

# 一个海气耦合模式模拟的云辐射过程<sup>\* 1</sup>

汪 方

(中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081;  
南京信息工程大学,南京,210044;中国气象科学研究院,北京,100081)

丁一汇 徐 影

(国家气候中心,北京,100081)

## 摘 要

利用 NCC/IAP T63 海气耦合模式进行了 20 a 积分,详细分析了模式对云量及其辐射影响的模拟能力。结果表明,模式能够模拟出云量分布的基本特征,但同 ISCCP 卫星观测资料及 ERA 再分析资料相比还存在较大的差距,总体表现为模拟的云量偏小,尤其是海洋上部分地区出现了异常的低值区。通过对云量方案的改进,明显改善了两大洋东岸、夏半球副热带到中纬度海洋上空低云的模拟。但模式对热带印度洋到西太平洋地区云量的模拟仍然存在明显的偏差,这主要是由于模式对该地区强对流云模拟能力差,造成该地区高云模拟存在较大的误差。对辐射及其云辐射强迫的分析表明,模式对长波及其云辐射强迫的模拟要明显好于短波。短波辐射模拟的偏差主要是由于短波云辐射强迫模拟过小、耦合模式对积雪和海冰模拟较差、以及未考虑气溶胶的影响等原因共同引起的;而长波辐射模拟的差距主要是云量以及下垫面温度模拟不足造成的。相应于云量方案的改进,两大洋东岸、夏半球副热带到中纬度海洋上辐射(尤其是短波辐射)的模拟有了明显的改善,这也明显改进了这些地区的净辐射模拟。

**关键词:** 海气耦合模式,云辐射,云辐射强迫,云量方案。

## 1 引 言

云覆盖了地球约三分之二的面积,在地气系统的辐射收支中起着十分重要的作用。云一方面吸收和散射太阳短波辐射,对地气系统起到降温作用;同时,云能有效吸收和反射地表及云下大气放射的长波辐射,起到保温作用,其净作用在气候变化中起着关键作用。但是,由于对云辐射过程认识的不足以及云辐射参数化的缺陷,当前气候模式对云辐射过程的模拟还存在很大的不确定性,这直接影响到了用模式预估未来气候变化的可信度。研究表明,模式对云辐射参数化十分敏感,对于不同的云辐射参数化方案,不同的模式给出的气候敏感性的差异可以达到 3 倍的量级<sup>[1,2]</sup>。IPCC 在对未来气候进行预测时<sup>[3~5]</sup>, 给出的气候敏感性的范围为

1.5~4.5 °C,表现出很大的不确定性。而决定气候敏感性的最大不确定性因素在于云及其对辐射的影响上。

云量作为云的一个影响辐射的重要因子,直接影响了辐射能量在地气系统中的分布,其分布和变化特征在调节气候上起着十分重要的作用<sup>[6~10]</sup>。模式在云模拟上的缺陷,会对地表的热量平衡产生影响,对于海洋可能影响海温分布,进而影响海洋环流的模拟<sup>[11,12]</sup>;云模拟的不足还会进一步影响到海陆热力对比,从而影响季风环流的模拟<sup>[13]</sup>。此外,云量反馈还会对气候敏感性产生影响,可能增强由于 CO<sub>2</sub> 加倍引起的地球表面变暖<sup>[14,15]</sup>。

鉴于云量及其辐射影响的重要性,在模式模拟中对其进行检验十分重要。过去这项工作主要受到云辐射观测的限制,但近几十年来,卫星观测技术的

\* 初稿时间:2004 年 10 月 26 日;修改稿时间:2005 年 1 月 19 日。

资助课题:国家科技部“十五”攻关滚动课题“全球环境变化对策与支撑技术研究”01 课题(2001BA611B01)。

作者简介:汪方,1974 年生,男,湖北宜昌人,博士,主要从事全球气候模式云-辐射参数化敏感性研究。

飞速发展使得云辐射观测有了很大进步,目前国际上一些著名的云辐射观测项目,如国际卫星云气候计划(ISCCP)<sup>[16]</sup>、地球辐射平衡试验(ERBE)<sup>[17]</sup>、大气辐射观测计划(ARM)<sup>[18]</sup>等,积累了具有一定时间长度和精度的云辐射资料。同时,目前还有一些再分析资料,它们综合了观测资料和一些先进模式的计算结果,可用于对模式的比较验证。

NCC/IAP T63 海气耦合模式是国家气候中心和中国科学院大气物理研究所于 20 世纪 90 年代后期发展起来的。该模式被广泛应用于短期气候预测、气候数值模拟和对未来气候的预测等领域<sup>[19~21]</sup>。在云辐射方面,沈元芳等<sup>[22]</sup>曾研究了辐射参数化的变化对预报的影响,但对模式云辐射过程的气候学特征进行系统的研究甚少,对模式模拟云辐射的能力缺乏必要的了解,而这种认识的缺乏必然会影响模式的进一步发展。为此本文利用 NCC/IAP T63 海气耦合模式进行了较长时间的积分,分析了模拟的云辐射过程的气候特征,找出了云辐射模拟中存在的主要不足,并对云量方案进行了改进。

## 2 模式和方法

### 2.1 模式介绍

采用国家气候中心和中国科学院大气物理研究所共同研制的 NCC/IAP T63 全球海气耦合模式,其中大气模式为 63 波三角形截断谱模式,水平分辨率为  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ ,垂直方向采用  $p-\sigma$  混合坐标,划分为 16 层;海洋模式的分辨率与大气模式相同,垂直方向分为 30 层。辐射参数化方案采用 ECM-WF 的 Morcrette 辐射方案;深积云对流采用修改的 Kuo 方案;浅积云对流采用 Tiedtke 垂直扩散方案;采用一个简单的三层模式来描述陆面土壤过程;地形重力波拖曳参数化采用 Palmer 等方案的修改型;海冰采用一个热力学海冰模式来进行预报。海气耦合采用逐日耦合方式,即大气模式每天调用一次海洋模式,并与海洋模式交换海气通量;为抑制耦合模式的气候漂移,采用了日通量距平耦合(DFA)的方法。有关大气和海洋模式的技术细节,可参考文献<sup>[23~26]</sup>。

### 2.2 云量参数化方案及其改进

模式原云量方案主要将云分为 4 种类型:对流云和高、中、低层云<sup>[23]</sup>。对流云由模式积云对流方

案中的平均对流降水率来决定。层云主要表示为相对湿度的二次函数,除了低云考虑了垂直速度和逆温外,相对湿度几乎是确定云的唯一因子。而实际上云的形成依赖于相对湿度、垂直速度、大气稳定度和对流质量通量等的共同作用。此外,原云量方案对海洋上云量的模拟较差,可能是没有考虑海洋层积云引起的。

鉴于上述原因,参考 NCAR CAM2 的云量参数化方案<sup>①</sup>,对云量参数化方案作了如下改进:

(1) 引进海洋层积云的参数化方案,将海洋上的层云量  $C_{st}$  表示为<sup>[27]</sup>

$$C_{st} = \min\{1.0, \max[0, (\theta_{700} - \theta_s) \times 0.057 - 0.5573]\} \quad (1)$$

其中  $\theta_{700}$  和  $\theta_s$  分别是 700 hPa 和地球表面的位温。

(2) 在弱的下沉区域允许低云(750 hPa 以下)存在,低云量表示为

$$C_l = \begin{cases} 0 & \omega > \omega_c \\ \left(\frac{\omega_c - \omega}{\omega_c}\right) \left(\frac{R_H - R_{H\min}^{\text{low}}}{1 - R_{H\min}^{\text{low}}}\right)^2 & 0 \leq \omega \leq \omega_c \\ \left(\frac{R_H - R_{H\min}^{\text{low}}}{1 - R_{H\min}^{\text{low}}}\right)^2 & \omega < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中  $R_H$  为相对湿度,  $R_{H\min}^{\text{low}}$  为低云形成的相对湿度临界值,  $\omega$  和  $\omega_c$  分布为垂直速度和临界垂直速度。

(3) 中高层云的参数化考虑大气稳定度表示为

$$C_h = \left[\max\left(0, \frac{R_H - R_{H\lim}}{1 - R_{H\lim}}\right)\right]^2 \quad (3)$$

$$R_{H\lim} = 0.999 - (1 - R_{H\min}^{\text{high}}) \times \left[1 - \min\left(1, \frac{N^2}{3.5 \times 10^{-4}}\right)\right] \quad (4)$$

其中  $N^2$  是 Brunt-Vaisala 频率,  $N^2 = -\frac{g^2 \rho}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p}$ ;

$R_{H\min}^{\text{high}}$  为中高层云形成的相对湿度临界值。

需要指出的是,尽管热带地区对流云的模拟存在较大问题,但这涉及到对积云对流参数化方案的修改,这超出了本文的研究范围,因此本文并未改进对流云的参数化方案,留待以后进一步研究。

### 2.3 资料和试验设计

本文主要使用了两套资料:一是国际卫星云气候计划(ISCCP)提供的 ISCCP-D2 月平均资料集<sup>[16]</sup>,资料时段为 1983 年 7 月至 2001 年 9 月,包

① Description of the NCAR Community Atmosphere Model(CAM2), <http://www.cesm.ucar.edu/models/>

括各种云量、云水含量、云的光学厚度等观测项目；二是最近20年(1982~2001年)的月平均,欧洲中心40a再分析资料(ERA-40)<sup>①</sup>,包括总云量和高、中、低云量,大气顶和地面的长波和短波辐射(有云和晴空两种情况)等变量。需要指出的是,尽管对于单独的云或辐射资料,都有一定的卫星或台站观测资料可用,但考虑到云和辐射以及其他大气资料之间的协调性,本文仍然选取ERA-40作为模式的验证资料。采用ERA资料是一种迫不得已的做法,还存在较大的不确定性。

本文共进行了两组积分试验,分别采用原云量方案(简称ORIG)和改进云量方案(简称NEW)。两种方案各积分20a,将前10a积分作为耦合调整积分,以减小耦合冲击<sup>[28]</sup>,而将后10a平均的积分结果用于本文的分析。以下主要按季节进行分析,即春季(3~5月),夏季(6~8月),秋季(9~11月)和冬季(12~次年2月)。

### 3 云量的模拟

#### 3.1 总云量

表1给出了全球及区域平均的全年和各个季节的平均总云量。比较ISCCP和ERA两套资料可以

发现,两套资料给出的全球和区域平均的总云量在数值上比较接近,但在纬向平均上(图1),除热带地区外,两套资料还存在明显的差别,尤其是在两极差别更为明显。模式云量方案改进以后,在全球和区域平均总云量的模拟上较原方案有了一定的改善,但与观测资料相比仍有明显的差距,普遍偏少约10%,而热带地区的模拟最差,偏少10%~20%(表1)。而纬向平均云量的改进较为明显(图1),主要集中在南半球中纬度海洋、副热带以及北极地区,改进最大可超过10%。但纬向平均云量在热带地区的差距仍然十分明显,其原因将在下面分析。

#### 3.2 总云量的全球分布

模式模拟的总云量在分布形势上与ERA再分析资料比较一致,均为中高纬和热带地区大,副热带小,但模拟总云量的量级普遍偏小。原方案对海洋上空云量的模拟存在明显的差距,尤其是在赤道印度洋、赤道中东太平洋、北美和南美的西岸沿海以及非洲西南洋面等地出现了异常的低值区。此外,南北半球中高纬度海洋云量偏低十分明显。通过对云量方案的改进,明显改进了两大洋东岸、以及夏半球副热带到中纬度海洋上空(纬度30°~60°)云量的模拟,这从云量差值场(图2)上可以清楚看出。

表1 年平均和季节平均的全球及区域平均总云量(单位:%)

Table 1 Annual and seasonal mean total cloud cover in global and regional scale(unit: %)

区域	ISCCP			ERA			ORIG			NEW		
	年	夏季	冬季	年	夏季	冬季	年	夏季	冬季	年	夏季	冬季
全球	66.9	66.3	66.9	66.9	67.1	66.5	54.0	54.3	53.7	56.7	57.2	56.1
北半球	67.8	65.6	70.2	68.8	66.8	70.7	56.8	55.5	58.8	58.8	59.4	58.1
南半球	70.7	71.3	68.1	70.4	72.7	67.5	57.5	59.3	54.5	61.3	61.8	60.1
热带	60.1	60.2	60.4	59.3	59.4	59.3	45.1	45.3	45.2	47.4	47.5	47.6

注:表中区域按纬度划分:北半球(20°~90°N),南半球(20°~90°S),热带地区(20°N~20°S)。

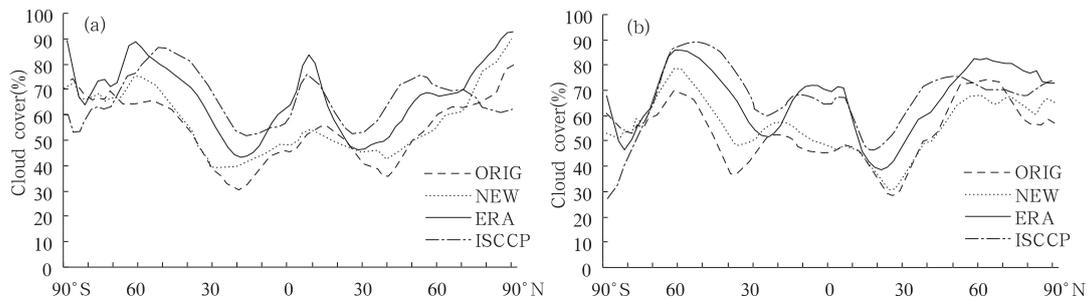


图1 夏季(a)和冬季(b)纬向平均总云量分布(单位:%)

Fig. 1 Zonal averaged total cloud cover(unit: %)(a. summer, b. winter)

<sup>①</sup> 资料详细说明及下载参见网址 [http://data.ecmwf.int/data/d/era40\\_moda](http://data.ecmwf.int/data/d/era40_moda)

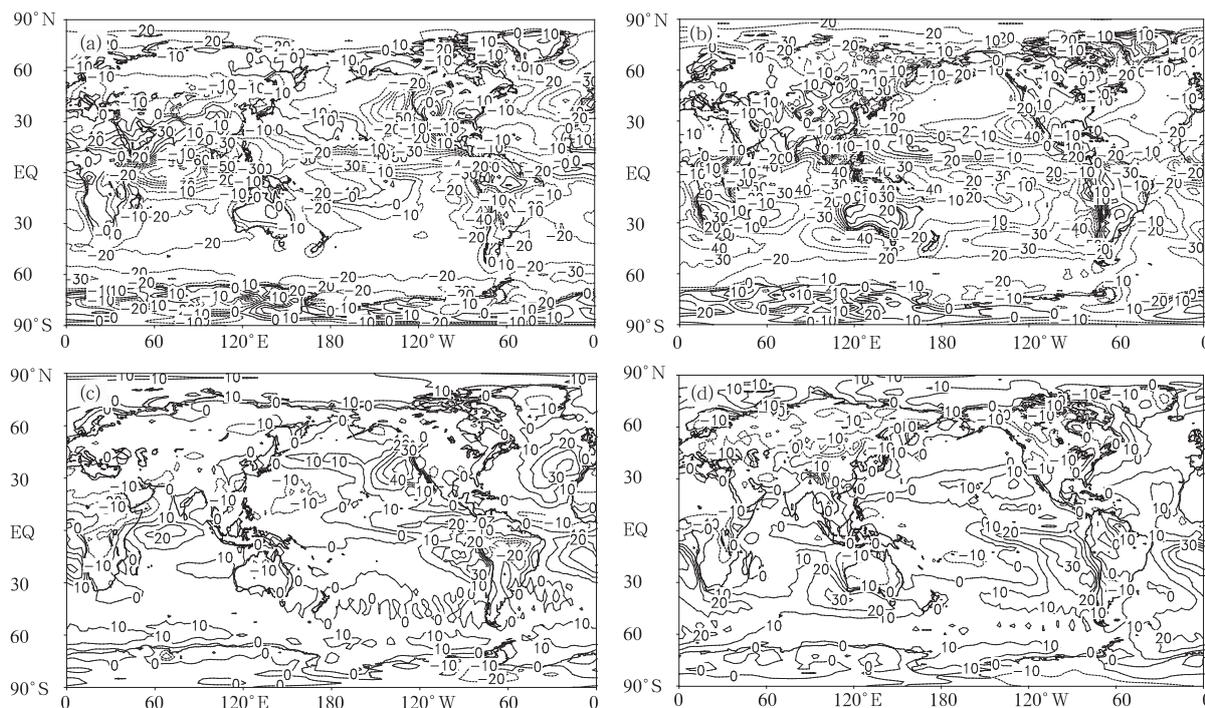


图 2 总云量差值场

(a. 夏季, ORIG-ERA; b. 冬季, ORIG-ERA; c. 夏季, NEW-ORIG; d. 冬季, NEW-ORIG; 单位: %)

Fig. 2 Total cloud cover differences

(a. summer, ORIG-ERA; b. winter, ORIG-ERA; c. summer, NEW-ORIG; d. winter, NEW-ORIG; unit: %)

但是,在热带地区尤其是热带印度洋到热带西太平洋的模拟还存在较大的差距(图略),这可能是由于该地区下垫面海温模拟偏低,以及模拟的深积云对流上升运动太弱,造成该地区对流云尤其是高云模拟得不好。应当指出,对热带印度洋到热带西太平洋地区的云量及其降水模拟不好是当今模式模拟共同存在的问题<sup>[29]</sup>,说明模式在模拟这种很强的海气耦合现象上还存在明显的不足。

### 3.3 云量的垂直结构

将云顶气压低于 440 hPa, 440~680 hPa 以及高于 680 hPa 的云量分别定义为高、中、低云<sup>[16]</sup>。分析表明,云量方案改进后,中低云的改变最为显著,而高云的变化不大(图略)。云量方案改进后,与 ERA 资料相比,高云差距最为明显,尤其是在前面提到的赤道印度洋到赤道西太平洋一带模拟的高云量明显偏少(图略),这也说明了总云量在该地区的模拟差距可能主要是由于高云模拟得不好造成的。

从纬向平均云量的垂直分布上也可以看出(图 3),原方案对云量垂直分布的描述十分粗糙,对中高纬的低云量中心未能很好模拟,此外,热带对流层上部的高云量的模拟也存在较大误差。改进方案在低云量的模拟上有了明显的进步,这也是大洋东岸、夏

半球副热带到中纬度海洋上空总云量模拟改进的主要原因。

## 4 辐射的模拟

为了更清楚地了解两种云量方案在辐射模拟以及云在辐射传输中所起的作用,我们将辐射分解为晴空辐射和云辐射强迫两部分,其中云辐射强迫定义为有云时和晴空时辐射通量的差<sup>[30]</sup>。

### 4.1 云辐射强迫

一般来说,云对短波辐射主要起到反射作用,因此云的短波辐射强迫为负值;而云对长波辐射有很强的吸收作用,同时以较低的云顶温度向外发射长波辐射,因此云的长波辐射强迫为正值。而对气候变化有重要作用的净的云辐射强迫,在各个层次不尽相同,取决于长波和短波云辐射强迫之差。从 ERA 的结果分析来看,大气顶净的云辐射强迫主要为负值,且高值区主要位于热带和夏半球的中纬度地区,说明云对地气系统总体上起到降温作用,这与一些研究的观点一致<sup>[31,32]</sup>。地表的情况比较类似,但与大气顶不同的是,在冬半球的中纬度地区(60°纬度附近),由于太阳入射辐射减少,在这些地区的地表云的长波云辐射强迫较大,出现了较明显的正

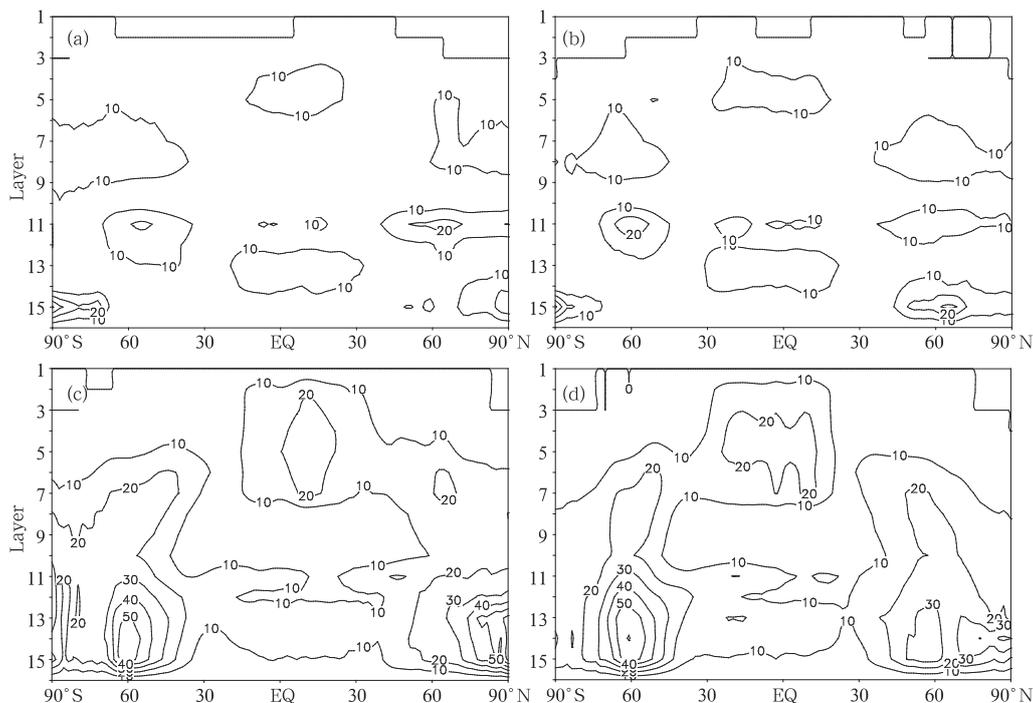


图3 模拟云量的纬度-高度剖面

(a. 夏季 ORIG, b. 冬季 ORIG, c. 夏季 NEW, d. 冬季 NEW; 单位: %)

Fig. 3 Latitude-height cross section of simulated cloud cover

(a. summer, ORIG, b. winter, ORIG, c. summer, NEW, d. winter, NEW; unit: %)

的净云辐射强迫。

#### 4.2 短波辐射

由于太阳入射角随纬度的变化, 太阳短波辐射呈中低纬高、两极低的分布形势, 并且高值中心位于夏半球。相对于 ERA 再分析场, 原方案模拟的短波辐射普遍偏高, 最大偏高中心主要位于热带地区和夏半球的副热带到中纬度地区(纬度  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ , 尤其是海洋上空)(图略), 显然, 这与该地区云量模拟不好有很大关系; 此外, 在夏季的北极地区模拟也明显偏高, 这部分是由于云量模拟的偏差, 但更主要可能是由于模式对该地区海冰及积雪的模拟不好造成的。云量方案改进后, 短波辐射的模拟有了明显的改善, 尤其是在两大洋东岸、副热带到中纬度地区的海洋上, 这与这些地区低云量模拟的改善紧密联系, 云量模拟的改进使得这些地区的短波云辐射强迫的模拟偏差明显减小(图 4)。因为低云以反射太阳辐射、冷却地球为主, 云量的增加使得到达地表的短波辐射减少, 而大气顶反射回太空的短波辐射增加。值得注意的是两大洋东岸低云模拟的改善可能对海洋的模拟产生重要影响, 因为该地区低层云和海温之间存在明显的正反馈, 可能影响海洋气候态的模拟<sup>[11, 12]</sup>。

晴空短波辐射的模拟也对短波辐射的模拟偏差有重要贡献(图 5), 有两点值得注意: 一是夏季的北极地区、欧亚大陆北部和阿拉斯加地区、以及冬季南极大陆沿海, 海冰模拟得较差, 造成该地区地表对短波辐射的异常吸收, 而大陆积雪模拟得过多, 导致过量的短波辐射被反射, 反映了冰雪-反照率反馈的巨大作用; 二是非洲撒哈拉沙漠及其周边地区, 由于本文模式没有考虑气溶胶(尤其是沙尘气溶胶)对辐射的影响<sup>[33]</sup>, 导致该地区到达地表的短波辐射偏高, 造成地表对短波辐射的异常吸收, 这导致该地区尽管云短波辐射强迫偏差较小, 但短波辐射仍出现了较大偏差。

#### 4.3 长波辐射

云对长波辐射具有很强的吸收能力, 因此长波辐射的模拟与云量的模拟紧密关联。分析 ERA 给出的长波辐射分布特征, 长波辐射的最大值区域主要位于副热带的少云地区, 而云量多的地方长波辐射也小(大气顶和地表均是如此)。

由于高云对地表长波辐射有很强的截留作用, 同时以较低的云顶温度向外射出长波辐射, 大气顶的长波辐射偏差主要来自高云的模拟误差。原方案大气顶长波辐射的最大差值出现在高云模拟明显偏

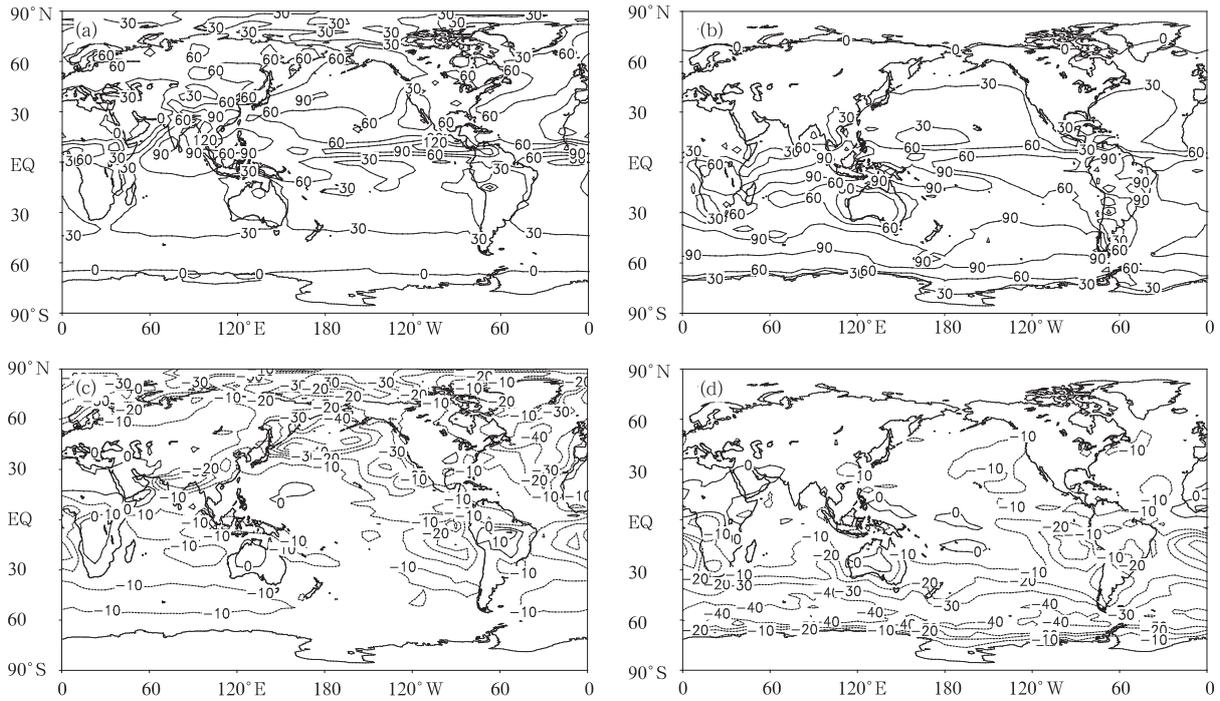


图 4 大气顶短波云辐射强迫差值

(a. 夏季, ORIG-ERA, b. 冬季, ORIG-ERA, c. 夏季, NEW-ORIG, d. 冬季, NEW-ORIG; 单位:  $W/m^2$ )

Fig. 4 Top of air shortwave cloud radiative forcing differences

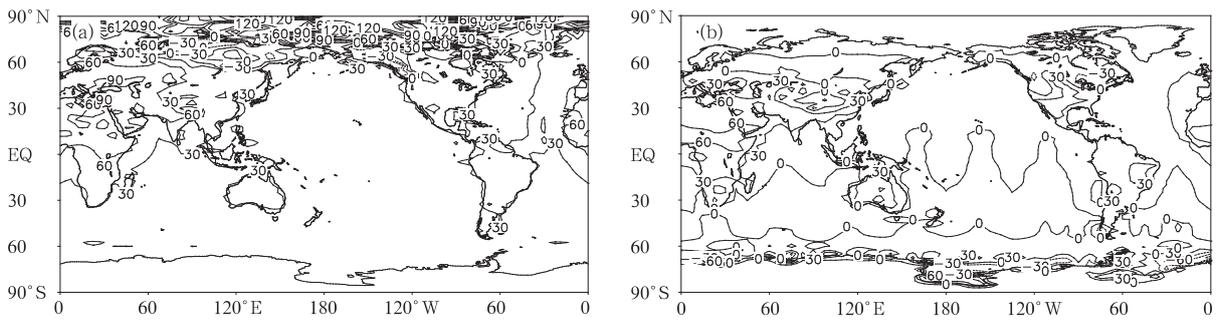
(a. summer, ORIG-ERA, b. winter, ORIG-ERA, c. summer, NEW-ORIG, d. winter, NEW-ORIG ; unit:  $W/m^2$ )

图 5 地表晴空短波辐射差值场(NEW-ERA)

(a. 夏季, b. 冬季; 单位:  $W/m^2$ )

Fig. 5 Surface clear-sky shortwave radiation differences

(a. summer, b. winter; unit:  $W/m^2$ )

少的热带印度洋至西太平洋一带,模拟的长波辐射明显偏高。改进方案对大气顶长波辐射的模拟没有明显的改善,主要是由于在该地区高云模拟变化较小。

而对于地表长波辐射,更多受到低云对地表长波辐射的反射和吸收影响。原方案模拟的地表长波辐射偏高,且偏差大于  $30 W/m^2$  的地区占很大比重。云量方案改进以后,这种偏差明显减少,尤其是在低云模拟明显改进的大洋东岸、副热带到中纬度的海洋地区,长波辐射的模拟有了明显改进。这是

由于这些地区上空云量的增加,导致其上云层向下放射以及反射的向下长波辐射增加,长波云辐射强迫增强的缘故(图 6)。此外,云量变化后引起的长波辐射的变化也可能部分反映了云量和海温之间的反馈作用,云量的增加将反射更多的太阳辐射,海洋因吸收的太阳辐射减少而降温<sup>[34]</sup>,导致地表射出的长波辐射减小,从而减小了长波辐射模拟的偏差。但应看到,在热带印度洋和西太平洋地区地表长波辐射偏高仍十分明显,这主要是其上云量模拟较差

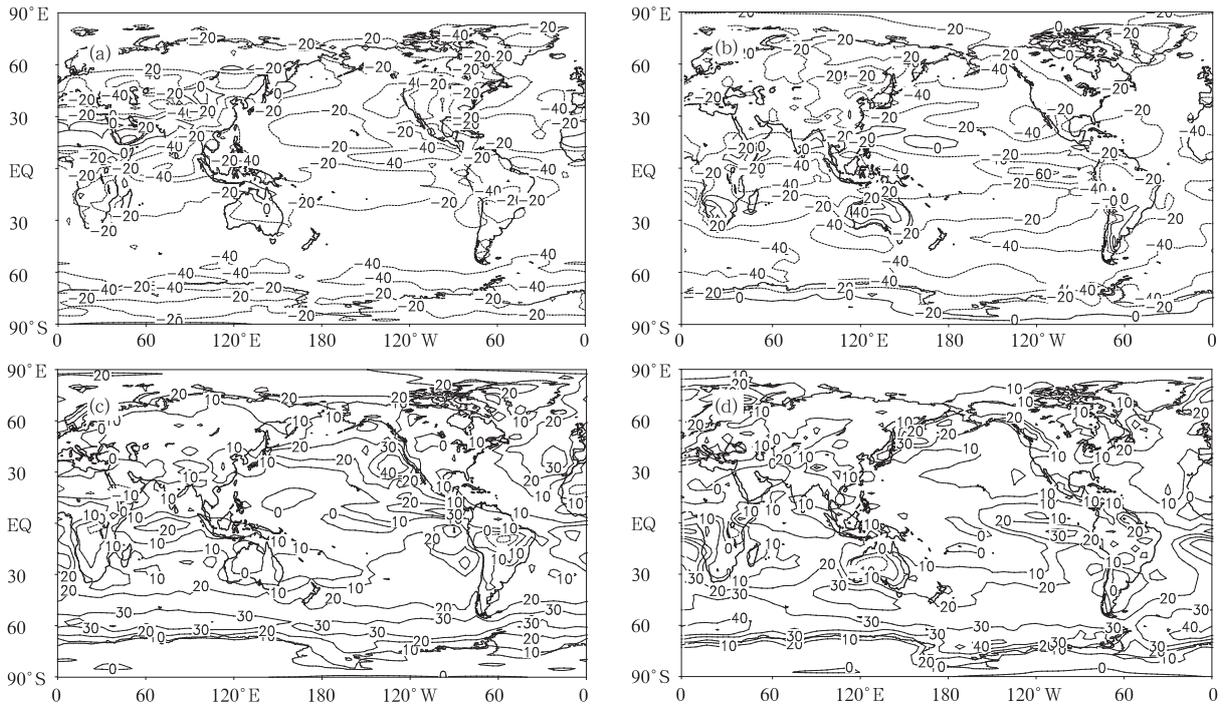


图6 地表长波辐射差值场

(a. 夏季, ORIG-ERA, b. 冬季, ORIG-ERA, c. 夏季, NEW-ORIG, d. 冬季, NEW-ORIG 单位:  $W/m^2$ )

Fig. 6 Surface long wave radiation differences

(a. summer, ORIG-ERA, b. winter, ORIG-ERA, c. summer, NEW-ORIG, d. winter, NEW-ORIG; unit:  $W/m^2$ )

的原因。

总的说来,模拟的长波辐射要明显好于短波辐射,其偏差要比短波辐射小得多,这可能随之产生净辐射模拟的较大偏差。

#### 4.4 净辐射

相对于短波辐射和长波辐射,我们更关心净辐射,因为它直接影响了大气的非绝热加热场的分布,进而影响大气环流。分析 ERA 净辐射的分布,无论地表还是大气顶,正的净辐射收支均主要出现在热带和夏半球的中纬度地区,地表的正辐射收支要比大气顶大得多,约为两倍;而负的净辐射收支在地表和大气顶不尽相同,地表主要出现在冬半球的中高纬地区,大气顶几乎在整个冬半球以及夏半球的极地均表现为负值(图略)。

对于大气顶净辐射(图7),原方案模拟得明显偏高,尤其在热带及夏半球的副热带到中纬度地区更为明显,综合前面短波辐射和长波辐射的分析结果,净辐射的偏差主要是由于短波辐射较长波辐射偏差更大引起的。云量方案改进后,模拟的净辐射在大洋东岸、夏半球副热带到中纬度海洋上有了明显改进,这主要是由于这些地区低云的改进明显改

善了短波云辐射强迫的模拟,而长波云辐射强迫主要取决于高云的模拟,相对变化较小。

地表的净辐射有着与大气顶净辐射相似的变化,唯一不同的是,地表长波辐射受到低云的较大影响,云量变化后,在短波云辐射强迫改善的同时,长波云辐射强迫也有相应的改善,只不过变化幅度相对较小。由于长波和短波云辐射强迫的变化符号相反,在一定程度上削弱了短波云辐射强迫的改善,因此在上述低云明显改善的地区,地表净辐射的改善不如大气顶明显。

#### 5 云对辐射加热率的影响

考虑到水汽对辐射加热的影响,辐射加热率的计算可以表示为

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{rad}} = \frac{g\partial F}{c_p\partial p} \quad (5)$$

$c_p = c_{p\text{dry}} [1 + (c_{p\text{vap}} - c_{p\text{dry}})q/c_{p\text{dry}}]$ , 为湿空气的定压比热;  $c_{p\text{dry}}$  和  $c_{p\text{vap}}$  分别为干空气和水汽的定压比热;  $F$  为净辐射通量。

对模拟的辐射加热率的分析表明(图8,仅给出改进方案结果),模拟的长波降温率要明显大于短波

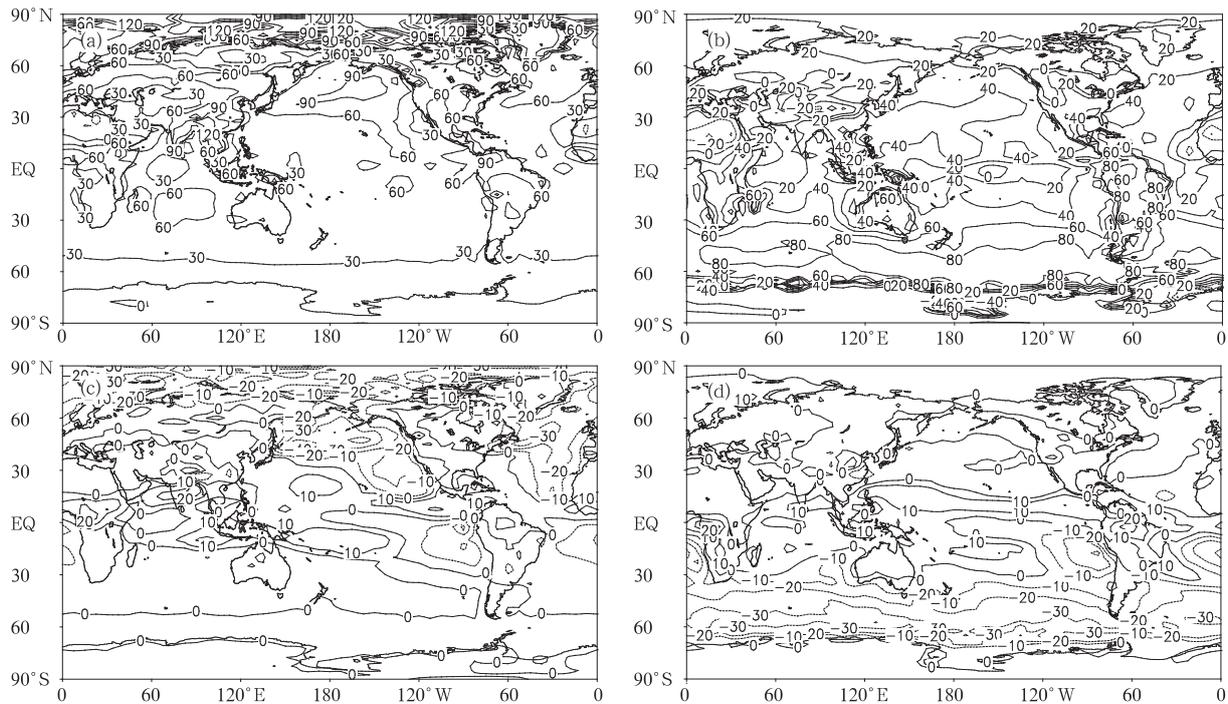


图 7 大气顶净辐射差值

(a. 夏季,原方案-ERA,b. 冬季,原方案-ERA,c. 夏季,改进方案-原方案,d. 冬季,改进方案-原方案;单位:  $W/m^2$ )

Fig. 7 Top of air net radiation differences

(a. summer, ORIG-ERA, b. winter, ORIG-ERA, c. summer, NEW-ORIG, d. winter, NEW-ORIG; unit:  $W/m^2$ )

加热率。长波降温率最大值中心主要位于中低纬对流层中部,而短波加热率的最大值主要位于平流层,这主要是臭氧对太阳辐射强烈吸收的结果,此外,热带对流层中部也有一个次大值中心。净辐射加热率在整个模式层均为负值,这显然不合理<sup>[35]</sup>,这也从一个侧面说明了模式大气对短波辐射过于透明。

一般说来,云和辐射加热率的关系主要表现在,长波辐射使云的下部增温,云的上部降温,而云由于对太阳辐射有强烈的散射和吸收,天空有云时云的上部吸收太阳辐射而加热,由于云的反射作用,云下的加热明显下降<sup>[35]</sup>。通过比较晴空和全天条件下的辐射加热率,并结合云量的垂直分布,很好地验证了以上观点,只是由于模式模拟的云对短波辐射的吸收和散射过弱,导致短波辐射加热率的变化较小(图略)。

云量方案改进后,相应于云量发生的变化,辐射加热率尤其是长波辐射降温率发生了明显的变化(图 9)。由于中高纬低层云量变化较大(图 3),在其下部的近地面层,长波辐射造成了明显的增温,而在其上部则为明显的降温;同样,由于云对短波辐射的散射和吸收模拟不好,辐射加热率的变化不显著,但

基本的变化趋势还是模拟出来了(图略)。

## 6 结论和讨论

本文利用 NCC/IAP T63 海气耦合模式进行了 20 a 积分,详细分析了其对云辐射过程的模拟性能。考虑到模式对云量模拟存在的较大缺陷,对云量方案进行了改进。研究得出以下主要结论:

(1) 模式原方案对总云量的分布具有一定的模拟能力。通过对云量方案的改进,明显改进了两大洋东岸、以及夏半球副热带到中纬度海洋上空(纬度  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )低云的模拟。改进方案在热带地区尤其是赤道印度洋到西太平洋一带的总云量模拟还存在较大的差距,主要是由于模式对该地区深积云对流模拟不好,造成该地区高云的模拟存在较大的误差。

(2) 模式对长波辐射的模拟要明显好于短波辐射。短波辐射模拟偏差的主要原因在于模式模拟的短波云辐射强迫过小,此外,未考虑气溶胶对短波辐射的吸收、以及海冰和积雪的模拟偏差造成的反照率效应也是一个重要原因。长波辐射模拟的差距主要是云量以及下垫面温度模拟的不足造成的。

(3) 相应于两大洋东岸、夏半球副热带到中纬度

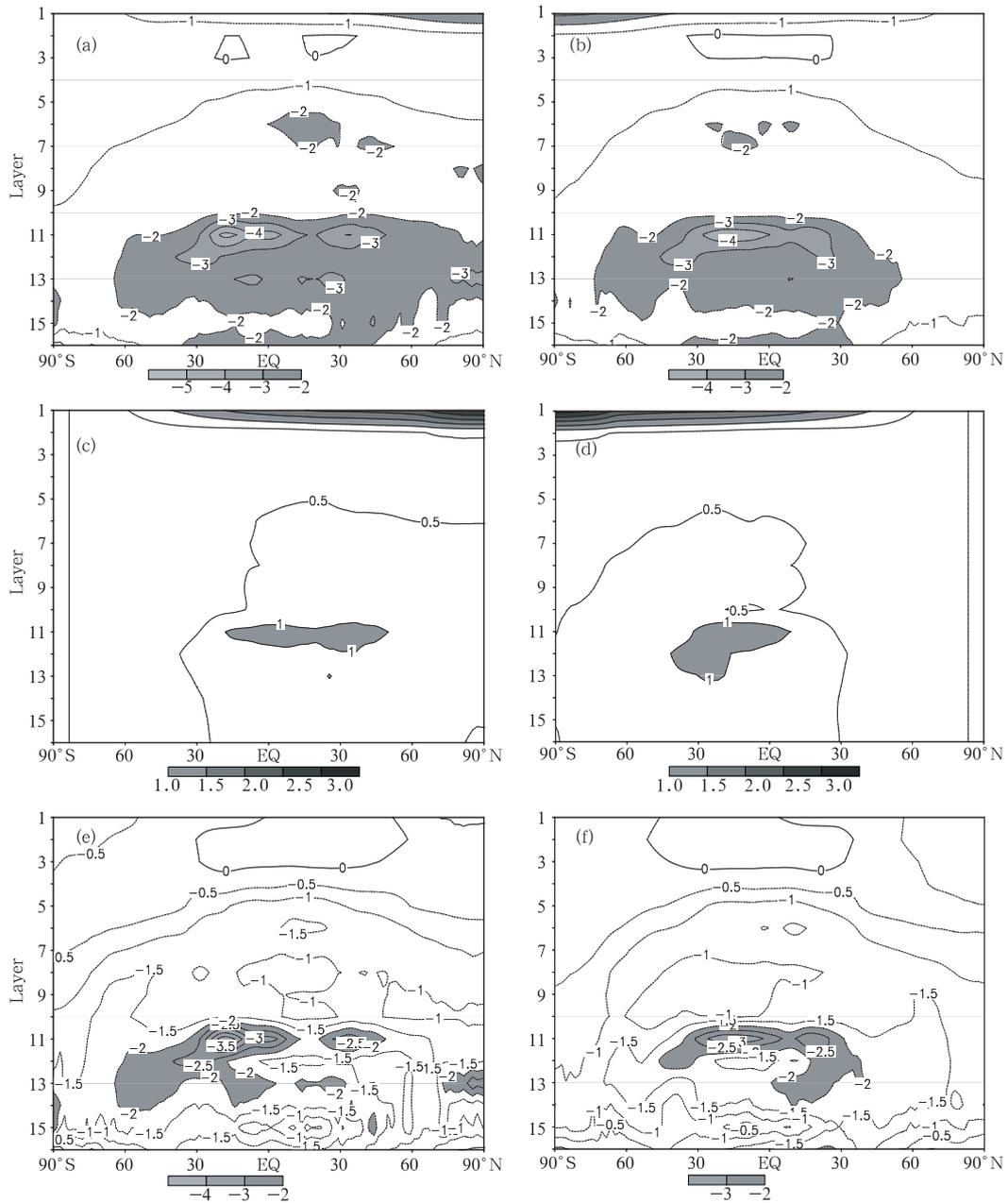


图8 NEW模拟的辐射加热率的纬度-高度剖面

(a. 夏季长波辐射降温率, b. 冬季长波辐射降温率, c. 夏季短波辐射加热率, d. 冬季短波辐射加热率, e. 夏季净辐射变温率, f. 冬季净辐射变温率; 单位: K/d)

Fig. 8 Latitude-height cross section of radiative heating rate simulated by NEW

(a. long wave for summer, b. long wave for winter, c. short wave for summer, d. short wave for winter, e. net radiation for summer, f. net radiation for winter; unit: K/d)

海洋上空低云模拟的明显改善,云辐射强迫的模拟得到了明显的改进,这也造成了这些地区的净辐射模拟得到了明显改进。由于地表的长波云辐射强迫较大气顶变化更为显著,这部分抵消了地表短波云辐射强迫的改进,因此,地表净辐射的改进要小于大气顶。

(4) 云对辐射加热率具有明显的影响。云量方案改进后,给长波辐射降温率带来了显著的变化,但由于模式大气对短波辐射过于透明,短波辐射增温率变化不大。

云和辐射之间存在着复杂的反馈过程,除了云量以外,云还可以通过一系列微物理光学性质(如云

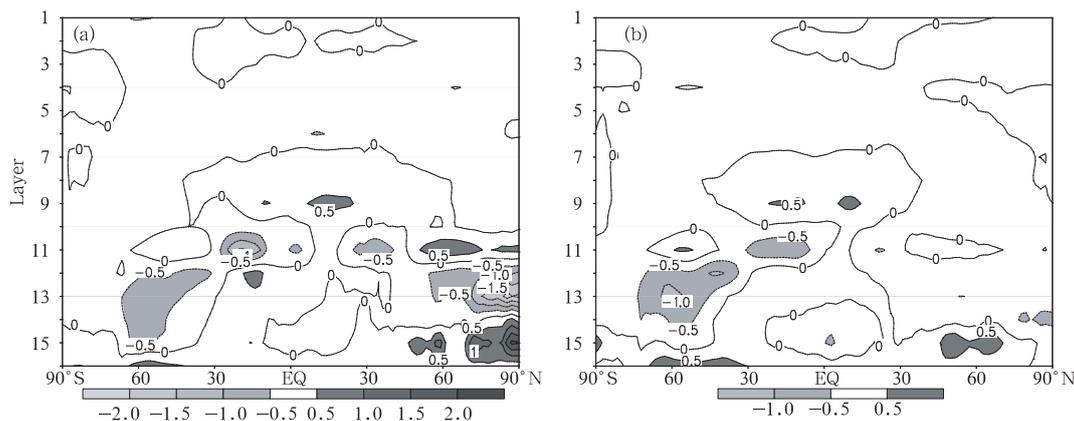


图 9 长波辐射降温率变化的纬度-高度剖面(NEW-ORIG)

(a. 夏季, b. 冬季; 单位: K/d)

Fig. 9 Latitude-height cross section of change in longwave cooling rate(NEW-ORIG)

(a. summer, b. winter; unit: K/d)

水含量, 光学厚度, 云粒子有效半径等) 对辐射产生重要影响<sup>[36]</sup>。在本文的辐射参数化方案中, 对这些微物理性质的参数化仍然是较为薄弱的环节, 这也是本文云辐射强迫模拟仍存在较大差距的一个重要原因。此外, 提高海洋模式的模拟能力, 尤其是改进海温和海冰的模拟, 也是提高云辐射模拟能力的一个重要途径。最后需要指出的是, 由于本文采用的模式验证资料(ERA-40)本身还存在较大的不确定性, 对本文的结论应谨慎对待。

## 参考文献

- [1] Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. *J Geophys Res*, 1990, 95: 16601-16615.
- [2] Cess R D, Zhang M H, Ingram W J, et al. Cloud feedback in atmospheric general circulation models: An update. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12791-12794
- [3] IPCC, Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Contribution of Working Group I to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 365pp
- [4] IPCC, Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, et al. eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 572pp
- [5] IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Houghton J T, Ding Y H, et al. eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881pp
- [6] 刘洪利, 朱文琴, 宜树华等. 中国地区云的气候特征分析. *气象学报*, 2003, 61(4): 466-473  
Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, et al. Climatic analysis of the cloud over China. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2003, 61(4): 466-473
- [7] 曾昭美, 章名立. 本世纪海洋云量变化与全球变暖问题. *大气科学*, 1996, 20(2): 149-158  
Zeng Zhaomei, Zhang Mingli. Variation of ocean cloud amounts in 20th century and the global warming. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 1996, 20(2): 149-158
- [8] 李昉英, 宇如聪, 徐幼平等. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析. *气象学报*, 2003, 61(6): 733-743  
Li Yunying, Yu Rocong, Xu youping, et al. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2003, 61(6): 733-743
- [9] Yu R C, Yu Y Q, Zhang M H. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(6): 1090-1102
- [10] Yu R C, Wang B, Zhou T J. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau. *J Climate*, 2004, 17(13): 2702-2713
- [11] Yu J Y, Mechoso C R. Links between annual variations of Peruvian stratocumulus clouds and of SSTs in the eastern equatorial Pacific. *J Climate*, 1999, 12: 3305-3318
- [12] Mechoso C R, Robertson A W, Barth N, et al. The seasonal cycle over the tropical Pacific in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 2825-2838
- [13] Zhou T J, Li Z X. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM. *Climate Dynamics*, 2002, 19: 167-180
- [14] Wetherald R T, Manabe S. Cloud feedback processes in a general circulation mode. *J Atmos Sci*, 1988, 45(8): 1397-

- 1415
- [15] Mitchell J F B, Ingram W J. Carbon dioxide and climate-mechanisms of changes in cloud. *J Climate*, 1992, 5: 5-21
- [16] Rossow W B, Schiffer R A. ISCCP cloud data products. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 72: 2-20
- [17] Ramanathan V, Harrison E F, Barkstrom B R. Climate and the Earth's radiation budget. *Physics Today*, 1989, 42, (5): 22-33
- [18] Ackerman T P, Stokes G M. The atmospheric radiation measurement program. *Physics Today*, 2003, 56: 38-44
- [19] 丁一汇, 倪允琪, 张学洪等. 我国短期气候预测系统的研究之二: 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 500pp  
Ding Yihui, Ni Yunqi, Zhang Xuehong, et al. Development of Operational Dynamical Model for Short-term Climate Prediction. Beijing: China Meteorological Press, 2000. 500pp
- [20] 徐影. 人类活动对气候变化影响的数值模拟研究: [学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2002  
Xu Ying. A study of numerical simulation of impact of human activities on climate change: [dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science. 2002
- [21] 丁一汇, 李清泉, 李维京等. 中国业务动力季节预报的进展. *气象学报*, 2004, 62(5): 598-612  
Ding Yihui, Li Qingquan, Li Weijing, et al. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China. *Acta Meteor Sinica(in Chinese)*, 2004, 62(5): 598-612
- [22] 沈元芳, 伊兰, 陈谊等. 辐射参数化的变化对模式预报的影响. 见: 我国短期气候预测系统的研究, 之二: 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 79-89  
Shen Yuanfang, Yi Lan, Chen Yi, et al. Change in radiation parameterization's impact on model forecast. In: Development of Operational Dynamical Model for Short-term Climate Prediction. Beijing: China Meteorological Press, 2000. 79-89
- [23] 国家气象中心编译. 资料同化和中期数值预报. 北京: 气象出版社, 1991. 436pp  
National Meteorological Center. Data Assimilation and Medium-term Numerical Forecast. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 436pp
- [24] 董敏, 耿全震, 梁益国等. 气候模式的基本原理和技术方法. 北京: 气象出版社, 1997. 177pp  
Dong Min, Geng Quanzhen, Liang Yiguo, et al. Fundamental Principle and Technical Method of Climate Model. Beijing: China Meteorological Press, 1997. 177pp
- [25] 董敏主编. 国家气候中心大气环流模式—基本原理和使用说明. 北京: 气象出版社, 2001. 152pp  
Dong Min. Fundamental Principle and Operating Instruction of NCC AGCM. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 152pp
- [26] Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16 (2): 197-215
- [27] Klein S A, Hartmann D L. The seasonal cycle of low stratiform clouds. *J Climate*, 1993, 6(8): 1587-1606
- [28] 赵其庚编著. 海洋环流及海气耦合系统的数值模拟. 北京: 气象出版社, 1999. 164-167  
Zhao Qigeng. Numerical Simulation of Ocean Circulation and Atmosphere-Ocean System. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 164-167
- [29] Kang I S, Jin K, Wang B, et al. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs. *Climate Dyn*, 2002, 19: 383-395
- [30] Ramanathan V. The role of Earth radiation budget studies in climate and general circulation research. *J Atmos Sci*, 1987, 37: 447-454
- [31] Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment. *Science*, 1989, 243: 57-63
- [32] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射(I): 云气候学和云的辐射作用. *大气科学*, 1994, 18(增刊): 910-932  
Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. Cloud and radiation I: cloud climatology and radiative effects of clouds. *Scientia Atmospherica Sinica(in Chinese)*, 1994, 18(suppl): 910-932
- [33] Miller R L, Tegen I. Climate response to soil dust aerosols. *J Climate*, 1998, 11: 3247-3267
- [34] Ramanathan V, W Collins. Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Niño. *Nature*, 1991, 351: 27-32.
- [35] 尹宏编著. 大气辐射学基础. 北京: 气象出版社, 1993. 268pp  
Yin Hong. Theoretical Basis of Atmospheric Radiation. Beijing: China Meteorological Press, 1993. 268pp
- [36] 汪方, 丁一汇. 气候模式中云辐射反馈过程机理的评述. *地球科学进展*, 2005, 20(2): 207-215  
Wang Fang, Ding Yihui. An evaluation of cloud radiative feedback mechanisms in climate models. *Advances in Earth Sci(in Chinese)*, 2005, 20(2): 207-215

## CLOUD AND RADIATION PROCESSES SIMULATED BY A COUPLED ATMOSPHERE-OCEAN MODEL

Wang Fang

*(Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081)*

Ding Yihui Xu Ying

*(National Climate Center, Beijing, 100081; Nanjing University of Information Science Technology, Nanjing 210044;  
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)*

### Abstract

Using NCC/IAP T63 atmosphere-ocean coupled model, a 20 years' integration was processed, and its capability to simulating cloud and radiation was also analyzed in detail. The results show that the model can simulate the basic distribution of cloud cover, however obvious differences still exist compared to ISC-CP satellite data and ERA reanalysis data. The simulated cloud cover is less in general, especially the abnormal low values in some regions of ocean. By improving the cloud cover scheme, simulated cloud cover in eastern ocean, summer hemisphere's ocean from subtropical to mid-latitude is considerably improved. But in tropical Indian Ocean and west Pacific the cloud cover difference is still evident, which is mainly caused by the deficiency of high cloud simulation in these regions caused by deep cumulus convection. In terms of the analysis to radiation and cloud radiative forcing, it was found that simulation on long wave radiation is better than short wave. The simulation error of short wave radiation is caused mostly by the simulation difference in short wave radiative forcing, sea ice and snow cover, and also by not involving aerosol's effect. The simulation error of long wave radiation is mainly resulted from deficiency in simulating cloud cover and underlying surface temperature. Corresponding to improvement of cloud cover, simulated radiation (especially short wave radiation) in eastern ocean, summer hemisphere's ocean from subtropical to mid-latitude is remarkably improved. This also brings obvious improvement to net radiation in these regions.

**Key words:** Atmosphere-Ocean Model, Cloud and radiation, Cloud radiative forcing, Cloud cover scheme.