

王智敏,汪会,冯婉悦,等,2024. GPM 卫星探测新疆区域降雪敏感性及其云结构特征研究[J]. 气象,50(6):686-700. Wang Z M, Wang H, Feng W Y, et al, 2024. Sensitivity of GPM satellite detection of snowfall and analysis of cloud structure characteristics in Xinjiang Region[J]. Meteor Mon, 50(6):686-700 (in Chinese).

GPM 卫星探测新疆区域降雪敏感性及其云结构特征研究^{*}

王智敏^{1,2,3,4} 汪 会⁵ 冯婉悦⁶ 李 斌³ 李圆圆³ 郑博华³

1 中国气象局高影响天气重点开放实验室,长沙 410000

2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002

3 新疆空中云水资源开发利用创新研究院,乌鲁木齐 830002

4 新疆乌兰乌苏生态与农业气象野外科学观测研究站,乌鲁木齐 830002

5 中国气象局人工影响天气中心,北京 100081

6 新疆维吾尔自治区气象技术装备保障中心,乌鲁木齐 830002

提 要:目前人们对新疆干旱区降雪云结构特征的认知仍有限。利用 2014—2021 年 GPM(global precipitation measurement)卫星搭载的测雨雷达 DPR(dual-frequency precipitation radar)和微波成像仪 GMI(GPM microwave imager)观测资料,对比了 DPR 不同产品对新疆区域降雪的敏感性及其三类降雪云(深厚、浅薄和近地表)的宏微观特性差异,利用等频率高度统计方法,分析了四次新疆不同下垫面降雪云结构特征。结果表明:浅薄降雪云出现频率超过 60%,而深厚降雪云对降雪量的贡献最大,三类云的液水路径(LWP)和冰水路径(IWP)集中在 $80\sim 450\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $100\sim 380\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,回波顶高、LWP、IWP 与近地表降水率总体上呈正相关;四次典型降雪系统分别发生在阿勒泰山区(A 个例)、伊犁河谷(B 个例)、古尔班通古特沙漠腹地(C 个例)及昆仑山北麓戈壁地区(D 个例),其中 A、B 个例主要为冰云,C、D 个例多为冰水混合云,在 GMI 中 166 GHz 高频通道对降雪的敏感性较好,亮温分布在 $200\sim 275\text{ K}$;雷达反射率因子(Z)集中在 $16\sim 25\text{ dBz}$,对应高度为 $0.75\sim 4.65\text{ km}$,A、B 和 D 个例云团存在“左倾”结构,Z 集中在云体中上部,属于发展阶段,C 个例的 Z 主要位于云体下部,云团处于成熟阶段。质量加权平均直径(D_m)和粒子数浓度(dBN_w)在 $1.00\sim 1.22\text{ mm}$ 和 $33\sim 35$ 产生的降雪量较大,降雪强度不仅与冰晶和过冷水粒子大小有关,还受到粒子数浓度的影响。研究成果对提升新疆地区降雪监测水平,深入认识该地区降雪形成机制及评估复杂地形条件下人工增雨(雪)潜力等具有积极意义。

关键词:测雨雷达(DPR),微波成像仪(GMI),降雪系统结构,粒子谱分布

中图分类号:P482

文献标志码:A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.033001

Sensitivity of GPM Satellite Detection of Snowfall and Analysis of Cloud Structure Characteristics in Xinjiang Region

WANG Zhimin^{1,2,3,4} WANG Hui⁵ FENG Wanyue⁶ LI Bin³ LI Yuanyuan³ ZHENG Bohua³

1 Open Project of the High Impact Weather Key Laboratory of CMA, Changsha 410000

2 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

3 Xinjiang Institute of Air Cloud Water Resources Development and Utilization Innovation, Urumqi 830002

4 Xinjiang Wulanwusu Field Scientific Experiment Observation Research Station for Ecology and Agrometeorology, Urumqi 830002

^{*} 中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2023011)、中国气象局高影响天气重点开放实验室开放课题、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01B182)、中国气象科学研究院科技发展基金项目(2021KJ016)、新疆气象局科技创新发展基金项目(MS202412)和中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室创新基金项目(2023CPML-B07)共同资助

2023 年 6 月 13 日收稿; 2024 年 2 月 29 日收修定稿

第一作者:王智敏,主要从事雷达技术研究、大气探测相关工作. E-mail:569830205@qq.com

通讯作者:汪会,主要从事大气遥感、人工影响天气相关工作. E-mail:hwang@cma.gov.cn

5 CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

6 Meteorological and Technical Equipment Support Center of Xinjiang, Urumqi 830002

Abstract: Using the detection results of Global Precipitation Measurement (GPM) dual-frequency precipitation radar (DPR) and microwave imager (GMI) from 2014 to 2021, the differences in observing snowfall processes between different precipitation products of DPR are compared. Moreover, the macro and micro characteristics of three types of snowfall systems (deep, shallow, and near surface) are clarified, and the structural characteristics of four typical snowfall clouds in Xinjiang are analyzed by means of equal frequency height statistical method. The results show that the probability of shallow snowfall clouds exceeds 60%, while deep snowfall clouds contribute the most to snowfall. The liquid water path (LWP) and ice water path (IWP) of the three types of clouds are mostly distributed in $80-450 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and $100-380 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, with a positive correlation between the echo top height, LWP, and IWP and the near-surface snowfall rate as a whole. The four selected cases are located in the Ale Mount Taishan area (A), the Ili River Valley (B), the hinterland of the Gurban Tunggut Desert (C), and the northern foot of the Kunlun Mountains in southern Xinjiang (D). The snow system observation results of GMI's 166 GHz high-frequency channel are more detailed, and the brightness temperature is concentrated in the range of 200–275 K. Cases A and B are mainly ice clouds, and cases C and D are mostly ice water mixed clouds, and the snowfall intensity and area of the former are greater than the latter. The radar reflectivity factor (Z) of the cloud profile is concentrated in 16–25 dBz and 0.75–4.65 km height. Cloud clusters in cases A, B, and D exhibit a “left leaning” structure, with the highest echo intensity in the upper and middle parts of the cloud, belonging to a typical development stage of cloud cluster. The echo intensity of case C is mainly located in the lower part of the cloud, and the cloud cluster is in the mature stage. D_m (mass weighted average diameter) and dBN_w (particle number concentration) produce more snowfall between 1.00–1.22 mm and 33–35, respectively. The snowfall intensity is not only related to the particle size of ice crystals or supercooled water, but also affected by the particle number concentration. This study is of significance for improving the level of snow monitoring in Xinjiang, understanding the formation mechanism of snowfall and evaluating the potential and effectiveness of artificial snow seeding and cloud seeding in different regions of northern and southern Xinjiang.

Key words: DPR (dual-frequency precipitation radar), GMI (GPM microwave imager), snowfall system structure, particle size distribution

引 言

降雪,又称固态降水,是全球特别是中高纬度地区水循环中的关键环节。尽管全球降雪总量只占总降水量的5%,但对中高纬度地区而言,降雪可达当地总降水的50%以上(Levizzani et al, 2011; Hou et al, 2014; Field and Heymsfield, 2015; Casella et al, 2017; 李慧等, 2021)。针对降雪系统的研究对于预测地面积雪、冰川水储量、评估全球降水和水文循环等具有重要意义。传统观测降雪系统的方法包括地面测雪仪、地基测雨雷达、空基飞机穿云观测以

及天基被动微波遥感等(Kneifel et al, 2010; Xie et al, 2012; 杜佳等, 2019; 魏玮等, 2019; 封秋娟等, 2021; 马新成等, 2021)。近十几年来卫星主动遥感技术的快速发展,为测量全球降雪系统创造了新机遇。

GPM(Global Precipitation Measurement)卫星是新一代全球降水探测卫星,主要目标是提供高空间分辨率的降水观测(Hou et al, 2014; Skofronick-Jackson et al, 2017; 沈程锋和李国平, 2022)。GPM核心观测平台搭载了全球首部星载双频降水雷达(DPR)和多通道微波成像仪(GMI)。DPR在热带降雨测量卫星(TRMM)搭载的单频

(Ku 波段)雷达的基础上,新增了 Ka 波段,与 Ku 波段相比,Ka 波段的波长更短,有助于提高对弱降雨和降雪的探测能力(Hamada and Takayabu,2016),同时双频测雨雷达可以获得精细的云微物理信息(肖柳斯等,2019;赵震,2019;俞琳飞等,2020;魏栋等,2021;施丽娟等,2022)。GPM/DPR 提供了全球范围内从 65°N 至 65°S 的三维降水观测,覆盖了地球的中高纬度地区,探测降雪是 GPM 卫星的一个重要目标。

目前,中外学者利用 GPM 卫星针对降雪系统进行了广泛的研究,如 Le and Chandrasekar(2019)通过对奥林匹克山地区降雪个例进行统计分析,发现在 DPR 与地面测雨雷达的重叠区域内匹配率为 87.8%。von Lerber et al(2018)和 Rysman et al(2018)利用二维雨滴谱仪等验证了 DPR 观测降雪系统的有效性为 84%~90%。Chase et al(2020)统计发现 DPR 与 X 波段雷达所探测的降雪系统一致性较好。Tanelli et al(2008)和 Tang et al(2017)发现 GPM/DPR 观测山区降雪系统比 CloudSat/CPR (cloud profile radar)更有效,这可能是因为 DPR 比 CPR 观测位置更低,因此可以显示出更大纬度的降雪分布。吴琼等(2017)研究发现 DPR 相态产品和地基观测结果比较一致且降雪系统回波顶高主要集中在 6 km 以下。一些学者利用不同类型的微波成像仪对降雪系统进行了观测,对比发现 150 GHz 和 183 GHz 的高频微波通道观测降雪云有效性较好(Skofronick et al,2015;Noh et al,2006)。You et al(2017)研究发现 GMI 中的 166 GHz 和 183 GHz 高频通道对降雪探测更为敏感。目前国内利用 DPR 和 GMI 观测资料进行降雪系统研究的成果还较少,其探测不同强度、不同发展阶段和不同下垫面的降雪系统能力如何,DPR 双频雷达在准确反演降雪云团微物理参量等方面仍需要更深入的了解。

新疆地形地貌复杂、高山环绕、绿洲与荒漠共存且相互作用,形成了独特的冰川-绿洲-荒漠生态气候系统格局,冬春季节降雪天气频繁发生,是我国降雪系统最丰富的地区之一(张俊兰等,2021)。新疆每年冬春季节在全区开展人工增雨(雪)作业,科学开发利用空中云水资源,增加新疆水资源供给。目前利用主动遥感降水卫星研究新疆地区降雪系统三维结构较少见,且多数研究主要利用地基雷达开展降雪系统分析,受到观测站点覆盖范围限制,对沙漠腹地和山区复杂地形中出现的降雪系统缺乏有效探

测。GPM 卫星提高了现有的降雪探测水平,将二维观测提升到了三维,这为研究不同下垫面地区及不同类型的降雪系统结构提供了支撑。本文对新疆典型区域不同降雪系统的宏微观参量的水平分布和垂直结构特征做了统计分析,为 GPM/DPR 降水产品在新疆降雪系统的准确应用,填补南疆地区降雪云垂直结构特征的研究空白,构建天山南北不同地区人工增雨(雪)作业指标体系提供科技支撑,对助力新疆绿洲经济社会的高质量发展具有重要的应用价值和现实意义。

1 数据和方法

1.1 数据来源

GPM 卫星搭载的 DPR 作为全球首部星载双频测雨雷达,由 Ku(13.6 GHz)波段和 Ka(35.5 GHz)波段雷达组成,Ku_PR(precipitation radar)的扫描方式为 normal scan(NS),观测幅宽约 245 km,垂直分辨率为 250 m。Ka_PR 具有两种观测模式:matched scan(MS)和 high sensitivity scan(HS),观测幅宽约 125 km,Ka_MS 垂直分辨率与 Ku 相同(即 250 m),而 Ka_HS 垂直分辨率为 500 m。对于所有模式光束宽度约为 0.7°,轨道高度为 407 km,Ku_PR 和 Ka_PR 的地面水平分辨率约为 5.2 km(表 1)。DPR 的降水反演算法包含单频和双频反演算法。GPM/DPR 持续稳定运行多年,测量数据经过与地基测雨雷达、雨量计和二维雨滴谱仪等进行了严格的内外定标和交叉验证,均一性好,可靠性高(Kotsuki et al,2014;Chandrasekar and Le,2015;Le and Chandrasekar,2019)。其中 GPM/DPR 降水产品的回波强度数据均进行了衰减校正,文中剔除了降水产品中出现的奇异值。GMI 具有 13 个频段,能够观测所有云层内的降水,包括微量降雨以及降雪(表 1),其中 166 V&H 和 183±8 GHz 高频通道,能较好地识别出降雪云团的尺度范围,由于 GMI 的幅宽较大,达到了 885 km,探测出的云团范围较 DPR 观测范围(幅宽 245 km)更大,有利于我们对降雪系统宏观水平结构进行更深入的分析。

1.2 研究方法

自 GPM 卫星发射以来,积累了丰富的降水观测资料,在文中收集了 2014—2021 年发生在新疆不

表 1 GPM 仪器参数信息
Table 1 GPM equipment and track parameter information

参数	DPR		GMI
	Ku_PR	Ka_PR	
频率	13.6 GHz	35.5 GHz	10.65 V&H、18.7 V&H、23 V、37 V&H、89 V&H、166 V&H、183±3 GHz、183±8 GHz(13 个通道)
足迹尺寸	5.05~5.60 km		6~26 km
灵敏度	12~13 dBz	12~13 dBz(HS) 17~18 dBz(MS)	0.3~0.8 K
扫描模式	十字轨迹		圆锥形
测距间隔	250 m	250 m(MS) 500 m(HS)	—
幅宽	245 km	125 km	885 km

同地区的降雪系统作为研究对象,通过与 GPM 卫星过境时间进行匹配,筛选出了发生在天山和阿勒泰地区、古尔班通古特沙漠和昆仑山北麓戈壁等地区 70 个降雪系统。文中主要基于 GPM/DPR 双频测雨雷达提供的已衰减订正的雷达反射率因子(Z)、近地表降水率(R)、回波顶高(STH)、质量加权平均直径(D_m)和粒子数浓度(dBZ_w)等资料。首先文中详细对比了典型个例 DPR 单双频反演的不同降水产品在观测降雪系统中的敏感性和差异性特征;然后依据 Jeoung et al(2020)利用星-地多源观测数据分析提出的降雪系统分类方法,将降雪云分为三种类型:深厚、浅薄和近地表降雪云,其中深厚降雪云是指 STH 超过 4 km 的云,大多是由冷锋系统的大幅抬升所造成的,多位于锋面区和低压中心附近;将浅薄降雪云定义为 STH 在 2~4 km 的云,这类降雪云与锋面通过后不稳定气团等有关;将 STH 低于 2 km 的云定义为近地表降雪系统;最后针对三类降雪系统的 Z 、 R 、STH、 D_m 和 dBZ_w 等参量的水平分布、垂直结构及微物理特性进行了统计分析和个例研究。

GPM 中的 Ku_PR 的 Ku_NS(normal scan)扫描宽度为 245 km,每条扫描线上有 49 个像素。而 Ka_PR 的扫描宽度为 125 km,分两种模式进行扫描:在 Ka_PR 和 Ku_PR 重叠扫描的地区(Ku_PR 的第 13~37 像素),Ka_PR 同步 Ku_PR 波束进行匹配扫描模式为 Ka_MS,扫描宽度为 125 km;当 Ku_PR 观测两侧的扫描区域时,Ka_PR 通过两倍宽度的发射脉冲对匹配扫描的间隔区域进行高灵敏度扫描模式 Ka_HS(Ku_PR 的第 1~12、第 38~49 像素),扫描宽度也是 125 km。GPM 根据不同的扫描方式和单双频反演算法,提供了六种不同的 2 级

降水产品,其中双频反演产品包含:DPR_HS、DPR_MS 和 DPR_NS;单频反演产品含有:Ka_HS、Ka_MS 和 Ku_NS。通过对比分析不同降水产品中 R 的差异性,从图 1 中可以看出,Ka_HS 和 DPR_HS 探测的 R 小,主要识别的是 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下的降水,尤其是可以探测到更多降水强度小于 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的弱降水,比例达到了将近 40%,这说明 Ka_PR 在高灵敏模式下工作时,对于弱降水的识别具有很大的优势;Ka_MS 和 DPR_MS 探测的 R 主要为小于 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,对大于 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水极不敏感,同时对于 $0.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下的降水也不能很好地识别,说明 Ka_MS 的探测降雪性能相对偏弱(强降雪对 Ka 波段的衰减大);DPR_NS、Ku_NS 和 DPR_MS 的频率分布曲线较宽,对较强的 R 识别能力较好,DPR_NS 和 Ku_NS 探测到的地表降雪强度大(Ku 波段适合探测相对强的降雪),特别是可以很好地识别强度大于 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降雪,占比

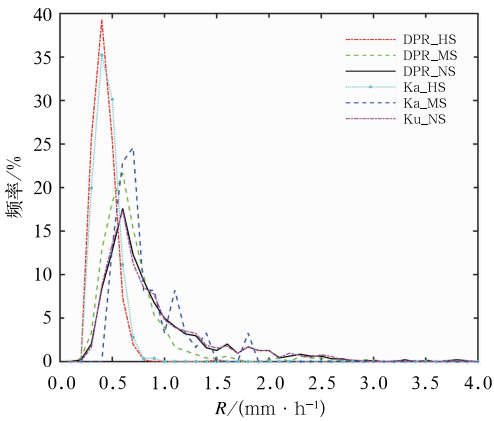
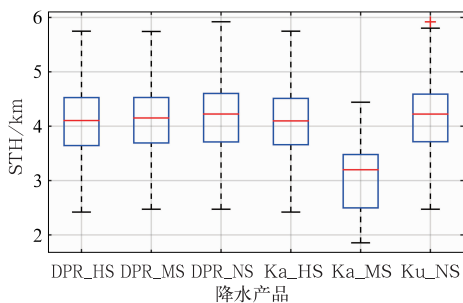


图 1 不同降水产品 R 的频率分布
Fig. 1 Frequency distribution of R for different precipitation products

超过 10%, 对 $0.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下降雪强度也能较好地识别。

星载测雨卫星探测的 STH 通常定义为测雨雷达反射率因子廓线中出现大于信噪阈值的最高层高度(傅云飞等, 2012a)。STH 与云中上升气流强弱及稳定度密切相关(Houze et al, 2017)。GPM 六种不同降水产品 STH 的统计如图 2 所示, 可以发现 Ka_MS 的 STH 与其他产品存在明显不同, 该产品探测的 STH 明显偏低, 这主要是因为 Ka_PR 做匹配扫描时其最小回波阈值变大所造成的。而其他五种降雪系统的 STH 统计值比较接近, 只是 Ku_NS 和 DPR_NS 探测的 STH 略大(接近 6.0 km), 这说明 DPR_NS 和 Ku_NS 对较高的降雪系统具有一定的探测能力。总体而言, GPM 探测的降雪云的 STH 主要集中在 $2.5 \sim 6.0 \text{ km}$, 这与 Kulie et al (2016) 和吴琼等(2017)利用 GPM/DPR 和 Cloud-Sat/CPR 观测统计得出降雪云的 STH 绝大多数小于 6 km 的研究结果较为一致。

为了清楚地区分不同探测方式所造成 Z 探测结果的差异, 文中将六种降水产品所反演的 Z 数据集进行了对比分析, 如图 3 所示, 发现 DPR_HS 和 Ka_HS 的 Z 主要分布在 $10 \sim 20 \text{ dBz}$, 对大于 20 dBz 的强降水观测性能较弱, Ka_MS 观测到的 Z 在 $15 \sim 25 \text{ dBz}$ 范围所占的比例最大, 相比于其他降水产品探测到 Z 更大, 但对小于 15 dBz 的弱降水观测能力不足。DPR_MS、Ku_NS 和 DPR_NS 三者频率分布曲线较为相似, 频率分布曲线较宽, 对不同强度的降水均有较好响应, 可探测到的最强 Z 约为 35 dBz , 综合降雪系统识别能力较好。



注: 上端和下端代表统计的最大和最小值, 箱体自上而下三条线分别代表第 75%、50% 和 20% 分位值; + 表示异常值。

图 2 不同降水产品 STH 的箱线图

Fig. 2 Box plot of STH for different precipitation products

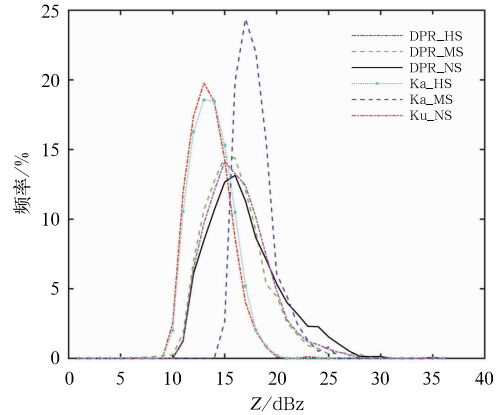


图 3 不同降水产品 Z 的频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of Z for different precipitation products

综上所述, 通过统计对比得出 DPR_NS、Ku_NS 和 DPR_MS 在 R、STH 和 Z 的识别能力较好。由于双频反演算法中有粒子谱产品, 使用双频方法进行探测降水比单频有优势, 同时 NS 探测方式扫描宽度 (245 km) 较 MS 探测方式 (125 km) 更宽, 可以探测识别出更多的降雪系统。这与吴琼等(2017)研究得出 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的研究结论一致。因此本文主要使用了 GPM 双频反演产品 DPR_NS 进行南北疆降雪系统结构特征的研究。

2 结果分析

2.1 三类降雪云参量特征分析

为深入分析不同降雪系统的宏微观特征差异, 图 4, 图 5 分别给出了三种降雪云(深厚、浅薄和近地表降雪云)的出现频率、平均降雪强度、R 分布以及有效像元数等。统计发现, 超过一半(62.18%)的观测样本是浅薄降雪云, 其次是深厚降雪云(36.27%), 近地表降雪云最少(1.54%), 浅薄降雪云出现频率是深厚降雪云的 1.71 倍。深厚降雪云平均降雪率($0.74 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)对总降雪量的贡献最大, 其次是浅薄降雪云($0.61 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 最后是近地表降雪云($0.59 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 深厚降雪云平均降雪强度分别比浅薄和近地表降雪云大 $0.13 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

从图 5 可以发现深厚和浅薄降雪云出现的频率较大, 对 R 贡献最大, 且一些大于 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的

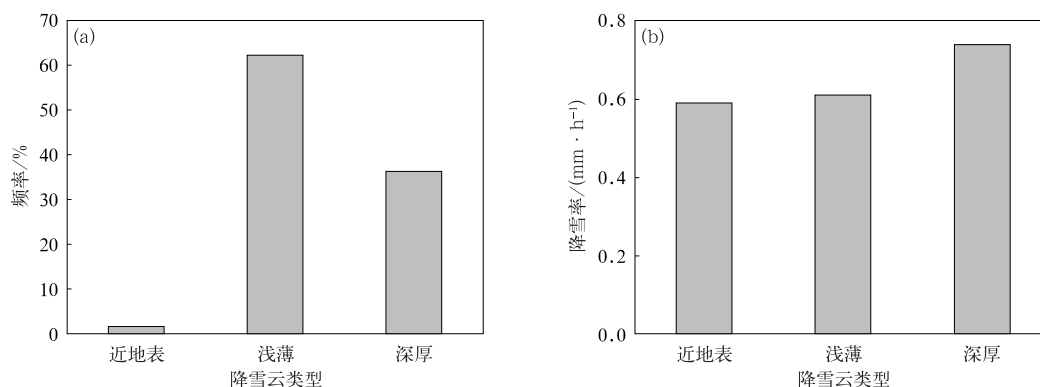
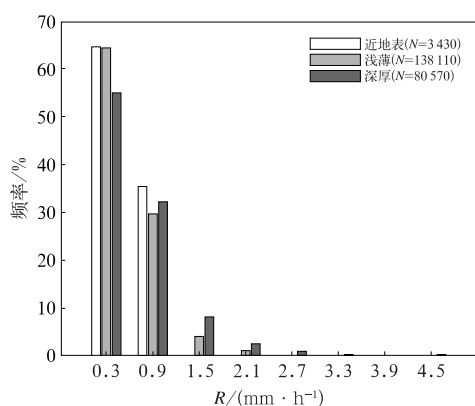


图4 三类降雪云的(a)出现频率和(b)平均降雪率分布

Fig. 4 (a) Frequency and (b) average snowfall rate distribution of three types of snowfall clouds

注: N 为像元数。图5 三类降雪云的 R 频率分布Fig. 5 Frequency distribution of R for three types of snowfall clouds

强降雪事件主要集中在浅薄和深厚降雪云。Pettersen et al(2020)分析了在美国密歇根州观测到的四个冬季的降雪云,将降雪云分为浅薄云和深厚云,研究发现浅薄云出现的频率是深厚云的2倍,而这两种类型降雪云对每年降雪量的贡献几乎相等。Kulie et al(2016)发现,在全球范围内浅薄和近地表降雪云的降雪率大多低于 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,强降雪主要与深厚云系有关。这些统计结果与本研究中新疆地区发生的降雪事件的研究结论较为相似。

如图6所示,统计得出近地表、浅薄和深厚降雪云的STH分别集中在 $1.5 \sim 2.0$ 、 $2.0 \sim 4.0$ 和 $4.0 \sim 6.0 \text{ km}$,深厚降雪云STH平均值(4.5 km)比浅薄(3.3 km)大36%,是近地表(1.88 km)的2.39倍;三类云 R 分别分布在 $0.1 \sim 1.1$ 、 $0.1 \sim 2.0$ 和 $0.1 \sim 2.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,主要集中在 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下,大于

$1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降雪率多见于深厚和浅薄降雪云。在深厚降雪云中,存在较高的LWP和IWP,多分布于 $0 \sim 450 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0 \sim 380 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,LWP和IWP大值区($100 \sim 250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)在浅薄降雪云中也有出现,在浅薄降雪云中LWP和IWP主要在 $0 \sim 300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0 \sim 350 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,近地表降雪云的绝大多数LWP和IWP值在 $0 \sim 80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0 \sim 100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。深厚降雪云的LWP均值为 $110 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,分别比浅薄降雪云均值 $95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和近地表降雪云的均值 $75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 大15.79%和46.67%;三者的IWP均值分别为150、100和 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,深厚降雪云均值分别是浅薄、近地表降雪云的1.5倍和3倍。新疆深厚降雪云主要集中在天山和阿勒泰山区。

通过分析发现,STH与 R 总体上存在较好的对应关系,出现STH均值越大 R 越强的现象;LWP和IWP与 R 之间一般存在正相关,尤其在浅薄和深厚降雪云近地表降雪率达到 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时,LWP($80 \sim 200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)和IWP的大值区($100 \sim 250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)在两类云中均有发现。三类云的LWP和IWP均值随着 R 的增加而增加。同时也存在一些特殊的情况,如一些降雪云STH很高、 R 却较低,这种现象可能是因为降雪云是由多层云组成或者云体内上下剧烈的动态分离合并,云中不时出现夹层导致的。Pettersen et al(2018)利用在格陵兰岛观测到的数据,研究发现深厚和浅薄降雪云通常是混合相云,含有大量过冷水,且液水路径比冰水路径偏少。Jeoung et al(2020)研究得出朝鲜半岛东海岸地区近地表、浅薄和深厚降雪云的LWP均值存在逐步增大的现象。这些发现与本文的研究结果较为相似。

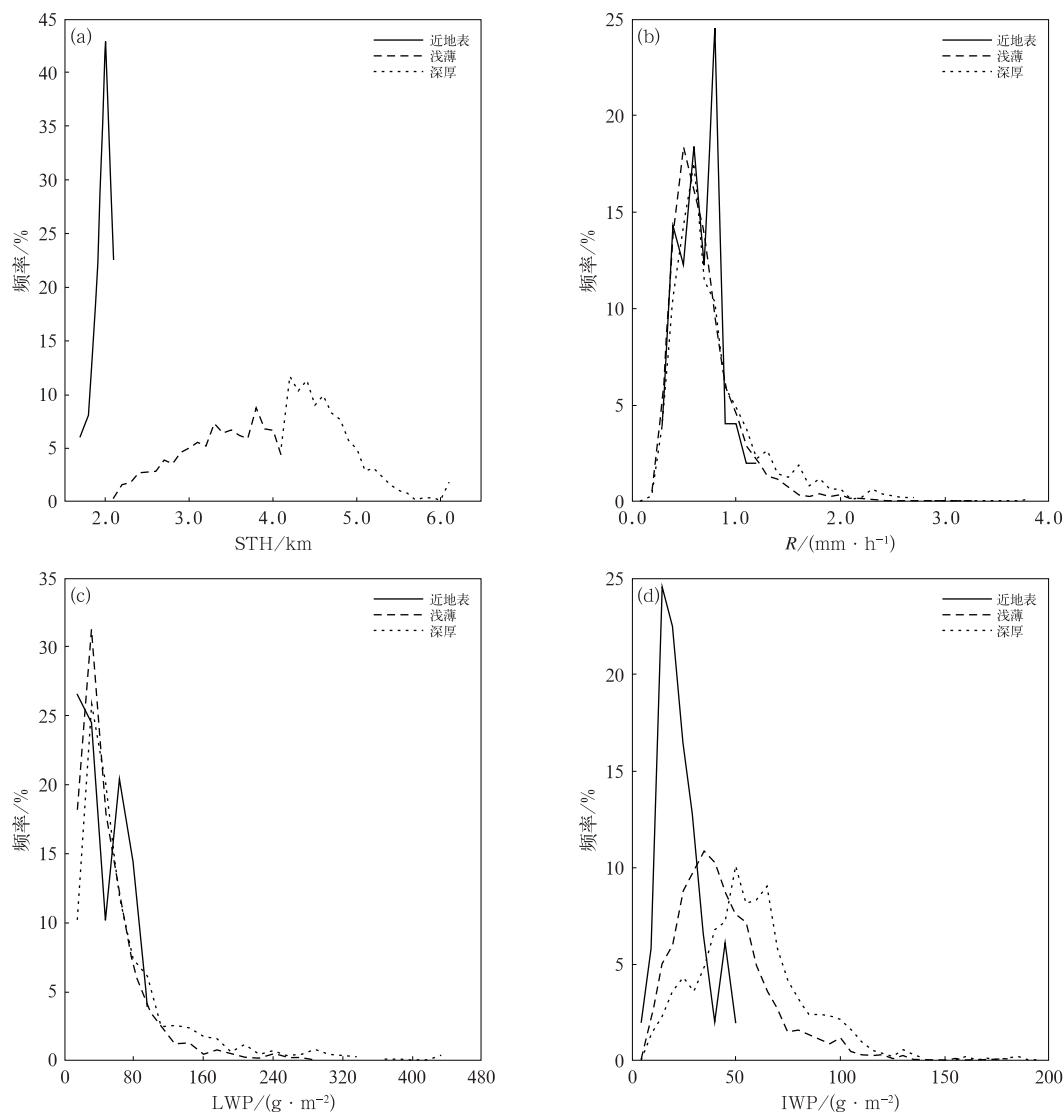


图 6 三类降雪云的(a)STH,(b) R ,(c)LWP 和(d)IWP 频率分布

Fig. 6 Frequency distribution of (a) STH, (b) R , (c) LWP and (d) IWP for three types of snowfall clouds

2.2 个例分析

2.2.1 降雪系统水平结构

文中主要结合地面观测数据以及 GPM 卫星过境信息等,从 70 次降雪系统中选取了具有新疆代表性下垫面(山区、河谷,沙漠和戈壁)的典型降雪个例开展了详细分析,如图 7 所示,分别为 2015 年 11 月 1 日阿勒泰山区降雪(图 7a,A 个例);2015 年 11 月 19 日西天山伊犁河谷降雪(图 7b,B 个例);2016 年 11 月 16 日古尔班通古特沙漠降雪(图 7c,C 个例);2017 年 2 月 19 日发生在南疆昆仑山北麓戈壁地区的降雪(图 7d,D 个例)。通常测雨雷达给出降水的

水平分布主要以 R 来表征,反映了不同强弱降水的空间分布(傅云飞等,2012b;刘鹏等,2012),进而可以对降水系统发展过程进行推断。图 7 为所选四次例子地表降水强度的水平分布,从图中可以看到四次降雪个例均为层状云,大部分区域的降雪率不足 $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大不超过 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。A 个例发生于北疆阿勒泰山区,降雪系统为一个独立降雪云团单体,存在一个强降雪中心,识别的降水像元为 12593 个,降雪率最大达到了 $4.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最小为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为 $0.86 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;B 个例发生在伊犁河谷,降雪率的分布较均匀,主要分布在 $0.10 \sim 3.09 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为 $0.59 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降

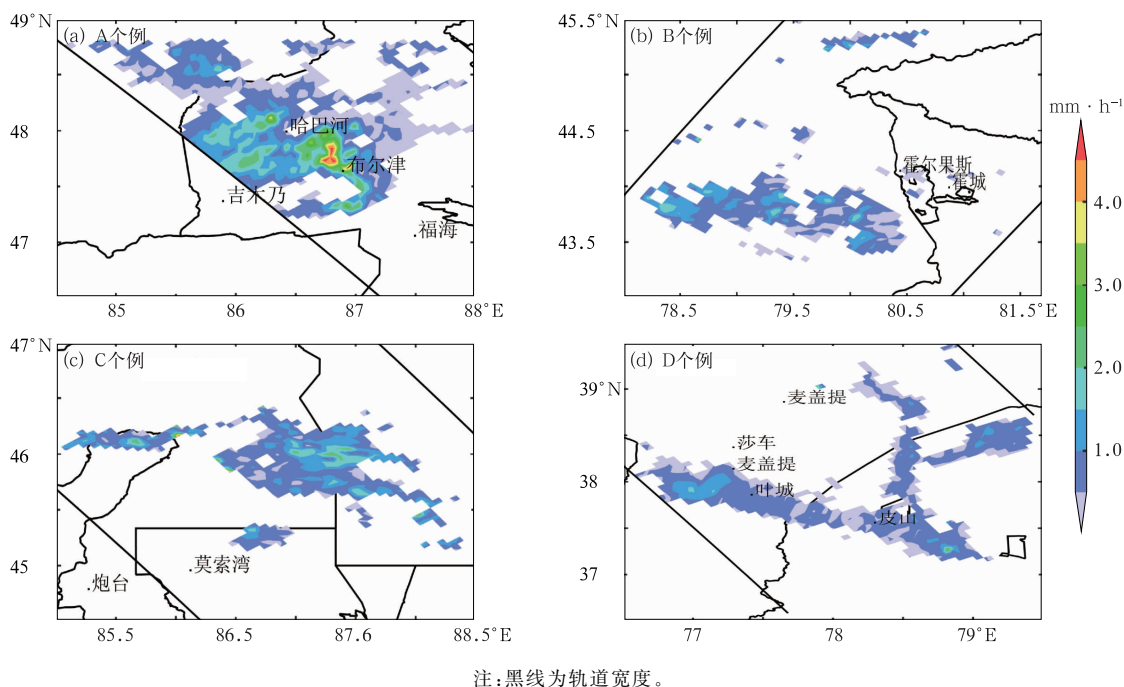


图7 四次降雪系统的R分布

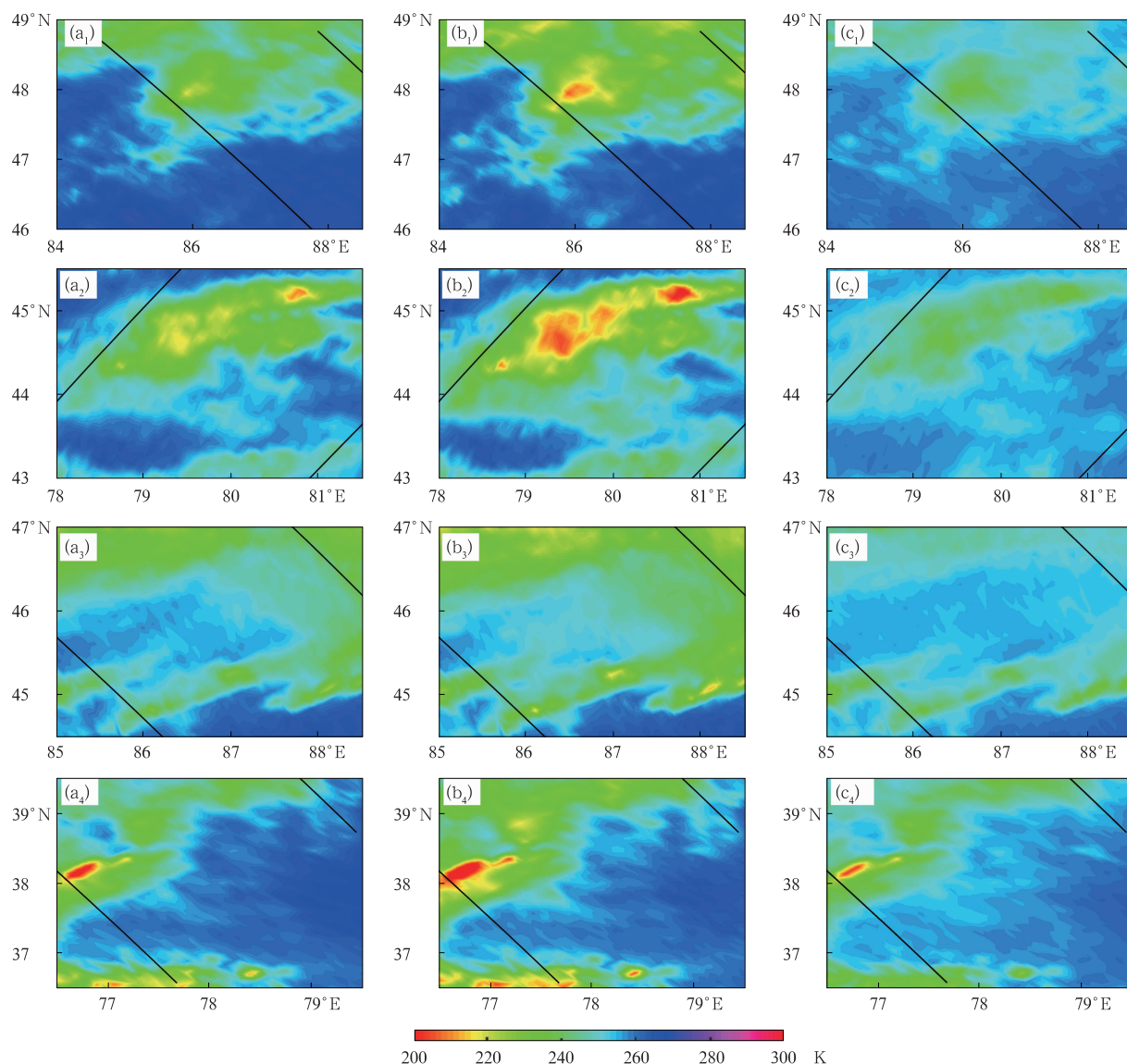
Fig. 7 Distribution of R during four snowfall systems

水像元为 13 083 个,是四个降水系统中雨团面积最大的;C 个例是在古尔班通古特沙漠腹地出现的降雪系统,降雪率集中在 $0.16 \sim 2.03 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值 $0.47 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,是所有个例中降雪最弱的,降水像元为 12 348 个;D 个例降雪在昆仑山北麓出现,降水像元为 7399 个,降雪率最小值为 $0.03 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大值为 $3.81 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值是 $0.56 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,云系分布较分散,降雪面积为所有个例中最小。阿勒泰山区和伊犁河谷的降雪系统无论是降雪率和面积都要大于发生在古尔班通古特沙漠和南疆昆仑山北麓的降雪系统。这与王秀琴等(2019)得出新疆地区强降雪的发生北疆多于南疆,山区多于盆地,西部多于东部等研究结果较一致。

云层中的降雨及降雪可以辐射出自己的能量,通过对这些能量的大小和频段进行对比分析,能够区分降雨和降雪系统、计算降水强度。GMI 具有 13 个频段,其中 5 个低频段适合观测各类液态降水,4 个中频段能够捕获液态、固态混合降水,4 个高频段适合观测固态降水。通过对南北疆地区降雪系统的分析,发现在 4 个高频通道中 166 V&H 和 $183 \pm 8 \text{ GHz}$ 通道能较好地识别出了降雪系统的尺度范围,由于 GMI 的幅宽较大,达到了 885 km,探测出的降雪系统范围较 GPM/DPR_2A 级降水产品 (245 km) 更大,有利于我们对南北疆降雪系统宏观

水平结构进行更深入的分析。

图 8a、8b 分别为 166 GHz 垂直和水平极化通道,图 8c 为 $183 \pm 8 \text{ GHz}$ 高频通道观测的四次降雪云系微波辐射亮温信息。通常云系中冰云的亮温小于 233 K,水云的亮温则高于 273 K,当介于 233~273 K 则为冰水混合云 (Braga and Vila, 2014)。2015 年 11 月 1 日 17 时(北京时,下同)在阿勒泰地区上空出现一大片完整云系,低于 240 K 亮温区在东西和南北方向大体为 150 km,最低亮温约 200 K,降雪云系较深厚,其南侧亮温变化位于 270~300 K,为晴空少云区,该降雪云主要为冰云。2015 年 11 月 19 日 05 时在西天山伊犁河谷出现低亮温单体云系轮廓(200~230 K),其东西宽约 350 km,南北宽约 150 km,降雪云系面积较大,降雪系统发展旺盛,在云系的南侧和东侧,存在零星小块云团,最低亮温在 230 K 左右,云系主要以冰云为主体。2016 年 11 月 16 日 04 时古尔班通古特沙漠出现降雪,降雪系统分布较分散,亮温主要分布在 240~280 K,该降雪云为典型的冰水混合云。2017 年 2 月 19 日 23 时昆仑山北麓喀什与和田地区出现降雪系统,云顶部降水粒子相态出现明显的空间差异,降雪云以 77.5°E 为界主要分为两部分,西半部分降雪云亮温集中在 230 K 以下,该部分云团是冰云,东半部分降雪云亮温多为 240 K 以上,则主要是冰水混合云。通



注:黑线为 DPR 轨道宽度,图 a~c 中下角 1~4 分别表示四次降雪系统。

图 8 GMI 的(a)166 GHz 垂直极化通道,(b)166 GHz 水平极化通道,(c)183±8 GHz 垂直极化通道探测的四次降雪系统微波辐射亮温

Fig. 8 Microwave radiation brightness temperatures of four snowfall systems detected by (a) 166 GHz vertical polarization channel, (b) 166 GHz horizontal polarization channel, (c) 183±8 GHz vertical polarization channel of GMI

过图 8 中 3 个高频通道识别结果对比,认为 166 GHz 通道对降雪云的观测敏感性较好,观测结果最为细致。

统计分析降雪系统近地表降水强度(图 7)与云顶 166 GHz 水平通道亮温(图 8b)之间的关系,表明弱降雪(小于 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)对应的降雪云顶亮温变化位于 $230 \sim 275 \text{ K}$;中等降雪(大于 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 且小于 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)相应的亮温变化位于

$220 \sim 265 \text{ K}$,即该降水强度相应的云顶多为冰水混合相态云;而强降雪(大于 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)相应的亮温则低于 230 K ,即强降雪云顶为冰相。研究结果说明地面降雪强度越大,降雪云顶越高,两者呈正相关。当降雪云内部较强的上升气流将水汽带到高层,形成大量的冰晶或过冷水滴粒子时,STH 相对越大,当这些粒子在下落时,相互之间发生碰并-聚

合现象,对应近地表降水粒径越大,降水强度更高(Houze et al,2017)。

2.2.2 降雪系统垂直结构

根据雷达探测原理(张培昌等,2001),雷达测得的降水回波垂直结构变化反映了云中液态、固态或两者混合态粒子在垂直高度上的分布情况,当云中上升运动越强,云滴粒子会漂浮越高,从而雷达回波图上的高处便会出现相对大的回波强度。通常用等频率高度(CFAD)的统计方法来明晰不同降水的垂直结构差异(Yuter and Houze,1995)。此方法能较好地反映降水系统在垂直方向上的变化,解决了传统空间横截面不易描述降水云结构特征的难题。

从图9中可以看出,四次降雪系统的 Z 最大值在28~35 dBz,占比小于0.1%。降雪 Z 及对应高度占比的大值区(高于0.4%)集中在17~25 dBz和2.0~4.5 km(A个例)、18~24 dBz和1.45~3.65 km(B个例)、16.0~23.5 dBz和0.75~3.75 km(C个例)、15.5~24.5 dBz和2.50~4.65 km(D个例)。分析发现A、B和D个例的CFAD分布存在“左倾”结构, Z 分布区间较宽,云垂直结构较深厚,云中较

强的上升气流导致更多的冰晶和过冷水粒子悬浮在较高水平,产生倾斜的云体状态,三者属于典型的发展阶段云团。而C个例的 Z 主要在3.75 km高度以下,雨团较狭窄,降水集中于云垂直轮廓的下部,云团处于成熟阶段。

总体上,降水云剖面结构在很大程度上取决于云的发展阶段,发展中的云在上部雷达回波强度最大,而成熟的云在垂直轮廓的下部最大。强盛的向上气流将大量水汽从下层带到上层,产生丰富的大冰粒和过冷水滴,并在云中迅速产生高浓度的大粒子(Yuter and Houze,1995),在云垂直结构中形成显著的核心区。Ye et al(2020)研究发现云中微物理过程的发展演变与上升气流关系密切。

雨滴谱指的是在单位体积内粒子大小的分布。在云降水物理学研究中,滴谱是一个十分重要的参量,获取准确的滴谱信息有助于我们了解降水的微物理结构(李慧等,2021)。降水系统垂直结构上的滴谱参数 D_m 和 dBN_w 在各高度出现的频次,反映了云内微物理特征变化及其生命周期。图10,图11为四次降雪系统的 D_m 和 dBN_w 的CFAD分布,四

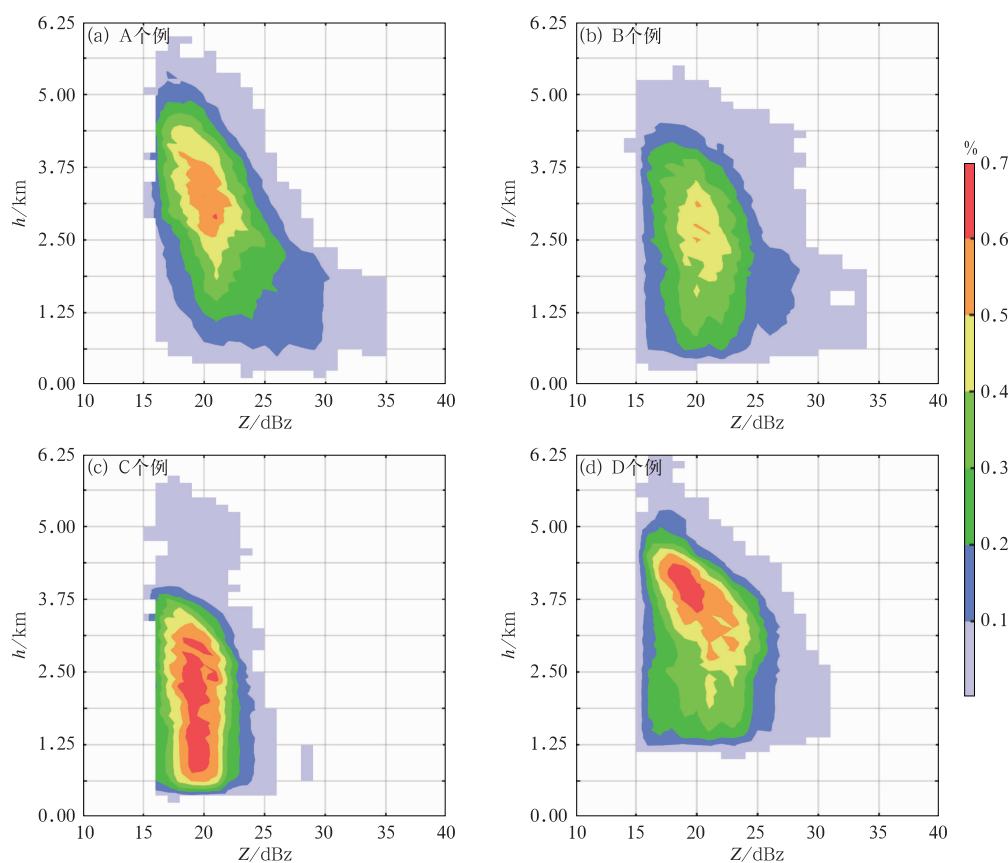
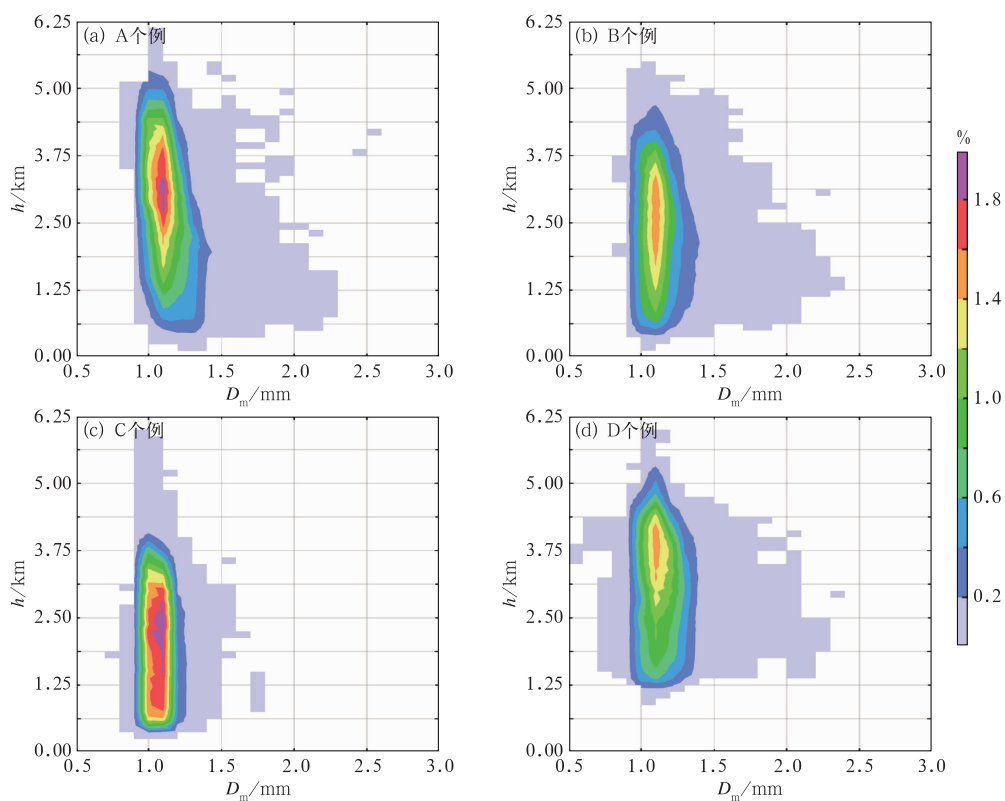
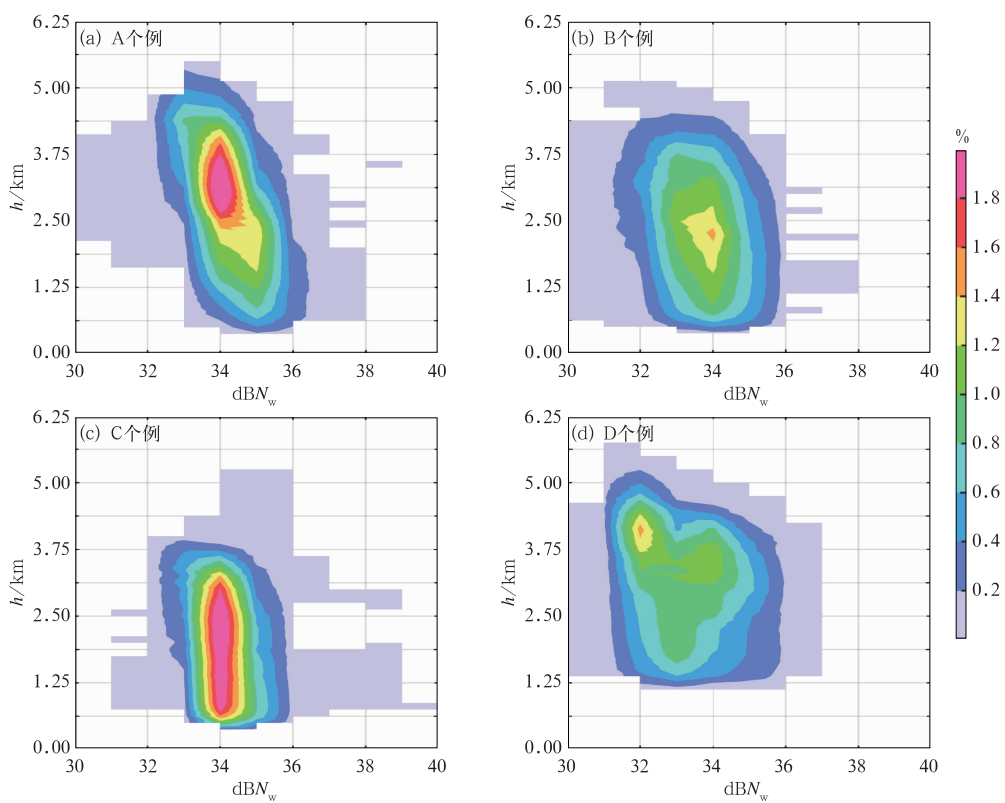


图9 四次降雪系统 Z 的CFAD分布

Fig. 9 CFAD distribution of Z during four snowfall systems

图 10 四次降雪系统 D_m 的 CFAD 分布Fig. 10 CFAD distribution of D_m during four snowfall systems图 11 四次降雪系统 dBN_w 的 CFAD 分布Fig. 11 CFAD distribution of dBN_w during four snowfall systems

个降雪系统的 D_m 最大值在 $1.8 \sim 2.5$ mm, 占比小于 0.2% , D_m 及对应高度占比的大值区(高于 1.0%)集中在 $1.00 \sim 1.22$ mm 和 $2.2 \sim 4.5$ km(A 个例)、 $1.00 \sim 1.25$ mm 和 $1.45 \sim 3.65$ km(B 个例)、 $0.95 \sim 1.28$ mm 和 $0.65 \sim 3.75$ km(C 个例)、 $1.00 \sim 1.20$ mm 和 $2.50 \sim 4.65$ km(D 个例);四次个例的 dBZ_w 大值区集中在 $33 \sim 35$ 、 $32.0 \sim 33.7$ 、 $33.5 \sim 34.7$ 和 $32.0 \sim 34.3$, 主要分布于 $0.75 \sim 4.70$ km 高度上。在 2.5 km 以下沙漠和戈壁地区降雪近地面的 Z 、 D_m 和 dBZ_w 值较阿勒泰山区和伊犁河谷的降雪云团均偏小。结合图 7 的近地表降雪量, 研究发现降雪系统中降水粒子大小、数浓度与地表降水量呈现较好的对应关系。Zagrodnik et al(2018)研究得出降水粒子大小和数浓度合理配置会显著增加地面降水量。结合图 7 中近地表降雪率数据进行分析, 得出 D_m 为 $1.00 \sim 1.22$ mm 和 dBZ_w 为 $33 \sim 35$ 的配置产生的降雪最强, 降水强度不仅与降水粒子大小有关, 而且还受到粒子浓度的影响。

雨滴谱参量受降水不同发展阶段影响较大; 发展阶段由于受强上升气流的影响, 降水粒子需增长到足够大才能降落, 因此发展阶段 D_m 最大, 但云内水汽含量较少, 因而 dBZ_w 最低; 成熟阶段对流发展达到峰值, 因此回波发展最高, 降水最强, 且降水云内水汽充足, D_m 和 dBZ_w 也比较大; 消散阶段云内上升气流最弱, D_m 最小, dBZ_w 略高于发展阶段(Zhang and Fu, 2018)。研究表明四次降雪系统的 D_m 和 dBZ_w 分别集中于 $1.0 \sim 1.5$ mm 和 $31 \sim 36$, D_m 和 dBZ_w 大值分布的高度范围分别为 $0.65 \sim 4.65$ km 和 $0.75 \sim 4.70$ km。降水粒子 D_m 值随着高度下降而不断增大, 由于云中碰并-聚合等微物理过程的影响, 越靠近地面降水粒子数浓度越大, 层状云降水更强。白云飞(2023)利用 GPM/DPR 数据分析得出东北地区降雪云平均 D_m 为 $1.6 \sim 2.2$ mm, dBZ_w 分布在 $38 \sim 40$ 。潘佩翀等(2020)得出青海三江源地区降雪系统平均 D_m 主要分布在 $2.01 \sim 2.33$ mm。通过对比, 发现新疆地区雪滴谱中 D_m 小于 1.4 mm 的占比最大, 与东北和三江源地区相比明显偏小。这可能是因为新疆地区低层空气较干燥, 空气柱中水汽含量较少, 过冷水含量偏低, 而在祁连山和东北等地区降雪云团中水汽较丰沛, 过冷水丰富, 固态降水粒子在靠近地面时融化后攀附在

一起导致的碰并效应, 使得降雪系统出现大粒子占比较多。

3 结论与讨论

目前对新疆地区降雪系统结构的认知仍有限, 尤其对沙漠腹地 and 山区复杂地形中出现的降雪系统缺乏有效探测。本文基于 2014—2021 年 GPM/DPR 和 GMI 的探测结果, 对比了 DPR 不同降水产品在观测新疆降雪系统中的敏感性, 统计了三种降雪云(深厚、浅薄和近地表)的宏微观物理特性差异, 揭示了新疆具有代表性的山区、河谷、沙漠和戈壁等不同下垫面的四次降雪系统水平和垂直结构特征, 研究表明如下:

(1) 对比得出 DPR_NS、Ku_NS 和 DPR_MS 在 R、STH 和 Z 的识别能力较好, 由于使用双频方法进行探测降水比单频有优势, 同时 NS 探测方式扫描宽度更宽, 可以探测识别出更多的降雪系统, 综合得出 DPR_NS 数据集对降雪的综合探测能力最强。

(2) 文中按照云顶高度将降雪云分为三种类型: 深厚、浅薄和近地表降雪云。统计发现超过一半(62.18%)的是浅薄降雪云, 其次是深厚降雪云(36.27%), 近地表降雪云最少(1.54%)。深厚云平均降雪率($0.74 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)对总降雪量的贡献最大, 三者的 LWP 和 IWP 多分布于 $80 \sim 450 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $100 \sim 380 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, STH、LWP 和 IWP 与 R 总体上呈正相关。

(3) 发生在阿勒泰山区和伊犁河谷的降雪系统无论在降雪强度和面积都要大于发生在古尔班通古特沙漠和南疆昆仑山北麓戈壁的降雪系统。在 GMI 中 166 GHz 高频通道对识别降雪云敏感性最好, 亮温集中分布在 $200 \sim 275 \text{ K}$, 出现在阿勒泰山区和伊犁河谷的降雪云主要是冰云, 发生在古尔班通古特沙漠和南疆昆仑山北麓戈壁的降雪云则以冰水混合云为主。

(4) 四次降雪系统的 Z 集中在 $16 \sim 25 \text{ dBZ}$, 云垂直结构较好表征了云的发展阶段, 即发展中的云体中上部回波强度最大, 而成熟的云在垂直轮廓的下部最大。 D_m 和 dBZ_w 大值区分别出现高度在 $0.65 \sim 4.65$ km 和 $0.75 \sim 4.70$ km。当 D_m 集中在 $1.00 \sim 1.22$ mm 及 dBZ_w 主要分布在 $33 \sim 35$ 时产

生的降水最强,降水强度不仅与降水粒子大小有关,而且还受到粒子数浓度的影响。在沙漠和戈壁地区2.5 km以下近地面降雪云的 Z 、 D_m 和 dBN_w 值较山区降雪云团均偏小。由于新疆地区水汽含量低,下垫面较干燥,降雪粒子直径小于1.4 mm的占比最大,与东北和青海三江源等地区相比明显偏小。

文中利用DPR和GMI对发生在新疆地区典型降雪系统的敏感性和云结构特征进行了统计分析。本文还存在一些局限性,统计样本量偏少,在对降雪系统天气背景的分析不足。在后续的工作中将注重对不同天气形势下的降雪系统进行遴选归类后进行综合研究,以得到更为全面的研究结果,不断加深我们对西北干旱区降雪系统的物理学认知,为该地区数值天气模式的改进提供参考依据。

参考文献

- 白云飞,2023.东北地区温带气旋暴雪的统计分析和个例研究[D].南京:南京信息工程大学. Bai Y F, 2023. Statistical analysis and case study of extratropical cyclone blizzard in Northeast China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 杜佳,杨成芳,戴翼,等,2019.北京地区4月一次罕见暴雪的形成机制分析[J].气象,45(10):1363-1374. Du J, Yang C F, Dai Y, et al, 2019. Formation mechanism of an infrequent blizzard in Beijing in April[J]. Meteor Mon, 45(10): 1363-1374 (in Chinese).
- 封秋娟,牛生杰,侯团结,等,2021.山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究[J].大气科学,45(5):1146-1160. Feng Q J, Niu S J, Hou T J, et al, 2021. Aircraft-based observation of the physical characteristics of snowfall cloud in Shanxi Province[J]. Chin J Atmos Sci, 45(5): 1146-1160(in Chinese).
- 傅云飞,曹爱琴,李天奕,等,2012a.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,70(3):436-451. Fu Y F, Cao A Q, Li T Y, et al, 2012a. Climatic characteristics of the storm top altitude for the convective and stratiform precipitation in summer Asia based on measurements of the TRMM precipitation radar[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 436-451 (in Chinese).
- 傅云飞,刘奇,王雨,等,2012b.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[J].中国工程科学,14(10):43-50. Fu Y F, Liu Q, Wang Y, et al, 2012b. TRMM satellite onboard instruments and the application on precipitation analysis of their measurements[J]. Strategic Study CAE, 14(10): 43-50 (in Chinese).
- 李慧,苏立娟,郑旭程,等,2021.呼和浩特降雨和降雪过程粒子谱分布特征分析[J].气象,47(1):71-81. Li H, Su L J, Zheng X C, et al, 2021. Analysis on characteristics of particle size distribution during rain and snow processes in Hohhot [J]. Meteor Mon, 47(1): 71-81(in Chinese).
- 刘鹏,王雨,冯沙,等,2012.冬、夏季热带及副热带穿透性对流气候特征分析[J].大气科学,36(3):579-589. Liu P, Wang Y, Feng S, et al, 2012. Climatological characteristics of overshooting convective precipitation in summer and winter over the tropical and subtropical regions[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3): 579-589 (in Chinese).
- 马新成,董晓波,毕凯,等,2021.北京海坨山区低槽降雪云系演变特征的观测研究[J].气象学报,79(3):428-442. Ma X C, Dong X B, Bi K, et al, 2021. The characteristics and evolution of low trough snowfall cloud system in the Haituo Mountain, Beijing [J]. Acta Meteor Sin, 79(3): 428-442(in Chinese).
- 潘佩翀,解宏伟,魏加华,2020.高海拔地区冬季降雪滴谱特征分析[J].青海大学学报,38(1):81-86. Pan P C, Xie H W, Wei J H, 2020. Analysis of characteristics of the snow size spectra in the high altitude regions in winter[J]. J Qinghai Univ, 38(1): 81-86 (in Chinese).
- 沈程锋,李国平,2022.基于GPM资料的四川盆地及周边地区夏季地形降水垂直结构研究[J].高原气象,41(6):1532-1543. Shen C F, Li G P, 2022. The vertical structure of orographic precipitation during warm season in the Sichuan Basin and its surrounding areas by using GPM dual-frequency spaceborne precipitation radar[J]. Plateau Meteor, 41(6): 1532-1543(in Chinese).
- 施丽娟,冯婉悦,雷勇,等,2022. GPM日降水产品在中国大陆的准确性评估[J].气象,48(11):1428-1438. Shi L J, Feng W Y, Lei Y, et al, 2022. Accuracy evaluation of daily GPM precipitation product over Mainland China[J]. Meteor Mon, 48(11): 1428-1438(in Chinese).
- 王秀琴,卢新玉,马禹,等,2019.基于灾情数据的新疆雪灾的评估与区划[J].冰川冻土,41(4):836-844. Wang X Q, Lu X Y, Ma Y, et al, 2019. Study on snow disaster assessment method and snow disaster regionalization in Xinjiang[J]. J Glaciol Geocryol, 41(4): 836-844(in Chinese).
- 魏栋,刘丽伟,田文寿,等,2021.基于卫星资料的西北地区高原涡强降水分析[J].高原气象,40(4):829-839. Wei D, Liu L W, Tian W S, et al, 2021. Analysis of the heavy precipitation caused by plateau vortex in Northwest China based on satellite data[J]. Plateau Meteor, 40(4): 829-839(in Chinese).
- 魏玮,刘黎平,吴翀,等,2019.杭州“12·05”降雪天气过程的偏振雷达观测分析[J].气象,45(9):1248-1261. Wei W, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of dual-polarization radar observation during the 5 December 2015 snowfall process in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 45(9): 1248-1261(in Chinese).
- 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. Wu Q, Yang M L, Dou F L, 2017. Study of GPM dual-frequency radar in detecting snow [J]. Meteor Mon, 43(3): 348-353(in Chinese).

- 肖柳斯,张阿思,闵超,等,2019. GPM 卫星降水产品在台风极端降水过程的误差评估[J]. 高原气象, 38(5): 993-1003. Xiao L S, Zhang A S, Min C, et al, 2019. Evaluation of GPM satellite-based precipitation estimates during three tropical-related extreme rainfall events[J]. Plateau Meteor, 38(5): 993-1003 (in Chinese).
- 俞琳飞,张永强,张佳华,等,2020. 卫星降水产品在太行山区的适用性初步评估[J]. 高原气象, 39(4): 819-829. Yu L F, Zhang Y Q, Zhang J H, et al, 2020. Preliminary evaluate the applicability of satellite precipitation products over the Taihang Mountains[J]. Plateau Meteor, 39(4): 819-829(in Chinese).
- 张俊兰,施俊杰,李伟,等,2021. 乌鲁木齐暴雪天气的环流配置及中尺度系统特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 15(1): 1-8. Zhang J L, Shi J J, Li W, et al, 2021. Atmospheric circulation and meso-scale system characteristics of snowstorm in Urumqi[J]. Desert Oasis Meteor, 15(1): 1-8(in Chinese).
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001. 雷达气象学: 2 版[M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 赵震,2019. 2016 年台风“莫兰蒂”结构特征的多源卫星探测分析[J]. 高原气象, 38(1): 156-164. Zhao Z, 2019. Multi-satellite observations on the structure characteristics of Typhoon Meranti in 2016[J]. Plateau Meteor, 38(1): 156-164(in Chinese).
- Braga R C, Vila D A, 2014. Investigating the ice water path in convective cloud life cycles to improve passive microwave rainfall retrievals[J]. J Hydrometeor, 15(4): 1486-1497.
- Casella D, Panegrossi G, Sanò P, et al, 2017. Evaluation of the GPM-DPR snowfall detection capability: Comparison with CloudSat-CPR[J]. Atmos Res, 197: 64-75.
- Chandrasekar V, Le M D, 2015. Evaluation of profile classification module of GPM-DPR algorithm after launch[C]// 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan, Italy: IEEE: 5174-5177.
- Chase R J, Nesbitt S W, McFarquhar G M, 2020. Evaluation of the microphysical assumptions within GPM-DPR using ground-based observations of rain and snow[J]. Atmosphere, 11(6): 619.
- Field P R, Heymsfield A J, 2015. Importance of snow to global precipitation[J]. Geophys Res Lett, 42(21): 9512-9520.
- Hamada A, Takayabu Y N, 2016. Improvements in detection of light precipitation with the Global Precipitation Measurement Dual-Frequency Precipitation Radar (GPM DPR)[J]. J Atmos Ocean Technol, 33(4): 653-667.
- Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al, 2014. The global precipitation measurement mission[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(5): 701-722.
- Houze Jr R A, McMurdie L A, Petersen W A, et al, 2017. The Olympic mountains experiment (OLYMPEX)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(10): 2167-2188.
- Jeoung H, Liu G S, Kim K, et al, 2020. Microphysical properties of three types of snow clouds: implication for satellite snowfall retrievals[J]. Atmos Chem Phys, 20(23): 14491-14507.
- Kneifel S, Löhnert U, Battaglia A, et al, 2010. Snow scattering signals in ground-based passive microwave radiometer measurements[J]. J Geophys Res Atmos, 115(D16): D16214.
- Kotsuki S, Terasaki K, Miyoshi T, 2014. GPM/DPR precipitation compared with a 3. 5-km-resolution NICAM simulation[J]. SOLA, 10(1): 204-209.
- Kulie M S, Milani L, Wood N B, et al, 2016. A shallow cumuliform snowfall census using spaceborne radar[J]. J Hydrometeor, 17(4): 1261-1279.
- Le M D, Chandrasekar V, 2019. Ground validation of surface snowfall algorithm in GPM dual-frequency precipitation radar[J]. J Atmos Ocean Technol, 36(4): 607-619.
- Levizzani V, Laviola S, Cattani E, 2011. Detection and measurement of snowfall from space[J]. Remote Sens, 3(1): 145-166.
- Noh Y J, Liu G S, Seo E K, et al, 2006. Development of a snowfall retrieval algorithm at high microwave frequencies[J]. J Geophys Res Atmos, 111(D22): D22216.
- Pettersen C, Bennartz R, Merrelli A J, et al, 2018. Precipitation regimes over central Greenland inferred from 5 years of ICECAPS observations[J]. Atmos Chem Phys, 18(7): 4715-4735.
- Pettersen C, Kulie M S, Bliven L F, et al, 2020. A composite analysis of snowfall modes from four winter seasons in Marquette, Michigan[J]. J Appl Meteor Climatol, 59(1): 103-124.
- Rysman J F, Panegrossi G, Sanò P, et al, 2018. SLALOM: An all-surface snow water path retrieval algorithm for the GPM microwave imager[J]. Remote Sens, 10(8): 1278.
- Skofronick-Jackson G, Hudak D, Petersen W, et al, 2015. Global precipitation measurement cold season precipitation experiment (GCPEX): for measurement's sake, let it snow[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(10): 1719-1741.
- Skofronick-Jackson G, Petersen W, Berg W, et al, 2017. The global precipitation measurement (GPM) mission for science and society[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(8): 1679-1695.
- Tanelli S, Durden S L, Im E, et al, 2008. CloudSat's cloud profiling radar after two years in orbit: Performance, calibration, and processing[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 46(11): 3560-3573.
- Tang G Q, Wen Y X, Gao J Y, et al, 2017. Similarities and differences between three coexisting spaceborne radars in global rainfall and snowfall estimation[J]. Water Resour Res, 53(5): 3835-3853.
- von Lerber A, Moiseev D, Marks D A, et al, 2018. Validation of GMI snowfall observations by using a combination of weather radar and surface measurements[J]. J Appl Meteor Climatol, 57(4): 797-820.
- Xie X X, Löhnert U, Kneifel S, et al, 2012. Snow particle orientation observed by ground-based microwave radiometry[J]. J Geophys

- Res Atmos, 117(D2):D02206.
- Ye B Y, Jung E, Shin S, et al, 2020. Statistical characteristics of cloud occurrence and vertical structure observed by a ground-based Ka-band cloud radar in South Korea[J]. Remote Sens, 12(14): 2242.
- You Y, Wang N Y, Ferraro R, et al, 2017. Quantifying the snowfall detection performance of the GPM Microwave Imager channels over land[J]. J Hydrometeor, 18: 729-751.
- Yuter S E, Houze Jr R A, 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity[J]. Mon Wea Rev, 123(7): 1941-1963.
- Zagrodnik J P, McMurdie L A, Houze Jr R A, 2018. Stratiform precipitation processes in cyclones passing over a coastal mountain range[J]. J Atmos Sci, 75(3): 983-1004.
- Zhang A Q, Fu Y F, 2018. Life cycle effects on the vertical structure of precipitation in East China measured by Himawari-8 and GPM DPR[J]. Mon Wea Rev, 146(7): 2183-2199.

(本文责编:俞卫平)