

气候模式中云的垂直重叠及其辐射传输问题研究进展^{*1}

张 华^{1,2} 荆现文^{1,2}

ZHANG Hua^{1,2} JING Xianwen^{1,2}

1. 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京, 100081

2. 南京信息工程大学, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044

1. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2015-11-03 收稿, 2015-12-23 改回.

张华, 荆现文. 2016. 气候模式中云的垂直重叠及其辐射传输问题研究进展. 气象学报, 74(1):103-113

Zhang Hua, Jing Xianwen. 2016. Advances in studies of cloud overlap and its radiative transfer issues in the climate models. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(1):103-113

Abstract The latest advances in studies of cloud overlap treatments and its radiative transfer issues in the global climate models are summarized. The developments in this international challenging problem are described from aspects such as the formation of the cloud overlap model, the realization of the cloud overlap models in climate models, and the data and methods used to obtain observational consistent cloud overlap structure and the radiative transfer in overlapped clouds. To date, there have been an appreciable amount of achievements in studies of cloud overlap in climate models, as demonstrated by: scientific model (e. g. e-folding overlap) has been developed to describe cloud overlap; fast radiative transfer method for overlapped clouds (Monte Carlo Independent Column Approximation, i. e. McICA) has been invented and widely used; as well as continuous 3D cloud satellite observation (e. g. CloudSat/CALIPSO) and cloud-resolving models provide plenty of data valuable for the exact description of cloud overlap structure in climate models. However, the present treatments of cloud overlap and its radiative transfer method are far from complete, and there remain many unsettled problems needed to be explored in the future.

Key words Cloud overlap, Climate models, Parameterization

摘 要 概述了全球气候模式中云的垂直重叠的处理方法及其辐射物理过程的最新研究进展。从云垂直重叠模型的构造、模型在气候模式中的实现方式, 得到与观测一致的云重叠结构所采用的数据和方法、重叠云的辐射传输等方面, 给出了针对这一国际研究难点问题的最新研究进展。关于气候模式中云的垂直重叠问题的研究至今已取得了许多成果, 表现在: 重叠模型上有了更为科学的描述形式(如指数衰减重叠); 重叠云的辐射传输也有了更快速的处理方法(如蒙特卡罗独立柱近似)并被广泛应用; 连续的三维云遥感观测(如 CloudSat/CALIPSO)和云分辨尺度的三维云模式的发展为在气候模式中精确描述云的垂直结构提供了丰富的观测资料和模式数据。但是, 气候模式中现有的云重叠结构处理及其辐射传输方法还远不够完善, 仍然存在很多没有解决的问题需要在未来进行探索。

关键词 云重叠, 气候模式, 参数化

中图法分类号 P422 P426.5⁺3

* 资助课题: 国家科技部公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201406023)、国家自然科学基金项目(41375080)和国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403405)。

作者简介: 张华, 主要从事云-辐射相互作用及其气候影响、大气辐射传输模式等方面的研究。E-mail: huazhang@cma.gov.cn

通讯作者: 荆现文, 主要从事气候模式中的云-辐射过程研究。E-mail: jingxw@cma.gov.cn

1 云垂直重叠问题简介

覆盖地球表面约 60% 面积的云,是影响地-气系统辐射收支平衡的重要因素(Liou, 1992)。云也是地-气系统中最活跃的因素之一,与地-气系统的辐射能量收支、水分循环、大气化学和气溶胶相关过程等都有着密切联系。对云的各种物理性质和光学性质的准确模拟是影响气候模拟、气候预测的准确性和可靠性的重要因素。

大尺度模式(包括天气和气候模式)的水平尺度一般在几十千米以上,使得云通常成为次网格参量而不能被大尺度模式精确描述。虽然模式可以通过诊断方法或预报方程得到每个模式网格上云量的垂直廓线,但是网格内云的结构:包括垂直结构和水平结构并不能被显式地给出。在云的辐射传输计算中,网格内云层的垂直结构需要通过一定的重叠假定给出(Morcrette, et al, 1986; Liang, et al, 1997; Chou, et al, 1998)。与描述云相关的物理量,如云滴大小、云的相态、云水凝结量等,大多可以直接被仪器观测到或用反演算法计算得到,但多层云的垂直重叠的描述要复杂得多,很难用直接观测或反演的量来完整描述,因此也成为模式模拟中一个重要的不确定性来源。

气候模式中云的垂直重叠假定对计算有云大气的辐射传输至关重要,而正确描述云的宏观特征对云的光学参数化非常重要(汪方等, 2005; 霍娟等, 2009)。这是因为对于给定云量垂直廓线,采用不同的云重叠假定所得到的垂直投影的总云量不同,一方面导致有云和晴空部分的辐射贡献比重有差别;另一方面使云光学厚度在网格内的分布发生变化,从而影响大气顶反射和到达地表的总辐射通量以及整层大气的加热/冷却率(McFarlane, et al, 2007),这些将通过影响大气稳定度、蒸发等过程作用于大气动力过程,影响模式的整体模拟结果。例如, Barker 等(1999)利用多个例研究发现,利用通常的重叠设置得到的大气顶短波辐射通量误差常常超过 100 W/m^2 ; Li 等(2005)用理想个例也得到与此相当的误差量级;当这些云重叠假定应用于全球气候模式时,不同重叠假定在大气顶及地表的全球平均辐射通量相差可以达到 $20\text{--}40 \text{ W/m}^2$ (Morcrette, et al, 2000; 荆现文等, 2009; 张华等, 2010); 研究发现,不同模式模拟的大气顶短波和长波云辐射强

迫差异很大,而所用云垂直重叠结构的不同对这种差异的贡献超过 35% (张华等, 2013; Zhang, et al, 2013a)。由于云垂直重叠结构对有云大气辐射传输的重要作用,使得模式对外强迫(如温室气体和气溶胶等)的敏感程度也因云的垂直重叠结构差异而有明显不同(Weare, 2001),因此,减小云垂直重叠结构描述及其辐射传输处理的不确定性对于气候变化研究也具有重要意义。

文中概述了以往有关气候模式中云的垂直重叠结构的处理方法及其辐射传输过程的研究状况,以期对气候模式中该类问题的处理提供有价值的参考,并提出未来研究中需要解决的问题。

2 云垂直重叠模型的发展

2.1 传统形式的云垂直重叠模型

传统的云垂直重叠模型大多采用固定形式的重叠假定,常见的有最大重叠、随机重叠、最大-随机重叠(图 1)。其中最大重叠简单地将最大层云量作为垂直投影的总云量,以简单的两层云(假设为 k 层和 l 层,分别具有云量 C_k 和 C_l)情形为例,总云量表示为

$$C_{k,l}^{\max} = \max(C_k, C_l) \quad (1)$$

观测或模式中只要给出 C_k 和 C_l 即可按照式(1)得到总云量。这对于在垂直方向上相衔接的云层是比较合理的,但是对于垂直上不相邻的云块、尤其是在全球大气模式的网格尺度上是不够真实的,会造成总云量的系统低估(Tian, et al, 1989)。

随机重叠认为云层是完全不相关的,其总云量表示为

$$C_{k,l}^{\text{ran}} = C_k + C_l - C_k C_l \quad (2)$$

观测或模式中给定 C_k 和 C_l , 即可按式(2)得到随机重叠的总云量。Tian 等(1989)研究表明,这一假定在特定的区域(如中纬度海洋)和恰当的水平分辨率、且对于不相邻云层能够给出较准确的总云量,但是对于其他情形将不再适用,如对于深厚的强对流系统,随机重叠将大大高估总云量(Morcrette, et al, 2000)。

最大-随机重叠是最大重叠和随机重叠的结合,可认为相接云层是最大程度重叠,而有晴空相隔的云层是随机重叠的。对于多层云系统,可按式(1)得到相邻云层的重叠总云量,而被晴空隔开的云块可将每个云块的总云量代入式(2)计算最终的总云量。

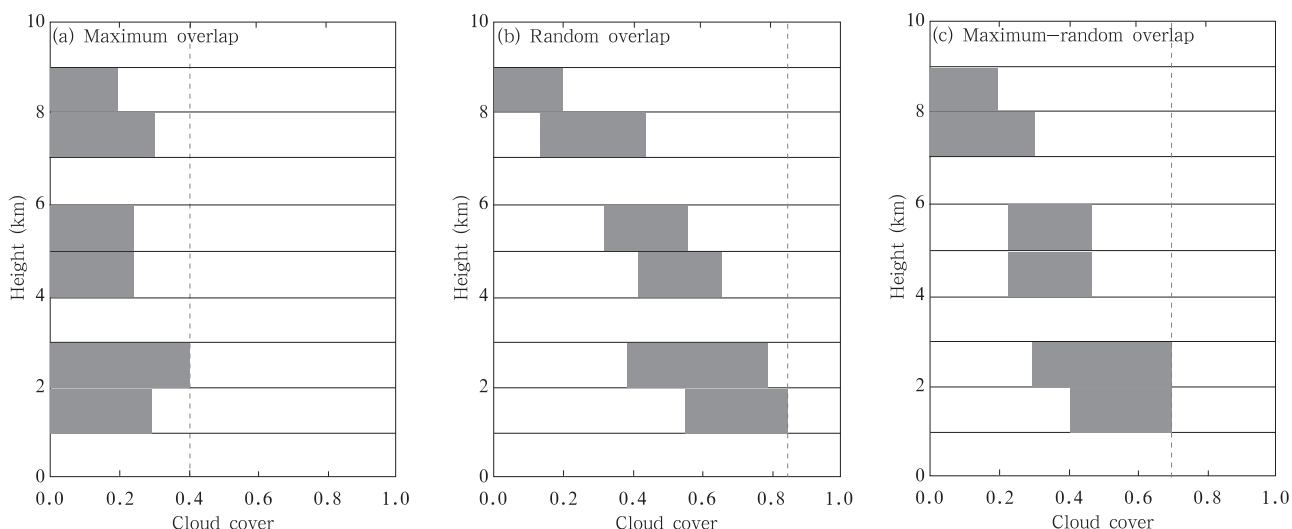


图1 GCM中常用的3种重叠假定示意(Hogan, et al, 2000)

(a. 最大重叠假定, b. 随机重叠假定, c. 最大-随机重叠假定;
阴影表示垂直方向上的云层, 虚线表示重叠后总云量的大小)

Fig.1 Diagrams of the three overlap approximations traditionally used in GCMs (Hogan, et al, 2000)

(a. maximum overlap, b. random overlap, c. maximum-random overlap; shaded are cloud layers in the vertical direction, dashed lines indicate vertically projected total cloud fraction after overlapping)

这种折衷的重叠模型相比最大重叠和随机重叠更具有合理性,当前模式大多采用的是最大-随机重叠假定(Collins, 2001; Barker, 2008a)。但最新的研究表明,最大-随机重叠也不够准确,相接云层并不是简单的最大程度重叠(Hogan, et al, 2000),而是随着云的厚度而变化的。需要特别指出的是,最大-随机重叠和随机重叠的一个明显不足是,它们都与模式的垂直分辨率有很大联系(Räisänen, 1998; Bergman, et al, 2002),同样的重叠假定应用于不同垂直分辨率上得到的云量分布、辐射计算结果会有很大差异。这种非真实的分辨率依赖性显然不利于模式不断向更高分辨率发展(Oreopoulos, et al, 2003; Stephens, et al, 2004)。

2.2 指数衰减重叠

以上3种传统的重叠假定及其他一些变换形式都过于固定,缺乏可变性,而且没有明确的物理基础和观测依据,模式在使用这些假定时往往需要人为调整辐射程序以使大气顶能量达到一定的统计平衡(Stephens, et al, 2004)。实际大气云的垂直重叠关系比以上模式假定要复杂得多,采用单一、固定形式的假定显然是不够准确的。

从21世纪初开始,国际上开始对云垂直重叠结

构进行定量化的研究。Hogan等(2000)首次用高垂直分辨率的雷达资料,研究了英国范围云的垂直重叠关系,发现云层之间的重叠关系随着它们之间的垂直距离增大而迅速减弱,这与大多数大尺度模式假定的最大-随机重叠是不同的。Mace等(2002)把以上研究方法扩展到包括热带、中纬度、北极等更广泛的地区,也得到了相似的规律。Bergman等(2002)在以上研究基础上,进一步提出了一个“抗相关厚度”参数(以下以 L_{cl} 表示)来表示云层间的重叠关系,利用一个指数函数很好地再现了云层重叠随云间垂直距离的变化关系。该方法充分体现了云层重叠程度与垂直距离的关系,并且避免了其对模式分辨率的依赖,被称为指数衰减重叠,它根据两层云之间的垂直高度差判断其重叠关系,使云的重叠结构具有多样性,能够体现不同类型云的特点。

指数衰减重叠模型将上下两层(标记为第 k 和第 l 层)的垂直投影的总云量写为

$$C_{k,l} = \alpha_{k,l} C_{k,l}^{\max} + (1 - \alpha_{k,l}) C_{k,l}^{\text{ran}} \quad (3)$$

式中, $C_{k,l}^{\max}$ 和 $C_{k,l}^{\text{ran}}$ 分别为假设最大重叠和随机重叠时的总云量。 $\alpha_{k,l}$ 是两层云的重叠系数,反映两层云之间的重叠程度, $\alpha_{k,l}$ 越大,则重叠程度越高。当重叠

系数 $\alpha_{k,l} = 1$ 时,指数衰减重叠即为最大重叠,而当 $\alpha_{k,l} = 0$ 时,即为随机重叠,当 $\alpha_{k,l}$ 位于 0—1 时,重叠关系介于最大和随机之间。 $\alpha_{k,l}$ 可以由以下公式计算

$$\alpha_{k,l} = \exp\left[-\int_{Z_k}^{Z_l} \frac{dz}{L_{cf}(z)}\right] \quad (4)$$

式中, L_{cf} 是云层的抗相关厚度,表示重叠系数减小为 e^{-1} 时的层间距离,此时两层云的重叠程度已经很小,接近于随机重叠。

对于不同云系统、水平分辨率, L_{cf} 特性也不同,实际应用中可对具体的观测云场计算相应的 L_{cf} 。对于一个观测的云场,总云量 $C_{k,l}$ 是已知的, $C_{k,l}^{\max}$ 和 $C_{k,l}^{\min}$ 可按照式(1)和(2)计算得到,由式(3)可计算得到 $\alpha_{k,l}$,进一步由式(4)(已知云层高度 Z_k 和 Z_l)即可计算 L_{cf} 。

指数衰减重叠比其他重叠方案最明显的优越性在于其实现了云垂直重叠这一宏观特性的“量化”描述,使其有了量化标准。因此,越来越多的大尺度天气和气候模式开始采用这种新的重叠模型(Pincus, et al, 2006; Morcrette, et al, 2008; Shonk, et al, 2010a; Räisänen, et al, 2010; 荆现文等, 2009; Zhang, et al, 2013b, 2014)。

指数衰减重叠只是给出了定量描述云垂直重叠的数学方法,在指数衰减重叠假定下,新的问题是:如何给出恰当的 L_{cf} 值,使重叠情况更接近真实? 理论上,只要给出真实的 L_{cf} 随时间、区域以及高度的变化,利用指数衰减重叠模拟的总云量就能足够真实。随着云垂直剖面探测技术的发展,系统研究并得到 L_{cf} 参数的时空分布规律的条件也已经成熟。已有许多学者利用不同资料从不同的时间和空间尺度对 L_{cf} 的特征进行了研究。Barker (2008a, 2008b) 利用一个月的 CloudSat 和 CALIPSO 卫星数据(Stephens, et al, 2008)进行了 L_{cf} 随云量、日出、日落等的统计分析,给出了纬向平均的 L_{cf} 分布。Zhang 等(2013b)同样利用 CloudSat 和 CALIPSO 卫星资料侧重研究了东亚地区不同区域的 L_{cf} 季节变化。

虽然基于指数衰减重叠模型的研究已有很多,但是就气候模拟实际应用而言,由于云本身的极端复杂性,至今还没有很完善的方案能够在模式中真实地表现出 L_{cf} 的复杂变化,仅有一些非常简化的近似参数化方案。Shonk 等(2010a, 2010b)根据地基

雷达观测结果给出简单的 L_{cf} 随纬度的线性变化关系,但是却没能体现云重叠随时间的变化。Oreopoulos 等(2012)根据 CloudSat/CALIPSO 卫星观测结果,用纬度和儒略日的函数表示 L_{cf} 的变化,虽然能够一定程度上反映云垂直重叠的时、空变化特征,但是这一方法不适用于对未来气候变化的模拟研究,因为这一函数并不随未来云系统(云系构成、云系动力过程等)的变化而变化。Zhang 等(2014)则针对对流云和其他类型云的重叠特征差异,给出了一个用不同类型云的云量计算 L_{cf} 的参数化方法

$$L_{cf} = [L_{cf-1} f_{con} + L_{cf-2} (f_{tot} - f_{con})] / f_{tot} \quad (5)$$

式中, L_{cf-1} 和 L_{cf-2} 分别是深对流云和其他类型云的抗相关厚度(分别取经验常数 10 km 和 1 km), f_{con} 和 f_{tot} 分别为深对流云量和总云量。该方法的优点在于可以使 L_{cf} 动态反映云系统的变化,同时能够给出 L_{cf} 在垂直高度上的变化。但是该参数化方法仅区分了深对流云和其他类型云,对于浅层对流云、层状云、卷云等没有做进一步区分,因此还有待进一步的研究加以完善。

2.3 云重叠模型对辐射场的影响

除总云量以外,检验云的重叠假定是否可行的另一个重要标准是其能否使计算的相应辐射场更加符合实际。然而,在实测情形中,影响辐射计算的因素除了云宏观特征外,还有云的微观属性(如云滴尺度和数浓度、冰晶尺度和形态等)和光学属性(消光系数、单次散射比等),这些因素很难在较大的空间尺度上精确地观测得到,从而为利用实测云和辐射资料来判断不同云重叠假定的优劣增加了难度。一些研究仅采用观测的三维云场的宏观信息,在人为给定其微观和光学参数的基础上诊断不同云重叠假定的辐射误差,如 Barker(2008a)利用 CloudSat 和 CALIPSO 卫星的全球云场简要探讨了短波辐射对 L_{cf} 的敏感性。

更多的研究采用云分辨尺度的模式(称为云分辨模式或云系统分辨模式,简称 CRM)模拟云场来代替实测云:通过固定云微观和光学属性、变换云的重叠假定,将相应的辐射场与利用精细云场直接计算得到的辐射场对比即可判定不同云重叠假定的有效性。Barker 等(1999)利用一个云分辨模式的 3 个瞬时模拟结果比较了随机重叠和最大-随机重叠的辐射场差异,对于该云场随机重叠的辐射模拟误差在太阳高度角较大时可达 250 W/m^2 ,云的短波

辐射反照率普遍被高估;采用最大-随机重叠时辐射误差有所减小,但是云的短波辐射反照率普遍被低估,这说明实际重叠情形应该介于随机重叠和最大-随机重叠之间。Wu 等(2005)利用一个云分辨模式进行了1个月的模拟,诊断了随机重叠的误差,发现随机重叠高估了总云量的同时也减少了到达地表的短波辐射通量(月平均减少约 5.2 W/m^2)。Barker 等(2005)在指数衰减重叠下,利用一个全球云分辨模式结果着重讨论了不同纬度云辐射强迫对 L_{cf} 的敏感性,结果表明热带地区和南半球中纬度海洋云辐射强迫对 L_{cf} 的变化最为敏感,可达约 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{km})$ 。Wang 等(2016)用一个云分辨模式云场详细比较了最大重叠、随机重叠、最大-随机重叠和指数衰减重叠4种假定的辐射差异,结果表明,最大重叠和最大-随机重叠都显著低估了短波/长波云辐射强迫,而随机重叠则相反;短波和长波辐射强迫的最大误差分别可达 100 和 60 W/m^2 ;指数衰减重叠得到的辐射误差仅为上述传统重叠形式的 $1/3$,同时指数衰减重叠也显著减小了传统重叠形式的辐射加热率误差,这充分显示了指数衰减重叠的优越性。

从以往的研究不难总结出以下一般性的结论:(1)云重叠假定的选择对辐射场、尤其是瞬时辐射场的影响非常可观;(2)最大重叠、最大-随机重叠一般低估云对短波辐射的反射和向外太空的长波发射、增加到达地表的短波辐射,而随机重叠则相反;(3)指数衰减重叠具有明显优越性,但其效果受具体的云类型和参数 L_{cf} 设置的影响。这些结论对于气候模式云重叠参数化具有重要的参考价值。

鉴于指数衰减重叠的优越性,更多的气候模式倾向于采用这种最新的云重叠模型。例如, Morcrette 等(2008)在欧洲中期天气预报中心(EC-MWF)的模式中用最新的指数衰减重叠代替原有的最大-随机重叠后,该模式模拟的长、短波云辐射强迫都有了非常明显的改进;张华等(2010)、Zhang 等(2013b)研究表明中国国家气候中心大气环流模式 BCC_AGCM 的辐射场模拟对云重叠结构的变化也有明显的响应;Zhang 等(2014)进一步在 BCC_AGCM2.0.1 模式中给出区分不同云类型的指数衰减重叠形式,从而减小了热带对流区域与其他区域的云量和辐射场误差。正如上面所述,目前气候模式中的云重叠参数化研究主要在于在指数衰减重叠

形式下如何更好地给出参数 L_{cf} 的变化(Tompkins, et al, 2015)。

3 重叠云的辐射传输实现方法

为表述方便,以下将“考虑了次网格云重叠结构的云”称为“重叠云”。由于重叠云中涉及到部分覆盖的云层(即云层仅覆盖某个模式层的一部分),而辐射传输过程本身只能直接计算晴空和全云(云覆盖整个模式层)情况,因此考虑重叠云的辐射传输过程,需要借助于一定的方法才能实现。即使对于相同的云重叠模型,采用不同的辐射传输方法也会对辐射计算结果产生一定的影响;而重叠云的辐射传输方法也对辐射计算的效率以及云-辐射过程的灵活性产生较大影响。以下列举几种常见的云重叠模型的辐射传输计算方法。

3.1 云矩阵方法

对于次网格重叠的处理,传统上多采用云矩阵法处理,Li(2000)对云矩阵处理重叠结构的方法做了详细的介绍。利用云矩阵来表达云重叠最初来自 Manabe 等(1964)的工作,Harshvardhan 等(1987)、Liang 等(1997)、Räisänen(1998)、Morcrette 等(2000)应用并改进了该方法,提高了云矩阵法的准确度。

但是在大气辐射传输计算中利用云矩阵法处理云的垂直重叠有其明显的弊端。Räisänen(1998)指出,利用云矩阵法处理红外辐射传输时,通常用量和云的发射率合并为一个等效云量来处理云层的红外发射,这种做法和最大-随机重叠或最大重叠结合时,其计算结果比较容易受到模式垂直分辨率的影响。Li 等(2005)则对云矩阵法的短波辐射效果进行了详细的检验,结果显示,即使抛开特定云重叠模型的影响,单纯云矩阵法本身就带来很大的短波辐射计算误差。另外,云矩阵法所需的计算时间较长、内存占用空间也比较大,而且不能用在某些二流近似辐射传输解法中(Li, 2002)。

3.2 马赛克方法

Liang 等(1997)提出了一个处理多层云重叠的“马赛克”方法,在 GCM 辐射参数化中显式地考虑对流云、卷云和层状云的垂直相关。该方案将模式网格按照云的类型和相应云量划分为若干次网格,每个次网格上的各层云量只能为 1 或 0;对流云按照云量最大的一层分配所占的次网格面积比例,从

云顶到云底具有统一的云量 1, 并采用最大重叠模型; 卷云(被认为是对流云顶的延展)和层状云则按照面积比例分配于其余次网格内, 其中层云之间的重叠采用前文介绍的最大-随机重叠模型, 而卷云与层云间的重叠则采用随机重叠模型。尽管“马赛克”方法考虑到了不同种类云的重叠, 但是具体到某类云仍采用的是传统的重叠模型, 因此对模式水平和垂直分辨率有较大的依赖。

3.3 McICA——云的重叠模型和辐射计算方案的分离

以上几类重叠云的辐射传输过程都是在辐射传输计算中植入云结构描述模块, 并且与辐射方案紧密相连, 使得对次网格云结构描述的改变和辐射方案的更新都缺乏灵活性。

Pincus 等(2003)基于独立气柱近似提出了一种快速、灵活的、可以用于任意云重叠形式和云非均匀分布的辐射计算方案, 称为蒙特卡洛独立气柱近似(McICA)。在蒙特卡洛独立气柱近似辐射积分方案下, 次网格的云信息可由 Räisänen 等(2004b)提出的次网格随机云产生器给出, 该云产生器将大尺度网格上的云水/冰水含量等信息根据一定的重叠规则在次网格内进行分配。

这种云产生器和蒙特卡洛独立气柱近似相结合的新的云-辐射计算框架将对云的次网格结构的描述和它们的辐射传输计算完全分离: 一方面, 云的结构描述完全在云产生器中完成, 无论是将云的垂直重叠和水平分布等结构调整趋向某种观测事实还是某种假设的理想状况都比较方便; 另一方面, 辐射传输计算不用再繁琐地处理云的垂直重叠、水平分布等问题, 仅需进行晴空和全云两种情况的辐射传输方程求解即可, 因此, 也大大方便了辐射方案的选择和改进。

由于蒙特卡洛独立气柱近似的云-辐射方案形式灵活, 具有进一步改进次网格云结构和辐射计算的潜力, 越来越多的大尺度天气、气候模式开始采用蒙特卡洛独立气柱近似的云-辐射方案, 如地球流体动力实验室(GFDL)的全球环流模式 AM2(Pincus, et al, 2006)、欧洲中期天气预报中心的集合预报系统 IFS(Morcrette, et al, 2008)和业务季节预报系统(Tompkins, et al, 2009)、德国马普气象研究所的大气环流模式 ECHAM5(Räisänen, et al, 2010)以及 NCAR 的 CAM5 模式(Neale, et al,

2010)。蒙特卡洛独立气柱近似方案也已经在中国国家气候中心全球气候模式 BCC-AGCM2.0.1 中得到应用(荆现文等, 2012; Zhang, et al, 2014), 其中包含了多种可供选择的云重叠形式。

4 研究数据和方法

对于云垂直重叠参数化方案, 详尽、可靠的三维云数据是至关重要的。目前云垂直结构研究的数据来源主要有卫星和地基遥感观测以及数值模拟两类。数据来源不同, 研究方法和侧重点也存在差别。

4.1 三维云遥感观测

由卫星和地基遥感观测手段获取的云系统垂直剖面为云重叠研究提供了第一手资料, 可通过对资料的处理和分析寻找描述云重叠假定中需要的真实参数。这些观测结果直接来源于研究对象, 是对实际状况的最直接、最准确的描述, 因此也是云重叠参数化研究的最理想的数据支撑。

目前国际上在利用卫星探测云的方面取得了飞跃的进步, 如美国国家航空航天局(NASA)从 2006 年 7 月开始用 CloudSat(搭载 94 GHz 云雷达)和 CALIPSO(搭载激光雷达)极轨卫星联合观测(Stephens, et al, 2008), 首次在全球范围连续进行云垂直剖面观测; 大气辐射观测计划(ARM)则从地面观测入手, 利用地面遥感和现场观测等多种手段在全球不同站点进行气象场和云的连续观测(Ackerman, et al, 2003)。目前国际上已有大量的研究成果从不同地区、不同云类型等方面给出了云的垂直结构信息和云的宏/微观物理和光学特征, 如基于 CloudSat/CALIPSO 卫星遥感资料的研究(Barker, 2008a, 2008b; Kato, et al, 2010; Li, et al, 2015; Peng, et al, 2014), 以及基于地基 ARM 雷达资料的研究(Huang, et al, 2005; Naud, et al, 2008)。其中很多研究(如 Barker, 2008a, 2008b; Kato, et al, 2010; Oreopoulos, et al, 2012 等)都探讨了指数衰减重叠中重要参数的时空变化规律, 如 Barker(2008a, 2008b)和 Oreopoulos 等(2012)揭示了 L_{cf} 的纬向分布及其随季节的变化规律; Kato 等(2010)指出 L_{cf} 对云顶高度有一定的依赖性; Naud 等(2008)在热带和中纬度地区大气动力和状态条件对云重叠的影响方面得到了一些规律性的结果。这些研究为大尺度模式中的云垂直重叠参数化提供了参考依据, 但也充分展示了描述云重叠现象的复杂性。

中国也开展了大量的卫星和地基遥感观测,对云的宏观和内部结构进行了细致的研究。在卫星遥感方面,很多研究(李积明等,2009;王帅辉等,2011;汪会等,2011;彭杰等,2013)利用 CloudSat 卫星资料,对中国及周边区域各类云的垂直结构参数和地理分布、季节变化进行了统计分析,为了解本区域的云垂直结构气候特征提供了大量观测事实;杨冰韵等(2014)和张华等(2015)利用 CloudSat 资料分别研究了全球和东亚地区云的光学厚度、云水路径、有效半径等微物理属性的时空分布。同样基于卫星观测资料,傅云飞等(2012)和尹金方等(2013)则从云内降水的角度研究了亚洲大陆云的垂直结构,给出了云内雷达反射率垂直分布随季节、云类型等的变化特征以及降水云和非降水云在雷达反射率垂直结构上的差异,这些都有助于提高人们对云水含量的垂直分布规律的认识。在地基遥感方面,黄兴友等(2013)比较了云雷达、激光云高仪等多种仪器对云底高度的观测精度;吴举秀等(2014)利用 94 GHz 云雷达研究了云系结构变化和云内小尺度变化;卜令兵等(2014)利用激光雷达和毫米波云雷达研究了卷云的宏观物理特性;周天等(2013)则利用地基双波段偏振激光雷达侧重研究了黄土高原地区云的垂直结构。这些研究从不同的仪器、不同的视角提供了云的垂直结构信息,对了解云垂直结构特征以及其在大尺度模式中的参数化描述有很高的参考价值。与国际上的研究相比,中国的研究大多侧重于对云出现的高度的直接描述,比如多层云出现的高度分布、云水含量或雷达回波强度在不同高度上的差异;但是缺乏在气候网格尺度上分析不同高度云层相对位置的关系和变化规律,而这些信息对模式中的云重叠参数化至关重要。加强云垂直结构遥感数据在云重叠参数化等气候模拟方面的开发应用是中国云观测领域未来一个值得关注的研究方向。

需要指出的是,这些观测资料或观测手段也存在一定的不足,例如:CloudSat/CALIPSO 极轨卫星观测虽然在较长时段上能够基本覆盖全球,但是在某一特定区域上无法给出连续时间的观测;ARM 虽然在固定的站点区域对大气和云的观测足够详细和时间连续,但是这种观测也只能在分散的样点上,在空间上很难做到足够密集。除了上述时空连续性上的不足,观测资料的综合性往往也不够理

想,不同观测手段往往只专长于探测某种要素,而缺失其他要素(例如 CloudSat 对云的探测比较精细,但却不能给出相应的气象场数据),难以建立云和其他要素的联系,这一定程度上限制了云重叠结构与其相关物理量的关联分析。

4.2 三维云模拟

在云的参数化发展方面,国际上另一种比较成熟、有效的方法是利用水平分辨率达到几千米或者更小尺度的云分辨模式,从云和其他气象场在小尺度上的联系,通过统计或其他分析方法得到云在较大尺度上的参数化方法(GEWEX Cloud System Science Team, et al, 1993; Xu, et al, 2002; Randall, et al, 2003; Inoue, et al, 2008, 2010; Cheng, et al, 2011; Mrowiec, et al, 2012)。全球能量和水循环试验(GEWEX)早在 1992 年就将云分辨模式的发展作为其长期的、主要的云系统研究手段之一:气象场观测资料首先被用来发展和验证云分辨模式,云分辨模式随之用做大尺度云参数化的“试验场”(GEWEX Cloud System Science Team, et al, 1993),为气候和数值预报模式提供优化的参数化方法。Xu 等(2002)比较了几种云分辨模式对中纬度积云对流的模拟情况,结果表明:几种云分辨模式模拟的对流强度、温度和比湿变化、云水路径和云量分布等与 ARM 站点观测结果都很接近,云分辨模式比较合理地模拟了积云对流过程,因此云分辨模式的结果非常适用于发展单气柱模式(SCM)、全球模式(GCM)的参数化方案。Randall 等(2003)也指出,云分辨模式可以用来提高人们对云的物理机制的认识,提供包含各种大气参数的综合四维数据集、发展和测试适用于大尺度模式的云参数化方案。

对于“云垂直重叠结构”这样一个具有大尺度特征,又与次网格动力、热力过程有密切联系的研究对象,云分辨模式无疑是一种非常适合的研究工具。例如,Oreopoulos 等(2003)利用云分辨模式研究了对流云中云重叠关系随着云层距离增大的变化规律,得到了与地基雷达(Hogan, et al, 2000, 2003)非常相似的结果,显示了云分辨模式在研究云垂直结构上的可靠性;Räisänen 等(2004b)进一步利用一个全球云分辨模式的三维云产品研究了不同云重叠假定对云量和辐射通量的影响,并给出了云重叠参数 L_{cl} 在垂直方向上的分布;Barker 等(2005)利用云分辨模式模拟的两个对流云和层状云的个例研

究了其非常不同的重叠特征和辐射效应; Neggers 等(2011)则在一个更小的区域内(25.6 km × 25.6 km)模拟了边界层云的重叠统计特征。虽然这些研究给出了一些关于云重叠结构特征和变化规律的很有价值的结论,但是,由于云重叠结构本身的复杂性,这些研究都没有给出可应用于大尺度模式中的普适性的云重叠参数化方法,因此对于气候模拟应用来说,对云的垂直结构研究未来还有大量的工作要做。

5 未来需要研究的问题

虽然对云的垂直重叠结构研究取得了以上诸多研究成果,但气候模式中的云垂直重叠处理还远不够完善。未来云的重叠研究至少还需要考虑以下问题:

(1) 云重叠特征与动力环境的联系:云重叠特征和大气风场、对流稳定度等有着密切的关系(Naud, et al, 2008)。一种理想的情况是在模式中建立云重叠结构与大气动力条件、大气状态等其他气象要素之间的物理参数化模型,从而使云的重叠结构最真实地反映与其伴随的天气过程。Zhang 等(2014)建立的云类型与云重叠结构的经验公式是对这一问题的初步尝试,但该方案较为简化,仅将深对流云和其他种类的云加以区分,不足以完整描述云的复杂性,而且没有直接运用动力学变量,因此未来还需进一步完善。

(2) 云重叠过程在辐射和降水/蒸发过程中的统一问题:这里讨论的云垂直重叠问题主要是和辐射过程相关,这是因为大多数气候模式中辐射和降水/蒸发过程对云的处理是各自独立的。Morcrette 等(2000)最早在模式中同时考虑了辐射和降水过程中的云重叠问题,其研究表明,虽然云重叠问题在降水/蒸发过程的影响要小于在辐射过程中的影响,但仍是不可忽视的,两者应该统一起来。然而至今,这方面的研究还非常少,大多数模式仍然未对这一问题加以考虑。

(3) 云水重叠的问题:云内凝结水(包括液水和冰)在水平方向往往是不均匀分布的,因此在考虑云水的水平非均匀性时,云的垂直重叠就不仅应包括云出现位置的重叠处理,还应包括云水含量的垂直关系处理,这无疑将增加云重叠参数化的复杂程度(Räisänen, et al, 2004a, 2004b; Pincus, et al,

2005, 2006)。如何真实、合理地构建这种参数化关系还需要更多的研究工作。

(4) 云重叠与网格尺度的关系:对于同样的云场,从不同的网格尺度上去看,云的重叠特征会有很大的差异,因此云的重叠参数化是应该与目标网格尺度相对应的(Hogan, et al, 2003)。随着气候模式网格分辨率的不断提高,如何在云垂直重叠参数化方法中考虑网格尺度的变化对云重叠的真实性、有效性的影响,将是一个重要挑战。

(5) 发展云分辨的全球气候模式将是未来精确描述云-辐射过程的方向。这样可以精确地显式描述目前所谓的次网格云的结构及其辐射传输过程,无需进行它们的参数化。

6 结 语

云的垂直重叠问题源于模式分辨率过低、模式网格内同时存在晴空和云层的情况。当模式分辨率普遍发展到可显式给出每个云块(如云分辨模式那样),云重叠的问题也就不复存在。但这将是一个很漫长的过程,在可预见的未来还难以实现。因此,云的垂直重叠问题在当前仍需予以重视。

从以上对已有研究的追述来看,云的垂直重叠问题研究由来已久,到目前为止已经取得了丰硕的成果,不仅从重叠模型上有了更为科学的形式(指数衰减重叠),从实现手段上也有了较大进步(蒙特卡罗独立气柱近似)。但是面向未来,挑战仍然很多,需要有更系统和完整的观测数据和模拟试验来获得更接近实际情况的参数化方法或者预报方程,才能逐渐解决这些难题。

最后需要指出的是,气候模式中对云的垂直重叠的描述是基于模式平均云(云量和云水含量)廓线进行的,其模拟是否正确直接影响到云垂直重叠的正确性,因此在改进云重叠模型的同时不应忽视对云本身参数化过程的改进与提高。

参考文献

- 卜令兵, 覃艳秋, 吴放等. 2014. 基于激光雷达和毫米波云雷达的卷云特性分析. 强激光与粒子束, 26(10): 109003-1-6. Bu L B, Qin Y Q, Wu F, et al. 2014. Analysis of cirrus properties based on micro-pulse lidar and millimeter wave cloud radar. High Power Laser Part Beams, 26(10): 109003-1-6 (in Chinese)
- 傅云飞, 曹爱琴, 李天奕等. 2012. 星载测雨雷达探测的夏季亚洲

- 对流与层云降水雨顶高度气候特征. 气象学报, 70(3): 436-451. Fu Y F, Cao A Q, Li T Y, et al. 2012. Climatic characteristics of the storm top altitude for the convective and stratiform precipitation in summer Asia based on measurements of the TRMM Precipitation Radar. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 436-451 (in Chinese)
- 黄兴友, 夏俊荣, 卜令兵等. 2013. 云底高度的激光云高仪、红外测云仪以及云雷达观测比对分析. 量子电子学报, 30(1): 73-78. Huang X Y, Xia J R, Bu L B, et al. 2013. Comparison and analysis of cloud base height measured by ceilometer, infrared cloud measuring system and cloud radar. *Chinese J Quant Elect*, 30(1): 73-78 (in Chinese)
- 霍娟, 吕达仁. 2009. 三维辐射传输模式分析非均匀云对天空辐射场影响. 大气科学, 33(1): 168-178. Huo J, Lü D R. 2009. Simulations of inhomogeneous cloud and its effects on radiative distribution of atmosphere with a 3D radiative transfer model. *Chinese J Atmos Sci*, 33(1): 168-178 (in Chinese)
- 荆现文, 张华, 郭品文. 2009. 气候模式中云的次网格结构对全球辐射影响的研究. 气象学报, 67(6): 1058-1068. Jing X W, Zhang H, Guo P W. 2009. A study of the effect of sub-grid cloud structure on global radiation in climate models. *Acta Meteor Sinica*, 67(6): 1058-1068 (in Chinese)
- 荆现文, 张华. 2012. McICA 云-辐射方案在国家气候中心全球气候模式中的应用与评估. 大气科学, 36(5): 945-958. Jing X W, Zhang H. 2012. Application and evaluation of McICA Cloud-Radiation Framework in the AGCM of the National Climate Center. *Chinese J Atmos Sci*, 36(5): 945-958 (in Chinese)
- 李积明, 黄建平, 衣育红等. 2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征. 大气科学, 33(4): 698-707. Li J M, Huang J P, Yi Y H, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data. *Chinese J Atmos Sci*, 33(4): 698-707 (in Chinese)
- 彭杰, 张华, 沈新勇. 2013. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究. 大气科学, 37(1): 91-100. Peng J, Zhang H, Shen X Y. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data. *Chinese J Atmos Sci*, 37(1): 91-100 (in Chinese)
- 汪方, 丁一汇. 2005. 气候模式中云辐射反馈过程机理的评述. 地球科学进展, 20(2): 207-215. Wang F, Ding Y H. 2005. An evaluation of cloud radiative feedback mechanism in climate models. *Adv Earth Sci*, 20(2): 207-215 (in Chinese)
- 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征. 大气科学, 35(6): 1117-1131. Wang H, Luo Y L, Zhang R H. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data. *Chinese J Atmos Sci*, 35(6): 1117-1131 (in Chinese)
- 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚等. 2011. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区各类云的宏观特征分析. 气象学报, 69(5): 883-899. Wang S H, Han Z G, Yao Z G, et al. 2011. An analysis of cloud types and macroscopic characteristics over China and its neighborhood based on the CloudSat data. *Acta Meteor Sinica*, 69(5): 883-899 (in Chinese)
- 吴举秀, 魏鸣, 周杰. 2014. 94 GHz 云雷达回波及测云能力分析. 气象学报, 72(2): 402-416. Wu J X, Wei M, Zhou J. 2014. Echo and capability analysis of 94 GHz cloud radars. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 402-416 (in Chinese)
- 杨冰韵, 张华, 彭杰等. 2014. 利用 CloudSat 卫星资料分析云微物理和光学性质的全球分布特征. 高原气象, 33(4): 1105-1118. Yang B Y, Zhang H, Peng J, et al. 2014. Analysis on global distribution characteristics of cloud microphysical and optical properties based on the CloudSat data. *Plateau Meteor*, 33(4): 1105-1118 (in Chinese)
- 尹金方, 王东海, 翟国庆等. 2013. 基于星载云雷达资料的东亚大陆云垂直结构特征分析. 气象学报, 71(1): 121-133. Yin J F, Wang D H, Zhai G Q, et al. 2013. A study of cloud vertical profiles from the CloudSat data over the East Asian Continent. *Acta Meteor Sinica*, 71(1): 121-133 (in Chinese)
- 张华, 荆现文. 2010. 气候模式中云的垂直重叠假定对模拟的地-气辐射的影响研究. 大气科学, 34(3): 520-532. Zhang H, Jing X W. 2010. Effect of cloud overlap assumptions in climate models on modeled Earth-atmosphere radiative fields. *Chinese J Atmos Sci*, 34(3): 520-532 (in Chinese)
- 张华, 彭杰, 荆现文等. 2013. 东亚地区云的垂直重叠特性及其对云辐射强迫的影响. 中国科学: 地球科学, 43(4): 523-535. Zhang H, Peng J, Jing X W, et al. 2013. The features of cloud overlapping in Eastern Asia and their effect on cloud radiative forcing. *Sci China: Earth Sci*, 43(4): 523-535 (in Chinese)
- 张华, 杨冰韵, 彭杰等. 2015. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究. 大气科学, 39(2): 235-248. Zhang H, Yang B Y, Peng J, et al. 2015. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the CloudSat dataset. *Chinese J Atmos Sci*, 39(2): 235-248 (in Chinese)
- 周天, 黄忠伟, 黄建平等. 2013. 黄土高原地区云垂直结构的激光雷达遥感研究. 干旱气象, 31(2): 246-253. Zhou T, Huang Z W, Huang J P, et al. 2013. Study of vertical distribution of cloud over Loess Plateau based on a ground-based lidar system. *J Arid Meteor*, 31(2): 246-253 (in Chinese)
- Ackerman T P, Stokes G M. 2003. The atmospheric radiation measurement program. *Phys Today*, 56(1): 38-44
- Barker H W, Stephens, G L, Fu Q. 1999. The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry. *Quart J Roy Meteor Soc*, 125(558): 2127-2152
- Barker H W, Räisänen P. 2005. Radiative sensitivities for cloud structural properties that are unresolved by conventional GCMs. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(612): 3102-3122
- Barker H W. 2008a. Overlap of fractional cloud for radiation calculations in GCMs: A global analysis using CloudSat and CALIPSO data. *J Geophys Res*, 113(D8): D00A01
- Barker H W. 2008b. Representing cloud overlap with an effective

- decorrelation length: An assessment using CloudSat and CALIPSO data. *J Geophys Res*, 113(D24): D24205
- Bergman J W, Rasch P J. 2002. Parameterizing vertically coherent cloud distributions. *J Atmos Sci*, 59(14): 2165-2182
- Cheng A, Xu K M. 2011. Improved low-cloud simulation from a multiscale modeling framework with a third-order turbulence closure in its cloud-resolving model component. *J Geophys Res*, 116(D14): D14101
- Chou M D, Suarez M J, Ho C H, et al. 1998. Parameterizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models. *J Climate*, 11(2): 202-214
- Collins W D. 2001. Parameterization of generalized cloud overlap for radiative calculations in general circulation models. *J Atmos Sci*, 58(21): 3224-3242
- GEWEX Cloud System Science Team. 1993. The GEWEX cloud system study (GCSS). *Bull Amer Meteor Soc*, 74(3): 387-399
- Harshvardhan, Davies R, Randall D A, et al. 1987. A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. *J Geophys Res*, 92(D1): 1009-1016
- Hogan R J, Illingworth A J. 2000. Deriving cloud overlap statistics from radar. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(569): 2903-2909
- Hogan R J, Illingworth A J. 2003. Parameterizing ice cloud inhomogeneity and the overlap of inhomogeneities using cloud radar data. *J Atmos Sci*, 60(5): 756-767
- Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. 2005. Advanced retrievals of multilayered cloud properties using multispectral measurements. *J Geophys Res*, 110(D15): D15S18
- Inoue T, Satoh M, Miura H, et al. 2008. Characteristics of cloud size of deep convection simulated by a global cloud resolving model. *J Meteor Soc Japan*, 86(S): 1-15
- Inoue T, Satoh M, Hagihara Y, et al. 2010. Comparison of high-level clouds represented in a global cloud system-resolving model with CALIPSO/CloudSat and geostationary satellite observations. *J Geophys Res*, 115(D4): D00H22
- Kato S, Sun-Mack S, Miller W F, et al. 2010. Relationships among cloud occurrence frequency, overlap, and effective thickness derived from CALIPSO and CloudSat merged cloud vertical profiles. *J Geophys Res*, 115(D4): D00H28
- Li J. 2000. Accounting for overlap of fractional cloud in infrared radiation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(570): 3325-3342
- Li J. 2002. Accounting for unresolved clouds in a 1D infrared radiative transfer model. Part I: solution for radiative transfer, including cloud scattering and overlap. *J Atmos Sci*, 59(23): 3302-3320
- Li J, Dobbie S, Räisänen P, et al. 2005. Accounting for unresolved clouds in a 1-D solar radiative-transfer model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(608): 1607-1629
- Li J, Huang J, Stamnes K, et al. 2015. A global survey of cloud overlap based on CALIPSO and CloudSat measurements. *Atmos Chem Phys*, 15(1): 519-536
- Liang X Z, Wang W C. 1997. Cloud overlap effects on general circulation model climate simulations. *J Geophys Res*, 102(D10): 11039-11047
- Liou K N. 1992. *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere*. New York: Oxford University Press, 172-248
- Mace G G, Benson-Troth S. 2002. Cloud-layer overlap characteristics derived from long-term cloud radar data. *J Climate*, 15(17): 2505-2515
- Manabe S, Strickler R F. 1964. Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *J Atmos Sci*, 21(4): 361-385
- McFarlane S A, Mather J H, Ackerman T P. 2007. Analysis of tropical radiative heating profiles: A comparison of models and observations. *J Geophys Res*, 112(D14): D14218
- Morcrette J J, Fouquart Y. 1986. The overlapping of cloud layers in shortwave radiation parameterizations. *J Atmos Sci*, 43(4): 321-328
- Morcrette J J, Jakob C. 2000. The response of the ECMWF model to changes in the cloud overlap assumption. *Mon Wea Rev*, 128(6): 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*, 136(12): 4773-4798
- Mrowiec A A, Rio C, Fridlind A M, et al. 2012. Analysis of cloud-resolving simulations of a tropical mesoscale convective system observed during TWP-ICE: Vertical fluxes and draft properties in convective and stratiform regions. *J Geophys Res*, 117(D19): D19201
- Naud C M, Del Genio A, Mace G G, et al. 2008. Impact of dynamics and atmospheric state on cloud vertical overlap. *J Climate*, 21(8): 1758-1770
- Neale R B, Chen C C, Gettelman A, et al. 2012. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0). NCAR Technical Note TN-486
- Neggler R A J, Heus T, Siebesma P. 2011. Overlap statistics of cumuliform boundary-layer cloud fields in large-eddy simulations. *J Geophys Res*, 116(D21): D21202
- Oreopoulos L, Khairoutdinov M. 2003. Overlap properties of clouds generated by a cloud-resolving model. *J Geophys Res*, 108(D15): 4479
- Oreopoulos L, Lee D, Sud Y C, et al. 2012. Radiative impacts of cloud heterogeneity and overlap in an atmospheric General Circulation Model. *Atmos Chem Phys*, 12(19): 9097-9111
- Peng J, Zhang H, Li Z Q. 2014. Temporal and spatial variations of global deep cloud systems based on CloudSat and CALIPSO Satellite observations. *Adv Atmos Sci*, 31(3): 593-603
- Pincus R, Barker H W, Morcrette J J. 2003. A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields. *J Geophys Res*, 108(D13): 4376

- Pincus R, Hannay C, Klein S A, et al. 2005. Overlap assumptions for assumed probability distribution function cloud schemes in large-scale models. *J Geophys Res*, 110(D15): D15S09
- 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(12): 3644-3656
- Räisänen P. 1998. Effective longwave cloud fraction and maximum-random overlap of clouds: A problem and a solution. *Mon Wea Rev*, 126(12): 3336-3340
- Räisänen P, Barker H W. 2004a. Evaluation and optimization of sampling errors for the Monte Carlo Independent Column Approximation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130(601): 2069-2085
- Räisänen P, Barker H W, Khairoutdinov M F, et al. 2004b. Stochastic generation of subgrid-scale cloudy columns for large-scale models. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130(601): 2047-2067
- Räisänen P, Järvinen H. 2010. Impact of cloud and radiation scheme modifications on climate simulated by the ECHAM5 atmospheric GCM. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(652): 1733-1752
- Randall D, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. 2003. Breaking the cloud parameterization deadlock. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(11): 1547-1564
- Shonk J K P, Hogan R J, Edwards J M, et al. 2010a. Effect of improving representation of horizontal and vertical cloud structure on the Earth's global radiation budget. Part I: Review and parameterization. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(650): 1191-1204
- Shonk J K P, Hogan R J. 2010b. Effect of improving representation of horizontal and vertical cloud structure on the Earth's global radiation budget. Part II: The global effects. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(650): 1205-1215
- Stephens G L, Wood N B, Gabriel P M. 2004. An assessment of the parameterization of subgrid-scale cloud effects on radiative transfer. Part I: Vertical overlap. *J Atmos Sci*, 61(6): 715-732
- Stephens G L, Vane D G, Tanelli S, et al. 2008. CloudSat mission: performance and early science after the first year of operation. *J Geophys Res*, 113(D8): D00A18
- Tian L, Curry J A. 1989. Cloud overlap statistics. *J Geophys Res*, 94(D7): 9925-9935
- Tompkins A M, Feudale L. 2009. Seasonal ensemble predictions of West African monsoon precipitation in the ECMWF system 3 with a focus on the AMMA special observing period in 2006. *Wea Forecasting*, 25(2): 768-788
- Tompkins A M, Di Giuseppe F. 2015. An interpretation of cloud overlap statistics. *J Atmos Sci*, 72(8): 2877-2889
- Wang X C, Liu Y M, Bao Q. 2016. Impacts of cloud overlap assumptions on radiative budgets and heating fields in convective regions. *Atmos Res*, 167: 89-99
- Weare B C. 2001. Effect of cloud overlap on radiative feedbacks. *Climate Dyn*, 17(2-3): 143-150
- Wu X Q, Liang X Z. 2005. Radiative effects of cloud horizontal inhomogeneity and vertical overlap identified from a monthlong cloud-resolving model simulation. *J Atmos Sci*, 62(11): 4105-4112
- Xu K M, Cederwall R T, Donner L J, et al. 2002. An intercomparison of cloud-resolving models with the atmospheric radiation measurement summer 1997 intensive observation period data. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128(580): 593-624
- Zhang F, Liang X Z, Li J N, et al. 2013a. Dominant roles of subgrid-scale cloud structures in model diversity of cloud radiative effect. *J Geophys Res*, 118(14): 7733-7749
- Zhang H, Peng J, Jing X W, et al. 2013b. The features of cloud overlapping in Eastern Asia and their effect on cloud radiative forcing. *Sci China: Earth Sci*, 56(5): 737-747
- Zhang H, Jing X, Li J. 2014. Application and evaluation of a new radiation code under McICA scheme in BCC_AGCM2. 0. 1. *Geosci Model Dev*, 7(3): 737-754