

# 气候模式中云的次网格结构对全球辐射影响的研究<sup>\*1</sup>

荆现文<sup>1,2</sup> 张 华<sup>2\*</sup> 郭品文<sup>3</sup>

JING Xianwen<sup>1,2</sup> ZHANG Hua<sup>2\*</sup> GUO Pinwen<sup>3</sup>

1. 中国气象科学研究院,北京,100081

2. 中国气象局气候研究开放实验室,国家气候中心,北京,100081

3. 南京信息工程大学,大气科学学院,南京,210044

1. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China

2. Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3. Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2008-07-11 收稿,2009-07-30 改回.

**Jing Xianwen, Zhang Hua, Guo Pinwen. 2009. A study of the effect of sub-grid cloud structure on global radiation in climate models. Acta Meteorologica Sinica, 67(6):1058—1068**

**Abstract** A recently developed stochastic sub-grid cloud generator (SCG) and independent column approximation (ICA) are used to study the effect of horizontal heterogeneity and vertical overlap of clouds on global radiative fields. Results of experiments IHCLD (Inhomogeneous Clouds) and HCLD (Homogeneous Clouds) show that horizontally inhomogeneous clouds lead to both larger net shortwave flux at surface (FSNS) and larger net longwave flux at the top of atmosphere (FLNT). The largest (about 1 W/m<sup>2</sup>) and second largest (about 0.6 W/m<sup>2</sup>) increases in FSNS occur at the higher latitude where low clouds dominant and in the tropics where convection movement is quite active, respectively. However, the largest increases in FLNT (about 0.3 W/m<sup>2</sup>) occur in the tropics due to tremendous high clouds. Experiments GenO (General Overlap) and MRO (Maximum-Random Overlap) suggest a stronger signal of impact on the shortwave and longwave radiation budget. Regionally, the most significant differences of FSNS reach up to 30—40 W/m<sup>2</sup> in ITCZ regions, as well as a zonal mean difference of about 5 W/m<sup>2</sup> at the higher latitudes with large amount of low clouds. There are similar spatial distributions for the differences of FLNT, but with smaller value. Overlap-assumption shift can also trigger opposite changes to radiative heating rate in the upper and lower atmospheric layers, thus influences the thermodynamic structure of the atmosphere. The impacts of cloud horizontal and vertical structure on radiation budget will surely carry over to the thermodynamic, dynamic status and water vapor conditions of the atmosphere, and consequently change the evolution of modeled climate. The off-line cloud-radiation calculation makes the results generally applicable, so as to provide valuable information when parameterize cloud-radiation process in different models.

**Key words** Large-scale model, Stochastic cloud generator, Cloud horizontal variation, Cloud overlap, Radiative flux

**摘 要** 利用一种用于大尺度天气、气候模式的随机云产生器(SCG)和独立气柱近似(ICA)辐射算法,研究了次网格云的水平结构以及垂直重叠结构对全球辐射场的影响。比较了水平非均匀云(IHCLD)和水平均匀云(HCLD)的辐射场差异以及云的最大-随机重叠(MRO)和一般重叠(GenO)的辐射场差异。结果显示,与 HCLD 相比,IHCLD 一方面可增加地面净短波辐射通量,纬向平均最大值(约 1 W/m<sup>2</sup>)和次大值(约 0.6 W/m<sup>2</sup>)分别位于高纬度低云密集地区和对流旺盛的热带地区;另一方面可增加大气顶的净长波辐射通量,纬向平均最大值(0.3 W/m<sup>2</sup>)出现在热带地区。不同的重叠结构对短波和长波辐射收支也有很大的影响,MRO 和 GenO 的短波辐射通量差异在热带辐合带最大,达到 30—40 W/m<sup>2</sup>,在高纬度低云带的纬向平均也

\* 资助项目:国家科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706036)和中国气象局数值模式创新基地科研业务课题。

作者简介:荆现文,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,主要从事大气辐射传输模式、云-辐射相互作用等方面的研究。E-mail:huazhang@cma.gov.cn

可达到  $5 \text{ W/m}^2$  左右;长波辐射通量差异具有相似的地区分布,但量值相对较小。不同重叠结构可以造成大气上下层的辐射加热率差异,影响大气热力层结。云的水平垂直结构对有云区域辐射收支的影响将改变大气热力、动力状况以及水汽条件,从而影响模拟的气候系统的演变。文中采用单向云-辐射计算,排除了与气候系统其他过程复杂的相互作用,从而使其结果具有一定的普适性,可为不同大尺度模式进行次网格云辐射参数化提供参考。

**关键词** 大尺度模式,随机云产生器,云水平结构,云垂直重叠,辐射通量

**中图法分类号** P422.4

## 1 引言

云覆盖了地球面积的 60% 左右,是影响地气系统辐射收支平衡的重要因素(Liou, 1992),但是对云的模拟一直以来都是全球气候模式的薄弱环节,这成为气候模拟不确定性的主要原因之一(Wetherald, et al, 1988; Houghton, et al, 2001)。自然云的水平尺度范围很广,从一到十千米尺度的积云到几百甚至上千千米的层状云。传统全球气候模式的水平分辨率一般为几十至几百千米,对于众多尺度小于网格尺度的云,模式不能分辨。由于模式分辨率较低,模式计算辐射传输时,云的次网格结构(水平和垂直)要么被完全忽略,要么进行简单的参数化和某种固定的重叠假设。云是地球辐射平衡的主要调节者,云-辐射参数化方案的改进对全球能量收支的模拟有重要意义(张韬等, 2005)。云的过于简单的处理使模式辐射传输计算容易产生系统性的偏差,影响大气能量收支的准确模拟,成为气候模拟不确定性的重要来源(Barker, 2002)。一般来说,气候模式为了弥补云-辐射计算的偏差,采用人为调整云量和云的其他参数的方法得到合理的辐射通量结果(Tiedtke, 1996),而这些调整缺乏物理根据,是模式应该尽量避免的。鉴于云对辐射过程的重要性以及传统气候模式所存在的以上问题,如何在大尺度模式中合理表征次网格云的结构及云的辐射过程,成为国内外研究热点和难点。

目前比较完善的次网格云的模拟有云系统分辨模式(Cloud System Resolving Model, 简称 CSRM)和多尺度模拟系统(Multi-scale Modeling Framework, 简称 MMF)等(Randall, et al, 2003),它们考虑了次网格的云动力过程。但是由于巨大的计算压力,这些方案到目前为止还仅限于研究阶段,不能应用于常规气候模拟。而其他传统的参数化方法大多假定云是水平均匀的,云层的垂直重叠方案也比较固定,采用最大重叠、最小重叠或者最大-随机重叠(Barker, 1999; Jakob, et al, 2000)。Räisänen 等(2004)建立了一种基于随机取样思想的次网格尺度的云产生器,这

里称之为随机云产生器(Stochastic Cloud Generator, 简称 SCG)。它不仅能够模拟次网格云的水平不均匀分布,也可以模拟更接近实际大气的云的垂直重叠结构。该随机云产生器利用大尺度模式气柱的云量和云水含量廓线,在该气柱内随机产生若干个相互独立的次级气柱,它们各自代表一种次网格结构,同时这些次网格结构的平均又遵循该气柱的大尺度信息。与以往次网格云的参数化方法相比,这种方法最大的优点在于其灵活性:一方面可以灵活改变云的水平结构,另一方面可以灵活改变云的垂直重叠结构。因此,它具有更全面地体现自然云多变结构的能力。同时,避免了在辐射计算中对云的人为调整,减少了主观因素对气候模拟的影响。

本文利用 SCG 研究了云水含量的水平分布和云的垂直重叠对辐射场的影响,期望能初步得到次网格云结构对辐射场影响的清晰认识,从而为 SCG 这种具有很大潜力的云处理方法的进一步应用提供有价值的参考。

## 2 随机云产生器方法

### 2.1 随机云产生器的基本假设

在传统气候模式的一个气柱内,云量和云水含量(包括冰云和水云含量)廓线是云辐射计算的关键输入参数。随机云产生器(SCG)方法首先在该大尺度气柱内生成分若干个次级气柱,然后将大尺度云的信息通过一定方法分配到各次级气柱上。SCG 有 3 个基本假设:(1)单个次级气柱的单个层上(称为“胞”),假设要么有云(即云量为 1),要么无云(即云量为 0);(2)假设在水平方向上,每层的有云胞数目在次级柱总数中所占比例近似等于该层的大尺度云量,在垂直方向上,胞的分布满足一定的重叠关系;(3)假设水平辐射传输是不重要的,可以忽略,这样,我们可以独立地产生次级柱而不考虑云的水平相关。

假设在每个大尺度气柱内产生  $N$  个次级气柱,模式垂直分为  $K$  层(顶层为第 1 层,向下依次为第 2, 3... $K$  层),那么在最基本的层面上,SCG 首先在每个胞上产生  $[0, 1]$  范围内的随机数,记为  $x_{j,k}$ 、 $y_{j,k}$

( $j, k$  分别为柱序号和层序号), 分别做判断该处的云量和云水含量的依据。

$x_{j,k}$  通过以下关系判断该处是否有云

$$c_{j,k} = \begin{cases} 0 & x_{j,k} \leq 1 - C_k \text{ (晴空)} \\ 1 & x_{j,k} > 1 - C_k \text{ (有云)} \end{cases} \quad (1)$$

$$k = k_{\text{top}} \cdots k_{\text{base}}; j = 1, 2 \cdots N$$

其中,  $C_k$  为大尺度气柱在第  $k$  层的云量,  $k_{\text{top}}, k_{\text{base}}$  分别为云顶、云底层。可以看到, 如果随机数小于晴空比例, 则认为该胞是无云的, 如果随机数大于晴空比例, 则认为该胞是有云的。因为  $x_{j,k}$  是完全随机的, 所以, 只要取样数目足够大, 每层上的有云胞数目所占比例必然趋向该层的大尺度云量。

$y_{j,k}$  通过以下关系得到该处云水凝结量  $w_{j,k}$

$$y_{j,k} = \int_0^{w_{j,k}} p_k(\omega) d\omega \quad (2)$$

其中  $p_k(\omega)$  是第  $k$  层内总云水含量(水云和冰云)的归一化概率密度分布,  $y_{j,k}$  是其累积频率分布。 $p_k(\omega)$  可以暂时指定为某种理想的分布型, 如  $\Gamma$  分布、 $\beta$  分布等, 也可直接应用观测结果。

## 2.2 SCG 对垂直重叠关系和水平非均匀结构的实现

在更高的层面上, SCG 需要解决的问题是: 如何产生次网格随机数  $x_{j,k}, y_{j,k}$ , 使其体现出云量和云水含量的水平非均匀性和垂直重叠关系。

SCG 首先确定次网格云的位置分布, 使其满足一定的重叠关系, 然后再将云水含量按一定的要求分配给次网格云, 使其满足一定的水平分布关系。我们以最大-随机重叠 (Maximum-Random Overlap, 简称 MRO) 和一般重叠 (General Overlap, 简称 GenO) 为例, 介绍 SCG 生成次网格云结构的过程。

### 2.2.1 最大-随机重叠

MRO 认为垂直相邻的两层云是最大重叠的, 即重叠总云量等于垂直方向上两层云中云量最大者; 而在垂直方向上被一个以上晴空层分离的两个云层是随机重叠的, 重叠总云量是随机的 (Geleyn, et al, 1979)。SCG 首先在云顶层, 给每个次网格气柱分配一个独立的、均匀分布于  $[0, 1]$  之间的随机数  $R_{1j, k_{\text{top}}}$ , 即

$$x_{j, k_{\text{top}}} = R_{1j, k_{\text{top}}} \quad j = 1, 2 \cdots N \quad (3)$$

然后向下逐层确定下一层随机数。如果上层有云, 则沿用其上层的  $x_{j,k}$ , 否则使用新随机数, 这样新的云量就优先产生于两层云重叠的区域, 从而实现了 MRO。这个过程可以概括为

$$x_{j,k} = \begin{cases} x_{j, k-1} & x_{j, k-1} > 1 - C_{k-1} \text{ (上层有云)} \\ R_{j,k} (1 - C_{k-1}) & x_{j, k-1} \leq 1 - C_{k-1} \text{ (上层无云)} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $R_{j,k}$  为新的随机数,  $C_{k-1}$  为第  $k-1$  层的云量。

### 2.2.2 一般重叠

Hogan 等 (2000) 以及 Bergman 等 (2002) 提出了一般云重叠的数学模型, 这个模型将上下两层 (标记为第  $k$  和第  $l$  层) 的垂直投影的总云量写为

$$C_{k,l} = \alpha_{k,l} C_{k,l}^{\text{max}} + (1 + \alpha_{k,l}) C_{k,l}^{\text{ran}} \quad (5)$$

这里  $C_{k,l}^{\text{max}} = \max(C_k, C_l)$ ,  $C_{k,l}^{\text{ran}} = C_k + C_l - C_k C_l$ ,  $\alpha_{k,l}$  是两层云的重叠系数, 反应两层云之间的重叠程度,  $\alpha_{k,l}$  越大, 则重叠程度越高。 $\alpha_{k,l}$  可以由以下公式计算

$$\alpha_{k,l} = \exp\left(-\int_{Z_k}^{Z_l} \frac{dZ}{L_{\text{cf}}(Z)}\right) \quad (6)$$

其中,  $L_{\text{cf}}(Z)$  是云量的抗相关厚度, 当两层云之间的距离超过这个厚度时, 认为两层云没有相关关系。GenO 同样从顶层向下逐层确定随机数  $x_{j,k}$ , 只是在确定下层随机数时考虑了与上层云的重叠程度。假设上层确定了  $x_{j, k-1}$ , 然后在下层重新产生平均分配于  $[0, 1]$  之间的一组随机数  $R_{2j, k}$ , 这一层  $x_{j,k}$  的确定则通过以下关系,

$$x_{j,k} = \begin{cases} x_{j, k-1} & R_{2j, k} \leq \alpha_{k-1, k} \\ R_{3j, k} & R_{2j, k} > \alpha_{k-1, k} \end{cases} \quad (7)$$

$$k = k_{\text{top}} + 1 \cdots k_{\text{base}}; j = 1, 2 \cdots N$$

其中,  $R_{3j, k_{\text{top}}}$  为类似于  $R_{1j, k_{\text{top}}}, R_{2j, k}$  的重新产生的随机数。注意到, 当重叠系数  $\alpha = 1$  时, GenO 即为最大重叠, 而当  $\alpha = 0$  时, 即为随机重叠, 当  $\alpha$  位于  $0-1$  之间时, 重叠关系介于最大和随机重叠之间。

### 2.2.3 水平结构的实现

云的水平分布经过以上步骤确定下来。如果假设云水含量在云内是水平均匀分布的, 那么可以将每层的大尺度云水含量平均分配给每个有云胞; 如果云水含量的水平分布是不均匀的, 那么次网格的云水含量可以通过如下做法得到。

首先, 在云顶层, 在有云胞 (无云胞不予考虑) 中给出平均分配于  $[0, 1]$  间的随机数,

$$y_{j, k_{\text{top}}} = R_{4j, k_{\text{top}}} \quad j = 1, 2 \cdots N \quad (8)$$

然后, 在下层, 按以下关系得到,

$$x_{j,k} = \begin{cases} y_{j, k-1} & R_{5j, k} \leq 1 - r_{k-1, k} \\ R_{6j, k} & R_{5j, k} > 1 - r_{k-1, k} \end{cases} \quad (9)$$

$$k = k_{\text{top}} + 1 \cdots k_{\text{base}}; j = 1, 2 \cdots N$$

其中,  $R_{4j,k}$ 、 $R_{5j,k}$ 、 $R_{6j,k}$  是类似  $R_{1j,k}$  的随机数。根据式(8)、(9)和(2),可以得到水平呈  $p_k(\omega)$  型的云水含量分布。

图 1 是由单柱大尺度云量、云水廓线产生精细的次网格云结构的例子,采用 MRO 重叠,云水水平分布为  $\Gamma$  分布。

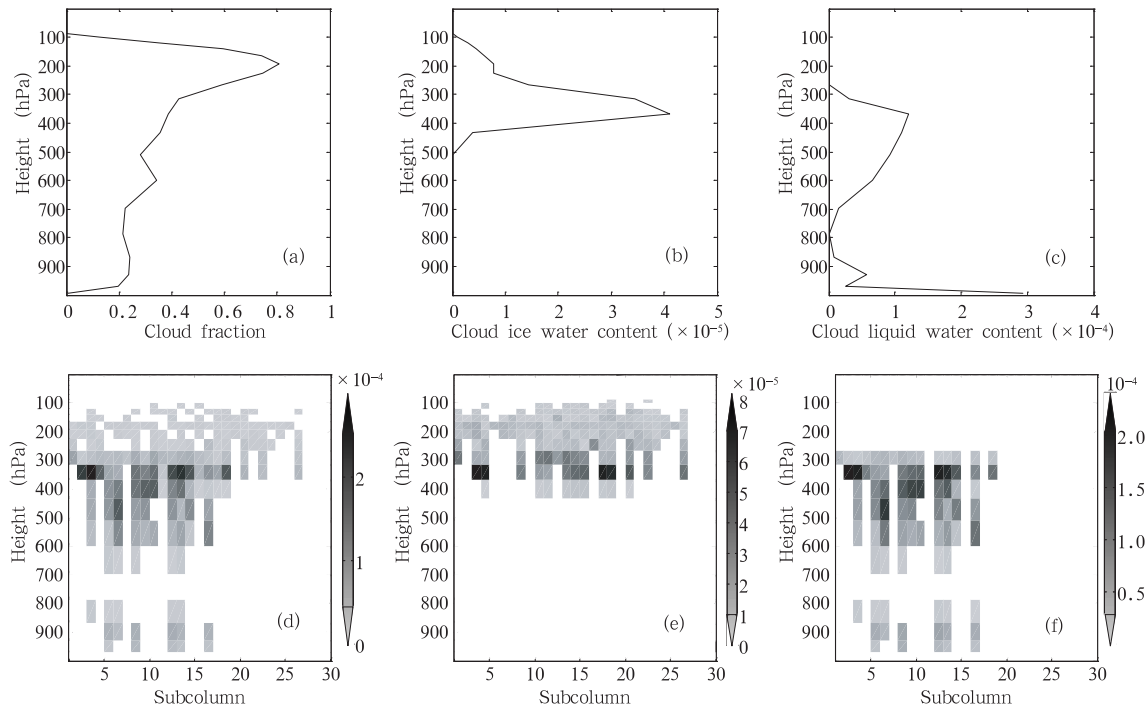


图 1 大尺度网格的云以及据此产生的次网格云的分布

(a. 大尺度云量垂直廓线, b. 冰云含量的垂直廓线, c. 水云含量垂直廓线,

d. 次网格总云水结构, e. 次网格冰云结构, f. 次网格水云结构; 单位(除云量外): kg/kg)

Fig. 1 Cloud within a large scale column and the corresponding subgrid structure from SCG

(Profile of: a. cloud fraction, b. cloud ice water content, c. cloud liquid water content, subgrid distribution of:

d. cloud total water, e. cloud ice water, f. cloud liquid water; units (except for cloud fraction): kg/kg)

### 3 SCG 在全球气候模式中的应用

#### 3.1 模式介绍

SCG 已经在很多大尺度天气、气候模式中得到应用,如美国 GFDL 的 AM2(Pincus, et al, 2006)、欧洲中期数值预报中心的 ECMWF(Morcrette, et al, 2008)等,本文将其应用在 NCAR 的全球大气模式 CAM3 中。该模式采用 42 波三角截断的水平方案(T42 近似于  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ ),垂直方向采用混合  $\sigma$ -压力坐标系,共 26 层,最顶层高度为 3.5 hPa。模式动力积分步长为 20 min,辐射方案 1 h(3 个步长)执行 1 次。云水含量为预报量,辐射计算中仅考虑非对流云水,它由 Rasch 等(1998)和 Zhang 等(2003)的方案预报得到。云量为诊断量,由 3 部分组成,其中海上层积云量由位温关系诊断得到

(Klein, et al, 1993),大尺度层云由相对湿度关系诊断得到(Randall, 1989),而深、浅对流云量的确定与质量通量有关(Xu, et al, 1991)。

本文 SCG 辐射计算采用独立气柱近似(Independent Column Approximation, 简称 ICA),以次网格柱为单位进行计算,不考虑辐射在柱-柱之间的水平传输。虽然大块的云被分为若干独立的小块云,ICA 也不是真实的三维辐射传输,但是 ICA 依然可以得到准确的网格平均辐射通量(Cahalan, et al, 1994; Barker, 1999)。网格平均的辐射通量和加热率由其中的次网格柱结果的平均得到。由于对网格的一次辐射计算变为对多个次网格气柱的多次辐射传输计算,计算时间必然大幅增加。但是,本文的重点在于讨论不同的次网格云的处理方案对辐射场的影响,所以,如何在新的云处理方案下减少计算

时间不是本文讨论的内容,我们会在另文给予讨论。

云的光学性质采用 Hu 等(1993) 和 Lindner 等(2000)的米散射方法计算,冰云和水云光学有效半径都取网格平均值。气体吸收(包括  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $O_3$ )的计算采用相关  $K$  分布的方法(Kato, et al, 1999),其中短波分为 15 个带,长波分为 12 个带。辐射传输采用二流近似方法计算(Zdunkowski, et al, 1980)。

### 3.2 数值试验方法

为研究云水的水平分布对辐射场的影响,我们进行两组试验,第 1 组假设云水含量是水平均匀分布的,记为 HCLD(Homogeneous Cloud);第 2 组假设云水含量的水平分布是非均匀的,采用方差为 0.2 的  $\Gamma$  分布,记为 IHCLD(Inhomogeneous Cloud)。两组试验中云的重叠都采用 MRO。两组试验都由 1949 年 9 月 1 日开始,积分 16 个月,选取两个能够反应云的季节变化的典型月份 1 月和 7 月进行分析。

为了研究不同云重叠方案对辐射场的影响,我们进行另外两组试验,一组采用目前很多大尺度天气、气候模式使用的 MRO 重叠(Stubenrauch, et al, 1997; Morcrette, et al, 2000; Collins, 2001),记为 MRO;另一组采用新的 GenO 重叠,记为 GenO。两组试验中,云水含量都取为水平均匀分布,以排除云的水平分布对结果的影响。式(8)中的抗相关厚度  $L_{cl}(Z)$  是随季节、地区和云类型的不同而变化的,本文取为常数 2.0 km,这大致是全球的平均值,能够给出比较接近于实际的总云量(Barker,

et al, 2005; Barker, 2008)。

以上 4 组试验中,次网格云的产生以及次网格的辐射计算在 CAM3 模式之外单独进行,SCG 与大尺度云场的时间演变没有关系。这保证了在每个时步,4 组试验的初始大尺度云场是完全一致的,因而辐射场差异仅来自次网格云水的水平分布和垂直重叠的不同。

## 4 云的次网格水平、垂直结构对全球辐射场的影响

如前所述,SCG 可以灵活地得到多种云的小尺度结构,包括不同的水平分布和不同的垂直重叠方式。因此,次网格云的参数化就变得简便易行,可以根据不同的目的和要求使用不同的次网格云结构,用于气候模拟和研究中。这里主要探讨气候模式中次网格云的水平分布和垂直分布对辐射通量、辐射加热率的影响。

从 1 月和 7 月大尺度云量的纬度-高度分布(图 2)可以看到,高纬度地区以低云为主;热带辐合带对流旺盛,以高云为主;副热带下沉气流区,云量总体最少。由于云的这种分布特征,在高纬度地区,云对辐射的影响主要是通过低云作用,而在低纬度地区,云对辐射的影响主要是通过高云作用。云量的分布也表现出一定的季节变化,低云和高云都有南北向移动;而且在 7 月的南极上空出现了位置很高的高云,而 1 月这一高云并不存在。因为云量的季节变化,云的辐射作用也随之发生季节变化。

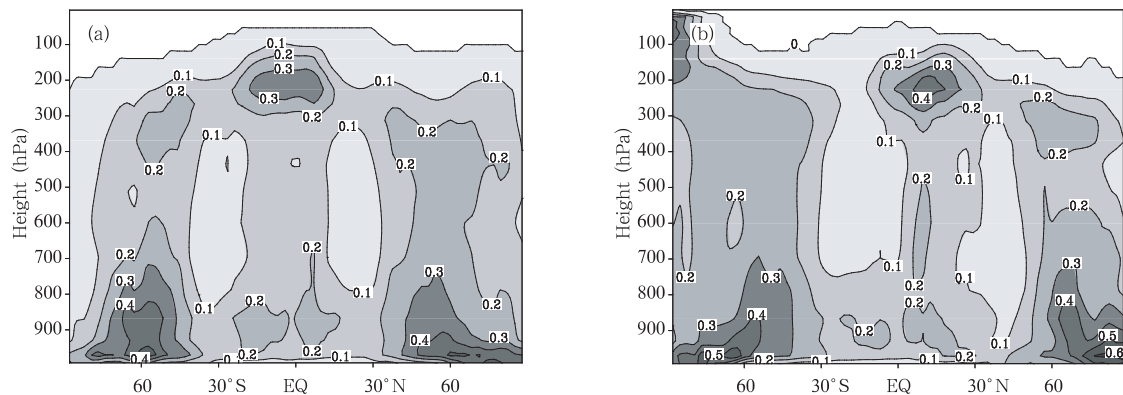


图 2 大尺度云量的纬度-高度分布 (a. 1 月, b. 7 月)

Fig. 2 Latitude-height distribution of large-scale cloud fraction (a. January, b. July)

### 4.1 云的水平结构对辐射场的影响

云对长、短波辐射的吸收和散射作用与云水含

量的关系不是简单的线性关系(Wielicki, et al, 1986; Boer, et al, 1997),因此,HCLD 和 IHCLD

模拟的同一云体的光学性质是不相同的。地面净短波辐射通量(FSNS)代表地表得到的太阳辐射能量,大气顶净长波辐射通量(FLNT)代表地气系统的长波能量损失,我们用这两个量来考察云的水平分布对地球辐射场的影响。

图3是1月和7月FSNS和FLNT的纬向平均差值场。不论1月还是7月,由IHCLD模拟的FSNS都比HCLD的模拟偏多,最大值出现在1月的60°S附近(图3a)和7月的60°N附近(图3b),都接近或超过1.0 W/m<sup>2</sup>,因此地表获得更多的短波辐射能量。这显然与低云有关。60°S整个纬圈都为海洋,低云量普遍超过0.8,云水的水平分布对其光学性质影响相对较大。云水的非均匀分布使得一些次网格柱的云水聚集,云的光学厚度增加,同时使另一些次网格柱的云水疏散,云的光学厚度减小,其总的效果是减小了大尺度网格内云的总光学厚度,

从而使短波透射率增大,于是更多的短波辐射到达地面,这与张凤(2005)的研究结果相似。在高云量最多的热带对流区域,短波辐射差值场上出现一个次大值,约0.6 W/m<sup>2</sup>。可见,虽然热带地区大气顶获得的太阳辐射通量远大于高纬度地区,但是短波辐射却在高纬低云区对云水的水平分布更为敏感。因此,在对云的水平结构进行参数化时,低云的水平分布更应引起重视。

IHCLD模拟的FLNT总是高于HCLD模拟的值(图3c、3d),即有更多长波辐射出射。与FSNS不同的是,FLNT差别最大是在热带地区,约0.3 W/m<sup>2</sup>。这是因为大气顶长波辐射与高云关系最为密切,高云一方面吸收部分地面长波辐射,一方面通过其较周围大气冷的云顶向外发射长波辐射。云顶的长波发射率与云水含量并不成线性关系。与水平均匀云相比,云水的非均匀分布使部分次网格

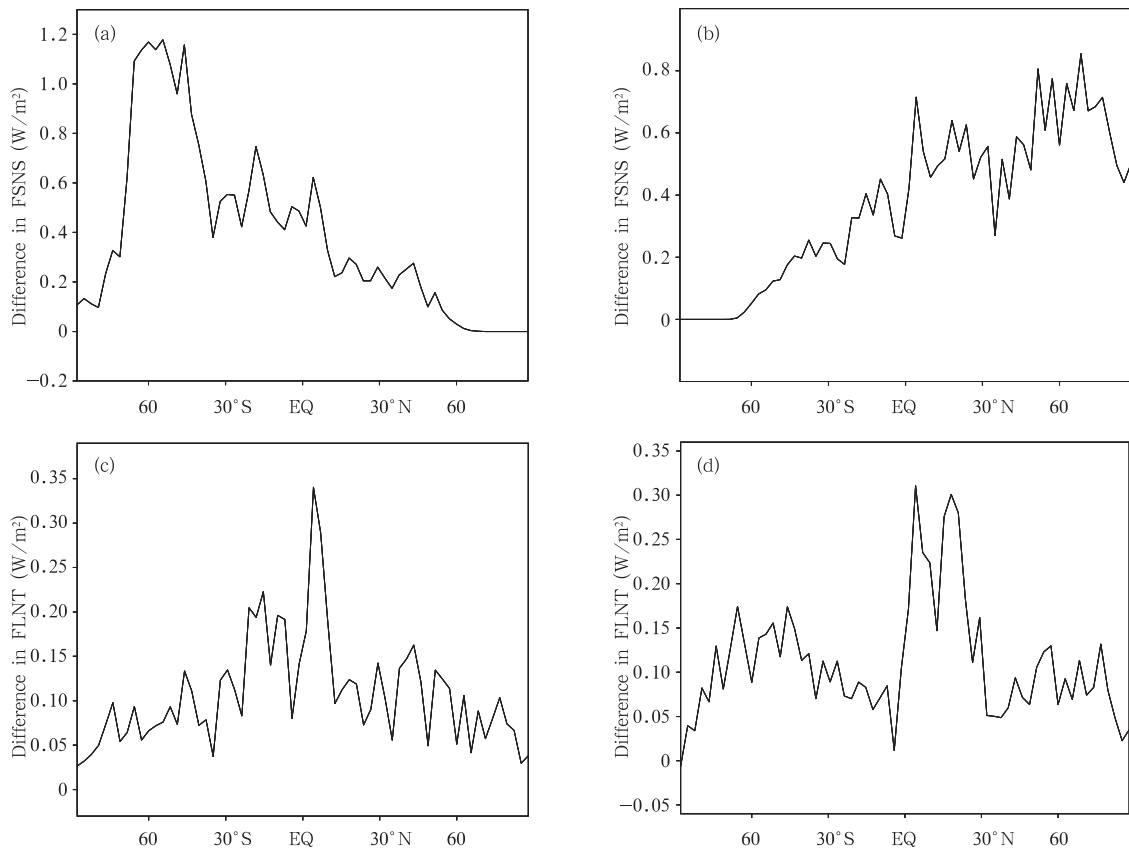


图3 IHCLD和HCLD之间FSNS(a,b)和FLNT(c,d)的纬向平均差异(IHCLD-HCLD)

(a,c, 1月, b,d, 7月; 单位: W/m<sup>2</sup>)

Fig. 3 Zonal mean differences in FSNS (a,b) and FLNT (c,d) between IHCLD and HCLD (IHCLD-HCLD)

(a,c, January, b,d, July; units, W/m<sup>2</sup>)

柱的云水聚集,从而增大对长波辐射的吸收率和发射率;同时使另一些次网格柱的云水疏散,从而减小对长波辐射的吸收率和发射率;FLNT 的差别是云对长波吸收作用的改变和云顶长波发射率的改变共同造成的。IHCLD 增加了长波能量的损失,在一定程度上抵消了所获得短波辐射能量的增加。但长波辐射的差别比短波辐射的差别小很多,两者全球平均分别约为  $0.12 \text{ W/m}^2$  和  $0.4 \text{ W/m}^2$ 。总体上看,水平非均匀的云水分布使更多的能量被地气系统所接收,而且多吸收的能量随纬度而变,高纬度地区获得了大多数的额外能量,能量的这种分配差异可改变大气热力状况和环流形势,从而影响气候模拟结果。

需要指出的是,我们这里仅涉及水平数密度分布不均匀对辐射场的影响,而云滴半径的水平不均匀分布也会对辐射有明显的影响(Barker, et al,

2004),其影响程度可能与数密度的影响程度相当。云滴半径的分布与云滴数密度分布也有一定的关系。这两方面共同对辐射场的影响,还有待进一步研究。

#### 4.2 云的垂直重叠方式对辐射场的影响

不同的重叠方式一方面改变云水的垂直分布以及云厚的分布,另一方面也改变网格垂直投影的总云量,它们都会对辐射场有很大影响(汪宏七等, 1994),提高云量的模拟能力,可以明显提高对辐射场的模拟(汪方等, 2005)。图 4 给出 GenO 和 MRO 模拟的总云量的纬向平均差值。GenO 模拟的总云量总是比 MRO 模拟的偏多,对照图 2 发现,偏多最大值是在高云量最多的区域(1月、7月的赤道附近和7月的南极附近)和高纬度低云带的边缘附近,这些地区的总云量乃至辐射场受重叠方式的影响较大。

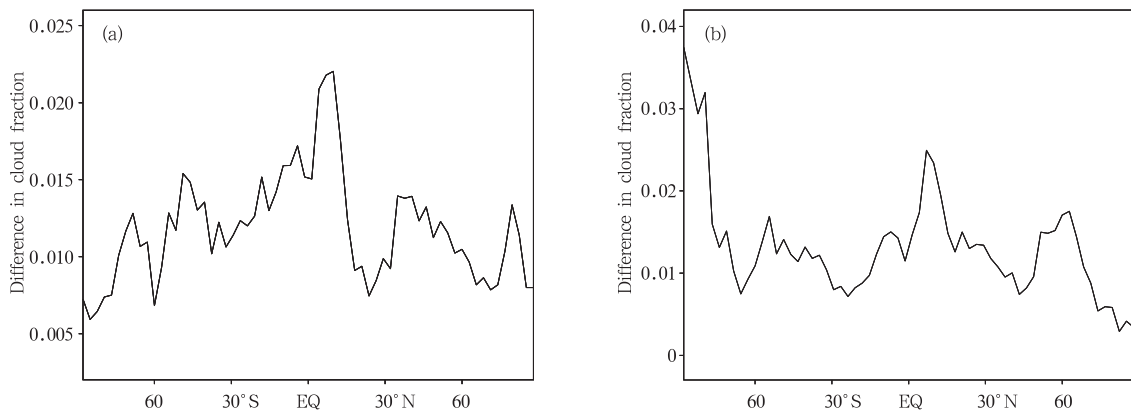


图 4 GenO 和 MRO 总云量的纬向平均差值 (GenO-MRO) (a. 1月, b. 7月)

Fig. 4 Zonal mean difference of total cloud fraction between GenO and MRO (GenO-MRO) (a. January; b. July)

图 5 是 1 月和 7 月 FSNS 和 FLNT 的纬向平均差值场。从短波来看(图 5a、5b),FSNS 差值基本上在各个纬度上都是负值,说明 GenO 比 MRO 有更多的短波辐射被散射,透过大气层到达地面的短波辐射通量因而减小,减小最大值出现在图 4 中总云量增大最明显的地区(冬半球除外),超过  $5-6 \text{ W/m}^2$ 。从 FSNS 偏差的全球分布来看(图 6),低纬度地区差异集中在对流旺盛、云层较厚的区域,普遍在  $10-15 \text{ W/m}^2$ ,极值达到  $30-40 \text{ W/m}^2$ ;高纬度地区差异相对均匀地分布于整个低云带。可见,地面获得的太阳辐射能量的全球分布与云量、云厚的分布有明显关系。重叠方式的不同引起有云地

区短波能量的变化,使这里大气热力、动力状况以及水汽条件发生变化,这可能使整个气候系统的演变发生系统性的改变。

长波情况,从图 5c、5d 看出,各个纬度上 FLNT 的差值也都是负的,而且最大值也出现在图 4 云量差异最明显的地方(包括南半球和北半球)。这是因为 GenO 比 MRO 有更大的云覆盖面积,阻碍了地面长波辐射向外的出射,同时有更多的低于环境温度的云向外发射长波辐射。从图中可以看到 FLNT 差异量比 FSNS 差异量小得多,最大约为  $-1.8 \text{ W/m}^2$ 。与图 3 云的水平不均匀性对长波和短波辐射通量的影响有明显区域差异相比,图 5 显示云的垂直重叠

对长波和短波辐射通量的影响随纬度分布的差异不大,这也反映出云的垂直结构与云的水平不均匀性对辐射场的影响机制的不同。

从云的水平分布和垂直重叠对全球平均辐射通量的影响(表 1)可以看到,云的水平分布不同造成

的辐射通量差比不同垂直重叠造成的辐射通量差小得多,就辐射作用而言,云的水平不均匀性是相对次要的;同时,长波辐射通量差比短波辐射通量差小得多,云的短波辐射作用受其次网格结构影响更为显著。

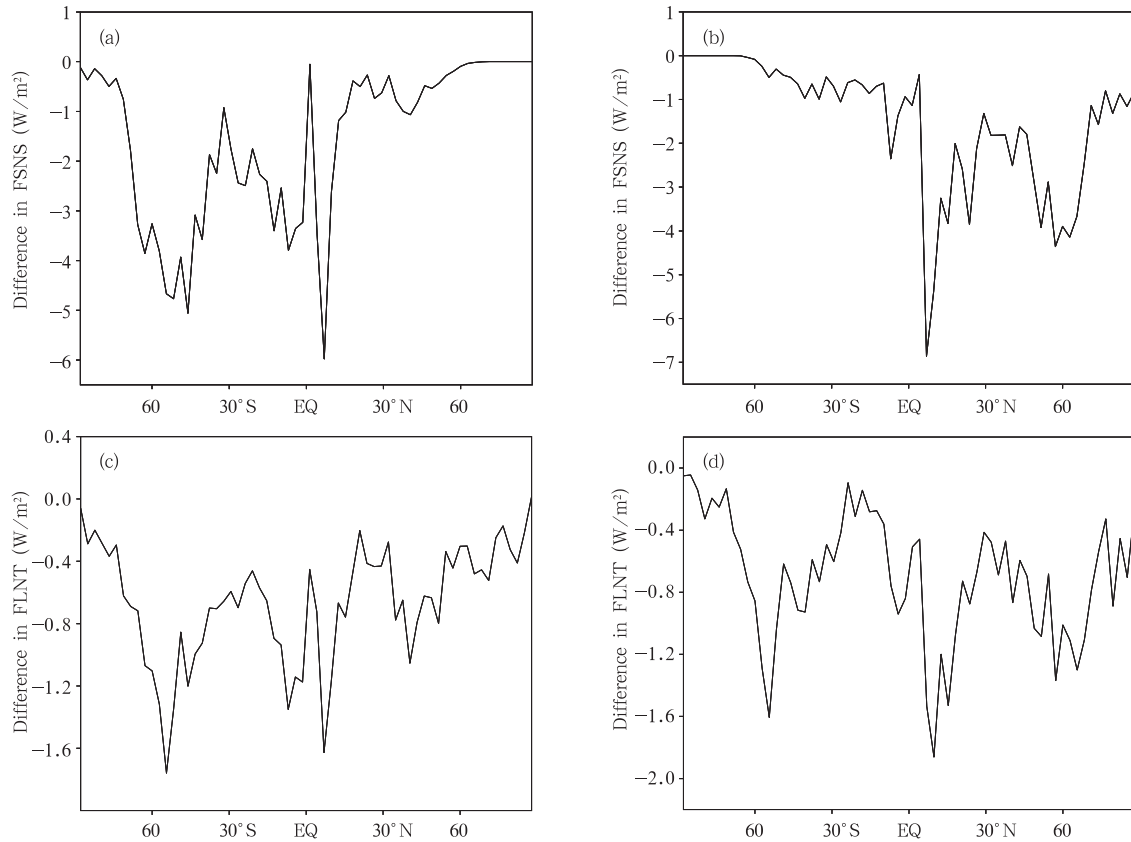


图 5 GenO 和 MRO 之间 FSNS(a、b)和 FLNT (c、d)的纬向平均差异(GenO—MRO)  
(a、c. 1月, b、d. 7月)

Fig. 5 Zonal-mean differences in FSNS (a, b) and FLNT (c, d) between GenO and MRO (GenO—MRO)  
(a, c: January; b, d: July)

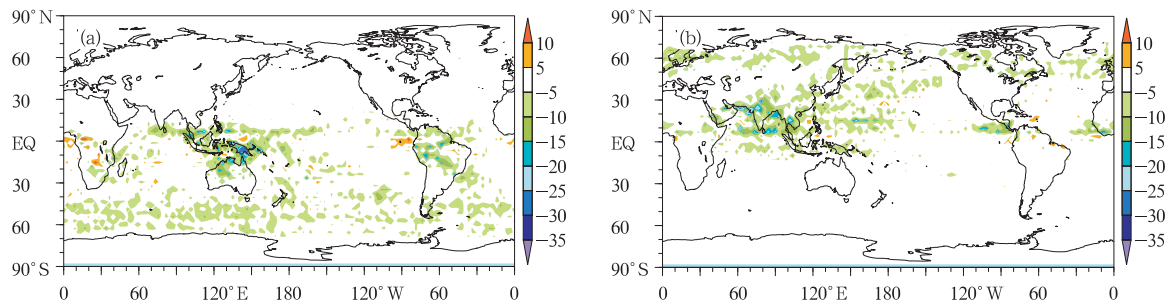


图 6 GenO 和 MRO 之间 FSNS 差值的全球分布(GenO—MRO) (a. 1月, b. 7月; 单位: W/m²)  
Fig. 6 Global distribution of differences in FSNS between GenO and MRO (GenO—MRO)  
(a. January; b. July; units: W/m²)



表1 云的水平、垂直结构差异带来的全球平均辐射通量差值(单位:  $W/m^2$ )

Table 1 Global mean differences in radiative fluxes by differences in cloud horizontal and vertical structures (units:  $W/m^2$ )

	FSNS之差		FLNT之差	
	1月	7月	1月	7月
IHCLD-HCLD	0.44	0.39	0.13	0.12
GenO-MRO	-1.90	-1.72	-0.74	-0.75

云的结构变化不仅影响地面和大气顶两个边界的辐射通量,而且也影响辐射能量在大气中各层的分布状况,所以单纯从地表和大气顶来看还不够,还有必要了解能量在整层大气中的变化。辐射对大气层结的影响主要通过其对大气的辐射加热(或冷却)。因为云的水平结构对辐射场的影响是次要的,这里仅研究了不同垂直重叠条件下辐射加热率的差异。

从图7a、7b可以看出,两种重叠方案造成的短

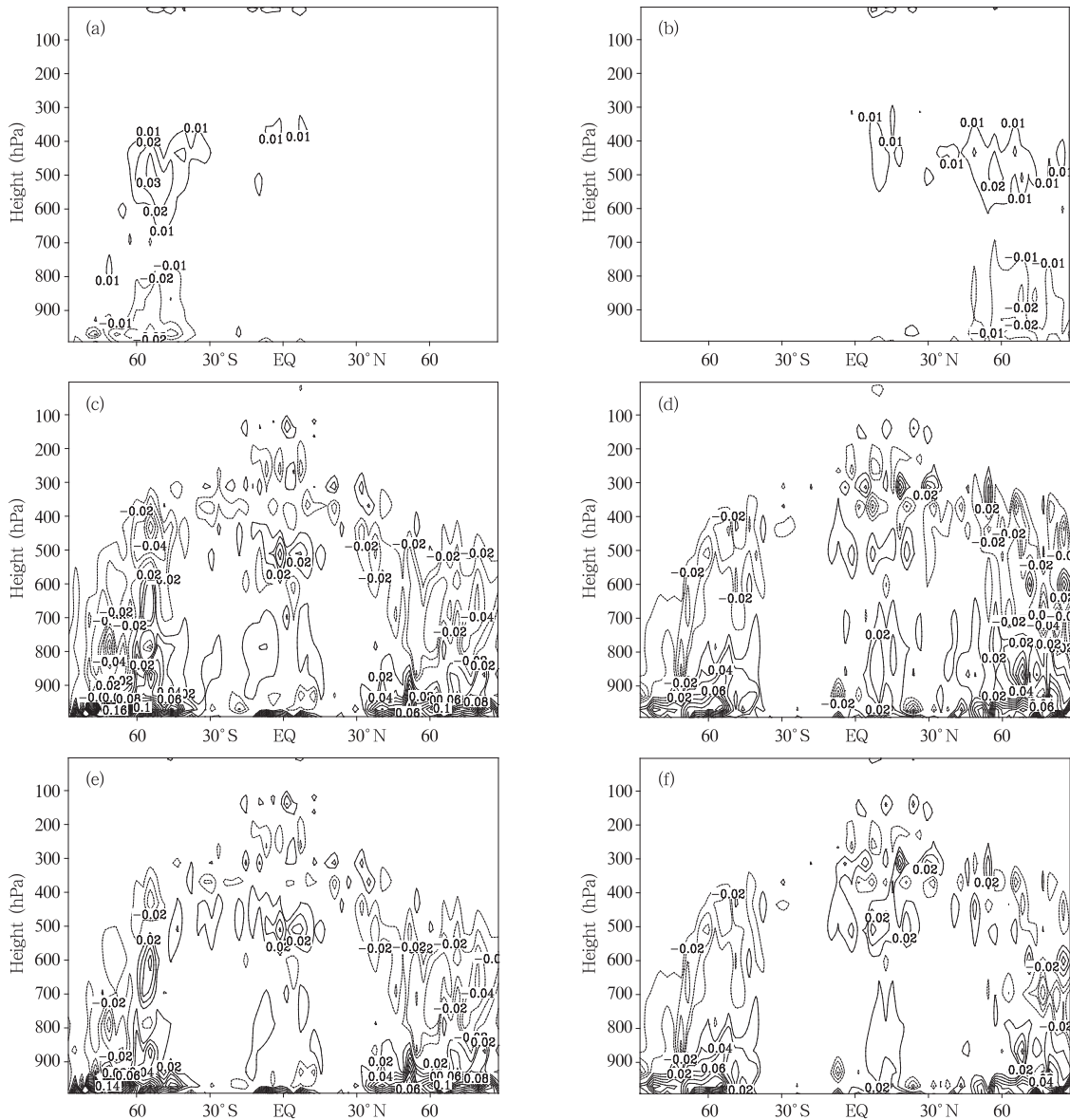


图7 GenO和MRO之间辐射加热率差值的纬度-高度分布(GenO-MRO)

(a. 1月短波加热率之差, b. 7月短波加热率之差, c. 1月长波加热率之差, d. 7月长波加热率之差, e. 1月总加热率之差, f. 7月总加热率之差)

Fig. 7 Latitude-height distribution of differences in heating rate between GenO and MRO (GenO-MRO)

(a. shortwave heating rate difference in January; b. as (a) but for July, c. longwave heating rate difference in January; d. as (c) but for July, e. total heating rate difference in January; f. as (e) but for July)

波加热率差异主要在低云密集区,显然是低云重叠差异造成的;而在云量较大且云层较厚的赤道地区,变化很小,厚的云层使得重叠结构不容易集中改变某些大气层的辐射加热作用。与 MRO 相比,GenO 使低云带下层出现一定程度的负偏差,上层出现一定程度的正偏差,偏差最大约 0.03 K/d,显示了大气层结的明显变化。这种层结变化与 GenO 更大的云量有关,云量大一方面使短波透射率减小,进而导致低云下方短波加热率的减小,另一方面使低云散射有所增强,导致低云上方短波加热率的增大。

长波加热率的情况恰好相反(图 7c、7d)。在高纬度低云带,GenO 增大的低云量使低云云底吸收了较多的地面长波辐射,从而使低云所在层以下加热率增强;同时较冷的云顶向上发射长波辐射,使上层冷却。长、短波加热率的改变在高纬度地区符号相反,一定程度上会相互抵消,但抵消的只是很小一部分;长波辐射加热率的差异(最大达到 0.18 K/d)比短波辐射加热率的差异(最大仅为 0.03 K/d)高大约 1 个量级,从图 7e、7f 可见,总辐射加热率差异中长波辐射占统治地位。这种上冷下热的差异在赤道地区并没有出现,正如前面所述,这是云层较厚所致。这种差异可能导致高纬度地区垂直运动的加强和水汽、潜热能等的重新分配。因此,云的重叠结构对辐射场乃至整个气候系统的演变都会产生不可忽视的影响。

## 5 结论和讨论

本文利用一种新的大尺度天气、气候模式随机次网格云产生器(SCG)探讨了云的次网格水平和垂直结构对地球辐射场的影响,得到以下主要结果:

(1) 与传统的水平均匀云假定相比,水平非均匀的云可造成地面净短波辐射的增加,在高纬度低云密集处的增加最大,在热带对流旺盛处增加为次大;也可造成大气顶净长波辐射的增加,高云密集的热带对流旺盛区域增加最大,从而使各纬度区域的大气能量收支发生变化。全球平均来看,云的水平分布对短波辐射通量的影响要大于其对长波辐射通量的影响,前者约  $0.4 \text{ W/m}^2$ ,后者约  $0.12 \text{ W/m}^2$ 。

(2) GenO 和 MRO 两种不同的垂直重叠方式使得总云量不同,造成长波和短波辐射通量在云量差别最大的地方出现较大偏差,其中短波辐射通量在对流旺盛处差别最大可达  $30\text{--}40 \text{ W/m}^2$ ,在低云带的纬向平均也可达到  $5 \text{ W/m}^2$  左右;大气顶长波辐射通量差异与短波辐射通量差异有相似的地区分布,但量值上较小。云的重叠方式的不同还在高纬

度大气层形成上下不同的加热率差异,从而改变大气热力层结,进而可能改变这里的垂直运动、水汽和能量分配等。

总之,云的水平分布和重叠方式的不同,首先引起有云区域能量收支的变化,进而使大气热力、动力状况以及水汽条件等发生变化,这会对气候系统的演变产生重要影响。

气候模式对次网格云-辐射过程的响应与模式本身的其他物理过程等也有很大关系,对于同一种云-辐射参数化方案,不同的气候模式可能有不同的响应。选取怎样的次网格的云结构才能达到理想的气候模拟效果,可能要跟据不同的模式自身的特点而定。由于本文使用气候模式 CAM3 的云场单向驱动云-辐射计算,排除了与气候系统其他过程的复杂相互作用,这使结果具有一定的普适性,所以其他大尺度模式在进行次网格云辐射参数化时也可作为参考。

但是本文结果仍存在一定局限性,如沿用了传统气候模式不考虑对流云辐射作用的做法,这使云-辐射作用的表达不够完整,尤其在对流活跃的热带地区,而有研究表明积云对流活动对大气辐射通量有明显影响(李剑东等,2009)。如果在模式中考虑对流云的辐射效应,所得结果可能会与本文结果有所不同,这需要进行进一步研究。再者,本文进行的是单向的云-辐射计算,没有考虑次网格云结构及辐射过程与气候系统的双向反馈作用,而次网格云-辐射过程将改变气候系统的其他环节,如大气环流、水汽循环等,这又会反馈到云本身的产生和消散并影响辐射场。在考虑这种双向反馈作用下,进一步研究次网格云结构的辐射效应及其他气候效应,是下一步要进行的工作。

**致谢:**感谢加拿大气候模拟与分析中心(CCCma)的 Jiangnan Li 博士、美国华盛顿大学大气科学系的傅强教授、McICA 方案的作者 Howard W. Barker 教授以及 Jason N Cole 博士等在论文前期以及完成过程中曾经给予过的极为重要的帮助!

## References

- Barker H W. 1999. The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry. *Quart J Roy Meteor Soc*, 125: 2127-2152
- Barker H W. 2002. The Monte Carlo Independent Column Approximation: Application within Large-Scale Models. *Proceedings of the GCSS Workshop, 20-24 May 2002, Kananaskis, Alberta, Canada* (available at <http://www.met.utah.edu/skrueger/gcss-2002/Extended-Abstracts.pdf>)
- Barker H W, Riess P. 2004. Neglect by GCMs of subgrid-

- scale horizontal variations in cloud-droplet effective radius: A diagnostic radiative analysis. *Quart J Roy Meteor Soc*, 30: 1905-1920
- Barker H W, Rienecker P. 2005. Radiative sensitivities for cloud structural properties that are unresolved by conventional GCMs. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131: 3103-3122
- Barker H W. 2008. Overlap of fractional cloud for radiation calculations in GCMs: A global analysis using CloudSat and CALIPSO data. *J Geophys Res*, 113, D00A01, doi: 10.1029/2007JD009677
- Bergman J W, Rasch P J. 2002. Parameterizing vertically coherent cloud distributions. *J Atmos Sci*, 59: 2165-2182
- Boer E R, Ramanathan V. 1997. Lagrangian approach for deriving cloud characteristics from Satellite observations and its implications to cloud parameterization. *J Geophys Res*, 102(D17): 21383-21399
- Cahalan R F, Ridgway W, Wiscombe W J, et al. 1994. Independent pixel and Monte Carlo estimates of stratocumulus albedo. *J Atmos Sci*, 51: 3776-3790
- Collins W D. 2001. Parameterization of generalized cloud overlap for radiative calculations in general circulation models. *J Atmos Sci*, 58: 3224-3242
- Geleyn J F, Hollingsworth A. 1979. An economical method for computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contrib Atmos Physics*, 52: 1-16
- Hogan R J, Illingworth A J. 2000. Deriving cloud overlap statistics from radar. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128: 2903-2909
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. New York: Cambridge University Press, 419-470
- Hu Y X, Stamnes K. 1993. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds for use in climate models. *J Clim*, 6: 728-742
- Jakob C, Klein S A. 2000. A parametrization of the effects of cloud and precipitation overlap for use in general-circulation models. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126: 2525-2544
- Kato S, Ackerman T P, Mather J H, et al. 1999. The k-distribution method and correlated-k approximation for a shortwave radiative transfer model. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 62: 109-121
- Klein S A, Hartmann D L. 1993. The seasonal cycle of low stratiform clouds. *J Clim*, 6: 1587-1606
- Li Jiandong, Liu Yimin, Sun Zhian, et al. 2009. The impacts of the radiation and cumulus convective parameterization on the radiation fluxes in SAMIL. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 67(3): 355-369
- Lindner T H, Li J. 2000. Parameterization of the optical properties for water clouds in the infrared. *J Climate*, 13: 1797-1805
- Liou K N. 1992. *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere*. New York: Oxford University Press, 172-248
- Morcrette J J, Jakob C. 2000. The response of the ECMWF model to changes in the cloud overlap assumption. *Mon Wea Rev*, 128: 1707-1732
- Morcrette J J, Barker H W, Cole J S, et al. 2008. Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Mon Wea Rev*, doi: 10.1175/2008MWR2363.1
- Pincus R, Hemler R, Klein S A. 2006. Using stochastically-generated subcolumns to represent cloud structure in a large-scale model. *Mon Wea Rev*, 134: 3644-3656
- Rienecker P, Barker H W, Khairoutdinov M F, et al. 2004. Stochastic generation of subgrid-scale cloudy columns for large-scale models. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130: 2047-2067
- Randall D A. 1989. Cloud parameterization for climate models: status and prospects. *Atmospheric Research*, 23: 345-362
- Randall D, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. 2003. Breaking the cloud parameterization deadlock. *Bull Amer Meteor Soc*, 11: 1547-1564
- Rasch P J, Kristjánsson J E. 1998. A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations. *J Climate*, 11: 1587-1614
- Stubenrauch C J, Del Genio A D, Rossow W B. 1997. Implementation of subgrid cloud vertical structure inside a GCM and its effect on the radiation budget. *J Climate*, 10: 273-287
- Tiedtke M. 1996. An extension of cloud-radiation parameterization in the ECMWF model: the representation of subgrid-scale variations of optical depth. *Mon Wea Rev*, 124: 745-750
- Wang Fang, Ding Yihui, Xu Ying. 2005. Cloud and radiation processes simulated by a coupled atmosphere-ocean model. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(5): 716-727
- Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. 1994. Cloud and radiation (I): cloud climatology and radiative effects of clouds. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 18(Suppl): 910-935
- Wetherald, R T, Manabe S. 1988. Cloud feedback processes in a general circulation model. *J Atmos Sci*, 45: 1397-1415
- Wielicki B A, Welch R M. 1986. Cumulus cloud properties using Landsat satellite data. *J Clim Appl Meteor*, 25(3): 261-276
- Xu K M, Krueger S K. 1991. Evaluation of cloudiness parameterizations using a cumulus ensemble model. *Mon Wea Rev*, 119: 342-367
- Zdankowski W G, Welch R M, Korb G. 1980. Investigation of the structure of typical two-stream methods for the calculation of solar fluxes and heating rates in clouds. *Contrib Atmos Phys*, 53: 147-166
- Zhang Feng. 2005. The study of the effect of cloud inhomogeneity in AGCM. *Climatic and Environ Research (in Chinese)*, 10(3): 574-587
- Zhang M H, Lin W Y, Bretherton C S, et al. 2003. A modified formulation of fractional stratiform condensation rate in the NCAR Community Atmospheric Model(CAM2). *J Geophys Res*, 108, D1, 4035, doi: 10.1029/2002JD002523
- Zhang Tao, Wu Guoxiong, Guo Yufu. 2002. Energy budget bias in global coupled ocean-atmosphere-land model. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 60(3): 278-289

### 附中文参考文献

- 李剑东, 刘屹岷, 孙治安等. 2009. 辐射和积云对流过程对大气辐射通量的影响. *气象学报*, 67(3): 355-369
- 汪方, 丁一汇, 徐影. 2005. 一个海气耦合模式模拟的云辐射过程. *气象学报*, 63(5): 716-727
- 汪宏七, 赵高祥. 1994. 云和辐射(I)云气候学和云的辐射作用. *大气科学*, 18(增刊): 910-935
- 张风. 2005. AGCM中云的不均匀性作用的初步研究. *气候与环境研究*, 10(3): 574-587
- 张韬, 吴国雄, 郭裕福. 2002. 海-陆-气耦合模式能量收支的误差. *气象学报*, 60(3): 278-289