

TRMM 卫星及其数据产品应用

何会中^{1,2} 崔哲虎¹ 程明虎¹ 周凤仙¹

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 北京大学物理学院, 北京 100871)

摘要 简要介绍了热带降水测量 (TRMM—Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星所携带的观测仪器及其主要产品。概述了 TRMM 卫星资料产品在热带降水测量、提高预报准确率、暴雨研究、资料同化、反演热带海面温度、热带气旋观测等领域的应用。

关键词 TRMM 卫星 数据产品 应用

引言

降水是地球气候系统的关键部分,它通过潜热释放对大气环流系统产生很大影响^[1,2]。大气所得到的能量中有四分之三来自于降水的潜热释放,而地球上也有三分之二的降水是发生在热带地区^[3]。但由于热带地区主要是海洋,我们对地球气候系统的关键部分即热带地区降水并没有足够的认识,因此人们一直在谋求一种能够对热带降水进行详细测量的方法。

TRMM 卫星是 1997 年 11 月 27 日发射成功的。它是由美国 NASA (National Aeronautical and Space Administration) 和日本 NASDA (National Space Development Agency) 共同研制的试验卫星。自成功发射以来,它为气象工作者提供了大量热带海洋降水、云中液态水的含量、潜热释放等气象数据。

1 TRMM 卫星搭载的仪器

TRMM 卫星在 2001 年 8 月 6 日以前高度约为 350 km,轨道范围为 35°S~35°N。图 1 为 TRMM 卫星扫描方式示意图。它的原设计寿命为 3 年,经历了近 4 年的运行,卫星及其搭载的仪器工作状态仍然良好,因此 NASA 决定让它继续服务。在 2001 年 8 月以后,为减少功耗将轨道高度提升到距地面 403 km,因此所有仪器的探测范围均有所增加。

TRMM 卫星共搭载 5 种遥感仪器,分别为:可见光和红外扫描仪 VIRS (Visible and Infrared Scan-

ner)、TRMM 微波图像仪 TMI (TRMM Microwave Imager)、降水雷达 PR (Precipitation Radar)、闪电图像仪 LIS (Lightning Imaging Sensor) 及云和地球辐射能量系统 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System),其中 VIRS、TMI 和 PR 为 TRMM 卫星的基本降水测量仪器。表 1 列出 TRMM 所携带的 VIRS、TMI 和 PR 3 种基本测量降水仪器的工作波长、分辨率、扫描宽度等特性。

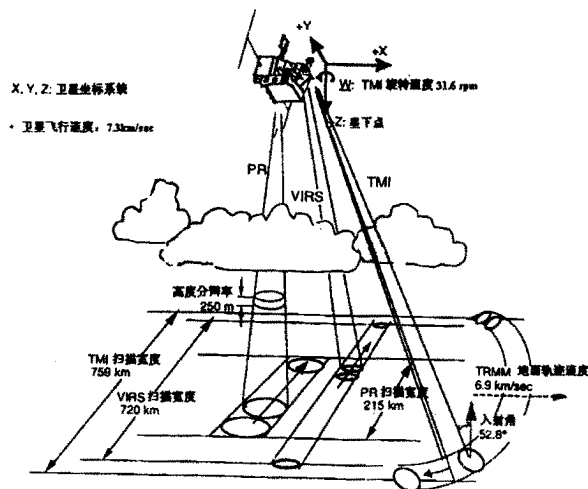


图 1 TRMM 卫星扫描方式示意图

LIS 是工作波长为 0.774 μm 光学探测器,它被用来观测闪电分布形式及其变化。CERES 是工作波长分别为 0.3~0.5 μm 和 8.0~12.0 μm 的可见光和红外探测器,它主要是用来测量地表及大气发射和反射的辐射能及其分布形式。

表 1 TRMM 卫星的 VIRS、TMI 和 PR 工作特性

	可见光和红外扫描仪 (VIRS)	TRMM 微波图像仪 (TMI)	降水雷达 (PR)
工作频率/ 波长	0.63, 1.6, 3.75, 10.8, 12 μm	双极化 :10.65, 19.25, 37, 85.5 GHz 垂直极化 :21 GHz	垂直极化 :13.8 GHz
扫描方式	与轨道垂直扫描	圆锥扫描	与轨道垂直扫描
水平分辨率*	2.2 km/2.4 km (可见光和红外)	4.4 km/5.1 km (85.5 GHz)	4.3 km/5.0 km
扫描宽度*	720 km/833 km	760 km/878 km	215 km/247 km

* 轨道提升前/轨道提升后

2 TRMM 卫星资料处理流程及主要产品

图 2 为 TRMM 卫星资料处理流程示意图。TRMM 科学数据信息系统 TSDIS(TRMM Science Data Information System) 承担了 TRMM 卫星资料的接收、实时处理和后处理工作。TSDIS 接收 TRMM 卫星观测的原始资料几乎与卫星扫描同步进行。TRMM 数据共有 5 个层次(0 ~ 4), 它们分别代表经过不同处理的资料:第 0 层,以时间为序并且有质量控制的原始卫星数据;第 1 层,标定后的 VIRS 反射率/亮温, TMI 的亮温, PR 的回波功率和反射

率数据,它们的分辨率等于观测仪器的像素点的大小;第 2 层,用第 1 层数据计算出的大气状况数据(如:降水、云中液态水的含量、潜热释放等),它具有与第 1 层数据相同的分辨率;第 3 层,经过空间和时间平均后得到的格点形式的气象数据;第 4 层,资料分析产品和 TRMM 资料与其它探测资料联合反演得到的数据产品。

3 TRMM 卫星 PR 和 TMI 资料的应用

3.1 热带地区及亚热带的降水量分布形式研究
长期以来,研究气候的工作者一直十分关心热带地区的降水。TRMM 卫星的目标是测量热带和亚热带的降水及能量交换^[4,5],并且用它们来进一步优化全球气候和天气模式的初始场。经过多年的成功运行, TRMM 卫星测量到详细的热带地区降水分布,给出热带地区的长期平均降水图像。如 NASA 的研究人员利用 TRMM 资料研究热带降水得出:在西太平洋地区降水要多于东太平洋。另外,在近年来 El Niño 现象的出现到最后消失过程中,赤道以南靠近赤道地区平均降水模式有明显改变,在 150°W 以东地区降水明显多于正常年份,而在西太平洋地区则明显少于正常年份。

Sorooshian^[6]等人利用 TMI 瞬时降水资料对用遥感信息估计降水的神经网络(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks, PERSIANN) 系统参数进行适当调整后, PERSIANN 估计的热带地区降水量在精度和稳定性方面有所提高。

中国的科学家在利用 TRMM 资料对降水和降水资料的验证等方面也作了大量的研究。Cheng 等人和 Sorooshian 等人^[6]分别用 TRMM 资料研究中国及其邻近地区海洋和陆地降水微波特性并进行了

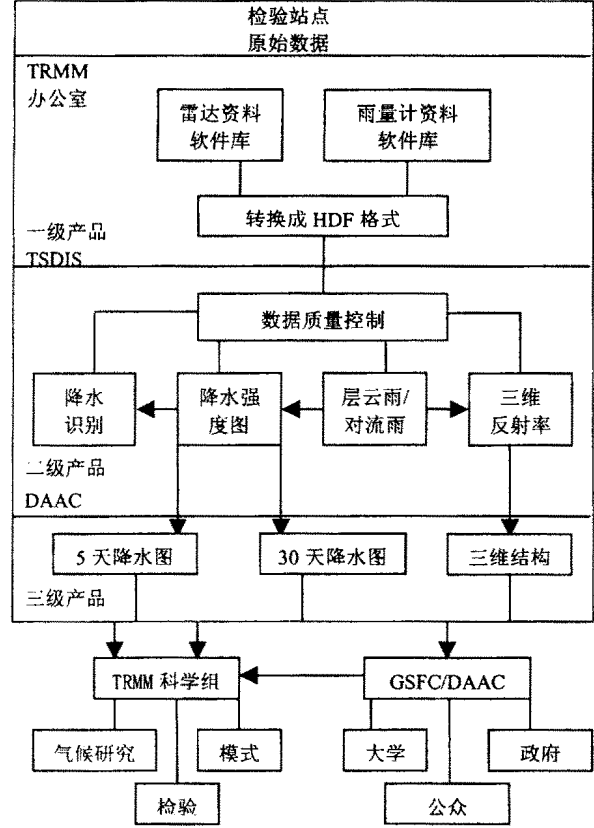


图 2 TRMM 资料处理流程

反演。吴庆梅等人^[7]也用 TRMM 微波资料从不同侧面进行了降水测量的研究。

Soroochian^[8]应用神经网络技术把 TMI 和 PR 资料反演成降水,并进一步得出范围为 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E} \sim 10^{\circ}\text{W}$ 的 1998 年 8 月至 1999 年 7 月一年内月平均的每小时降水量日变化形式。Kishtawal 和 Krishnamurti^[9]利用 TMI 资料研究了中国台湾地区夏季降水的日变化形式。Krishnamurti 和 Kishitawal^[10]用 TRMM 卫星和 Meteosat-5 资料计算出亚洲夏季季风的日变化分布图。Berg^[11]等利用 TRMM 卫星 PR 的降水资料研究 1999 年 12 月到 2000 年 2 月东、西太平洋赤道辐合带的降水结构差异时发现:两者之间有着明显的地区差异,并且这种地区差异有一定的季节和年际变化。

3.2 提高降水预报精度研究

热带降水预报是一个具有挑战性的课题。在通常情况下未来 1 天的降水预报是可信的,但对未来 2~3 天或更长时间的降水预报的准确性就会大大降低。

佛罗里达州立大学的研究人员把 TRMM 卫星和 SS MI (Special Sensor Microwave Imager) 数据加入到多分析过程的数值天气预报模式中,结果全球和局地的预报准确性都有改进。利用以上方法他们准确地预报出 1999 年主要飓风的路径,同时对降水量预报的准确性也有很大提高。现在,他们已经把 TMI 和 SS MI 准实时资料只用于短期预报拓展到 30 天的预报中^[12]。气象工作者把 TRMM 卫星和其它卫星资料的降水资料加入到预报模式中,结果模式的预报精度提高了 3 倍。同时,Florida 州立大学研究人员得到相同的结果^[13]。Hou 等^[14]把 TMI 和 SS MI 测得的降水和湿度资料加入到全球分析和预报模式中,结果证明降水和可降水总量资料在提高气候分析和天气预报的精度方面有很大的潜在应用价值。

3.3 降水结构和特性研究

对暴雨的准确预报一直是气象预报者所追求的目标,为此应精确了解暴雨的三维结构及暴雨的分布形式。TRMM 卫星提供了大量暴雨的三维结构资料。程明虎等人^[15]利用 TRMM 卫星 PR 资料研究分析了 1998 年 7 月 21 日的武汉暴雨,发现武汉暴雨的降水带由多个降水塔组成,这些降水塔虽然底部连在一起,但在顶部却是分开的(图 3),还指出

了武汉暴雨的降水塔最大高度和暴雨的垂直分布形式。他们对暴雨结构进行了详细分析,其结果对理解暴雨形成机制和提高对暴雨的预报准确率有很大帮助。

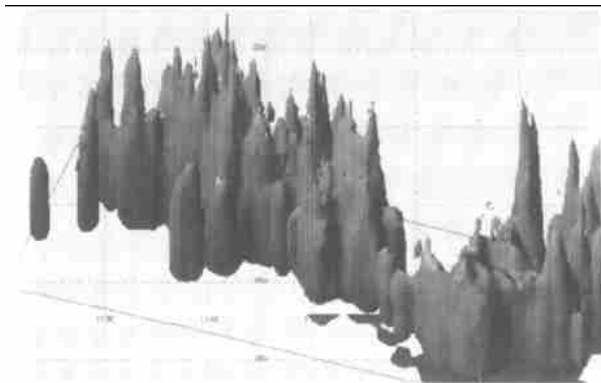


图3 PR 资料绘制成的 1998 年 7 月 21 日 05:40(北京时,下同)武汉暴雨立体图^[15]

Zhanyu Yao 等人^[16]利用 TMI 资料研究青藏高原的降水微波特性时发现,垂直极化的 85 GHz 通道测量的亮温 ($T_{B_{85V}}$) 与地表的降水量有负相关性,但是非常低的 $T_{B_{85V}}$ 并不对应于非常强的降水,这一点与地球上其它地区的观测结果有一定的差异。Marshall Shepherd 等^[17]利用 PR 资料研究了大城市对降水分布的影响。

3.4 对资料同化的改进

大气的资料同化过程是把观测到的数据同化到数值大气模式中去,在这个过程中包含了数据观测和模式的误差。众所周知,云和降水在大气能量收支平衡中占有重要地位。但在目前的模式中仅同化进去一些常规数据和卫星观测数据,如:气压、温度、风和水汽,而没有考虑到水的相态问题。

Marecal 和 Mahfouf^[18]利用 TRMM 卫星资料估计的地表降水率进行四维变分同化试验。他们利用 TRMM 卫星资料进行一次一维变分方法 15 天预报试验,试验中包含了几个人们感兴趣的天气过程(特别是 1998 年的 Bonnie 飓风),所有的预报结果都有一定的提高。Pu 等^[19]利用 MM5 模式模拟研究了超级台风“Paka”。结果表明,在同化进了 TMI 资料后,MM5 模式在强度、动力和降水结构的预报方面有明显改进。

3.5 在测量海面温度中的应用

海面温度决定了海面与大气的能量、动力和水汽的交换,它在海气相互作用过程中处于中心地位,

因此准确的测量热带地区海面温度具有非常重要意义。Emanuel^[20]、Saunders 和 Harris^[21]研究发现,在海面暴雨形成以后,处在风暴前方的海面热力因素是影响风暴强度非常重要的因素,因此准确测量风暴前方的海面温度对于提高海面暴雨强度的预报非常重要。但是在风暴的前方总是有云层,所以利用红外资料无法反演到精确的海面温度,人们一直追求测量有云覆盖的海面温度。Wentz 等人^[22]提出用 TRMM 卫星的 TMI 资料反演海面温度,由于微波在穿透云层和气溶胶时的衰减很小,所以可以得到除了有降水区域以外所有地方的海面温度。利用以上的反演结果, Wenz 等人^[22]成功的发现了 1998 年的 La Niña 现象和台风过后右边留下的冷轨迹。Quartly 和 Srokosz^[23]利用 TMI 资料研究了 Agulhas 和东 Madagascar 的海面温度,并且得到了一些关于 Agulhas 反射环流在 1997~1999 年发生次数变化和 2000~2001 年一些变化的研究结果。

3.6 热带气旋观测的新突破

由于一直没有热带海洋上风的数据,缺乏对热带气旋准确位置以及其强度的测量。因此对于台风的强度变化和台风的路径预报在过去的 20 年中一直处于徘徊阶段^[24]。在 TRMM 卫星成功发射以后,得到大量有关热带气旋的资料,它使准确预报热带气旋的路径和强度成为可能。Lonfat 等人^[25]利用 TRMM 的 TMI 和 PR 资料详细地研究了台风的降水水平分布、降水粒子的垂直分布以及热带气旋的加热形势等。另外, Cheng 等人利用 TRMM 卫星资料详细地研究了 1999 年 Sam 台风的台风眼位置和降水的垂直结构(图 4)。他们还研究了云中水和冰的含量及云高、降水所达到的高度、0℃等温线高度及云底高度等重要信息。Lee 等^[26]研究表明, TMI 的 37 GHz 资料可以比 TMI 的 85 GHz 和 SSM/I 资料提供更多有关台风的近地面降水信息。

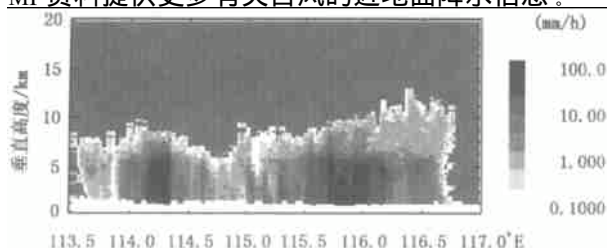


图4 TRMM/PR测量到的1999年8月22日09:22 Sam台风降水的垂直剖面图

4 TRMM卫星 LIS、CERES 及 VIRS 的应用

Toracinta 等^[27]指出:TRMM 的 LIS 探测到,对于相同的亮温和反射高度来说,热带大陆比热带海洋上更有可能出现闪电。Cecil 和 Edward^[28]利用闪电图像仪资料研究发现:对于热带海洋上的台风来说,在同样的亮温和雷达测量的参数条件下,在降水带的外围有更多的闪电出现。

Lin 等^[29]利用 CERES 资料研究发现:在热带海洋地区,减少对对流层上部云砧对气候系统来说有很弱的但可以明显察觉的正反馈作用。它说明对流层上部的云砧对气候系统并不具有很强的负反馈作用。Loeb 和 Kato^[30]利用 CERES 和 VIRS 资料研究热带海洋上的气溶胶粒子对直接辐射的影响。在热带地区气溶胶有降温作用,大小为 $4.6 \pm 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;并且对南半球的影响比北半球大,差值约为 $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

5 结语

TRMM 卫星资料在热带降水的测量、降水预报准确率提高、暴雨研究、预报模式的数据同化、热带海面温度反演、热带气旋的观测等方面的均有较好应用。另外,它的闪电图像仪及云和地球辐射能量系统的测量资料在热带和亚热带的闪电分布和气候模式研究方面也有很大的应用价值。

可以充分地利用 TRMM 的数据资源来改进天气、气候预报的精度,同时加深对热带和亚热带地区降水特性的理解。

由于篇幅的原因,对 TRMM 卫星资料还有大量应用成果在本文中未能涉及。若要详细了解 TRMM 卫星本身产品、软件及其应用成果等可访问 TRMM 入门网站,其网址是: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>,而欲获得免费资料可访问 DAAC 网站 (<http://daac.gsfc.nasa.gov/>)。

参考文献

- 1 Browning K A. Rain rainclouds and climate. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1990, 116: 1025-1056
- 2 Cheng M. Estimate of precipitation using satellite, Radar and rain Gauge. University of Bristol, 1994. 400
- 3 Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15(3): 809-817

- 4 Olson W S, Bauer P, Viltard N E, et al. A melting - layer model for passive/active microwave remote sensing applications Part I: Model formulation and comparison with observations. *J. Appl. Meteorol.*, 2001, 40:1145 - 1163
- 5 Tao W K, Simpson J, Sui C H, et al. Retrieval algorithms for estimating the vertical profiles of latent heat release: their applications for TRMM. *J. Meteor. Soc., Japan*, 1993, 71:685 - 700
- 6 Sorooshian S, Hsu K, Gao X, et al. Evaluation of PERSIANN System Satellite - Based Estimates of Tropical Rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(9): 2035 - 2046
- 7 吴庆梅,程明虎,苗春生. 用 TRMM 卫星资料研究我国江淮—华南降水的微波特性. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 206 - 214
- 8 Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. Diurnal Variability of Tropical Rainfall Retrieved from Combined GOES and TRMM Satellite Information. *Journal of Climate*, 2002, 15(9):983 - 1001
- 9 Kishtawal C M, Krishnamurti T N. Diurnal Variation of Summer Rainfall over Taiwan and Its Detection Using TRMM Observations. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(3):331 - 344
- 10 Krishnamurti T N, Kishtawal C M. A Pronounced Continental - Scale Diurnal Mode of the Asian Summer Monsoon. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(2):462 - 473
- 11 Berg W, Kummerow C, Morales C A. Differences between East and West Pacific Rainfall Systems. *Journal of Climate*, 2002, 15(24):3659 - 3672
- 12 Root J. 2000: NASA Helps Improves Weather Prediction. *Aerospace Technology Innovation May/June 8(3):Cover Story*
- 13 Krishnamurti T N, Surendran S, Shin D W, et al. Real - time multianalysis - multimodel superensemble forecasts of precipitation using TRMM and SSM/I product. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129: 2861 - 2883
- 14 Hou A Y, Zhang S Q, da Silva A M, et al. Improving Global Analysis and Short-Range Forecast Using Rainfall and Moisture Observations Derived from TRMM and SSM/I Passive Microwave Sensors. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(4): 659 - 680
- 15 Cheng M, He H, Mao D, et al. Study of 1998 heavy rainfall over the Yangtze river basin Using TRMM data. *大气科学进展*, 2001, 18:387 - 396
- 16 Yao Z, Li W, Zhu Y, et al. Remote Sensing of Precipitation on the Tibetan Plateau Using the TRMM Microwave Imager. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(8):1381 - 1392
- 17 Marshall S, Pierce J H, Negri A J, et al. Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(7):689 - 701
- 18 Marecal V, and Mahfouf J F, et al. Four dimensional variational assimilation total column water vapour in rainy areas, ECMWF Technical Memoranda, 2000, Oct.
- 19 Pu Z, Tao W, Braun S, et al. The Impact of TRMM Data on Mesoscale Numerical Simulation of Supertyphoon Paka. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(10):2448 - 2458
- 20 Emanuel K A. Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, 1999, 401: 665 - 669
- 21 Saunders M A and Harris A R. Statistical Evidence Links Exceptional 1995 Atlantic Hurricane Season to Record Sea Warming. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24(10): 1255 - 1258
- 22 Wentz F J, Gentemann C, Smith D, et al. Satellite Measurements of Sea Surface Temperature Through Clouds. *Sciences*, 2000, 288(5467):847 - 850
- 23 Graham D, Meric A Srokosz. SST Observations of the Agulhas and East Madagascar Retroreflections by the TRMM Microwave Imager. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(5):1585 - 1592
- 24 Simpson J, Kummerow C, Meneghini R, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Progress Report. *Earth Observation and Remote Sensing*, 2000, April(3):71 - 90
- 25 Lonfat M, Marks F D and Chen S. Characterization of the rain distribution in tropical cyclones using TRMM/TMI-PR. AGU 2000 Spring Meeting, Washington, D.C., May 30-June 3, 2000. Supplement to EOS, Transactions, American Geophysical Union, 81(19):S237 - S238, H42B-16 2000
- 26 Lee T F, Turk F J, Hawkins J, et al. Interpretation of TRMM TMI Images of Tropical Cyclones. *Earth Interactions*, 2002, 6(3): 1 - 17
- 27 Toracinta E R, Cecil D J, Edward J Z, et al. Radar, Passive Microwave, and Lightning Characteristics of Precipitating Systems in the Tropics. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(4):802 - 824
- 28 Cecil D J and Edward Z J. Reflectivity, Ice Scattering, and Lightning Characteristics of Hurricane Eyewalls and Rainbands, Part II: Intercomparison of Observations. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(4):785 - 801
- 29 Lin Bing, Wielicki B A, Chambers L H, et al. The Iris Hypothesis: A Negative or Positive Cloud Feedback. *Journal of Climate*, 2002, 15(1):3 - 7
- 30 Loeb Norman G, Kato Seiji. Top of Atmosphere Direct Radiative Effect of Aerosols over the Tropical Oceans from the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Satellite Instrument. *Journal of Climate*, 2002, 15(12):1474 - 1484

TRMM Satellite and Application of Its Products

He Huizhong^{1,2} Cui Zhehu¹ Cheng Minghu¹ Zhou Fengxian¹

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2 Physics School, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract : In order to help users familiarize and better use TRMM data products in their atmospheric researches and weather forecast, the instruments and main data products of the Tropical Rainfall Measuring Mission Satellite (TRMM) and the application of its products in heavy rainfall researches, data assimilation, and tropical sea surface temperature retrieval are introduced.

Key words : TRMM satellite, data product, application