

文章编号: 1007-4619 (2003)03-0227-06

降水云中液水含量的空基遥感

刘锦丽 吕达仁 张凌 段树

(中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 在建立不同降水云垂直结构模式的基础上, 利用矢量微波辐射传输模式进行空基云雨遥感的数值试验。结果表明, 星载微波辐射计 6.9GHz 通道对降水云的冰层很不敏感, 而对降水云柱总液水含量 (LWC) 非常敏感; 辐射亮温 (T_b) 随 LWC 呈单调变化关系; 进一步考查这个频率下 T_b 的两个极化分量差 $\Delta T_b (= T_{bv} - T_{bh})$ 和 LWC 的关系发现, 不同云结构(对流云和层状云)对 ΔT_b-LWC 关系影响较小。研究分析表明, 6.9GHz 的 v, h 两个通道有可能用于遥感降水云的液水总量。

关键词: 空基微波遥感; 云液水含量; 辐射传输模式

中图分类号: TP79/P407

文献标识码: A

1 引言

云中液水含量的定量测量对气候变化研究和灾害性天气监测、预报及军事上导弹再入大气层的消蚀作用等均有着十分重要的作用。在地表的微波遥感中, 云雨大气起着传输介质的作用。随着地球环境遥感研究和应用的迅速发展, 更全面更深入地了解微波信息在大气, 特别是云雨大气中的传输特性也具有重要的研究意义和应用价值。

由于云雨大气结构(水成物粒子的尺度、形状、取向、相态等)在时间、空间上的复杂多变性, 加之实际探测的困难, 云中液水含量的定量遥感至今仍是国际上具挑战性的前沿课题之一。

云中液水含量的探测除飞机直接测量外, 遥感方法有空基和地基遥感。地基微波雷达利用降水云回波反射率因子反演云中含水量分布, 微波辐射计可以测得沿波束路径积分的云液水总量^[1], 微波雷达-辐射计(主被动)联合遥感可以获得比单独使用雷达或辐射计精度更高的云中液水含量的分布^[2,3]。为了同时获得区域, 甚至全球范围云中液水总量的分布, 必须依靠空基遥感方法。目前国际上已有的空基遥感云雨分布的方法有: 主动的微波测雨雷达或主被动联合遥感(美日合作的 TRMM)方法反演云中含水量的分布, 但仅限于热带地区。被

动遥感方法, 主要是星载微波辐射计, 如美国国防气象卫星计划(DMSP)中的 SSM/I、美国 NOAA 极轨卫星 TIROS 的 AMSU、日本 ADEOS 的 AMSR 等。虽然被动微波辐射计只能测云中的液水总含量, 但后者功耗低、重量轻、体积小, 测量的区域广, 用于星载观测技术上实现的难度相对较小, 因而它更早更普遍被空间遥感所利用。考虑到我国即将上天的多模态微波辐射计, 这里也主要讨论被动空基遥感方法。

本文首先利用云的动力模式和实测资料相结合的方法建立洋面上不同类型降水云的垂直结构模式; 其次, 选择适合反演云中液水含量的云雨大气-地表耦合的矢量微波辐射传输模式。利用这个辐射传输模式和云垂直结构模式较系统地研究了降水云的辐射传输特性, 同时寻求降水云液水含量的定量反演方法。研究结果表明, 我们有可能利用低频(6.9GHz)频段星载微波辐射计两个偏振分量上的辐射亮温差反演云柱总液水含量。文章将介绍模拟计算所用的模式并用实测资料对模式进行验证, 分析和讨论计算结果。

2 模式

2.1 云模式

星载微波辐射计感测的是波束路径上的总辐射量。它依赖于所穿过的降水云垂直结构及地表状

收稿日期: 2003-01-27; 修回日期: 2003-12-24

©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: 本文获国家自然科学基金项目 No. 49885001, No. 40075006 及中科院空间科学与应用总体部的资助。

作者简介: 刘锦丽(1938—), 福建龙海人, 研究员, 主要从事空、地基大气遥感研究。发表论文 50 余篇。

态。实测表明,降水云的垂直结构在时间,空间上具有高度不均匀性。对主动雷达遥感而言,我们可能同时获得降水云垂直结构的信息,而对被动遥感方法,一般做法是设定降水云的垂直结构模式,在此基础上建立定量反演关系,这时选择合适的云结构模式对反演结果的影响是至关重要的。

本文利用 TOGA COARE 强化期美法合作的机载雷达-辐射计资料^[4](具有与 TRMM 星载雷达相同的工作频率, 13.8GHz)以及改进后的云动力模式建

立了热带洋面上层状云和对流云的垂直结构模式。其做法是,先用雷达的反射率垂直剖面资料识别层状云和对流云;再利用相近时刻的探空资料(ISS 系统测得)作为降水云动力模式的输入,由此获得相应降水云的垂直剖面资料,即冰晶,雪花,云滴,雨滴等的垂直分布。在此基础上建立具有代表性的降水云的平均结构模式。图 1 给出所建立的两种云的垂直结构模式。

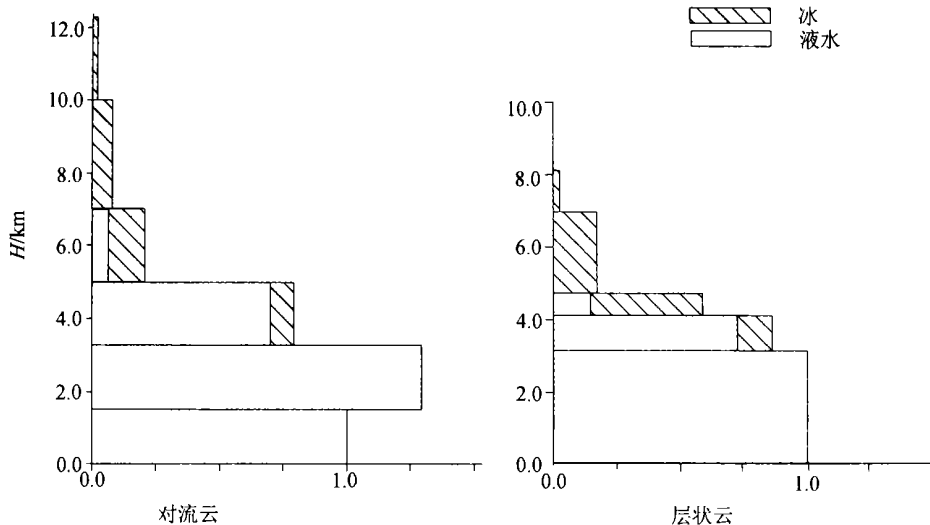


图 1 对流云与层状云的垂直结构模式

Fig. 1 Vertical structure model of convective and stratiform cloud

2.2 辐射传输模式

许多研究已表明,微波辐射计的偏振信息对降水云的识别及提高反演精度均有重要作用。目前用于云雨遥感的星载多波段微波辐射计多具有两个偏振通道,因而需要建立偏振微波辐射传输模式,即完整描述微波辐射传输中的全部 Stokes 参数的矢量微波辐射传输模式。国际上关于矢量微波辐射传输模式的研究开始于 20 世纪 80 年代。近年来这方面具有代表性的工作有:Evans 的平面分层矢量微波辐射传输模式^[5]和林龙福等^[6]的非对称侧边界有限云及 J. Hafferman^[7]的三维矢量微波辐射传输模式。利用这些模式能够适应当前国际上已有的和即将上天的多波段偏振微波辐射计反演方法的数值模拟试验。本研究对层状云主要采用 Evans 的矢量微波辐射传输模式,对对流云采用林龙福的三维矢量微波辐射传输模式,开展各种不同微波频率的试验,通过计算建立辐射亮温组合与云中液水含量之间的关系。

计算中假定液态和固态降水元均服从 Marshall-Palmer 滴谱分布;并选择平静海面为地表。

我们在分析 TOGA COARE 机载雷达资料中发现,对流云的尺度为 15—20km,而且这些对流云周围多是相对均匀的层状性降水云。因此,在对流云的计算中我们采用了 9 块云模式,中心为对流云,围绕它的是 8 块相同尺度的层状云,并考虑了这些云与对流云间的相互作用。每块云的尺度取为 15km

2.3 云结构模式的对比分析

为了考察所建立的云模式的有效性,我们利用 TOGA COARE 获得的实测资料^[4]。首先从海面经衰减订正^[8]的雷达反射率因子反演出降水强度,以此作为地表降水实况,再与相应时刻由机载辐射计实测获得的辐射亮温值作点散图(见图 2)。图 2(a), (b)中曲线分别为利用不同云结构、不同辐射传输模式计算出的不同云的辐射亮温与降水强度的关系。

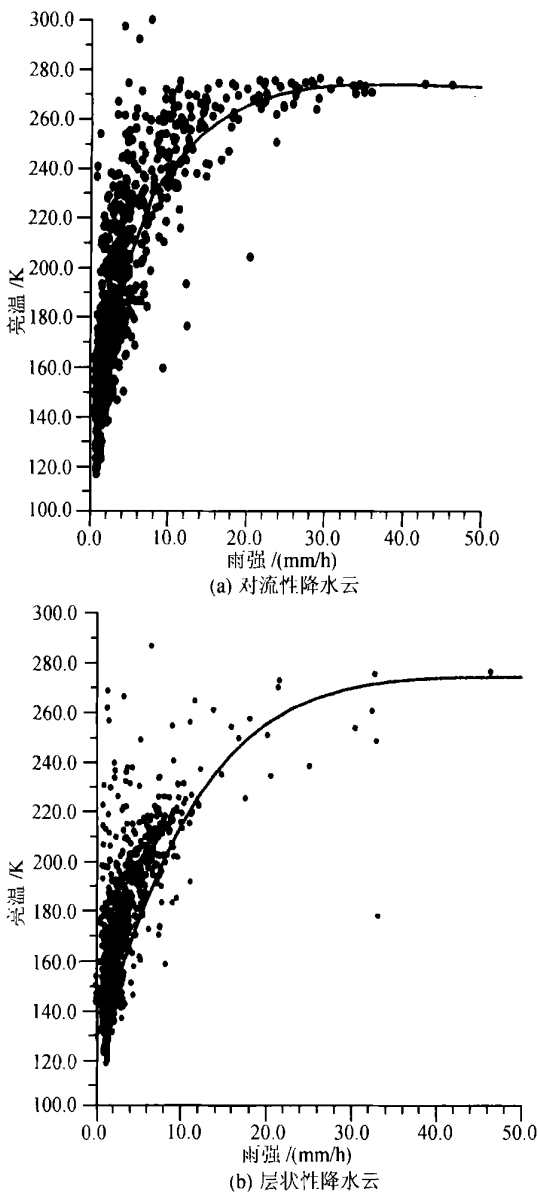


图2 亮温与雨强关系中模式与实测对比

Fig.2 Comparison result between simulation and observation of T_b - R

对比看出, 辐射亮温 T_b 与降水强度 R 的关系中, 实测与模式计算结果有基本一致的动态范围和一致的变化趋势, 特别是, 对流性降水情况下的符合性更为理想。说明了这两种简化的云结构模式以及两个微波辐射传输模式基本上能适用于热带洋面降水分布的反演研究。

3 计算结果

被动微波遥感不能直接感测地表的降水。它感测的是波束路径上的总辐射量, 包括降水云和地表

辐射量, 而降水云的辐射量是云中不同比例不同相态的降水元的辐射量之路径加权和, 更准确地说, 微波被动遥感降水是建立在遥感云的总含水量(液水和冰水)以及这个云的总水量与地面降水的内在联系上。因此, 我们将首先考查不同频率下辐射亮温 T_b 与降水云总含水量 TWC 的关系, 亦即利用上述云的结构模式及辐射传输模式建立降水云中 T_b - TWC 的关系, 以寻求改进反演降水云各类参数的方法。本文只讨论 6.9GHz 通道的计算结果。

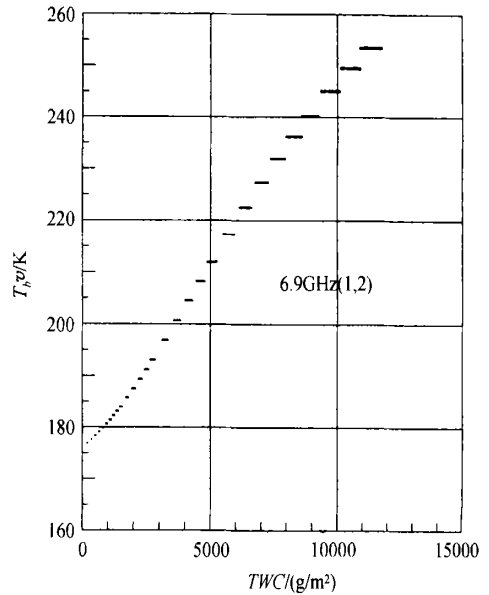


图3a 改变冰层含冰量时 T_b - TWC 关系

Fig.3a T_b versus TWC when changing ice water content in ice layer

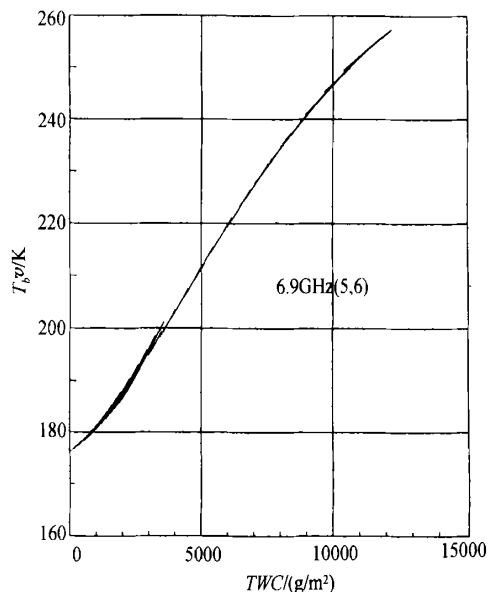


图3b 改变水层含水量时 T_b - TWC 关系

Fig.3b T_b versus TWC when changing liquid water content in liquid water layer

(1) 6.9GHz 频段辐射亮温 (T_b) 随云总水量 (TWC)的变化

图 3a 是 6.9GHz, v 分量层状云 T_b - TWC 的变化关系。图中 3 条曲线是代表降水云上部(图 1 中第 1、2 层)冰层中冰含量相对模式值改变 $\pm 50\%$ 时 T_b - TWC 关系。由图可以看出, 云上部冰含量的变化对辐射计的 T_b 测值几乎没有影响。说明这个频段的辐射计不能感测降水云的冰层部分。图 3b 是改变云下部(图 1 中第 5、6 层)液水含量 $\pm 50\%$ 的情况。结果与图 3a 相反, 这时 T_b 值对液水含量的变化非常敏感。所有液水变化所引起的 T_b 变化落在非常窄的变化范围内, 即表明 T_b 只与云柱总含水量相关。对于 6.9GHz h 分量及对流云的模拟计算结果均与上述层状云 v 分量的结果相类似。

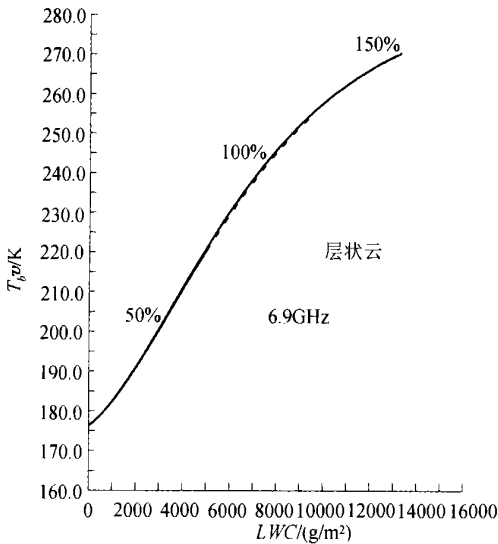


图 4a 层状云中 T_b - LWC 关系
Fig.4a T_b - LWC for stratified cloud

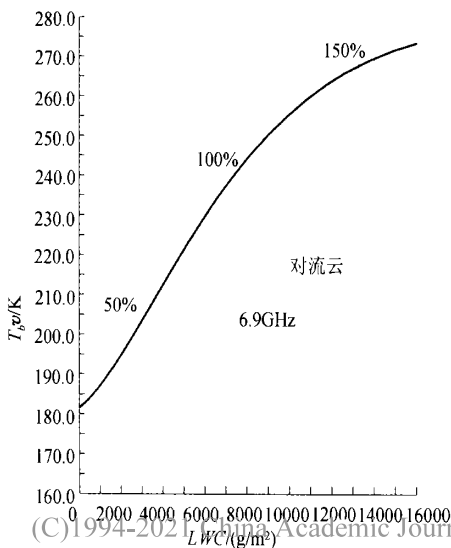


图 4b 对流云中 T_b - LWC 关系
Fig.4b T_b - LWC for convective cloud

(2) 6.9GHz 频段下辐射亮温 (T_b)随云总液水含量(LWC)的变化

下面我们直接考查辐射亮温 T_b 与云柱总液水含量值 LWC 的关系。模拟计算仍用图 1 的云结构模式。图 4a 和 4b 分别给出云柱总液水含量各变化 $\pm 50\%$ 时 6.9GHz v 通道下层状云和对流云 T_b - LWC 关系。

结果表明, 各图中三条曲线(50%, 100%, 150%)重合得很好, 说明 T_b - LWC 关系不随降水云液水总量值大小的变化而变化, 且 T_b 随 LWC 的增大而单调上升。另外, 从上节计算中已知 T_b 不能感测云中冰含量, 因此, 我们有可能利用 6.9GHz 这个通道的 T_b 值获得降水云中的液水总含量。 h 通道的计算结果也与之相类似。

下面我们考查 T_b 的 v 、 h 分量之差, 即 $\Delta T_b (= T_{bv} - T_{bh})$, 与 LWC 的关系, 特别是考查不同云型对 ΔT_b - LWC 关系的影响。

先分析不同云型对总含水量 TWC 与降水强度 R 关系的影响, 所用频率、云结构、辐射传输模式, 粒子谱型等均与上述计算相同。图 5 给出两种降水云 TWC - R 的计算结果。可以看出, 相同总含水量 (TWC)在不同云型中对应的降水强度 (R) 差别非常明显, 差别大小随 TWC 的增大而增大。

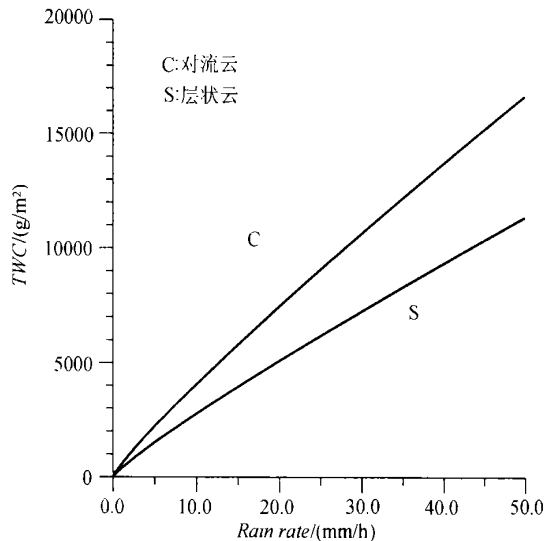


图 5 两种云的 TWC - R 关系 ($M-P$ 谱)

Fig.5 TWC versus Rain rate for two different cloud type

图 6 给出对流云和层状云 ΔT_b - LWC 的变化关系。可以看出, ΔT_b 与 LWC 关系中, 不同云型的 ΔT_b - LWC 关系相当一致, 说明了云的不同结构(除小液水含量外)对它几乎没有影响; 加上前述模拟计

算给出的 6.9GHz 对冰层极不敏感的结果,均表明了利用 6.9GHz 的 v, h 两通道遥感云柱总液水含量的可行性。

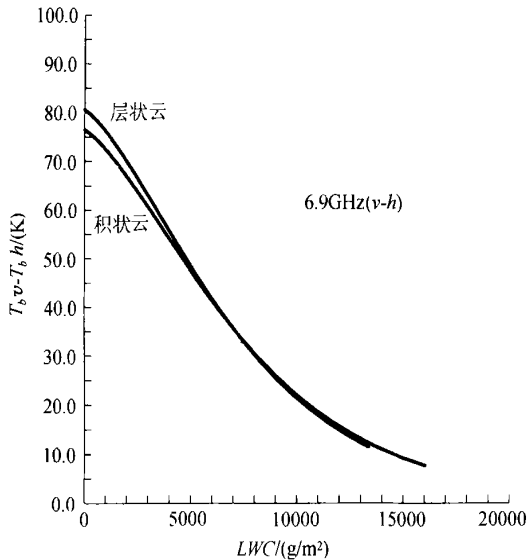


图 6 不同类型云 ΔT_b -LWC 关系

Fig.6 ΔT_b -LWC for different cloud type

4 结论与讨论

1. 本文利用 TOGA COARE 资料,根据雷达反射率因子垂直剖面以及云的动力学模式建立了洋面上对流云和层状云的垂直结构模式。在此基础上开展星载微波辐射计遥感云雨分布的模拟试验。计算结果表明,6.9GHz 的 v, h 通道对降水云的冰层极不敏感,而对云柱总液水含量十分敏感。 T_{bv} 和 T_{bh} 均随 LWC 的增大而单调递增, ΔT_b 随 LWC 的增大单调递减。特别是不同降水类型(对流云和层状云)所造成的云中液水垂直分布的相对变化在总量不变的情况下对 ΔT_b -LWC 关系几乎没有影响。这些结果为利用星载微波辐射计遥感降水云的液态总水量提供了一种方法。由于美国 EOS/AQUA 和日本 ADEOS II 卫星上均载有包括 6.9GHz 通道的微波遥感器(分别为 AMSR-E 和 AMSR),加上我国航天遥感试验亦将有接近该频段的微波辐射计上天,均可提供试验的机会。考虑到这个微波遥感器的地面分辨率均在几十 km 以上,可能还需要采用退卷积方法^[9]提高地面相元分辨率。

2. 被动微波遥感感测的是波束路径上的总幅

射量,它包括降水云和地表辐射量。本文未对地表(海表)状态变化影响作分析,在利用星载散射计反演风场后,这一工作可以获得辅助信息而订正。

当然,为了提高反演方法的有效性和可靠性,除了必须重视降水云物理模式及微波辐射传输模式的合理性外,多种遥感(空、地基,主、被动,红外、可见、微波)手段的综合利用及由大量实测资料的验证对比是十分重要的。本文的工作只是这方面的一个重要组成部分。

参考文献 (References)

- [1] Wei Zhong, Lin Hai & Xin Miao-xin: Measurement of Liquid Water Content in Cloud by Dual-Wavelength Ground-based Microwave Radiometer[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*. 1982, 6(2): 195-202 [魏重, 林海, 忻秒新: 8.6 毫米和 3.2 厘米两个波长地面辐射计探测云中含水量[J]. *大气科学*, 1982, 6(2): 195-205].
- [2] Lin Hai, Xin Miaoxin *et al.*: Ground-based Remote Sensing of LWC in Cloud and rainfall by A Combined Dual-wavelength Radar-Radiometer System[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1985, 2(1): 93-103.
- [3] Liu, Jinli and Ling Zhang: Remote Sensing of Liquid Water Content with Combined Radar-Radiometer[J]. *Atmospheric Research*. 1994, 34: 145-152.
- [4] Zhang Ling, Dou Xiankang & Liu Jinli: Studies of the Vertical Structure Model and Microwave Attenuation of Clouds and Precipitation over Tropical Ocean Area[J]. *Acta Meteorologica Sinica*. 1998, 112(4): 400-409.
- [5] Evans, K. F., and G. L. Stephens: A new polarized atmospheric radiative transfer model[J]. *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*. 1991, 46: 412-423.
- [6] Lin Longfu, Lu Daren, Liu Jinli & Wu Beiyong: Model Study of Microwave Radiance Emerging from Horizontally Finite Precipitating Clouds with Different Lateral Boundary Conditions[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*. 1994, 18(6): 729-738 [林龙福, 吕达仁, 刘锦丽, 吴北婴. 不同侧边界条件下水平有限云的微波辐射模式研究[J]. *大气科学*, 1994, 18(6): 729-738].
- [7] Hafeman, J. L. *et al.*: Physically Based Satellite Retrieval of Precipitation using a 3D Passive Microwave Radiative Transfer Model[J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 1996, 13(4): 832-850.
- [8] Dou X. K., J. Testud, P. Amayene: The study of the Space-borne Rain Radar Rainfall Rate Retrieval Algorithms by Simulations[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 1997, 42(3): 292-295
- [9] Ling Zhang, Shuowen Yang, Jinli Liu and Daren Lu: A method for retrieving inhomogeneous reflectivity fields within the radar beam[J]. *J. of Remote Sensing*, 1998, 2(2): 81-88. [张凌, 杨硕文, 刘锦丽, 吕达仁. 一种反演雷达波束内不均匀反射率场的方法. *遥感学报*. 1998, 2(2): 81-88.]

Space-borne Remote Sensing on Liquid Water Content of Precipitating Cloud

LIU Jin-li, LV Da-ren, ZHANG Ling, DUAN Shu

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

Abstract: Liquid water content (*LWC*) of precipitating cloud is of vital importance in monitor severe storms and weather modification, also for research and application of climate change and water cycle within the ocean-land-atmosphere system. It is well known that passive microwave techniques have been used in global precipitation remote sensing with preliminary success, but for remote sensing of *LWC* it is still a challenging task.

In this paper, the precipitating cloud models are established by using combined cloud dynamic model and the real observation data and verified with the real observation data obtained during TOGA COARE IOP. Based on these cloud models the numerical simulation study were made with vector radiative transfer model. It is found that the radiance of the channel 6.9GHz (*v* or *h*) is very sensitive to the column liquid water content of the precipitating cloud, the brightness temperature T_b monotonously increase with *LWC*; The brightness temperature difference of *v* and *h* channels of 6.9GHz, $\Delta T_b (= T_{bv} - T_{bh})$, is the best for remote sensing of *LWC* over ocean, ΔT_b monotonously decrease with *LWC*, and the influence of different cloud type to ΔT_b -*LWC* is small; On the contrary, the brightness temperatures are very insensitive to the ice water content of upper part of precipitating cloud, it means that ice water content of the precipitating cloud is almost without contribution to the total water content (*TWC*) of precipitating cloud.

Simulation results indicate that the channel of 6.9GHz on Satellite-borne radiometer can be used to estimate column liquid water content of precipitating cloud, for operational use we have to do the investigation of the retrieval accuracy in more details, especially to verify by real observation data.

Key words: space-borne microwave remote sensing; liquid water content of precipitating cloud; radiative transfer model