

热带测雨卫星 TMI 探测结果对非降水云液态水路径的反演方案研究*

王 雨¹ 傅云飞¹ 刘国胜²

1 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥, 230026

2 美国佛罗里达州立大学, 气象系

摘 要

根据 TRMM TMI 的探测特点, 结合微波辐射传输模式, 研究了针对副热带地区非降水云液态水路径的 TMI 反演方案, 并对反演方案进行了间接检验。首先, 利用微波辐射传输模式进行模拟研究, 分析了在副热带地区, 相应 TMI 各通道的微波亮温对非降水云液态水路径的响应特点, 结果表明 37.0 GHz 和 85.5 GHz 的水平极化通道探测结果对非降水云液态水路径的响应更为敏感; 随后, 利用模式分析了 TMI 各单一通道反演的非降水云液态水路径与理论值的差异, 并在此基础上给出了利用 37.0 GHz 和 85.5 GHz 的水平极化通道亮温联合反演非降水云液态水路径的方案; 最后, 利用 TMI 的探测结果, 采用该反演方案对无云区、非降水云区以及台风降水云区进行了反演计算。结果表明, 无云区的液态水路径在 $-1 \sim 1 \text{ g/m}^2$ 之间, 且平均值为 10^{-5} 量级; 非降水云的液态水路径变化范围在 $0 \sim 500 \text{ g/m}^2$ 之间, 且其水平分布与 TRMM 的可见光通道 $0.64 \mu\text{m}$ 探测的云分布一致; 在台风降水云个例中, 随着台风的成熟, 高液态水路径的面积比初始阶段增多, 且当地表降水率小于 5 mm/h 时, 云中液态水路径随地表降水率的增大而逐渐增大。

关键词: TMI, 微波反演, 非降水云, 液态水路径。

1 引 言

云作为气象要素之一, 对气候系统的影响十分重要, 且具有不确定性。一方面, 云通过反射和吸收太阳短波辐射、吸收和发射长波辐射, 进而影响地气系统的辐射收支平衡^[1]。研究表明, 低云量的增加可抵消一部分温室效应^[2]; 另一方面, 云物理过程是形成云降水的一个关键环节, 决定着云中潜热释放及垂直分布。如对流降水过程的潜热加热整个对流层大气, 而层云降水过程的潜热释放主要位于对流层中上部^[3]。

云的液态水路径(Liquid Water Path, 用 P_{LW} 表示), 即气柱垂直积分的液态水含量, 它和云状、云温、云高、光学厚度等宏观物理参数, 以及粒子组成、

粒子大小及谱分布等微物理参数一起, 共同决定着云的性质。因此, 液态水路径的大小不仅影响大气辐射, 而且也是可降水量的源头之一。后者对空中水资源开发十分重要。近些年来, 国内外许多学者对液态水路径进行了研究^[4-8]。其中, 魏重和吕达仁^[5]发展了一个双通道遥感云水和水汽的反演方案。刘锦丽等^[6]选取低频通道极化差来遥感降水云的液水总量。陈洪滨^[7]利用亮温差与液态水路径的线性关系反演云水。此外, 他还提出了一个利用卫星-地面的微波衰减, 来确定云水总量的设想^[8]。

由于直接观测液态水路径, 并获得全球液态水路径的分布十分困难, 所以卫星遥感是研究液态水路径的有效方式之一。卫星遥感反演液态水路径主要采取两类方法: 一类为可见光/红外方法, 即利用

* 初稿时间: 2005 年 8 月 26 日; 修改稿时间: 2005 年 12 月 25 日。

资助课题: 国家重点基础研究专项经费(2004CB418304)、中国科学院知识创新工程重要方向项目基金(ZKXC2-SW-210)、国家自然科学基金(40175015、40375018)、国家自然科学基金海外杰出青年基金(40428006)。

作者简介: 王雨, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事卫星遥感云与降水及气溶胶研究。电子信箱: fyf@ustc.edu.cn

非吸收的可见光通道和吸收的近红外通道,计算云的可见光光学厚度和云有效半径 r_e 并认为液态水路径 P_{LW} 遵从如下经验关系:

$$P_{LW} = \frac{2}{3} \times r_e$$

20世纪80年代初, Gloersen 等^[10]利用 Nimbus7 的多通道扫描微波辐射计 (SMR), 系统性地研究了微波反演液态水路径方案。此后, 很多学者利用 SSM/I (Special Sensor Microwave/ Image) 探测结果, 采取不同的反演方案对液态水路径进行了研究, 如 Alishouse 等^[11]的液态水路径统计反演方案; Petty^[12]的准物理模型估计液态水路径方案; Greenwald 等^[13]的同时反演液态水路径和可降水量的方案; Liu 和 Curry^[14]的利用云反射率与 39 GHz 水平极化通道亮温关系反演液态水路径的方案。但遗憾的是, 各种方案计算结果都不尽相同, 这主要是由于验证结果的困难造成。在用间接的方法验证比较结果表明, Liu 和 Curry^[14]方案准确性较高, 因此该方案被用于印度洋试验 (INDOEX) 机载成像微波辐射计 (AIMR) 探测结果的反演计算, 取得了很好的结果^[15]。

本文以 Liu 和 Curry^[14]的反演方案框架为基础, 结合微波辐射传输模式, 分析了 TMI 各个通道微波亮温对非降水云液态水路径的敏感性, 提出了基于 TMI 探测结果的非降水云液态水路径反演方案, 并用个例进行了反演计算和检验, 为今后统计分析研究非降水云特征奠定基础。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用热带测雨卫星^[16] (Tropical Rainfall Measuring Mission, 简称 TRMM) 上搭载的微波成像仪 (TMI) 探测资料 1B11 是美国航空航天局 (NASA) 哥达德飞行中心 (GSFC) 和日本空间发展署 (JAXA) 地球观测研究中心 (EORC) 发布的 TRMM 标准资料之一。1B11 是经过标定后的 TMI 各通道探测亮温数据。TMI 接收的微波信号频率: 10.65, 19.35, 21.3, 37.0, 85.5 GHz。除 21.3 GHz 频率是单一垂直极化通道外, 其他 4 个频率均为水平和垂直极化双通道。TMI 扫描的宽度为 760 km, 视场为一椭圆。各频率通道的水平分辨率不等, 从低频 10.65 GHz 约 63 km × 37 km 到高频 85.5 GHz 的

7 km × 5 km^[17]。

此外, 文中还用到了由 TMI 探测结果反演的日平均海表温度资料^[18] (TMSST)。在以往反演方案中, 海表温度资料常使用红外辐射计探测结果或气候平均值数据。但红外信号反演的地表温度易受云的影响, 而气候平均海表温度数据也有时空变化反映能力差的缺点。因此, 1B11 与 TMSST 的同时使用, 不仅可以避免上述缺点, 而且可以减少资料间匹配误差。

2.2 辐射传输模式

本文采用的模式是 Liu^[19]设计的平面平行微波辐射传输模式, 其主要方程为

$$\mu \frac{dI(\mu, \mu_0)}{d} = I(\mu, \mu_0) - \frac{1}{2} I(\mu, \mu) \cdot P(\mu, \mu) d\mu - (1 - \omega_0) B(\mu)$$

其中 $I(\mu, \mu_0)$ 是光学厚度 τ 处、沿 μ (天顶角的余弦) 方向传输的微波辐射率, 可以根据普朗克函数转换成亮温; $B(\mu)$ 为 τ 处的黑体辐射率; P 为散射相函数; ω_0 为单次辐射反照率。

Liu^[19]研究发现, 当卫星观测频率为 19.4 GHz 和 85.5 GHz, 观测角为 53° 时, 与精确模式 (32 流多流离散纵标法) 相比, Liu 模式计算速度提高了 1000 倍, 而最大误差不超过 3 K。因此, 该模式快速准确, 可用于计算微波辐射性质 (亮温) 和进行辐射资料同化。

2.3 反演方案框架

本文采用的液态水路径反演方案的框架结构, 来源于 Liu 和 Curry^[14,15]的 SSM/I 和 AIMR 的液态水路径反演模式。在他们的模式中, 液态水路径可以用如下表达式计算

$$P_{LW} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{1}{1 - \tau_c}\right) \cos \theta \quad (1)$$

其中 k 是液态水的吸收系数, 它是频率和云温的函数^[12]; θ 是入射角; τ_c 是云的发射率, 可通过以下公式计算得到

$$a^2 + b^2 + c^2 = 0$$

其中 $a = T_c$, $b = T_{B0} - (1 + \tau_c) T_c$, $c = T_B - T_{B0}$, $T_B = 1 - \frac{T_{B0}}{2} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)$ 。 T_a , T_s , T_c 分别表示平均大气温度、海表温度和云温。而 T_B 和 T_{B0} 分别表示观测的亮温值和晴空亮温值。

3 反演方案理论分析

在 Liu 和 Curry 的液态水路径反演方案中,所选取的微波探测仪器为 SSM/I 和 AIMR,那么,同样的方案是否适用于 TMI?此外,他们所研究的区域主要为热带海洋地区。由于大气状况有所不同,该方案能否直接用于中国沿海和副热带海洋地区?我们有必要对 TMI 各通道亮温的敏感性和上述反演框架的适应性进行分析,从而确定出基于 TMI 探测结果,适用于中国近海及副热带海洋地区的液态水路径反演方案。

3.1 亮温敏感性分析

利用微波辐射传输模式,首先假设以下条件:副热带标准大气廓线,下垫面为海洋,海温为 300 K,风速 0—20 m/s,扫描角为 53°,云厚 1 km,位于离海面 1—2 km。模式中的非降水云液态水路径变化范围^[14]为 0—1000 g/m²。研究表明,海表风速对亮温有较大影响^[12],因此,我们计算了不同风速下,与 TMI 相对应的各个频率水平和垂直极化通道的亮温随液态水路径的变化。但由于在任意风速条件下,亮温与液态水路径之间的关系类似,因此,图 1 仅给出了风速为 8 m/s 条件下的计算结果。对任何一个 TMI 频率,其水平极化通道亮温随液态水路径的变化率,总是大于垂直极化通道,故水平极化通

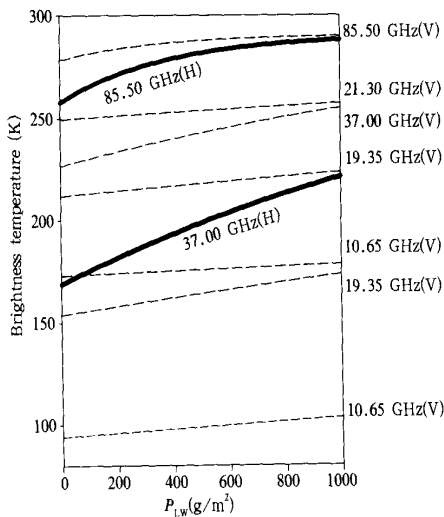


图 1 当风速为 8 m/s 时,辐射传输模式计算的 TMI 各个通道亮温与液态水路径关系

Fig. 1 Relationship between liquid water path (P_{LW}) and brightness temperature at different TMI channels calculated by the Radiative Transfer Model with 8 m/s wind speed

道亮温更能敏感地反映液态水路径的变化。因此,选用水平极化通道亮温来反演液态水路径,效果应该比较理想。再对各个频率水平极化通道进行相互比较可发现,37.0 GHz 和 85.5 GHz 亮温随液态水路径的变化率明显高于其他通道。由此看来,利用 37.0 GHz 和 85.5 GHz 水平极化通道亮温来反演液态水路径,可以取得较好的效果。此外,图中还表明,在非降水云条件下,除 85.5 GHz 外,其余通道亮温均随液态水路径的增加而线性升高,这将为反演修正带来了方便。

为更细致地揭示不同风速条件下,37.0 和 85.5 GHz 水平极化通道亮温与液态水路径之间关系,图 2 绘制了这两个通道亮温在不同风速下随液态水路径的变化。可以看出,对同样的液态水路径,两个通道亮温值均随风速的增加而升高。但是,即使风速不同,两个通道亮温均随液态水路径增大而升高,其中 37.0 GHz 基本表现为线性升高。除此之外,我们还注意到,无论风速大小,85.5 GHz 水平极化通道亮温在 285 K 附近饱和,相应饱和的非降水云液态水路径在 600 g/m² 左右。因此,在 85.5 GHz 水平极化通道亮温适合反演 600 g/m² 以下的液态水路径。

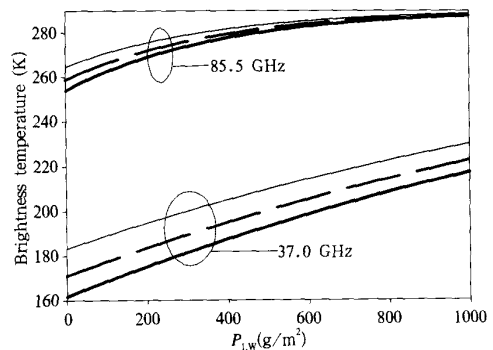


图 2 辐射传输模式计算的 37.0 和 85.5 GHz 水平极化通道亮温与液态水路径的关系(粗实线风速为 0 m/s,间隔线风速为 10 m/s,细实线风速为 20 m/s)
Fig. 2 Relationship between P_{LW} and brightness temperature at 37.0 GHz and 85.5 GHz calculated by the Radiative Transfer Model (Solid, dashed, and thin lines correspond to wind speeds of 0, 10, and 20 m/s, respectively)

3.2 Liu 和 Curry 反演框架试验分析

为了解 Liu 和 Curry 反演模式(1)在副热带地区对非降水云液态水路径的反演能力,我们利用微

波辐射传输模式和反演模式(1),分析该反演模式对非降水云液态水路径的反演效果。在3.1小节同样的假设条件下,分别计算10.7,19.4,37.0,85.5 GHz 4个水平极化通道的亮温值。我们把作为辐射传输模式输入的非降水云液态水路径 P_{LW1} 作为真值,模拟计算了相应各通道亮温值(即模拟的亮温)。随后,将模拟亮温值代入反演模式中,计算不同水平通道反演的非降水云液态水路径 P_{LW2} (反演值)。在反演计算过程中,将液态水路径为 0 g/m^2 时的亮温值作为 T_{B0} ,云的平均温度设为 $T_a = T_s - 6^{[13]}$

图3为真值 P_{LW1} 和反演值 P_{LW2} 的差异比较。除85.5 GHz外,其他3个通道都存在着一个线性的系统偏差。其中10.7 GHz反演值偏小,19.4和37.0 GHz反演值偏大,且37.0 GHz偏差较19.35 GHz更大。因此,需要对Liu的反演模式进行修正。通过拟合计算,分别得出3个通道的线性拟合系数为1.15,0.93和0.8。对85.5 GHz而言,其反演结果 P_{LW2} 在液态水路径小于 600 g/m^2 时与 P_{LW1} 较为一致。

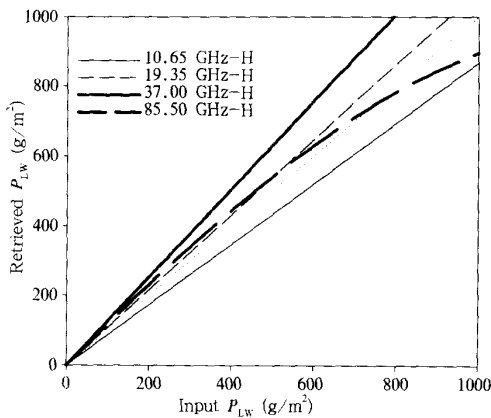


图3 模式输入和反演的 TMI 4个水平极化通道液态水路径的比较

Fig. 3 Input P_{LW1} in the Radiative Transfer Model versus retrieved P_{LW2} at 4 TMI horizontal polarization channels

3.3 基于 TMI 探测结果的液态水路径反演方案

由以上分析可知,选用水平极化通道亮温来反演非降水云液态水路径,其结果优于垂直极化通道,且37.0和85.5 GHz的水平极化通道亮温对非降水云液态水路径的变化更为敏感。考虑到分辨率的因素(TMI 5个通道10.7,19.4,22.0,37.0和

85.5 GHz的水平分辨率分别约为37,18,18,9和5 km),采用相对高分辨率的37.0和85.5 GHz两个通道,来反演非降水云液态水路径效果会更好。此外,两个通道的联合反演可避免单一通道反演带来的误差,如85.5 GHz水平极化通道亮温在液态水路径为 600 g/m^2 左右时就饱和了,故只能用85.5 GHz通道来反演较小液态水路径。综上所述,最终我们给出如下反演方案:

首先,利用反演模式(1)分别反演37.0和85.5 GHz水平极化通道的液态水路径和。然后,对 P_{LW85h} 进行线性修正: $P_{LW37h} = 0.8 \times P_{LW37h}$ 。最后,对不同液态水路径给出以下联合反演方案:

$$\begin{cases} P_{LW} = f \times P_{LW37h} + (1 - f) \times P_{LW85h} \\ \quad (P_{LW37h} > 500.0 \text{ g/m}^2) \\ P_{LW} = P_{LW37h} \\ \quad (P_{LW37h} \leq 500.0 \text{ g/m}^2) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $f = P_{LW37h} / 500.0$ 。

整个反演方案框架结构如图4。

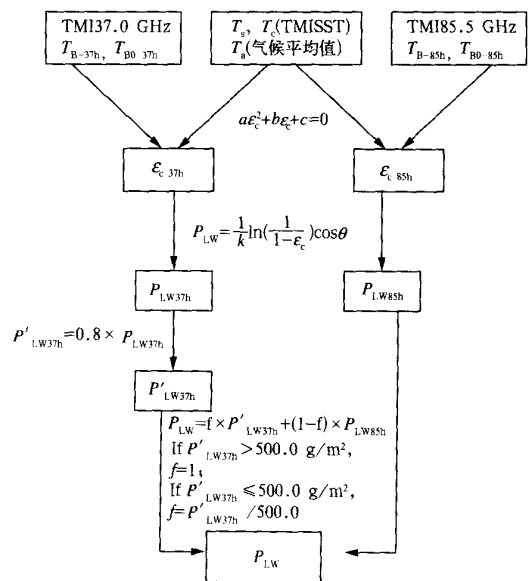


图4 反演方案框架结构

Fig. 4 Flowchart of the algorithm

4 反演结果检验

由于得到实际大气中的准确液态水路径十分困难,直接验证反演方案的结果难以实现。因此,一般采取间接的验证方法^[15]。在此,我们就无云、非降水云和台风降水云条件下的3个个例,分别反演计

算了液态水路径,并进行了间接验证。

4.1 无云检验

首先,我们选取了 1998 年 7 月 12 日和 13 日东海至日本附近的 3 条 TRMM 轨道(轨道号分别为 3579, 3582, 3595)。然后在 23° — 34° N, 122° — 135° E 区域内,挑选其中的无云像素点,利用联合反

演方案,液态水路径的反演结果见表 1。

从表 1 可见,每条轨道无云像素点反演的液态水路径都在 $-1-1 \text{ g/m}^2$,平均值均为 10^{-5} 的量级,由此可视为无云像素对应的液态水路径为零。故可以认为联合反演方案在反演较小液态水路径时,没有明显的系统性偏差。

表 1 无云区像素的液态水路径反演结果

Table 1 Retrieval results of the liquid water path for pixels of cloudless areas

	总像素点	0 - 1 g/m^2	0 - 1 g/m^2	- 1 - 0 g/m^2	- 1 - 0 g/m^2
		像素点平均值(g/m^2)	像素点比例(%)	像素点平均值(g/m^2)	像素点比例(%)
轨道 1	11098	2.472×10^{-5}	50.3	-3.740×10^{-5}	49.7
轨道 2	7523	2.490×10^{-5}	51.9	-3.702×10^{-5}	48.1
轨道 3	7078	2.113×10^{-5}	49.5	-3.492×10^{-5}	50.5
总计	25699	2.381×10^{-5}	50.6	-3.659×10^{-5}	49.4

4.2 非降水云检验

我们挑选了 1999 年 8 月 17 日 12 时左右东海至日本附近(22° — 34° N, 123° — 135° E, 轨道号 9892) 的一个锋面气旋降水系统(彩图 5)。图中黑线区域为 TRMM 上搭载的测雨雷达(PR)测得的有降水地区。考虑到海岛对微波亮温的影响,我们选择了下垫面全为海洋的非降水云区(图中绿色方框),进行液态水路径反演。据 TRMM 可见/红外扫描仪(VIRS)观测,该云的高度约为 1 km。彩图 6 为 VIRS $0.63 \mu\text{m}$ 和 $10.8 \mu\text{m}$ 通道,以及 TMI 4 个频率水平极化通道对该区域的探测亮温。从图上可以看出,虽然 VIRS 与 TMI 各个通道的分辨率不同,但可见和红外通道探测的云分布与 37.0 和 85.5 GHz 探测的亮温分布大致相同。这与前面我们的分析结果是一致的,即 37.0 和 85.5 GHz 水平极化通道的探测结果更能反映非降水云的云水状况。

单独利用 $37.0, 85.5 \text{ GHz}$ 水平极化通道亮温反演的液态水路径 P_{LW37h} 和 P_{LW85h} ,以及联合反演方案的反演结果(彩图 7)。比较 P_{LW37h} 和 P_{LW85h} 可以发现, 85.5 GHz 通道不能反演出大于 600 g/m^2 的液态水路径,这与前面的结论一致,即该通道只能用于反演较小的液态水路径。而当液态水路径小于 500 g/m^2 时, 85.5 GHz 比 37.0 GHz 的反演结果更细致。 P_{LW37h}, P_{LW85h} 与联合反演结果的对比表明,联合反演方案具备了两个通道各自反演的优点,既能较精细地反演出小的液态水路径,也能较准确地反演出大的液态水路径。将联合反演方案的结果和可见光 $0.63 \mu\text{m}$ 通道的探测结果进行比较,发现可

见光探测的云分布与反演得到的液态水路径大小分布基本一致,表明联合反演方案可较准确地识别非降水云。另外,反演的液态水路径绝大多数在 $0-500 \text{ g/m}^2$,这正是非降水云液态水含量的量级^[14],所以该联合方案的反演结果也具有较高的可信度。

4.3 台风降水云检验

在实际使用中,Liu 和 Curry^[14]的反演框架亦适用于计算降水云的液态水路径。同样的,我们的反演方案虽然主要用于反演非降水云的液态水路径,但当液态水路径大于 500 g/m^2 时,该计算方案也可用于降水云液态水路径的反演。在此我们通过反演不同阶段台风中不同位置的液态水路径,来检验该方案对含有降水云的液态水路径反演效果。台风云系可分为台风中心云系、内螺旋云带和外螺旋云带,许多学者也利用微波遥感的方法对其进行了研究^[20]。这里研究的台风为发生在 2004 年 8 月的“云娜”,我们分别选择了她的生成期(8 月 7 日,轨道号 38354)和成熟期(8 月 10 日,轨道号 38395),反演结果如彩图 8。台风在初始阶段为热带低压,中心云系呈团状,但已能看到中心外围气旋性云带;而在成熟阶段,其中心台风眼和云墙已非常明显,台风内螺旋和外螺旋云系也非常清晰。彩图 8 表明台风成熟期云墙液态水路径多在 3200 g/m^2 以上,而初始阶段的中心液态水路径多在 3200 g/m^2 以下。

为细致了解不同阶段台风中液态水路径的变化,我们分别对两个阶段 3 个代表性区域(图 9 中 A, B, C)的液态水路径进行了统计比较。对中心 A 区而言,台风在初始阶段液态水路径小于 2500 g/m^2

的面积占优(约 80%),而在成熟期,液态水路径小于 2500 g/m^2 与大于 2500 g/m^2 的面积接近;对内螺旋云带 B 区,台风成熟期 85% 面积的液态水路径高于 2500 g/m^2 ,初始阶段液态水路径高于 2500 g/m^2 的面积不足 30%;对于外螺旋云带 C 区,两个阶段台风大部分面积(约 65% 以上)的液态水

路径在 1500 g/m^2 以下,特别是在初始阶段,这部分面积近 85%,而在台风期成熟期,外螺旋云带 C 区高液态水路径(即大于 1500 g/m^2)的面积也增大。由此可知,本反演方案所得液态水路径对不同阶段台风降水云系中的含水量有一定指示,即随着台风的成熟,高液态水路径面积比初始阶段增多。

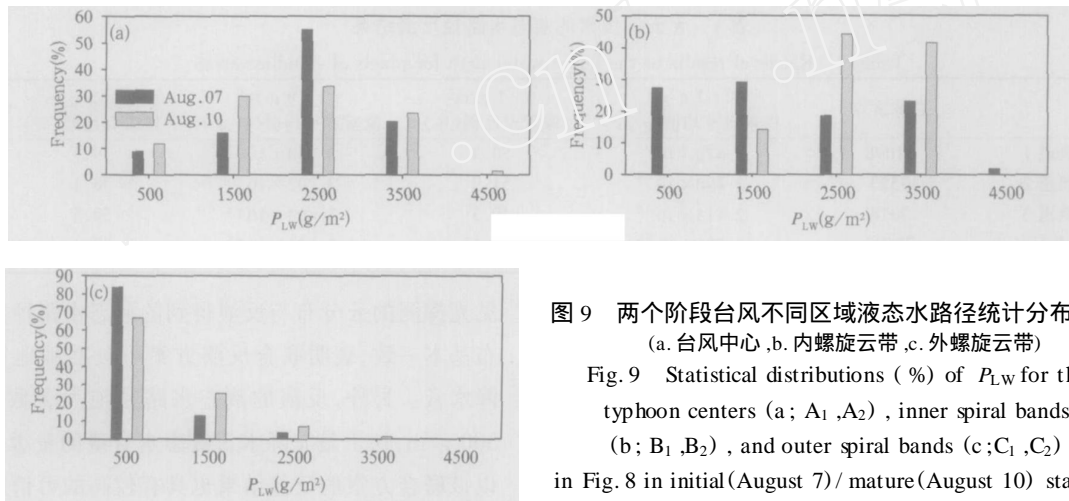


图9 两个阶段台风不同区域液态水路径统计分布
(a. 台风中心, b. 内螺旋云带, c. 外螺旋云带)

Fig. 9 Statistical distributions (%) of P_{LW} for the typhoon centers (a; A_1, A_2), inner spiral bands (b; B_1, B_2), and outer spiral bands (c; C_1, C_2) in Fig. 8 in initial (August 7)/ mature (August 10) stage

此外,为了解液态水路径与地表降水率之间的关系,我们就台风的近地表降水率与相应液态水路径之间关系进行了分析。液态水路径像素(即 TMI 像素)的近地表降水率由 TRMM 测雨雷达探测结果插值得到。近地表(2 km)降水率与相应液态水路径的分布如图 10 所示,如以液态水路径小于 500 g/m^2 区分非降水云,该图表明所选区域非降水云仅占很小比例(约 2%);当地表降水率增大时,云中液态水路径也逐渐增大;但当地表降水率大于 5 mm/h 时,则液态水路径趋于饱和(饱和值约为 2700 g/m^2)。另外,图 10 还表明台风云系中存在一部分(约占 28.6%)地表降水率很小(小于 0.5 mm/h)

的云,但云中液态水路径却在 $500\text{--}2500 \text{ g/m}^2$,此类云大部分处于降水云与非降水云之间。上述结果也间接说明本文反演方案合理。

5 结论

本文利用 TRMM TMI 的探测结果,在 Liu 和 Curry 的 SSM/I 和 AIMR 的液态水路径反演方案基础上,并结合微波辐射传输模式,研究了针对副热带地区非降水云液态水路径的 TMI 反演方案,并对结果进行了间接检验。

(1) 利用微波辐射传输模式,分析了副热带地区 TMI 不同通道微波亮温对液态水路径的敏感性。结果表明,水平极化亮温较垂直极化通道更适宜于液态水路径的反演; 37.0 和 85.5 GHz 的水平极化通道探测结果,比其他频率对液态水路径的响应更为敏感;对任意风速, 85.5 GHz 的水平极化亮温在 285 K 左右均达到饱和,相应的液态水路径为 600 g/m^2 ,故该通道亮温只适用于反演较小的液态水路径。

(2) 对 Liu 和 Curry 的 SSM/I 和 AIMR 的液态水路径反演方案计算结果表明,除 85.5 GHz 外,其余 3 个频率的水平极化通道的液态水路径反演结果,均存在着线性的系统偏差,因此, Liu 和 Curry 的

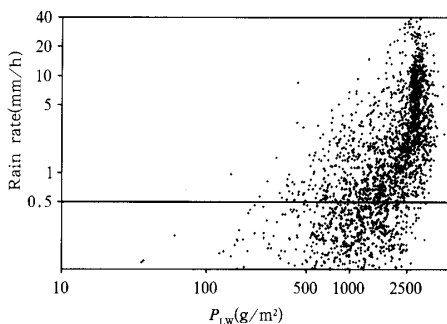


图10 液态水路径和近地表降水率关系散点分布

Fig. 10 Scatter plot for P_{LW} and near surface precipitation rate

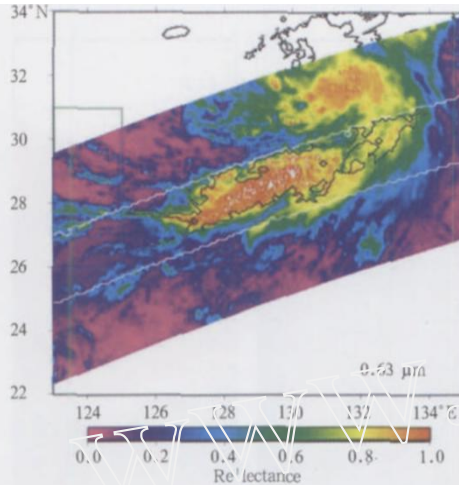


图5 1999年8月17日12时的锋面气旋降水系统
Fig.5 Precipitation system of a frontal cyclone at 12:00 UTC August 17, 1999

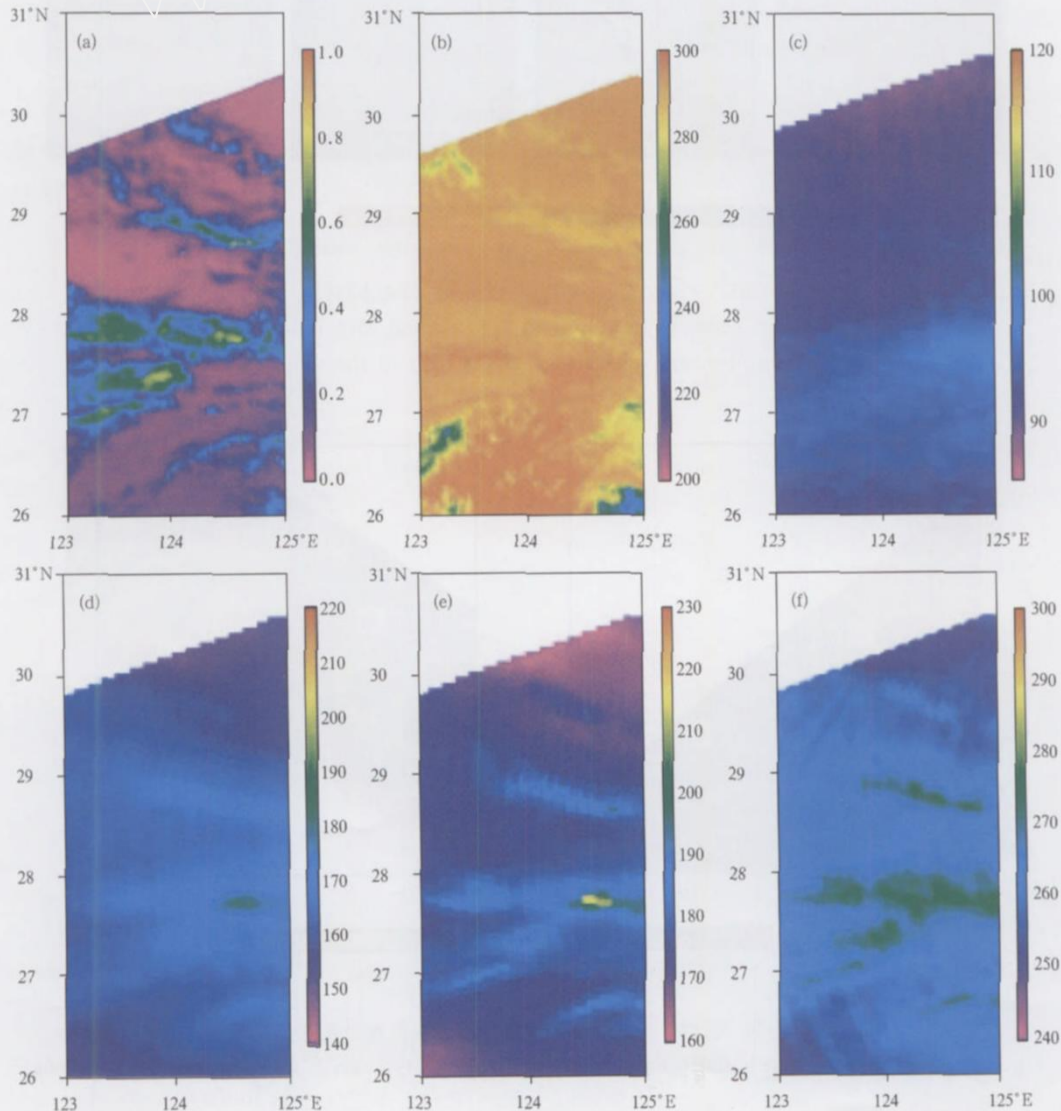


图6 VIRS(a)可见光0.64 μm通道、(b)红外10.8 μm通道和TMI的(c)10.7、(d)19.4、(e)37.0和(f) 85.5 GHz水平极化通道对非降水区域的探测亮温
Fig.6 Brightness temperatures of the non-precipitating area detected at VIRS 0.64 μm (a), 10.8 μm (b), and TMI 10.7 GHz(c), 19.4 GHz(d), 37.0 GHz (e), 85.5 GHz(f) channels

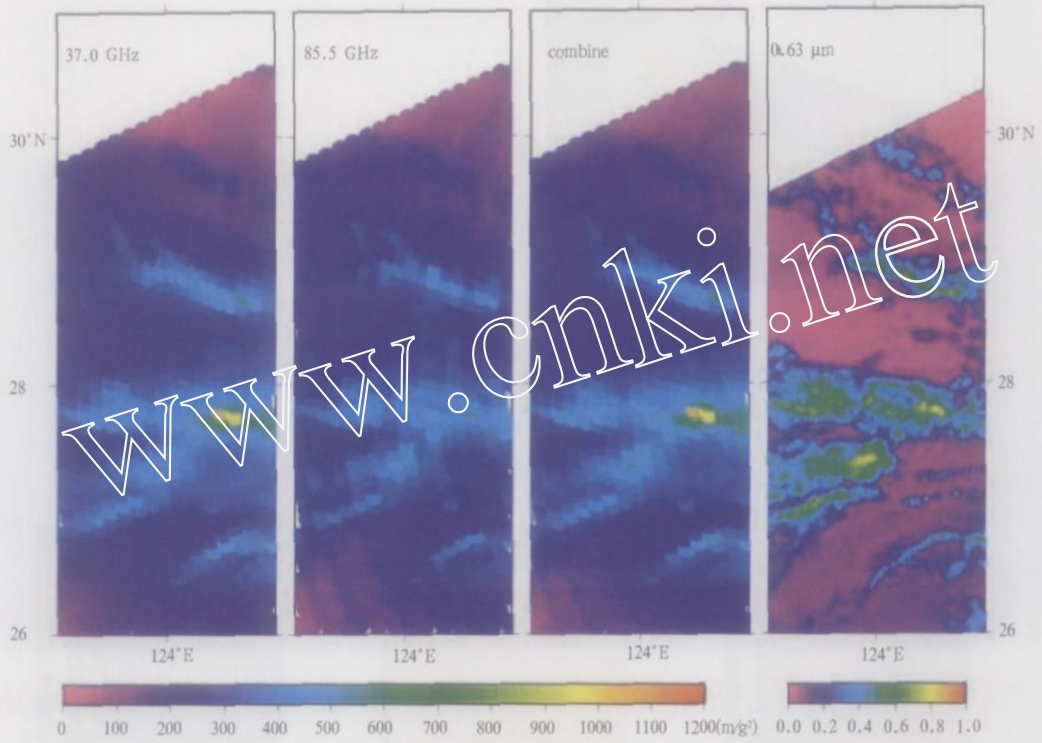


图7 P'_{LW37h} , P'_{LW85h} 和 P'_{LW} 联合反演的液态水路径
 Fig.7 Liquid water paths retrieved at 37.0, and 85.5 GHz horizontal polarization channel, respectively, and jointly at the two channels

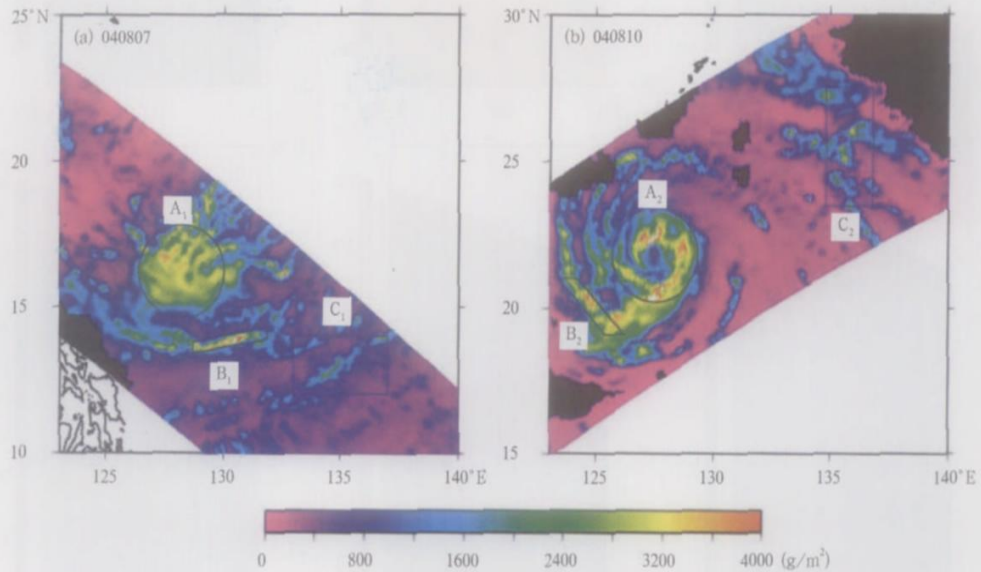


图8 台风“云娜”生成期(a)和成熟期(b)反演得到的液态水路径
 Fig.8 Retrieved P_{LW} in the initial (a) and mature (b) stage of typhoon “Ranarin” in August 2004

SSM/I 和 AIMR 的液态水路径反演方案,不能直接用于 TMI 对副热带地区非降水云液态水路径的反演计算。本文给出的 TMI 副热带地区非降水云液态水路径的反演方案计算结果表明,采用相对高空空间分辨率的 37.0 GHz 和 85.5 GHz 的水平极化通道,不但可获得较好的反演效果,而且,这两个通道的联合反演可避免单一通道反演带来的误差。

(3) 我们还对新反演方案进行了无云区、非降水云区以及降水云区验证。结果表明,无云区的液态水路径在 $-1 \sim -1 \text{ g/m}^2$,且平均值为 10^{-5} 量级;非降水云的液态水路径变化范围在 $0 \sim 500 \text{ g/m}^2$,且其水平分布与 TRMM 的可见光通道 $0.64 \mu\text{m}$ 探测的云分布一致;对台风降水云的反演计算表明,该反演方案所得液态水路径对不同阶段台风降水云系中的含水量有一定指示,即随着台风的成熟,高液态水路径的面积比初始阶段增多。液态水路径与地表降水率之间关系表明,当地表降水率增大时,云中液态水路径也逐渐增大;但当地表降水率大于 5 mm/h 时,则液态水路径趋于饱和。上述验证说明新反演方案合理。

参考文献

- [1] Paltridge G W. Cloud-radiation feedback to climate. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 895-899
- [2] Ramanathan V, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 2001, 294: 2119-2124
- [3] Houze R A Jr. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 70: 282-285
- [4] 吕达仁,王普才,邱金桓等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. *大气科学*, 2003, 27(4): 552-566
Lu Daren, Wang Pucai, Qiu Jinhuan, et al. An overview on the Research Progress of Atmospheric Remote Sensing and Satellite Meteorology in China. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 2003, 27(4): 552-566
- [5] Wei Zhong, Lu Daren. An universal regression retrieval method of the ground-based microwave remote sensing of precipitable water vapor and path, integrated cloud liquid water content. *Atmos Res*, 1994, 34: 309-322
- [6] 刘锦丽,吕达仁,张凌等. 降水云中液水含量的空基遥感. *遥感学报*, 2003, 7(3): 227-232
Liu Jinli, Lu Daren, Zhang Lin, et al. Space-borne remote sensing on liquid water content of precipitating cloud. *J Remote Sensing (in Chinese)*, 2003, 7(3): 227-232
- [7] 陈洪滨. 星载微波辐射计遥感反演云水量的一个算式. *遥感学报*, 2000, 4(3): 165-171
Chen Hongbin. A retrieval algorithm for deriving liquid water path from space-borne microwave radiometric measurements. *J Remote Sensing (in Chinese)*, 2000, 4(3): 165-171
- [8] 陈洪滨. 测量云液水柱含量的一个设想. *大气科学*, 2002, 26(5): 695-701
Chen Hongbin. A concept for measuring liquid water path from microwave attenuation along Satellite-Earth path. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 2002, 26(5): 695-701
- [9] 赵凤生,丁强,孙同明等. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法. *气象学报*, 2002, 60(5): 594-601
Zhao Fengsheng, Ding Qiang, Sun Tongming, et al. An iterative algorithm for the retrieval of cloud properties from NOAA-AVHRR imagery. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2002, 60(5): 594-601
- [10] Goersen P, et al. A summary of results from the first Nimbus 7 SMMR observation. *J Geophys Res*, 1984, 89: 5335-5344
- [11] Alishouse J C, et al. Determination of cloud liquid water content using the SSM/I. *IEEE Trans. Geosci Remote Sens*, 1990, 28: 817-822
- [12] Petty G W. On the response of the SSM/I to the marine environment- Implications for atmospheric parameter retrievals. [Ph. D. dissertation]: Univ of Washington, Seattle, 1990. 291 pp
- [13] Greenwald T J, et al. A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using SSM/I observations. *J Geophys Res*, 1993, 98: 18471-18488
- [14] Liu G, Curry J A. Determination of characteristic features of cloud liquid water from satellite microwave measurements. *J Geophys Res*, 1993, 98: 5069-5092
- [15] Liu G, et al. Retrieval and characterization of cloud liquid water path using airborne passive microwave data during INDOEX. *J Geophys Res*, 2001, 106: 28719-28730
- [16] Simpson J, Adler R F, North G R. A proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. *Bull Amer Meteor Soc*, 1988, 69: 278-295
- [17] Kummerow C, Barnes W, Kozu T. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. *J Atmos Oceanic Tech*, 1998, 15: 809-817
- [18] Donlon C J, et al. Towards improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements of climate research. *J Climate*, 2002, 15: 353-369
- [19] Liu G. A fast and accurate model for microwave radiance calculations. *J Meteorol Soc Jpn*, 1998, 76: 335-343
- [20] 游然,许建民,张文建. 用 SSM/I 微波遥感图像分析海上台风的螺旋云带. *气象学报*, 2002, 60(4): 477-485
You Ran, Xu Jianmin, Zhang Wenjian. Analysis of typhoon spiral cloud band at sea with SSM/I image. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2002, 60(4): 477-485

RETRIEVAL OF LIQUID WATER PATH IN NONPRECIPITATING CLOUDS USING TMI MEASUREMENTS

Wang Yu¹ Fu Yunfei¹ Liu Guosheng²

1 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

2 *Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA*

Abstract

The relationship between microwave brightness temperature (TB) and liquid water path (P_{LW}) in the non-precipitating cloud and a corresponding retrieval algorithm are studied by using the satellite microwave measurements from the TRMM Microwave Imager (TMI), together with a radiative transfer model for microwave radiances calculations. Radiative transfer modeling shows that the sensitivities of the TBs at 37.0 GHz and 85.5 GHz horizontal polarization channels to P_{LW} in the non-precipitating cloud are both higher. Then, the differences between P_{LW} retrieved from single channel measurements and theoretical values are analyzed by using the model. Based on above analysis results, a joint retrieval algorithm for P_{LW} of non-precipitating cloud is developed by using the TB measurements of TMI 37.0 GHz and 85.5 GHz horizontal polarization channels. At last, the algorithm is indirectly validated through typical retrieval cases. The retrieval results show that P_{LW} ranged from -1 to 1 g/m² for clear sky, and its mean value is in the order of 10⁻⁵; P_{LW} in the non-precipitating cloud ranged from 0 to 500 g/m², and its horizontal distribution is consistent with that of the cloud detected by the 0.64 μ m visible channel of TRMM; and in the typhoon precipitation case, the area of high P_{LW} increased from the initial stage to the mature stage, and when the precipitation rate is lower than 5 mm/h, the retrieved P_{LW} in typhoon cloud increased with increase in precipitation rate.

Key words: P_{LW} , TMI, Non-precipitating cloud, Retrieval.