

吴琼, 仰美霖, 窦芳丽, 2017. GPM 双频降水测量雷达对降雪的探测能力分析[J]. 气象, 43(3): 348-353.

GPM 双频降水测量雷达对降雪的探测能力分析^{*}

吴 琼^{1,2,3} 仰美霖⁴ 窦芳丽³

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 国家卫星气象中心, 北京 100081

4 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

提 要: 以双频降水测量雷达为主载荷的 GPM 卫星于 2014 年 2 月发射升空。由于轨道倾角以及仪器通道的设置, 大大提升了对弱降水和降雪的探测能力。通过四次降雪个例, 分析比较了双频降水测量雷达的三种扫描模式(Ku, KaMS 和 KaHS)对降雪探测能力的差异。结果表明: DPR 相态产品和地面实际观测结果比较一致, 固态降雪温度 $< -0.5^{\circ}\text{C}$ 并且降雪发生时的风暴顶高度大多 $< 6\text{ km}$ 。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, 而 KaMS 和 KaHS 也具有特定的作用。此外, 为了保证衰减订正的精度, 和非降雪部分的衰减相比, 需要主要提高降雪衰减尤其是混合相态湿雪的衰减订正精度。

关键词: GPM, 双频降水测量雷达, 降雪探测, 粒子相态, 路径衰减

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.03.011

Study of GPM Dual-Frequency Radar in Detecting Snow

WU Qiong^{1,2,3} YANG Meilin⁴ DOU Fangli³

1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environmental Observation (LAGEO),

Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

4 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract: The Global Precipitation Measurement (GPM) mission core observatory was launched in February 2014, carrying the dual-frequency precipitation radar (DPR). The DPR consists of two radars with microwave frequencies of Ka and Ku bands. DPR is expected to extend its ability to capture weak rain and snow in higher latitudes. In order to evaluate the ability of DPR in snow detection, four cases are analyzed. As a result, particle phase products of DPR are consistency with the actual weather condition and the temperature of solid snow is lower than -0.5°C . What's more, the heights of most storm tops are lower than 6 km. By comparison, actual Ku-band radar detectability turns out to outperform the Ka band radar in identifying the existence of snow because of an obvious improvement of sensitivity. KaMS and KaHS are also useful. In order to improve snow retrieval, the attenuation correction of snow is very important, especially for wet snow.

Key words: Global Precipitation Measurement (GPM), dual-frequency precipitation radar (DPR), snow detection, particle phase, path attenuation

^{*} 国家自然科学基金项目(41475030, 61527805)和北京市自然科学基金(8172022)共同资助
2016 年 5 月 10 日收稿; 2016 年 8 月 3 日收修定稿
第一作者: 吴琼, 主要从事星载降水测量雷达方面的研究. Email: wuqiong@cma.gov.cn

引言

对降水的研究是大气科学的重要组成部分,由于降水在空间和时间上的变化性很大,因此,降水是最难测量的大气参数之一。为了获得高时空分辨率的降水观测数据,美国和日本联合提出了全球降水观测计划(Global Precipitation Measurement, GPM)(Furuhashi et al, 2002; Iguchi et al, 2002)。GPM 的基本设想是使用八颗搭载微波辐射计的卫星星座和一颗搭载一部双频雷达和一台微波辐射计的核心卫星提供 3 h 一幅的全球降水图。这些数据对改进天气和洪水预报、水资源管理以及研究和监测全球变暖与气候变化具有重要贡献。GPM 是热带降水测量卫星(Tropical Rain Measure Mission, TRMM)的后继任务(Kummerow et al, 1998),与 2014 年 2 月 27 日发射升空,降水的精确测量由安装在 GPM 核心星上的双频降水雷达(dual-frequency precipitation radar, DPR)获取。DPR 包括两部微波频点的雷达,分别是 13.6 GHz 的 Ku 波段降水雷达和 35.5 GHz 的 Ka 波段降水雷达(<http://gpm.nasa.gov>; GPM, 2013),由日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)和日本情报通信研究机构(National Institute of Information and Communication Technology, NICT)共同研制。DPR 在 TRMM Ku 波段 PR (Precipitation Radar)的基础上增加了 Ka 波段降水雷达,主要有三个原因:(1)来自于 Ka 波段的非瑞利散射效应有助于获取粒子谱分布(drop size dis-

tribution, DSD)的信息,从而减少降水反演中由于 Z-R 关系的不确定性所带来的降水估计误差(骆三等, 2011; 成璐等, 2014; 廖荣伟等, 2015); (2) Ka 波段有利于准确估计降水系统中相态转换的高度,这个信息不仅可以提高 DPR 的降水反演精度,还可以改善被动微波辐射计的降水反演精度; (3)通过提高 Ka 波段的灵敏度,有望探测到 65°S~65°N 大部分的降雪(Hou et al, 2008; 2014; GPM ATBD, 2015)。

降水根据其不同的物理特征可分为液态降水和固态降水,降雪属于固态降水的一种。降雪对城市交通和农业生产等都有较大影响,强降雪更是影响我国的主要气象灾害之一。目前,对降雪的常规观测仍然以地面测量为主,探测仪器包括雪量计和地基雷达等,能够测量的降雪参数有积雪覆盖、雪水当量和雪深等。这些参数描述的基本都是雪下落后的情况,对雪在空间垂直结构的观测则无能为力。GPM 的成功发射大大提高了现有的降雪探测水平,将二维观测提升到了三维。

本文主要基于 GPM DPR 雷达对降雪的 4 次实际观测数据,重点探讨了 DPR 对降雪的探测能力,为后续 DPR 在降雪监测中的应用做准备。

1 研究数据

根据实际天气过程和 DPR 的轨道覆盖情况,选择了 2015 年在我国发生的四次降雪事件作为研究对象,相应的轨道号、日期、主要覆盖区域以及选择的扫描行号范围如表 1 所示。

使用的数据以 GPM V03 版本的标准产品为

表 1 降雪个例基本情况
Table 1 Basic information of snow case

轨道号	5198	5223	5592	9840
日期/年-月-日	2015-1-27	2015-1-29	2015-2-22	2015-11-22
主要覆盖区域	江苏北部	安徽中部	黑龙江西北部、吉林西部	山西北部、河北西部
扫描行号范围	5111~5210	2741~2840	3151~3250	4881~4980

主,包括 2A. GPM. Ku. V5, 2A. GPM. Ka. V5, 2A. GPM. DPR. V5 和 2A-ENV. GPM. DPR. V5 (GPM, 2015)。

2A. GPM. Ku 记录的是 Ku 波段雷达的测量结果,一条扫描行包含 49 个角库。2A. GPM. Ka 记录的是 Ka 波段雷达的测量结果,也有 49 个角库,但被分成了两种扫描模式,一种是波束匹配模式 Ka-MS(matched scan),该模式包含 25 个角库,正好和

Ku 波段雷达第 13 至第 37 个角库的波束相匹配,另外一种是高灵敏度模式 KaHS(high-sensitivity),该模式共有 24 个角库,在该模式下, Ka 波段雷达的灵敏度最高。2A. GPM. DPR 包括了所有 Ku 和 Ka 波段雷达的测量结果,和 2A. GPM. Ku 和 2A. GPM. Ka 的不同之处在于,前者使用了双频联合的反演算法,后者仅使用了单频的反演算法。2A-ENV. GPM. DPR 是环境参数文件,来自于日本

气象局的分析场数据 (GPM ATBD, 2015; Kobayashi et al, 2015), 主要包括气压、温度和风速等。需要说明的是为了尽可能地保证几种扫描模式在时空上的一致性, 文中所有涉及到 Ku 扫描模式时的数据, 都仅指为与 KaMS 匹配的那部分。

2 结果与分析

2.1 相态

DPR 的相态产品在 GPM 的降水反演中非常重要, 因为它有利于获得准确的 DSD, 从而提高主动雷达和被动微波辐射计的降水反演精度 (GPM ATBD, 2015)。在 2A 的相态产品中, 一共有三类, 分别是固态、液态和混合态。根据相态能够区分降水的形态, 利用实际地表所在距离库的相态产品, 对四个个例中的降水形态进行了分类, 其中, 将固态和混合态归类为降雪, 液态归类于降雨 (统计结果见表 2)。从结果上来看, 除了 5198 的轨道上存在一些降雨以外, 其他都是降雪, 表明 GPM DPR 确实具有降雪探测的能力。图 1 是用 GPM 官方发布的 Orbit viewer THOR 软件 (<http://pps.gsfc.nasa.gov>) 绘制的 5223 轨道上近地面层的粒子相态 (phaseNearSurface) 分布图和近地面层的降雪率 (precipRateNearSurface) 分布图。相态分布图中的紫色区域显示的是降雪的范围, 对应 color bar 的数值 < 100 (固态 < 100 , 液态 > 200 , 混合态介于两者之间), 表明这是一次典型的降雪事件。降雪率的分布图显示出大部分区域的瞬时降雪率不足 $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 但在安徽、河南以及江苏的部分区域瞬时降雪率超过 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。天气过程记录的资料表明在 2015 年 1 月 27—30 日, 我国中东部地区出现了入冬以来最大范围的雨雪天气, 其中, 陕西中部和北部、山西南部、河南中部和北部、山东西南部、安徽北部、江苏北部等地降雪 $4 \sim 10 \text{ mm}$, 河南中部部分地区 $11 \sim 18 \text{ mm}$ 。由此可见, GPM DPR 的观测结果和实际的天气状况是比较吻合的。

表 2 降雪个例相态
Table 2 Phase of snow case

轨道号	5198	5223	5592	9840
粒子相态	固态和液态	固态	固态和混合态	固态
降水形态	雨、雪	雪	雪	雪

粒子相态和环境温度之间存在一定的关系, 在

天气预报中, 一般将雨雪的温度分界线设定为 0°C , 0°C 以上预报为降雨, 0°C 以下预报为降雪。但是, 实际的预报结果表明, 如果单纯以 0°C 作为标准, 在雨雪的判断上可能会存在偏差, 这也是目前降雪预报中面临的一个困难。结合 2A-ENV. GPM. DPR. V5 中的空气温度廓线和 2A. GPM. DPR. V5 中的相态产品, 对不同相态和温度之间的关系进行了统计。结果表明在上述 4 个个例中, 固态所对应的最高气温依次为 -0.5001 , -1.468 , -0.5003 和 -0.5015°C 。混合态的温度略高于固态, 其中最低值略大于 -0.5°C , 最高值大于 0°C 。液态的温度范围和混合态类似, 也在 0°C 附近波动。由此可见, 除了固态的温度具有低于 -0.5°C 的规律以外, 混合态和液态仅通过温度很难区分, 如果单纯以 0°C 作为雨雪预报的界限, 很可能把降雨误判为降雪。因此, 如何合理使用 DPR 的相态产品为降雪预报服务具有重要的研究价值。

2.2 Ku 和 Ka 波段雷达的降雪探测能力分析

对于同一个降雪事件而言, DPR 两部雷达的探测结果是有区别的, 这主要和雷达系统本身的灵敏度有关。灵敏度越高, 探测能力就越强。DPR 在指标设计的时候, 要求 Ku, KaMS 以及 KaHS 三种扫描模式下最小可检测雷达反射率因子分别达到 18, 18 和 12 dBz。单纯从指标设计上来看, KaHS 的灵敏度最高, 因此对降雪以及弱降水的探测能力最强。但是, 由于仪器硬件制造水平的提高, 实际最小可检测的雷达反射率因子可能优于设计指标, 因此不同波段雷达的降雪探测能力有必要结合实际的探测结果来进行综合分析。

通过使用 2A. GPM. Ku. V5 和 2A. GPM. Ka. V5 中的降雨判断产品 flagPrecip, 对三种扫描模式下的降雪检测结果进行了统计, 统计结果见表 3。从表 3 可以看出, Ku 识别出降雪的个数最多, 其次是 KaHS, KaMS 最差。KaMS 识别降雪的个数要远远少于 Ku, 其中, 5592 轨道上 Ka 波段识别出降雪的个数最多, 但是比例还达不到 Ku 波段的 20%, 5198 和 9840 轨道上的比例少于 10%, 甚至在 5223 轨道上, KaMS 居然没有判断出任何的降雪。因此, 从 flagPrecip 的产品来看, 三种扫描模式对降雪探测能力强弱的排序依次为 Ku, KaHS 和 KaMS。

为了进一步比较三种扫描模式下降雪探测能力的差异, 对不同的风暴顶高度进行了分析。风暴顶高度指的是降水发生时的最高垂直高度, 这和降水

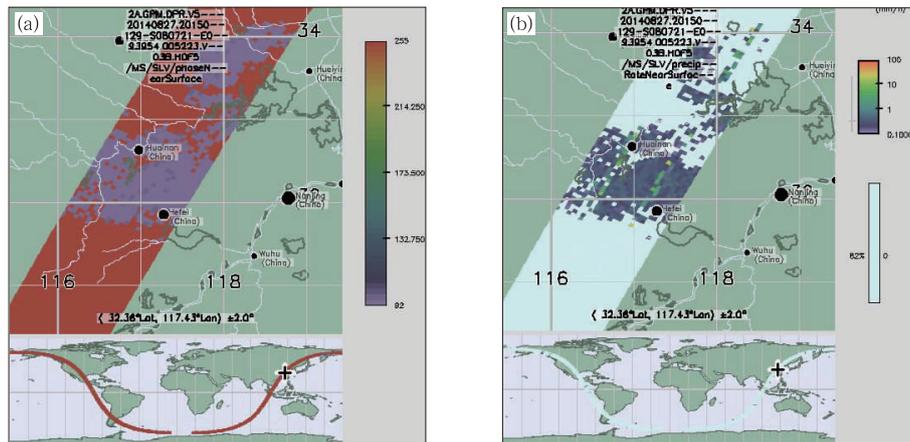


图 1 DPR 观测到的近地面层的相态分布图(a)和近地面层的降雨率分布图(b)
(图中的文字表示相应的产品路径)

Fig. 1 Near surface phase (a) and near surface rain rate (b) observed by DPR
(The data path is 2A. GPM. DPR. V5-20140827. 20150129-S080721-E093954. 005223. V03B. HDF5/MS/SLV/phaseNearSurface and 2A. GPM. DPR. V5-20140827. 20150129-S080721-E093954. 005223. V03B. HDF5/MS/SLV/precipRateNearSurface)

表 3 Ku 和 Ka 波段降雪检测的结果(单位: 个)
Table 3 Identification results of snow observed by Ku and Ka band radar

轨道号	KaMS	KaHS	Ku
5198	18	251	465
5223	0	76	849
5592	87	215	555
9840	10	143	474

系统的动力结构密切相关。比如台风的风暴顶高度一般都比较高,平均能达到 15~20 km,而降雪的风暴顶高度则要低的多(图 2),大部分降雪的风暴顶高度都低于 6 km,最低的甚至小于 1.5 km。图 2 是使用 2A. GPM. Ku. V5 和 2A. GPM. Ka. V5 中的 heightStormTop(HST)产品得到的风暴顶高度的频率分布曲线。其中, KaMS 的曲线和 Ku 以及 KaHS 的曲线有明显的不同,在 KaMS 扫描模式下,观测到比较多的是 3 km 以下的低风暴顶,而对 3 km 以上的风暴顶的探测则不如 Ku 和 KaHS, KaMS 探测风暴顶的最高高度约在 5 km,而 Ku 和 KaHS 对 5 km 以上的风暴顶还具有一定的探测能力。此外, Ku 和 KaHS 两者的曲线比较相似,不同之处在于 Ku 观测到低风暴顶的比例高于 KaHS,而观测到高风暴顶的比例又小于 KaHS。

在判断是否有降雨以及确定风暴顶高度时,都需要用到最小可检测的雷达反射率因子。为了测试不同扫描模式下最小可检测雷达反射率因子的差异,比较了风暴顶所在距离库的雷达反射率因子,使

用的产品是 ZFactorMeasured,相应的频率分布曲线如图 3 所示。和图 2 的结果类似, KaHS 和 Ku 的曲线比较接近, KaMS 则和它们存在一些区别,主要体现在反射率因子分布范围的不同。在三种扫描模式下, Ku, KaMS 以及 KaHS 雷达反射率因子的最小值分别为 12.65, 17.86 和 12.07 dBz。由此说明, KaMS 和 KaHS 最小可检测的雷达反射率因子基本上符合设计指标的要求,而 Ku 波段雷达最小可检测的雷达反射率因子优于发射前测试的 14.5 dBz(Toyoshima et al, 2015),基本和 KaHS 高灵敏度模式下的最小可检测的雷达反射率因子相当,表明 Ku 波段雷达的探测能力得到了大幅的提升。另外,从数值上来看, KaHS 最小可检测的雷达反射率因子略优于 Ku,探测能力也应该比 Ku 强。但是实际情况并非如此,一个可能的原因是非瑞利散射的影响。因为对 Ku 波段而言,除了强降水以外,瑞利近似基本上都是有效的,但对于 Ka 波段而言,瑞利散射在很大的一个降雨率范围内都不再有效(L'Ecuyer and Stephens, 2002)。非瑞利散射的影响部分抵消了 Ka 波段原有的敏感性优势,使得实际 Ka 波段的探测能力不像预想的那样超出 Ku 波段。

总的来说, Ku 波段对降雪探测的综合能力比较强, KaMS 的主要作用在于通过和 Ku 波段的联合观测获得较高精度的 DSD 信息,从而提高降水反演的精度,而 KaHS 由于 Ku 波段灵敏度的提高,没

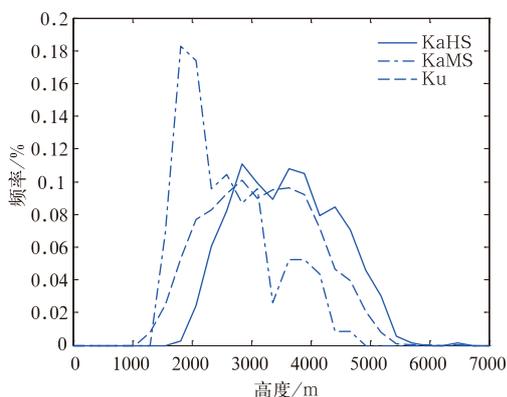


图 2 三种扫描下风暴顶高度的频率分布图
Fig. 2 The normalized histogram of HST
in three scan models

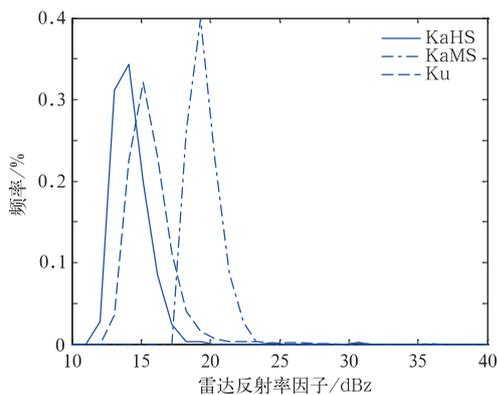


图 3 三种扫描下风暴顶所在距离库的
雷达反射率因子频率分布图

Fig. 3 The normalized histogram of radar
reflectivity factor in three scan models

有凸显出预计的优势,但是它在对高风暴顶的探测上还是略微优于 Ku 波段。

2.3 衰减

降雪回波和降雨回波一样,在传播过程中会有一些程度的衰减,衰减主要有两部分组成,一是非降雪部分的衰减,包括云中液态水、云中冰水、水汽和氧气所造成的衰减,还有一种是降雪本身造成的衰减。了解不同类型衰减量的大小可以为后续开展衰减订正起到一定的帮助。

图 4a 和 4b 分别是轨道号为 5592 的降雪个例中 KaMS 和 Ku 扫描模式下的路径积分衰减分布图,使用的产品包括 2A. GPM. Ku. V5 以及 2A. GPM. Ka. V5 中的 piaNP 和 piaFinal,样本数为两者共同探测到降雪的部分,共 85 个。总的来讲,

因为雷达频点的差异,Ka 波段的衰减要明显大于 Ku 波段。从图中可以看出,非降雪部分的衰减变化大体上比较平稳,其中,水汽衰减最稳定,不但图 4a 和 4b 中的水汽衰减量基本是个定值,就文中分析的四个个例而言(图略),Ka 波段水汽衰减的变化范围仅在 0.23~0.26 dB,变化幅度小于 0.03 dB。Ku 波段水汽衰减变化范围仅在 0.08~0.09 dB,变化幅度小于 0.01 dB。和水汽衰减相比,云中冰水的衰减略有波动,但是波动幅度不大,并且受温、压、湿等环境参数的影响,有的时候略大于水汽衰减,有的时候略小于水汽衰减。四个个例的统计结果显示 Ka 波段冰水衰减的最大值小于 0.35 dB,Ku 波段冰水衰减的最大值小于 0.09 dB。云中液态水的衰减量在四个非降雪部分的衰减中最大,属于最主要的衰减,氧气衰减虽然很小,但是仍有一定的波动幅度,并和云中液态水的变化趋势一致。由此可见,在非降雪部分的衰减订正过程中,因为水汽衰减和云中冰水含量的衰减比较稳定,订正相对容易,云水含量和氧气衰减受环境参数影响有所波动,可以结合分析场提供的温、压、湿等环境参数信息进行合理的订正。和非降雪的衰减相比,降雪的衰减和降雪的垂直廓线有关,波动幅度比较大。因此,衰减订正的难度也最大。因为瞬时降雪率一般都不是很大,所以降雪衰减也比较小。在 5592 的例子中,Ka 波段

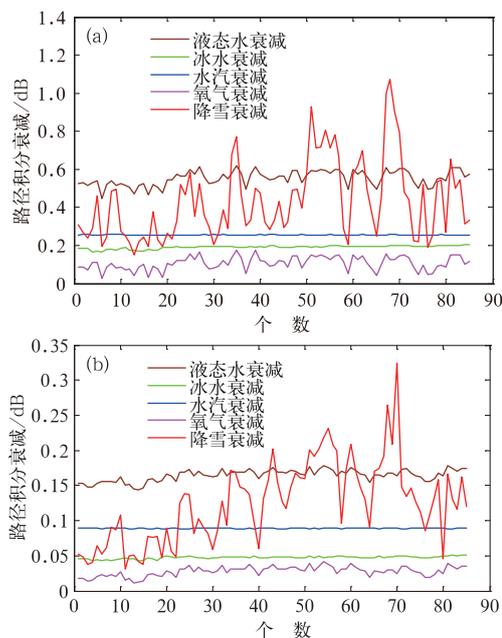


图 4 KaMS(a)和 Ku(b)波段的路径积分衰减
Fig. 4 Path-integrated attenuation of
KaMS (a) and Ku band (b)

的最大衰减略大于 1 dB, Ku 波段的最大衰减只略大于 0.3 dB。这和降雨的衰减相比要小很多。

在降雪的衰减订正过程中,有两个因素需要重点考虑,一是降雪部分的衰减,因为它的波动幅度比较大,过量订正或者订正不足,都会直接影响反演的精度,另外一个相态对降雪衰减产生的影响,因为混合态湿雪的衰减要比固态干雪的衰减大得多,因此对湿雪的订正难度更大。只有在优先保证衰减订正较为准确的前提下,才能获得高精度的降雪反演产品。

3 结论

(1) 降雪属于固态降水的一种,根据 DPR 的相态产品可以对雨雪进行区分。4 次降雪个例的结果表明,DPR 的相态产品和实际的天气过程比较吻合,表明 GPM DPR 确实具有降雪探测的能力。粒子相态和温度有关,但是,除了固态的温度具有低于 -0.5°C 的规律以外,混合态和液态从温度的角度上很难区分,如果单纯以 0°C 作为雨雪预报的界限,很可能把降雨误判为降雪。因此,如何合理使用 DPR 的相态产品为降雪预报服务可以作为未来的一个研究方向。

(2) 在 Ku, KaMS 以及 KaHS 三种扫描模式下, Ku 能够识别出降雪的个数最多,其次是 KaHS,最后是 KaMS。风暴顶高度的频率分布图表明, KaMS 扫描模式观测到比较多的是 3 km 以下的低风暴顶,而对 3 km 以上的风暴顶的探测则不如 Ku 和 KaHS。另外, Ku 和 KaHS 两者的曲线比较接近,不同之处在于 Ku 观测到低风暴顶的比例高于 KaHS,而观测到高风暴顶的比例又小于 KaHS。通过比较风暴顶的雷达反射率因子后发现, Ku, KaMS 以及 KaHS 雷达反射率因子的最小值分别为 12.65, 17.86 和 12.07 dBz。表明 Ku 波段雷达最小可检测的雷达反射率因子基本和 KaHS 高灵敏度模式下最小可检测的雷达反射率因子相当。因此, Ku 波段灵敏度的大幅提升加上非瑞利散射可能造成的影响,使得 Ku 波段对降雪探测的综合能力最强。

(3) 对比云中液态水、云中冰水、水汽、氧气以及降雪衰减后发现,降雪衰减的波动幅度比较大,非降雪部分的衰减变化则大体上比较平稳。因此,在衰减订正过程中,需要重点关注降雪部分的衰减,尤

其是混合态湿雪的合理订正。

综上所述, GPM DPR 对降雪具有较好的探测能力并且 Ku 波段在降雪探测上的综合能力较强,但是 KaMS 和 KaHS 也具有特定的优点。在实际资料的使用中,可以结合需求选择最合理的数据。对 GPM 观测资料的实际应用将在后续的研究中进一步展开。

参考文献

- 成璐, 沈润平, 师春香, 等, 2014. CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估计产品的评估检验[J]. 气象, 40(11):1372-1379.
- 廖荣伟, 张冬斌, 沈艳, 2015. 6 种卫星降水产品在中国区域的精度特征评估[J]. 气象, 41(8):970-979.
- 骆三, 苗峻峰, 牛涛, 等, 2011. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象, 37(9):1081-1090.
- Hou A Y, Skofronick-Jackson G, Kummerow C D, et al, 2008. Global precipitation measurement: advances in measurement, estimation and prediction[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 131-169.
- Hou A Y, R K Kakar, S Neeck, et al, 2014. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(5):701-722.
- Furuhama Y, Oki R, Iguchi T, et al, 2002. Precipitation observation from space in the next generation: the global precipitation mission[R]. URSI-F Open Symposium, Garmisch-Partenkirchen, February 12-15.
- GPM ATBD, 2015. Global Precipitation Measurement algorithm theoretical basis documents[Z].
- GPM, 2013. Precipitation measurement missions. Global Precipitation Measurement Program [EB/OL]. NASA. <http://gpm.nasa.gov>.
- GPM, 2015. Precipitation Processing System Global Precipitation Measurement[Z].
- Iguchi T, Oki R, Smith E, et al, 2002. Global Precipitation Measurement program and the development of dual frequency precipitation radar[J]. J Commu Res Lab, 49(2):37-45.
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al, 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics[J]. J Meteor Soc Japan, 93(1):5-48.
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al, 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package[J]. J Atmos Ocean Tech, 15(3):809-816.
- L'Ecuyer T S, Stephens G L, 2002. An estimation-based precipitation retrieval algorithm for attenuating radars[J]. J Appl Meteor, 41(3):272-285.
- Toyoshima K, Masunaga H, Furuzawa F A, 2015. Early evaluation of Ku- and Ka-band sensitivities for the global precipitation measurement (GPM) Dual-Frequency Precipitation Radar (DPR)[J]. SOLA, 11:14-17.