用 TRMM/TMI 估算 HUBEX 试验区的云中液态水*

姚展予

(中国气象科学研究院,北京, 100081)

李万彪 朱元竞 赵柏林

(北京大学物理学院大气科学系,北京, 100871)

摘 要

文中应用热带降雨测量卫星微波成像仪的微波遥感资料反演云中液态水。由于微波成像仪 85.5 GHz 通道对云中液态水非常敏感,通过离散纵坐标矢量辐射传输模式,运用迭代的方法可以有效地反演出陆地上空非降水云中的液态水路径。在淮河流域能量与水分循环试验中,分别运用微波成像仪 85.5 GHz 垂直极化单通道和微波成像仪 85.5 GHz 极化亮温差两种方法来估算陆地上空的云中液态水路径,反演结果与地基微波辐射计的测量结果是较为一致的。当地表比辐射率或地表温度误差较大时,用极化亮温差法估算云中液态水路径相对较好,尤其是对于低云,因为该方法对地表温度不敏感。

关键词:热带降雨测量卫星,微波成像仪,反演,云中液态水。

1 引 言

自 1988 年以来,世界气候研究计划(WCRP)开展了一系列全球能量和水分循环试验(GEWEX),GEWEX 亚洲季风试验(GAME)是与 GEWEX 相关的大陆尺度的一个试验计划。在中国境内开展的淮河流域能量与水分循环试验(HUBEX)是 GEWEX/GAME 的一个重要组成部分,而卫星遥感云中液态水(CLW)是其中的一个新的研究内容。

陆地上空和海洋上空的云中液态水的卫星遥感方法有很大的不同。由于海洋表面的比辐射率较低,卫星遥感海洋上空的云中液态水比陆地上空更为敏感。早期的卫星遥感海洋上空云中液态水的研究主要借助于 Nimbus-E/NEMS 或 Nimbus-5/ESMR[1~3], Nimbus-6/SCAMS[4,5], Nimbus-7/SMMR 或 Seasat/SMMR[6~8]等各种气象卫星上的微波探测仪器,近年来卫星微波反演海洋上空云中液态水的研究主要运用美国国防气象卫星(DMSP)上的特殊微波成像仪(SSM/I),主要代表作见文献[9~12]。

由于陆地地表比辐射率较大,陆地上空云中液态水的卫星遥感相对要困难许多。早期的卫星遥感陆地上空云中液态水的工作包括运用 Nimbus 系列卫星上的红外资料[13]和分别运用 22.235 和 31.4 GHz 通道的微波资料[14], Yeh 和 Liou[15]在模式中综合利用红外和微波资料计算云中液态水和其他云参数。近年来有关卫星微波遥感陆地上空云中液态水的研究工作主要围绕着应用 DMSP 卫星 SSM/I 微波通道资料上。Jones 和 Vonder Haar[16]及 Greenwald 等[17]分别利用 SSM/I 的高频通道资料来遥感陆地上空的云中液态水,取得了一定的成功。

文中将应用 TRMM 卫星微波成像仪(TMI)的 85.5 GHz 通道资料来反演 HUBEX 试验区非降水云中液态水路径,并将反演的寿县地区云中液态水路径与在该地用地基微波辐射计的测量结果进行比较。

2 研究区域和资料分析

用于陆地上空云中液态水反演试验的研究区域是 HUBEX 试验区(28~40°N, 110~122°E)(图 1)。

* 初稿时间:2002 年 8 月 6 日;修改稿时间:2002 年 9 月 3 日。

资助课题:国家自然科学基金项目(49794030),国家科技攻关项目(2001BA610A-06-05)和中国气象局与吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室科学基金。

图 1 中“+”位置是安徽省的寿县(32.55°N, 116.78°E),该地布设了一部地基微波辐射计,提供了 1998 和 1999 年的 6 和 7 月的观测资料。

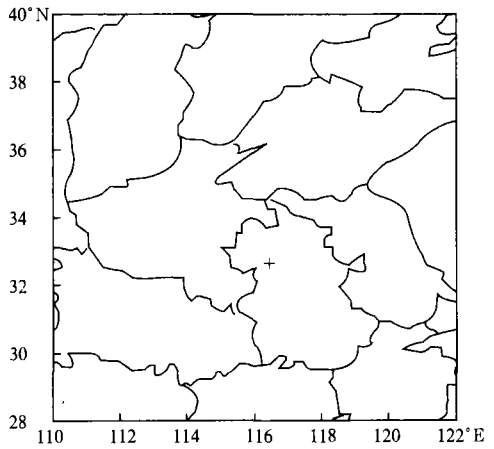

图 1　HUBEX 试验区
(“+”是安徽省寿县(32.55°N, 116.78°E),
该地布设了一部地基微波辐射计)

用于反演液态水路径的资料是热带降雨测量卫星(TRMM)微波成像仪(TMI)的微波遥感资料。TRMM 卫星的运行为近赤道非太阳同步轨道,运行周期为 91.3 min。TMI 天线的扫描波束轴与仪器的旋转轴成 49°角,到达地面的入射角为 52.76°,扫描波束为锥面,观测的扫描角度为 130°,在地球表面的扫描宽度为 758.5 km,每条扫描线由 104 个低分辨率像素或 208 个高分辨率像素组成。TMI 是由 5 个频段的 9 个线性极化通道组成的被动微波辐射测量系统,TMI 的 5 个观测频段的中心频率分别为 10.65,19.35,21.3,37.0 和 85.5 GHz(以下分别简称为 10, 19, 21, 37 和 85 GHz),其中除了 21.3 GHz只有垂直极化通道外,其余的 4 个频段都具有垂直极化通道和水平极化通道。10,19,21 和 37 GHz 通道称为低频通道,85 GHz 通道称为高频通道。表 1 给出了 TMI 各通道的中心频率、极化状况和空间分辨率[18]。

表 1　TMI 各通道的中心频率、极化状况和空间分辨率

通　道	中心频率 (GHz)	极化 (V-垂直,H-水平)	空间分辨率 (km×km)
1	10.65	V	63×37
2	10.65	H	63×37
3	19.35	V	30×18
4	19.35	H	30×18
5	21.3	V	23×18
6	37.0	V	16×9
7	37.0	H	16×9
8	85.5	V	7×5
9	85.5	H	7×5

地基双频微波辐射计由北京大学研制,两个中心频率 22.235 和 35.3 GHz 用以分别测量水汽和液态水总量。地基微波辐射计的测量结果用来与 TMI 的反演结果进行对比。

3　原理和方法

计算大气顶处的向上微波辐射亮温的基础是微波辐射传输方程。对于非散射的平面平行大气,在非黑体表面边界条件下,从卫星上接收的微波辐射的传输方程可表示如下:

$$I_\upsilon(0) = \epsilon_\upsilon B_\upsilon(T_s)\tau_\upsilon(p_s,0) + \int_{p_s}^{0} B_\upsilon[T(p)]\cdot \frac{\partial\tau_\upsilon(p,0)}{\partial p}\mathrm{d}p + (1-\epsilon_\upsilon)[\tau_\upsilon(p_s,0)]^2\cdot \int_{p_s}^{0}\frac{B_\upsilon[T(p)]}{[\tau_\upsilon(p,0)]^2}\frac{\partial\tau_\upsilon(p,0)}{\partial p}\mathrm{d}p + (1-\epsilon_\upsilon)[\tau_\upsilon(p_s,0)]^2 B_\upsilon(T_\infty) \quad (1)$$

式中 $I_\upsilon(0)$是位于气压 $p=0$ 处的卫星接收到的频率为 υ 的向上微波辐射强度,ϵ_υ 是地表比辐射率,$B_\upsilon(T)$是温度为 T 的普朗克函数,T_s 是地表温度,p_s 是地面气压,$\tau_\upsilon(p,0)$是气压 $p=p$ 到气压 $p=0$ 这一层大气的透过率,$T_\infty\approx 2.7$ K 是宇宙背景温度。式(1)右边的第 1 项是地表向上发射辐射贡献项,第 2 项是大气向上直接发射辐射贡献项,第 3 项是大气向下发射辐射经地表反射后再向上传输的辐射贡献项,第 4 项是宇宙背景辐射经地表反射后再向上传输的辐射贡献项。第 4 项的贡献相对于前 3 项的贡献而言是小量,可以忽略。

当用星载微波辐射测量仪器遥感云中液态水含量时,85.5 GHz 通道比其它通道相对更加敏感[19]。由于尺度较大的降水粒子的散射效应也会显著地影响 85.5 GHz 辐射,本文只考虑用 TRMM/TMI 的 85.5 GHz 通道的微波遥感资料反演非降水云中的液态水路径。

用 85.5 GHz 垂直极化通道遥感云中液态水路径时,首先将所研究的非降水云区假定为晴空区,并应用微波辐射传输方程计算晴空条件下估计的该通道的亮温值 T_{B85V}(下标 V 表示垂直极化)。由于实际研究的区域为非降水云区,云水粒子对 T_{B85V}有一定的吸收衰减,因此用 TMI 实测的 T_{B85V}要比晴空条件下估计的 T_{B85V}小,而晴空条件下的 T_{B85V}估计值与用 TMI 遥感的 T_{B85V}实测值之间的差值正好反映云中液态水的吸收影响。

借助于离散纵坐标矢量辐射传输模式(VDISORT)[20],我们运用迭代的方法可以确定出非降水云中的液态水含量。图2给出运用 T_{B85V} 单通道法估算云中液态水路径的结构框图和基本步骤,图中下标c和下标m分别代表亮温 T_{B85V} 的模拟计算值和卫星实际测量值,下标 i 代表第 i 次循环,$i = 0, 1, 2 \cdots n$。

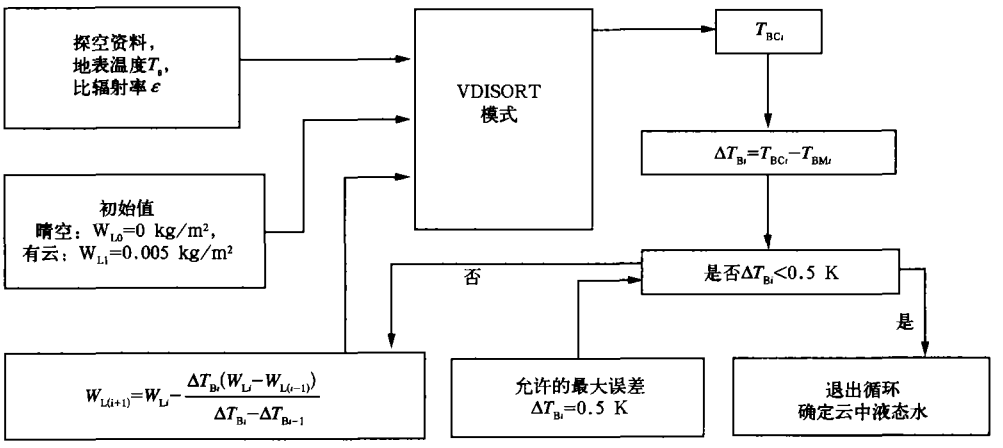

图2 用单通道法反演云中液态水含量 W_L 的结构框图

当地表比辐射率或地表温度较难确定时,用单通道法反演陆地上空液态水路径时在某些情况下会有一定的限制,因为单通道法的反演精度依赖于地表比辐射率的反演精度。Greenwald 等[17]建议用极化亮温差法来反演液态水路径,该方法对地表温度不敏感,对反演低云的液态水路径有一定的优越性。

从式(1)中,垂直极化(用下标 V 表示)和水平极化(用下标 H 表示)的辐射强度的差值可表示为

$$I_V(0) - I_H(0) = (\epsilon_V - \epsilon_H)B(T_s)\tau(p_s,0) - (\epsilon_V - \epsilon_H)[\tau(p_s,0)]^2 \cdot \int_{p_s}^{0} \frac{B[T(p)]}{[\tau(p,0)]^2}\frac{\partial\tau(p,0)}{\partial p}dp - (\epsilon_V - \epsilon_H)[\tau(p_s,0)]^2 B(T_\infty) \quad (2)$$

由于宇宙空间的辐射贡献非常小,式(2)中右边的第三项可以忽略。

对式(2)的辐射强度应用 Rayleigh - Jeans 定律,辐射强度的极化差($D_P(I)$)可以简化为辐射亮温的极化差($D_P(T_B)$)[21]

$$D_P(T_B) \approx D_P(\epsilon)(T_s - T_a)\tau \quad (3)$$

式中 $D_P(T_B) = (T_{BV} - T_{BH})$,$D_P(\epsilon) = \epsilon_V - \epsilon_H$,$T_s$ 是地表温度,T_a 是向下的大气辐射被地表反射后向上传输部分的相当温度。通常情况下,与 T_s 相比 T_a 可以忽略,因此式(3)可以简化为

$$D_P(T_B) \approx D_P(\epsilon)T_s\tau \quad (4)$$

应用 VDISORT 模式可以计算出 $D_P(\epsilon)$,因此从式(3)中可以确定出 $D_P(T_B)$。

4 结果和分析

在 GAME/HUBEX 加强观测期(1998 和 1999 年 6 和 7 月),运用 TRMM/TMI 的观测资料,我们对非降水云中液态水路径进行了反演试验。结果显示,用 T_{B85V} 单通道法和 T_{B85} 极化亮温差法均可反演出 HUBEX 区域(28～40°N, 110～122°E)非降水云中的液态水路径,但 T_{B85} 极化亮温差法比 T_{B85V} 单通道法对低云的反演效果更好,因为它对地表温度不敏感。

文中还特别针对安徽寿县(图1中的"+"位置)上空的非降水云,用 TMI 资料反演的云中液态水与该地专门布设的地基微波辐射计遥感的云中液态水进行了对比分析。

图3给出了根据 TMI 的实测资料运用 T_{B85V} 单通道法和 T_{B85} 极化亮温差法反演的安徽寿县地区云中液态水路径与该地区地基微波辐射计探测的相应结果对比的散点图。表2给出了对比结果的误差统计分析。结果表明,用 TMI 资料反演的云中液态水路径与用地基微波辐射计遥感的结果较为一致,说明基于 TMI/T_{B85} 观测资料反演的云中液态水路径是可信的。

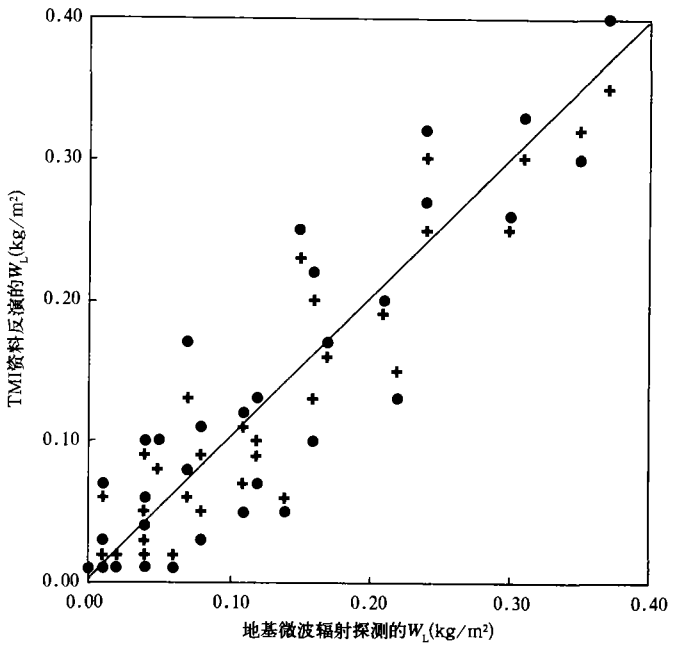

图 3　用两种 TMI 反演方法反演的安徽寿县地区云中液态水路径与地基微波辐射计探测结果对比的散点分布
（“●”为 TMI/T_{B85V}单通道法反演结果，“+”为 TMI/T_{B85}极化亮温差法反演结果）

表 2　用两种 TMI 反演方法反演的云中液态水路径与地基微波辐射计探测结果对比的误差统计

反演方法	相关系数	RMS (kg/m²)
TMI/T_{B85V}单通道法	0.956	0.048
TMI/T_{B85}极化亮温差法	0.959	0.043

5　结　论

云中液态水是了解大气和云微物理过程的一个重要参数，它对某些天气系统的发生发展过程起着重要的作用。在中尺度模式中，潜热效应的大小与云中液态水的含量密切相关；对于云模式或气候模式，其微物理过程可以用云中液态水的测量结果进行测试或验证。有效地确定云中液态水是非常必要的。

卫星遥感云中液态水与其它探测手段相比具有很大的优越性。本文运用 TRMM/TMI 85.5 GHz 通道遥感资料来尝试估算云中液态水路径。在 HUBEX 试验加强观测期间，分别采用 85.5 GHz 垂直极化单通道法和 85.5 GHz 极化亮温差法两种方法对 HUBEX 试验区陆地上空非降水云中的液态水路径进行了反演试验。应用 VDISORT 模式模拟出 TMI 85.5 GHz 通道晴空条件下的亮温，借助于迭带的方法，模拟亮温与实测的非降水云条件下的亮温之间的差异可以成功地用来反演陆地上空的云中液态水路径。

对安徽寿县地区，用 T_{B85V}单通道法和 T_{B85}极化亮温差法两种方法反演的云中液态水路径与地基微波辐射计的遥感对比结果表明，这两种方法反演陆地上空非降水云中液态水路径是可行的。进一步的试验对比显示，T_{B85}极化亮温差法适用性更广，因为该方法对地表温度非常不敏感，尤其是对于低云，T_{B85}极化亮温差法反演液态水路径精度更高、效果更好。

致谢：感谢日本 NASDA 提供了 TMI 全球观测资料。

参考文献

1　Grody N C. Remote sensing of atmospheric water content from satellites using microwave radiometry. IEEE Trans Antennas Propag, 1976, AP-24: 155～162

2 Staelin D H, Kunzi K F, Pettyjohn R L, et al. Remote sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus 5 Microwave Spectrometer. J Appl Meteor, 1976, 15: 1204～1214

3 Chang A T, Wilheit T T. Remote sensing of atmospheric water vapor, liquid water, and wind speed at the ocean surface by passive microwave techniques from the Nimbus 5 satellite. Radio Sci, 1979, 14: 793～802

4 Rosenkrantz P W, Staelin D H, Grody N C. Typhoon June (1975) viewed by a scanning microwave spectrometer. J Geophys Res, 1978, 83: 1857～1868

5 Grody N C, Gruber A, Shen W C. Atmospheric water content over the tropical Pacific derived from the Nimbus 6 scanning microwave spectrometer. J Appl Meteor, 1980, 19: 986～996

6 Njoku E G., Swanson L. Global measurements of sea surface temperature, wind speed, and atmospheric water content from satellite microwave radiometry. Mon Wea Rev, 1983, 111: 1977～1987

7 Prabhakara C, Wang I, Chang A T C, et al. A statistical examination of Nimbus-7 SMMR data and remote sensing of sea surface temperature, liquid water content in the atmosphere and surface wind speed. J Climate Appl Meteor, 1983, 22: 2023～2037

8 Curry J A, Ardeel C D, Tian L. Liquid water content and precipitation characteristics of stratiform clouds as inferred from satellite microwave measurements. J Geophys Res, 1990, 95: 16659～16671

9 Alishouse J C, Snider J B, Westwater E R, et al. Determination of cloud liquid water content using the SSM/I. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1990, 28: 817～822

10 Petty G W. On the response of the Special Sensor Microwave/Imager to the marine environment-Implications for atmospheric parameter retrievals: [Ph.D. thesis]. Seattle: Univ. of Washington, 1990

11 Hargens U. Remote sensing of cloud liquid water during ICE'89. The third specialists meeting on microwave radiometry and remote sensing applications. NOAA Environ Res Lab, Boulder, Colorado, 1992. 27～31

12 Greenwald T J, Stephens G L, Vonder Haar T H, et al. A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations. J Geophys Res, 1993, 98: 18471～18488

13 Feddes R G, Liou K. Atmospheric ice and water content derived from parameterization of Nimbus 6 High-resolution Infrared Sounder data. J Appl Meteor, 1978, 17: 536～551

14 Liou K, Duff A D. Atmospheric liquid water content derived from parameterization of Nimbus 6 scanning microwave spectrometer data. J Appl Meteor, 1979, 18: 99～103

15 Yeh H, Liou K. Remote sensing of cloud parameters from a combination of infrared and microwave channels. J Climate Appl Meteor, 1983, 22: 201～213

16 Jones A S, Vonder Haar T H. Passive microwave remote sensing of cloud liquid water over land regions. J Geophys Res, 1990, 95: 16673～16683

17 Greenwald T J, Combs C L, Jones A S, et al. Further development in estimation cloud liquid water over land using microwave and infrared satellite measurements. J Appl Meteor, 1997, 36: 389～405

18 Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. J Atmos Oceanic Technol, 1998, 15: 809～817

19 Njoku E G. Microwave remote sensing of the earth from space: A review. Proc IEEE, 1982, 70: 728～750

20 Weng F. A multi-layer discrete-ordinate method for vector radiative transfer in a vertically-inhomogeneous, emitting and scattering atmosphere－I Theory. J Quant Radiat Transfer, 1992, 47: 19～34

21 Combs C L, Greenwald T J, Jones A S, et al. Satellite detection of cloud liquid water over land using polarization differences at 85.5 GHz. Geophys Res Let, 1998, 25: 75～78

ESTIMATION OF CLOUD LIQUID WATER OVER THE HUBEX AREA USING TRMM/TMI

Yao Zhanyu

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081)

Li Wanbiao　Zhu Yuanjing　Zhao Bolin

(*Department of Atmospheric Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100871)

Abstract

The ability of the tropical rainfall measuring mission microwave imager (TRMM/TMI) for cloud liquid water (CLW) retrieval has been demonstrated in this study. Due to the great sensitivity of the TMI 85.5 GHz channels to CLW, the liquid water path (LWP) of nonprecipitating clouds over land can be successfully estimated by using the vector discrete ordinate radiative transfer (VDISORT) model based on the iteration algorithm. Both the vertical－polarized 85.5 GHz single－channel method and the polarization－difference of 85.5 GHz method were applied for the LWP estimates over land regions during the Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (HUBEX) in China. The retrieval results show reasonable agreement with the ground－based microwave radiometer measurements. When the surface emissivity or skin temperature is difficult to be made sure, the polarization－difference method shows advantages of providing estimates of LWP, especially for low clouds because of its extremely insensitiveness to the surface skin temperature.

Key words: TRMM/TMI, Retrieval, Cloud liquid water.