

李芳,李南,万瑜.台风“温比亚”影响山东期间 GPM 资料的降水分析[J].海洋气象学报,2020,40(4):69-76.
LI Fang, LI Nan, WAN Yu. GPM data analysis of precipitation in Shandong as affected by Typhoon RUMBIA[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 69-76. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.008. (in Chinese)

台风“温比亚”影响山东期间 GPM 资料的降水分析

李芳¹, 李南², 万瑜³

(1. 济宁市气象局, 山东 济宁 272000; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 新疆维吾尔自治区气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 为研究 GPM (Global Precipitation Measurement) 资料对台风雨带降水结构的探测能力, 利用 GPM 卫星资料、地基雷达资料和地面降水实况对 2018 年第 18 号台风“温比亚”影响山东期间的降水结构进行分析。结果表明: 台风螺旋雨带造成的降水远大于台风外围云系产生的降水; 台风螺旋雨带的雨顶高度大于外围云系的雨顶高度, 基本在 7 km 以上, 最大雨顶高度达到 15 km; 台风螺旋雨带及其外围云系都以层云和对流云降水为主, 其中螺旋雨带中对流云降水所占比例高于外围云系, 对流云的平均降水率是层云的 3 倍左右, 对流云降水对应近地面降水率和雨顶高度的大值区; 台风螺旋雨带的降水柱与外围云系中的降水柱相比, 具有数量多、密度大、高度高的特点, 这与台风螺旋雨带中对流发展旺盛有关; 2A-DPR 数据产品对降水估测具有较好的指示意义。研究结果为用 GPM 产品估测降水结构提供了参考依据。

关键词: 全球降水测量; 台风“温比亚”; 降水结构; 降水分析; 螺旋雨带; 雨顶高度; 降水率

中图分类号: P457.8; P457.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)04-0069-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.008

GPM data analysis of precipitation in Shandong as affected by Typhoon RUMBIA

LI Fang¹, LI Nan², WAN Yu³

(1. Jining Meteorological Bureau, Jining 272000, China; 2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract In order to study the ability of GPM (Global Precipitation Measurement) data to detect the precipitation structure of typhoon, the GPM satellite data, ground-based radar data, and surface precipitation observations are used to analyze the precipitation structure of Typhoon RUMBIA (2018) as it affects Shandong. The results are listed as follows. 1) The precipitation caused by the spiral rainband of the typhoon is much larger than that by the peripheral cloud system. 2) The rain top height of the spiral rainband of the typhoon is greater than that of the peripheral cloud system. The rain top height is basically above 7 km and the maximum reaches 15 km. 3) The spiral rainband and peripheral cloud system of the typhoon are dominated by precipitation of stratus clouds and convective clouds. The precipitation ratio of convective clouds in the spiral rainband is higher than that in the peripheral cloud system, the average precipitation rate of convective clouds is three times more than that of stratus clouds, and the precipitation of convective clouds corresponds to the high-value area of near-surface precipitation rate and rain top height. 4) Compared with the precipitation column in the peripheral cloud system of the typhoon, the

收稿日期: 2020-09-18; 修订日期: 2020-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41675029); 山东省气象局科研项目(2017SDQN15, 2019sdqxm19)

通信作者: 李芳, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事天气气候预测和研究工作, 675210503@qq.com。

precipitation column in the spiral rainband is characterized by large number, high density, and great height, which is related to the strong convection development in the spiral rainband of the typhoon.

5) The 2A-DPR data products have a good indication for predicting precipitation. The results provide a reference for predicting precipitation structure with GPM products.

Key words Global Precipitation Measurement (GPM); Typhoon RUMBIA; precipitation structure; precipitation analysis; spiral rainband; rain top height; precipitation rate

引言

台风是产生暴雨的重要天气系统,强台风发生时常带来极端性降水,易发生雷暴、大风、龙卷等灾害,严重威胁人民的生命财产安全^[1-3]。由于台风登陆后与中纬度系统之间复杂的相互影响,台风移动路径及强度的准确预报仍是目前预报的难点,也是防灾减灾迫切需要解决的问题。台风暴雨落区主要受台风内部涡旋结构影响,因此,对台风内部结构的准确探测显得尤为重要^[4-6]。星载测雨雷达可以不受下垫面地表类型和太阳辐射的影响,主动探测云和降水的三维结构,是对地基雷达和被动式卫星遥感观测的有效补充,更有助于了解降水内部垂直结构^[7-15]。

全球降水测量计划 GPM (Global Precipitation Measurement) 是继 TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) 之后新一代全球卫星降水产品,观测范围为南北纬 65° 之间,每 3 h 获得一次全球降水分布数据资料,其所搭载的双频降雨雷达 DPR 相对于 TRMM 上的 PR 有所改进。GPM 从 2014 年 3 月开始提供数据产品,近年来关于 DPR 资料的相关研究成为了降水观测领域的热点内容,目前山东地区还没有利用 GPM 数据进行相关分析^[16-21]。唐国强等^[22]对 GPM 所提供的算法产品以及应用前景分别进行了介绍,利于 GPM 产品在国内的应用和推广。张慕祺和傅云飞^[23]选取 2014 年 4 个分别位于中国东部、西北太平洋区域、风暴轴区域以及美国的降水个例,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,结果表明 Ka 波段高精度探测 (Ka HS) 的回波顶高度最高但对强降水存在严重低估。金晓龙等^[24]针对天山山区,比较三种卫星数据与地面气象站观测数据的相关系数,发现相比于 TRMM 和 CMORPH, GPM 产品与观测数据的相关性最好。吴琼等^[25]以 2015 年发生在我国不同区域的 4 场降雪为例,分析了 GPM 双频测雨雷达对降雪的探测能力,发现 Ku 波段雷达由于仪器灵敏度

的大幅提高,对降雪的综合探测能力最强。朱梅等^[26]利用 GPM 卫星探测的 2A-DPR 和 1C-GMI 产品以及三亚市自动气象观测站降雨数据对 2017 年 19 号台风“杜苏芮”的结构进行分析,得出高频对冰粒子的探测更为敏感的结论。利用 GPM 的星载测雨雷达 DPR 捕捉到的观测资料,可为研究台风降水内部结构提供丰富的数据支持,但由于卫星过境时间不连续,卫星捕捉到的台风资料仍然有限,迫切需要开展更多这方面的研究^[27-29]。

2018 年 18 号台风“温比亚”由 8 月 17 日 04 时登陆上海浦东到 20 日 05 时在山东北部进入渤海,在陆地维持时间长达 73 h,期间经历了热带风暴—热带低压—温带气旋的发展过程。“温比亚”对山东影响长达 69 h (17 日 17 时—20 日 14 时),历史少见,导致山东大部地区产生暴雨至大暴雨,局部特大暴雨^[30],但降水时空分布特征随台风的发展变化呈现明显差异。因此,本文利用 GPM 卫星捕捉到的“温比亚”台风影响山东期间的数据资料,从近地表降水率、雨顶高度、降水类型、降水三维结构等方面进行分析,以期为进一步了解台风降水结构提供数据参考。

1 研究数据

文中所用 GPM 数据主要为其 2 级产品的 2A-DPR,包含扫描时间、扫描范围、地理信息、降水的反射率因子、回波顶高等信息^[31]。“温比亚”影响山东期间,2A-DPR 产品共生成 64 个,经过经纬度筛选,只有两次扫过山东,具体信息如表 1 所示。

表 1 “温比亚”影响山东期间卫星过境资料 (北京时)

Table 1 Satellite data of Typhoon RUMBIA as it affects Shandong (BST)

轨道号	开始时间	结束时间	数据格式
25393	20180818T0646	20180818T0649	Hdf5
25418	20180819T2055	20180819T2058	Hdf5

“温比亚”移动路径如图 1 所示:17 日 04 时“温比亚”以热带风暴强度自上海浦东登陆,17 日 17 时

开始影响山东,18 日 14 时减弱为热带低压,19 日 20 时进入山东,20 日 05 时形成温带气旋,20 日 07 时进入渤海。8 月 18 日 06:46—06:49 卫星捕捉到的山东境内降水信息距台风中心大约 450 km,主要为热带风暴螺旋雨带外围云系产生的降水,降水分散且弱;8 月 19 日 20:55—20:58 卫星捕捉到的山东境内降水信息距台风中心大约 230 km,能看到部分螺旋雨带,降水较强,本文将对这两个时刻的台风降水结构进行分析。

文中所用 2A-DPR 产品由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 免费提供 (<https://pmm.nasa.gov/GPM>); 山东省国家级气象观测站降水数据通过全国综合气象信息共享平台 (CIMISS) 获取,数据均经过质量控制。

2 天气形势及降水实况

由 8 月 18 日 08 时 500 hPa 高空图(图 2a)可以

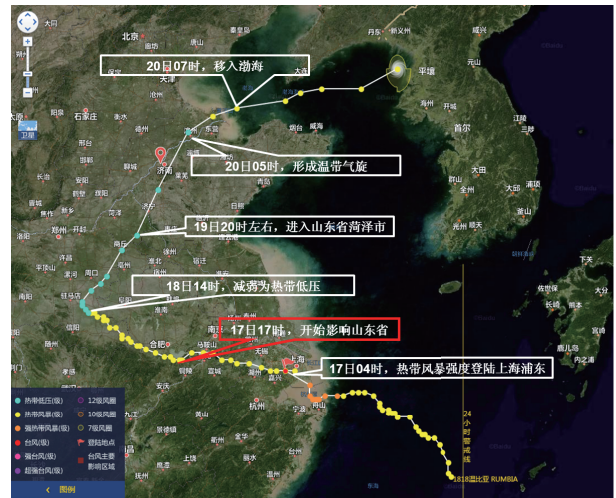


图 1 2018 年第 18 号台风“温比亚”移动路径
Fig.1 Track of Typhoon RUMBIA (2018)

看出,中高纬西风环流较平,海上暖性高压的长期维持导致台风登陆后移动缓慢,此时“温比亚”在安

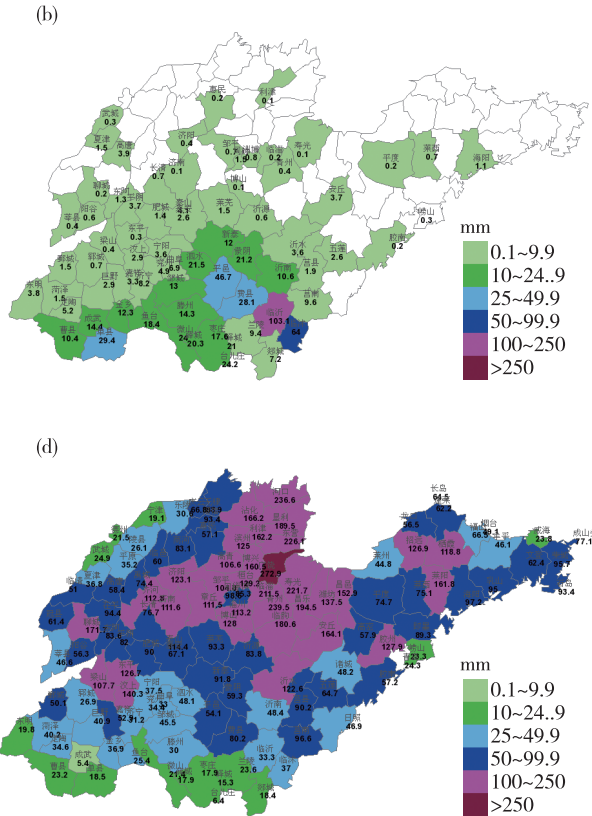
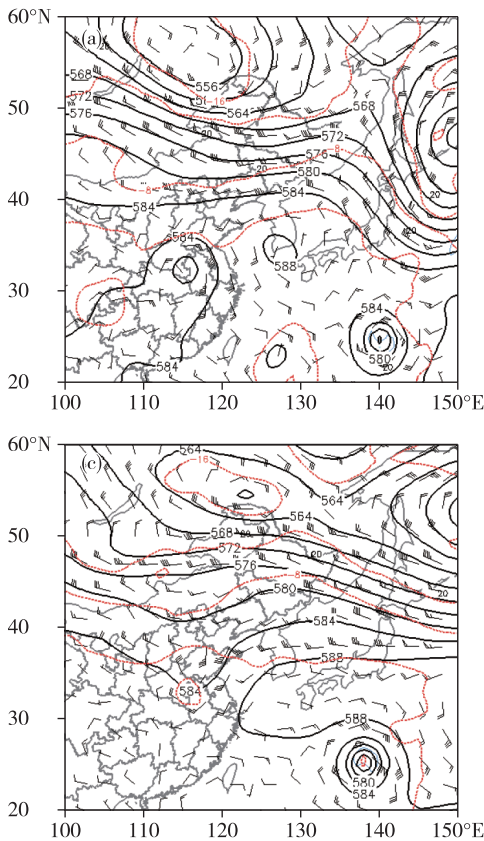


图 2 500 hPa 天气图(黑线:等高线,单位:dagpm;红线:等温线,单位:℃)和降水实况(单位:mm)(a. 2018 年 8 月 18 日 08 时 500 hPa 天气图,b. 2018 年 8 月 17 日 17 时—18 日 08 时山东累计降水量,c. 2018 年 8 月 19 日 20 时 500 hPa 天气图,d. 2018 年 8 月 19 日 08 时—20 日 14 时山东累计降水量)

Fig.2 Synoptic chart at 500 hPa (black line for contour line, units: dagpm; red line for isotherm, units: °C) and precipitation observation (units: mm) (a. synoptic chart at 500 hPa at 08:00 BST 18, b. cumulative precipitation in Shandong from 17:00 BST 17 to 08:00 BST 18, c. synoptic chart at 500 hPa at 20:00 BST 19, d. cumulative precipitation in Shandong from 08:00 BST 19 to 14:00 BST 20 August 2018)

徽境内,山东主要受台风螺旋雨带外围云系的影响,降水较弱,由8月17日17时—8月18日08时山东降水量(图2b)看出,鲁南地区降水量大都在0~25 mm之间,半岛地区基本无降水;19日20时500 hPa中低纬系统进一步结合(图2c),台风环流已并入西风带系统,副热带高压东撤,西风槽东移,此时“温比亚”已从菏泽进入山东,山东大部地区处在槽前西南气流中,台风东侧再次出现强对流云带发展,最强对流区位于东营、潍坊一带,由8月19日08时—20日14时山东降水量(图2d)看出,此时鲁中、鲁西北东部和半岛地区降水量基本都超过50 mm,最大值272.9 mm出现在东营广饶。

3 “温比亚”卫星资料分析

3.1 近地表降水率特征

图3为GPM卫星捕捉到的山东境内台风“温比亚”两个时刻的近地表降水率。8月18日06:46—

06:49,GPM卫星扫过鲁中地区(图3a),降水率较低且分散,此时“温比亚”外围强降水云系从东侧逆时针旋转至台风北部,台风中心南侧云系逐渐消散,强降水区和强风速区逐渐远离环流中心,开始出现“空心”结构(图4a),山东处在台风螺旋雨带外围云系中,此时的降水率集中在 $15\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下,部分区域为 $20\sim 25\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,仅有个别点达到 $55\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,这与地面较弱的降水实况吻合;8月19日20:55—20:58,GPM卫星扫过鲁西北东部和鲁中(图3b),降水率较高,螺旋雨带明显,此时台风中心已进入山东且移速缓慢(图4b),螺旋雨带显示的近地表降水率大都在 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上且存在不连续跃变现象,部分区域在 $100\sim 150\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,近地表降水率大值区对应地面实况强降水区。由此可见,此次过程台风螺旋雨带造成的降水远大于外围云系产生的降水。

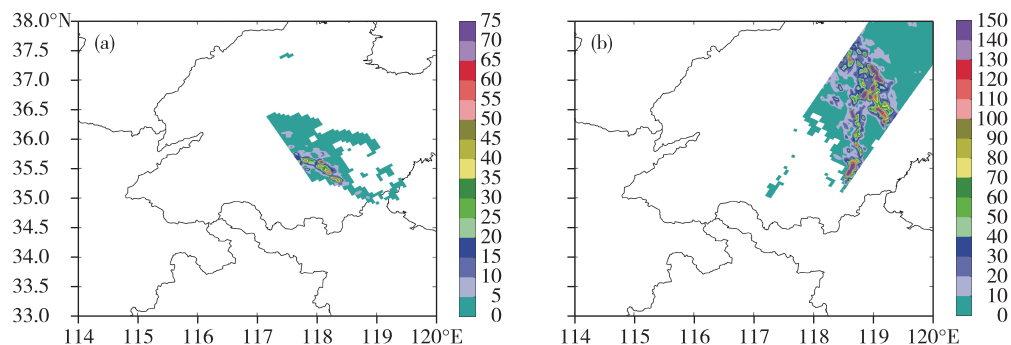


图3 山东境内台风“温比亚”的近地表降水率(填色,单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$;a. 2018年8月18日06:46—06:49;b. 2018年8月19日20:55—20:58)

Fig.3 Near-surface precipitation rate of Typhoon RUMBIA in Shandong (colored area, units: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; a. from 06:46 BST to 06:49 BST 18; b. from 20:55 BST to 20:58 BST 19 August 2018)

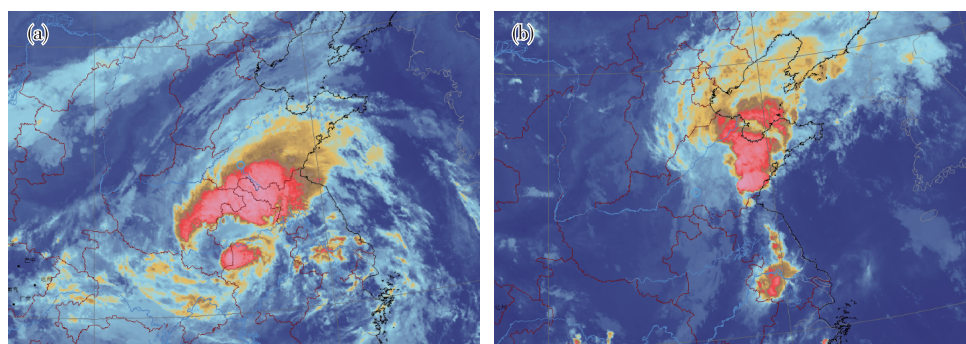


图4 山东境内台风“温比亚”红外卫星云图(a. 2018年8月18日06:46—06:49;b. 2018年8月19日20:55—20:58)

Fig.4 Infrared cloud imagery of Typhoon RUMBIA in Shandong (a. from 06:46 BST to 06:49 BST 18; b. from 20:55 BST to 20:58 BST 19 August 2018)

3.2 雨顶高度特征

图5为GPM卫星捕捉到的山东境内台风“温

比亚”两个时刻的雨顶高度。可以看出,8月18日06:46—06:49(图5a),台风螺旋雨带外围云系的雨

顶高度普遍较低,基本在 5~10 km;8月19日 20:55—20:58(图 5b),台风螺旋雨带的雨顶高度较高,基本在 7 km 以上,10~12 km 居多,最大雨顶高

度达到 15 km。对比图 3 可以看出,近地表降水率大的区域雨顶高度也较高。

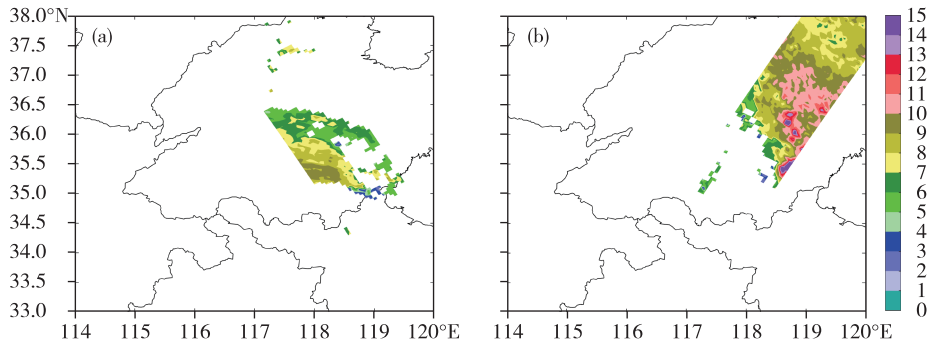


图 5 山东境内台风“温比亚”(1818)的雨顶高度(填色,单位:km;a. 2018年8月18日06:46—06:49;b. 2018年8月19日20:55—20:58)

Fig.5 Rain top height of Typhoon RUMBIA in Shandong (colored area, units: km; a. from 06:46 BST to 06:49 BST 18; b. from 20:55 BST to 20:58 BST 19 August 2018)

用地面雷达资料对 GPM 数据进行验证,分析 8月19日的临沂雷达资料可知:14时起鲁南至鲁中山区多条强回波带自南向北发展,至17时回波北段到达潍坊、东营一带,最大组合反射率因子达到

58 dBZ(图 6a);20:59,雷达测得的强回波区与 GPM 卫星探测的雨顶高度大值区一致(图 6b),说明 GPM 卫星的 2A-DPR 数据产品对降水估测具有较好的指示意义。

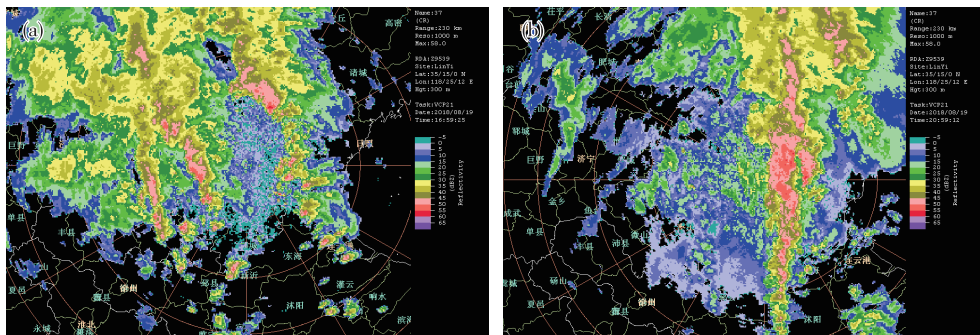


图 6 2018年8月19日临沂雷达组合反射率因子(a. 16:59, b. 20:59)

Fig.6 Composite reflectivity on 19 August 2018 from Linyi CINRAD-SA radar (a. 16:59 BST, b. 20:59 BST)

3.3 降水类型分析

GPM 数据中把降水类型分为三类,分别为层云、对流云和其他,对 GPM 探测的山东境内观测像素点的不同类型降水量及降水率进行统计(表 2)发现:台风“温比亚”螺旋雨带及其外围云系均以层云和对流云降水为主,其中螺旋雨带中对流云降水所占比例高于外围云系;对流云像素点的平均降水率是层云的 3 倍左右。由降水类型分布(图 7)看出,8月19日 20:55—20:58 山东境内的对流云降水像素点个数远大于 8月18日 06:46—06:49,这也是造成 8月19日山东产生强降水的原因。结合图 3 和图 5 可知,对流云降水对应近地面降水率和雨顶高度的大值区。

表 2 不同类型降水所占样本比例及平均降水率

Table 2 Proportion of different types of precipitation in samples and corresponding average precipitation rate

时刻	降水类型	占样本比例/ %	平均降水率/ (mm · h ⁻¹)
2018年8月 18日 06:46—06:49	层云降水	82.4	1.7
	对流云降水	10.4	5.3
	其他	7.2	0.4
2018年8月 19日 20:55—20:58	层云降水	69.2	4.3
	对流云降水	27.6	12.7
	其他	3.2	0.4

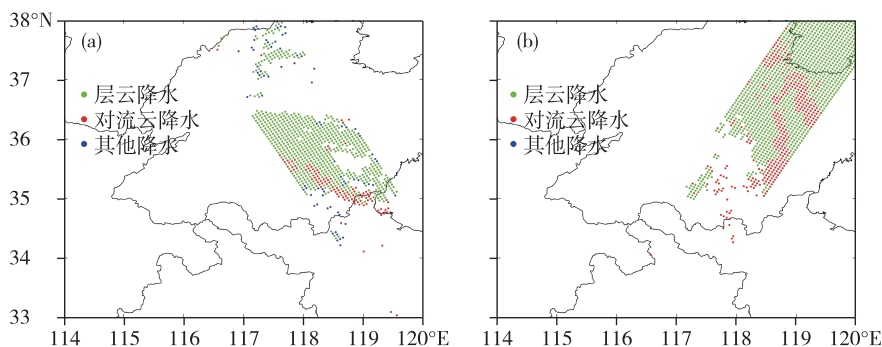


图7 山东境内台风“温比亚”(1818)的降水类型分布(a. 2018年8月18日06:46—06:49;b. 2018年8月19日20:55—20:58)

Fig.7 Distribution of precipitation types of Typhoon RUMBLIA in Shandong (a. from 06:46 BST to 06:49 BST 18; b. from 20:55 BST to 20:58 BST 19 August 2018)

3.4 降水的三维结构特征

图8是台风“温比亚”在两个时刻的降水三维结构轮廓图,降水率的阈值分别取 5.0 、 10.0 和 $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可以看出,降水率阈值为 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时(图8a和图8b),两个时刻的降水柱都较为密实,台风外围云系的降水柱高度低于螺旋雨带的降水柱;降水率阈值增大到 $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 后(图8c和图8d),台风外围云系的降水柱少了许多并出现离散现象(图8c),螺旋雨带的降水柱略有减少仍较为密实(图8d);将降水率阈值增大到 $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 后(图8e和图8f),台风外围云系的降水柱高度明显降低并出现不连续现象(图8e),螺旋雨带的降水柱数量有所减少,但是高度没有明显降低,这与此位置降水类型为对流云有关(图8f)。综上分析:台风螺旋雨带的降水柱与台风外围云系中的降水柱相比,具有数量多、密度大、高度高的特点,这与台风螺旋雨带对流发展旺盛有关;降水柱密实的区域对应地面降水率也较大,降水柱的高度也较高。

4 结论

利用GPM卫星探测的数据产品2A-DPR、地基雷达资料和地面降水实况对2018年第18号台风“温比亚”影响山东期间的降水率、雨顶高度、降水类型、降水三维结构等特征进行了分析,结论如下:

1) 近地表降水率大值区对应地面强降水区,台风螺旋雨带造成的降水远大于台风外围云系产生的降水。

2) 台风螺旋雨带的雨顶高度大于外围云系的雨顶高度,基本在 7 km 以上,其中 $10 \sim 12 \text{ km}$ 居多,最大雨顶高度达到 15 km 。8月19日20时,山东处在槽前西南气流,对流发展旺盛,螺旋雨带中多对

流云,而对流云发展高度一般在 $10 \sim 15 \text{ km}$,与GPM卫星探测的结果一致。

3) 台风“温比亚”的螺旋雨带及其外围云系都以层云和对流云降水为主,其中螺旋雨带中对流云降水所占比例高于外围云系,对流云的平均降水率是层云的3倍左右,对流云降水对应近地面降水率和雨顶高度的大值区。

4) 台风螺旋雨带的降水柱与外围云系中的降水柱相比,具有数量多、密度大、高度高的特点。这是因为:一是台风外围云系离台风中心较远,对流云和层云的数量较少;二是台风螺旋雨带附近多对流发展,对流云密度大且云顶高度大于层云降水的雨顶高度($8 \sim 10 \text{ km}$)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郑丽娜,孙兴池.气旋类山东暴雨过程天气学特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(4):74-80.
- [3] 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.
- [4] 赵秀兰.近50年登陆我国热带气旋时空特征及对农业影响研究综述[J].海洋气象学报,2019,39(4):1-11.
- [5] 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.
- [6] 王海平,董林.2019年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2020,40(2):1-9.
- [7] 张培昌,王振会.大气微波遥感基础[M].北京:气象出版社,1995.
- [8] 周毓荃,赵姝慧.CloudSat卫星及其在天气和云观测分析中的应用[J].大气科学学报,2008,31(5):603-614.

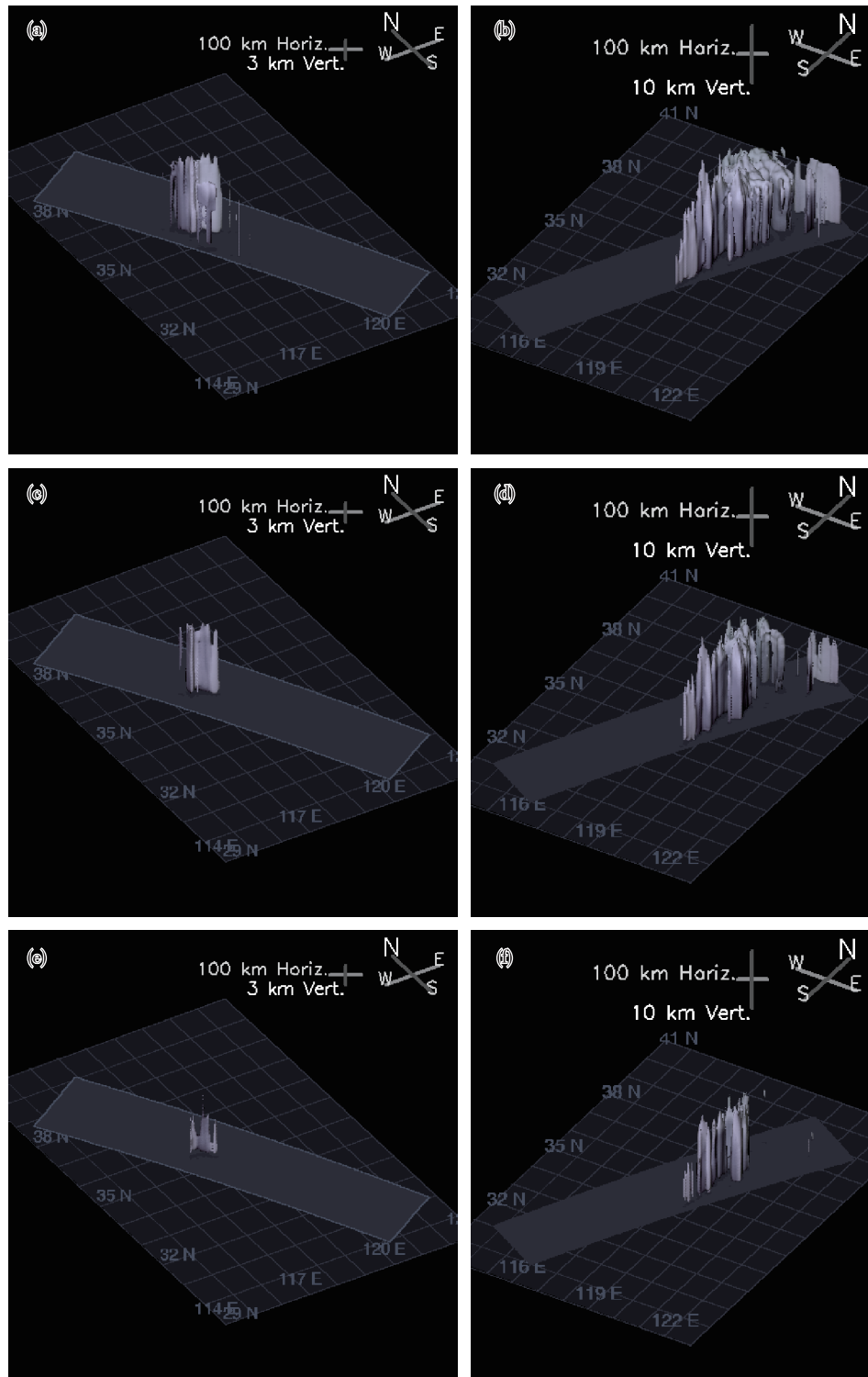


图 8 2018 年 8 月 18 日 06:46—06:49(a/c/e) 和 2018 年 8 月 19 日 20:55—20:58(b/d/f) 山东境内台风“温比亚”的三维降水率轮廓图(a/b.降水率阈值为 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; c/d.降水量阈值为 $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; e/f.降水量阈值为 $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig.8 Three-dimensional profile of precipitation rate of Typhoon RUMBIA in Shandong from 06:46 BST to 06:49 BST 18 (a/c/e) and from 20:55 BST to 20:58 BST 19 (b/d/f) August 2018 (a/b. threshold of precipitation rate is $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; c/d. threshold of precipitation rate is $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; e/f. threshold of precipitation rate is $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

[9] 傅云飞, 曹爱琴, 李天奕, 等. 星载测雨雷达探测的夏季亚洲对流与层云降水雨顶高度气候特征[J]. 气象学

报, 2012, 70(3): 436-451.
[10] LIU G S. Deriving snow cloud characteristics from

- CloudSat observations[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2008, 113(D8):D00A09.
- [11] VILLARINI G, KRAJEWSKI W F. Empirically-based modeling of spatial sampling uncertainties associated with rainfall measurements by rain gauges [J]. *Adv Water Resour*, 2008, 31(7):1015-1023.
- [12] USHIO T, HECKMAN S J, BOCCIPPIO D J, et al. A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D20):24089-24095.
- [13] 韩丁, 严卫, 叶晶, 等. 基于 CloudSat 卫星资料分析东太平洋台风的云、降水和热力结构特征 [J]. *大气科学*, 2013, 37(3):691-704.
- [14] SHORT D A, NAKAMURA K. TRMM radar observations of shallow precipitation over the tropical oceans [J]. *J Climate*, 2000, 13(23):4107-4124.
- [15] SHIGE S, TAKAYABU Y N, KIDA S, et al. Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data Part IV: Comparisons of lookup tables from two- and three-dimensional cloud-resolving model simulations [J]. *J Climate*, 2009, 22(20):5577-5594.
- [16] 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.
- [17] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al. The Global Precipitation Measurement Mission [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2014, 95(5):701-722.
- [18] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. *气象学报*, 2004, 62(5):541-549.
- [19] 傅云飞, 冯沙, 刘鹏, 等. 热带测雨卫星测雨雷达探测的亚洲夏季积雨云云砧 [J]. *气象学报*, 2010, 68(2):195-206.
- [20] ZHANG S J, WANG D H, QIN Z K, et al. Assessment of the GPM and TRMM precipitation products using the rain gauge network over Tibetan Plateau [J]. *J Meteor Res*, 2018, 32(2):324-336.
- [21] OLIVEIRA R, MAGGIONI V, VILA D, et al. Characteristics and diurnal cycle of GPM rainfall estimates over the central Amazon region [J]. *Remote Sens*, 2016, 8(7):544.
- [22] 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.
- [23] 张晁祺, 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.
- [24] 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.
- [25] 吴琼, 仰美霖, 窦芳丽. GPM 双频降水测量雷达对降雪的探测能力分析 [J]. *气象*, 2017, 43(3):348-353.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 严卫, 韩丁, 周小珂, 等. 利用 CloudSat 卫星资料分析热带气旋的结构特征 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(6):1809-1824.
- [29] 史兰红, 崔林丽, 赵兵科, 等. 台风眼壁及周围螺旋云带云属性垂直分布研究 [J]. *热带气象学报*, 2015, 31(1):51-62.
- [30] 郑怡, 杨晓霞, 孙晶. 台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析 [J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(1):106-115.
- [31] 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.