

钟琦, 钟青, 沈元芳. 2011. 物理守恒律保真全球谱模式辐射—云—对流过程的改进 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 407–418. Zhong Qi, Zhong Qing, Shen Yuanfang. 2011. Improvement on the simulation of radiation–cloud–convection process in a physical conserving fidelity global spectral model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 407–418.

## 物理守恒律保真全球谱模式辐射—云—对流过程的改进

钟琦<sup>1</sup> 钟青<sup>2</sup> 沈元芳<sup>3</sup>

1 中国气象局培训中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘要** 辐射—云—对流相互作用的正确和合理描述是改进湿物理过程描述和数值模式的重要方面。在一个物理守恒律保真的全球模式中引入描述更细致的云参数化方案和辐射参数化方案, 对6个30天实时资料数值积分进行分析。结果表明, 通过云参数化方案中云描述的细化, 改进了模式对云分布、云量、以及云水、云冰不同相态的模拟; 辐射方案中对这些云水物质的反应, 有效改进了次网格加热中的辐射对流平衡, 进而促进了次网格加热和动力相互作用的改进, 斜压能量转换获得改进。最终, 模式在整体系统误差上取得较大改进, 对流层顶的温度场和风场误差明显减小, 降水结构和降水强度显著改进, 并且未见“双赤道辐合带”的现象。

**关键词** 物理守恒律保真 谱模式 辐射—云—对流平衡 能量循环 系统误差

**文章编号** 1006–9585 (2011) 04–0407–12 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

## Improvement on the Simulation of Radiation – Cloud – Convection Process in a Physical Conserving Fidelity Global Spectral Model

ZHONG Qi<sup>1</sup>, ZHONG Qing<sup>2</sup>, and SHEN Yuanfang<sup>3</sup>

1 *China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081*

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

**Abstract** One of the most important aspects in improving the numerical model is the reasonable description of radiation–cloud–convection interaction. A more detailed cloud parameterization and radiation parameterization were introduced in a physical conservation fidelity global spectral model, and analysis was based on six 30-day numerical integrations of real-time data. Results show that the simulation of cloud and diabatic heating rate between radiation and convection are improved. Furthermore, the baroclinic energy conversions are improved. As a result, the systematic errors have considerable improvements. Temperature error throughout the tropopause and wind error are decreased. Precipitation is dramatically improved both in the amount and the structure. Another advantage is that the false structure of “double Intertropical Convergence Zone (ITCZ)” is not seen in the result.

**Key words** fidelity of physical conservation laws, spectral model, energy cycle, systematic error, radiation–cloud–convection interaction

**收稿日期** 2010–01–19 收到, 2010–12–20 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金项目 40775067、40475026

**作者简介** 钟琦, 女, 1980 年出生, 博士, 主要从事大气环流数值模式发展。E-mail: zhongqi@mail.iap.ac.cn

## 1 引言

数值预报已成为现代天气预报和气候预测的主要工具。目前的认识表明,提高预报质量和时效,需着力降低模式的不确定性和初值的不确定性。而减小数值模式不确定性的主要障碍,在于利用数值方法求解方程时对物理规律的保持和对次网格过程的参数化表达的准确程度,以及对它们之间相互作用的合理描述。近年来,参数化过程和未被求解过程的能量向大尺度运动的升尺度级串被认为是一个关键因素。由于对这些升尺度过程的发展和非线性相互作用的描写存在误差,导致了虚假的小尺度扰动,随着预报时效的增加,这种小尺度扰动就会渗透到大尺度运动之中,最终限制大尺度运动的可预报性。上述小尺度过程包括:(1)深/浅湿对流;(2)边界层和地表交换;(3)云和辐射;(4)在急流/锋面系统、与对流层顶相互作用的对流云系统内,惯性重力波在山地上空的破碎过程。对应于此,世界各大数值预报中心在中短期发展战略中均指出进一步的提高和发展参数化过程一直、也将继续是优先致力于的方向。参数化发展的战略目标中,重点集中在湿物理过程的描述,其中对流-云-辐射的相互作用至关重要,是目前的热点也是难点之一。

在数值模式的早期,仅考虑简单的对流-辐射平衡,后来才引进了云的影响效果。此后多数云-辐射研究集中在云在大气层顶和地表能量平衡中的作用,而忽略了云造成的大气加热,以及大气加热与动力场的联系。(1)对流和辐射对云的基础作用体现在,控制云(系统)生消发展的首先是大气的大尺度运动,然后是对三维温度场分布的复杂依赖关系。(2)云对辐射平衡的作用。过去,在该方面的很多工作都集中在研究云对大气层顶(TOA)辐射平衡的作用,部分原因是由于卫星观测试验提供了大量可度量云对TOA辐射平衡作用的瞬时资料,如地球辐射收支试验(Earth Radiation Budget Experiment)及云和地球辐射能量系统(Clouds and the Earth's Radiant Energy System),此外,还有国际卫星云气候计划(International Satellite Cloud Climatology Program),提供全球总云量分布和云光学属性等资

料。这些卫星资料为检验模式中云在TOA的辐射平衡提供很多有用信息,但是非常少的资料可用于理解云对大气(ATM)中,及地表(SFC)辐射平衡的作用。对后面两种作用的研究主要是通过直接的模式模拟,或是对由模式约束的某些特定类型的数据的分析(Pinker and Corio, 1984; Zhang et al., 1995; Charlock and Alberta, 1996)。然而,有一些重要的潜在云-辐射作用并不是由TOA通量决定,而是由云加热和冷却大气的效应控制。因此,吸收的能量在大气柱中如何分配,取决于什么因子是一个关键问题。(3)大气环流模式物理参数化过程中的云-辐射相互作用。目前,很多环流模式中,通过引入云参数化或耦合云模式解决这一问题。上世纪60年代的云参数化基本是经验性的,云-辐射相互作用的考虑较粗糙;70年代后期,对云-辐射过程进行了更复杂的描述,如将云的光学性质与云中凝结水和冰物质的数量联系起来,并且开始了基于云物理理论的预报方案研究(Sundquist, 1978)以及气溶胶在云反射效应上的研究(Twomey, 1977);80年代末,少数全球模式中开始采用预报云方案代替诊断方案(Smith, 1990),并且开始考虑用交互式的云-辐射过程代替以往固定过程;90年代,预报方案逐渐替代了诊断云方案,并更多的考虑了云微物理过程的细节,重点逐渐转移到物理上更协调,表达更显示的云可分辨模式(Browning, 1993);本世纪以来,以研究气溶胶的云辐射作用过程为重点的云微物理探讨是热点,另一方面,将显式云模式植入全球模式(Grabowski, 2001; Randall et al., 2003),以期在云-辐射过程中得到更多的自我协调。在本文中,模式通过引入描述更细致的云和辐射参数化方案,改进了云的描述和辐射-云-对流平衡,进而获得能量转换的更合理描述,最终达到改进模式系统误差。

## 2 模式介绍和资料说明

### 2.1 物理守恒律保真全球谱模式

钟青(1997)给出了物理守恒律保真模式(Physical Conserving Fidelity global spectral Model, 简称为FM, 以下简称为保真模式)动力框架的细致描述。在T42L9分辨率上的实例研究

(钟青, 1994, 1997; Zhong et al., 2002) 表明半隐式新型全能量保真方案确可以有效的改进传统方案对于高阶全能量 (包含三阶矩守恒量) 以及质量等整体物理守恒性质的系统偏离; 系统误差在对流层中低层得到了很大的改进。并且, 无需采用人工平滑和耗散技术, 保持了稳定的非线性数值计算。物理守恒保真方案保证了高阶全能量和质量等物理守恒律在差分计算中得到保持, 并由此获得了在典型大气动力过程中能量转换 (钟琦和钟青, 2010) 和能量级串机制的改进 (钟琦, 2008)。因此探索完全非绝热情况下守恒格式的应用是有意义的科学问题, 也是进一步探讨物理守恒律保真约束下尺度能量级串过程的必要工作。Zhong and Zhong (2008) 在保真动力框架的基础上引进了一套非绝热的物理参数化过程, 形成第一版本保真全模式 (FM1.0)。对系统误差和能量循环的考查显示, FM1.0 能够抓住大气能量循环和降水分布的主要特征, 获得基本可信的模拟结果。我们同时注意到, FM1.0 还存在一些明显误差, 包括对流层顶明显偏暖, 和降水强度偏小 (尤其是夏半球中纬度地区的降水显著偏小)。针对这些误差, 诊断分析表明 (钟琦, 2008), 由于对流层顶显著的温度误差, 涡动有效位能在对流层顶存在误差, 加之该处激发的虚假垂直速度, 导致了涡动有效位能向涡动动能转换的误差。夏半球高纬地区几乎贯穿对流层的温度误差, 是造成夏半球中高纬斜压转化率 (包括向涡动有效位能的转换, 和有效位能向涡动动能的转换) 显著偏弱的主要原因, 这将极大影响该区域内的斜压扰动活动, 极有可能是夏半球降水显著偏小的主要原因。因此, 对流—辐射—云过程尚需改进。

## 2.2 FM 模式中的辐射和云方案

在 FM1.0 版本中采用赵高祥等 (1987, 1988) 建立的辐射方案。将红外光谱范围划分为 6 个谱带间隔, 仅在  $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$  带和  $\text{O}_3$  9.6  $\mu\text{m}$  带所在的光谱间隔上考虑  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_3$  与水汽的重迭吸收影响, 在其余的 4 个光谱间隔上只考虑水汽的吸收。云方案为气候云诊断, 仅简单的区分了有云和晴空两种情况, 云水量值为依据气候资料的给定值。

本文引入了 Morcrette 辐射方案 (Morcrette, 1989, 1991), 国内学者将该方案与其它方案进行

了比较 (沈元芳和 Baer, 1997; 沈元芳等, 2003), 并将其引入我国 T106 业务预报模式 (沈元芳等, 2002) 和 GRAPES 全球模式中 (杨学胜等, 2009), 显示出较好的效果。该方案中水汽有 e 和 p 型连续域吸收,  $\text{CO}_2$  计算时透射函数有较精确的表示, 气溶胶短波吸收和散射基于气候模式 5 种类型气溶胶的米参数, 云滴吸收和散射短波使用  $\delta$ -Eddington 方法。本文还引入了欧洲中期数值预报中心 ECMWF\_T106 中的诊断云方案, 该方案区分了高云、中云和低云, 增加了云冰的计算, 云水、云冰由模式热力场和水汽分布决定。改进的全模式称为 FM2.0 版本。

## 2.3 试验设计和资料

为便于比较, 实验设计与 Zhong and Zhong (2008) 一致, 选取 1993~1998 年 6 个 7 月的实例试验, 考查 FM2.0 版本在改进云的描述, 辐射加热描述, 及辐射—对流平衡方面的效果。文中观测值使用美国国家环境预报中心与美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 数据, 1 日 00 时 (协调世界时, 下同) 为初始, 每个例子积分 30 天。模式水平分辨率采用 T42, 垂直分辨率采用 L26 层, 时间步长 30 分钟。文中给出的结果为 6 个例子的平均结果。

## 3 结果

### 3.1 云描述

云是调节辐射加热和水循环的重要环节, 也是大气模式中最难以确定的因素之一。虽然云 (系统) 具有高度不确定性, 但观测指出从太空俯瞰, 围绕地球的云是准有组织的大尺度系统 (Rossow and Carines, 1995), 这些互相关联的云的特征和运动基本上由大尺度大气环流控制, 从宏观上取得对云 (系统) 的合理描述是可以实现的。图 1 给出了 FM2.0 中总云量随纬度的分布, 与国际卫星云气候计划 (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) 资料的比较显示, FM2.0 中总云量随纬度变化的基本特征得到了较好的模拟, 赤道附近, 南北半球中高纬地区为云量的 3 个高值区, 南北纬  $30^\circ$  附近为云量的低值区。模拟的云量比观测略偏强, 尤其是赤道和夏半球的两个峰值处。另外, 模式在两极对云

量的模拟存在虚假的偏多。总云量水平分布 (图 2) 表明, FM2.0 对总云量水平分布的模拟基本符合观测, 但是沿 15°N 的总云量偏多, 包括西太平洋上空和西大西洋上空, 云量明显偏多。50°N 附近峰值偏大的原因是沿该纬圈的大陆上空的云量虚假增多, 而海洋上空实际上还略小于观测。对极地的模拟也呈现出明显偏多, 尤其是夏半球。

我们将 FM2.0 与 FM1.0 模拟的云量、云水和云冰纬向平均的纬度-高度分布做了对比 (见图 3)。FM1.0 中 (图 3a、3b) 对云的判断只是简单的有和无 (分别对应 1 和 0), 而云水则根据产生云的高度给定的气候估计值。这时诊断的云量虽然也描写出了 3 个峰值区的分布, 但它明显不合理地集中在对流层低层, 甚至贴近地表面, 云量也明显偏大。相对应的云水的气候分布也是低层最大。所以, FM1.0 基本没有考虑到云相关特征的垂直分布。FM2.0 有效地改进了上述缺陷

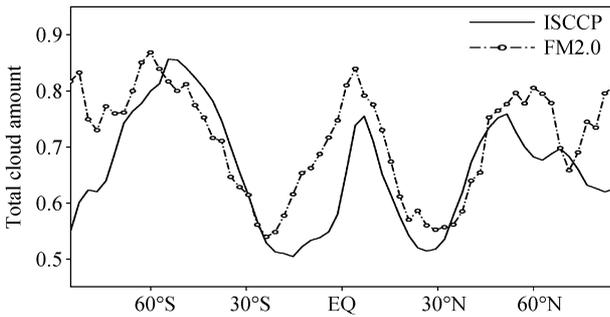


图 1 ISCCP (实线) 和 FM2.0 (点虚线) 总云量随纬度的分布  
Fig. 1 Total cloud amount distribution with latitude of ISCCP (solid) and FM2.0 (dotted)

(图 3c-3e): 云量分布很好的对应观测资料的 3 个峰值区, 其中, 南半球洋面上的云量主要是以低云为主, 北半球中高纬云量大值在对流层中层。但是赤道附近上空的云量也主要集中在中层 (500 hPa), 实际高云 (200 hPa 附近) 更合理。云水分布集中在对流层的中低层, 赤道上空为云水最充沛的地区, 北半球中高纬次之。在 FM2.0 中还加入了对云冰的描述, 在 60°S 上空和极地上空对流层中低层描述出云冰分布, 赤道上空和 45°N 地区对流层中高层是云冰的大值区。同时我们注意到, 赤道上空云冰与云量的位置均明显偏低, 有待进一步的分析。

### 3.2 次网格物理过程加热率

接下来我们对比了 FM 两个版本中次网格物理过程的加热率。图 4 给出了赤道地区 (5°S~5°N) 纬向平均加热率的垂直分布特征。在 FM1.0 中, 对流层上层 (300~100 hPa) 非绝热过程均在加热大气 (则整体作用也是加热大气), 这是造成对流层顶大的暖偏差的主要原因。在 FM2.0 中, 辐射加热率为负, 与对流和降水加热率相抵消, 甚至更大些, 这虽然导致了一定程度的冷偏差, 但这至少合理地反映了对流层高层对流-辐射平衡的图像。当然, 我们也看到新版本中次网格过程的相互作用也还有待改进, 比如, 300 hPa 附近由辐射造成的负加热率应对应于深对流在此处的潜热释放加热, 但对流和凝结降水的加热率明显减小。对流层中层, FM1.0 辐射负加热远大于对流和凝结降水加热, 整体偏冷。FM2.0 中, 对流层中层辐射冷却和凝结释热为两

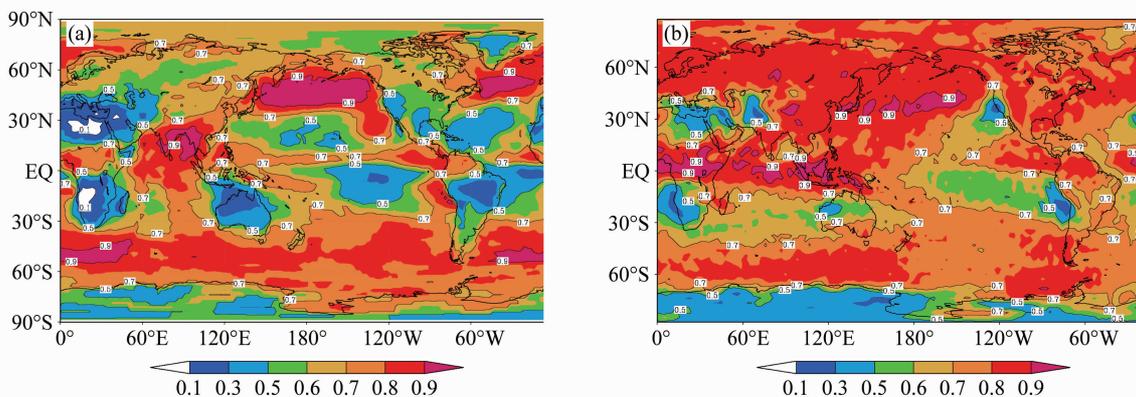


图 2 总云量水平分布: (a) ISCCP; (b) FM2.0  
Fig. 2 Horizontal distribution of total cloud amount: (a) ISCCP; (b) FM2.0

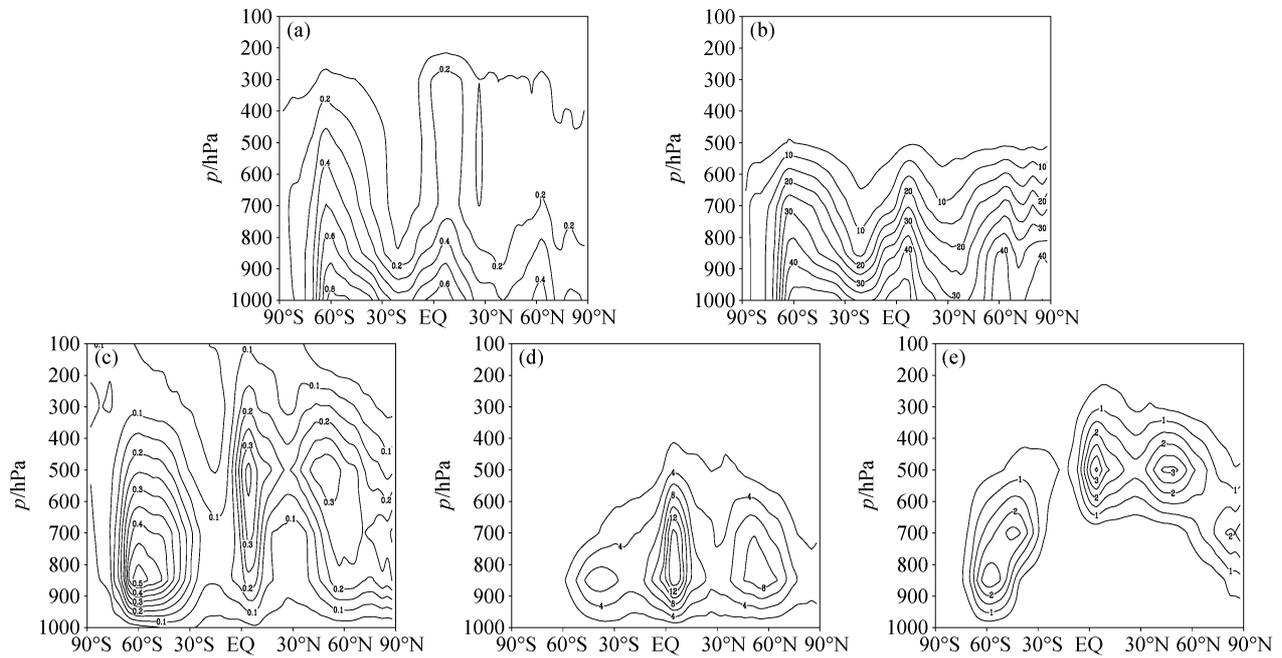


图 3 云量、云水 (单位:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、云冰 (单位:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 纬向平均的纬度—高度分布: FM1.0 的 (a) 云量和 (b) 云水; FM2.0 的 (c) 云量、(d) 云水和 (e) 云冰

Fig. 3 Latitude-height cross sections for zonal mean (a) cloud cover and (b) cloud water ( $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) from FM1.0 and (c) cloud cover, (d) cloud water ( $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), and (e) cloud ice ( $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) from FM2.0

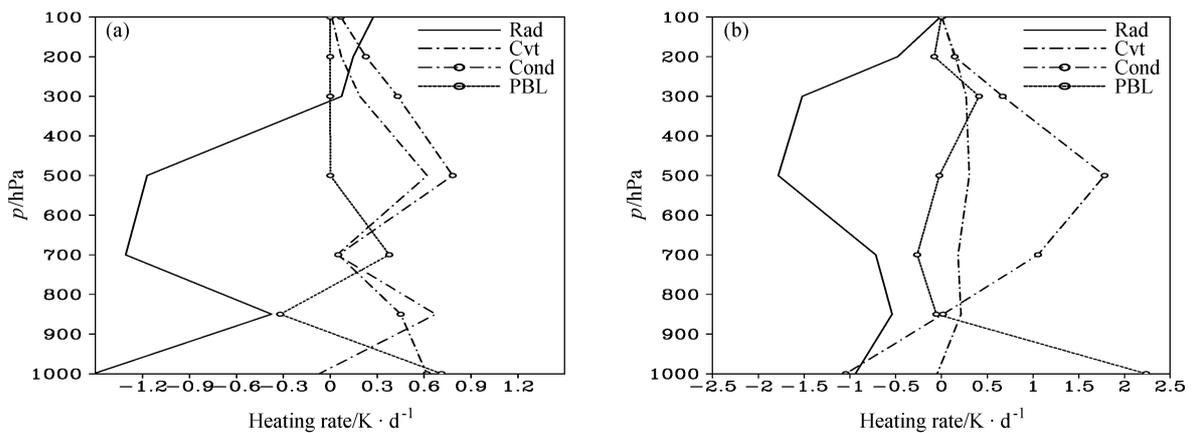


图 4 赤道地区 ( $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ) 物理参数化纬向平均辐射加热率 (Rad; 单位:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ )、积云对流加热率 (Cvt; 单位:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ )、大尺度凝结降水加热率 (Cond; 单位:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 和边界层湍流加热 (PBL; 单位:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 的垂直分布特征: (a) FM1.0; (b) FM2.0

Fig. 4 The vertical distribution of zonal mean heating rate of radiation process (Rad; units:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ ), cumulus convective process (Cvt; units:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ ), large scale condensation (Cond; units:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ ), and boundary layer turbulence (PBL; units:  $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ ) over equatorial region ( $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ): (a) FM1.0; (b) FM2.0

个主要方面,基本达到平衡。对流层低层的平衡,辐射和大尺度降水的效果为负加热,主要由边界层方案的加热效果相平衡。我们同时注意到,FM2.0 虽然很有效地改进了辐射加热分布和对流层中高层的对流—辐射平衡,但是也还存在其它

的不足,最明显的是对流加热率的减小。对流层中高层的辐射冷却主要是由凝结释热来平衡,深对流的潜热释放发挥的作用很小,尤其是 300 hPa 附近、500 hPa 附近以及低层的加热中心都没有得到反映,这直接导致了大气整体偏冷,尤其是对

流层高层。因此,在 FM2.0 中,深对流加热过程的调试和改进是下一步工作应该考虑的方向。

### 3.3 对流层顶系统误差的改进

FM1.0 在南北两极存在明显的暖偏差,几乎贯穿整个对流层。在中纬和低纬地区,对流层中低层主要是冷偏差。另外,在对流层顶附近,存在较大范围的显著的暖偏差。由于对流层上层热力主要由辐射和对流加热平衡,我们认为造成该误差的原因应该与辐射—对流相互作用的描述不合理有关。图 5 给出了 FM2.0 纬向平均的温度误差和纬向风误差的纬度—高度分布。对流层顶的过度偏暖问题得到显著改进。对流层顶甚至出现了一些冷的偏差。北半球中高纬贯穿对流层的加热也基本得到解决。但是南半球高纬的冷偏差略有加强。总体来说,模式误差显著改进,但是整体偏冷了。与 3.2 节中分析一致,这是由于对流加热太弱,辐射的冷却效应没有得到平衡的结果。

纬向风场的模拟显示,纬向风的基本分布得到了合理的描述,包括赤道高层和低层的东风,

中纬度对流层高层西风急流中心等分布特征。FM1.0 对西风急流强度的模拟强度偏弱,并且在两个半球均存在不合实际的向低纬度的位移。(南半球纬向风偏强,北半球偏弱)。FM2.0 风场的误差分布显示出整体误差减小,尤其是夏半球中纬度急流带上的误差。赤道地区对流层中高层也得到很好的改善。这与 FM2.0 中对流层顶辐射—对流平衡使热力场误差减小有关。

### 3.4 能量转换

由于大气的很多重要诊断特征反映在 Lorenz 能量循环和能量转换率中,这使得在模式评估的众多方法中,全球能量循环的诊断占有显著的地位 (Lambert, 1987; Sheng and Hayashi, 1990)。而在谱域,或混合时/空域的研究更有助于深入考查相关的相互作用过程的物理背景。

#### 3.4.1 资料和方法

作为观测值,文中使用美国国家环境预报中心与美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 数据,对应于 1993~1998 年 7 月 2~31 日 00 时。

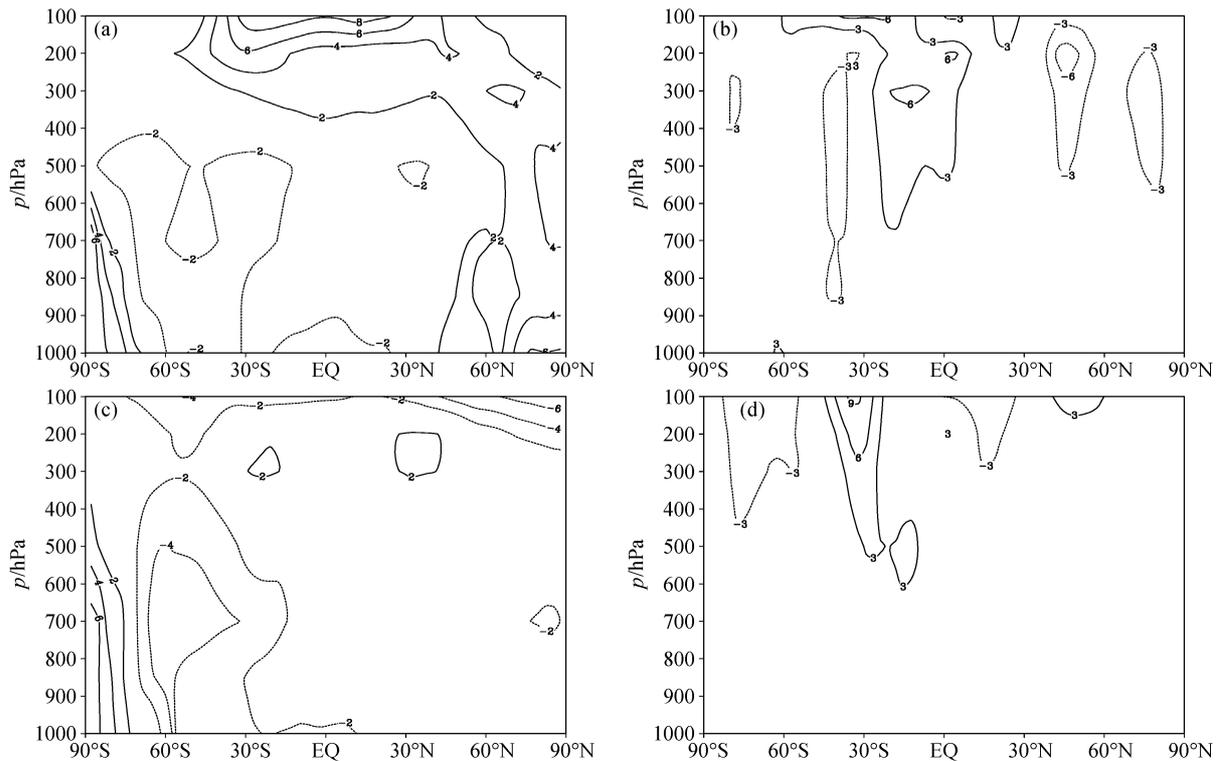


图 5 7 月纬向平均 (a)、(c) 温度误差 (单位: K) 和 (b)、(d) 纬向风误差 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的纬度—高度分布: (a)、(b) FM1.0; (c)、(d) FM2.0

Fig. 5 Latitude-height cross sections of monthly mean error for (a), (c) temperature (K) and (b), (d) zonal wind ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a), (b) FM1.0; (c), (d) FM2.0

采用的变量包括经向风、纬向风、垂直速度、温度的再分析资料，水平分辨率为  $2.5 \times 2.5$  经纬度网格，垂直方向取 7 个等压面层，分别为 100 hPa、200 hPa、300 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa、1000 hPa。

文中不同能量和转换项的计算是根据 Ulbrich and Speth (1991) 所用的能量循环公式来实现的，我们也将沿用文献公式中的符号，方程中各项具体表达式可参阅 Ulbrich and Speth (1991)。其中，AZ 和 KZ 分别代表月平均纬向平均环流的有效位能和动能，CZ 表示 AZ 向 KZ 的转换项。 $A_{SE}$  和  $K_{SE}$  代表各自月平均（即定常的）纬向涡动， $A_{TE}$  和  $K_{TE}$  分别表示瞬变涡动有效位能和瞬变涡动动能。 $C_{AT}$ （从 AZ 向  $A_{TE}$  的转换）， $C_{ET}$ （从  $A_{TE}$  向  $K_{TE}$  的转换）和  $C_{KT}$ （从 KZ 向  $K_{TE}$  的转换）表示由于瞬变波引起的转换项， $C_{AS}$ （从 AZ 向  $A_{SE}$  的转换）， $C_{ES}$ （从  $A_{SE}$  向  $K_{SE}$  的转换）和  $C_{KS}$ （从 KZ 向  $K_{SE}$  的转换）表示定常波引起的各自转换项。定常波和瞬变波之间的非线性转换用  $C_{ATE-ASE}$ （从  $A_{TE}$  向  $A_{SE}$  的转换）和  $C_{KTE-KSE}$ （从  $K_{TE}$  向  $K_{SE}$  的转换）来表示。 $G_Z$ 、 $G_{SE}$  和  $G_{TE}$  分别

表示 AZ、 $A_{SE}$  和  $A_{TE}$  的制造项。 $D_Z$ 、 $D_{SE}$  和  $D_{TE}$  分别表示 KZ、 $K_{SE}$  和  $K_{TE}$  的耗散项。对制造项和耗散项的估算，常常是根据收支方程（并忽略能量的时间导数）将它们作为能量循环其它项的剩余项来得到的。这种余差方法，通常是由平衡要求得到，并不是直接从大气加热场和温度场的分布来求得，而且其它项的误差也累计到余项中，所以源、汇项不是本文关心的对象，在文中不予给出。

对于个别能量和转化项的公式，不同文献中差别很大。这可能是除了形式不同外，不同特性的局地物理过程可以导致相同的全球积分能量值的缘故。因此，为正确的揭示我们得到的结果，需要了解这些项所描述的特定物理过程。在用于本文的公式中，KZ 代表纬向平均风场的振幅， $K_{SE}$  和  $K_{TE}$  分别表示由于定常波和瞬变波引起的风场的变化。纬向有效位能 AZ 反映了高纬和低纬之间的温度对比， $A_{SE}$  和  $A_{TE}$  分别表示由定常波和瞬变波引起的沿纬圈的温度变化。它们在各自的纬度和气压层上也与静力稳定度有关。斜压转换项  $C_{AS}$  和  $C_{AT}$  的纬向平均贡献表示沿纬向平均温度

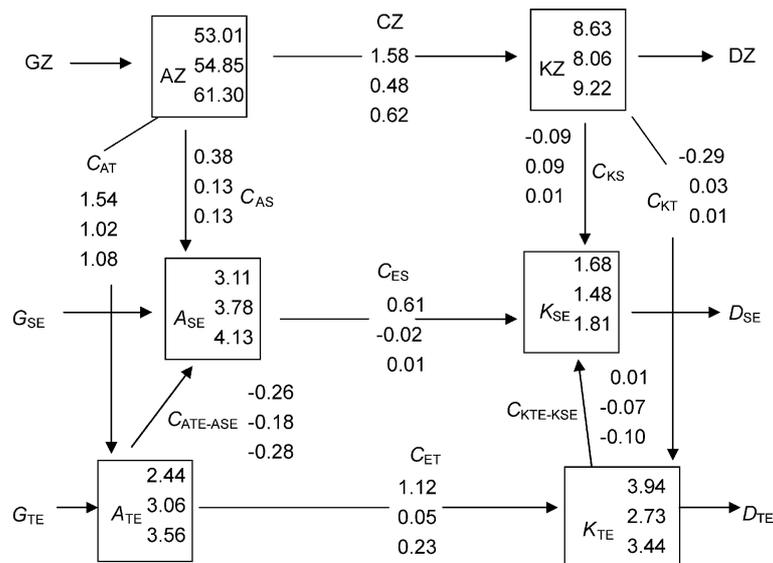


图 6 7 月份全球大气能量循环。贮蓄项（方框内）单位为  $J \cdot m^{-2}$ ；转换项单位为  $W \cdot m^{-2}$ 。箭头表示正值的转换方向，负值时转换方向相反。图中每组数值第一行为 NCEP/ NCAR 再分析资料 1993~1998 年的平均结果，第二行为 FM1.0 的结果，第三行为 FM2.0 的结果  
Fig. 6 The global atmospheric energy cycle for Jul. Reservoirs (in boxes) are in  $J \cdot m^{-2}$ . Conversions are in  $W \cdot m^{-2}$ , with arrows indicating the orientation of conversions for positive values, and the orientation of conversions is reversed for negative values. The top numbers indicate values based on NCEP/ NCAR reanalysis data during 1993 - 1998, the second row values are from FM1.0, and the last row numbers from FM2.0

梯度方向的涡旋热输送, 而  $C_{ES}$  和  $C_{ET}$  表示与定常涡动和瞬变涡动有关的暖空气上升和冷空气下沉。这些过程与温带气旋有关, 但也与定常波有联系 (Ulbrich and Speth 1991)。正压转换项  $C_{KS}$  和  $C_{KT}$  的局地贡献表示从纬向急流最大值中心向外发散的纬向动量的经向输送 (正值) 或向急流中心处集中的纬向动量的经向输送 (负值), 它主要反映扰动的正压性质造成纬向气流减弱或加强的波流相互作用的过程。最后, 非线性转换项 ( $C_{ATE-ASE}$  和  $C_{KTE-KSE}$ ) 正的纬向平均贡献表示瞬变涡动引起的热量和动量逆定常涡旋热量和动量梯度方向输送。负值表示顺定常涡旋梯度方向输送, 即定常波的减弱有利于转化为瞬变涡动能量。

### 3.4.2 全球能量循环

图 6 给出了 7 月 FM2.0 的能量循环框图。从全球平均量可以看到, 除了位能 ( $AZ$ 、 $A_{SE}$ 、 $A_{TE}$ ) 虚假增大, FM2.0 在其它各能量贮蓄项和转换项均取得不同程度的改进。尤其是偏弱的涡动动能  $K_{TE}$  明显增大, 更接近观测 (虽然仍然略有偏弱); 向涡动有效位能的转换率  $C_{AT}$  增大; 涡动有效位能向涡动动能的斜压转换 (包括纬向平均 CZ 和涡动分量  $C_{ES}$ 、 $C_{ET}$ ) 取得较大改进; 涡动有效位能之间的非线性相互作用更接近实际资料。

### 3.4.3 纬向平均垂直剖面 and 局地分布特征

#### 3.4.3.1 纬向平均向涡动有效位能的斜压转换

图 7 给出涡动有效位能的纬向平均分布。在平均量中我们看到, FM1.0 和 FM2.0 版本均比实际资料强, 实际是由于赤道上空对流层顶高层的量值偏大造成, 在 FM2.0 版本中, 该误差得到有效改进, 并且夏半球中高纬对流层中低层的大值中心得到显著改进, 冬半球的中纬度对流层中层的改进也很明显。与之相一致的, 向涡动有效位能的转换  $C_{AT}$  获得改进。包括两个半球中纬度地区贯穿对流层的大值中心的改进, 尤其是在 FM1.0 版本中明显偏弱的夏半球 (中纬度) 大值中心 (图 8)。这些改进与温度误差在对流层顶及夏半球中高纬对流层中低层的显著改进密不可分。

#### 3.4.3.2 涡动有效位能及其向涡动动能的转换

FM1.0 版本中, 涡动有效位能向涡动动能的转换在对流层顶的误差得到明显的改善。图 9 给出定常涡动位能  $C_{ES}$  的转化率。位能向动能的斜压

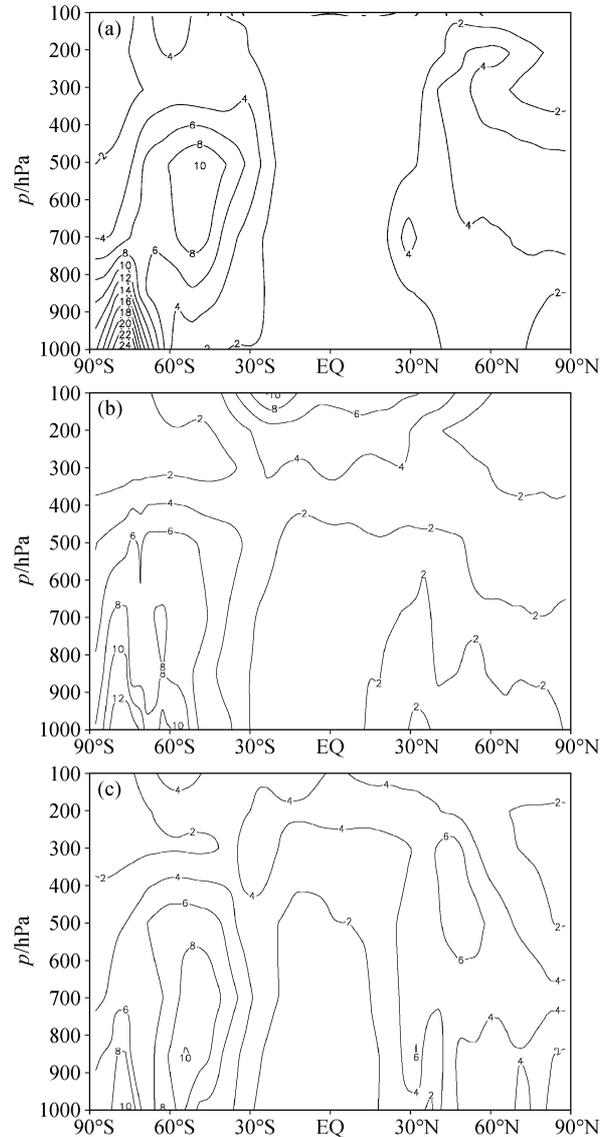


图 7 7 月  $A_{TE}$  的纬向平均垂直剖面 (单位:  $J \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$ ): (a) NCEP 资料; (b) FM1.0; (c) FM2.0

Fig. 7 The meridional and vertical cross sections of zonal mean reservoir  $A_{TE}$  ( $J \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$ ) for Jul from (a) NCEP reanalysis, (b) FM1.0, and (c) FM2.0

转换主要发生在对流层的中层以及低层。在 2.0 版本中, 不仅有效的改进了对流层顶的虚假误差, 夏半球中低层的误差也得到显著增加。这是由于温度场误差减小的缘故。但是我们同时发现, 对流层高层仍然存在一定的误差, 尤其是冬半球极地上空的反向转换。这都需要进一步的分析和改进。

#### 3.4.3.3 涡动动能

瞬变涡动动能  $K_{TE}$  仍然比观测值要低, 但是

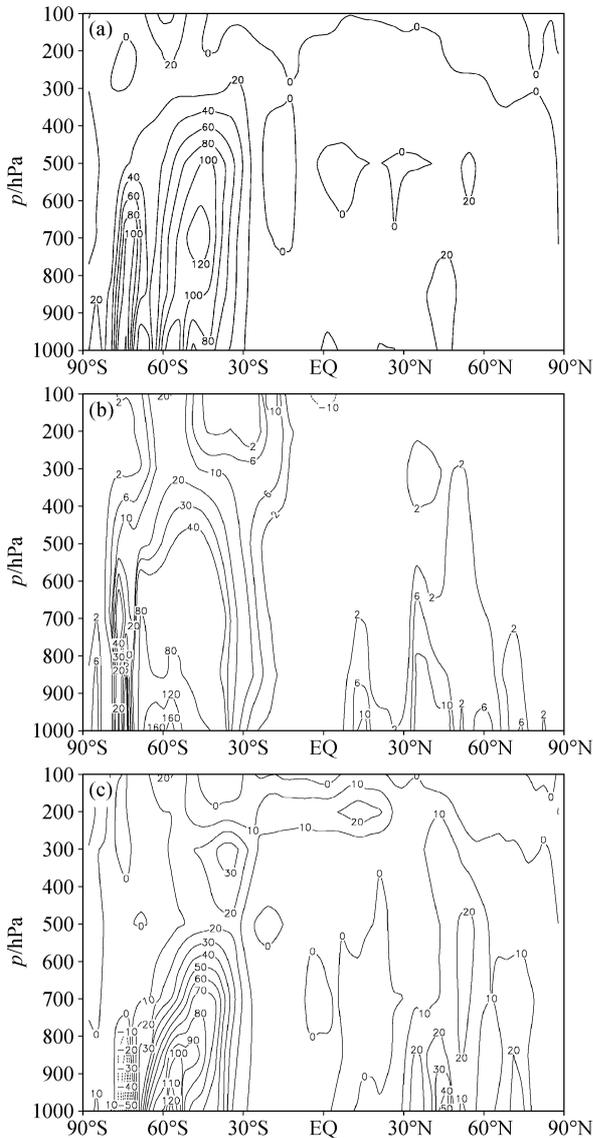


图 8 7 月转换项  $C_{AT}$  ( $AZ \rightarrow A_{TE}$ ) 的纬向平均垂直剖面 (单位:  $10^{-6} W \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$ ): (a) NCEP 资料; (b) FM1.0; (c) FM2.0

Fig. 8 The meridional and vertical cross sections of zonal mean conversion  $C_{AT}$  ( $AZ \rightarrow A_{TE}$ ) ( $10^{-6} W \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$ ) for Jul from (a) NCEP reanalysis, (b) FM1.0, and (c) FM2.0

在 FM2.0 版本中得到了显著的改善 (图 10)。在 1.0 版本中, 夏半球中纬度对流层高层的急流大值基本没有得到体现, 而且冬半球的极值也明显偏弱。在 2.0 版本中, 副热带急流显著增强, 在两个半球的中心明显, 位置也与实况基本吻合。这是由于 2.0 版本中, 原 FM1.0 在对流层顶的系统误差得到显著改进, 以至于涡动有效位能在对流层顶的误差得以改进, 从而涡动有效位能向涡

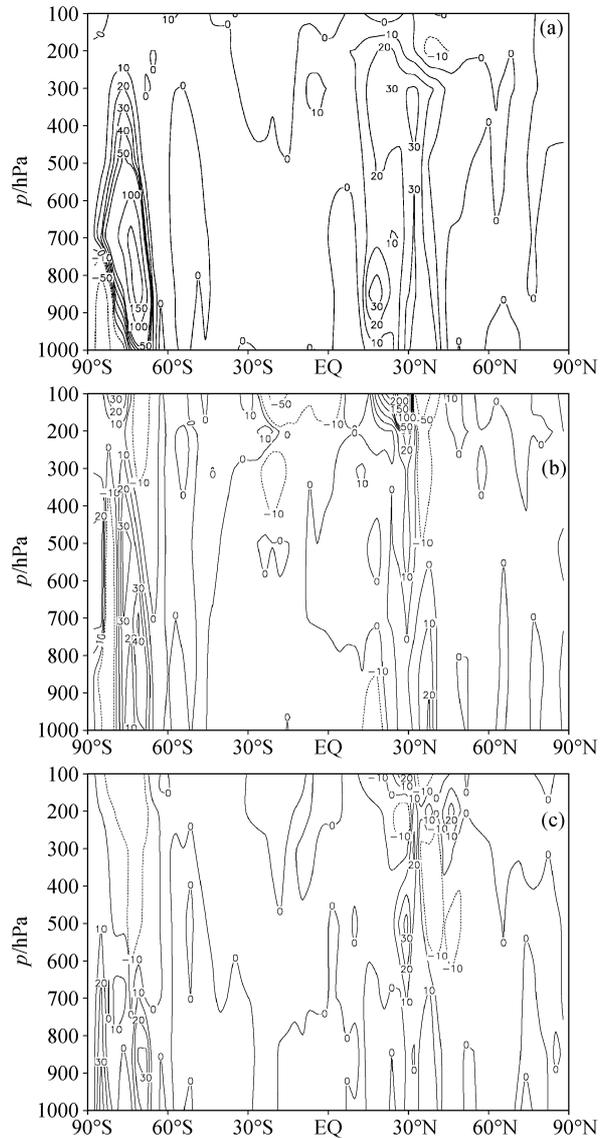


图 9 同图 8, 但为转换项  $C_{ES}$  ( $A_{SE} \rightarrow K_{SE}$ ) 的纬向平均垂直剖面

Fig. 9 As in Fig. 8, but for the meridional and vertical cross sections of conversion  $C_{ES}$  ( $A_{SE} \rightarrow K_{SE}$ )

动动能的转换改进, 尤其是夏半球  $C_{AT}$  转化率的增强和  $C_{ET}$  的改进, 最终导致瞬变涡动动能的显著改进。但是, 我们同时也看到, FM2.0 中强度仍然略偏弱, 赤道地区对流层高层还存在一定的误差, 这可能与  $C_{ET}$  在该处的误差有关, 有待在下一步工作中改进。

### 3.5 降水分布

降水是动力、热力和水分循环等多种气象条件共同作用的结果, 因此它是反映模式综合表现的重要因子。因此我们考查了降水模拟与 CMAP

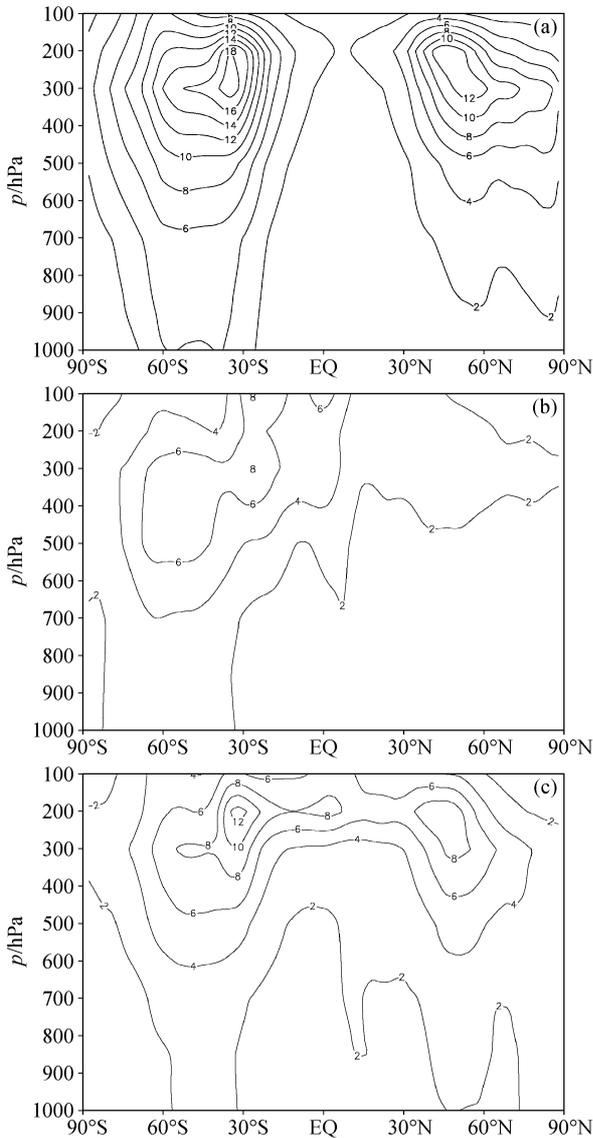


图 10 同图 7, 但为  $K_{TE}$  纬向平均垂直剖面  
Fig. 10 As in Fig. 7, but for the meridional and vertical cross sections of reservoir  $K_{TE}$

资料的对比。图 11 给出的是降水率的纬向平均分布, 图 12 给出的是降水率的水平分布。可以看出, FM 基本模拟出了降水分布的主要特征。夏半球的赤道地区为降水的主要地区, 另外在两个半球的中纬度地区为降水的次峰值区。水平分布的模拟基本抓住了赤道地区的主降水带, 包括夏季东南亚和西太平洋的降水中心。对冬半球中纬度的降水特征也有合理的反映, 包括冬季北太平洋和西大西洋的块状降水中心, 夏季南半球中纬度洋面上的降水带。

FM1.0 对降水的模拟存在一些明显的不足和

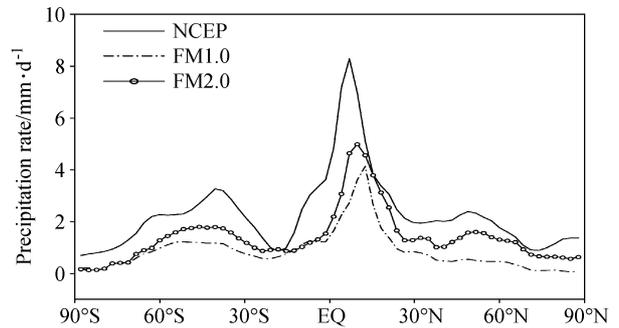


图 11 7 月降水率的纬向平均分布  
Fig. 11 Monthly mean zonal averaged precipitation rate in Jul

偏差。首先是降水强度的低估, 尤其南美洲赤道地区的大陆降水中心基本没有反映出来。另外, 在降水的水平分布上 FM1.0 总是模拟不出夏半球中纬度的降水次中心, 北半球中纬度大陆上地区的降水基本没有得到反映。

在 FM2.0 中, 降水强度显著增加, 包括赤道地区和南北半球中纬度地区的降水, 尤其是夏半球的降水强度显著改善, 降水峰值的位置也更接近再分析资料 (图 11)。降水的水平分布 (图 12) 显示, 降水的分布基本合理。FM1.0 中夏半球大陆上降水缺失得到了很大改进, 北太平洋上的降水范围也更合理; 赤道地区, FM1.0 对非洲和南美洲大陆上的降水中心基本没有反映, 在 FM2.0 中也得到很大改进, 西太平洋暖池附近降水中心的降水强度和范围增大, 中东太平洋强降水断带明显改进; 值得一提的是, 困扰大部分模式的“双赤道辐合带”在保真模式中并没有迹象。另外, 南半球宽广海域上的降水在 FM2.0 中均有合理的反映, 只是强度仍然偏弱。

## 4 结论

在改进的物理守恒律保真全模式 FM2.0 中, 云的特征的模拟得到很大改善, 包括云量及空间分布, 云水的垂直分布, 且增加了云冰的模拟。辐射方案中对这些云水物质的反应, 改进了对流层中高层的辐射加热。大气顶和地表的辐射加热更加合理。在垂直空间上次网格物理过程造成的加热和冷却效应相平衡。大气能量循环的诊断分析也表明, FM2.0 能量及其转换的全球平均和局地分布获得改进, 尤其是瞬变扰动明显增强, 与

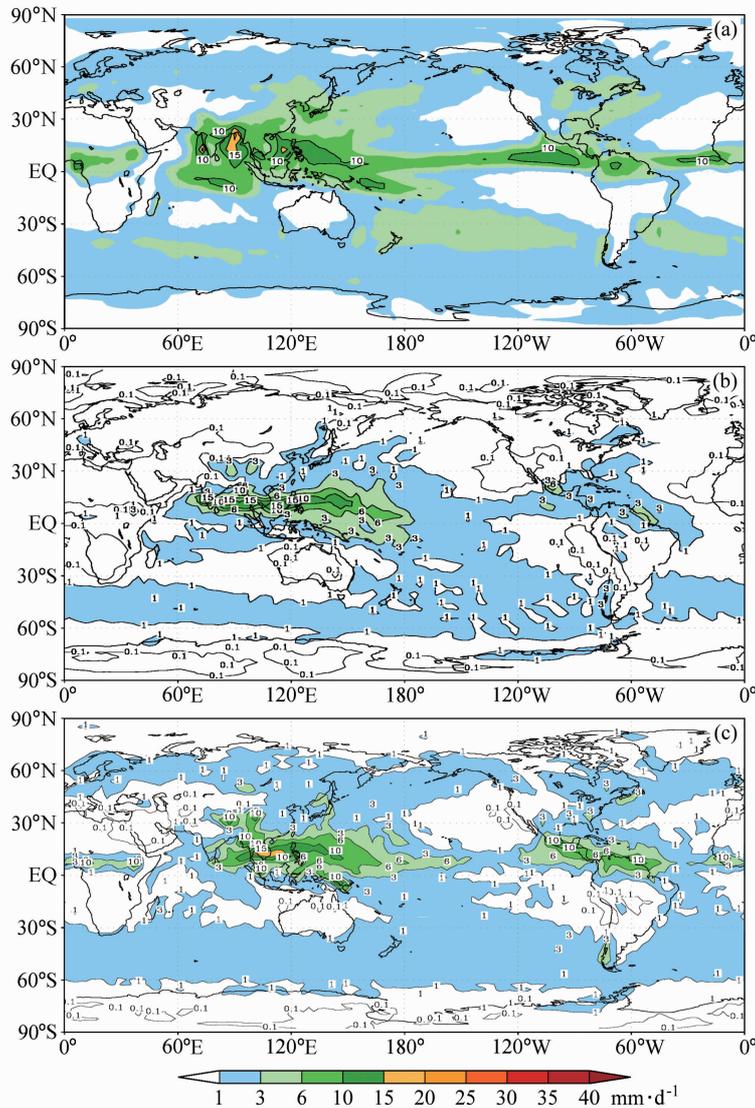


图 12 7 月降水率的水平分布：(a) NCEP 资料；(b) FM1.0；(c) FM2.0  
Fig. 12 Monthly mean precipitation rate in Jul: (a) NCEP reanalysis; (b) FM1.0; (c) FM2.0

瞬变涡动有关的能量项和斜压转换项均取得较大改进。作为结果，原 FM1.0 在对流层顶的暖偏差明显改进。地面降水分布改进显著，降水强度明显增强，尤其是赤道地区的降水中心。FM1.0 版本中夏半球中纬度降水的问题得到显著改进。降水结构和数量均更为合理，并且未见“双赤道辐合带”现象。总之，通过云和辐射参数化方案的改进，FM2.0 在辐射—云—对流平衡的描述更加合理，这种合理描述同时促进了次网格加热和动力相互作用的改进，斜压能量转换更合理。该版本全模式能够较真实地模拟真实大气的主要特征，是可信的和可以初步应用的全模式。

### 参考文献 (References)

Browning K. 1993. The GEWEX cloud system study [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 74: 387-400.  
Charlock T P, Alberta T L. 1996. The CERES/ARM/GEWEX Experiment (CAGEX) for the retrieval of radiative fluxes with satellite data [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 2673-2683.  
Grabowski W W. 2001. Coupling cloud processes with largescale dynamics using cloud resolving convection parameterization [J]. J. Atmos. Sci., 58, 78-997.  
Morcrette J J. 1989. Description of the radiation scheme. in the ECMWF model [R]. ECMWF Tech. Memo. 165: 536-549.  
Morcrette J J. 1991. Radiation and cloud radiative properties in the

- European centre for medium range weather forecasts forecasting system [J]. *J. Geophys. Res.*, 96 (D5): 9121-9132.
- Lambert S J. 1987. Spectral energetics of the Canadian climate centre general circulation model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1295-1304.
- Pinker R T, Corio L A. 1984. Surface radiation budget from satellites [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112: 209-215.
- Randall D A, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. 2003. Breaking the cloud parameterization deadlock [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84: 1547-1564.
- Rossow W B, Cairns B. 1995. Monitoring changes of clouds [J]. *Climatic Change*, 31: 305-347.
- Sheng J, Hayashi Y. 1990. Observed and simulated energy cycles in the frequency domain [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 1243-1254.
- 沈元芳, Baer F. 1997. 全球气候模式对辐射强迫的响应 [J]. *应用气象学报*, 8 (增刊): 78-86. Sheng Yuanfang, Baer F. 1997. Response of global climate model to radiative forcing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 8 (suppl.): 78-86.
- 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*, 13 (2): 265-276. Sheng 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)*, 13 (2): 265-276.
- 沈元芳, 伊兰, 陈谊, 等. 2002. 辐射参数化的变化对模式中中期和月预报的影响 [J]. *应用气象学报*, 13 (3): 300-311. Sheng Yuanfang, Yi Lan, Chen Yi, et al. 2002. Impact of changes in radiation parameterization on model medium-range and monthly forecasting [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (3): 300-311.
- Smith R N B. 1990. A scheme for predicting layer clouds and their water contents in a general circulation model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 116: 435-460.
- Sundqvist H. 1978. A parameterization scheme for nonconvective condensation including prediction of cloud water content [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 104: 677-690.
- Twomey S. 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34: 1149-1152.
- Ulbrich U, Speth P. 1991. The global energy cycle of stationary and transient atmospheric waves results from ECMWF analyses [J]. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 45: 125-138.
- 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 Science (in Chinese)*, 33 (3): 593-599.
- Zhang Y C, Rossow W B, Laci A. 1995. Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets. 1. Method and sensitivity to input data uncertainties [J]. *J. Geophys. Res.*, 100: 1149-1165.
- 赵高祥, Rockel B, Raschke E. 1987. 大气中红外辐射传输的参数化模式 [J]. *科学通报*, 19: 1479-1482. Zhao Gao-xiang, Rockel B, Raschke E. 1987. An infrared radiative transfer model in the atmosphere [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 19: 1479-1482.
- 赵高祥, 汪宏七, Rockel B, et al. 1988. 晴空大气中太阳辐射传输的近似计算 [J]. *科学通报*, 33 (11): 847-850. Zhao Gao-xiang, Wang Hongqi, Rockel B, et al. 1988. An approximate calculation for solar radiation in the atmosphere of clear sky [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 33 (11): 847-850.
- 钟琦. 2008. 一个保真全球谱模式的发展 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士论文, 45-52. Zhong Qi. 2008. Development of a physical conserving fidelity global spectral model [R]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 45-52.
- Zhong Q, Zhong Q. 2008. The development of a physical conservation fidelity global spectral model-From dynamic framework to a full model [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letter*, 1 (1): 33-35.
- 钟琦, 钟青. 2010. 理守恒保真计算与理想斜压不稳定波模拟的改进 [J]. *高原气象*, 29 (5): 1119-1126. Zhong Qi, Zhong Qing. 2010. Improvements on the Simulation of Ideal Baroclinic Instability Wave by a Fidelity Scheme of Physical Conserving Laws. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (5): 1119-1126.
- 钟青. 1994. 长时效的正压原始方程能量完全守恒 (拟) 谱模式 [J]. *气象学报*, 2 (4): 385-396. Zhong Qing. 1994. A long valid time energy perfect conservative pseudo-spectra scheme of barotropic primitive equations [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 52 (4): 385-396.
- 钟青. 1997. 物理守恒律保真格式构造与数值预报斜压原始方程传统谱模式改进研究 [J]. *气象学报*, 55 (6): 641-661. Zhong Qing. 1997. The Formulation of fidelity schemes of physical conservation laws and improvements on a traditional scheme of baroclinic primitive equations for numerical weather prediction [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 55 (6): 641-661.
- Zhong Q, Chen J, Sun Z. 2002. Elimination of computational systematical errors and improvements of weather and climate system models in relation with baroclinic primitive equations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (6): 1103-1112.