

对流性降水云辐射特性研究

王小兰 程明虎 崔哲虎

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

结合 MM5 模式和三维微波辐射传输模式, 对 2002 年 7 月 22~23 日发生在湖北宜昌附近一次中尺度强降水过程中的强降水中心的对流性降水云的微波辐射特性进行了模拟, 模拟结果表明: MM5 模式可以较好地模拟此次降水过程; 云中各微物理量的含量和分布对上行微波辐射亮温有重要影响; 就物理方法而言, 选用适当的云廓线, 是利用微波信息反演降水的关键。

关键词: MM5 辐射传输 辐射亮温 云廓线

引 言

相对于可见光和红外间接反映云的厚度和高度而言, 在大气微波窗区, 微波可以能够穿透云体内部而直接反映云体内部的信息。从星上被动微波观测资料反演降水与所观测的云系统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性建立微波辐射在云中的传输模型, 快捷而准确地进行辐射传输模拟计算, 对于利用卫星资料反演地面降水, 是非常必要的。研究云廓线以及地面降水与微波上行辐射亮温之间的关系, 是为利用微波辐射信息反演云的廓线以及地面降水强度奠定了物理基础。

利用微波估算降水的方法通常有两类: 经验方法和物理方法^[1]。物理方法早期是利用简单假设的云廓线输入辐射传输模式反演降水^[2], 后来发展为结合云模式和辐射传输模式来反演降水^[3]。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相当复杂^[3], 简单分层的云结构, 并不能准确代表实际云中微物理量的分布。黄容^[4]曾使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, 来计算卫星所接受到

的上行微波辐射亮温。但是由于该对流云模式模拟的空间范围很小, 只有几十公里, 仅能模拟出一个对流云的单体, 而实际的一次强降水过程往往是多个处于不同生命周期的对流单体的相互和共同作用, 另外对于 Monte-Carlo 辐射传输模式, 当模拟的区域扩大(主要是无云区的扩大)到几百公里的时候, 由于侧边界净辐射泄漏造成的亮温误差可以减小到 0.1K ^[5]。因而本文采用中尺度模式 MM5 模拟降水过程和云的微物理分布, 作为三维微波辐射传输模式的输入, 计算上行的微波辐射亮温, 研究各微物理量和亮温之间的关系。

1 模式介绍

1.1 MM5 模式

本文采用的是 Reisner 霰方案。在 MM5 (V3) 的云显式降水方案中, Reisner 霰方案考虑的微物理过程比较全面, 也比较复杂^[6,7]。包括 7 个预报量: 水汽(q_v)、云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶(q_i)、雪(q_s)、霰(q_g)、冰晶数浓度(N_i), 考虑了 31 种物理过程, 包括微物理量之间的凝结和蒸发、碰并、自动转化、冻结、融化、升华和凝华、核化和繁生^[8]。

MM5 的非静力模块侧边界采用时变松

弛边界条件,对云水、雨水、雪、冰晶等水汽变量的边界值在流入边界上定义为零值,流出边界定义为梯度为零。使用2002年7月22~23日一天4个时次(00时、06时、12时、18时)的再分析资料,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,作为模式的初始场和边界条件(如不说明,文中所用时间皆为世界时)。使用三层嵌套,垂直方向气压分为20层(1000、950、925、900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、200、150、100hPa)。具体的参数设置见表1。模式最终的输出结果很丰富,取本次研究需要的温度、相对湿度廓线,云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶(q_i)、雪(q_s)和霰(q_g)含量的三维分布以及地面降水分布。

表1 MM5模式参数化选择

参数	Domain1	Domain2	Domain3
中心经度	114.20°E	110.98°E	110.32°E
中心纬度	30.37°N	31.24°N	29.85°N
水平格点数	(52×73)	(82×91)	(91×103)
格距(分辨率)	45km	15km	5km
微物理方案	Reisner2	Reisner2	Reisner2
行星边界层方案	MRF	MRF	MRF
积云对流方案	KUO	Grell	Grell
大气辐射方案	云层大气辐射	无	无

1.2 三维 Monte-Carlo 辐射传输模式

本文采用 Liu(Liu et al. 1996)的三维辐射传输模式,即前后向结合的 Monte-Carlo 方法^[3]。其中的大气吸收采用了 Liebe 模式^[9]。计算在一个水平 $2000\text{km} \times 2000\text{km}$, 垂直 40km 的长方体内进行,中尺度模拟的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。

模式的输入为温度、相对湿度、和云水、雨水、冰晶、雪花、霰和霰的空间分布以及地面降水分布。由于 Reisner 霰方案没有霰的情况,辐射模式的霰初值设为 0。模式输出为 Stokes 参数 I, Q, U, V , 用 Planck 辐射定律将之转化为亮温。模式的观测角取为与星载微波辐射计 TMI(TRMM Microwave Imager)一致(即 52.8°),模拟的结果是星载微波辐射计所接收到的辐射亮温。由于在陆地

表面,强降水使得地面背景特征模糊,当粒子假设为球形时,模拟的垂直极化和水平极化亮温几乎没有差别^[2],故在此只考虑垂直极化的亮温。

2 个例情况

2002年7月17~27日,南方、长江中下游和淮河流域出现了大范围的强降水过程,降水量普遍有 100~200mm,局部超过 200mm。本研究选取的个例是发生 22 日 00 时至 23 日 00 时的一次强降水过程。选取的宜昌及邻近地区,是本次降水的一个强降水中心,TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)卫星^[10]22 日 06:45UTC 经过,图 1(见封三)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。

3 MM5 模式模拟结果

比较 22 日至 23 日 24 小时降水的实况图和使用 MM5 模式三层嵌套模拟的 24 小时降水图(图略),可以看出,模拟宜昌地区及附近地区降水的落区和中心最大降水基本吻合,模拟的具体数值较实测稍小。分辨率较高的 Domain3 模拟的 24 小时降水局部地区达到了 200mm 以上,与实测降水量接近。因此可以初步判断使用 MM5 模式可以较好地模拟本次宜昌及附近地区的强降水过程。

4 微波辐射传输模式的模拟

将 MM5 模式 Domain3 模拟的云微物理的廓线,作为一个平面分层的有限云体输入到 Monte-Carlo 辐射传输模式中,在模拟出的降水较集中的 22 日 11:00 至 17:00 时,每隔 5 分钟,对穿过云体的 85.5GHz 垂直极化上行微波辐射作模拟。图 2 是模拟的 12 时 85.5GHz 垂直极化通道亮温、地面降水和此时的云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶(q_i)、雪花(q_s)、霰(q_g)含量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)的平面等值线图,各微物理量取垂直方向上的积分总量。模拟的区域达到 $510\text{km} \times 450\text{km}$,发现在整个区域上存在着几个降水中心,即是模拟的区域上存在着几个云单体,对应的 85.5GHz

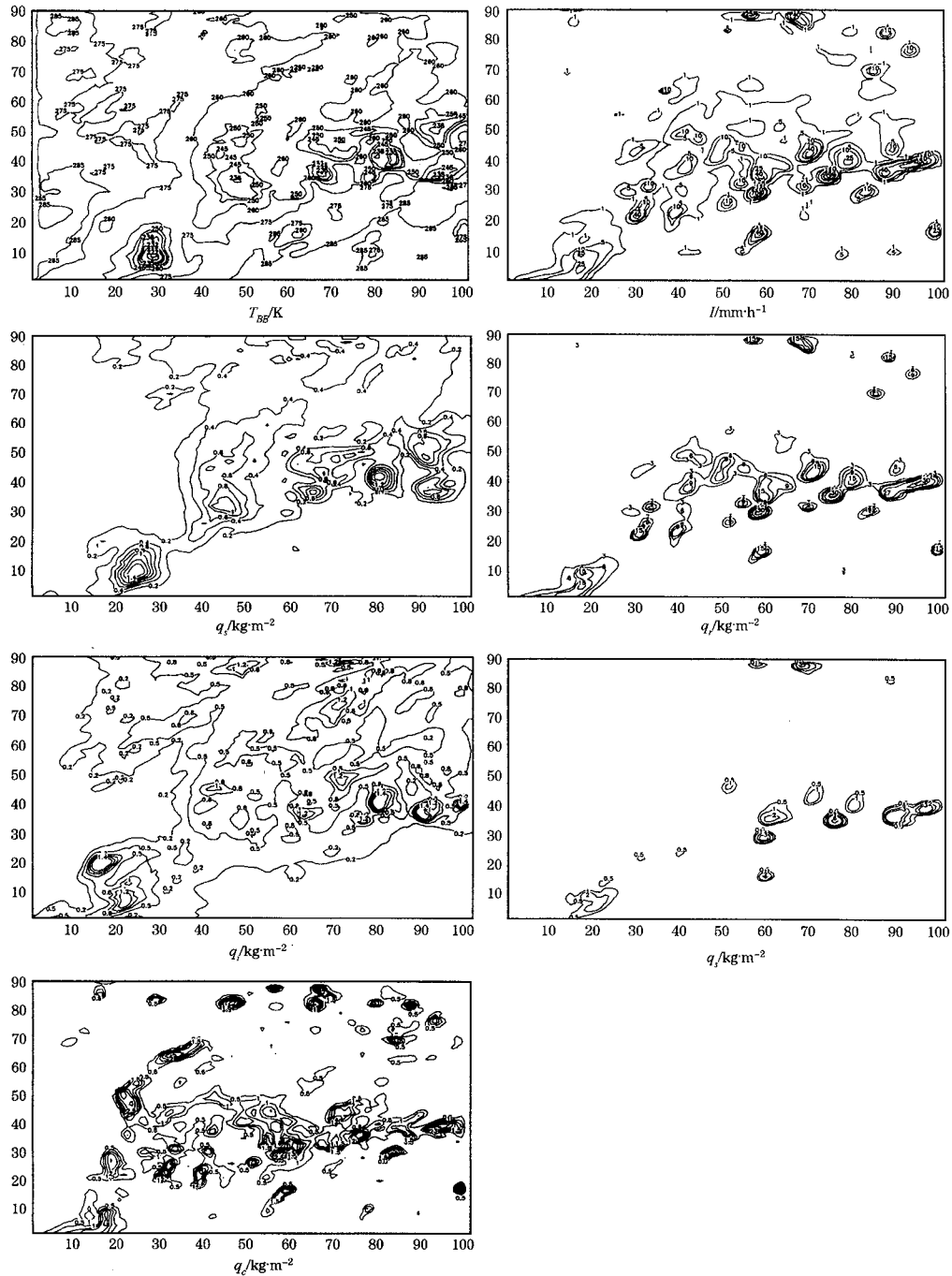


图2 12:00模拟整个区域上的85.5GHz亮温(T_{BB}/K)、地面降水($I/mm \cdot h^{-1}$)、各微物理量(q_c, q_r, q_i, q_s, q_g)的分布等值线图

垂直极化亮温图上也有几个亮温的低值区。冰晶和雪花的含量分布与亮温的低值分布很对应,所以在高频通道以冰相粒子的散射作

用占主导,使得上行微波辐射亮温降低,故而云区亮温较背景辐射亮温低。但由于处于下层的霰对上层冰晶和雪散射的阻塞作用,亮

温的极低值并不对应冰晶和雪含量的最高值;且冰晶和雪的分布并不直接对应降水的分布,亮温的最小值区与降水强度的最大值区在位置上也有一定的偏差。从平面图上还可以看出:地面降水、雨水、云水和霰含量的分布在空间上很对应,霰的大值区对应着雨水的大值区,而雨水直接构成地面降水,所以由霰与云水的含量与分布对雨水的形成有重要影响^[8]。

图3给出了12:00, $Y=36$ 格点处, X 方向的截面上辐射传输模式模拟的85.5GHz垂直极化亮温(T_b)(K)和MM5模拟的地面降水($R/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶和雪花(q_i+q_s)及霰(q_g)含量($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分布图。从图上可以看到,每个降水峰值对应着一个对流云单体,该截面上存在着至少4个云单体;无云区的背景亮温都在280K以上,从无云区到有云区辐射亮温迅速降低,可见在85.5GHz频段以冰相粒子的散射作用为主。12~22格点处没有地面降水,有少量云系存在,虽然上层冰晶和雪花的含量很低,但该处的亮温却有明显的降低;同样地,35~56格点处的云体的地面降水量较小,云水和雨水含量也不高,但冰晶和雪花的含量很高,导致亮温降低至239.9K,是所取截面上的亮温次小值,可见云中冰相粒子对上行辐射亮温有重要的影响;且由于霰的含量几乎为零,冰晶和雪花含量的最大值区直接对应亮温的极低值区,位置上几乎没有偏差。比较57~70处和71~80处的两个云单体的微物理量的廓线分布可以发现,两个云体在所选截面上的冰晶分布很相似,含量也接近,虽然后者的云水、雨水、霰的含量都较前者大,但由于前者的雪花的含量大于后者很多,空间分布也更大,向上延伸的高度更高,所以57~70格点处的云体对应的上行辐射亮温达到了最低(234.4K)。在80~87格点处,上层空间存在冰晶和雪花,2~4km处有少量云水存在,而几乎没有霰和近地面的雨水,宏观上可以理解是云单体的云砧部分,此处对应的亮温在89点处有一个明显的降低,与12~22格点处的情况较相似,同样说明了云体上

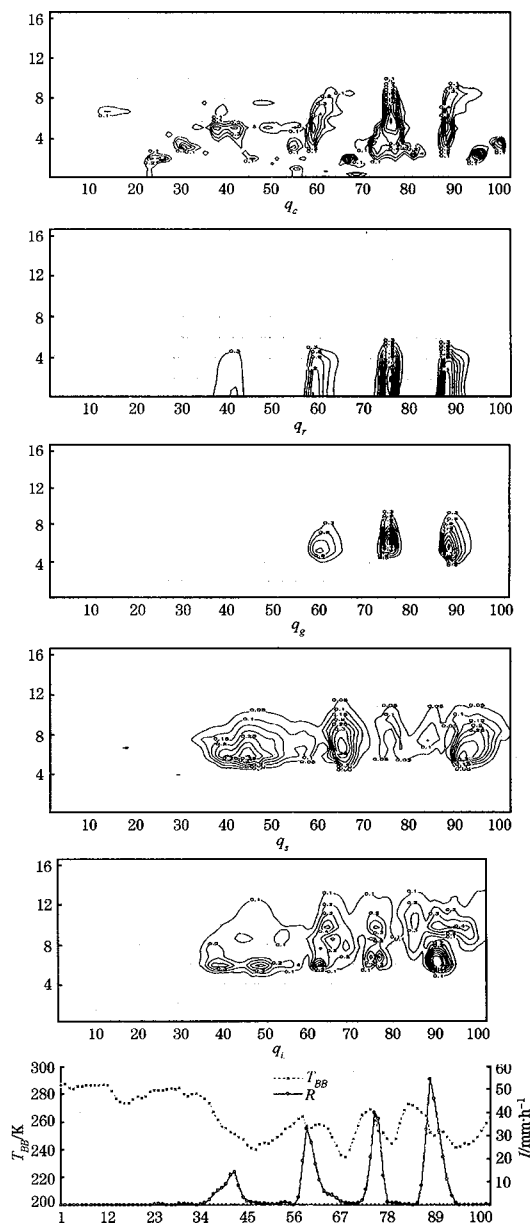


图3 $Y=36$ 格点处, X 方向的截面上85.5GHz垂直极化亮温(T_{BB}/K)、地面降水($I/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶(q_i)和雪花(q_s)及霰(q_g)含量($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的分布图

X : 格点, Y : 高度: km

层的冰相粒子对亮温的散射作用很强,当没有或很少液态粒子存在的时候,亮温的降低尤其显著。比较57~70和88~102两处的云体,可以发现两者的雪花廓线的分布较相

似,含量也较接近;冰晶的分布廓线在5~8km高度上差异较大,显然后者的含量和分布的范围都较前者大很多,8km以上的高度上两者的冰晶廓线较接近,比较最终的亮温发现,前者对应的上行辐射亮温反而比后者的亮温更低,可见云体中下层的冰晶对亮温的散射影响没有上层的大。

5 结论

本文结合MM5模式和三维微波辐射传输模式,对2002年7月22~23日发生在湖北宜昌附近一次中尺度强降水过程中的强降雨核降水云的微波辐射特性进行了模拟。

(1) 使用MM5模拟本次降水的24小时降水总量、落区与实况较接近。Domain3上由于分辨率较高,24小时局部降水达到200mm;且模拟的区域很大,出现了几个云单体相互和共同作用而降水的情况,与只模拟出一个云单体的情况比较更接近实况。云体内部霰和云水的含量与分布对形成地面降水有重要作用。

(2) 在85.5GHz垂直极化通道,本质上亮温仍是受云水和雨水的辐射增温作用和冰晶、雪花和霰的散射降温作用共同作用的结果,只是散射作用比辐射作用的影响更大,从整体上来看,以冰相粒子的散射作用为主,有云区的亮温较背景亮温低。但是由于下层的霰对上层冰晶和雪散射的阻塞作用,亮温的极低值并不对应冰晶和雪含量的最高值,与降水强度的最大值区在位置上也有一定的偏差。上层(垂直方向8km以上)冰晶和雪花对辐射的散射降温作用很强,亮温明显降低,尤其是云中液态粒子含量很低时,极少的冰

相粒子都可能导致显著的亮温降低。而中下层的冰晶对亮温的散射作用显然没有上层冰晶的散射作用对亮温的影响大。

参考文献

- 1 Cheng M. Estimation of precipitation using satellite, radar and rain gauge, Ph. D Thesis, University of Bristol, 1994, 31,400.
- 2 Wu Rongzhang, J. A. Weinman. Microwave radiances from precipitating clouds containing aspherical ice, combined phase, and liquid hydrometeors. *J. Geo. Res.*, 1984, 89: 7170—7178.
- 3 Adler R. F., Haw-Young M. Yeh, N. Prasad et al. Microwave simulation of a tropical rainfall system with a three-dimensional cloud model, *J. Appl. Meteor.*, 1991, 30:924—953.
- 4 黄容,程明虎,崔哲虎等. 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. *气象*, 2003, 30(3): 7—11.
- 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 Reisner J., Rasmussen R. M., Bruintjes R. T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1998, 124:1071—1107.
- 7 Lin Wenshi, Fong Soikun, Wu Chisheng et al. A simulating study on Resolvable-Scale microphysical parameterization in a mesoscale model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17(3): 487—502.
- 8 孙晶,王鹏云. 用MM5模式Reisner霰方案对华南暴雨的数值模拟. *气象*, 2003, 29(4): 10—14.
- 9 Liebe, H. J. An updated model for millimeter wave propagation in moist air. *Radio Sci.*, 1985, 20:1069—1089.
- 10 何会中,程明虎,周康军等. TRMM PR与香港雷达资料的对比分析. *气象*, 2002, 28(10): 32—36.

On Radiative Characteristics of Convective Precipitating Cloud System with MM5 and Microwave Radiative Transfer Model

Wang Xiaolan Cheng Minghu Cui Zhehu

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The convective cloud system on 22—23 July 2002 in Yichang region is simulated with MM5 model. The results from MM5 are then used as the input to a 3D microwave radiative transfer model that calculated the upwelling radiance received by the radiometer aboard the satellite. It is found that the structure of the convective cloud has a strong influence on the upwelling microwave radiation.

Key Words: MM5 Radiation transfer model TRMM

《对流性降水云辐射特性研究》附图 《卫星遥感在秸秆焚烧监测中的应用》附图

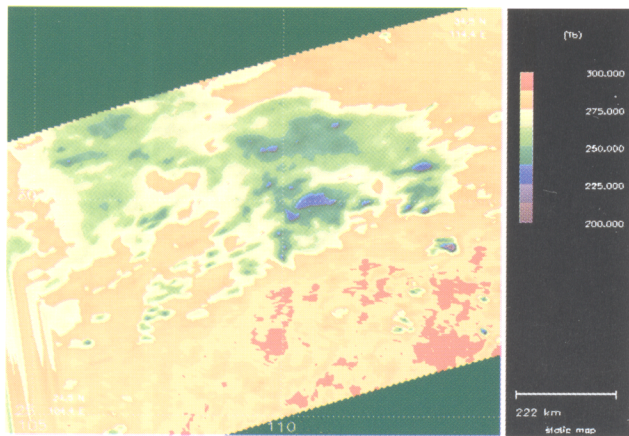


图1 2002年7月22日06:45 (UTC) TMI 85.5GHz
垂直极化通道亮温图

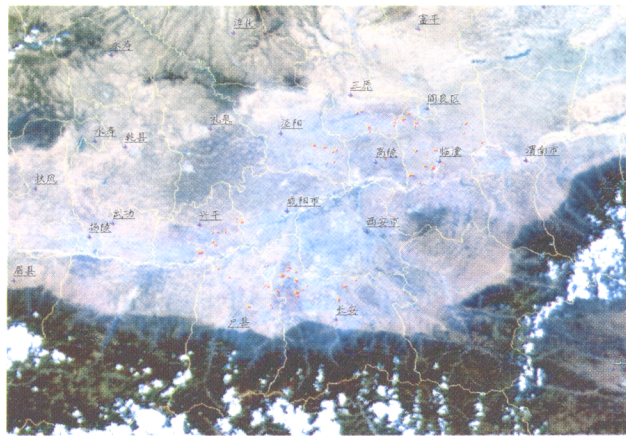


图1 关中地区秸秆燃烧卫星遥感监测图像