

朱梅,何君涛,方勉,等. GPM卫星资料在分析“杜苏芮”台风降水结构中的应用[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 997-1002. [ZHU Mei, HE Juntao, FANG Mian, et al. Application of GPM Data in Analysis of Precipitation Structure of Typhoon Doksuri[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6): 997-1002], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0997

GPM 卫星资料在分析“杜苏芮” 台风降水结构中的应用

朱梅^{1,2}, 何君涛¹, 方勉¹, 尹群¹

(1. 海南省三亚市气象局, 海南 三亚 572000;

2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口 570203)

摘要:利用 GPM 卫星探测的数据产品 2A-DPR 和 1C-GMI 以及三亚市 30 个自动气象站降雨数据对 2017 年第 19 号台风“杜苏芮”的降水率、雨顶高度、降水类型、降水微波信号、云水路径、冰水路径、降水三维结构等特征进行了分析。结果表明:“杜苏芮”加强阶段,近地面降水率主要集中在 $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下,部分区域为 $40.0 \sim 100.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大值高达 $299.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;雨顶高度集中在 $6 \sim 10 \text{ km}$,最大为 12 km ;降水率和雨顶高度的大值区均处在台风外围的螺旋雨带中;台风降水中层云降水占 68.5% ,对流降水占 27.1% ,对流云降水的平均降水率是层云降水的 3.2 倍;低频 (18.9 GHz)、中频 (89.0 GHz) 和高频 ($183.31 \pm 8 \text{ GHz}$) 的微波亮温表明台风云系中存在大量的水粒子和冰粒子,且高频对冰粒子的探测更为敏感;台风螺旋云带中对流发展旺盛,且存在大量的降水柱,近地面降水率较大的区域所对应的降水柱也较为密实,降水柱的高度也比较高。

关键词:GPM; 台风“杜苏芮”; 降水率; 降水类型; 微波亮温

文章编号:1006-7639(2018)06-0997-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0997

中图分类号:P458.1⁺24

文献标志码:A

引言

台风是影响我国的重要天气系统之一,其所伴随的狂风骤雨对人民的生命财产安全造成重要威胁^[1-8]。防范和减小台风灾害的有效手段就是准确地预报台风活动路径及强度^[9]。传统的地基雷达观测和卫星被动式遥感探测还存在诸多限制,地基雷达观测受下垫面的影响较大,并且观测范围有限;静止卫星能探测台风顶部,了解台风的轮廓、活动路径等,但对台风内部特征的探测还存在一定的局限性^[10]。星载测雨雷达能够弥补地基雷达和卫星被动遥感存在的不足,具有对云和降水的三维结构进行主动探测的能力,并且不受地表类型、太阳辐射等方面的影响^[11]。

1997 年美国和日本联合发射了第一颗主动式测雨卫星 TRMM,旨在观测热带和亚热带地区降水,2015 年由于燃料耗尽,TRMM 卫星停止运行。在

TRMM 卫星运行的十多年中,不少学者利用其探测资料对降水系统的内部结构、微波亮温、降水微物理特征及干旱监测等进行了分析研究^[12-13]。美国和日本 2014 年又联合发起了全球测雨计划 GPM (global precipitation measurement)^[14],作为 TRMM 卫星的延续^[15],其搭载的第二代星载测雨雷达 (dual-frequency precipitation radar, DPR) 对强降水和弱降水都能够进行有效观测,并且还能反演降雪及降水粒子谱等信息,对更加深入了解降水内部结构特征提供了不可多得的资源^[16]。

目前,国内已有涉及 GPM 卫星探测产品的研究,如张昇祺等^[17]选取 2014 年 4 个降水个例,利用 DPR 的 Ku、Ka 波段不同探测方式反演的降水产品对所选个例的降水结构特征进行对比分析;金晓龙等^[18]分析 GPM 卫星数据产品在天山地区的适用性;吴琼等^[19]以 4 场降雪为例,分析了 GPM 双频测

收稿日期:2018-03-19;改回日期:2018-06-06

基金项目:三亚城市雨涝灾害防御研究项目(2013YD85)及卫星资料在海南岛的适用性分析项目(HNXXQN201805)共同资助

作者简介:朱梅(1988—),女,硕士,工程师,主要研究方向为城市雨涝及相关研究工作。E-mail:894855279@qq.com。

通讯作者:何君涛,男,高级工程师。E-mail:syqh2012@163.com。

雨雷达对降雪的探测能力;ZHANG等^[20]对GPM、TRMM降雨产品在青藏高原地区的适用性进行分析,结果表明在青藏高原地区,GPM IMERG降雨产品要优于TRMM TMPA。利用GPM卫星数据研究台风降水,不仅能够弥补传统自动站观测在空间分布上的缺陷,而且能更好地认识台风的发展阶段,对后续台风的预报提供一定的参考价值;降水云团中微物理量的分析还可以同模式模拟结果进行对比验证,同时在无法利用机载PMS粒子探测系统的条件下,GPM卫星捕捉到的降水数据为研究降水内部结构提供了重要的数据支持。基于此,本文选取2017年第19号台风“杜苏芮”,利用GPM卫星探测反演的降水产品,分析降水强度、雨顶高度、降水类型、微波信号、降水云系微物理量、降水三维结构等特征,为深入了解台风降水结构提供可靠的事实观测依据。

1 数据介绍

GPM卫星是美国和日本联合提出的新一代全球降水观测计划,它由一个核心观测平台和多个卫星组成一个卫星群,能够提供全球范围内基于微波反演的3h以内的降水数据产品,其中余占猷^[21]对GPM卫星及其数据产品进行过详细介绍。文中所用数据主要为GPM V03版本1-2级数据产品中的1C-GMI亮温和2A-DPR降水数据产品,卫星扫描时间为2017年9月14日10:58—11:00(北京时间,下同),此时段卫星扫描到台风“杜苏芮”的大部分结构,卫星过境期间“杜苏芮”正处在加强时期;2017年9月14日08:00至9月15日14:00三亚市30个自动气象站降雨实测数据,利用这些数据对台风“杜苏芮”的降水结构、微波亮温、回波特征等进行分析。

2 台风“杜苏芮”过程介绍

2017年第19号台风“杜苏芮”于9月11日11:00在菲律宾吕宋岛东部洋面上生成,随后向西偏北方向移动,12日14:00加强为热带风暴,14日05:00发展为强热带风暴,14日14:00升格为台风,并于夜间从海南岛南部近海海面经过,15日04:00加强为强台风,15日12:15前后在越南广平省北部沿海登陆,登陆时中心附近最大风力14级($45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),登陆后向西偏北移动,强度逐渐减弱。台风在海南岛南部近海海面经过时,正处在发展加强阶段,其中三亚市大部分地区出现暴雨到大暴雨,部分地区降水超过 200.0 mm [图1(a)]。

3 结果分析

3.1 降水的水平分布

图2为2017年9月14日10:58—11:00 DPR降水产品中近地表降水率和雨顶高度分布。可以看出,台风中心区域无降水,眼壁及外围的螺旋雨带均出现降水,降水率集中在 $20.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下,部分区域为 $40.0\sim 100.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最大值高达 $299.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。雨顶高度集中在 $6\sim 10\text{ km}$,最大雨顶高度为 12 km 。降水率和雨顶高度的大值区均处在台风外围的螺旋雨带中。在台风加强并向西北偏西方向移动时,三亚地区的降雨也在逐渐增大,其中14日23:00至15日04:00,三亚市30个气象站的平均降雨量在 10.0 mm 以下,15日04:00—06:00小时降雨量超过 10.0 mm ,其中15个气象站的小时降雨量超过 20.0 mm ,海棠区爱潜站监测04:00—05:00的小时降雨量高达 45.4 mm [图1(b)]。观测数据与GPM卫星探测的台风外围降水数据结

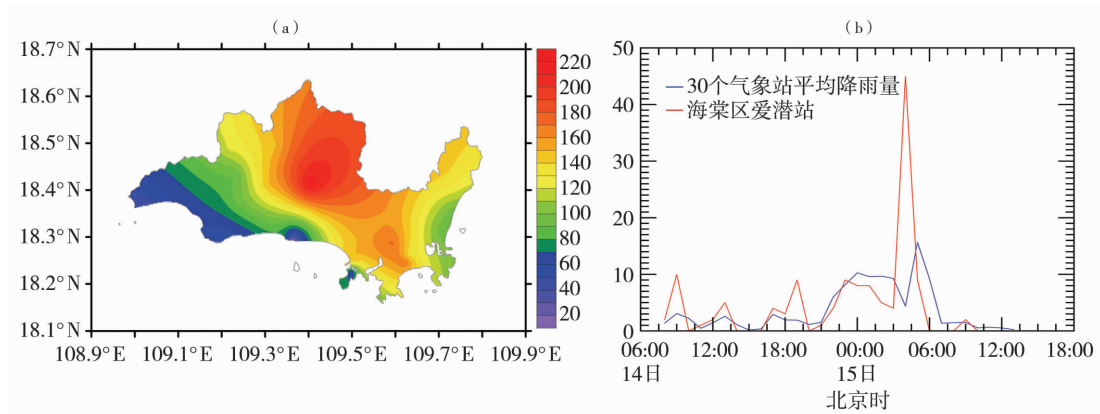


图1 2017年9月14日08:00至15日14:00三亚市降雨量分布(a,单位:mm)及三亚市逐小时平均降水量变化(b,单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig.1 Precipitation distribution (a, Unit:mm) and average hourly rainfall (b, Unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) in Sanya from 08:00 BST on 14 to 14:00 BST on 15 September 2017

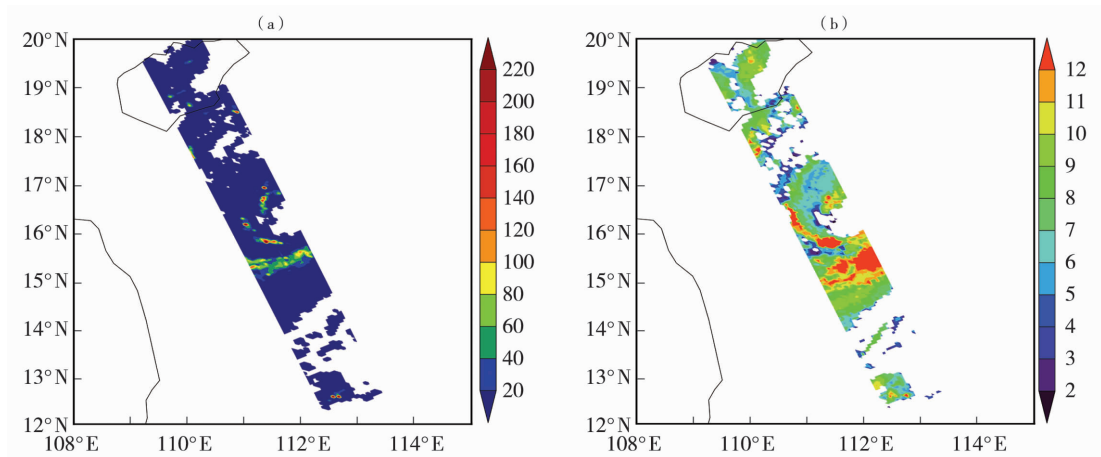


图 2 2017 年 9 月 14 日 10:58—11:00 DPR 降水产品的近地表降水率(a,单位:mm · h⁻¹)和雨顶高度(b,单位:km)分布

Fig. 2 The precipitation rate near surface (a, Unit:mm · h⁻¹) and rain top height (b, Unit:km) from DPR precipitation products from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017

果接近,但需注意的是,由于台风中心位于海上,目前还缺少相应气象站点观测数据,因此,对降水率超过 100.0 mm · h⁻¹的卫星探测数据还有待进一步验证。

表 1 列出 2017 年 9 月 14 日 10:58—11:00 研究区(12°N—20°N,108°E—115°E)观测像素点的不同类型降水所占样本比例及平均降水率、最大降水率。可以看出,样本中以层云和对流云降水为主,其中层云降水像素点个数(2047 个)是对流云降水(808 个)的 2.5 倍,但每个像素点上对流云降水的平均降水率(17.5 mm · h⁻¹)是层云平均降水率(5.4 mm · h⁻¹)的 3.2 倍。层云降水和对流云降水的最大降水率相当,都在 299.0 mm · h⁻¹以上,这可能与热带地区对流降水经常会减弱演变为层云降水有关^[22]。图 3 是台风“杜苏芮”降水类型的空间分布,其中层云降水占比较大,对流降水主要位于台风外围螺旋云带上。结合图 2 可以发现,对流云降水所对应的降水率普遍较大。

表 1 2017 年 9 月 14 日 10:58—11:00 研究区不同类型降水所占样本比例及对应的最大降水率、平均降水率

Tab. 1 The proportion of different types of precipitation and the corresponding maximum precipitation rate and average precipitation rate in study area from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017

降水类型	样本量/ 个	占样本 比例/%	最大降水率/ (mm · h ⁻¹)	平均降水率/ (mm · h ⁻¹)
层云降水	2047	68.5	299.8	5.4
对流降水	808	27.1	299.8	17.5
其他	132	4.4	1.0	0.1

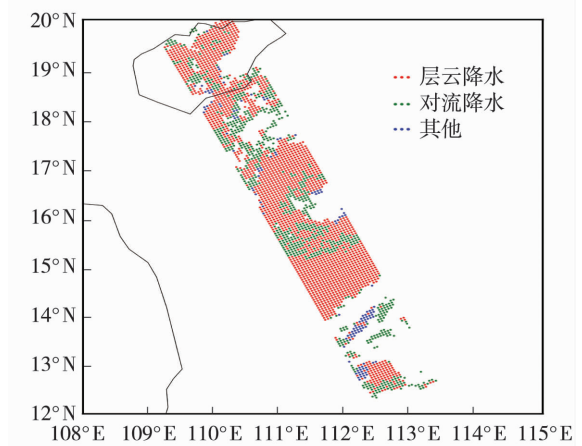


图 3 2017 年 9 月 14 日 10:58—11:00 台风“杜苏芮”降水类型分布

Fig. 3 Distribution of precipitation types of the typhoon Doksuri from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017

3.2 降水的微波信号特征

根据 GPM 多波段的微波成像仪 GMI 的 13 个微波通道的亮温分布特点,选取低频(18.7 GHz)、中频(89.0 GHz)和高频(183.31 ± 8 GHz)的垂直极化通道分析台风“杜苏芮”降水云系的微波辐射亮温分布特点(图 4)。可以看出,GMI 的扫描宽度大于 DPR 的扫描宽度,因此可以看到较为全面的降水系统。从低频微波辐射亮温可以看到,“杜苏芮”螺旋云带的亮温较高,普遍在 280 K 以上,这是由于台风处在冷洋面上,水粒子越多亮温越高,而水粒子的多寡则与降水强弱有关,水粒子越多表明这些区域存在强降水。中频辐射亮温反映云中冰粒子的信

息,亮温越低冰粒子越多,“杜苏芮”螺旋云带亮温在 200 K 以下,表明这些区域存在大量冰粒子。高频辐射亮温表征小颗粒的冰粒子分布情况,“杜苏芮”螺旋云带中的亮温低至 150 K 以下,并且低值区范围明显大于中频的低值区范围,表明高频比中频能够探测到更多冰粒子信息。

为进一步了解降水云中水粒子、冰粒子的含量,利用 GMI 微波探测结果反演云水、冰水路径分布情况(图 5)。可以看出,“杜苏芮”螺旋云带存在大量的水粒子,最大值在 $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,结合图 4 可以看到低频螺旋云带上亮温的大值区域与云水粒子螺旋云带上的大值区基本吻合。冰水路径分布中冰水含量高达 $8.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,且 GMI 反演的冰水路径中大值区与 GMI 高频亮温中低值区相对应。

3.3 降水的三维结构特征

图 6 是 DPR 反演的降水三维结构轮廓图,降水率的阈值分别取 5.0 和 $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可以看出,降水率阈值为 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,台风螺旋云带中存在大量的降水柱,近地面降水率较大的区域其所对应的降水柱也较为密实,降水柱的高度也比较高。

将降水率阈值增大到 $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,在台风眼区的南侧仍然存在密实的强降水柱,台风北侧螺旋云带上的降水柱较为离散。从图 6 还可以看到台风“杜苏芮”的降水分布主要在眼区以南,北侧的降水强度及降水范围都较小。图 7 为 DPR 探测的降水率内部结构三维图,显示台风的雨顶高度达 10 km 左右,最大降水强度出现在台风眼壁及南侧螺旋云带中 2 km 高度以下的对流层低层。

为进一步分析降水中的对流发展情况,取阈值为 20 dBZ,给出 DPR 探测的雷达反射率三维图(图 8),可以看到台风眼区为晴空区,没有对流单体。云墙区的反射率较大,对流单体紧密连接在一起,说明对流发展旺盛;眼区南侧螺旋云带区,存在连续对流单体,能够明显看到雨带的螺旋结构;台风螺旋云带外围南侧有多个孤立状的对流单体(图 8 红色圈内),结合图 7 发现该处(图 7 中红色圈内)的降水率强度与云墙区的降水率强度相当,但反射率较云墙区明显偏小,体现了降水率强弱变化的复杂性^[23],也表明降水率与云团中微物理因子有密切联系。

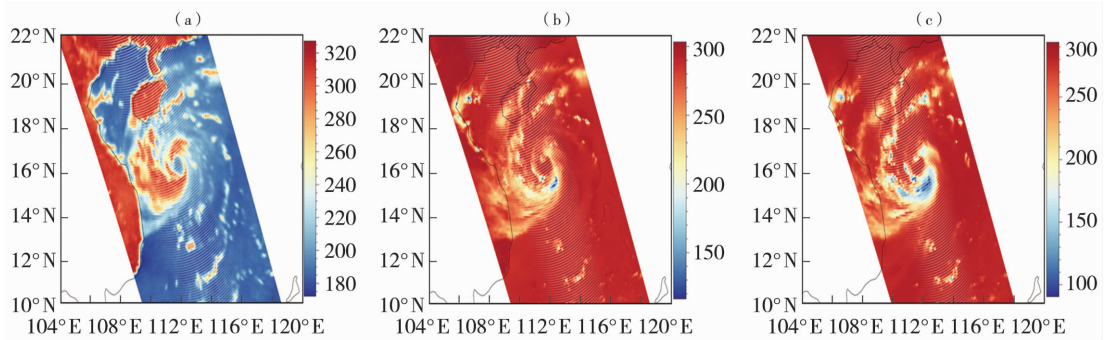


图 4 2017 年 9 月 14 日 10:58—11:00 GMI 低频(a)、中频(b)、高频(c)垂直通道探测的台风降水云系微波辐射亮温(单位:K)

Fig. 4 The brightness temperature of microwave radiation detected by the low (a), middle (b) and high (c) frequency of vertical channel of GMI from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017 (Unit:K)

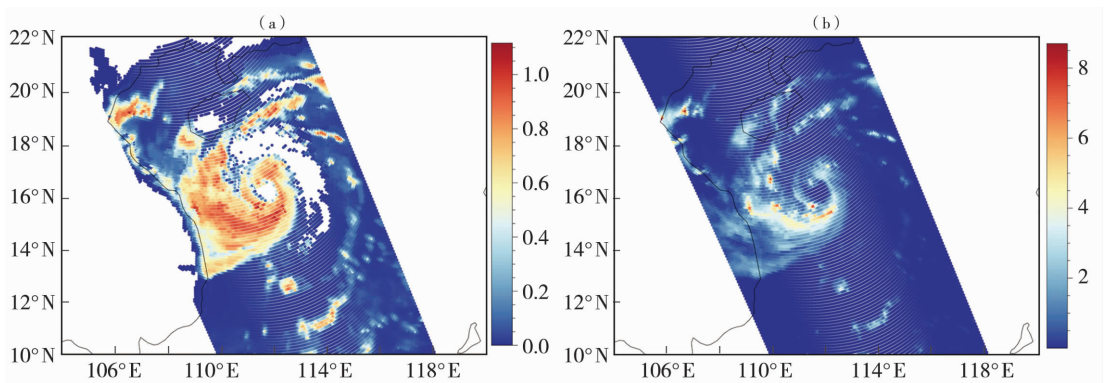


图 5 2017 年 9 月 14 日 10:58—11:00 GMI 反演的云水路径(a)和冰水路径(b)分布(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 5 Cloud water path (a) and ice water path (b) detected by GMI from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017 (Unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

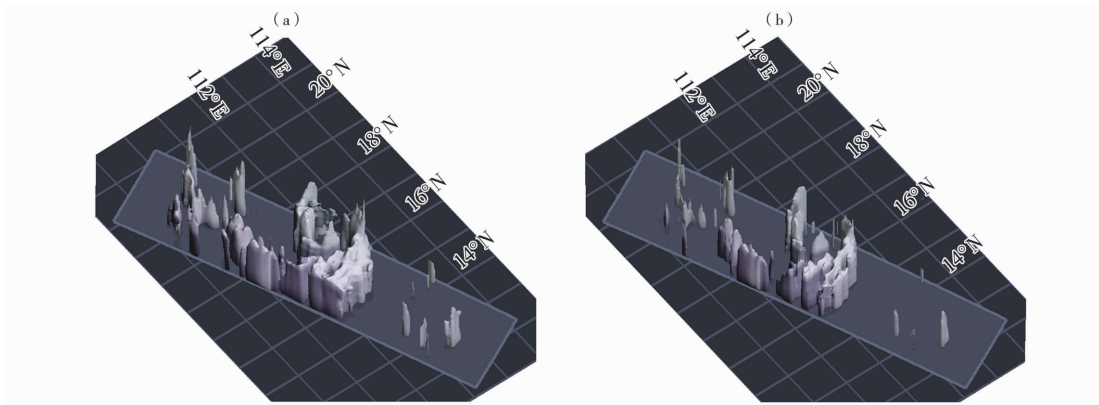


图6 2017年9月14日10:58—11:00 DPR探测的三维降水率轮廓图
(a)降水率阈值为 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b)降水量阈值为 $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 6 Three dimensional precipitation rate profile detected by DPR from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017

(a) the threshold of precipitation rate is $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) the threshold of precipitation rate is $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

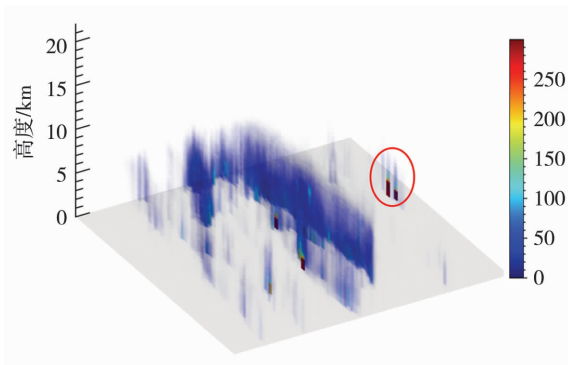


图7 2017年9月14日10:58—11:00 DPR探测的降水率内部结构图(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 7 The internal structure of the precipitation rate detected by DPR from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017 (Unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

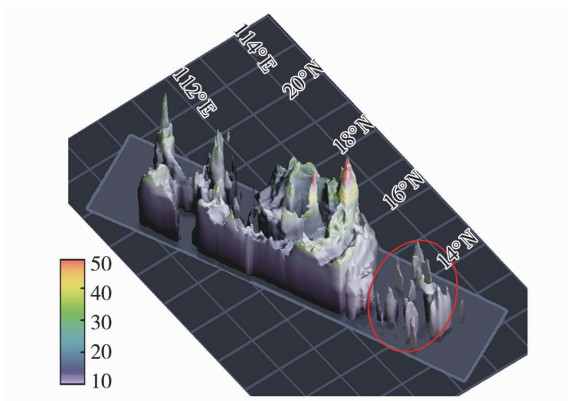


图8 2017年9月14日10:58—11:00 DPR探测的雷达反射率三维图(单位:dBZ)
(雷达反射率阈值为20 dBZ)

Fig. 8 Three dimensional radar reflectivity detected by DPR from 10:58 BST to 11:00 BST on 14 September 2017 (Unit:dBZ)
(the threshold of radar reflectivity is 20 dBZ)

4 结论

(1)自动气象站实测资料与GPM卫星探测的台风外围降水率相吻合,“杜苏芮”加强阶段,近地面降水率主要集中在 $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,部分区域为 $40.0 \sim 100.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大值高达 $299.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,台风的雨顶高度集中在 $6 \sim 10 \text{ km}$,最大为 12 km 。降水率和雨顶高度的大值区域均处在台风外围的螺旋云带中。

(2)台风降水中以层云和对流云降水为主,层云降水分布更广,且2种类型的最大降水率都高达 $299.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,这可能与热带地区对流降水减弱演变为层云降水有关。虽然层云降水数量比对流降水数量多,但是对流降水率强度大,对流降水率是层云降水率的3.2倍。

(3)低、中、高不同频率通道对微物理因子(云水、冰水)的探测能力不同,其中低频通道显示台风螺旋云带的高值区与云水路径中的大值区相吻合,中、高频螺旋云带的低值区对应冰水路径中的大值区,且高频对冰粒子的探测更为敏感。

(4)降水率的垂直结构特征表明,台风南侧的降水柱高度和密度明显高于北侧,最大降水强度出现在台风眼壁及南侧螺旋云带中 2 km 高度以下的对流层低层,此外,降水率的强弱除了与雷达反射率强弱有关,还受微物理因子等其他因素的影响。

参考文献:

[1] 张雅斌,武麦风,侯建忠,等. 陕西4次台风远距离暴雨过程的水汽条件对比[J]. 干旱气象,2014,32(5):788-797.
[2] 王文波,王旭,杨明,等. 台风“达维”移动路径成因分析[J]. 干

- 旱气象,2014,32(1):75-80.
- [3] 陆桂荣,王文,于怀征,等. 台风“达维”对山东日照“08.03”暴雨天气过程的影响分析[J]. 干旱气象,2014,32(2):256-262.
- [4] 黄小丹,黄先伦,麦宗天,等. 3个登陆台风引发阳江特大暴雨的水汽输送对比分析[J]. 气象与环境科学,2015,38(3):61-69.
- [5] 沈晓玲,孙琦旻. “菲特”台风暴雨成因分析[J]. 气象与环境科学,2014,37(4):33-39.
- [6] 陈联寿,许映龙. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学,2017,40(1):3-10.
- [7] 黄昌兴,江敦双,李欣,等. 影响山东半岛的两次台风暴雨对比分析[J]. 气象与环境科学,2015,38(3):70-77.
- [8] 吴蓁,李朝兴,梁钰. 0505台风低压倒槽后退东移的原因分析[J]. 气象与环境科学,2015,38(3):37-46.
- [9] 陈联寿,罗哲贤,李英. 登陆热带气象研究的进展[J]. 气象学报,2004,62(5):541-549.
- [10] 傅云飞,刘栋,王雨,等. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征[J]. 气象学报,2007,65(3):316-328.
- [11] 卢美圻,魏鸣. GPM资料在分析“彩虹”台风降水垂直结构中的应用[J]. 遥感技术与应用,2017,32(5):904-912.
- [12] 黄强,陈子燊,孔兰,等. 联合干旱指数在干旱监测中的应用:以广东韶关地区为例[J]. 干旱气象,2014,32(4):499-504.
- [13] 王宝鉴,黄玉霞,魏栋,等. TRMM卫星对青藏高原东坡一次大暴雨强降水结构的研究[J]. 气象学报,2017,75(6):966-980.
- [14] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al. The global precipitation measurement mission[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014,95(5):701-722.
- [15] TANG G, ZENG Z, LONG D, et al. Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM level-3 products over a midlatitude basin: is day-1 IMERG a good successor for TMPA 3B42V7[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016,17(1):121-137.
- [16] 唐国强,万玮,曾子悦,等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用,2015,30(4):607-615.
- [17] 张暮祺,傅云飞. GPM卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析[J]. 大气科学,2018,42(1):33-51.
- [18] 金晓龙,邵华,张弛,等. GPM卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. 自然资源学报,2016,31(12):2074-2085.
- [19] 吴琼,仰美霖,窦芳丽. GPM双频降水测量雷达对降雪探测能力分析[J]. 气象,2017,43(3):348-353.
- [20] ZHANG S, WANG D, QIN Z, et al. Assessment of the GPM and TRMM precipitation products using the rain gauge network over Tibetan Plateau[J]. Journal of Meteorological Research, 2018,32:324-336.
- [21] 余占猷. 利用DPR和GMI探测结果对东亚降水云的个例分析研究[D]. 北京:中国科学技术大学,2016:6-33.
- [22] 刘鹏,李崇银,王雨,等. 基于TRMM PR探测的热带及副热带对流和层云降水气候特征分析[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(9):1358-1369.
- [23] 刘圣楠,崔晓鹏. “碧利斯”(2006)暴雨过程降水强度和降水效率分析[J]. 大气科学,2018,42(1):192-208.

Application of GPM Data in Analysis of Precipitation Structure of Typhoon Doksuri

ZHU Mei^{1,2}, HE Juntao¹, FANG Mian¹, YIN Qun¹

- (1. Sanya Meteorological Bureau of Hainan Province, Sanya 57200, Hainan, China;
2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China)

Abstract: Based on the 2A-DPR, 1C-GMI products of GPM (global precipitation measurement) and the precipitation data of 30 automatic meteorological stations in Sanya of Hainan Province, the precipitation rate near surface, rain top height, precipitation type, microwave signal, cloud water path, ice water path and the 3D structure of precipitation of the 19th typhoon Doksuri in 2017 were analyzed. The results show that at the strengthening stage of the typhoon Doksuri, the precipitation rate near surface was mainly less than $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, and in some parts it ranged from 40.0 to $100.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, and the maximum of it was over $299.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. The height of rain top was between 6 and 10 km, and the maximum height of the rain top reached 12 km. The higher value of precipitation rate near surface and rain top height appeared in the spiral cloud band outside the typhoon. The stratiform precipitation ratio was 68.5%, and the convective precipitation ratio was 27.1%, while the average convective precipitation rate was 3.2 times of the stratiform precipitation rate. The low frequency (18.9 GHz), intermediate frequency (89.0 GHz) and high frequency (183 ± 8 GHz) microwave brightness temperatures reflected that there were a large number of water and ice particles in the typhoon, and the high frequency channel was more sensitive to detection of the ice particles. At the developing stage of the typhoon, there were a lot of precipitation columns in the spiral cloud belt of the typhoon. The higher value of the precipitation rate near surface corresponded to the denser and higher precipitation columns.

Key words: GPM; typhoon Doksuri; precipitation rate; precipitation type; microwave brightness temperature