

TRMM 卫星微波成像仪分级产品 及其反演降水算法

邓 伟 何会中 程明虎 崔哲虎

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘要 文章叙述了获取定量降水信息的意义,简要介绍了对热带测雨卫星 TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)的仪器、美国国家宇航局提供的微波成像仪 TMI(TRMM Microwave Imager)分级产品。对比了物理方法和经验方法反演降水的特点,并对一些经验方法以及倾斜对流系统对反演降水的影响、动态聚类分析、神经网络反演方法的研究成果进行了介绍。

关键词 TRMM 卫星 TMI 产品 微波反演降水

引言

定量降水信息的不足对大气科学发展产生一个重要的“瓶颈”效应,从而也影响了相关地学学科的实际应用^[1]。降水信息是大气物理过程模拟、天气预报模式和气候模式中的一个重要参数,降水释放的潜热对大气环流的驱动作用也相当重要。此外,降水作为水循环中的一个必不可少的环节对水文学、冰川学等学科的研究也有重要意义。我国是一个雨季集中、暴雨多发的国家,仅 1998 年夏季出现的罕见大暴雨就造成 3004 人死亡,直接经济损失达 1666 亿元^[2]。因此,对定量降水的研究不仅是一个科学研究的范畴,而且还有着重要的社会意义。

降水是一个剧烈的不连续过程,空间上一点的测量不可能代表较大范围的降水分布^[3]。地面雨量计观测区域的代表性小,尤其在强对流性降水观测中。雷达只能对限定区域进行观测,且受到不确定性、覆盖率低、造价高等因素的限制^[4]。而气象卫星凭借能提供宏观、大尺度的全球资料,已成为全球降水观测中的重要手段^[5]。

气象卫星的可见光和红外云图可用于降水估算,但对云雨层的穿透性很差。可见光资料反映了云的厚度信息,而红外资料反映云顶的高度信息,两

者都是借助于云的信息反映降水的大小,被称为间接方法。而微波在云雨大气中有很强的穿透性^[6],降水云体内部产生的辐射信息可以到达星载微波辐射计,其信息本身就包含了降水的信息^[4],又称之为直接方法^[7]。

全球降水与气候计划已经证明利用星载微波资料反演降水是可行的,尽管其精度离实际业务还有一定的差距。我国计划在 2005 年前后发射的风云三号卫星也将携带微波辐射计、微波成像仪^[8],它不仅将弥补我国星载微波探测仪器的空白,而且必将对星载微波辐射计反演降水的研究产生积极的促进作用。

本文主要根据 TRMM 产品说明^[9-12]以及美国刊物上的相关文献,对 TRMM 卫星仪器、TMI 分级产品、微波反演降水原理和典型的降水反演算法进行说明,并对一些最新的研究方法和成果进行介绍。

1 TRMM 卫星及其观测仪器

1997 年 11 月 27 日发射的 TRMM 卫星由美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration)和日本国家空间发展局(National Space Development Agency)共同研制,第一颗专门用于定量测量热带、亚热带降雨的气象卫星。卫星参数见

自然科学基金项目(090504-01-11)资助

作者简介:邓伟,男,1973 年生,中国气象科学研究院在读硕士研究生

收稿日期:2003 年 9 月 26 日;定稿日期:2003 年 12 月 30 日

何会中等的文章^[13]。TRMM 卫星运行于非太阳同步轨道,通过同一地点的时间不同,适于研究降雨的日变化情况^[14]。其主要发射目的:通过研究热带地区的降雨量和潜热来进一步了解全球能量和水循环;了解热带降水对全球循环机制的影响;改进各种中短期预报和诊断模式;更好的理解、诊断、预报厄尔尼诺、南方涛动和热带大气的 30~60 d 振荡^[15]。

TRMM 卫星搭载有 5 种科学测量仪器,与降水测量密切相关的有 3 种:可见光/红外扫描仪 VIRS (Visible and Infrared Scanner)、测雨雷达 PR (Precipitation Radar) 及微波成像仪 TMI (TRMM Microwave Imager)。PR 是当前第一部星载雷达;3 种仪器不仅可以各自进行降雨探测,而且又可以相互补充、共同测量。因此,有人又称该卫星为“飞行的雨量计”^[15,16]。TMI 共有 5 个频段,除 21.3 GHz 以外其余都是双极化方式,它是以美国国防气象卫星 (Defense Meteorological Satellite Program) 的特殊微波成像仪 (Special Sensor Microwave/ Imager) 为基础而发展的 9 通道微波辐射计,其主要差异在于 TMI 增加了中心

频段在 10.7 GHz 的一对水平、垂直极化通道以及为避免水汽饱和而作的 21.3 GHz 通道的改动。由于 TRMM 卫星高度的降低而使其分辨率大为提高。由于各频段的分辨率不同,习惯上把 TMI 的 10.7, 19.4, 21.3 和 37.0 GHz 频段称为低分辨率频段,把 85.5 GHz 频段称为高分辨率频段。该 3 种仪器的相应参数见何会中等^[13]的文章。另外两种仪器分别为云和地球辐射能量测量系统 (CERES: Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 和闪电成像感应器 (LIS: Lightning Imaging Sensor),这两种仪器对降水观测的意义不大。

2 TMI 产品说明

TRMM 卫星资料是由 TRMM 科学试验组负责研制并由 TRMM 科学资料和信息系统以及 TRMM 办公室处理,由分布式主动存储中心负责存档和免费分发。下面对 TMI 的资料分级产品及其算法(表 1)依次做一简要说明^{9~12]}。

表 1 算法及其生成的相应产品

输入产品代号	算法代码	生成结果	输出产品代号
1A11	Level-1 算法 (1B11 算法)	辐射计观测的亮度温度	1B11
1B11	TMI 廓线算法 (2A12 算法)	垂直方向上水汽凝结物数量、地表雨强等	2A12
1B11、1C21 和 2A23	TMI/PR 融合算法 (2B31 算法)	粒子的平均直径、雷达的路程衰减、地表雨强等	2B31
1B11	TMI 发射算法 (3A11 算法)	格点为 $5^\circ \times 5^\circ$ 的海表月降水量及其统计特征等	3A11
2A12 和 2B31	TMI/VIRS 融合算法 (3B31 算法)	格点为 $5^\circ \times 5^\circ$ 的水汽凝结物及潜热、降雨量等	3B31

(1) 1A 级产品(1A11):原始数据产品,包括辐射计数值文件和标准格式数据单元头文件,并给出飞行器高度工具包、传感器数据管理和科学数据工具包。

(2) 1 级产品(1B11):算法(1 级算法)用一种近似的线性关系,在经过交叉极化纠正后生成了亮度温度(以下简称“亮温”),即 1B11 产品的数据。在每条扫描线给出高分辨率频段 208 个像元、低分辨率频段 104 个像元的扫描时间、地理位置等信息。数据是以两字节的整数形式存储,且有: $I_{\text{存储值}} = (I_{\text{观测值}} - 100) \times 100$ 。可以用该产品进行降水反演。

(3) 2 级产品:包括 2A12 产品和 2B31 产品,资料的存储值与实际的计算结果之间也存在类似于 1 级产品的转化关系。

① 2A12 产品:是 1B11 产品用一种辐射计数据和云模式混合的廓线算法^[17]加工生成的产品,产品提供像元的瞬时降水强度、瞬时对流性降水强度、降水区域及其水汽凝结物、潜热的三维结构等信息。

② 2B31 产品:是由 1B11 产品与 PR 的 1C21、2A23 产品融合后获得的“最优雨强”^[18~19]。产品提供降水粒子的平均半径和谱分布、雷达的路程衰减、地表瞬时降水雨强等信息。

(4) 3 级产品:包括 3A11、3B31 和 3B40 RT 产

品,产品以格点资料形式给出,有利于与其他数值模式进行嵌套,为其广泛应用奠定了基础。

① 3A11 产品:算法对 1B11 产品统计其概率分布函数的亮温直方图,然后用发射信号获取降水信息^[20~22],提供每个格点($5^{\circ} \times 5^{\circ}$)的月降雨量、降雨概率、冻结层高度等信息。

② 3B31 产品:用 2A12 产品和 2B31 产品加工合成的格点($5^{\circ} \times 5^{\circ}$)降雨量^[18],并提供三维的月平均水汽凝结物、潜热等信息。

③ 3B40RT 产品:格点为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,是由 SSM/I 和 TMI 数据融合的降雨量,相对于每一种单独计算的结果,融合结果的质量更高。

3 星载微波资料降水反演算法原理回顾

自从“宇宙-243”卫星搭乘的 4 通道微波辐射计升空以来,“雨云”系列卫星等都把微波辐射计作为一必不可少的仪器^[23]。随之,对微波反演降水技术的探索、研究逐渐取得了大量的成果。

微波反演降水,其求解方法可以分为两类:物理方法^[7],经验方法^[7,23]。物理方法是把微波辐射传输方程与云的微物理模式相结合,根据大气模式进行辐射传输方程的数值积分获得地表降水的方法^[23],Wilheit 最早提出了这样的理论模式^[31]。该方法物理意义较强,但对云、雨微物理过程的认知程度,方程求解方法及解的稳定性等问题制约了其发展。Wilheit^[24]、Kummerow^[25]、Liu^[26]等又进行了相关的研究。经验方法是根据降水在物理意义上的可测性,直接建立观测值和降水参数之间的统计关系,又称之为统计方法。随着辐射计波段的增多和极化方式的不同,又产生了由间接参数来反演降水的算法^[7,14,16]。经验方法可以避免物理反演中的不稳定问题,但不适于极端情况。经验-物理方法则是以上两种方法的结合运用,以充分发挥两种方法的各自长处^[27,28]。

经验方法在原理上可以分为吸收法和散射法两大类^[29,30]。微波在大气中的衰弱作用是由散射和吸收共同形成的。利用大气对微波的吸收作用来反演降水的方法即为吸收法。由基尔霍夫定律中反射率和吸收率的相等关系,吸收法又称之为发射法。利用吸收法可以建立亮温和雨强之间的线性关系^[23]。吸收法一般适用于低频率、比辐射率小的水体表面,弱降水、复杂的陆地背景几乎使降水遥感无

法实现^[29,31],而雨强过大时还会出现“饱和效应”。散射法一般都选择较高的频率,利用冻结层以上的冰晶数量的多少来间接判断降水强度的大小。散射法可以适用于海、陆表面的降水反演,但是对“暖云”系统降水的测量效果不好^[24]。

为了滤掉地表“噪音”的干扰,一些学者又提出了频率差方法(Frequency Algorithms)^[32]、极化差方法(Polarization Algorithms)^[33]和修正极化温度方法(Polarization Corrected Temperature)^[32,34]等。频率差就是通过判断非散射地表(大部分地表)的散射(降水粒子)现象的存在来获取降水信息,根据两个频率的亮温差的大小来估算降水强度。极化差是针对水面的高度极化性与降水微波辐射的非极化性这一物理现象^[35]而发展的,适用于下垫面为水面的降水区域。极化差定义为某一频率垂直极化通道和水平极化通道的亮温差。修正极化温度法是对极化差方法的发展,是结合模式获得的方法^[7,14,34],此外,还有适合暖地表的散射指数法^[16,36]、多通道自适应统计方法^[37]等。

4 近几年的新进展

下面结合相关文章^[38],介绍星载微波资料反演降水的新进展。

4.1 倾斜对流系统中亮温特征及对反演降水影响

热带地区一般为中尺度对流系统降水。当系统向前传播时,对流核及降雨中心的轴线必然要落后于移动方向,成倾斜的状态,故高层的冰晶粒子也要随之在水平方向上偏离地面的强降水区域,那么强降水所对应的高、低频率的亮温中心之间就会产生偏离现象;而星载辐射计测量的亮温值本身就依赖于视角,于是就产生了在倾斜系统中反演降水时的误差^[39]。

Ye Hong 对这种倾斜的影响进行了深入的探讨。对于倾斜系统分别采用简单的倾斜云模式和 GCE(Goddard Cumulus Ensemble)模式,用三维后向蒙特卡罗辐射传输模式^[40]对 85 GHz 和 19 GHz 进行了亮温的理论计算,并用卫星观测值对理论计算进行了进一步的证明。结果表明:由于视角和降雨系统的倾斜,倾斜的中尺度系统中 85 GHz、19 GHz 通道亮温中心的偏离现象确实是存在的^[41],且偏移距离可达到 100 km。由于这种偏移随分辨率的增加而更加明显,当对倾斜的对流系统用 85 GHz 的

散射信息来反演降水时,就会出现很大的误差(图略)。作者认为:单纯用 TMI 数据并不能判定中尺度系统的倾斜方向,只有借助于降水雷达 PR 才能获得令人满意的结果。

4.2 动态聚类分析判别降水区域和组合因子反演陆地降水的研究

星载微波辐射计接收的资料中,大气、地面等非降水信息对降水反演有着很强的“污染”作用。另外,在经验方法反演降水中,降水区域的标定对反演结果有着重要的影响。

聚类分析方法是研究多要素事物分类问题的一种数量方法,基本原理为:根据样本自身的属性,用数学方法按照某种相似性或差异性指标来定量的确定样本之间的亲疏关系^[42],动态聚类的 K-均值算法是其中的一种。根据地表微波比辐射率和云雨的

微波辐射特性,李万彪等把下垫面分为干土、湿土、海面/水面、层状云降雨和对流云降雨等 5 类。考虑到各通道对下垫面和降水粒子的作用不同,分类过程中选择了 TMI 9 个通道亮温及其组合作为聚类因子,通过聚类分析最终确定了降雨区域^[43]。通过对实例的模拟可知:该方法获得的降水区域与降水雷达 PR 所示雨区非常接近,但是比地面雷达所示的范围小(图 1)。

在进行下垫面分类识别后,定义干土作为晴空区的数据集,层状云降雨和对流云降雨作为降雨区的数据集。经过这样区分后,通过进一步定义陆地表面的大气散射指数,并与 85 GHz 的极化温度差组合最终获得降水的反演算子,从而建立算子与雨强的线性关系。试验表明,用该方法确定降水区域和对陆地表面降水的反演还是比较成功的(图 2)。

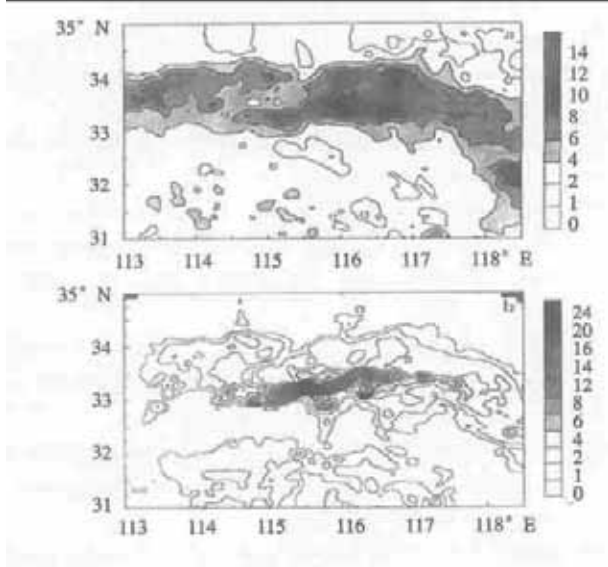


图 1 1998 年 6 月 29 日 04:49 ~ 04:58 反演的雨量等值线图^[43]
(a. 用 TMI 资料, b. 阜阳雷达资料; 单位: mm/h)

4.3 Gated Experts 神经网络方法对大洋表面云水含量及降雨强度的反演^[44]

神经网络是一个由大量神经元组成并具有高度非线性的超大规模连续时间动力系统,广泛用于模式识别、过程模拟与预测、系统的优化计算等问题^[42],尤其适用于传统的多元统计方法所要求的假设条件不能得到满足时。它具有自动学习、联想储存、能够高速寻找优化解等优点,于是也被用于微波反演降水的技术中^[45,46]。Gated Experts(以下简称 GE)神经网络算法是以概率论为统计基础而建立的

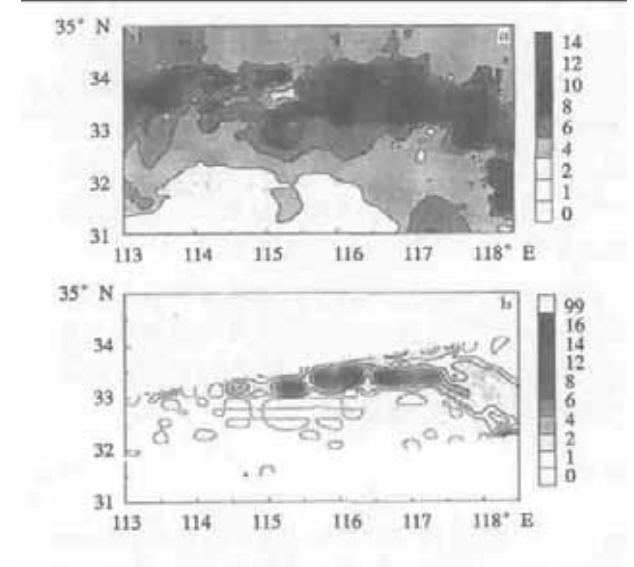


图 2 日本 NASDA 提供的 TMI(a)和 PR(b)反演的雨强分布^[43]
(2b 图注标号为 99 的色段为非观测区域,单位: mm/h)

多元输入量和多元输出量之间的关系,目的是求得组合优化问题最佳解的近似解。

Moreau 利用欧洲中期预报中心(ECMWF)的模式获得了两组大气廓线的分布,然后用两个辐射传输方程分别计算了无雨、有雨时的云顶亮温。这样,就建立一个由亮温与云水含量、大洋表面降雨强度对应关系所组成的数据库。在研究过程中,数据被分为 3 份:1/2 用于系统学习,1/4 用于对系统结果进行理论评估,1/4 用于与其他算法进行比较。GE 神经网络系统通过对输入的亮温值和输出的液态水

含量及雨强进行不断的调节,最终获得最优化的关系,完成系统的自身学习过程。云水含量反演结果对比:与 Gérard^[47]提出的回归算法相比较,GE 网络结果的偏差、标准偏差都很小,说明该算法对云水的反演有很好的效果。通过与 TMI 2A12 产品相比较可知:GE 网络可以很好的反演雨强,而且还可以进行降雨区、非降雨区的划分。通过与测雨雷达 PR 测量降雨的结果对比,两者的吻合程度可以达到 96.3%(图略)。GE 网络算法的一个主要优点是它能从“噪音”环境中提取出所需信息的能力。当新参数的函数关系不能用解析式来表达时,该方法也能进行相关的计算。

5 结语

尽管星载微波辐射计反演降水是一项难度很大的技术^[48],但是经过众多学者的大量研究和探讨,目前已取得了很多喜人的结果;NASA 更是生成了 TMI 的相应产品。大量研究表明:多种传感器联合探测降水比单一微波辐射计反演的效果好^[49-51]。当然,TMI 资料还有着其他方面的广泛利用:用于研究降雨的日变化^[52]、监测地面洪涝^[53]、模拟海洋表面温度^[54]、强热带风暴路径预测^[55]等。

最后要说明的是,伴随着我国风云三号卫星的即将发射,其相应的星载微波辐射计资料不仅会极大地促进降水反演技术的进一步发展,而且其应用也会扩展到相应的地学学科。

参考文献

- Christian K, Barnes W. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1998, 15(3): 809 - 817
- 中国气象局国家气候中心. '98 中国大洪水与气候异常. 北京:气象出版社, 1998. 137
- Wilheit T T, Chang A T C, Rao M S V, et al. A satellite technique for quantitatively mapping rainfall rates over the oceans. *J. Appl. Meteor.*, 1977, 16(5): 551 - 560
- Cheng M, Brown R, Collier C G. Delineation of precipitation areas using Meteosat infrared and visible data in the region of the united kingdom. *J. Appl. Meteor.*, 1993, 32(5): 884 - 898
- WMO. The Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX). *WMO Bull.*, 1993, 42(1): 20 - 27
- Westwater E R. Microwave emission from clouds. NOAA Technical Report ERL 219-WPL, 1972. 18
- Cheng M. Estimation of precipitation using satellite, radar and rain gauge data (Volume I): [PhD Thesis]. University of Bristol, 1994. 242
- 章国材. 中国天情. 北京:开明出版社, 2002. 484
- National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center. Tutorial for Reading Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Data Products (Release 1.1). NASA, 1998
- National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Realtime System File Specification (Release 2.02). NASA, 1999
- National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center. Tutorial for Reading Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Data Products (Release 1.2.1). NASA, 2000
- National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Realtime System File Specification (Release 2.50). NASA, 2001
- 何会中,崔哲虎,程明虎,等. TRMM 卫星及其数据产品应用. *气象科技*, 2004, 32(1): 13 - 18
- 毛冬艳. 用 TRMM 资料对中国暴雨个例的分析和降水反演: [硕士论文]. 北京:中国气象科学研究院, 2001. 51
- Kummerow C, Simpson J, Thilie O, et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *J. Appl. Meteor.*, 2000, 39: 1965 - 1982
- 吴庆梅. 利用 TRMM 卫星资料研究我国降水的微波特征: [硕士论文]. 南京:南京气象学院, 2002. 72
- Kummerow C, Olson W S, Giglio L. A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometer profiles from passive microwave sensors. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1996, 34: 121 - 1232
- Haddad Z S, Smith E A, Kummerow C D, et al. The TRMM 'day-1' radar/radiometer combined rain profiling algorithm. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1997a, 75: 799 - 809
- Haddad Z S, Short D A, Durden S L, et al. A new parametrization of the rain drop size distribution. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997b, 35: 532 - 539
- Chang A T C, Chiu L S. Non-systematic errors of monthly oceanic rainfall derived from SSM/I. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, 127: 1630 - 1638
- Chiu L S, Chang A T C, Janowiak J. Comparison of monthly rain rates derived from GPI and SSM/I using probability distribution functions. *J. Appl. Meteor.*, 1993, 32: 323 - 334
- Wilheit T T, Chang A T C, Chiu L S. Retrieval of monthly rainfall indices from microwave radiometric measurements using probability distribution functions. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1991, 8: 118 - 136
- 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理. 北京:科学出版社, 1982. 178
- Wilheit T T, Cheng A T C, King J L, et al. Microwave radiometric observations near 19.35, 92 and 183 GHz of precipitation in tropical storm Cora. *J. Appl. Meteor.*, 1982, 21: 1137 - 1145
- Kummerow C D, Mach R A, Harrariken N M. A self-consistency

- approach to improve microwave rainfall rate estimation from space. *J. Appl. Meteor.*, 1989, 28(9): 869 - 886
- 26 Liu Q, Simmer C, Ruprecht E. Three-dimensional radiative transfer effects of clouds in the microwave spectral range. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101: 4289 - 4298
- 27 Smith E A, Mugnai A, Cooper H J, et al. Foundations of statistical physical precipitation retrieval from passive microwave satellite measurement, Part I: Brightness temperature properties of a time dependent cloud-radiation model. *J. Appl. Meteor.*, 1992, 31(6): 506 - 531
- 28 Mugnai A, Smith E A, Tripoli G J. Foundations of statistical physical precipitation retrieval from passive microwave satellite measurement, Part II: Emission source and generalized weighting function properties of a time dependent cloud-radiation model. *J. Appl. Meteor.*, 1993, 32: 17 - 39
- 29 Ferraro R R, Marks G F. The development of SS M/I rain rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995, 12: 755 - 770
- 30 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社, 1995. 412
- 31 Allison L J, Rodgers E B, Wilheit T T, et al. Tropical cyclone rainfall as measured by the Nimbus 5 electrically scanning microwave radiometer. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1974, 55(9): 1074 - 1089
- 32 Grody N C. Precipitation monitoring over land from satellite by microwave radiometry. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'84). Strasbourg: ESA France, SP-215, 1985, 417 - 423
- 33 Rogers E, Wilheit T. A statistical determination of rainfall overland employing Nimbus-7 SMMR measurements. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 1979
- 34 Spencer R W, Goodman H M, Hood R E. Precipitation retrieval over land and ocean with the SS M/I: Identification and characteristics of the scattering signal. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1989, 6(4): 254 - 273
- 35 Weinman J A, Guetter P J. Determination of rainfall distributions from microwave radiation measured by the Nimbus 6 ESMR. *J. Appl. Meteor.*, 1977, 16(4): 437 - 442
- 36 Grody N C. Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SS M/I). *J. Geophys. Res.*, 1991, 96: 7423 - 7425
- 37 Kummerow C D, Mark R A, Hakkarinen I M. A self-consistency approach to improve microwave rainfall rate estimation from space. *J. Appl. Meteor.*, 1989, 28(9): 869 - 884
- 38 Garstang M, Kummerow C D. Editorial. *J. Appl. Meteor.*, 2000, 39(12)
- 39 Ye H, Haferman J L, Olson W S, et al. Microwave brightness temperatures from tilted convective system. *J. Appl. Meteor.*, 2000(12): 983 - 998
- 40 Roberti L, Haferman J L, Kummerow C. Microwave radiative transfer through horizontally inhomogeneous precipitating clouds. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 16707 - 16718
- 41 黄容. 利用云和辐射传输模式对流性降水云微物理及辐射传输特性的研究:[硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003. 54
- 42 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002. 457
- 43 李万彪, 陈勇, 朱元竞, 等. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水. *气象学报*, 2001, 59(5): 591 - 600
- 44 Moreau E, Mallet C, Thiria S, et al. Atmospheric liquid water retrieval using a gated experts neural network. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2002, 19: 457 - 467
- 45 Tsintikidis D, Haferman J L, Anagnostou E, et al. A neural network approach to estimating rainfall from spaceborne microwave data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1079 - 1093
- 46 Jung T, Ruprecht E, Wagner F. Determination of cloud liquid water path over the ocean from Special Sensor Microwave/Imager (SS M/I) data using neural networks. *J. Appl. Meteor.*, 1998, 37: 832 - 844
- 47 Gérard E, Eymard L. Remote sensing of integrated cloud liquid water: development of algorithms and quality control. *Radio Sci.*, 1998, 33: 433 - 447
- 48 Atlas D, Thiele O W. Precipitation measurements from space. Workshop report. Goddard Space Flight Center, 1981. 50
- 49 吕达仁, 林海. 雷达和微波辐射计测雨特性比较及其联合应用. *大气科学*, 1980, 4(1): 30 - 39
- 50 Adler R F, Negri N J, Keehn P R, et al. Estimation of monthly rainfall over Japan and surrounding waters from a combination of low-orbit microwave and geosynchronous IR data. *J. Appl. Meteor.*, 1993, 32: 335 - 356
- 51 Smith E R, Turk F J, Farrar M R, et al. Estimating 13.8-GHz path-integrated attenuation from 10.7-GHz brightness temperatures for the TRMM combined PR-TMI precipitation algorithm. *J. Appl. Meteor.*, 1997, 36(4): 365 - 388
- 52 Kishitawari C M, Krishnamurti T N. Diurnal variation of summer rainfall over Taiwan and its detection using TRMM observations. *J. Appl. Meteor.*, 2001, 40(3): 331 - 344
- 53 姚展予, 李万彪, 高慧琳, 等. 用 TRMM 卫星微波成像仪遥感地面洪涝的研究. *气象学报*, 2002, 60(2): 243 - 249
- 54 Quartly G D, Srokosz M A. SST observations of the Agulhas and East Madagascar retroreflections by the TRMM microwave imager. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(5): 1585 - 1592
- 55 Tibbetts R T, Krishnamurti T N. An intercomparison of hurricane forecasts using SS M/I and TRMM rain rate algorithm(s). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2000, 74: 37 - 49

Introduction to TRMM TMI Products and Retrieval Algorithm

Deng Wei He Huizhong Cheng Minghu Cui Zhehu
(Chinese Academy of Meteorological Sciences , Beijing 100081)

Abstract : The meaning of quantitative precipitation is discussed . The instruments aboard Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) and the products of the TRMM Microwave Imager from National Aeronautics and Space Administration are described . The principles of microwave precipitation retrieval , the comparison of physical methods and empirical methods are narrated , and some empirical algorithms are introduced and discussions are made on the effect of the tilted convective system on upwelling microwave brightness temperature , the clustering analysis algorithms and the neural network algorithms .

Key words : tropical rainfall measurement mission , TMI product , microwave precipitation retrieval