

文章编号: 1001-8166(2005)02-0207-09

# 气候模式中云辐射反馈过程机理的评述\*

汪方<sup>1,2</sup>, 丁一汇<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;  
3. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

**摘要:**云对地气系统的辐射收支具有十分重要的作用,云辐射参数化是目前气候模式中不确定性的主要来源。云可以通过多种途径对辐射产生影响,形成不同符号、不同量值的反馈机制。研究表明,模式气候对不同的云辐射参数化方案十分敏感。预报云水含量方案的引入,改进了对云辐射过程的模拟,但与观测资料相比仍有差距。一般说来,模式中引入云水的相变和相互作用的云粒子大小产生负反馈,而光学厚度和云量产生的是正反馈。云辐射反馈的净作用其大小和符号因模式而异。云辐射与大尺度天气气候背景之间有着紧密的联系,尤其是海温对辐射平衡有显著影响。最后总结了当前云辐射研究中存在的主要问题,并提出了改进的途径。

**关键词:**气候模式;云辐射反馈;参数化

**中图分类号:** P46 **文献标识码:** A

## 0 引言

云覆盖了地球约 2/3 的面积,在地气系统的辐射收支中起着重要的作用。一方面,云能够吸收和散射太阳短波辐射,对地气系统起到降温作用;另一方面,云能有效地吸收地表和云下大气放射的红外长波辐射,并以云顶较低的温度向外发射长波辐射,对地气系统起到保温作用。云对辐射的影响通常用云辐射强迫 (CRF)<sup>[1,2]</sup> 来表示,一般说来,云的长波辐射强迫是正的,会增加地气系统吸收的能量,而云的短波辐射强迫是负的,云的存在使得地气系统吸收的太阳辐射减少。对气候变化起关键作用的云的净辐射强迫在全球来说有正有负,但当前气候条件下全球平均的云净辐射强迫是负的,对地气系统起到冷却作用<sup>[3]</sup>。

云辐射过程的空间尺度通常要小于当前气候模式所能达到的最高分辨率,在气候模式中必须对其进行参数化。云辐射参数化包括云的参数化和辐射参数化,两者虽然在气候模式中分开进行处理,但有着紧密联系。云参数化主要用于产生云,并为辐射

参数化提供必要的云参数,而辐射参数化以晴空大气的辐射传输理论为基础,在考虑云辐射影响的情况下,计算地气系统辐射收支及其辐射加热率,而地气系统加热场的改变,又反过来改变下垫面热状况和大气环流,影响云的生成。

从云辐射相互作用的角度来看,云及其辐射性质的参数化大致经历了 3 个阶段:一是早期模式根据气候观测资料将云量设定为固定的值<sup>[4]</sup>,该方法只考虑了云对辐射的平均气候效应,没有考虑云和辐射之间的相互作用;二是诊断云方案阶段,即用大尺度变量(相对湿度、垂直速度和大气稳定度参数)来表征云的形成<sup>[5]</sup>,主要考虑了云的宏观性质(云量和云高)和辐射之间的反馈作用,而云的微物理辐射性质(如光学厚度、反照率、发射率等)仍由观测经验给出;三是预报云方案阶段,将云水含量作为和其它大尺度变量一样的预报变量,主要是为了更好地对云和降水中的微物理过程进行参数化,以及在模式中考虑云的微物理性质和辐射之间的相互作用<sup>[6-8]</sup>。

云和辐射之间的相互作用十分复杂,可以通过

\* 收稿日期: 2004-01-29; 修回日期: 2004-06-28

\* 作者简介: 汪方 (1974-), 男, 湖北宜昌人, 博士研究生, 主要从事海气耦合模式云辐射参数化敏感性研究. E-mail: wf\_jason@sina.com

多种方式产生反馈机制(图 1),因此,在气候模式中对云辐射过程进行合理的参数化对于气候变化的模拟十分重要。大量研究表明,模式气候对云辐射参数化的响应十分敏感,IPCC 最近的 3 次评估报告<sup>[9-11]</sup>指出,云辐射参数化是制约当前气候模式模拟水平的关键因素,是模式不确定性的主要原因。对于不同的云辐射参数化方案,不同模式给出的气候敏感性的差异可以达到 3 倍的量级<sup>[12-14]</sup>。

随着近几十年来观测技术的发展,云辐射观测资料的数量和质量都有了较大提高,这在很大程度上增强了对云辐射反馈过程的认识,极大地推动了气候模式云辐射参数化的发展。但同时应该看到,当前我们对云辐射反馈机制的认识还十分有限,模式对云辐射过程的模拟还存在很多问题。鉴于此,本文将对气候模式中主要云辐射反馈过程及其敏感性研究作一评述,并探讨存在的主要问题及其解决途径。

### 1 云对辐射的主要影响机制

云和辐射之间的反馈机制十分复杂,云可以通过多种途径对辐射产生影响,形成大小不一、符号相反的反馈过程(图 1)。

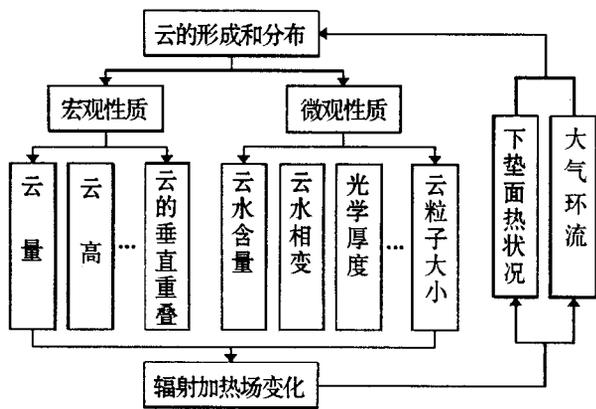


图 1 气候模式中云辐射间的主要反馈机制

Fig 1 Main cloud radiation feedbacks in climate models

#### 1.1 云量和云高

早期的云辐射参数化方案主要考虑的是云量和云高的变化,而云的辐射性质是根据不同的云型给定的。早期的辐射对流平衡模式研究指出,低云具有高反照率和相对较高的云顶温度,对气候产生净的降温作用;而高云反照率小,云顶温度相对较低,对气候产生弱降温或增温的作用。而云量对气候的总效果是降温作用<sup>[15]</sup>,这与当前的观测资料一致<sup>[3]</sup>。但不能因此推测云量越大,这种降温作用

就越强,这是因为云量的变化经常伴随着云高的变化,这也会导致地气系统的辐射平衡发生改变。

气候变化以后云量反馈对气候敏感性如何影响,研究发现云反馈过程明显增强了由于 CO<sub>2</sub>加倍引起的地球表面变暖<sup>[16,17]</sup>。这主要是由于气候变暖后对流层上部云层高度增加,云顶温度降低,向外长波辐射减小,同时对流层上部云量减小,降低了行星反照率,形成很强的高云正反馈,并在量级上远大于高纬低云的负反馈。

#### 1.2 云量的垂直重叠

在气候模式中,当有 2 个以上模式层同时有云时,必须考虑云在垂直方向的重叠。云的重叠假设有 3 种:极大重叠、随机重叠和极小重叠。还可根据不同的情况在同一个模式层中考虑不同的重叠假设,即所谓的混合重叠<sup>[18]</sup>。云重叠假定是否合适与所考虑的空间尺度有关,当空间尺度足够大,极小重叠假定可能更合适;在不相邻的 2 个层中,随机重叠可能更合适;在相邻的 2 个层中的云则更可能是极大重叠的<sup>[19]</sup>。但在所有情况下,辐射的计算都是首先在相应的云重叠假定下,对网格内每种可能的云垂直分布计算辐射通量密度,再根据各种分布在网格内所占的权重进行线性组合。

模式中采用不同的云重叠假设,其输出云的分布不同(图 2),进而影响辐射在大气中的传输以及大气辐射的加热/冷却廓线。对 ISCCP 云垂直分布资料的研究也表明,辐射通量和大气辐射加热率廓线对云垂直结构变化十分敏感<sup>[20]</sup>。不合理的云垂

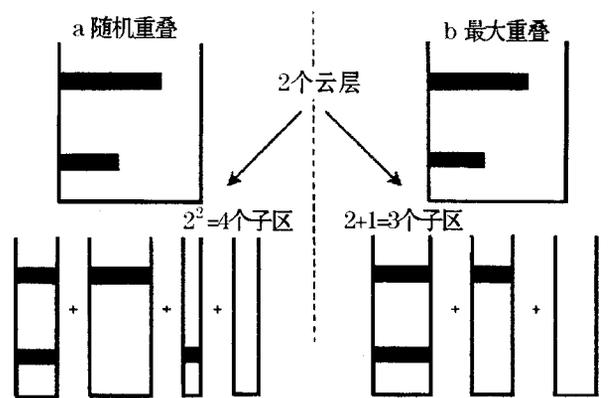


图 2 两层有云时不同云垂直重叠假设下云在格点内的可能分布

Fig 2 Schematic illustration of the distributions of the atmospheric sub-columns inside a model grid column  
a 随机重叠; b 最大重叠<sup>[18]</sup>

a the random overlap assumption, b the maximum overlap assumption

直重叠方案会显著影响云的整层光学性质,从而对辐射计算产生影响。

### 1.3 云水含量

云水含量是云的一个重要性质。由于云的辐射性质对云水含量有强烈的依赖性,尤其是这种依赖关系在气候变暖后可能会发生改变,所以必须在模式中考虑云水含量。云水含量的参数化可分为诊断和预测两种。云水含量作为预报变量的引入,明显改进了云辐射参数化的真实性,也为通过云水含量等因子确定云的辐射性质提供了可能<sup>[8,21]</sup>。

由于冰和水的折射率不同,冰晶和水滴的尺度、形状也不同,冰云和水云的辐射特性有很大差异,在模式中对之进行区分十分重要。目前主要通过温度来区分云中冰粒子和水粒子所占的比例。有研究发现,在引进冰云的处理后,模式的敏感性略有增加<sup>[21]</sup>。

云的相态变化及其所产生的反馈作用对模拟的气候状态有显著影响,在高纬地区,云的相态变化可使地气系统净辐射增加,而在热带地区使净辐射减小<sup>[22]</sup>。气候变暖以后,可能发生冰云向水云的转化,形成云水的相变反馈机制,这种反馈可能造成云量变大,短波云冷却增加,形成负反馈<sup>[21,23]</sup>。

### 1.4 云的光学厚度

云的光学厚度是云对辐射产生影响的重要参数,反映了云对通过其间辐射的削弱能力。其变化受到云水含量、云的垂直厚度、云粒子分布函数和形状等因素的影响。早期的云辐射参数化方案的光学厚度都是经验给定的。目前预报云方案中主要将云的光学厚度参数化为云水含量的函数<sup>[7]</sup>。

对于水云,许多模式考虑云的光学厚度与它的液水含量和垂直厚度成正比,同云粒子有效半径成反比<sup>[7,24]</sup>。对于冰云,情况要复杂的多,一般根据冰云的观测资料经验建立,取为冰水含量和云的厚度的函数<sup>[22]</sup>。

光学厚度随温度的变化关系十分重要。观测表明,光学厚度随温度的变化关系十分复杂<sup>[25,26]</sup>。模式对大气低云光学厚度随温度变化的研究表明,在温暖的亚热带和热带低云光学厚度随温度减小,而在冷的中纬度地区随温度增加<sup>[24]</sup>。

云的光学厚度对气候的反馈是一种正反馈<sup>[27]</sup>。研究表明,光学厚度的正反馈在低纬要强于高纬,这种纬向梯度会减小大多数气候模式模拟的温室变暖的极地加强现象<sup>[24,28]</sup>。

### 1.5 云粒子大小

云粒子大小会对云的光学厚度产生影响,从而

影响云的光学性质。云粒子的大小在云辐射参数化中一般用云滴有效半径表示,其大小取决于云滴浓度和云粒子大小分布。有效半径的确定是一件十分困难的事情,尤其对冰云粒子更是如此。云滴有效半径一般通过观测经验确定,在早期的云模式中,一般将云滴有效半径取为常数,在引入可预报的云水含量以后,主要通过云水含量来对云滴有效半径进行参数化。

云辐射参数化对是否考虑相互作用的云滴有效半径十分敏感,一般说来,引入相互作用的云滴有效半径会产生负反馈。当考虑了相互作用的云滴有效半径时,高云的光学厚度和红外发射率减小,导致地面向下的短波辐射通量和向外射出长波辐射增加<sup>[29]</sup>。

应当指出,以上提及的云的微物理光学性质(光学厚度、云粒子大小等)很大程度上依赖于观测经验确定,其物理基础比较薄弱,具有很大的不确定性,因此不能认为考虑了云的微物理光学性质就一定会改进对云辐射的模拟。

## 2 模式对云辐射参数化的敏感性研究

目前进行的这方面的研究主要分 2 类:一类是  $\pm 2\text{K}$  海温强迫试验,另一类是  $2 \times \text{CO}_2$  敏感性试验。

用海温距平作为强迫,对不同模式的模拟结果的比较发现,云反馈无论在符号还是大小上都有明显的差异,不同模式给出的模式气候敏感性最大相差高达 3 倍量级<sup>[12,13]</sup>。进一步的试验<sup>[14]</sup>发现模式间的差异有所减小,但差异仍很明显(图 3)。而海温强迫下同一模式对不同云辐射参数化方案的敏感性研究发现,模拟的当前气候的云量和辐射场对所采用的云辐射参数化方案十分敏感,预报云水含量的引入显著改进了云辐射参数化的真实性。应当指出,海温强迫方法虽然具有产生结果快的优点,但它产生的并非真实的气候敏感性,并且该方法忽略了海温的水平变化,而海温的水平变化明显会对气候敏感性产生显著影响<sup>[7,21]</sup>。

在  $2 \times \text{CO}_2$  气候敏感性试验中,在仅改变模式中云辐射反馈机制(主要为是否考虑云的微物理过程和光学厚度反馈)的情况下,地球平均表面温度变化的范围为 1.9 ~ 5.4,其中相对湿度方案最高(5.4),而采用相互作用的云水和云辐射属性的方案只有 1.9,当改进了冰云的处理后,模式敏感性略有增加(2.1)。研究中发现了 2 种明显的与云水方案有关的云反馈过程:一是相对于冰云增加液水云量

会产生强烈的负反馈,降低地气系统的变暖;二是引入云微物理辐射性质的参数化会导致进一步的负反馈<sup>[21]</sup>。Yao等<sup>[23]</sup>在其研究中发现,当使用诊断云方案和固定的光学厚度时,全球表面气温变化为 3.55;当引入新的湿对流参数化方案和大尺度预报云方案后,温度变化降至 3.09;当不考虑光学厚度反馈时,温度变化进一步减至 2.74,表明光学厚度反馈是正确的;当没有砧云时,温度变化由 3.09 增至 3.7,说明砧云大的光学厚度减小了气候敏感性。

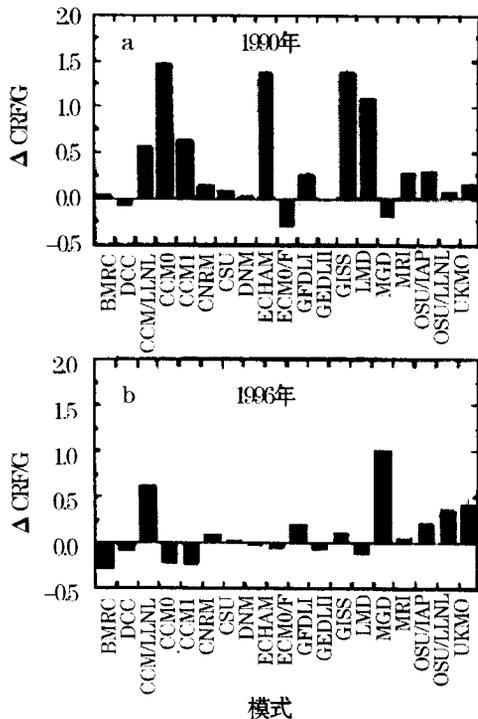


图 3 不同模式模拟的云反馈参数 ( $\Delta \text{CRF/G}$ )  
a 1990年; b 1996年<sup>[14]</sup>

Fig 3 Cloud feedback parameters ( $\Delta \text{CRF/G}$ )  
produced by different GCMs

总的说来,模式对云辐射参数化方案的选择十分敏感,不同的云辐射反馈所产生的气候敏感性其符号和大小都有较大差异,并且各种反馈的净作用的符号和大小也很难确定。通过不同云辐射参数化方案与观测资料的比较发现,显式计算云水含量和采用相互作用的辐射性质的方案具有更接近实际观测的潜力<sup>[30,31]</sup>,但我们还无法肯定哪种方案更加接近于现实,这也是当前云辐射参数化研究中的最大困境。

### 3 云辐射过程与大尺度天气气候背景的关系

云通过对辐射的影响可以改变下垫面热力状况

和大气内部辐射加热/冷却廓线,从而对大气环流产生重要影响。云的长波辐射强迫对大气环流的影响的研究发现,热带对流层上层云的主要作用是加热热带上部对流层,导致副热带急流加速,而低层云的冷却作用使对流层下层变得更加不稳定,触发更多的对流,导致哈得莱 (Hadley) 环流加强<sup>[32]</sup>。云辐射对大气环流的影响主要是由于云辐射和对流的相互作用引起的,与对流层上层云相联系的积云对流对对流和大尺度环流有很强的影响<sup>[33]</sup>。通过云辐射对季风影响的研究,证实了加热场对季风环流发展的重要性:当模式包含辐射加热和对流加热时,主要的南亚和东亚季风环流都可很好地模拟出来,而一旦去掉这两种加热场,则没有任何季风系统产生<sup>[34]</sup>。而云与辐射效应会增强南亚大陆上的季风环流及其相应的垂直环流,较多的潜热反馈导致季风环流加强<sup>[35]</sup>。此外,辐射对台风也有影响,在考虑辐射过程后,模式气旋发展更早、更强,表明辐射过程对于热带气旋的初始发展和加深过程有相当重要的影响<sup>[36]</sup>。

反过来,下垫面热力条件和大气环流对于云的形成十分重要,尤其是海温对云辐射有重要影响。由于热带海洋在全球能量收支中的重要作用,热带海温和云辐射之间的关系十分重要。观测表明,热带海温可能存在着某种上限,预示着海温和大气之间可能存在某种自我调节机制。有人据此提出了温度调节器假说 (the mostat hypothesis)<sup>[37]</sup> 和虹膜假说 (iris hypothesis)<sup>[38,39]</sup>,两者均认为海温增加会导致云的变化,从而对辐射进行调整,最后反过来调节海温。两者的差别在于,前者强调太阳辐射的减少,而后者侧重于长波辐射的增加。但两者的结果是一致的,均是产生云和气候之间的负反馈,后者甚至认为这是一种很强的负反馈,会抵消甚至超过当前气候模式中所有的正反馈。这两种观点均引起了广泛的争议,但争议双方的证据都带有一定的不确定性<sup>[40~43]</sup>。

Bony等<sup>[44]</sup>研究了热带海温和大尺度环流对云辐射强迫的影响,发现在大尺度下沉区,不管海温范围如何,云量、云的光学厚度以及短波云强迫都随海温的增加而减小;而在大尺度环流维持的对流区,长波和短波云强迫强烈依赖于海温的变化,这主要是由于海温变化引起的大尺度垂直运动的变化引起的。海温分布对云反馈也有影响,研究发现,相应于不同的海温变化型态,大气的气候敏感性 (部分由于云反馈的变化引起) 有显著的不同<sup>[45]</sup>。

研究发现,云辐射变化与北半球中纬度海平面气压之间也存在一定的关系。在低压阶段,更多的太阳辐射被反射,而更多的长波辐射被截限在对流层。高低压间大气顶净的辐射通量的差其符号和大小均随季节发生变化;中纬度气候动力特征的变化会导致明显的辐射反馈<sup>[46]</sup>。

#### 4 东亚及中国地区云辐射反馈过程的研究

东亚复杂的地理条件造就了其独特的东亚季风气候特点,尤其是东亚夏季风期间出现的与众不同的大的云量,强而持续的降水,都与当地独特的云辐射相互作用过程紧密联系。很多观测研究都表明,东亚及中国地区的云辐射强迫特征表现出很强的区域差异和季节变化<sup>[47,48]</sup>,这是在对该区域气候模拟

中必须密切注意的问题。

对东亚及中国地区的气候模拟,注意力主要集中在对季风雨带的模拟能力上。总的说来,对于总体的洪涝特征,模式都能较好地把握<sup>[49,50]</sup>,但对于具体的细节,模式的模拟能力还很有限,即使对于个例的模拟也还存在明显的差距<sup>[51]</sup>。这固然有多方面的原因,但对云辐射过程模拟的差异是一个重要原因。对于不同的区域,其气候和地形特点不同,其云辐射反馈机制也有差异,对某一种云辐射参数化方案,可能较适用于某一个(或几个)区域,而对其它地区模拟较差。有研究发现,在美国有较好模拟效果的区域气候模式,当应用于东亚研究夏季风发展过程时存在明显的问题,尤其在云辐射方面需要进一步的改进(图4)。还有研究发现,将CCM3的辐射参数化方案移植到区域模式中对中国地区的模

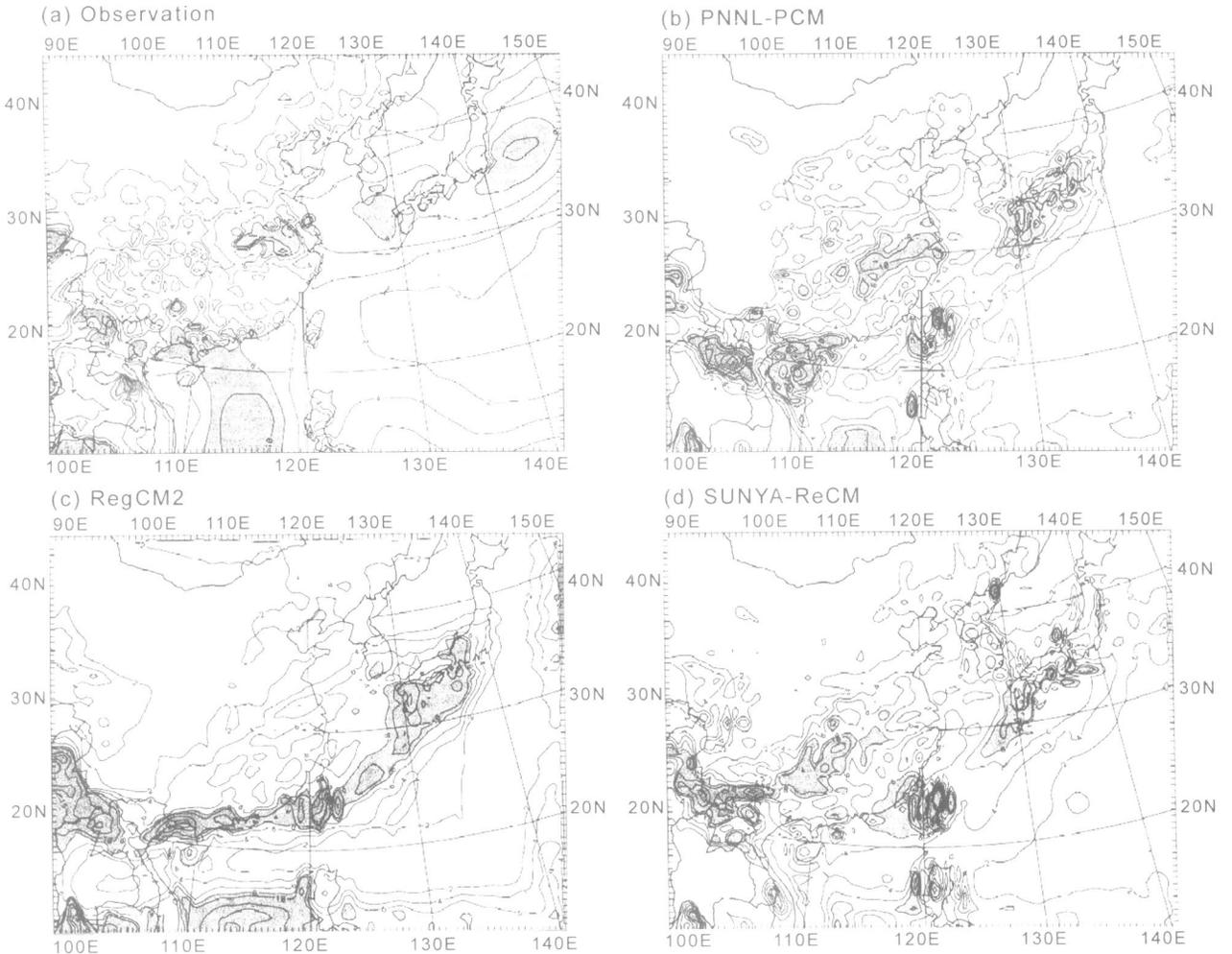


图 4 观测和模拟的 1991 年 5~7 月平均降水(单位:mm/d)

a:观测; b-d:区域气候模式模拟;阴影部分表示大于 8 mm/d 的值<sup>[51]</sup>

Fig 4 May-July averaged precipitation from (a) observations, and (b)-(d) regional model simulations (unit:mm/d). Areas with precipitation more than 8mm/day are shaded

拟具有一定的误差,这部分是由于使用的云参数化方案可能不很适合中国地区的气候特点,主要表现在高纬地区和青藏高原模拟了过多的云,而东部地区模拟的云量普遍偏少,且模拟的云量季节变化不明显。以上都说明云辐射过程表现为明显的地域特征,但当前的气候模式尤其是全球模式中一般都采用单一的云辐射参数化方案,而没有考虑同一种方案在不同地区的适用性问题。

针对东亚气候模拟中出现的问题,有人对东亚进行了多季节的模拟,发现模式有低估射出长波辐射(OLR)和高估地表太阳辐射和云量的倾向,指出在区域气候模拟中应对云辐射过程进行更为细致的研究<sup>[52]</sup>。研究发现,如能结合中国的地形环境和气候特点选择并改进云辐射方案,将有效地改进对中国辐射的模拟。

## 5 存在的主要问题

当前云辐射反馈研究中存在的首要问题是模式对不同的云辐射参数化方案十分敏感,而以我们目前的理解能力还无法确定什么样的云辐射参数化方案更加接近实际。造成这些问题的原因是多方面的,首先是模式本身的缺陷,由于当前的气候模式分辨率较低,使得模式无法对云辐射过程进行显式表征,只得进行参数化;其次,由于我们对云辐射过程(尤其是云的微物理过程)的机制的认知水平还十分有限,使得参数化缺乏必须的物理基础;最后,由于我们对云辐射的观测能力还很有限,尤其缺乏高分辨率的大范围三维云辐射资料去验证计算结果。

如何根据模式提供的云参数确定云的辐射性质是一个十分关键的问题,这也是当前云辐射参数化的难点。从理论上说,云微物理属性的引入使得模式考虑的云辐射过程更为全面。但云微物理属性的引入并不能保证云辐射过程的模拟更接近实际,这是由于我们对这些过程的物理机制知之甚少,目前主要通过观测资料给出这些过程的统计关系,具有较大的不确定性。

当前模式的云辐射参数化方案对模式的分辨率十分敏感。对不同的垂直分辨率,云量的变化幅度可达 10%,相当于观测云量的 20%,射出长波辐射和入射短波辐射也会发生显著的变化。最重要的是,模拟结果并不随分辨率的增加而收敛于观测结果,而是表现为显著的系统误差<sup>[53]</sup>。区域气候模式垂直分辨率的不同会使模拟的云结构发生变化,并对温度有明显的影

此外,通过模拟结果和观测资料的比较,模式模拟还存在以下明显的缺陷:

(1) 模式无法模拟热带地区大气顶辐射通量的时间变率<sup>[54]</sup>。

(2) 模式没能模拟出热带海洋可能存在的调节机制,即前面提到的温度调节器假说和虹膜效应。

(3) 许多气候模式低估了热带海洋层积云的存在,并且对它的季节循环也不能很好地模拟<sup>[55]</sup>。

(4) 一些模式低估了有云大气对太阳辐射的吸收,大多数模式中云对太阳辐射过于透明<sup>[56-58]</sup>,但这种观点仍有争议<sup>[59]</sup>。

## 6 结 语

经过近半个世纪的努力,气候模式云辐射参数化主要在以下几个方面取得了较大进展:

(1) 云的模拟取得了较大进步,尤其是预报云方案的引入,其物理意义更加清楚。

(2) 模式中包含了越来越多的云辐射反馈过程,尤其是引入了一些相互作用的微物理反馈机制。

(3) 模式对云辐射光学性质的处理上也越来越合理。

(4) 云辐射过程和大尺度天气气候背景之间的关系有了较深入的认识,尤其突出了海温的作用。

但如上节所述,目前云辐射参数化还存在很多问题,这主要是由于我们对云辐射反馈机制的认识还相当有限。要加强这方面的认识,需要在以下方面进一步提高:

(1) 改善云辐射观测网,尤其是加强云辐射三维结构及其微物理过程的观测。观测精度和云辐射资料的反演精度需进一步提高。

(2) 加强模式间云辐射参数化的系统比较,尤其是在当前气候条件下模式间云辐射反馈过程的比较,以及云辐射过程对气候变暖( $2 \times \text{CO}_2$ )响应的比较。这些需要在统一的框架内进行。

(3) 改进云辐射反馈分析方法。主要包括两个方面,一是如何将季节和年际时间尺度的气候变化同云辐射反馈联系起来,二是如何更好地实现云辐射反馈和其他非线性反馈过程的分离。

(4) 重点加强云辐射反馈物理机制的研究。这需要观测和模拟的紧密结合,同时要借助于其他一些手段,如针对外场观测而发展起来的单柱体模式

刘艳. 区域气候模式云—辐射参数化方案的检验和改进 [博士论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003.

(SCM),以及能够描述云内部复杂结构的云分辨模式(CRM)等。

### 参考文献 (References):

- [1] Ramanathan V. The role of Earth radiation budget studies in climate and general circulation Research[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 37: 447-454.
- [2] Ramanathan V, Barkstrom B R, Harrison E F. Climate and the earth's radiation budget[J]. *Physics Today*, 1989, 42(5): 22-32.
- [3] Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment[J]. *Science*, 1989, 243: 57-63.
- [4] Manabe S, Snagorinsky J, Strickler R F. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle[J]. *Monthly Weather Review*, 1965, 93: 769-798.
- [5] Slingo J M. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1987, 113: 899-927.
- [6] Sundqvist H. A parameterization scheme for non-convective condensation including prediction of cloud water content[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1978, 104: 677-690.
- [7] Del Genio A D, Yao M S, Kovari W, et al. A prognostic cloud water parameterization for global climate models[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9: 270-304.
- [8] Lee W H, Iacobellis S F, Somerville R C J. Cloud radiation forcings and feedbacks: General circulation model test and observational validation[J]. *Journal of Climate*, 1997, 10: 2 479-2 496.
- [9] IPCC. Climate change: The IPCC scientific assessment[A]. In: Contribution of Working Group I to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 1990.
- [10] IPCC. Climate change 1995: The science of climate change[A]. In: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 1996.
- [11] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis[A]. In: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [12] Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models[J]. *Science*, 1989, 245: 513-516.
- [13] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 16 601-16 615.
- [14] Cess R D, Zhang M H, Ingram W J, et al. Cloud feedback in atmospheric general circulation models: An update [J]. *Journal of Geophysical Sciences*, 1996, 101: 12 791-12 794.
- [15] Manabe S, Wetherald R T. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1967, 24(3): 241-259.
- [16] Wetherald R T, Manabe S. Cloud feedback processes in a general circulation model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(8): 1 397-1 415.
- [17] Mitchell J F B, Ingram W J. Carbon dioxide and climate-mechanisms of changes in cloud[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5: 5-21.
- [18] Yu W, Doutriaux M, Sèe G, et al. A methodology study of the validation of clouds in GCMs using ISCCP satellite observations [J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12: 389-401.
- [19] Zhao Gaoxiang, Wang Hongqi. Cloud and radiation : Cloud and cloud radiation parameterizations in general circulation models[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1994, 18 (suppl): 933-958. [赵高祥, 汪宏七. 云和辐射 ( ) : 环流模式中的云和云辐射参数化 [J]. *大气科学*, 1994, 18 (增刊): 933-958.]
- [20] Chen T, Zhang Y C, Rossow W B. Sensitivity of atmospheric radiative heating rate profiles to variations of cloud layer overlap [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 2 941-2 959.
- [21] Senior C A, Mitchell J F B. Carbon dioxide and climate: The impact of cloud parameterization[J]. *Journal of Climate*, 1993, 6: 393-418.
- [22] Sun Zhian, Keith P Shine. The importance of mixed-phase clouds in GCM climate Simulation[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1996, 7(4): 452-459. [孙治安, Keith P Shine. 混合云在 GCM 气候模拟中的重要性 [J]. *应用气象学报*, 1996, 7(4): 452-459.]
- [23] Yao M S, Del Genio A D. Effects of cloud parameterization on the simulation of climate changes in the GISS GCM[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12: 761-779.
- [24] Tselioudis G, Del Genio A D, Kowari Jr W, et al. Temperature dependence of low cloud optical thickness in the GISS GCM: Contributing mechanisms and climate implication[J]. *Journal of Climate*, 1998, 11: 3 268-3 281.
- [25] Tselioudis G, Rossow W B. Global Multiyear variations of optical thickness with temperature in low and cirrus clouds[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21: 2 211-2 214.
- [26] Tselioudis G, Rossow W, Rind D. Global patterns of cloud optical thickness variation with temperature[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5: 1 484-1 495.
- [27] Tselioudis G, Lacia A A, Rind D, et al. Potential effects of cloud optical thickness on climate warming[J]. *Nature*, 1993, 366: 670-672.
- [28] Roeckner E, Schlese U, Biercamp J, et al. Cloud optical depth feedbacks and climate modeling[J]. *Nature*, 1987, 329: 138-140.
- [29] Iacobellis S F, Somerville R C J, Lane D E, et al. Analysis of cloud-radiation interactions using ARM observations and a single-

- column model[A]. In: Eight ARM Science Team Meeting[C]. Tucson, AZ: March 23-27, 1998. 337-341.
- [30] Somerville R C J, Iacobellis S F, Lee W H. Effects of cloud-radiation schemes on climate model results[J]. *World Resource Review*, 1996, 8: 321-333.
- [31] Somerville R C J, Iacobellis S F. Single-column models, ARM observations, and GCM cloud-radiation schemes[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 1999, 24(6): 733-740.
- [32] Slingo A, Slingo J M. The response of a general circulation model to cloud longwave forcing I. Introduction and initial experiments [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1988, 114: 1 027-1 062.
- [33] Randall D A, Harshvardhan, Dazlich D A, et al. Interactions among radiation, convection, and large-scale dynamics in a general circulation model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46: 1 943-1 970.
- [34] Kuo H L, Qian Y F. Numerical simulation of the development of mean monsoon circulation in July [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110: 1 879-1 897.
- [35] Chen Shoujun. The Impact of radiative process on the onset of summer monsoon—Numerical experiments[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, 46(1): 20-27. [陈受钧. 辐射对夏季风开始的影响——数值模拟 [J]. 气象学报, 1988, 46(1): 20-27.]
- [36] Ding Yihui, Kong Jun. Numerical simulation of 3-D tropical cyclones and the radiative impact on it [J]. *Science in China (B)*, 1988, 8: 887-898. [丁一汇, 孔军. 三维热带气旋的数值模拟及辐射对它的影响 [J]. 中国科学 B 辑, 1988, 8: 887-898.]
- [37] Ramanathan V, Collins W. Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Niño [J]. *Nature*, 1991, 351: 27-32.
- [38] Lindzen R S, Chou M D, Hou A Y. Does the Earth have an adaptive infrared iris? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82: 417-432.
- [39] Lindzen R S, Chou M D, Hou A Y. Comments on “No Evidence for Iris” [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83: 1 233-1 237.
- [40] Hartmann D L, Michelson M L. Large-scale effects on the regulation of tropical sea surface temperatures [J]. *Journal of Climate*, 1993, 6: 2 049-2 062.
- [41] Fu R, Del Genio A D, Rossow W B, et al. Cirrus-cloud thermostat for tropical sea surface temperature tested using satellite data [J]. *Nature*, 1992, 358: 394-397.
- [42] Hartmann D L, Michelson M L. No evidence for IRIS [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83: 249-254.
- [43] Lin B, Wielicki B A, Chambers L H, et al. The iris hypothesis: A negative or positive cloud feedback? [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15: 3-7.
- [44] Bony S, Lau K M, Sud Y C. Sea surface temperature and large-scale circulation influences on tropical greenhouse effect and cloud radiative forcing [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10: 2 055-2 077.
- [45] Yao M S, Del Genio A D. Effects of cloud parameterization on the simulation of climate changes in the GISS GCM. Part II: Sea surface temperature and cloud feedbacks [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15: 2 491-2 504.
- [46] Tselioudis G, Zhang Y, Rossow W B. Cloud and radiation variations associated with northern midlatitude low and high sea level pressure regimes [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 312-327.
- [47] Ma Xiaoyan, Ji Guoliang. Analysis of temporal and spatial variations for cloud radiative forcing in China by using ERBE data [J]. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(2): 150-158. [马晓燕, 季国良. 利用 ERBE 资料分析中国地区云辐射强迫的时空变化 [J]. 高原气象, 2000, 19(2): 150-158.]
- [48] Wang W C, Gong W, Kau W S, et al. Characteristics of cloud radiative forcing over east China [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(4): 845-853.
- [49] Zhao Zongci, Luo Yong. Simulations of summer monsoon over east Asia: Intercomparisons of three regional climate models [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8 (suppl): 116-122. [赵宗慈, 罗勇. 东亚夏季风的模拟研究——3 个区域气候模式的对比 [J]. 应用气象学报, 1997, 8 (增刊): 116-122.]
- [50] Luo Yong, Zhao Zongci. Numerical simulation of east Asian regional climate with RegCM2 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8 (suppl): 124-133. [罗勇, 赵宗慈. NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验 [J]. 应用气象学报, 1997, 8 (增刊): 124-133.]
- [51] Leung L R, Ghan S J, Zhao Z C, et al. Intercomparison of regional climate simulations of the 1991 summer monsoon in East Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 6 425-6 454.
- [52] Giorgi F, Huang Y, Nishizawa K, et al. A seasonal cycle simulation over eastern Asia and its sensitivity to radiative transfer and surface processes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 6 403-6 424.
- [53] Lane D E, Somerville R C J, Iacobellis S F. Sensitivity of cloud and radiation parameterizations to changes in vertical resolution [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 915-922.
- [54] Wielicki B A, Wong T, Allan R P, et al. Evidence for large decadal variability in the tropical mean radiative energy budget [J]. *Science*, 2002, 295: 841-844.
- [55] Gordon C T, Rosati A, Gudge I R. Tropical sensitivity of a coupled model to specified ISCCP low clouds [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 2 239-2 260.
- [56] Cess R D, Zhang M H, Minnis P, et al. Absorption of solar radiation by clouds: observations versus models [J]. *Science*, 1995, 267: 496-499.
- [57] Cess R D, Zhang M H, Valeo F P J, et al. Absorption of solar radiation by the cloudy atmosphere: Further interpretations of collocated aircraft measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 2 059-2 066.
- [58] Wild M, Ohmura A. The role of clouds and the cloud-free atmosphere in the problem of underestimated absorption of solar radi-

tion in GCM atmospheres [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1999, 24B: 261-268.

mospheres over Germany and in GCMs[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27: 959-962.

[59] Wild M. Absorption of solar energy in cloudless and cloudy at-

## AN EVALUATION OF CLOUD RADIATIVE FEEDBACK MECHANISMS IN CLIMATE MODELS

WANG Fang<sup>1,2</sup>, DING Yi-hui<sup>3</sup>

(1. *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;*

2. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*

3. *National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** Cloud plays an important role in the radiative budget of climate system, and cloud-radiation parameterization is one of the main sources of uncertainty in climate models. Cloud can impact radiation through various ways, resulting in feedbacks with different sign and magnitude. Researches show that model climate is very sensitive to cloud-radiation parameterization schemes. As predictable cloud water content is introduced to models, the simulation of cloud-radiation processes is improved, though significant difference from observations still exists. Generally, the introduction of phase change of cloud water and interactive cloud droplet size can produce negative feedbacks, while the cloud optical depth feedback and cloud amount feedback are positive in climate change. Cloud-radiation has a close connection with large-scale background of climate, especially the remarkable SST effect on radiation balance. We also summarize the main problems of present cloud-radiation researches and give some proposals.

**Key words:** Climate models; Cloud radiative feedback; Parameterization