

用云和辐射传输模式研究对流性降水云微物理及辐射特性

黄 容

程明虎 崔哲虎
王柏忠 何会中

(山东省青岛市气象台, 266003) (中国气象科学研究院)

提 要

利用中国气象科学研究院的三维对流云模式模拟了 1998 年发生在我国武汉地区的特大暴雨过程中的对流云。在模拟云的成熟阶段, 模拟结果和地面最大降水量实况及热带测雨卫星 TRMM(Tropical Rainfall Measure Mission)的降水雷达 PR(Precipitation Radar)的零度层高度和降水粒子达到的高度较接近。将该云物理模式的输出结果输入到 Liu 的三维辐射模式的输入场, 模拟了以 TRMM 的微波成像仪 TMI(TRMM Microwave Imager)的扫描角为入射角, 频率为 85.5GHz 和 37.0GHz 的星载微波辐射仪接受到的亮温, 模拟的结果表明云中各微物理量的分布对上行微波辐射的影响较大。

关键词: 对流云模式 辐射传输模式 TRMM

引 言

从星上被动微波观测资料反演降水与所观测的云系的微物理结构和动力特性有着内在的联系。根据云中各种微物理量的微波辐射特征建立微波辐射在云中的传输模型, 快捷而又准确地进行辐射传输模拟计算, 对于利用卫星资料反演地表大片区域的降水, 是非常必要的。但是在强对流系统中, 地面的降水, 悬浮的云中各种微物理量和各微波通道上的上行辐射亮温之间的四维关系非常复杂^[1], 简单分层的云结构, 并不能准确代表实际云体中各种微物理量的分布。因此本文用中国气象科学研究院的三维对流性降水云模式模拟的云中微物理量的分布, 作为三维微波辐射传输模式的输入, 来计算卫星所接收到的上行微波辐射亮温, 将它们与 TMI 实测的亮温进行对比, 并研究云中各种微物理量与辐射亮温之间的关系。

1 处理方法

1.1 三维对流云模式

本文所采用的是中国气象科学研究院的对流云模式。模式中采用了胡志晋和邹光源^[2]提出的准弹性近似, 即在可压连续性方程中引入准弹性系数 β 压缩声波。微物理过程则采用包括比质量和比浓度的双参数预报方案^[3], 考虑了 26 种主要微物理过程。云和降水粒子的大小分布用 γ 分布来近似。模式中对流是采用热湿泡来扰动发展。平流采用蛙跃中心差格式加正平流订正方案^[4]。模式区域为水平 50×50 格点, 格距为 1.2km, 垂直平均分为 30 层, 每层格距为 0.7km。计算采用时间步长分离法。

模式的输入为单点的探空资料, 包括气压以及与之对应的温度、露点温度、风向、风速以及高度。输出为辐射传输模式所需的温度、相对湿度廓线, 云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶(q_i)、雹(q_h)和霰(q_s)含量的三维分布以及地面降水分布。

1.2 微波辐射传输模式

本文采用 Liu^[5] 的三维辐射传输模式。该模式采用了前后向结合的 Monte-Carlo 方法。计算在一个水平 $1000\text{km} \times 1000\text{km}$, 垂直 40km 的长方体内进行, 对流云置于该长方体的中心, 侧边界的不真实的通量交换引起的误差不超过 0.2K , 40km 以上的空间视为真空, 地表反射假设为各向同性的。大气吸收采用了 Liebe^[6] 模式。

模式的输入为温度、相对湿度以及云水、雨水、冰晶、雪、霰和霏的空间分布以及地面降水分布。因为对流云模式没有考虑雪晶的发生增长, 辐射模式的雪晶初值设为 0。辐射传输模式的输出为 Stokes 参数 I 、 Q 、 U 、 V , 并用 Planck 辐射定律将之转化为亮温。为了与 TRMM (Tropical Rainfall Measure Mission) 卫星的 TMI (TRMM Microwave Imager) 探测器的资料进行对比, 辐射传输模式的天顶角取为与星载微波辐射计(TMI)一致(52.8°), 辐射模式模拟的结果为星载微波辐射计所接受到的辐射亮温。因为在陆地表面, 当假设粒子为球形时, 模拟的垂直极化和水平极化的亮温几乎没有差别^[7], 我们取垂直极化的亮温。

1.3 TRMM 及其产品

热带测雨卫星 TRMM 是由美国国家宇航局 NASA 和日本国家空间发展局 NASDA 共同研制的一颗专门测量热带和副热带地区降水的卫星。TRMM 卫星上共搭载 5 种遥感器, 分别为: 可见光和红外扫描仪、TRMM 微波图像仪 TMI、降水雷达 PR、闪电图像仪 LIS 及云和地球辐射能量系统 CERES。其中 NASA 提供的 PR 和 TMI 产品被用在本研究中作为模拟结果的对比。PR 资料中的 2A23 和 2A25 分别提供了亮带高度和降水粒子所达到的高度。另外, 2A25 还提供了降水在三维空间中的分布信息。TMI 的一级产品 1B11 提供了九个通道的亮温值。TMI 的二级产品 2A12, 提供了水汽凝结体的垂直廓线, 在垂直方向 14 个高度层上(分别是距地面 0.5km , 1.0km , 1.5km ,

2.0km , 2.5km , 3.0km , 3.5km , 4.0km , 5.0km , 6.0km , 8.0km , 10.0km , 14.0km 以及 18.0km), 给出了可降水 (precipitable water)、可降冰晶 (precipitable ice)、云水 (cloud liquid water)、云冰 (cloud ice) 的空间分布。

2 个例的选取

本研究选取的个例为 1998 年 7 月下旬武汉市及其邻近地区发生的特大暴雨。该个例武汉站 (37.30°N , 114.08°E) 测得 24 小时 (7 月 20 日 20 时 ~ 21 日 20 时) 的降水为 280mm , 每小时的降水在 21 日 06 ~ 07 时达到峰值^[8] $88.4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。北京时间 21 日 05:40, 热带测雨卫星 TRMM 经过武汉地区, 图 1 给出了该时刻 TMI 测得的 85.5GHz 垂直极化通道的亮温灰度图。在图上可看到一片明显的亮温的低值区, 说明该处对流发展旺盛, 对流云中上部存在的冰相粒子散射使得辐射亮温较低, 其中武汉所处像素点的亮温为 238.87K 。

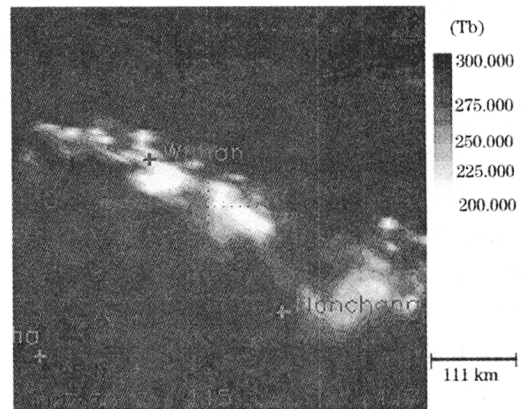


图 1 TMI85.5GHz 垂直极化通道亮温 T_b

3 对流云模式模拟单个雷暴云情况

对流云模式的初值为北京时间 7 月 20 日 20 时武汉站的探空资料, 模拟进行到 48 分钟时, 地面瞬时降水量最大, 达到 $92.25\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 与武汉站 21 日 06 ~ 07 时最大一小时降水 88.4mm 接近。模拟的零度层大约在 5km 高度左右, TRMM 的降水雷达 PR 测得的亮带高度为 4600m 左右, 而零度层高度应在亮带高度以上几百米处, 说明模拟的结果与 TRMM 的结果比较一致。冰晶

的分布都在 8km 以上,最高可达到 15km 以上,而由 TRMM 的降水雷达 PR 所测得的雷达回波达到 14.7km,模拟结果与实测结果是比较接近的,因此模拟的结果是比较合理的。雨水的分布几乎都在零度层以下,只有少量在零度层以上。霰的分布几乎都在零度层以上。

热带测雨卫星 TRMM 的微波图像仪 TMI 的分辨率在 85.5GHz 最高,为 $7.2 \times$

4.6km。而对流性降水云模式的分辨率为 $1.2 \times 1.2\text{km}$,为了降低分辨率大小的不同对本文结果的影响,在模拟云体范围内选取一片相当与 TMI 的分辨率大小的区域($7.2 \times 4.8\text{km}$),在该区域内模拟的 30 个垂直层上对云中各种微物理量的含量做平均,将平均后的云廓线与 TMI 所提供的经过武汉的像素点的云中各种微物理量的垂直廓线做一下比较。图 2 给出了比较的结果。

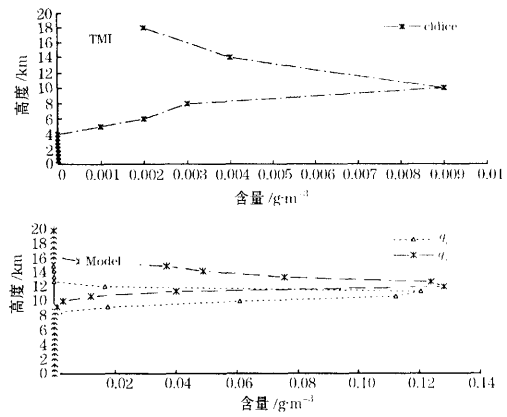
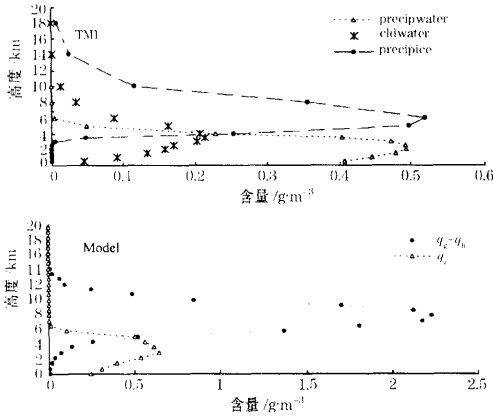


图 2 TMI 反演的云廓线与云模式模拟(Model)的一片区域平均的云廓线的对比

由图 2 可以看出,云模式模拟的霰和霰以及 TMI 反演的可降落的冰相粒子均集中在分布在 6~10km 高度上,冰晶则集中在分布在 8~12km,雨水的分布均在 6km 以下。但是模拟的云水的高度要高于 TMI 反演得到的云水的高度。从各种微物理含量的大小来看,TMI 反演的各种微物理量的峰值分别为雨水 $0.494\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、云水 $0.213\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、可降水的冰相粒子 $0.52\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、冰晶 $0.009\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。而云模式模拟的所选一片区域平均后的各种微物理量含量的峰值分别为雨水 $0.64\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、云水 $0.12\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、可降水的冰相粒子 $2.22\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、冰晶 $0.128\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。云水和雨水的含量与 TMI 反演的结果相对比较接近,而可降水的冰相粒子含量和冰晶粒子的含量则是云模式模拟的结果较 TMI 反演的结果大。

4 微波辐射传输的模拟

将所选区域平均后的云廓线作为一个平面分层的云输入到微波辐射传输模式中,在

模拟云发展的 120 分钟以内,每隔三分钟,对穿过云体的 85.5GHz 的微波上行辐射进行模拟。图 3 给出了 85.5GHz 垂直极化通道,在云模式发展的 120 分钟所选区域的云中各种微物理量含量、地面降水强度以及模拟亮温随时间的变化曲线。

由图 3 可以看出,在 85.5GHz,从无云区到有云区,辐射亮温比背景亮温(289.88K)低,说明在该频率,辐射以散射辐射为主。整个过程中,随着冰晶粒子和霰的最先出现以及增加,辐射亮温开始逐渐降低,到 39 分钟时,亮温降至最低,从模拟云的各种微物理量含量可以看出,在该时刻,霰的含量处于峰值,冰晶的含量处于次大值,冰相粒子的散射降温作用使得亮温降到最低,42 分钟时,冰晶的含量为极大值,霰的含量为次大值,冰相粒子的散射作用使得亮温为次低值,42 分钟以后,冰相粒子的含量逐渐减少,对辐射的散射降温作用减弱,所以辐射亮温逐渐增加。

在 102 分钟以后,极少量的上层冰晶对辐射没有影响。从整个过程中可以看到,在该频率,云水和雨水对亮温的大小几乎没有影响,说明该频率辐射以冰相粒子的散射作用为主。同时可以看到,在模拟的一个雷暴云单体内,亮温的极低值与冰相粒子的含量直接相关,而与地面降水强度的相关性较弱。

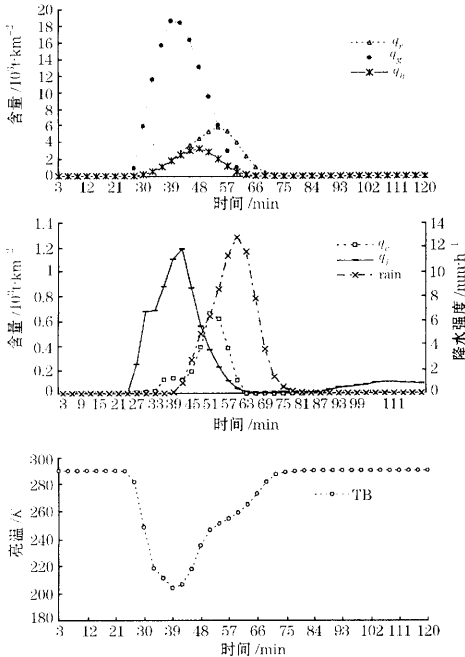


图 3 85.5GHz,云模式模拟的云水(q_c)、雨水(q_r)、霰(q_k)、雹(q_h)、冰晶(q_i)含量,地面降水(rain)以及辐射传输模式模拟的亮温(TB)随时间的变化

对于 37.0GHz,对应 TMI37.0GHz 的分辨率 $16\text{km} \times 9.1\text{km}$,选取云模式模拟云内的 13×8 个格点 ($15.6\text{km} \times 9.6\text{km}$),在各垂直层上对所选区域模拟得到的云中各种微物理量的分布进行平均,将平均后的云廓线作为一个平面分层的有限云体输入到微波辐射传输模式中对上行微波辐射进行模拟。图 4 给出了 37.0GHz 垂直极化通道,在云模式发展的 120 分钟所选区域的云中各物理量、降水以及模拟亮温随时间的变化曲线。

由图 4 可以看出,在 37.0GHz,从无云区到有云区,辐射亮温比背景亮温(282.032K)

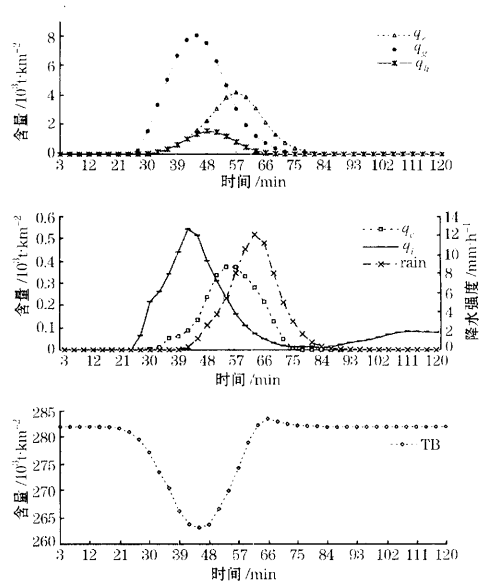


图 4 37.0GHz 云模式模拟的云水(q_c)、雨水(q_r)、霰(q_k)、雹(q_h)、冰晶(q_i)以及降水强度(rain)和辐射传输模式模拟的亮温(TB)随时间的变化

低,45 分钟时,亮温达到最低,此时霰的含量达到最大,冰晶和雹的含量很大,散射降温作用最强,使得亮温降到最低;在 63~72 分钟,辐射亮温较背景亮温有一个很小的起伏,对应于当时的云中各种微物理量含量,可以看到在该时段,冰晶的含量几乎为零,雹和霰的含量也大大降低,但云水和雨水含量较大,由于云水和雨水的吸收增温作用大于冰相粒子的散射降温作用,使得亮温较背景亮温稍高。说明在该频率,吸收增温作用和散射降温作用同时存在,辐射亮温比背景亮温高还是低,取决于吸收作用强还是散射作用强。

北京时 1998 年 7 月 21 日 05:40, TRMM 扫过湖北省武汉市及其邻近区域。TMI 测得武汉邻近地区无云区的背景亮温在 85.5GHz 和 37.0GHz 分别为 286.55K 和 280.16K,比模拟的背景亮温(289.88K 和 282.032K)要低 2~3K,可能是因为辐射传输模式的初始的地表温度取的是北京时 20 日的地表温度,而 TMI 测得的为 21 日 05:40 左右的背景辐射亮温,所以模拟的背景亮温稍高。

5 结 论

本文结合三维对流云模式和微波辐射传输模式对1998年7月武汉暴雨过程中的对流云的微物理特性及其对应的微波辐射特性进行了模拟,并将模拟的结果与TRMM所提供的产品做了比较,得到了以下初步的结论:

(1) 从高度分布上来看,云模式模拟的云中各种微物理量除云水的分布比TMI反演的要高以外,其他各种量在高度的分布上比较一致;从分布的大小来看,云模式模拟的云水和雨水的含量与TMI反演的比较一致,但是云模式模拟的可降水的冰相粒子以及冰晶的含量比TMI反演的要大。

(2) 在85.5GHz垂直极化通道,辐射以冰相粒子的散射为主,其中上层冰晶对上行辐射亮温有重要的影响。37.0GHz垂直极化通道,云水和雨水的吸收增温作用和冰相粒子的散射降温作用同时存在,亮温与各微物理量之间的关系复杂。说明云中各微物理量的分布对上行微波辐射的影响较大。

由于所选用的对流云模式模拟的范围较小且模拟的时间较短,在与大范围的TRMM资料的对比上存在一定的困难,下一步工作

考虑用中尺度模式对较大时间及空间范围的云进行模拟。

参考文献

- 1 Adler, R. F., H. M. Yeh, N. Prasad, W. Tao and J. Simpson. Microwave simulations of a tropical rainfall system with a three-dimensional cloud model. *Journal of Applied Meteorology*, 1991, 30: 924—953.
- 2 胡志晋, 邹光源. 大气非静力平衡模式和弹性适应. *中国科学, B辑*, 1991, (5): 550—560.
- 3 胡志晋, 何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式. *气象学报*, 1987, 45(4): 467—484.
- 4 于达维, 何观芳, 周勇等. 三维对流云催化模式及其外场试用. *应用气象学报*, 2001, 12卷增刊: 122—132.
- 5 Liu Q., C. Simmer and E. Ruprecht. Three-dimensional radiative transfer effects of clouds in the microwave spectral range. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 4289—4298.
- 6 Liebe, H. J.. An updated model for millimeter wave propagation in moist air. *Radio Sci.* 1985, 20: 1069—1089.
- 7 Wu, R., and J. A. Weinman. Microwave radiances from precipitating clouds containing aspherical ice, combined phase, and liquid hydrometeors. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89: 7170—7178.
- 8 陶诗言等. 1998夏季暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001: 426.

On Microphysical and Radiative Characteristics of Convective Precipitating Cloud System with Cloud-microwave Radiative Transfer Model

Huang Rong¹ Cheng Minghu² Cui Zhehu² Wang Baizhong² He Huizhong²

(1. Qingdao Meteorological Observatory, Shandong Province 266003; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences)

Abstract

The convective cloud system on 20 July 2003 in Wuhan region is simulated with a 3-D convective precipitating cloud model. The microphysical characteristics of a mature convective system derived from 3-D cloud model approach to the results from TRMM TMI and PR products. The result from the cloud model is then used as input into a 3-D microwave radiative transfer model that calculates the upwelling radiance received by the radiometer aboard the satellite. The result shows that the structure of cloud has a strong influence on the upwelling microwave radiation.

Key Words: convective cloud model radiation transfer model TRMM