

胞线型降水云微波辐射特性的数值研究^{*}

林龙福

(空军气象学院, 南京 211101)

吕达仁 刘锦丽

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要 本文将三维云的微物理模式的输出作为三维辐射传输模式的输入, 对降水云的微波上行辐射率同地球物理参数间的关系进行了初步研究。在侧边界条件不对称的情况下, 如果不考虑实际存在的云间相互辐射作用而模拟降水云的上行辐射率时, 模拟出的亮温在低频段将低估卫星上测到的亮温值; 在高频段则依降水云上层含冰量的大小而异, 即在降水云上层含冰量小的区域, 将低估卫星上测到的亮温, 且低估的幅度较低频通道的大, 而在降水云上层含冰量大的区域, 可能高估卫星上测到的亮温, 但高估的幅度较小。

关键词 云物理模式 微波辐射传输 亮温 降水云

1 引言

从星上被动微波观测资料反演降水信息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。尤其在强对流系统中, 地面的降水、悬浮的水成物和各微波通道的上行辐射率间的四维关系是非常复杂的。而且因为在大的空间范围和连续的时段内观测对流系统的水成物含量和物理特性的困难, 使得研究对流系统中地球物理参数和上行辐射率间的关系更加复杂。因此, 许多前人的工作在辐射传输模式的亮温模拟中, 都引用了简单分层的降水云结构模型^[1~3]。这些模型都是基于对有限的观测结果分析后设定的。

近年来, 对流云和云系统的数值模式发展很快, 设计发展了许多二维、三维云物理模式。这些云模式能够模拟出云系统的微物理过程和动力过程。整个模拟过程的每一时刻都可以给出地球物理参数包括辐射传输研究所关心的云水、雨水、云冰、雪和霰等物理量的更接近于实际的云系统结构, 而某一时刻的云物理模式给出的更近于实际和复杂程度的云结构可以用来代替辐射模式中设定的简单云结构模型。用这种将云物理模式和辐射传输模式结合的方法, 在保持实际对流云系统的复杂程度的情况下, 研究上行辐射率同地球物理参数间的关系, 对于建立更加有效而准确的反演降水的算法或检验已建立起来的算法, 均有很重要的意义。Simpson 等人^[4]综述了这方面的工作, 并建议进行辐射模式中云的水平不均匀引起的云间相互辐射影响的研究。在已有的云模式和辐射传输模式的结合研究中, 由于云的辐射传输模式均局限在不同的平面平行模式, 无法研究水平不均匀降水云间辐射相互作用效应。不同侧边界条件下的有限云三维辐射传输模

1994-12-20 收到, 1995-04-04 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金高技术项目资助

式^[5]的建立, 使研究水平不均匀降水云间辐射相互作用成为可能。本文将三维云物理模式的输出作为三维辐射模式的输入, 对降水云间辐射相互作用及其对上行辐射率的影响进行初步探讨。

2 云物理模式和辐射传输模式

2.1 三维云物理模式

用于本研究的云物理模式为三维云簇 (ensemble) 模式。它是一个非静力的且为非弹性的模式。Tao 和 Simpson^[6]对这一模式进行了详细的描述。这一模式允许在模式的区域内同时发展几个对流云。模式变量包括水平和垂直速度、位温、水汽的混合比等。液态水分分为云水和雨水两类, 而冰相态过程包括三种参数化的粒子, 即分为云冰、雪和霰。云水和云冰假定为单谱分布, 而可降雨滴、雪和霰等的尺度假定遵从 M-P 谱。时间积分和空间差分分别采用蛙跳时间积分和二阶空间差分技术。

2.2 微波辐射传输模式

这里选择的微波辐射传输模式为可以处理不同侧边界条件的垂直分层的水平有限降水云三维辐射传输模式。文献[5]对这一模式进行了详细的描述。模式中水成物的消光、散射和吸收系数的计算选用 Yeh 等人^[7]制成的 M-P 谱条件下的 Mie 散射表, 以提高计算效率节省 CPU 时间。云水和云冰的作用在模式计算中用 Rayleigh 近似。模式在垂直方向上根据 Kummerow 等人^[8]的分层方法分为五层的结构, 地球表面假定为平静的洋面且表面温度设定为 296 K。每层中各种水成物的含量用云物理模式的输出在相应层次上该物理量含量的平均值给定。这一有限云的三维辐射传输模式虽然较之 Adler 等人^[9]选用的平面平行模式在垂直方向上分层较粗 (Adler 等人选用的模式在有云区域分为 19 层), 但是, 五层模式仍可以抓住降水云的主要辐射过程。即可以考虑雨水层、冰水混合层和冰云层的不同的辐射过程。而这种模式的选用更为主要的是, 通过考虑相邻降水云间的相互辐射作用研究云间相互辐射作用对上行辐射率的影响。

3 云物理模式模拟的飑线个例分析

水成物的垂直结构和云参数是在大气顶确定上行辐射率的辐射传输计算所必须了解的。为此, 选择前述云物理模式的一热带飑线的模拟结果作为辐射模式的输入进行研究。文献[9]给出了 4 个小时模式运行期间飑线降水的演变情况。图 1 为在飑线成熟阶段的 210 min 这一时刻选择的 $y=42$ km 处降水云垂直结构截面图, 由三幅构成。其中 (a) 为液态降水即雨水的分布; (b) 为云水的分布; 而 (c) 为总的含冰量的分布。零度等温线的近似高度约为 4 km。雨水的分布几乎在零度等温线以下, 尽管在有些地方波及到 4 km 以上, 但零度等温线以上雨水的含量较小。云水的分布呈现水平方向上的很大的不均一性, 而云水含量极大值对应上升速度极大值所处的位置^[9]。总含冰量其波及高度在 10 km 以上, 但主要分布在 4~9 km 范围内。另外, 温度高于 0℃ 的地方有一些还未溶化的冰晶存在。

4 辐射传输模式计算的亮温—降水率关系

为了考虑降水云间存在相互辐射作用时的亮温变化情况,在四个频率通道上进行了考虑和不考虑降水云间相互辐射作用时的亮温差异模拟试验。将模式中云的水平尺度

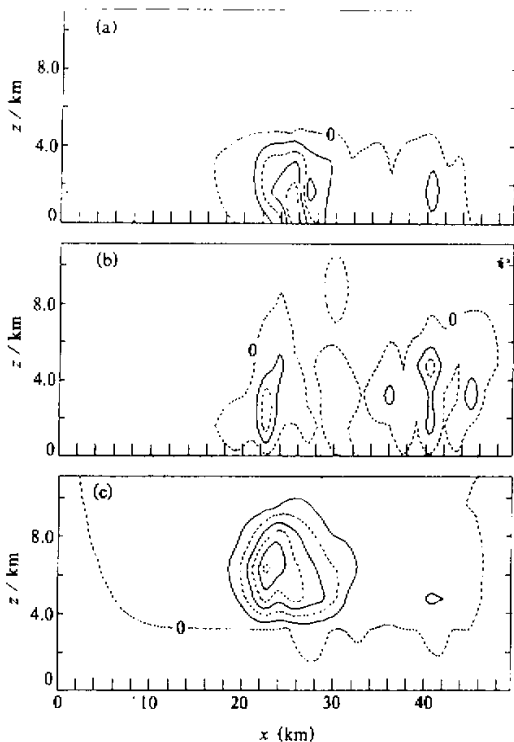


图1 $y=42$ km 处云物理参数的 $x-z$ 截面分布
(a) 雨水 (1 g m^{-3} 间隔); (b) 云水 (0.4 g m^{-3} 间隔);
(c) 总含冰量 (1 g m^{-3} 间隔)

取为 3 km, 星上仪器视角取为天底。将 $y=42$ km 处截面的各物理量在水平方向 3 km 范围平均, 并在所取五层的每个层次上进行垂向平均, 以此作为水平有限降水云辐射传输模式的输入进行计算。当不考虑云间相互辐射作用时, 将所考察的云带中每块云都看作是水平尺度为 3 km 的孤立云。在模式的计算处理上, 将侧边界条件看作是对称的侧边界条件, 并用大气背景的侧向通量密度限定侧边界条件。而这一侧向通量密度是用非散射大气平面平行模式^[5]计算得到的。实际上, 相邻降水云间是存在相互辐射作用的, 一块云受到另一块云的辐射作用时, 其侧向向内辐射通量密度值显然与大气背景下的侧向通量密度值不同。这样, 在相邻降水云间存在相互辐射作用时, 仍作为孤立云进行处理, 模式计算势必引入误差。所以, 当考虑云间相互辐射作用时, 在两

两降水云间的相邻边界上, 将一块云的向外侧向辐射通量密度作为另一块云的向内侧向辐射通量密度条件。在模式的计算处理上, 侧边界条件先用非散射大气平面平行模式的侧向通量密度值限定, 而下一步计算时每块云的侧向向内边界条件用上一步计算所得相邻云块的侧向向外通量密度值限定, 以计入云间相互辐射影响。如此迭代计算, 直至各相邻界面的侧向通量密度值收敛(平衡)到一定值为止。而对应这一侧边界条件的亮温便可看作考虑云间相互辐射作用时的亮温。应用上述作法, 在 $y=42$ km 处截面上计算的亮温变化由图 2 给出。为了便于比较, 在图中将考虑和不考虑云间相互辐射作用时的计算结果同时给出。其中, 实线表示考虑云间相互辐射作用时的结果, 而虚线则为不考虑云间相互辐射作用时的结果。从图 2 中可以看出, 考虑云间相互辐射作用和不考虑云

间相互辐射作用时的亮温进行比较时,除了个别区域外,不考虑云间相互辐射作用时将低估亮温,而且随着通道频率的不同,由于没有计入降水云间相互辐射作用而引入的亮温差异也不同。图3给出了四个频率通道的亮温差在截面上的变化情况。图中纵坐标是考虑降水云间相互辐射作用时的亮温减去不考虑这种作用时的亮温得出的亮温差。从亮温差的幅度上看,低频通道小于高频通道。从亮温差与降水云结构的关系来看,在19.4 GHz通道上,亮温差与降水云下层结构联系紧密。即亮温差的幅值与降水云下层的结构有较好的“正”相关关系。这是因为考虑相邻降水云间相互辐射影响时,下层的侧向通量密度较之不考虑降水云间相互辐射影响时的大,经过水成物的吸收再发射和散射辐射过程使上行辐射率增大。虽有上层的散射减弱作用,但不足以抵消增强了的上行辐射率。在85.6和92.0 GHz通道上,亮温差与降水云的上层结构联系紧密。即亮温差的幅值与上层的总含冰量的大小有较好的“负”相关关系。考虑相邻降水云间相互辐射影响时,降

水云下层向内的侧向通量密度较之不考虑这种作用时的大,而在上层侧向通量密度值较之不考虑云间相互作用时的小。因此,将相邻降水云的辐射影响看作外源时,较之不计入这种情况,在下层有“增暖”的趋势,而在上层却有“减温”的趋势^[5]。在冰云层中总含冰量大的地方,下层的增强了的辐射在上传过程中,由于雨滴和冰晶在该通道的散射衰减无法透过云层到达星上的仪器去抵消上层的“减温”作用。因此,在22 km到27 km区间,亮温出现负增量。与之相反,在上层总含冰量小的区域,由于上层的冰晶含量小,下层增强了的辐射在上传过程中,不仅未被全部衰减掉,而且还补偿了上层的“减温”作用,出现正的亮温增量。如在15 km和35 km附近的区域,85.6和92.0 GHz通道的亮温差出现峰值,正是上述原因造成的。在37.0 GHz通道上,降水云上层的“减温”作用和下层的“增暖”作用以及微波辐射在上传过程中的衰减程度均介于19.4

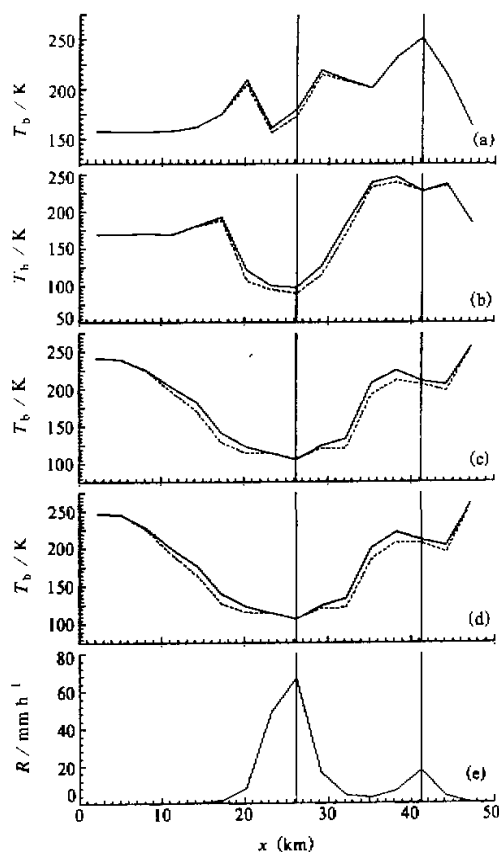


图2 $y=42$ km处 $x-z$ 截面的亮温变化

实线: 考虑云间相互辐射作用;

虚线: 不考虑云间相互辐射作用

(a) 19.4 GHz; (b) 37.0 GHz; (c) 85.6 GHz;

(d) 92.0 GHz和(e)雨强分布

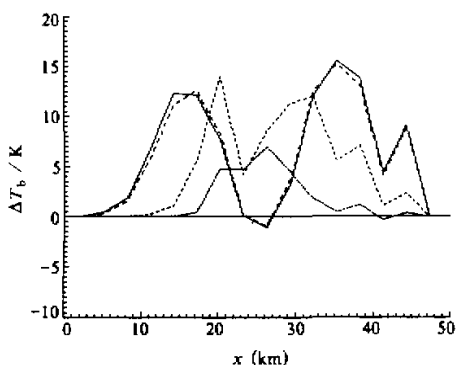


图3 亮温差在 $y = 42$ km 处截面上的分布

— 19.4 GHz, ... 37.0 GHz,
—— 85.6 GHz, —— 92.0 GHz

维微波辐射传输模式的输入。对考虑和不考虑降水云间相互辐射影响而引入的亮温差的分析表明, 侧向辐射通量密度值的估计不同将引起亮温的差别。如果不考虑实际存在的云间相互辐射影响而计算降水云的上行辐射率时, 模拟出的亮温在低频段将低估卫星上测到的亮温值; 在高频段则依降水云上层含冰量的大小而异, 即在降水云上层含冰量小的区域, 将低估卫星上测到的亮温, 且低估的幅度较低频通道的大, 而在降水云上层含冰量大的区域, 可能高估卫星上测到的亮温, 但高估的幅度较小。

致谢: 作者十分感谢美国NASA GSFC的C. Kummerow博士给予的辐射模式理论和云模式模拟资料方面的帮助。

5 结论

将三维云物理模式的输出作为三

参 考 文 献

- 1 Wilheit, T.T., A.T.C. Chang, M.S.V. Rao, R.B. Rodgers and J.S. Theon, 1977: A satellite technique for quantitatively mapping rainfall rates over the oceans, *J. Appl. Meteor.*, **16**, 551~560.
- 2 Wu, R. and J.A. Weinman, 1984, Microwave Radiances from precipitating clouds containing aspherical ice, combined phase and liquid hydrometeors, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7170~7178.
- 3 Kummerow, C., 1990, Rain and rain system structure from SSM/I measurements, *Preprint of American Meteorology Society Fifth Conf. Satellite Meteorology and Oceanography*, London, 241~246.
- 4 Simpson, J., R.F. Adler and G.R. North, 1988, A Proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **69**, 278~295.
- 5 林龙福、吕达仁、刘锦丽、吴北婴, 1994, 不同侧边界条件下水平有限降水云的微波辐射模式研究, *大气科学*, **18**(6), 729~738.
- 6 Tao, W.-K. and J. Simpson, 1989, Modeling study of tropical squall-type convective line, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 177~202.
- 7 Yeh, H.-M., N. Prasad and P.F. Adler, 1990, Tabulation of Mie Properties for an effective microwave radiative model, *Meteor. Atmos. Phys.*, **42**, 105~112.
- 8 Kummerow, C., R. A. Mack and I. M. Hakkarinen, 1989, A self-consistency approach to improve microwave rainfall rate estimation from space, *J. Appl. Meteor.*, **28**, 869~884.

- 9 Adler, R.F., H.-Y. M. Yeh, N. Prasad, W.-K. Tao and J. Simpson, 1991, Microwave simulations of a tropical rainfall system with a three dimensional cloud model, *J. Appl. Meteor.*, **30**, 924~953.

Numerical Study of Microwave Radiative Transfer of Precipitating Squall Line

Lin Longfu

(Air Force Institute of Meteorology, Nanjing 211101)

Lu Daren and Liu Jinli

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The relationship between upwelling microwave radiances from precipitating cloud and geophysical parameters was investigated when the output of a 3-D cloud physical model was used as the input of a 3-D radiative transfer model. The preliminary results indicate that if the radiative interactions existing between adjacent clouds are not taken into account in the upwelling radiance modeling, the simulated brightness temperature will underestimate the satellite observed one. The magnitude of underestimation is related to the lower part structure of the cloud for low frequency channels. For high frequency channels, the extent affected varies with the ice content of the upper layer of the cloud. When the ice content is small in the upper layer of the cloud, simulated T_b will underestimate the observed one and the magnitude of underestimation is larger than that for low frequency channels. When the ice content is large enough in the upper layer of the cloud, simulated T_b will overestimate the observed one, but the magnitude of overestimation is small.

Key words cloud physical model microwave radiative transfer brightness temperature
precipitation