

# 热带测雨卫星搭载的仪器及其探测结果 在降水分析中的应用

傅云飞, 刘奇, 王雨, 孙亮, 李锐, 马明, 刘国胜

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

[摘要] 针对降水遥感和探测, 简要介绍了卫星红外遥感方法和被动微波遥感方法, 着重讨论了热带测雨卫星及其搭载仪器。随后介绍了热带测雨卫星多仪器探测结果的应用, 并以夏季热对流降水为例, 分析了其降水结构、云顶高度和雨顶高度及其与地表降水之间的关系, 同时也阐述了如何利用热带测雨卫星和测雨雷达长时间资料, 来分析亚洲地区降水的气候分布。最后对卫星主动微波探测降水的发展做了简要展望。

[关键词] 热带测雨卫星; 测雨雷达; 微波成像仪; 光谱; 降水

[中图分类号] P468 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)10-0043-08

## 1 前言

降水是全球水循环过程中的一个重要环节, 它的时空异常分布决定着局地或大范围地区的旱或涝。降水所释放的潜热也为驱动大气环流提供了约 3/4 的能量, 同时产生降水的云还影响着地气系统辐射收支的平衡。降水对海水盐度产生稀释作用, 还对大气污染物和气溶胶产生湿沉降作用。降水已经作为全球气候状况的重要指示器, 被用于天气模式和气候模式的评估。

降水的观测可分为地基和空基方式, 也可分为直接测量和遥感探测方法(主动式和被动式)。地基雨量计是一种目前气象观测站常用的直接测量降水大小的仪器, 而地基测雨雷达则是一种常用的主动式遥感探测降水的仪器。雨量计观测降水的优点是精确, 它可以测出单位时间内的降水量, 其缺点是只能给出固定地点的降水信息。对于大范围地区, 可以通过布设多个雨量计来对降水进行监测, 但由于布设的密度有限, 雨量计对大范围降水的表征能

力受到影响。地基测雨雷达对降水的有效探测距离多在 300 km 之内, 故对大范围降水具有很好的监测能力。但是, 地基的降水测量方式不能用于海洋上, 也不能用于人迹罕至的地方, 如青藏高原等地区。为此, 通过卫星平台来搭载多种仪器, 实现对全球降水的观测就显得非常重要。

卫星的降水观测可分为红外遥感方法、被动微波遥感方法和主动微波探测方法。红外遥感方法是通过对降水云的云顶温度与地表降水之间的统计, 得到经验关系来反演地表降水强度。通常强降水云倾向于具有较低的云顶温度(即云顶高), 如美国的大气海洋局环境预测中心(NCEP/NOAA)开发的地球静止轨道环境业务卫星(GOES)降水量指数(GPI)降水算法, 就是根据这个原理, 给出了目前广泛应用的卫星红外反演降水资料。GPI 算法对深厚对流降水更为适用, 对层云降水的表现力较差<sup>[1]</sup>。

现行的被动微波遥感反演降水有两种方案, 即微波发射方案和散射方案。微波发射方案通过观测降水粒子所发射的低频(如 19 GHz)微波辐射来反

[收稿日期] 2012-06-25

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(2010CB428601); 中国科学院科技创新项目(KZCX2-YW-Q11-04; KJCX2-YW-N25); 国家公益性行业支撑项目(GYHY200906002); 国家科技基础性工作专项(2007FY110700); 国家自然科学基金重点项目(40730950); 青年项目(40805008)

[作者简介] 傅云飞(1961—), 男, 安徽安庆市人, 中国科技大学教授, 主要从事卫星遥感云和降水方面的研究; E-mail: fyf@ustc.edu.cn

演地表降水<sup>[2]</sup>,其原理是在较低的辐射背景下,降水越强,降水云中的液态水粒子越多,则上行辐射亮温越大。该方案在海洋面取得了很好的效果,但在陆地上效果不好。微波散射方案是利用降水云上部冰粒子的高频(如85 GHz)微波散射信号来反演降水<sup>[3,4]</sup>,其原理是降水云中的冰粒子越多,则上行散射亮温越低,地表降水也就越强。与微波发射方案相比,微波散射方案显得更间接,因为它需要依据观测,建立降水率与散射信号之间的经验或半经验关系,但这种方法可用于陆面降水的反演。

目前,虽然有多种降水反演算法,但它们给出的全球降水时空分布却存在很大的不一致性。全球第三次降水比较计划(PIP3)的结果表明,即使在较大的时空平均尺度上,各种降水资料之间的差异最大可达200%~300%,说明现有的降水反演方案还很不完善<sup>[5]</sup>。

为了获得对降水更为准确的测量,20世纪80年代美国和日本联合开展了热带测雨卫星计划<sup>[6]</sup>,并于1997年11月27日发射了热带测雨卫星(TRMM)。该卫星原计划工作3年,但到目前为止它已经运行了十多年,积累了大量热带和副热带地区的降水观测数据,为研究和认识这些地区的降水时空分布和变化、降水类型及结构特点提供了很好的数据。

## 2 热带测雨卫星和搭载仪器及资料

TRMM卫星开创星载测雨雷达(PR)之先河,它还同时搭载微波成像仪(TMI)、可见光/红外辐射计(VIRS)、闪电成像仪(LIS)、云和地球能量辐射系统(CERES)。将多仪器载于同一卫星平台上对云和降水进行同步观测,使研究者可以从不同的角度来认识云和降水特征。PR可以探测降水云的类型及降水水平和垂直结构;TMI可以探测到云中水粒子和冰粒子发射和散射的微波亮温,并可用来反演获得云水、云冰、水汽等信息;VIRS则可以探测云顶部对太阳短波辐射的反射辐射和云顶发射的红外辐射,进而可反演云顶部附近云粒子的大小和光学特性;LIS可以探测到闪电发生的位置和强度;CERES则可以探测到云和地面上行的短波段和长波段及全波段的辐射能量大小。热带测雨卫星搭载的TMI、PR和VIRS工作状态请参见文献[7]。

TRMM卫星是一颗极轨卫星,轨道倾角约35°,飞行高度为350 km(2001年8月7日升轨至400 km

高度),环绕地球一周的时间约为92 min。PR探测的扫描宽度约为220 km,每天在南北纬40°之间约有16条轨道。由于TRMM卫星轨道为非太阳同步,其探测结果为研究云和降水等大气参数的日变化提供了可能。

PR是一部主动式相位数字雷达,它由日本通讯实验室研制。PR由128对发射机和接收机构成128个单元,每个单元包含固态功率放大器(SSPA)、低噪音放大器(LNA)、针形二极管相位转换器(PHS)等。PR天线为2 m×2 m的平面阵列,峰值功率为500 W,波长约为2.2 cm(频率为13.8 GHz),波束宽度为0.71°,星下扫描角度为±17°,PR探测的灵敏度为17 dBz,约对应于0.4 mm/h的瞬时降水率。PR的水平分辨率约为4.3 km(星下点),垂直分辨率为250 m(星下点),垂直探测高度自地表至20 km高。根据PR的降水算法,它探测的降水分为对流降水、层云降水和其他类型降水<sup>[8,9]</sup>。简单地说,如果回波在冻结层出现亮带,则该降水定义为层云降水;如果回波无亮带,但回波中一旦出现超过39 dBZ的信号,则定义为对流降水。非上述两种情况的降水定义为其他类型降水。根据Z(雷达回波强度)—R(降水率)关系,PR降水算法给出了轨道上的三维降水率,即PR扫描宽度范围内自地表垂直向上至20 km内的降水率(称为降水廓线)。在美国国家航空航天局(NASA)公布的第六版降水资料中,层云降水的标识符定义为100至170之间的整数,对流降水标识符为200至291之间的整数,而“其他”类型降水以300、312、313整数标识,分别代表“其他”类型降水中的确定型、浅薄型及条件浅薄型。

VIRS是一个五通道成像光谱辐射计,它与先进的高分辨率辐射计(AVHRR)类似,其5个通道中心波长分别是0.63 μm、1.6 μm、3.75 μm、10.8 μm和12 μm。VIRS探测扫描宽度为770 km(2001年8月7日后为833 km),其探测的水平分辨率为2.2 km(2001年8月7日后为2.4 km);NASA发布的标准资料1B01是根据VIRS探测结果而标定的可见光反照率和红外辐射亮温<sup>[7]</sup>。

TMI是一个五频率九通道的微波辐射成像仪,其频率为10.65 GHz、19.35 GHz、21.3 GHz、37.0 GHz和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(H)和垂直(V)极化双通道。TMI以52.8°的角度对地进行圆

锥扫描方式工作,扫描的宽度为 760 km,其视场为一个椭圆。各频率通道的水平分辨率不等,从低频 10 GHz 的 63 km × 37 km 到高频 85 GHz 的 7 km × 5 km(见表 1)。NASA 发布的标准资料 1B11 也是根据 TMI 探测结果而标定的微波亮温信号<sup>[7]</sup>。

表 1 TMI 各通道分辨率

Table 1 Spatial resolutions of TMI channels

通道	分辨率/(km × km)
10(V)	63 × 37
10(H)	63 × 37
19(V)	30 × 18
19(H)	30 × 18
22(V)	23 × 18
37(V)	16 × 9
37(H)	16 × 9
85(V)	7 × 5
85(H)	7 × 5

LIS 是一部闪电成像探测器,其核心部件是一只由 128 × 128 个电荷耦合元件(CCD)组成的影像探测阵列,它能以 500 帧/s 的高速对闪电进行成像。由于采用了多种特殊滤波技术,它可以将闪电信号从白天很强的背景中检测出来。LIS 的视场为 600 km × 600 km( TRMM 卫星在 350 km 高度上),探测的空间分辨率为 3 km(星下)至 6 km(边缘)。由于 TRMM 卫星在轨道上飞行速度约为 7 km/s,因此,LIS 对雷暴中某一特定位置闪电活动的注视时间可长达 90 s<sup>[10]</sup>。NASA 提供的 LIS 资料中包括闪电位置(经度和纬度)、闪电辐射能、闪电持续时间、闪电族和闪电次数,但它不能区分云闪和云地闪。研究表明,LIS 在夜晚和白昼的探测效率分别是 93 % ± 4 % 和 73 % ± 11 %<sup>[11,12]</sup>。

CERES 由 3 个分探测器构成,用来探测大气层顶端至地表的太阳光辐射及地球放出的热辐射,其中短波探测器测量地球反射和发射的太阳辐射(0.3 ~ 5 μm),长波探测器测量水汽窗区地球发射的长波辐射(8 ~ 12 μm),而总探测器则测量总的地球反射和发射的辐射(0.3 ~ 200 μm)<sup>[13]</sup>。因此,CERES 提供了地球表面和大气层顶的辐亮度、地表反射率和辐射通量的瞬时观测值,以及卫星扫描范围内的云参量观测值。由于仪器供电出现问题,

CERES 于 1998 年 9 月后被迫关闭。

### 3 热带测雨卫星探测结果的应用

利用 TRMM 多仪器探测结果,国内外在热带及副热带云与降水等研究领域取得了丰富的成果。这些研究工作主要集中在如下 8 个方面。

1)对云、降水和闪电等观测事实统计规律的研究<sup>[14~17]</sup>。

2)对不同仪器探测结果的校正和定标、环境参数对测雨雷达探测的影响、降水廓线与微波信号关系的研究<sup>[18~22]</sup>。

3)对 TRMM 探测结果与其他仪器探测结果或产品资料的比较研究<sup>[23,24]</sup>。

4)利用 TRMM 探测结果进行气候诊断分析的研究,如云、降水及闪电分布与气候异常变化、与大气低频振荡关系等<sup>[25~27]</sup>。

5)利用 TRMM 探测结果对云和降水日变化规律的研究<sup>[28~32]</sup>。

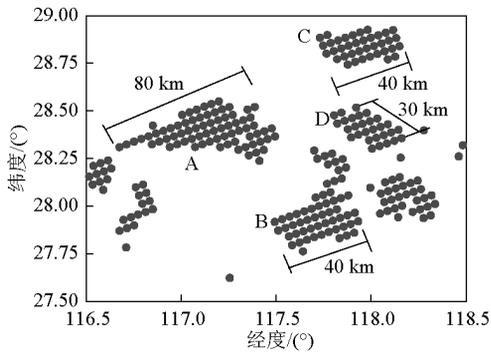
6)对降水、潜热和水汽等参数的反演算法研究<sup>[33~36]</sup>。

7)利用 TRMM 探测结果进行模式同化的研究,如利用 TRMM 探测结果进行台风同化模拟试验等<sup>[37,38]</sup>。

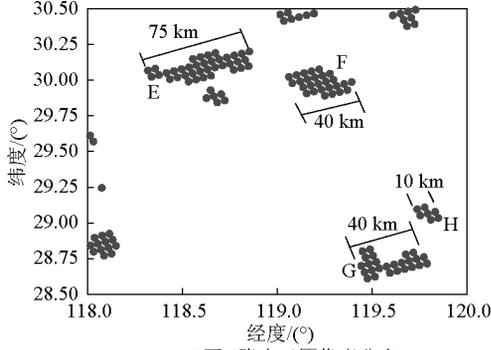
8)利用 TRMM 探测结果对区域天气和气候的研究,如对亚洲季风、南海对流活动、亚马逊雨林降水等的研究<sup>[39~41]</sup>。

我国学者在这些研究领域中也做出了贡献,如利用 TRMM 探测结果在暴雨等强降水结构、地表湿度反演等方面都取得很多成果<sup>[42~44]</sup>。

笔者曾利用 PR 探测资料 2A25 分别就东亚季风区降水结构特征、青藏高原降水结构及潜热廓线特征、ENSO(厄尔尼诺和南方涛动的合称)期间海洋表面温度(SST)异常对降水结构的影响、热带和副热带降水云与非降水云特征进行了统计分析研究。此外,还就中尺度强降水结构、锋面气旋降水及闪电活动、台风云系结构、热对流降水云特点进行了个例分析研究,这些研究提升了科研工作者对降水特征的认识<sup>[15,21,45~52]</sup>。如利用 PR 探测结果就可以得到副高中心内,热对流强降水的降水云尺度大小(见图 1)和降水廓线(见图 2);将 PR 与 VIRS 探测结果进行融合,就可以获得热对流强降水云团云顶高度、风暴高度(或称为雨顶高度)与地表降水强度之间的关系(见图 3、图 4),这些数据都是以往难以获取的。



(a) A至D降水云团像素分布



(b) E至H降水云团像素分布

图1 PR测得的2 km高度处降水云团像素分布<sup>[48]</sup>

Fig. 1 Distribution of precipitating pixels of each precipitating cloud at 2 km altitude detected by PR<sup>[48]</sup>

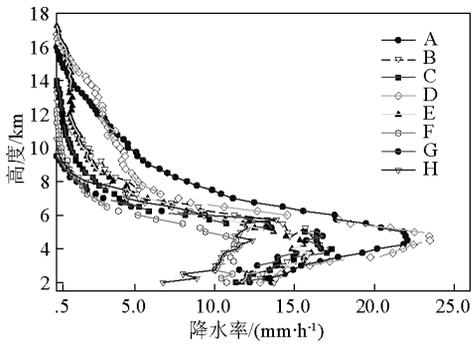


图2 PR探测的8个热对流降水云团的降水率平均廓线<sup>[48]</sup>

Fig. 2 Mean precipitation profiles of the eight thermal convective clouds detected by PR<sup>[48]</sup>

夏季季风降水是南亚和东亚的显著气候现象,利用PR就可以克服地面雨量计分布不足,而对季风区大范围降水观测有限的缺点。图5为PR为期10年探测结果给出的自阿拉伯海、印度次大陆、孟加拉湾、中南半岛至南海的夏季对流降水和层云降

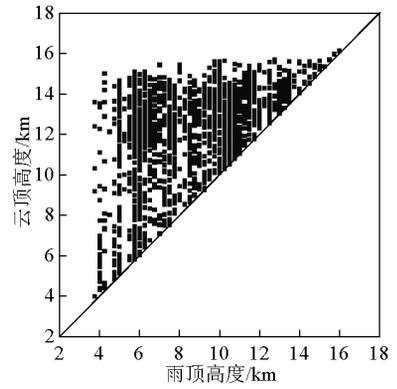


图3 热对流降水云团中降水像素相应的雨顶高度与近地表雨强关系<sup>[48]</sup>

Fig. 3 Scattering points of rain top corresponding to cloud top at each precipitating pixel in the thermal convective rains<sup>[48]</sup>

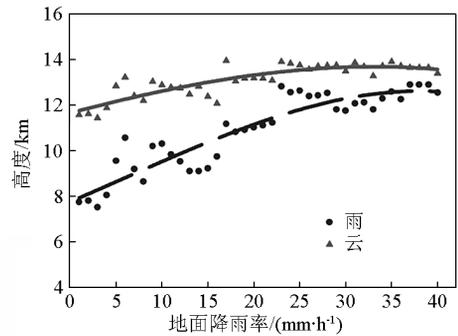


图4 地面降雨率与平均云顶高度和雨顶高度的关系<sup>[48]</sup>

Fig. 4 Relationship of both mean cloud top and rain top and near surface rainfall rate<sup>[48]</sup>

水出现频次分布以及850 hPa平均风场分布,从图中可以看到西南季风在地形迎风面产生的高频次降水,并且产生强降水(见图5a),这些地区的降水频次比其他地区要高1倍以上,降水强度则高3倍以上;在背风坡则相反,如印度次大陆南部东侧至斯里兰卡及孟加拉湾西南、中国南海西侧至越南近海,这些地区降水的频次低、降水强度也弱。图6为阿拉伯海、孟加拉湾、南海及整个北印度洋的对流降水和层云降水的平均廓线,它表明孟加拉湾和南海的这两种降水廓线基本一致,特别是在4 km以上降水廓线的分布十分吻合,虽然这两个地区降水的频次和强度不同,说明这两个地区海表状况有所差异,但对流层中上部的气团性质相当;而阿拉伯海则不同,所以阿拉伯海发生的对流降水和层云降水廓线与上述两地有所差别。上述定量结果是过去无法得到的。

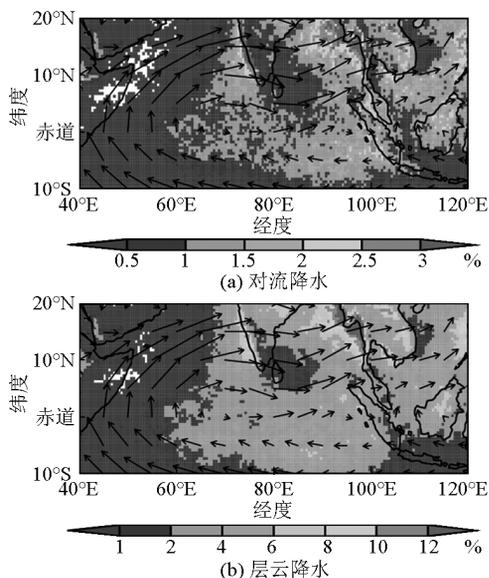


图5 夏季南亚至南海地区降水频次分布

Fig. 5 Frequency distribution of precipitation in summer from south Asia to South China Sea

总之,由于 TRMM 多仪器从不同视角实现了对云和降水的探测,为今后研究云和降水提供了非常独特的信息,如将 VIRS 和 PR 探测结果进行融合,并利用光谱方法反演得到云参数,就可以研究云光学厚度和云滴有效半径与降水结构之间的关系,还可以检验光谱方法反演降水的准确度;笔者曾利用这种方法得到了热带及副热带降水云、非降水云的云参数差异及分布特征,并揭示了以往国际卫星气候学计划(ISCCP)不能有效区分这两类云及其云参数差异的缺陷<sup>[52]</sup>。

#### 4 结语

热带测雨卫星运行至今已经超过 14 年,该卫星上搭载的多仪器除 CERES 外仍在对云和降水等进行探测。从科学上说,它已经远远超出了预计的科学目标;从工程上说,它的设计及制作无疑成为了大科学工程的榜样。我国气象卫星事业起步较晚,但已经取得了很大的进步,可是还是要充分学习和借鉴先进的经验,“他山之石可攻玉”。在科学层面上,科学家需要具有高瞻远瞩的战略眼光进行布局和设计;在工程层面上,工程技术人员需要努力提高工程设计和制造工艺水平。相信随着综合国力的不断提高,我国气象卫星的国际地位也会不断提升,近年来风云系列卫星的发射和运行已经证明了这点。

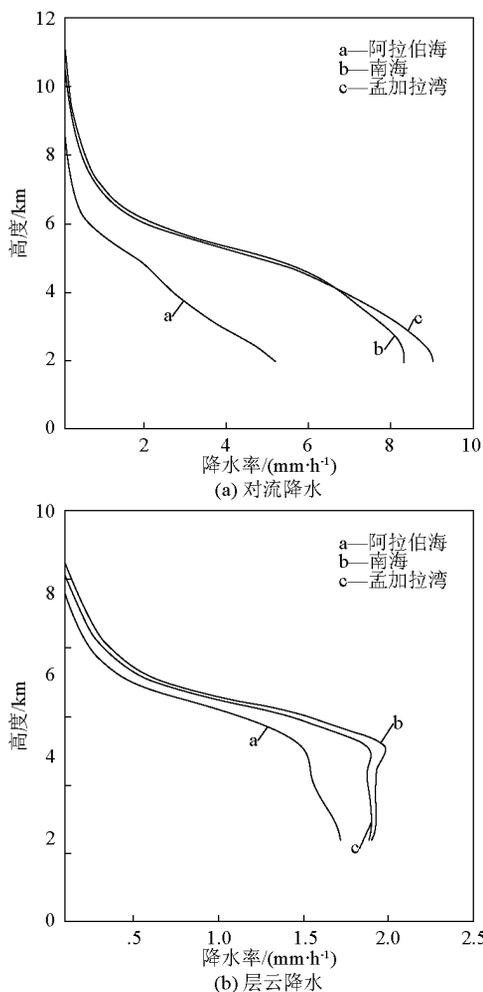


图6 夏季阿拉伯海、孟加拉湾和南海地区的降水率平均廓线

Fig. 6 Mean precipitation profiles in Arabia Sea, Bay of Bengal and South China Sea in summer

就 TRMM 探测结果的应用研究而言,还有很多内容等待着科研工作者去研究探索,如可以利用 TRMM 多仪器探测结果来直接检验和评估模式模拟结果,也可以将其用于降水识别、光谱和被动微波降水反演结果的检验,还可以用于云参数和大气参数的反演、大气气溶胶间接效应的研究。

2014 年全球降水测雨(GPM)卫星将要发射升空,该卫星是热带测雨卫星的继续,它将搭载一部双频测雨雷达和微波成像器对全球云和降水进行探测,目前 GPM 正在进行降水算法、地面校正等方面的研究。我国的星载测雨雷达也在进行研制中,相信星载测雨雷达和 GPM 的运行将会揭示有关降水的更多细节特征,从而为检验和评估模式降水、研究降水潜热垂直结构等奠定基础。

## 参考文献

- [1] Long S Chiu, Alfred T C Chang, John Janowiak. Comparison of monthly rain rates derived from GPI and SSM/I using probability distribution functions[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(2): 323 – 334.
- [2] 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]. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16(5): 551 – 560.
- [3] Roy W Spencer. Global oceanic precipitation from the MSU during 1979—1991 and comparisons to other climatologies[J]. *Journal of Climate*, 1993, 6(7): 1301 – 1326.
- [4] Roy W Spencer, John R Christy. Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: technique, validation, and results 1979—1991 [J]. *Journal of Climate*, 1993, 6(6): 1194 – 1204.
- [5] Robert F Adler, Christopher Kidd, Grant Petty, et al. Intercomparison of global precipitation products: The third precipitation intercomparison project (PIP-3) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(7): 1377 – 1396.
- [6] Joanne Simpson, Robert F Adler, Gerald R North. A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69(3): 278 – 295.
- [7] Christian Kummerow, William Barnes, Toshiaki Kozu, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3): 809 – 817.
- [8] Matthias Steiner, Robert A Houze Jr, Sandra E Yuter. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(9): 1978 – 2007.
- [9] Toshiro Iguchi, Toshiaki Kozu, Robert Meneghini, et al. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2038 – 2052.
- [10] William J Koshak, Mike F Stewart, Hugh J Christian, et al. Laboratory calibration of the optical transient detector and the lightning imaging sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(7): 905 – 915.
- [11] Boccippio D J, Goodman S J. Regional differences in tropical lightning distributions [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 2231 – 2248.
- [12] Boccippio D J, Cummins K L, Christian H J, et al. Combined satellite and surface-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States [J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129: 108 – 112.
- [13] Priestley K J, Barkstrom B R, Lee R B, et al. Postlaunch radiometric validation of the clouds and the earth's radiant energy system (CERES) proto-flight model on the tropical rainfall measuring mission (TRMM) spacecraft through 1999 [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2249 – 2258.
- [14] Stephen W Nesbitt, Edward J Zipser, Daniel J Cecil. A census of precipitation features in the tropics using TRMM: radar, ice scattering, and lightning observations [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(23): 4087 – 4106.
- [15] Liu G, Fu Y. The characteristics of tropical precipitation profiles as inferred from satellite radar measurements [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2001, 79: 131 – 143.
- [16] Dong-Bin Shin, Gerald R North, Kenneth P Bowman. A summary of reflectivity profiles from the first year of TRMM radar data [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(23): 4072 – 4086.
- [17] Courtney Schumacher, Robert A Houze Jr. Stratiform rain in the tropics as seen by the TRMM precipitation radar [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(11): 1739 – 1756.
- [18] Robert A Barnes, William L Barnes, Cheng-Hsuan Lyu, et al. An overview of the visible and infrared scanner radiometric calibration algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(4): 395 – 405.
- [19] Heymsfield G M, Geerts B, Tian L. TRMM precipitation radar reflectivity profiles as compared with high-resolution airborne and ground-based radar measurements [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2080 – 2102.
- [20] Robert Meneghini, Toshiro Iguchi, Toshiaki Kozu, et al. Use of the surface reference technique for path attenuation estimates from the TRMM precipitation radar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2053 – 2070.
- [21] Fu Yunfei, Liu Guosheng. The variability of tropical precipitation profiles and its impact on microwave brightness temperatures as inferred from TRMM data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(12): 2130 – 2143.
- [22] David B Wolff, Marks D A, Amitai E, et al. Ground validation for the tropical rainfall measuring mission (TRMM) [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(4): 365 – 380.
- [23] Robert F Adler, George J Huffman, David T Bolvin, et al. Tropical rainfall distributions determined using TRMM combined with other satellite and rain gauge information [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2007 – 2023.
- [24] Junji Ikai, Kenji Nakamura. Comparison of rain rates over the ocean derived from TRMM microwave imager and precipitation radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(12): 1709 – 1726.
- [25] Anyamba E, Williams E, Susskind J, et al. The manifestation of the Madden-Julian oscillation in global deep convection and in the Schumann resonance intensity [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(8): 1029 – 1044.
- [26] Daniel J Cecil, Steven J Goodman, Dennis J Boccippio, et al. Three years of TRMM precipitation features, Part I: radar, radiometric, and lightning characteristics [J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(3): 543 – 566.
- [27] Hirohiko Masunaga, Tristan S L'Ecuyer, Christian D Kummerow. The Madden-Julian oscillation recorded in early observations from the tropical rainfall measuring mission (TRMM) [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 63(11): 2777 – 2794.
- [28] Keiji Imaoka, Roy W Spencer. Diurnal variation of precipitation

- over the tropical oceans observed by TRMM/TMI combined with SSM/I[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(23):4149 - 4158.
- [29] Stephen W Nesbitt, Edward J Zipser. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(10):1456 - 1475.
- [30] Hiroki Ichikawa, Tetsuzo Yasunari. Time-space characteristics of diurnal rainfall over Borneo and surrounding oceans as observed by TRMM-PR[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(7):1238 - 1260.
- [31] Victoria L Sanderson, Chris Kidd, Glenn R McGregor. A comparison of TRMM microwave techniques for detecting the diurnal rainfall cycle[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(4):687 - 704.
- [32] Song Yang, Eric A Smith. Mechanisms for diurnal variability of global tropical rainfall observed from TRMM[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(20):5190 - 5226.
- [33] Kazumasa Aonashi, Liu Guosheng. Passive microwave precipitation retrievals using TMI during the Baiu period of 1998, Part I: algorithm description and validation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12):2024 - 2037.
- [34] Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al. The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12):1965 - 1982.
- [35] Meneghini R, Jones J A, Iguchi T, et al. A hybrid surface reference technique and its application to the TRMM precipitation radar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(11):1645 - 1658.
- [36] Tao W K, Smith E A, Adler R F, et al. Retrieval of latent heating from TRMM measurements[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(11):1555 - 1572.
- [37] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Shin D W, et al. Improving tropical precipitation forecasts from a multianalysis superensemble[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(23):4217 - 4227.
- [38] Pu Zhaoxia, Tao Weikuo, Scott Braun, et al. The impact of TRMM data on mesoscale numerical simulation of supertyphoon Paka[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(10):2448 - 2458.
- [39] Walter A Petersen, Stephen W Nesbitt, Richard J Blakeslee, et al. TRMM observations of intraseasonal variability in convective regimes over the Amazon[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(11):1278 - 1294.
- [40] Tao W K, Shie C L, Simpson J, et al. Convective systems over the South China Sea: Cloud-resolving model simulations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(24):2929 - 2956.
- [41] Yasu-Masa Kodama, Takuya Yamada. Detectability and configuration of tropical cyclone eyes over the Western North Pacific in TRMM PR and IR observations[J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(8):2213 - 2226.
- [42] 姚展予,李万彪,朱元竞,等. 用 TRMM/TMI 估算 HUBEX 试验区的云中液态水[J]. *气象学报*, 2003, 61(1):116 - 121.
- [43] 傅云飞,宇如聪,徐幼平,等. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究[J]. *气象学报*, 2003, 61(4):421 - 431.
- [44] 何文英,陈洪滨. TRMM 卫星对一次冰雹降水过程的观测分析研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(3):364 - 376.
- [45] Fu Y, Liu G. Precipitations in mid-latitude East Asia as observed by TRMM PR and TMI[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, 81(6):1353 - 1369.
- [46] Fu Y, Lin Y, Liu G, et al. Seasonal characteristics of precipitation in 1998 over East Asia as derived from TRMM PR[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20:511 - 529.
- [47] 郑媛媛,傅云飞,刘勇,等. 热带降水测量卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究[J]. *气象学报*, 2004, 62(6):790 - 802.
- [48] 傅云飞,冯静夷,朱红芳,等. 西太平洋副热带高压下热对流降水结构特征的个例分析[J]. *气象学报*, 2005, 63(5):750 - 761.
- [49] 傅云飞,张爱民,刘勇,等. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析[J]. *气象学报*, 2008, 66(5):730 - 746.
- [50] Fu Yunfei, Liu Guosheng, Wu Guoxiong, et al. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(1):1 - 4.
- [51] Fu Yunfei, Liu Guosheng. Possible misidentification of rain type by TRMM PR over Tibetan plateau[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2007, 46(5):667 - 672.
- [52] Liu Qi, Fu Yunfei. An examination of summer precipitation over Asia based on TRMM/TMI[J]. *Science China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 50(3):430 - 441.

# TRMM satellite onboard instruments and the application on precipitation analysis of their measurements

Fu Yunfei, Liu Qi, Wang Yu, Sun Liang,

Li Rui, Ma Ming, Liu Guosheng

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[**Abstract**] The method of satellite infrared and passive microwave remote sensing for precipitation were briefly introduced firstly. The instruments onboard the tropical rainfall measurement mission (TRMM) satellite and the application of their measurements were discussed. As for example, precipitation structure, relationship among altitude of cloud top and rain top with surface rain rate for a summer hot convective precipitation system were brought forth together with analyzing of long time dataset of the TRMM precipitation radar on precipitation climatology in Asia. At last, the prospect of the satellite active and passive remote sensing of precipitation in the near future were given.

[**Key words**] TRMM; precipitation radar; microwave imager; spectrum; precipitation

---

(上接 26 页)

## The development formulation and reflection of ISO 18186 and some thinking

Bao Qifan

(Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

[**Abstract**] The rapid development of economy and the continuous improvement of technical level form a growing voice to enhance our influence on the international standardization activities. *ISO 18186: 2011 Freight Container – RFID Shipment Tag System* was officially released in 2011 by International Standardization Organization (ISO), which is the first International Standard launched, drafted and led by Chinese experts in the field of the logistics and the internet of things, since China began to participate in ISO activities. The international standard, with “building a complete industrial chain including platform construction, hardware and software design, commercial mode, and system applications” as the technical support and along the route of “technique patented, patent standardized and standard internationalized”, firstly formed the national standard GB/T 23678—2009 and proceeded with the formulation of relevant international standards. This paper describes the development process and method of this International Standard and shares some experience in order to provide some useful help on how to raise our Chinese innovation up to an international standard.

[**Key words**] international standard development; container RFID (radio frequency identification); ISO 18186