002JD003322.
- Pincus R, Hemler R, Klein S A. 2006. Using stochastically-generated subcolumns to represent cloud structure in a large-scale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (12): 3644–3656.
- Pincus R, Stevens B. 2009. Monte Carlo spectral integration: A consistent approximation for radiative transfer in large eddy simulations [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 1: 1–9, doi: 10.3894/JAMES.2009.1.1.
- Räisänen P, Barker H W. 2004. Evaluation and optimization of sampling errors for the Monte Carlo independent column approximation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130 (601): 2069–2085.
- Räisänen P, Barker H W, Khairoutdinov M F, et al. 2004. Stochastic generation of subgrid-scale cloudy columns for large-scale models [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130 (601): 2047–2067.
- Räisänen P, Barker H W, Cole J N S. 2005. The Monte Carlo independent column approximation's conditional random noise: Impact on simulated climate [J]. *J. Climate*, 18 (22): 4715–4730.
- Räisänen P, Järvenoja S, Järvinen H, et al. 2007. Tests of Monte Carlo independent column approximation in the ECHAM5 atmospheric GCM [J]. *J. Climate*, 20 (9): 4995–5011.
- Räisänen P, Järvenoja S, Järvinen H. 2008. Noise due to the Monte Carlo

- independent-column approximation: Short-term and long-term impacts in ECHAM5 [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134 (631): 481–495.
- Shi G Y. 1981. An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents [D]. Ph. D. dissertation, Tohoku University of Japan, Sendai, Japan, 1–71.
- Wu T W, Wu G X. 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21 (4): 529–535.
- Wu T, Yu R, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate [J]. *Climate Dynamic*, 34(1): 123–147. doi: 10.1007/s00382-008-0487-2.
- Wyser K. 1998. The effective radius in ice clouds [J]. *J. Climate*, 11: 1793–1802.
- 颜宏. 1987. 复杂地形条件下嵌套细网格模式的设计 (二): 次网格物理过程参数化 [J]. *高原气象*, 6 (增刊): 64–139. Yan Hong. 1987. The design of a nested fine-mesh model over complex topography. Part 2: Parameterization of sub grid physical processes [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 6 (Suppl.): 64–139.
- Yang P, Wei H, Huang H L, et al. 2005. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near- through far-infrared spectral region [J]. *Appl. Opt.*, 44 (26), 5512–5523.
- 张华. 1999. 非均匀路径相关 K-分布方法的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 169pp. Zhang Hua. 1999. On the study of a new correlated K-distribution method for non-gray gaseous absorption in the inhomogeneous scattering atmosphere [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 169pp.
- Zhang H, Nakajima T, Shi G, et al. 2003. An optimal approach to overlapping bands with correlated k-distribution method and its application to radiative calculations [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D20): 4641, doi: 10.1029/2002JD003358.
- Zhang G J, Mu M Q. 2005. Effects of modifications to the Zhang-McFarlane convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3 [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D09109, doi: 10.1029/2004JD00517.
- Zhang H, Shi G, Nakajima T, et al. 2006a. The effects of the choice of the k-interval number on radiative calculations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 98 (1): 31–43.
- Zhang H, Suzuki T, Nakajima T, et al. 2006b. Effects of band division on radiative calculations [J]. *Optical Engineering*, 45 (1): 016002.
- 张丽霞, 周天军, 曾先锋, 等. 2011. 积云参数化方案对热带降水年循环模态模拟的影响 [J]. *大气科学*, 35 (4): 777–790. Zhang Lixia, Zhou Tianjun, Zeng Xianfeng, et al. 2011. The annual modes of tropical precipitation simulated with LASG/IAP AGCM: Sensitivity to convection schemes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (4): 777–790.