

王智敏,施丽娟,汪会,等,2022. 基于 GPM/DPR 数据的北疆地区降雪云宏观结构和微物理特征分析[J]. 气象,48(9):1140-1152. Wang Z M, Shi L J, Wang H, et al, 2022. Analysis of macro structure and microphysical characteristics of snow clouds in northern Xinjiang based on GPM/DPR data[J]. Meteor Mon, 48(9):1140-1152(in Chinese).

基于 GPM/DPR 数据的北疆地区降雪云 宏观结构和微物理特征分析^{*}

王智敏^{1,2} 施丽娟³ 汪会¹ 殷占福¹ 李圆圆² 冯婉悦⁴

1 中国气象局人工影响天气中心,北京 100081

2 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室,乌鲁木齐 830002

3 中国气象局气象探测中心,北京 100081

4 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: 利用 GPM/DPR 双频降水雷达资料、FY-2E 卫星资料和地面降水实况,对新疆北部四次成熟期降雪过程的红外亮温、水平分布和垂直结构特征进行了分析。结果表明:降雪云团的云顶亮温集中在 210~245 K,降雪云主要为层状云,中云对降水率贡献最大,近地面降水率多分布于 0.5~2.0 mm·h⁻¹,回波顶高主要集中在 3.0~4.5 km 范围内,回波顶高与近地表降水率强弱变化存在正相关;雷达反射率因子(Z)范围在 22~35 dBz,强回波中心高度主要分布在 1.25~4.50 km;质量加权平均直径(D_m)为 1.01~1.25 mm 和粒子数浓度(dBN_w)为 32~36 的配置贡献的降水最多,对应的高度范围为 2.19~2.50 km 和 2.13~2.67 km;近地表由碰撞-聚并过程产生的大粒子较多,近地表附近 D_m 达到了 2.33~3.00 mm,Z 和 D_m 朝地面几乎恒定或稍有增加,Z 和 D_m 数值大小与地表降水量变化呈正相关特征。

关键词: 双频降水雷达(DPR),降水垂直结构,回波顶高,滴谱参数

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.051602

Analysis of Macro Structure and Microphysical Characteristics of Snow Clouds in Northern Xinjiang Based on GPM/DPR Data

WANG Zhimin^{1,2} SHI Lijuan³ WANG Hui¹ YIN Zhanfu¹ LI Yuanyuan² FENG Wanyue⁴

1 CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

2 Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi 830002

3 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

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

Abstract: Based on GPM/DPR dual-frequency precipitation radar, FY-2E satellite and surface precipitation data, the infrared brightness temperature, horizontal distribution and vertical structure characteristics of the four snowfall processes during mature period in northern Xinjiang are analyzed. The results show that the cloud top brightness temperature of the snowfall is concentrated at 210–245 K, and the snowfall clouds are mainly stratiform clouds. The middle clouds contribute the most to the precipitation intensity, and the near-surface precipitation rate is mostly distributed between 0.5–2.0 mm·h⁻¹. The echo top

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC0406602)、中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2020Z00712)、中国气象局西北区域人影建设研究试验项目(RYSY201902)和新疆气象局引导性计划项目(YD202201、YD202203)共同资助

2021 年 6 月 23 日收稿; 2022 年 5 月 16 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:施丽娟,主要从事综合气象观测产品系统研发相关工作. E-mail:shilj@cma.gov.cn

height in areas with high precipitation rate is mainly concentrated in the range of 3.0–4.5 km, and there is a positive correlation between the echo top height and the variation of near-surface precipitation rate. The range of radar reflectivity factor (Z) is between 22–35 dBz, and the height of the strong echo center is mainly distributed in 1.25–4.50 km. The configuration with mass weighted average diameter (D_m) of 1.01–1.25 mm and particle number concentration ($dB N_w$) of 32–36 contributes the most precipitation, and the corresponding heights are 2.19–2.50 km and 2.13–2.67 km. Near the surface, there are more large particles produced by the collision-convergence process, and the D_m reaches 2.33–3.00 mm near surface. Toward the surface, Z and D_m are almost constant or slightly increase, and the values of Z and D_m are positively correlated to the variation of surface rainfall.

Key words: dual-frequency precipitation radar (DPR), vertical structure of precipitation, echo top height, droplet spectrum parameter

引言

GPM(global precipitation measurement)是新一代全球降水探测卫星,能够对降水过程进行精确的探测(唐国强等,2015;方勉等,2019)。GPM 核心观测平台搭载了全球首部星载双频降水雷达(dual-frequency precipitation radar, DPR)和微波扫描辐射仪(GPM microwave imager, GMI),观测范围可覆盖至南北纬 65° 。

目前,国外学者们利用 GPM 卫星针对降雪过程开展了大量研究,而国内相关研究相对较少,并且主要集中于一次降雪过程的分析。在国外,Le and Chandrasekar(2019)通过分析 2014–2018 年北美地区的 16 场降雪天气过程,发现 GPM/DPR 雷达和地基雷达的反射率因子匹配率为 $87.8\% \sim 98.5\%$ 。Hamada and Takayabu(2016)发现 GPM/DPR 雷达对弱降水的探测能力强于 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)。Adhikari et al (2018)利用全球三年降雪过程的 CloudSat 卫星和 GPM 卫星的观测资料,证实了 GPM 卫星比 CloudSat 卫星在观测强降雪方向更加有效,大多数降雪的雷达反射率小于 30 dBz,回波顶高在 2~5 km,北半球的降雪过程在清晨有明显的增强。Skofronick-Jackson et al (2019) 和 Casella et al(2017)对比了 GPM/DPR 和 CloudSat/CPR(cloud profile radar) 雷达观测降雪的优缺点,给出了雪粒子散射特性和粒径分布,在 Ku 和 W 波段建立了雷达反射率因子(Z)与降雪率(S)的关系,将 CloudSat/CPR 雷达和 GPM/DPR 雷达的降雪观测数据进行算法匹配融合,提高了 DPR 雷达观测降雪的数据质量。von

Lerber et al (2018)和 Rysman et al(2018)利用地基雷达、雨量计和雨滴谱仪等验证了 GPM 观测降雪过程的有效性为 $84\% \sim 90\%$,并利用 GPM 数据反演了雪水路径参量。Jeung et al (2020)对在 2017–2018 年冬季朝鲜半岛平昌地区的降雪云,根据云顶高度分为了三类云:近地表云、浅薄降水云 and 深厚降水云,其中近地表云是最常见的云类型,面积比例超过 60% ,而深厚降水云在降雪量中的贡献最大,占总数的 50% 以上,同时结合地面雷达和辐射计数据对三种类型雪云的云水路径和降雪率等进行了分析。Chase et al(2020)基于 GPM/DPR 的双频比和云顶高度等观测数据,发展了一种地面降雪识别算法,利用该算法所得出的结果与地基 X/Ka 波段雷达所观测的降雪信息具有较好的一致性,结合地基二维雨滴谱仪分别研究了降雨和降雪的降水率(R)和质量加权平均直径(D_m)等微物理参量之间的关系。国内方面,吴琼等(2017)分析比较了 GPM/DPR 双频降水测量雷达三种扫描模式(Ku, KaMS 和 KaHS)对降雪探测能力的差异,发现 DPR 相态产品和地面实际观测结果比较一致且降雪发生时的回波顶高大多小于 6 km。李林蔚和官莉(2020)改进了 GPM/DPR 的降雪指数(snow index, SI)来识别地面降水相态,提高了冬季降雨和降雪的分辨效果,改进后地面降雪识别结果与地面自动站观测结果有较好的一致性。

新疆为干旱半干旱地区,冬春季降雪天气频繁发生,同时也是我国降雪最丰富的地区之一(张俊兰等,2021),目前,对降雪的观测以地面测量为主,探测仪器包括雪量计和地基雷达(李慧等,2021;杜佳等,2019;魏玮等,2019),一些地方也在开展小范围的飞机观测(封秋娟等,2021;马新成等,2021),但对

大范围尤其是偏远地区的降雪云结构的观测则较少。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。然而,目前对新疆地区降雪云三维结构的研究较少,且多数研究仅基于一次降雪过程,本文基于 GPM 卫星数据对新疆 4 个时次的成熟期降雪天气过程进行了分析,其研究意义在于:其一,给出新疆阿勒泰地区、乌鲁木齐地区和哈密地区等不同地区降雪系统的宏微观结构特征,弥补了新疆地区降雪云三维结构特征研究空白;其二,为研究新疆地区的降雪机制和科学高效开展人工增雪作业奠定基础。

1 资料与方法

GPM 卫星搭载的 DPR 作为全球首部星载双频测雨雷达,由 Ku 波段和 Ka 波段降雨雷达组成,其中设备信息详见表 1, KuPR 的扫描方式为 normal scan(NS), KaPR 有两种扫描方式,分别为 matched scan(MS)和 high sensitivity scan(HS), DPR 的降水反演算法包含单频反演算法和双频反演算法。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,文中使用了 GPM 双频反演产品 2A-DPR_NS,主要包含扫描时间、地理位置、近地面降水率、回波强度和降水粒子谱分布参数等信息。该数据每次扫描宽度为 245 km,探测高度自地表向上 22 km,水平分辨率约为 5 km,垂直分

辨率约为 250 m。DPR 双频反演产品的合理性已经得到验证(Kotsuki et al, 2014; Chandrasekar and Le, 2015; 张昇祺和傅云飞, 2018),通过与地基雷达、地面雨量计和雨滴谱仪等进行对比交叉验证了 DPR 反演近地面降水率、回波强度和降水粒子谱的合理性。

文中根据实际降雪天气过程和 GPM 的轨道覆盖情况,选择了发生在北疆区域不同时次的降雪事件作为研究对象,收集相应的轨道号、日期、主要覆盖区域以及选择的扫描行号范围,对 GPM 卫星探测到的降雪系统的地表降水率、回波顶高、回波强度廓线和降雪粒子谱廓线等的云结构进行详细研究。

FY-2E 卫星于 2008 年发射,目前仍在轨道运行,是 FY-2 系列的第五个飞行单元。作为对地静止轨道卫星,它配备了可见和红外自旋扫描辐射计,可以进行扫描在五个波段的全圆盘图,主要包括可见光通道(0.5~0.9 μm)、中红外通道(3.5~4.0 μm)、热红外通道 1(10.3~11.3 μm)、热红外通道 2(11.5~12.5 μm)和水汽通道(6.3~7.6 μm),时间间隔为 30 min。该仪器在可见光通道中的分辨率为 1.25 km,在红外光通道中的分辨率为 5 km。该卫星于 2015 年 7 月 1 日从 105°E 移开,取代 FY-2D 成为 86.5°E 位置的主要卫星。现在用它观察新疆地区的云系发展演变有效性较高,本文主要使用了 FY-2E 的红外亮温(TBB)云图。

表 1 GPM/DPR 参数信息

Table 1 GPM equipment and track parameter information

参数	DPR	
	KuPR	KaPR
频率/GHz	13.6	35.5
足迹尺寸/km	5.05~5.60	5.05~5.60
灵敏度/dBz	12~13	12~13(HS) 17~18(MS)
扫描模式	十字轨迹	十字轨迹
测距间隔/m	250	250(MS), 500(HS)
幅宽/km	245	125
轨道高度/km	407	407

2 结果与分析

2.1 天气形势分析

图 1 为四次降雪过程 08 时 500 hPa 高空图,从

图中可以看出四次天气过程主要受西伯利亚低槽系统东移南下影响,在北疆大部地区出现偏西急流,造成降雪、降温天气过程,图 1a 为 2015 年 11 月 1 日主要发生在阿勒泰西部地区(84.0°~88.5°N, 46°~49°E)的降雪过程天气图,地面气象观测站记录降雪从 11 月 1 日 10 时开始至 2 日 06 时结束,累计降水

量为 4.7 mm(以下称 a 个例);图 1b 为 2015 年 11 月 30 日发生在乌鲁木齐地区(86°~90°N、43.0°~45.5°E)降雪过程天气图,从地面气象观测站记录降雪从 11 月 30 日 01 时开始至 06 时结束,累计降水量为 5.2 mm(以下称 b 个例);图 1c 为 2016 年 11 月 11 日发生在阿勒泰东部地区(87°~91°N、45.0°~47.5°E)降雪过程天气图,地面气象观测记录降雪从 11 月 11 日 01 时开始至 12 日 04 时结束,累计降水量为 19.5 mm(以下称 c 个例);图 1d 为 2018 年 12 月 1 日发生在哈密附近地区(87.0°~93.5°N、40.5°~43.5°E)的降雪过程天气图,在图 1d 中所示,从地面气象观测站记录降雪从 12 月 1 日 07 时开始至 2 日 10 时结束,累计降水量为 0.5 mm(以下称 d 个例)。

2.2 降雪云的水平分布特征

2.2.1 静止卫星观测降雪云团

文中给出了 GPM/DPR 观测到的四个时次降

雪前后 3 个小时内 FY-2E 红外亮温(TBB)云图,通过分析 TBB 的变化,我们确定了四个降水系统的发展阶段。图 2 为 FY-2E 卫星在 GPM 卫星过境前后 3 h 内观测到的四次降雪过程的云顶亮温信息,分析发现云图亮温参数主要集中在 215~260 K,四次降雪过程中的 GPM 卫星过境时间分别为 11:40、02:30、12:30 和 08:50 UTC,如图 2 所示,观测轨道内的云顶亮温平均值分别为 249.65、245.75、227.56 和 222.79 K。

Futyan and Del Genio(2007)总结得出了云生命周期阶段定义的方法,即根据云系生命周期定义了三个阶段(发育、成熟和消散)的红外亮温特征,云系内亮温逐渐降低,在达到最低 TBB 之前被定义为发育阶段,在成熟阶段云系达到最小 TBB 后云内亮温基本不变,消散阶段在成熟阶段之后,此时云内亮温逐渐增加,云系的大小不断减小减弱。

四次过程中降雪系统向东缓慢移动期间,在 GPM 观测到的降水出现区域,有一个相对明显的发

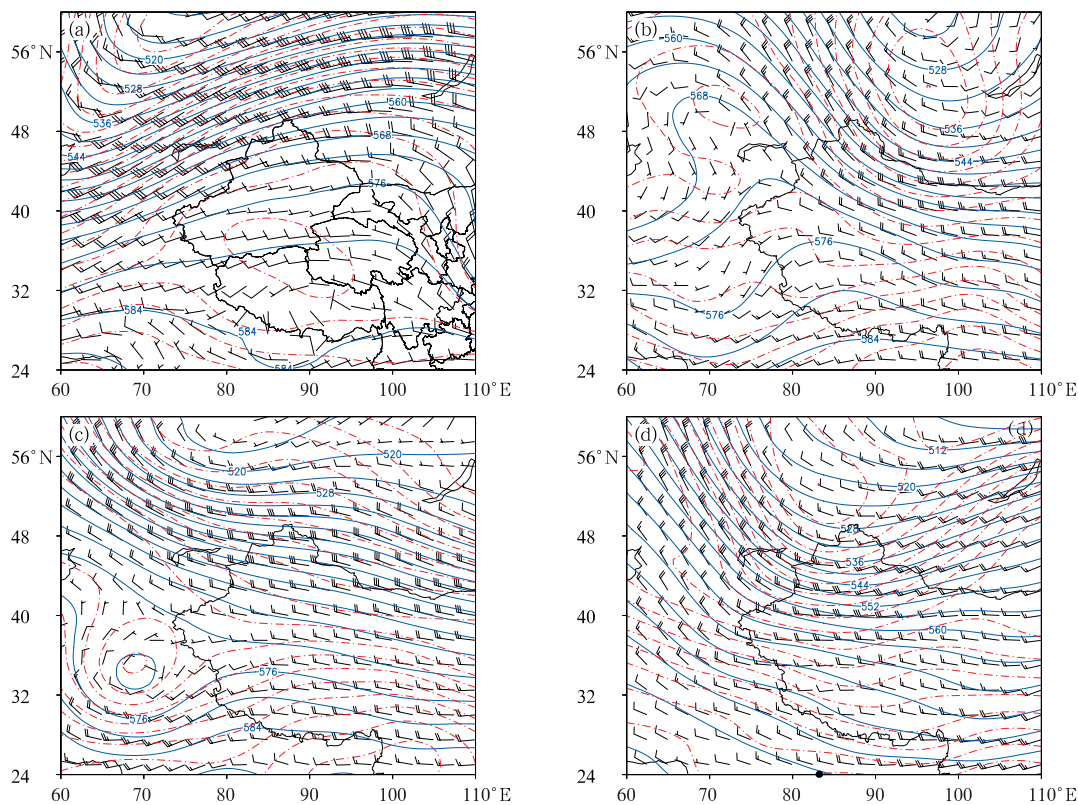


图 1 四次降雪过程 08 时 500 hPa 天气图(蓝线:等高线,单位:dagpm;红线:等温线,单位:℃;风羽)
(a)2015 年 11 月 1 日,(b)2015 年 11 月 30 日,(c)2016 年 11 月 11 日,(d)2018 年 12 月 1 日
(下同)

Fig.1 500 hPa synoptic chart of four snowfall processes

(blue line: contour, unit: dagpm; red line: isotherm, unit: ℃; barb)

(a) 1 November 2015, (b) 30 November 2015, (c) 11 November 2016, (d) 1 December 2018
(the same below)

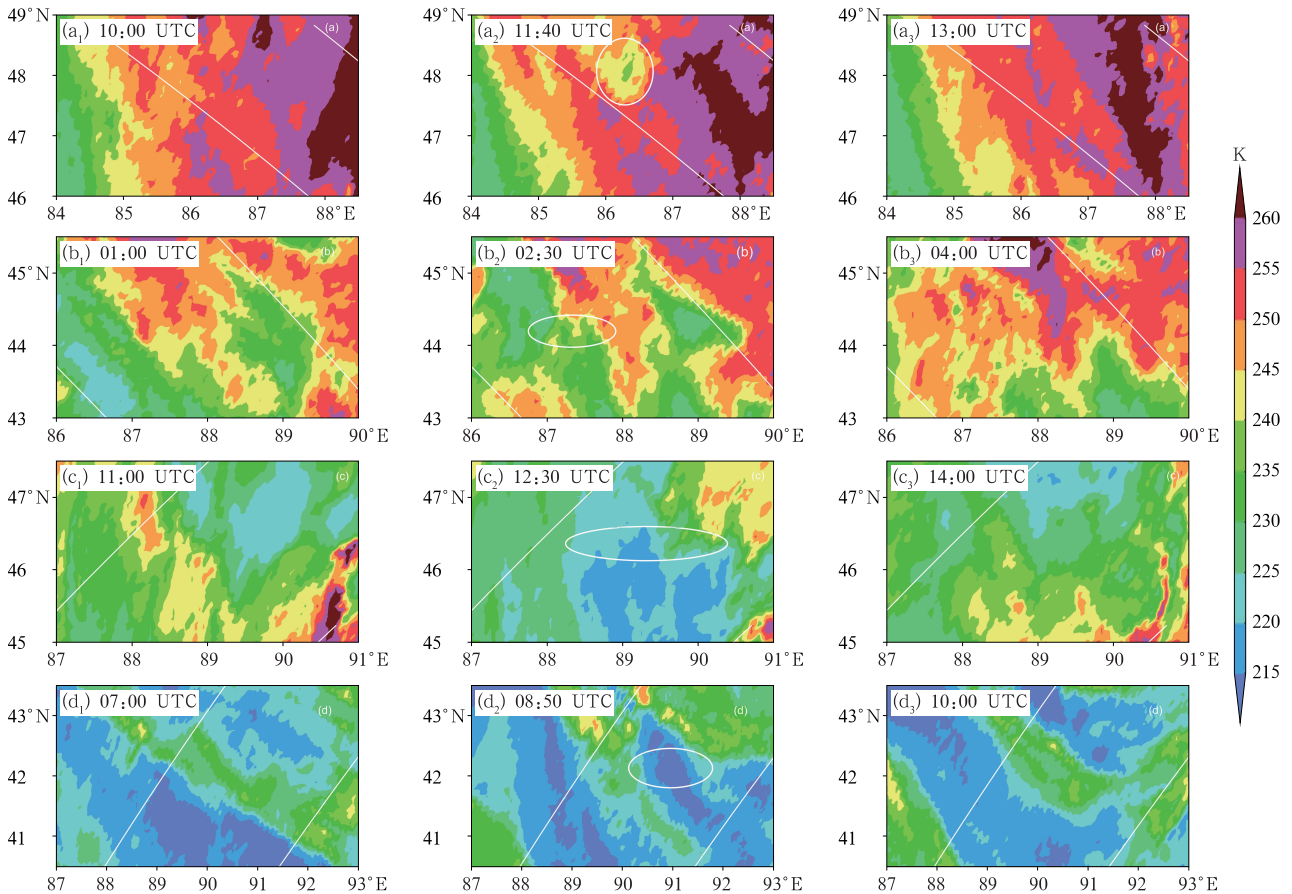


图 2 四次降雪天气过程的 FY-2E 云顶亮温演变

(a)2015 年 11 月 11 日 10—13 UTC, (b)2015 年 11 月 30 日 01—04 UTC,
(c) 2016 年 11 月 11 日 11—14 UTC, (d)2018 年 12 月 1 日 07—10 UTC

(白线为 GPM/DPR 雷达的观测轨道, 白圈为降水云团的空间位置)

Fig. 2 Evolutions of FY-2E cloud top brightness temperature in four snowfall processes
(a) 10:00—13:00 UTC 11 November 2015, (b) 01:00—04:00 UTC 30 November 2015,
(c) 11:00—14:00 UTC 11 November 2016, (d) 07:00—10:00 UTC 1 December 2018
(White line is the observation orbit of GPM/DPR radar,
and the white circle is the spatial position of precipitation clouds)

展成熟过程。即静止卫星的云顶亮温急剧下降, 然后几乎不变, 最后云顶亮温不断升高。DPR 扫描区域均出现了紧密的低亮温云团, 如图 2 中白圈所示, 这些云团的亮温主要分布在 215~245 K, 其中在图 2a 降水云内最低亮温 < 230 K, 且亮温 < 245 K 的云面积明显小于其前后 2 h, 同样在图 2b、2c 和 2d 降水云内最低亮温 < 225 K、< 215 K 和 < 215 K, 且亮温 < 240 K、< 225 K 和 < 215 K 的云面积明显小于其前后 2 h, 表明它们都属于典型的成熟阶段降水云。

2.2.2 回波顶高

回波顶高反映了降水系统发展的程度, 它与降水系统的动力与热力过程有关。回波顶高表示雷达

探测到的降水回波出现的最高位置, 可以反映降水云垂直方向的上升运动强弱变化。图 3 为四次降雪天气的回波顶高及近地表降水率-回波顶高散点分布情况, 从中可以直观地看出, 层云降水具有平缓的雨顶, 回波顶高分布相对比较均匀, 回波顶高多分布在 2.5~5.5 km。这与 Kulie et al(2016) 分别利用 GPM/KuPR 和 CloudSat/CPR 观测得出的结果, 即全球大约 98% 的降雪云的回波顶高度小于 5 km, 及吴琼等(2017) 研究发现 DPR 观测降雪云的回波顶高大多数小于 6 km 的研究结果较为一致。由图 3 可以发现四次降雪天气过程的回波顶高分布范围分别为 2.47~5.92、1.81~6.75、2.15~6.12 和 1.94~4.98 km, 平均高度分别为 4.16、3.60、3.49 和

3.55 km,四次过程的平均回波顶高为图 3a₁ 最大,图 3b₁、3c₁ 和 3d₁ 较为接近。四次过程降水强度大值区域的回波顶高主要集中在 3.0~4.5 km 的范围内,占比分别达到了 65.93%、62.99%、81.99% 和 85.04%,分析发现主要降水云类型为层状云,中云对降水率贡献最大。四次过程的近地表最大降水

强度为 4.7、4.6、2.36 和 2.74 mm · h⁻¹,所对应的最大回波顶高分别为 5.92、6.75、5.31 和 4.98 km,回波顶高与近地表降水强度强弱变化呈现出正相关的对应关系,存在雨顶越高、近地表降水率就越大的现象,降水强弱同时可能还与云内微物理过程有关。由于四次过程处于成熟阶段产生更多的地面降水,

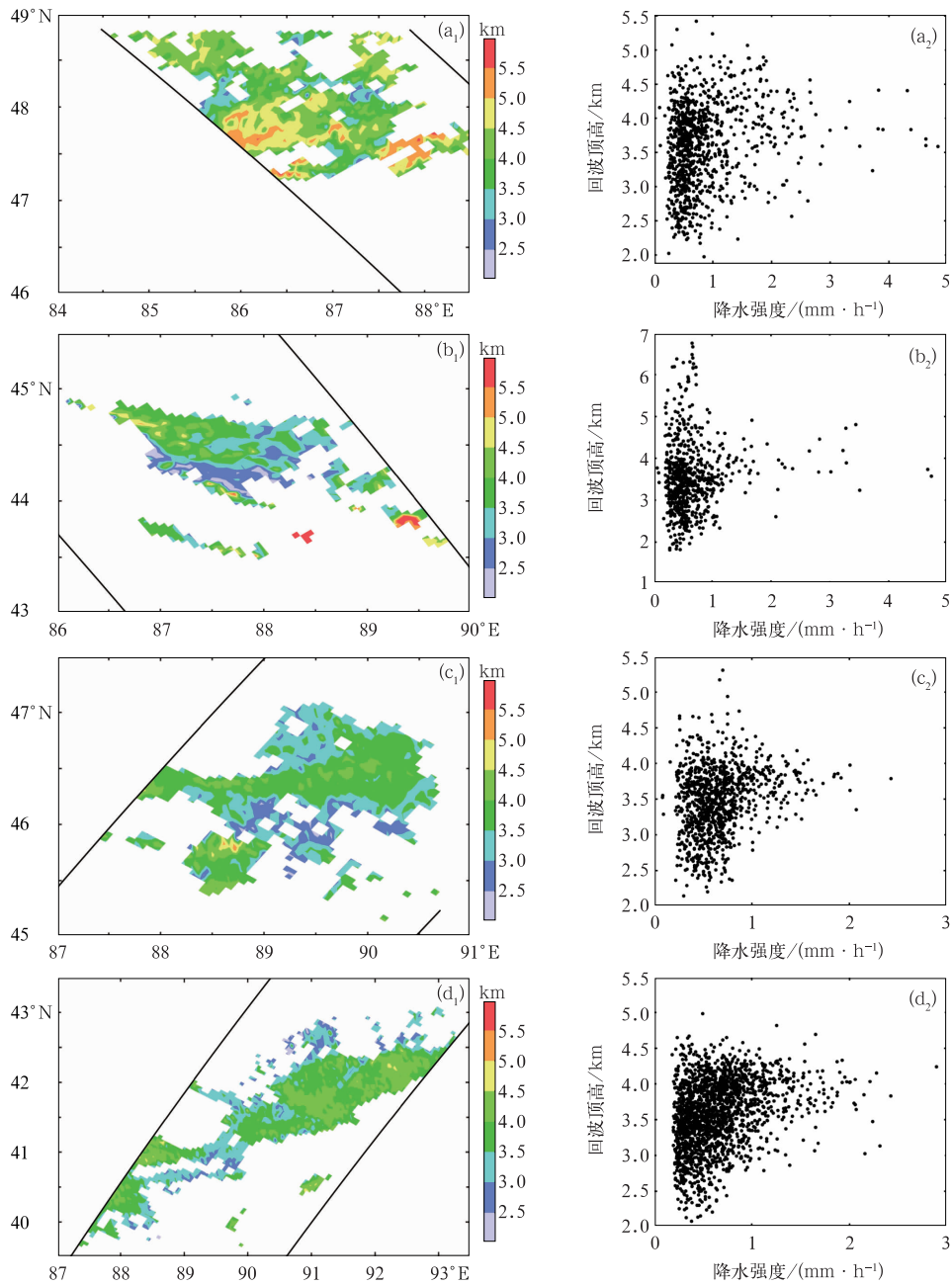


图 3 四次降雪天气过程的(a₁~d₁)回波顶高及(a₂~d₂)近地表降水强度-回波顶高散点分布 (黑线为轨道路径)

Fig. 3 (a₁—d₁) Echo top height and (a₂—d₂) near-surface precipitation intensity and echo top height scatter distribution of four snowfall processes (black line: track path)

同时成熟阶段强劲的向上气流将大量水分从下层带到上层,导致大量的大冰粒和雨滴,导致回波顶高相对较大,回波顶越高对应近地表降水粒径也越大,考虑到中高层云系统的运动,低层水气的输送以及降水垂直结构的变化,将这种现象的物理机制可以描述为“播种云”作用(Houze,2012)。

2.3 降雪的垂直结构特征

2.3.1 雷达反射率因子的 CFADs 分析

通常用统计雷达反射率因子随高度的频次分布(CFADs)的方法来表征降水的垂直结构特征,其做法是统计降水回波强度在各高度出现的频次(即高度与反射率因子的二维联合概率分布,简称联合概率分布),因此它反映了降水回波强度在垂直方向上出现的频次,以此来展示降水回波的垂直结构(Houze,2014)。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。因此,为了更深入地研究不同云系各层云的垂直结构,本文将 CFADs 方

法用于对云系垂直结构的研究,统计了不同强度雷达回波信号在各高度上占总样本数的概率。图 4 为四次降雪天气过程的雷达反射率因子的联合概率(CFADs)分布,图 4a 中个例降水回波强度最大为 35 dBz,其余三个个例为 30 dBz,但发生的概率都小于 0.1%,四个个例高于 0.4%的降水回波信号高度和雷达反射率因子出现范围分别是 1.88~4.38 km 和 17~24 dBz(a 个例)、1.00~3.75 km 和 18~24 dBz(b 个例)、1.00~3.88 km 和 16.0~24.5 dBz(c 个例)、1.25~3.75 km 和 16~25 dBz(d 个例)。分析发现个例 a、b 和个例 c、d 的 CFADs 图的外形具有相似性,显示出几乎相同的特征,降雪云垂直结构和微物理特征较为均一。前两个个例雷达反射率因子出现的高度更高,近地面雷达反射率因子更强,降水垂直结构 CFADs 较为深厚,其中 a 个例的雷达回波顶部高度比其他三个个例高 1 km 左右,这可能是由于较强的上升气流导致更多的冰粒悬浮在较高水平。总体上,北疆冬季降水回波的高度范围和雷达反射率因子范围分别为在 1.00~4.38 km 和

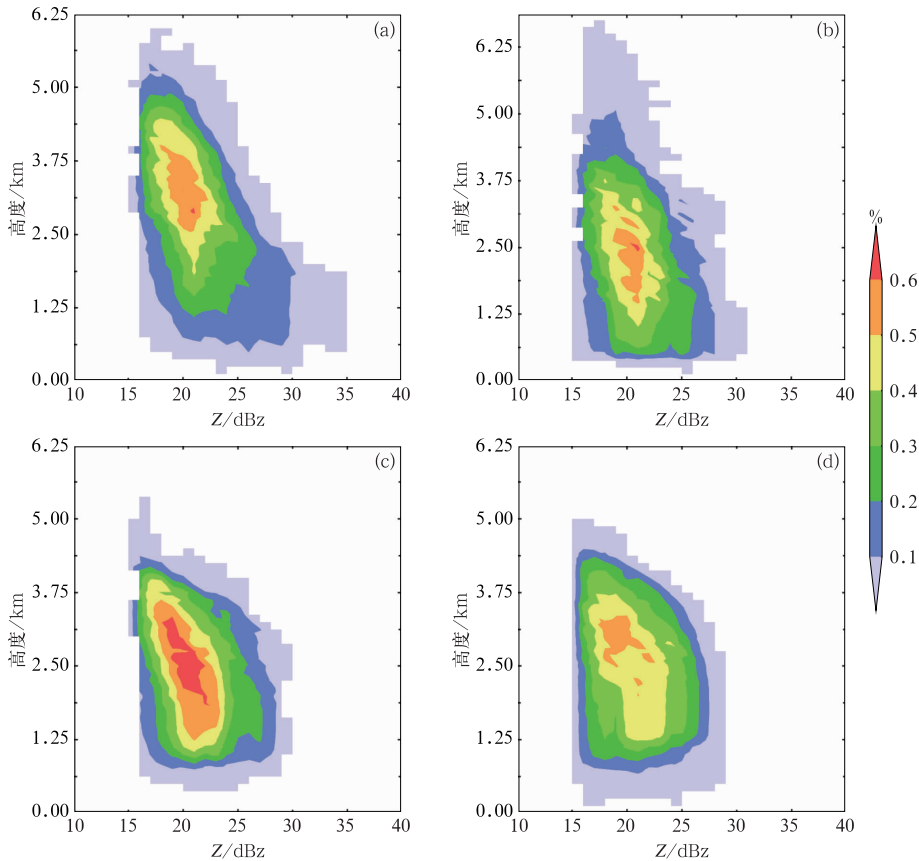


图 4 四次降雪天气过程的(a~d)雷达反射率因子 Z 的联合概率(CFADs)分布

Fig. 4 Distribution of joint probabilities (CFADs) of radar reflectivity factor Z in four snowfall processes (a—d)

16~35 dBz。随着高度的升高,反射率因子随高度减小,强度范围减小,其回波顶部高度不超过 6.75 km, a 个例和 b 个例的降水垂直结构较为深厚,近地表附近雷达反射率达到了 32~35 dBz, 强盛的向上气流将大量水汽从下层带到上层,导致大量的大冰粒和雨滴,并迅速产生高浓度的大粒子 (Yuter and Houze, 1995)。当这些更大、下落更快的冰粒下降后,雷达回波形成十分明显的垂直核心。

2.3.2 粒子谱和降水率 CFADs 分析

GPM 提供了降水的滴谱信息,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,对于降水反演而言,获取准确的滴谱信息有助于我们了解降水的微物理结构,准确构建雷达反射率因子和降水强度之间的经验关系式,从而提高降水估计的精度。Matrosov(1998)利用 Ka 和 X 双波段雷达反射率之间的对数差反演雪花的中值粒径 D_m ,估算的 D_m 以及 X 波段的雷达反射率因子通过 Z_e-R-D_m 关系反演

降雪量 R ,并分析了不同密度雪粒子的中值粒径与两个波段雷达反射率的关系。基于 GPM/DPR 观测,Liao et al(2016)通过探寻合适的散射模型和恰当的粒径分布(PSD)假设,研究了雪的微物理特征并估算了雪水含量、降雪量等参数,形成了直接链接反射率因子和雪水含量及降雪量的查找表。Iguchi et al(2017)编写的 GPM/DPR 观测数据二级算法中,是通过建立 Ka 和 Ku 两个波段的差分反射率因子 DFR 和雨滴谱的特征直径的查算表来进行雨滴谱的反演。

降水系统垂直结构上的滴谱参数[降水粒子的质量加权平均直径 D_m 和粒子数浓度 $dBN_w = 10\log_{10}(N_w)$]在各高度出现的频次,反映了其在垂直方向上的微物理特征变化及其生命周期。如图 5、图 6 所示为四次降雪天气(a~d 个例)降雪云的 D_m 和 dBN_w 的 CFADs 分布,a~d 个例的 D_m 分布范围在 0.76~3.00、0.56~3.00、0.78~2.73 和 0.75~2.33 mm,平均值在 1.09~1.10 mm; dBN_w

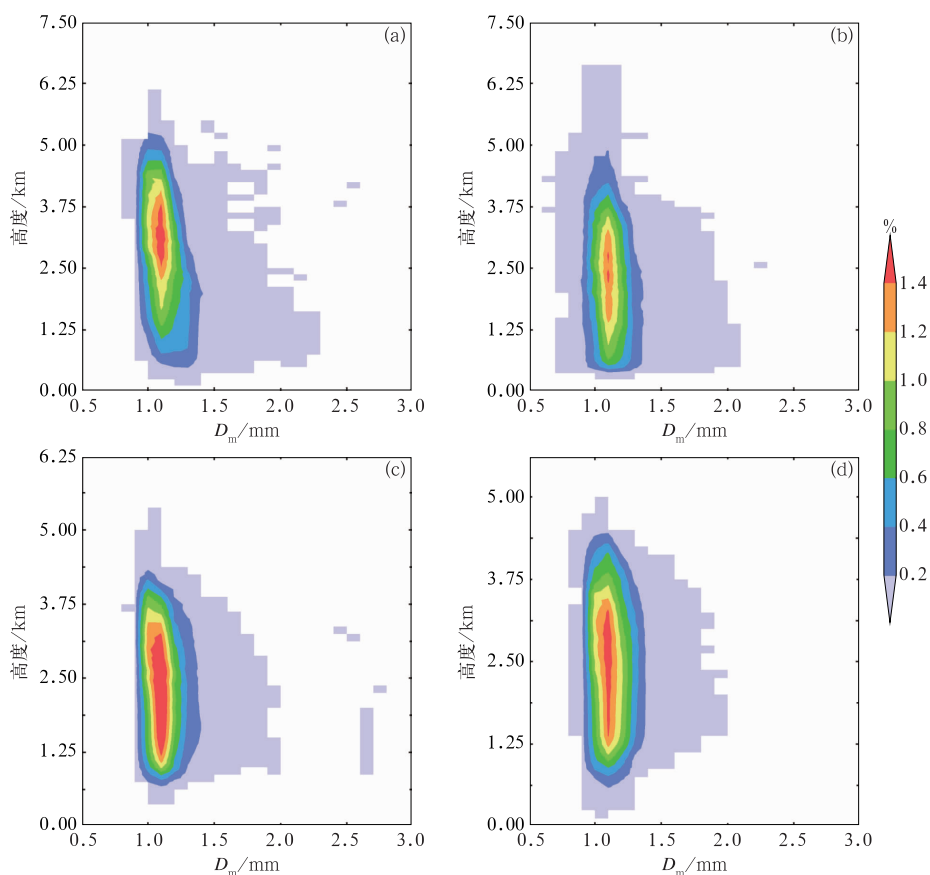


图 5 四次降雪天气过程的(a~d)质量加权平均直径 D_m 的联合概率分布

Fig. 5 Distribution of joint probabilities of mass-weighted average diameter D_m in four snowfall processes (a~d)

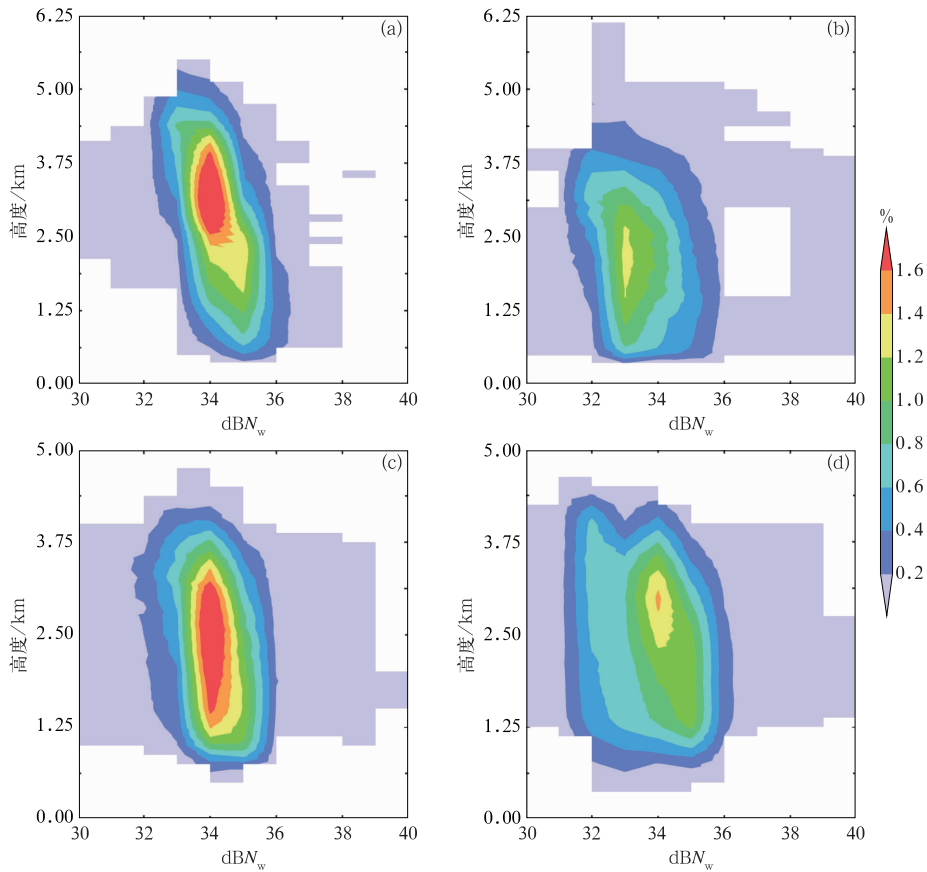


图 6 四次降雪天气过程的(a~d)粒子数浓度 dBN_w 的联合概率分布

Fig. 6 Distribution of joint probabilities of particle number concentration dBN_w in four snowfall processes (a~d)

分布范围在 5.78~42.86、7.90~51.43、6.00~39.60 和 13.35~41.10, 平均值分布在 32.90~33.42。分析发现 a 个例和 b 个例 D_m 的最大值达到了 3.0 mm, 分别是 c 个例和 d 个例的 1.09 倍和 1.29 倍, 前者的数浓度 dBN_w 值也明显大于后者, 对应于地表降水量也更大, 得出在层状云降雪过程中 D_m 和 dBN_w 数值大小与地表降水量呈现正相关特征。大于 0.2% 的 D_m 和 dBN_w 大值区域主要集中在 1.0~1.3 mm 和 31~36 范围内; 大于 1.0% 的大概率 D_m 和 dBN_w 分布的高度主要位于 1.25~4.00 km 和 0.63~3.75 km。a~d 个例中 D_m 的大值区分布在 1.0~1.2、1.1~1.25、1.1~1.2 和 1.0~1.1 mm; dBN_w 大值区集中在 33.0~35.0、32.0~33.5、33.5~35 和 33.5~34.5, 其中 a 个例和 b 个例滴谱参数的分布面积较大, 对应地面降水最多的也是 a 个例和 b 个例。Zagrodnik et al(2018)发现在奥林匹克山上有效的 D_m 和 dBN_w 配置会适度地增加降水, 并且大量小颗粒(较大的 dBN_w)容易发生碰撞和聚并以形成较强降水, 该理论与图 5、图 6

所示的结果非常吻合。结合图 3 中近地表降水率数据进行分析, 得出 D_m 为 1.01~1.25 mm 和 dBN_w 为 32~35 的配置产生的降水最多。北疆层云性降雪过程主要来自于大小较为均一的粒子组成, 并不是形成了更大尺度的云滴或雨滴。

总体上, 北疆冬季降水回波的 D_m 和 dBN_w 范围分别在 1.0~1.5 mm 和 32~36, D_m 和 dBN_w 大值分布的高度范围为 2.19~2.50 km 和 2.13~2.67 km, D_m 值随着降水粒子的下降而增大, 近地表附近 D_m 达到了 2.33~3.00 mm, 大于平均值 1.09~1.10 mm, 对应于地表由碰撞-聚合过程产生的大降水粒子较多, 大粒子的增多是产生层状云有效降水的重要微物理机制。

2.3.3 近地面降水率和降雪云剖面结构分析

利用 DPR 扫描轨道内的近地表降水强度数据, 能够对降水系统水平结构中相应的像素数量、降水面积和降水强度等进行定量分析, 文中所用 GPM 卫星数据基本覆盖了降雪过程的主要分布范围, 图 7 为四次降雪过程(a~d个例)的近地面降水率产品, 其中

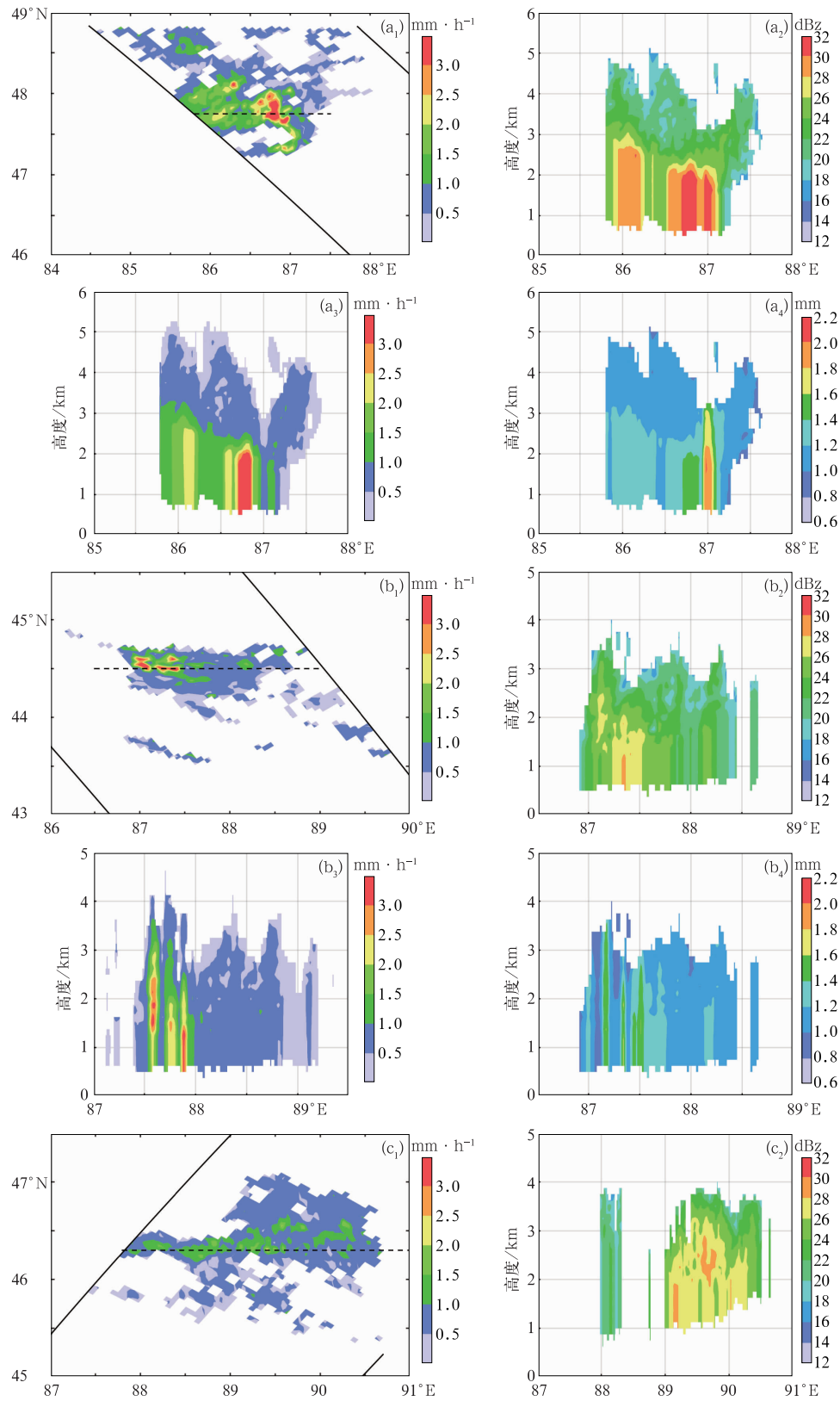
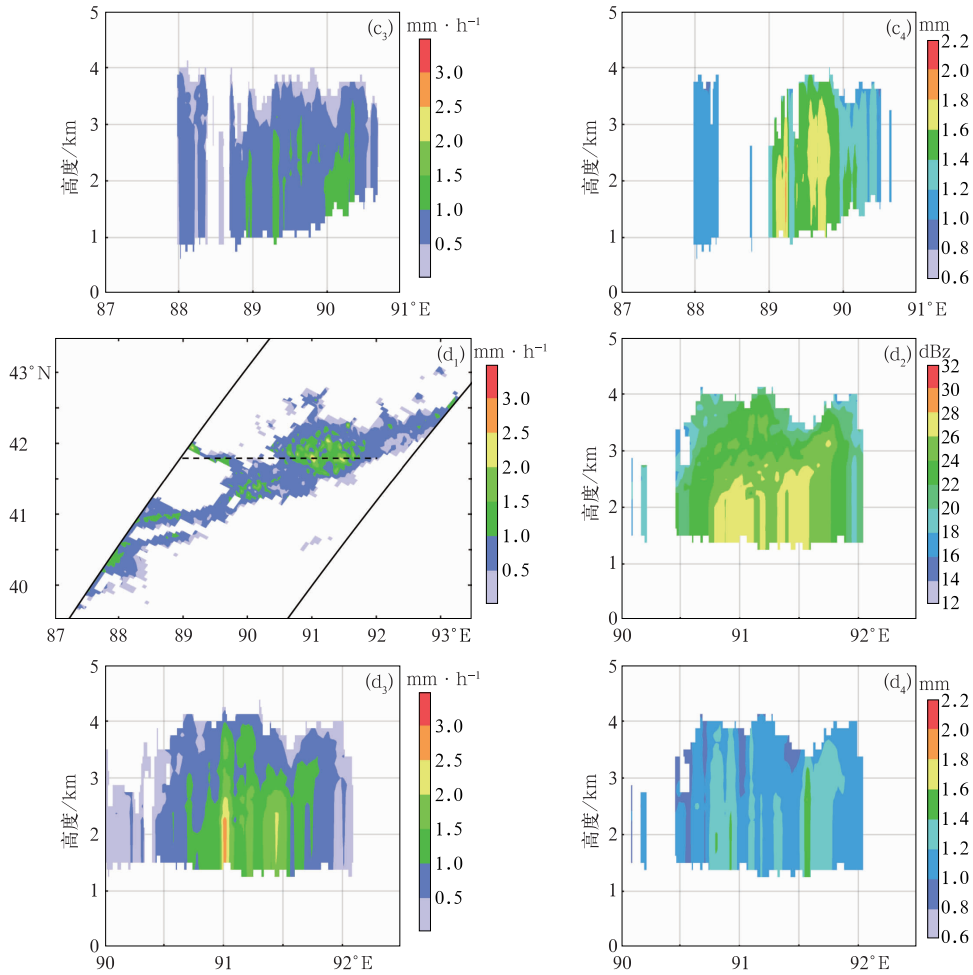


图 7 四次降雪天气的(a₁~d₁)近地表降水强度和(a₂~d₂)Z、(a₃~d₃)R 和(a₄~d₄)D_m 的沿纬度剖面 (对角线代表卫星观测的轨道路径,黑色虚线为剖面位置)

Fig. 7 (a₁ - d₁) Near-surface precipitation intensity at four moments and the latitude profiles along (a₂ - d₂) Z, (a₃ - d₃) R and (a₄ - d₄) D_m in four snowfall processes (a - d) (Diagonal line represents the orbit path of satellite observation, and black dashed line is the profile position)



续图 7
continued

a 个例和 b 个例降水率主要集中在 $0.09 \sim 4.70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.07 \sim 4.60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, c 个例和 d 个例降水率分布范围为 $0.07 \sim 2.36 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.18 \sim 2.74 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。通过分析降水强度的概率密度分布,四次过程的降水概率密度较为类似,在 $0.62 \sim 0.82 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 达到峰值。大部分区域降水率多分布于 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,说明四次过程的降水强度都不大,其所占比例分别为 62.39% , 47.08% , 62.5% 和 56.73% ,大于 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 其所占比例分别为 5.3% , 2.48% , 0.2% 和 0.49% 。

降水的剖面结构直观表征了降水云团的热力和动力特征。图 7 中同时给出了四个个例降雪云沿不同纬度的 Z 、 R 和 D_m 的垂直截面,这些截面对应于图中的黑色虚线位置。分析发现大多数雷达回波都在 5 km 以下,最大雷达反射率主要集中在 $3 \sim 3.5 \text{ km}$ 以下, Z 、 R 和 D_m 存在较好的对应关系。a

个例中 Z 的剖面显示在约 3 km 处出现了 Z 明显的增强 ($>32 \text{ dBz}$) 且反射率几乎恒定或朝着地面稍有增加,这可能与冰粒的沉积生长有关。同时在几乎相同的位置出现了粒子 $1.8 \sim 2.2 \text{ mm}$ 的粒子大值区域,冰粒子的浓度高于其他区域,这可能是由于聚集作用导致产生较大粒子,这些大粒子的出现极大促进了降水的发生,在这些位置降水率大于 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; b 个例中雷达反射率因子从 $2.0 \sim 2.5 \text{ km}$ 开始朝着地面单调增加,表明碰撞-聚并过程是主要从这个高度开始,在接近地面的位置出现了 Z 的峰值为 30 dBz ,对应该位置的 D_m 为 $1.4 \sim 1.6 \text{ mm}$,降水率大于 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 同样 c 个例和 d 个例的雷达反射率因子分别从 3.5 km 和 2.8 km 高度附近几乎恒定或朝着地面稍有增加,雷达强回波主要分布在 $26 \sim 30 \text{ dBz}$ 和 $26 \sim 28 \text{ dBz}$,对应强回波位置的 D_m 集中在 $1.6 \sim 2.0 \text{ mm}$ 和 $1.4 \sim 1.6 \text{ mm}$, R 剖面的降水量大

值区间为 $1.0\sim 1.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $1.5\sim 2.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

分析发现雷达发射率因子和雨量的变化趋势与雨滴直径增加有密切关系,表明当雨滴落下时,碰撞-聚并为主要过程。 D_m 随高度的变化主要介于 $1.4\sim 2.0\text{ mm}$,并且随着垂直方向高度的减小而保持不变。由于近地面云中聚并过程强于蒸发和破裂过程,在成熟阶段雷达反射率因子和降水率朝着地面恒定或略有增加。

3 结论与讨论

利用 GPM/DPR 双频降水雷达资料和 FY-2E 卫星观测到的新疆北部阿勒泰地区、乌鲁木齐地区和哈密地区四个成熟期的降雪过程资料,分析了云顶亮温、地表降水率、回波顶高、雷达回波强度和粒子滴谱的水平和垂直结构特征,得出以下结论:

(1) 四次降雪过程在 GPM/DPR 扫描区域均出现了紧密的低亮温云团,这些云团的亮温主要分布在 $215\sim 245\text{ K}$,它们属于典型的成熟阶段降水云。

(2) 四次降雪过程的降水概率密度峰值主要位于 $0.62\sim 0.82\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,大部分区域降水率多分布于 $0.5\sim 2.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,大于 $2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降水率所占比例分别为 5.30% 、 2.48% 、 0.20% 和 0.49% ,对应的回波顶高平均值分别为 4.16 、 3.60 、 3.49 和 3.55 km ,降水率大值区域主要集中在回波顶高为 $3.0\sim 4.5\text{ km}$ 范围,中云对降水率贡献最大,回波顶高与近地表降水率强弱变化呈现出正相关的对应关系。

(3) 降雪的 Z 强度范围多为 $20\sim 35\text{ dBz}$ 。随着高度的升高, Z 随高度减小,强度范围减弱,其回波顶部高度不超过 6.75 km ,其中两个个例的降水垂直结构较为深厚,近地表附近雷达反射率因子达到了 $32\sim 35\text{ dBz}$,相应产生的近地面降水强度也较强。

(4) 降雪的 D_m 和 dBN_w 范围多分布在 $1.0\sim 1.5\text{ mm}$ 和 $32\sim 36$, D_m 和 dBN_w 大值分布的高度范围为 $2.19\sim 2.50\text{ km}$ 和 $2.13\sim 2.67\text{ km}$ 。 D_m 值随着降水粒子的下降而增大,近地表附近 D_m 达到了 $2.33\sim 3.00\text{ mm}$,大于平均值 $1.09\sim 1.10\text{ mm}$,对应于地表由碰撞-聚并过程产生的大降水粒子较多,大雨滴的增多是产生层状云有效降水的重要微物理机

制。

本文利用主动式探测双频降水雷达对发生在新疆北部地区的四个成熟期降雪事件进行了分析。下一步工作将对降雪其他时期,如降雪初期、消散期的个例进行统计分析,进一步可将 GPM 降水观测资料与 ERA5 等再分析资料进行匹配和融合,对不同天气系统背景下的降水事件进行遴选归类后进行合成分析,丰富对新疆地区不同降水云垂直结构的认识,便于模式模拟中的参数化方案的选取和雷达反演地面降水算法的优化。

参考文献

- 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).
- 方勉,何君涛,符永铭,等,2019.基于 GPM 卫星降水产品对 1808 号超强台风“玛利亚”降水结构的分析[J].大气科学学报,42(6):845-854. Fang M, He J T, Fu Y M, et al, 2019. The precipitation structure for Super Typhoon “Maria” (1808) based on GPM satellite rainfall products[J]. Trans Atmos Sci, 42(6): 845-854 (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).
- 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).
- 李林蔚,官莉,2020.基于 GPM 卫星双频降水雷达的地面降雪识别算法[J].地球物理学进展,35(1):23-31. Li L W, Guan L, 2020. Surface snowfall identification algorithm based on GPM-DPR observations[J]. Prog Geophys, 35(1): 23-31 (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).
- 唐国强,万玮,曾子悦,等,2015.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,30(4):607-615. Tang G Q, Wan W, Zeng Z Y, et al, 2015. An overview of the global precipitation measurement (GPM) mission and its latest development[J]. Remote Sens Technol Appl, 30(4): 607-615 (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).
- 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).
- 张昇祺,傅云飞,2018. 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, 42(1):33-51. Zhang A Q, Fu Y F, 2018. The structural characteristics of precipitation cases detected by dual-frequency radar of GPM satellite[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):33-51(in Chinese).
- Adhikari A, Liu C T, Kulie M S, 2018. Global distribution of snow precipitation features and their properties from 3 years of GPM observations[J]. J Climate, 31(10):3731-3754.
- 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, 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]. Atmos, 11(6):619.
- Futyan J M, Del Genio A D, 2007. Deep convective system evolution over Africa and the tropical Atlantic[J]. J Climate, 20(20):5041-5060.
- 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 Oceanic Technol, 33(4):653-667.
- Houze R A Jr, 2012. Orographic effects on precipitating clouds[J]. Rev Geophys, 50(1):RG1001.
- Houze R A Jr, 2014. Cloud Dynamics [M]. 2nd ed. Oxford, UK: Elsevier/Academic Press.
- Iguchi T, Seto S, Meneghini R, et al, 2017. GPM/DPR level-2 algorithm theoretical basis document [EN/OL]. NASA. https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/algorithm/ATBD_DPR_V07A.pdf.
- 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.
- Kotsuki S, Terasaki K, Miyoshi T, 2014. GPM/DPR precipitation compared with a 3.5-km-resolution NICAM simulation[J]. SO-LA, 10:204-209.
- 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, Chandrasekar V, 2019. Ground validation of surface snowfall algorithm in GPM dual-frequency precipitation radar[J]. J Atmos Oceanic Technol, 36(4):607-619.
- Liao L, Meneghini R, Tokay A, et al, 2016. Retrieval of snow properties for Ku- and Ka-band dual-frequency radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 55(9):1845-1858.
- Matrosov S Y, 1998. A dual-wavelength radar method to measure snowfall rate[J]. J Appl Meteor, 37(11):1510-1521.
- 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, Kulie M, Milani L, et al, 2019. Satellite estimation of falling snow: A global precipitation measurement (GPM) core observatory perspective[J]. J Appl Meteor Climatol, 58(7):1429-1448.
- von Lerber A, Moisseev 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.
- Yuter S E, Houze 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 R A, 2018. Stratiform precipitation processes in cyclones passing over a coastal mountain range[J]. J Atmos Sci, 75(3):983-1004.

(本文责编:俞卫平)