

非对流云的观测事实及其对大气 环流模式设计的意义*

王必正 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 通过非对流云的气候资料分析和个例分析表明: (1) 非对流云有季节变化, 也随海陆分布的不同而变化, 还与大气三圈环流及季风等密切相关。由于它们的相关性, 在大气环流模式(GCM)中对非对流云的模拟必须与提高模式其他部分的模拟能力相辅相成。(2) 产生于中高纬度大范围上升气流的非对流云, 由赤道辐合带积云对流所致的高空赤道地区的卷云与卷层云和形成于副热带冷海水上空的层云与层积云是新一代大气环流模式显式预报的3类主要非对流云。这3类非对流云均是大尺度的, GCM的网格能显示分辨, 但在垂直方向如何提高GCM的分辨率问题仍是一个有待研究的问题。(3) 在GCM中如何模拟冷海水上空的层云和赤道ITCZ所对应的大范围卷云和卷层云是十分困难和必要的。(4) 通过对东亚及西太平洋区域非对流云系的个例分析, 可以认为在新一代大气环流模式中, 应显式预报行星大槽及赤道辐合带所对应的非对流云系。在模拟这些非对流云系时, 应考虑它们的生消过程、平流过程与辐射过程。由于一段时间内大气环流模式尚难以分辨锋面与 α 中尺度的气流, 因此有必要在GCM中参数化这些系统, 或采用更小的网格距。至于对非对流云所对应的降水参数化问题的研究, 需要进一步的观测为基础。

关键词: 非对流云; 观测; 大气环流模式

1 引言

科学开始于观测与实验。研究大气环流模式(GCM)中的非对流云问题, 同样应该从观测事实出发。人们已从多方面对非对流云进行了观测: 在陆地气象台站进行常规的地面及高空观测; 在外层空间通过气象卫星进行遥测等等。迄今为止, 人们已积累了不少这方面的资料。Liou^[1]在其专著《大气中的辐射和云过程》中已对1月和7月总云量以及一个卷云个例进行过分析, 并对GCM中如何参数化云的问题进行了综述。但是, 以前的工作, 或强调非对流云的观测事实, 或强调GCM中非对流云的模拟结果, 尚未系统建立GCM中非对流云的动力学以及在动力学基础上的计算问题。本文认为, 要建立GCM中非对流云的动力学, 必须首先建立大尺度非对流云的观测事实与大气中其他动力和热力过程的联系, 尔后利用数学方法对其进行系统研究。因此, 本文将从气候角度和个例分析角度揭示非对流云与GCM之间的联系。

第一, 利用气候资料分析非对流云与海陆分布、大气环流和太阳辐射的季节变化之

1999-03-31收到, 1999-07-14收到修改稿

* 本研究得到国家重点基础研究发展规划项目G1998040904“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论的研究”、国家自然科学基金资助项目49805005和49735160的联合资助

间的联系, 目的在于为 GCM 中非对流云的参数化提供一个气候背景。

第二, 利用个例分析的方法将非对流云从动态角度, 作为一个实体具体考察非对流云的生消演变过程, 目的是为 GCM 云参数化的若干问题提供一些解决的思路与方法。进一步的工作将陆续发表。

2 非对流云的气候分布及其对 GCM 设计的意义

2.1 夏季与秋季海洋上低云中的非对流云

根据 Warren 等^[2]给出的夏季(6~8月)和秋季(9~11月)层云、层积云和雾在海洋上的气候分布(起止年限为1952~1981, 图见文献[2]), 可以看到:

低层非对流云有明显的季节变化。夏季北半球中纬度(30~70°N), 在太平洋区域低云云量一般为60%以上, 中心在80%以上; 大西洋相应区域云量一般也在30%以上, 中心则在格陵兰岛附近, 达70%以上。但到了秋季, 相应区域的云量明显减少, 太平洋北部的云量最大值为60%, 大西洋最大为50%。季节变化实际上反映了太阳辐射的变化。低层非对流云在中纬度的明显季节变化, 反映了太阳辐射对非对流云的作用。无论是夏季及秋季, 30°S~30°N的非对流云低云云量一般小于30%, 这反映了广大海洋区域的热带高海表温度加热大气, 致使大气层结不稳定, 不利于非对流云的形成与维持。但在秘鲁西部, 大西洋东部的非洲西岸(0~40°S)的冷海区上空, 副热带区域则有大批的非对流云, 并且在夏季及秋季, 分布状况大致相似; 但从夏季到秋季, 加州西海岸的东太平洋区域, 非对流云低云从60%减至30%, 有明显的季节变化。夏季及秋季南半球中纬度(30~60°S), 云量一般大于30%, 但季节变化在南太平洋不明显; 南大西洋则从夏季到秋季, 有增大趋势, 中心最大值从50%增至70%。综上所述:(1)北半球中纬度区域, 海洋上低层非对流云有明显的季节变化;(2)大洋东岸的副热带地区, 秘鲁西部太平洋区域及安哥拉西部大西洋区域, 低层非对流云无明显季节变化, 而加州西海岸的太平洋区域, 则有明显的季节变化;(3)广大热带区域, 大范围海洋上空非对流云云量稀少;(4)南半球温带区域大西洋上空非对流云有明显季节变化, 太平洋上空则无明显变化。

上述云量的分布特征, 不仅与太阳辐射有关, 而且与海陆分布有关。本来在广大副热带区域应该是少云区, 但在大洋东部区域, 由于广大海表为冷海水区, 从而导致形成大范围低云(层云、层积云和雾), 改变了大范围地区的辐射特征, 从而致使所有的 GCM, 无论是大气模式还是海气耦合模式, 均对该区域的低云非对流云缺乏模拟能力。

大气环流也对低层非对流云的形成有明显的影响。比如: 在夏半年, 南方大量暖湿空气侵入北冰洋, 因北冰洋下层是海冰, 边界层大气是下冷上热, 大气层结是稳定的, 加之夏半年海冰融化, 大量水汽蒸发到大气中, 使大气达到饱和, 在充沛的水汽及稳定层结条件下, 非对流低云大量形成与维持; 在副热带区域, 下沉气流产生大范围少云区; 在热带区域, 大气层结不稳定产生积云, 但非对流云难以形成与维持(高空卷云除外)。

由于资料的限制, 没有分析冬季及春季的低层非对流云的气候分布, 但上面的分析

足以得出如下结论:

(1) 北半球海陆对比十分明显, 北半球中高纬度海洋上空低层非对流云有明显的季节变化, 相应的副热带大洋东部冷海水区上空的低层非对流云也有明显的季节变化, 而且在副热带的大范围下沉气流不利于低层非对流云的形成。

(2) 南半球海陆对比相对而言不明显, 因此, 低层云非对流云的季节变化也不十分明显。

(3) 大洋东部的副热带地区, 由于冷海水区及上空的下沉逆温致使在秘鲁西面、安哥拉西面和加州西面的广大冷海水区上空有大范围低层非对流云形成, 云量达 70% 左右。迄今为止所有的海气耦合模式对其均缺乏模拟能力, 今后应重点研究。

2.2 秋季卷云

根据 Randall^[3]给出的全球高云(卷云和卷层云)的秋季气候分布(书中未指出资料年限)可以看到, 高云非对流云在全球范围内的云量是很少的, 中高纬度地区一般不足 20% 左右。但赤道区域(30°S~30°N)的印度洋上空, 西太平洋区域与中太平洋区域, 则分布有大范围卷云与卷层云, 一般云量在 30% 以上; 在东印度洋及西太平洋赤道上空, 卷云与卷层云更达 50% 以上。因此, 从气象角度看, 如此大范围的卷云与卷层云, 首先由于其很大的反照率减少了太阳辐射, 同时又由于温室效应, 减少了地球长波向外的辐射, 对该范围内的气温及海温产生调整作用, 对大气环流及海洋环流产生重要的影响。

如此大范围的卷云与卷层云, 从动力学角度看, 实际上是赤道辐合带的积云对流卷出气流在高空所产生的。尽管从低层及中层对流层看, 大气是湿不稳定的, 在这个条件下在低及中对流层产生积云对流, 而且沿赤道辐合带产生大范围积云复合体, 但到了高层对流层及低层平流层, 积云卷出的冰及液态水(卷到高空即结冰)组成了大范围的卷云。因此, 为了在 GCM 中模拟赤道地区的卷云与卷层云, 必须考虑积云对流的卷出环流。尽管国外的一些 GCM 已经开始考虑这个因素, 但是由于问题的复杂性, 模拟效果仍不理想。总之, 在 GCM 中如何模拟赤道 ITCZ 所对应的大范围卷云与卷层云, 是十分困难但也是必要的。

2.3 1 月及 7 月全球平均总云量分布

上面已分析了非对流云的低云及高云分布的一些气候特点。以上这些资料都是通过专门观测得到的。得到这些资料往往是通过国际合作且花费昂贵。相对而言, 要得到对流云及非对流云之和的全球平均总云量, 则容易得多。Berlyand 与 Strokin^[4]给出的 1 月和 7 月的总云量的全球分布可作为研究非对流云在 GCM 中的参数化的参考^[5]。本文将详细讨论之并与 GCM 的设计建立联系。

无论冬夏, 赤道辐合带总是对应多云区, 大部分副热带地区少云。自副热带北侧向北, 云量逐渐增加, 在 50~60°N 极锋处达到最大。夏季总云量在 60°N 以北明显增加, 这在上文已作分析。从这个结果可以看出大气环流的经向三圈环流对于总云量有直接控制作用(反过来总云量如何反馈到大气环流的经向三圈环流, 至今仍不清楚), 表现在: 第一, 在赤道地区的 ITCZ 对应的辐合上升气流, 对应了赤道地区的多云区副热带的相对少云区, 实际上反映了 Hadley 环流下沉支的作用, 干而暖的空气减少了总云量(在冷海水区上空为例外); 第二, 中高纬度极锋与风暴路径对应了多云区, 实际上

反映了锋面与气旋对大尺度云形成的作用。

另外,从纬向角度看,海洋中云量总比陆地多。这一方面反映了海水的蒸发使其上空的水汽增多,容易形成云;而陆地相对比较干燥,尤其在沙漠上空,更不容易使云形成;另一方面也是由于海陆差异所引起的季风环流的影响,如中国的季风环流在夏季将西太平洋及印度洋的水汽输送到陆地,冬季则是西北气流为主,非常干燥。因此,中国夏半年总云量比冬半年要多。

为了在 GCM 中模拟出总云量,上面的分析指出:必须模拟出 ITCZ、三圈环流极锋及季风等。这对于非对流云而言,仍有参考价值。这表现在模拟 GCM 中的非对流云问题,不仅是非对流云本身的问题,也必须提高模式其他部分的模拟能力,它们的共同提高必须是相辅相成的。

还要注意的,就全球尺度而言,大洋东部冷海水区上空的层云与层积云云量尽管达 50%以上,但其范围并不大,为什么要着重研究呢?这是由于它是非对称的,即本来在副热带下沉区是少云区,可在冷海区上空维持大范围层云与层积云,致使海表从总的来说温度下降,使冷海水容易上翻,从而影响大洋环流。

2.4 从气候角度看 GCM 中非对流云的处理

(1) 非对流云主要有 3 个来源:一是中高纬度大范围上升气流产生的凝结;二是赤道辐合带积云对流产生的高空赤道的卷云与卷层云;第三是副热带冷海水区上空形成的层云和层积云。一般而言,非对流云在水平范围是大尺度的,垂直方向一般在 1000 m 左右。如何在 GCM 中参数化 ITCZ 所产生的大范围卷云及卷层云以及冷海水区上空的层云与层积云,是大气环流模式及海气耦合模式追求要求解决的问题。但在水平方向,如何提高 GCM 的分辨率仍是一个需研究的问题。

(2) 夏半球的云量总体来说比冬半球多,陆地上的云量总体上来说比海洋上少,副热带下沉区(冷海水区除外)总体上而言为少云区,而中高纬度总体而言为多云区。这表明在 GCM 中非对流云的模拟必须与提高模式其他部分的模拟能力相辅相成。

(3) 大气经圈环流、季风和极锋等大气环流系统,对于非对流云系有控制作用。反过来,这些非对流云系及积云云系作为强迫项会对大气环流有何影响呢?希望通过建立新一代 AGCM 和 CGCM,系统研究非对流云对大气和大洋环流的作用。

(4) 在 GCM 中如何模拟冷海水上空的层云和赤道 ITCZ 所对应的大范围卷云和卷层云,是十分必要和困难的问题。

3 非对流云的大尺度特征及对 GCM 设计的意义

3.1 个例分析的必要性

通常在研究 GCM 中的非对流云时,往往将模拟结果求多年平均后再与实测气候资料比。这种做法是比较初步的,原因在于:GCM 中的非对流云模拟,必须与实际存在的非对流云有某种流体力学意义上的相似性,而实际存在的非对流云无论在时间尺度与空间尺度均与大尺度的天气系统,如锋面、温热气旋、台风、高空槽、赤道辐合带等相联系,且时空尺度相当。曾庆存^[6]已指出,中高纬度的天气系统以准地转演变过程为主要过程之一。因此,根据随机抽样,本文选取 1997 年 4 月 20 日 8 时至 1997 年 4 月

21 日 8 时东亚及西太平洋地区的卫星云图与天气图(天气图限于篇幅一律从略), 从行星尺度及天气尺度的角度, 细致分析非对流云的形成、维持和消亡过程, 为 GCM 中非对流云过程的参数化提供一些启示。

3.2 非对流云与行星尺度运动的联系

3.2.1 中高纬度——亚洲及北太平洋

根据 1997 年 4 月 21 日 08 时 500 hPa 高空形势图, 沿 90°E 的孟加拉湾、西藏及新疆为一高空槽区。图 1 相应的红外卫星云图。图中最白区为卷云、卷层云, 稍暗区为中云及低云, ($90\sim 110^{\circ}\text{E}$, $28\sim 42^{\circ}\text{N}$) 为东北-西南向大范围倾斜的高云及中云系。沿 105°E 有一个脊, 对应在 105°E 的 $20\sim 50^{\circ}\text{N}$ 东北-西南倾斜带为大范围少云区。再往东沿中国华南、华东、东海、朝鲜半岛及日本海为一东北-西南倾斜的低槽, 相应的区域有大范围云系。再往东到 ($170\sim 180^{\circ}\text{E}$, $30\sim 60^{\circ}\text{N}$) 有大范围云系, 实际上亦有行星尺度的低槽区所对应。

大致上, 120°E 为东亚大槽的位置, 170°E 为北太平洋中高空大槽的位置。从行星尺度来看, 大范围非对流云(尽管含积云)实际只发生在行星尺度大范围的槽区及槽前区域。因为这些区域对应了大范围上升气流。将水汽抬升凝结后形成非对流云(从行星

GMS-5 970421 00:33 S (2:1)

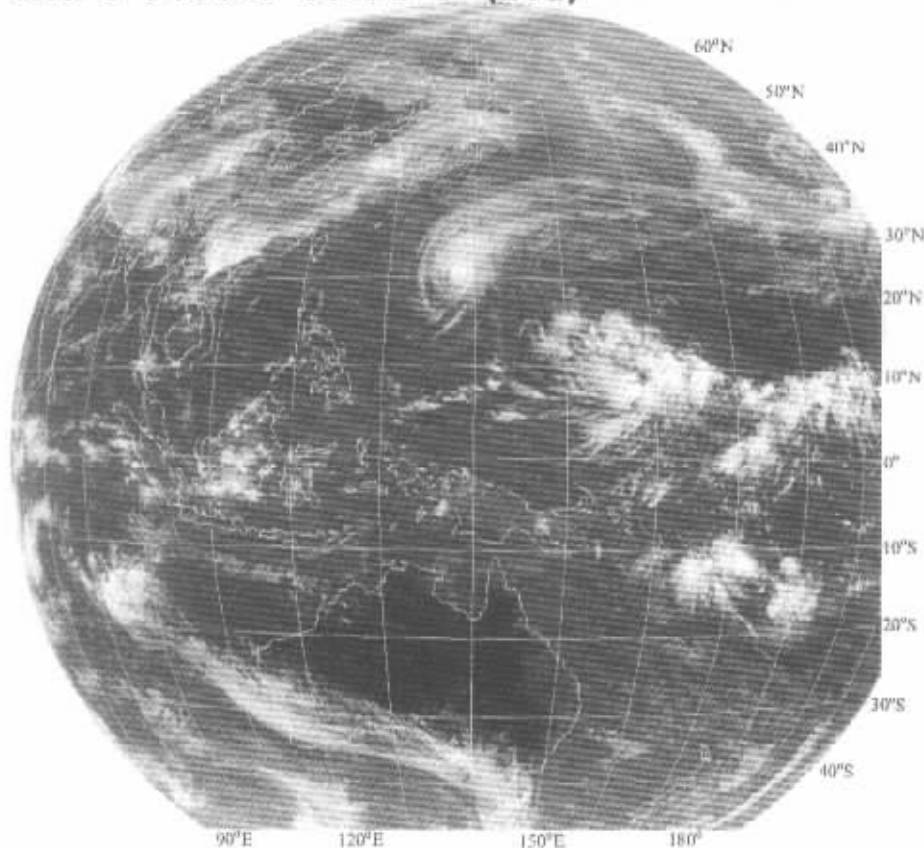


图 1 1997 年 4 月 21 日 08 时 33 分(北京时间)红外卫星云图

尺度看, 积云对流是不可分辨的)。这些云区范围东西达 10° 经距以上, 南北达 30° 纬距。按照计算数学的原则, GCM 网格是可以分辨这些非对流云的(如果新一代大气环流模式按 $2^\circ \times 2.5^\circ$ 设计, 则完全可以反映出非对流云)。这既是作为实体存在的非对流云对 GCM 的要求, 也是新一代大气环流模式预报非对流云的物理基础。

总之, 从中高纬度行星尺度与非对流云系的比较中可以看到, 在 GCM 中显式预报非对流云, 是有扎实的观测事实作为物理基础的。

3.2.2 赤道辐合带与高空卷云的联系[不考虑以 $(25^\circ\text{N}, 140^\circ\text{E})$ 为中心台风云系]

从图 1 可知, 在 $(20^\circ\text{S} \sim 15^\circ\text{N}, 140 \sim 170^\circ\text{W})$ 的广大地域, 有大范围的云系, 实际上就是赤道辐合带的大范围辐合产生积云对流, 而在高空夹卷出大量水及冰, 最后形成高空卷云与卷层云。这些云系在北半球作气旋式旋转, 证实了它是一种热带低压区所控制的云系, 或者说, 是发生在赤道辐合带范围内的热带低压作为实体所产生的云系。

这些非对流云的范围大而且有日变化, 与积云对流是母体与子体的关系。尽管在 GCM 网格范围内能分辨出这些高空卷云及卷层云, 但它的来源是积云对流。目前, 对于积云对流与这些卷云的联系, 已有一些研究, 但由于实测资料少, 如何在 GCM 中模拟这些云, 仍是十分困难的。

3.3 非对流云与天气尺度运动的联系

现将区域缩小至东亚区域。从 1997 年 4 月 20 日 8 时 850 hPa 形势图可以看出, 在中国东北、华北及四川、贵州分别有东北低涡及西南涡形成, 中国东部沿海为一大范围南北向狭长的高压脊控制。同时, 在地面上有一低压在中国东北维持, 有一冷锋沿东北、渤海和黄河以南向东南方向移动。相应地, 在东北、华北及渤海与四川等地有大范围云系(图 2)。

到了 1997 年 4 月 21 日 8 时, 高压脊南移到华北平原, 原中国东部沿海的高压分裂成两个脊, 在地面图上看, 东北低压仍与锋面相联系, 锋面移到日本海、渤海及淮河流域。对应于卫星云图(图 3)上, 在日本海和东海范围内有大范围非对流云云系(积云卷层云和中云为主)。

比较一下可知, 东北低压、西南涡与锋面直接与非对流云相关。传统的天气学认为是这些天气尺度系统控制了云系。而 Cox^[7]认为云系反过来控制天气系统。这实际上是一个鸡与蛋的问题。实际上, 天气尺度的抬升作用, 固然使云系得以形成, 但云系形成以后, 通过相变及辐射过程, 反过来对天气系统产生反作用。

现在的问题是 GCM 能模拟这些天气系统所导致的非对流云吗?

从计算数学可知, 要分辨锋面, 水平网格应在 20 km 以下; 要分辨东北低压及西南涡, 水平网格应在 60 km 以下。这对于研究气候的 GCM 而言, 实在是难以实现的。但这些非对流云(还有积云团等)又是在中高纬度实实在在产生、维持、消亡或发展着。因此, 必须在 GCM 中对它们进行参数化。

最后看一下降水。从 1997 年 4 月 20 日 8 时~21 日 8 时的 24 小时内, 华北、华南、华东及东北均有程度不同的降水发生。这些降水既有积云对流所致, 又有大尺度降水。如果认为卫星云图的云系, 主要对应于非对流云, 则可见降水除非对流云区外, 尚有一些在卫星云图上见不到的云系, 它们也产生降水。因此, 降水过程在 GCM 中如何参数化, 必须系统观测云中粒子分布与降水的联系。由于 GCM 网格较粗, 而实际

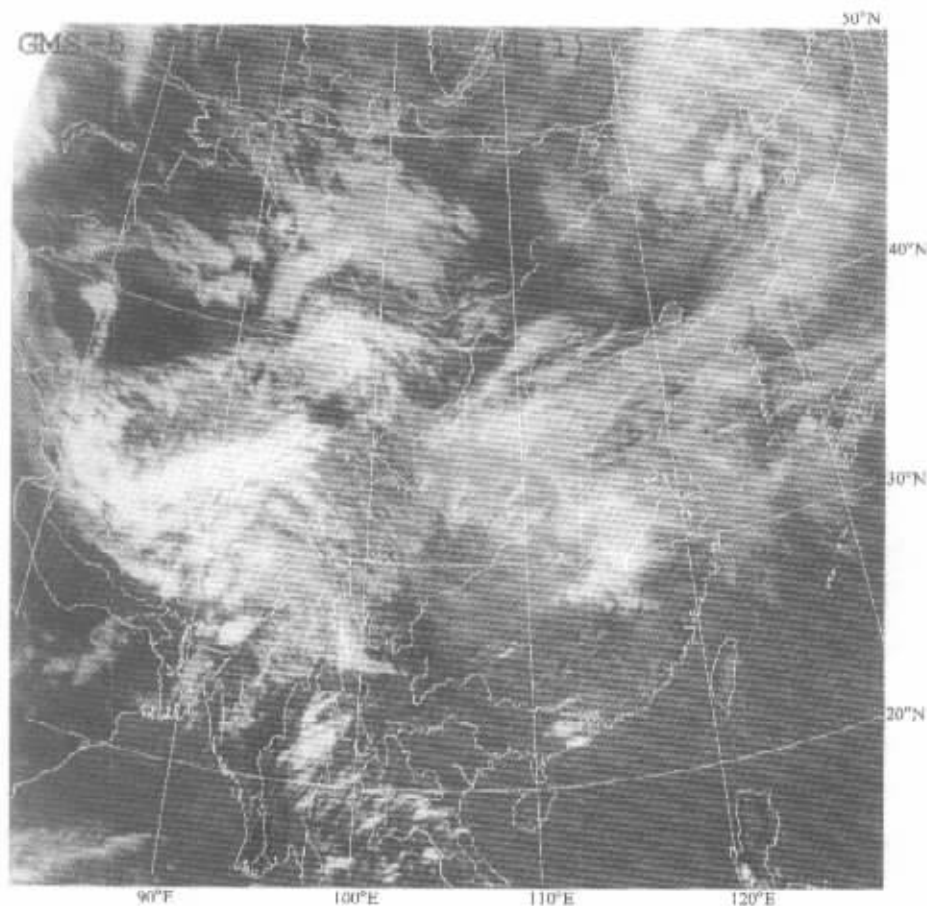


图2 1997年4月20日14时(北京时间)红外卫星云图

降水在水平方向不是正态分布的, 故如何用离散网格点值来表示不是正态方向的区域平均, 这方面的工作有待进一步研究。否则, 目前在云降水参数化方面, 观测太少, 要取得进展十分困难。

3.4 GCM 中非对流云参数化的若干问题

上面从一个观测例子, 分析了行星尺度、天气尺度系统与非对流云的联系, 着重分析了东亚及西北太平洋的例子。这些分析如果从普遍角度看, 对 GCM 的非对流云参数化有如下一些启示:

(1) 对于 $2^\circ \times 2.5^\circ \sim 4^\circ \times 5^\circ$ 的 GCM 而言, 能够分辨出行星大槽及赤道辐合带所对应的非对流云系。因此, 在设计新一代大气环流模式时, 应该而且可能用显式预报云方案去模拟它。

(2) 实际发生的云系随着行星尺度及天气尺度的演变而演变, 云系与天气系统之间存在着相互作用。这种相互作用的中介是云的相变过程及辐射过程。因此, 为了在 GCM 中模拟非对流云, 必须考虑非对流云的生消过程与辐射过程。

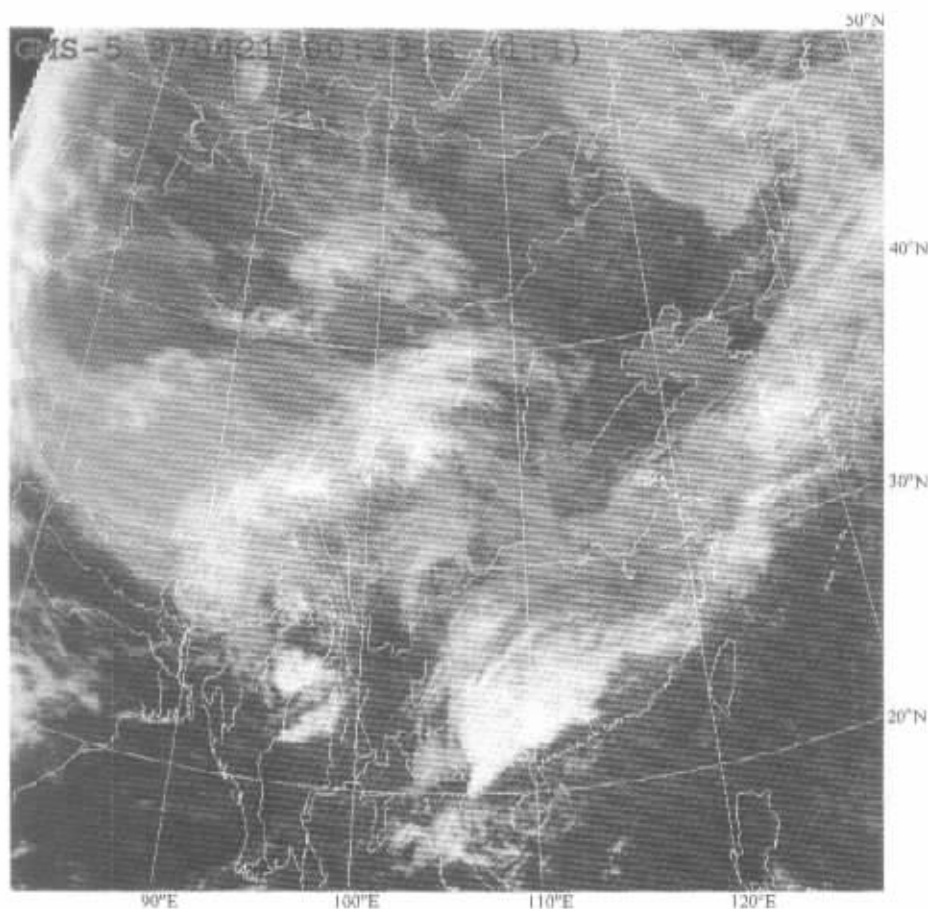


图3 1997年4月21日08时(北京时间)红外卫星云图

(3) 由于赤道辐合带所对应的卷云的来源为积云对流, 因此在新一代 GCM 中, 必须细致考虑积云对流的卷出作用。

(4) 由于将来一段时间内 GCM 尚难于分辨锋面 α 中尺度的气旋及低压系统, 因此必须在 GCM 中参数化这些系统所对应的云系, 或采用更小的网格距。

(5) 非对流云的降水参数化有待进一步的观测事实作为基础。

4 结论

本章从非对流云的气候分布和非对流云的大尺度个例分析讨论了非对流云如何在 GCM 中的表示问题, 结论如下:

(1) 由于非对流云的高度和微物理特点的不同, 在设计 GCM 时要充分重视这一点, 尤其在降水和辐射方面。非对流云在水平方向的大尺度和垂直方向的较薄特点, 也对 GCM 设计在分辨率角度提出不同要求。

(2) 非对流云有季节变化, 也随海陆分布的不同而变化, 还与大气三圈环流及季风

等密切相关。由于它们的相关性, 在 GCM 中对非对流云的模拟必须与提高模式其他部分的模拟能力相辅相成。

(3) 产生于中高纬度大范围上升气流的非对流云、由赤道辐合带积云对流导致的高空赤道地区的卷云与卷层云和形成于副热带冷海水上空的层云与层积云是新一代大气环流模式显式预报的主要 3 类非对流云。这 3 类非对流云均是大尺度的, GCM 的网格能显示分辨, 但在垂直方向如何提高 GCM 的分辨率问题仍是一个有待研究的问题。作者还设想, 非对流云作为强迫项, 对大气环流有反作用, 对大洋环流也有反作用, 是新一代 GCM 要解决的迫切问题之一。

(4) 在 GCM 中如何模拟冷海水上空的层云和赤道 ITCZ 所对应的大范围卷云和卷层云, 是十分困难和必要的。

(5) 通过对东亚及西太平洋区域非对流云系的一个个例分析, 作者认为在新一代大气环流模式中, 应显式预报行星大槽及赤道辐合带所对应的非对流云系。在模拟这些非对流云系时, 应考虑它们的生消过程, 平流过程与辐射过程。由于一段时间内大气环流模式尚难以分辨锋面与 α 中尺度的气旋, 因此有必要在 GCM 中参数化这些系统, 或采用更小的网格距。至于非对流云所对应的降水参数化问题的研究, 应以进一步的观测为基础。

参 考 文 献

- 1 Liou, K. N., *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere: Theory, Observation and Modeling*, Oxford University Press, 1992.
- 2 Warren et al., Global Distribution of Total Cloud Cover and Cloud Type Amounts over the Ocean, U. S. Dept. of Energy DOE / ER / 60085-H1, NCAR Technical Notes NCAR / TN-317+STR, NTIS-PR-360, 1988.
- 3 Randall, D. A. et al., On Fire at Ten, *Advances in Geophysics*, **38**, Academic Press, 1996.
- 4 Berlyand, T. G. and L. A. Strokina, *Global Distribution of Total Cloudiness*, Leningard: Gidrometeoizdat, 1980, 71pp.
- 5 Peixoto, J. P. and A. H. Oort, *Physics of Climate*, New York: American Institute of Physics, 1992.
- 6 曾庆存, 数值天气预报的数学物理基础, 第一卷, 北京: 科学出版社, 1979.
- 7 Cox, S. K., Radiation models of mid-latitude synoptic features, *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**, 637~651.

Observational Fact of Non-Convective Clouds and Its Significance on the Design of Atmospheric General Circulation Model

Wang Bizheng and Zeng Qingcun

(State Key Laboratory of Numerical Modeling Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract With climatological data analysis and case study about those clouds, the following results have been demonstrated. (a) Those clouds have seasonal variation, and they depend on land-sea distri-

bution, atmospheric general circulation and monsoon. These processes are interaction. (b) The three kinds of those clouds, originated from the condensation by upward air motion on large scale, from the semipermanent subtropical anticyclones off the west coasts and anvils by deep cumulus convection in ITCZ, should be represented explicitly in AGCM. However, those clouds are not simulated well. Thus, further research about them is important and necessary. (c) In designing them in AGCM, the formation, dissipation, advection and radiation about those clouds should be considered. (d) The clouds from mesoscale should be parameterized in AGCM or the smaller grid length should be introduced in AGCM in future. (e) Precipitation processes should be parameterized in detail because of their faster movement than the other processes.

Key words: non-convective cloud; observation; atmospheric general circulation model