

孙啸申,周学思,樊嵘,等,2023. 张家口2019年11月29日降雪天气的毫米波雷达和飞机观测分析[J]. 气象,49(8):958-971.
Sun X S,Zhou X S,Fan R,et al,2023. Analysis of a snowfall event at Zhangjiakou on 29 November 2019 based on Ka-band millimeter-wavelength radar and aircraft observations[J]. Meteor Mon,49(8):958-971(in Chinese).

张家口2019年11月29日降雪天气的 毫米波雷达和飞机观测分析^{*}

孙啸申 周学思 樊嵘 王晓青 张晓瑞 王梧熠 薛学武 李政昊

河北省人工影响天气中心,石家庄 050021

提 要: 结合毫米波云雷达数据和飞机观测数据,分析研究了2019年11月29—30日降雪云系的宏微观特征。此次降雪从29日14时持续至30日01时,受水汽输送影响,降雪量呈现增多—减少—再增多的趋势。云系的厚度变化明显,毫米波云雷达最大回波为25 dBz,地面小时降雪量大于1 mm的时刻与云雷达强回波(10~15 dBz)和大值谱宽出现的时间有较好的对应关系。云内冰晶转化和上升气流存在的高度在4 km以上,云雷达正的径向速度主要在降雪的前中期。飞机观测发现云内以冰晶为主,存在霰粒子和聚合体。冰晶在下落过程中,通过碰并、碰连和淞附等微物理过程增长,同时云雷达的径向速度和谱宽有所增加。飞机探测到大于500 μm 的冰晶时,云雷达回波强度大于0 dBz。在4400~4700 m,云雷达速度谱宽急剧变化。研究结果为进一步分析张家口地区冬季降雪云系的宏微观结构和增雪潜力提供了理论参考。

关键词: 毫米波云雷达,飞机观测,降雪,云宏微观特征,冰晶

中图分类号: P458,P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.071001

Analysis of A Snowfall Event at Zhangjiakou on 29 November 2019 Based on Ka-Band Millimeter-Wavelength Radar and Aircraft Observations

SUN Xiaoshen ZHOU Xuesi FAN Rong WANG Xiaoqing ZHANG Xiaorui

WANG Wuyi XUE Xuewu LI Zhenghao

Hebei Weather Modification Center, Shijiazhuang 050021

Abstract: A snowfall event occurred in Zhangjiakou in 29—30 November 2019. The snowfall clouds were thoroughly analyzed based on millimeter-wavelength cloud radar observations and aircraft observations to explore the macro- and microphysical characteristics of the clouds. This snowfall event lasted from 14:00 BT 29 to 01:00 BT 30. Restricted by moisture transport and supply, the ground precipitation showed an increasing—decreasing—increasing tendency. The vertical depth of clouds varied distinctly with time. The maximum reflectivity of cloud radar was 25 dBz. The recorded time with ground precipitation more than 1 mm corresponded well to the period that cloud radar detected high values of reflectivity (10—15 dBz) and spectral width. The growing ice crystals and updraft air flows mainly existed above 4000 m. Positive values of radial velocity detected by cloud radar were mostly in mid-to-early stages of snowfall. Ice crystals were the dominated particles within clouds according to the sounding of airborne probes. Besides, graupels and aggregated particles were captured. As ice crystals were falling, they grew up through the microphysical

^{*} 河北省省级科技计划(20375402D)和河北省气象局科研开发项目(20ky28)共同资助

2022年5月14日收稿; 2023年6月28日收修定稿

第一作者:孙啸申,主要从事大气物理和大气探测研究. E-mail: hugh.mathod@hotmail.com

通讯作者:樊嵘,主要从事大气物理和人工影响天气研究. E-mail: fanrongryb@126.com

processes of coalescence-collision and contact-freezing. Meanwhile the cloud radar observed magnitude of both radial velocity and spectral width were augmented. When ice crystals larger than $500\text{ }\mu\text{m}$ were detected, the reflectivity of cloud radar was greater than 0 dBz . In the heights $4400\text{--}4700\text{ m}$, spectral width of cloud radar dramatically changed. These results could further help understand and analyze the macro-and microphysics of winter snowfall clouds and snowfall enhancement potentials in Zhangjiakou Region.

Key words: millimeter-wavelength cloud radar, aircraft observation, snowfall, macro- and microphysics of cloud, ice crystal

引 言

云通过反射长波辐射和吸收太阳(短波)辐射,影响大气辐射传输过程,通过降水参与大气水循环,进而影响地球的气候(Zhao et al, 2014)。观测云的宏观和微观特征一直是气象研究中的重要话题,云底和云顶高度能够反映云的宏观特征,是影响辐射收支的重要参数,云的微物理特征直接或间接影响降水,在人工影响天气领域十分重要(吴翀等, 2017; 章文星和吕达仁, 2012; 辛乐和姚展予, 2011)。

自第二次世界大战以来,雷达逐渐开始在气象观测中推广应用(Kollias et al, 2007)。毫米波云雷达(35 GHz)最早由美国空军于 20 世纪 70 年代研发,用于观测云层边界、降水和融化层,该雷达不具备多普勒功能(Paulsen et al, 1970)。随着云雷达技术和硬件性能的提升,主要应用在地基(美国能源部 ARM 计划)、机载(W 波段)和星载(CloudSat 卫星雷达)方面(Kollias et al, 2007; 仲凌志等, 2009)。我国的毫米波测云雷达以 35 GHz 的 Ka 波段云雷达为主,广泛用于云和降水观测以及人工影响天气的研究。毫米波云雷达采用垂直指向探测得到的回波信息,能较好地给出云层的宏观特征。在低云观测上,尤其是在产生降水的天气情况下,毫米波云雷达的回波显示接地,无法给出具体的云底信息(李思腾等, 2015; 武静雅等, 2016)。在比较毫米波云雷达和探空数据发现,两个探测仪器探测到的云底吻合程度大于云顶的吻合程度(郝倚天等, 2018)。

刘黎平等(2014)采用毫米波云雷达的功率谱密度数据反演雨滴谱,论证米散射、空气上升速度和空气湍流对雨滴谱反演的影响,结果表明云雷达反演得到的雨滴谱分布和雨强与雨滴谱仪结果接近,但是云雷达探测到的小粒子更多。崔延星等(2018)融合毫米波云雷达、C 波段雷达和激光云高仪的数据,统计了 2016 年广东龙门夏季云系特征,发现云系顶

高等参数有明显的日变化。在青藏高原大气试验中,联合毫米波云雷达和多种地基观测设备,对西藏那曲夏季云系进行分类和特征总结,发现全年初生积云和层云常发生在 3 km 以上且存在上升气流(刘黎平等, 2015)。武静雅等(2022)利用 Ka 波段云雷达,通过统计和快速傅里叶变换方法,分析了 2019 年青藏高原西风槽、切变线和低涡系统观测到云的频率,以及云高、云厚日变化的时域和频域特征。丁虹鑫等(2018)联合微波辐射计和云雷达反演大气温度廓线,加入云雷达的反射率因子后,改善了温度廓线的可靠性。毫米波云雷达在降雪观测中应用较少,由于冰晶和雪晶的形状多变,仅靠回波强度反演冰水和液态过冷水含量的准确性还需要验证。王柳柳等(2017)利用云雷达谱数据,分析了冻雨和降雪过程中的空气垂直速度,计算得到平均粒子直径。李玉莲等(2019)从云雷达功率谱中获取云中过冷水的液态水路径,与微波辐射计的反演较为一致。张晋茹和杨莲梅(2019)利用毫米波云雷达数据得到了伊犁河谷两次降雪过程的宏微观特征,发现 1 km 以下的反射率因子与雪粒子下落速度和地面小时降雪量成正相关。陈羿辰等(2018)利用 Ka 波段云雷达分析降雪前后的宏微观变化,采用雷达回波强度估算雪粒子含水量,认为含量值 $0.04\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 可作为人工增雪的潜力值。黄钰等(2020)结合中尺度数值模式 WRF,分析北京延庆山区的一次降雪过程的宏微观特征,发现山区降雪以地形抬升作用为主,上升气流的存在有利于冰云的形成和发展,降雪的量级和冰雪晶形态与云水含量有关。飞机观测同地基观测一样,是研究云和降水微物理过程的重要工具,早在 20 世纪 80 年代初期就在我国开始应用(雷恒池等, 2008),能够获得云滴、水滴和冰晶的形状、尺寸和浓度、气溶胶的分布、云中的液态水含量,以及验证和完善数值模式中的云物理过程(郭学良等, 2021)。刘黎平等(2012)从毫米波云雷达中提取到垂直方向上粒子数浓度和液态水含量的变化,与飞

机探测得到的结果在量级和时间变化上一致。

张家口地区地势呈西北高、东南低的特点,阴山山脉横穿,冬季降雪受地形影响明显。地形抬升促进雪花的增长,山区的空气流动多变(风向改变、风切变)和水汽输送供给是否充足,都对山区降雪有重要影响(Nakai and Endoh, 1995)。2019 年 10 月,河北省人工影响天气中心在张家口观测站布设有 Ka 波段云雷达、激光云高仪、L 波段探空和自动气象站等设备,对降雪过程开展观测。本文基于毫米波云雷达,结合地面和飞机探测资料,分析 2019 年 11 月 29—30 日张家口地区降雪云系的宏微观特征,探讨降雪过程中的微物理过程。

1 仪器和数据

1.1 地基和飞机仪器

地基垂直观测设备均布设在张家口市观测站,观测站的海拔高度为 774 m。观测设备包括 Ka 波段云雷达、CL12 激光云高仪、自动气象站和 L 波段探空等,设备之间的直线距离不超过 10 m。

云雷达是由西安华腾微波公司生产的 Ka 波段雷达,采用固态发射机制,速度分辨率为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,回波强度精度小于 1 dBz,以垂直对空方式连续观测。云雷达的观测资料包括回波反射率因子(Z)、径向速度(V_r)、速度谱宽(S_w)和功率谱,数据的空间分辨率为 30 m,距离库数为 510 个,时间分辨率为 5 s。上升径向速度为正,下降径向速度为负。

云高仪选用的是北京聚恒博联科技有限公司生产的 CL12 激光云高仪,采用米散射激光雷达技术,每隔 1 min 探测大气的后向散射信号,计算输出云底高度和云层厚度,可统计云量,在天空模糊时可计算垂直能见度,最多能探测五层云。

飞机探测通过空中国王 350 飞机搭载的云物理探测系统。其中,云粒子成像仪(CPI)是由美国 SPEC 公司生产,可拍摄高精度的粒子图像,粒子的尺径范围在 $10 \sim 2000 \mu\text{m}$,可清楚地分辨出球形水滴和冰晶个体的形状和尺径(Baker and Lawson, 2006)。

1.2 毫米波云雷达的数据质控

云雷达工作频率为 35 GHz,脉冲重复频率为

5714.29 Hz,波长为 8.97 mm,采用脉冲压缩技术发射三种脉宽,分别为 $1 \mu\text{s}$ (不采用脉冲压缩)、 $5 \mu\text{s}$ 和 $20 \mu\text{s}$ 。每个脉冲通过 8 次相干积累以探测不同高度的云,三个脉冲对应的探测范围分别是 $150 \text{ m} \sim 1.2 \text{ km}$ 、 $1.2 \sim 3.6 \text{ km}$ 和 $3.6 \sim 15.7 \text{ km}$ 。由于探测各距离回波数据采用了三脉冲组合模式,因此在 1.2 km 和 3.6 km 两个高度的拼接处回波差异明显。

在 1.2 km 和 3.6 km 高度上下的数据拼接处,均探测到有效回波强度时,计算 1230 m 和 1200 m 以及 3630 m 和 3600 m 的平均回波强度差,对 1.2 km 以下和 1.2~3.6 km 的回波分别加上回波差值,进行拼接订正。

毫米波云雷达的回波强度衰减订正采用的是黄兴友等(2013)的逐库订正法,按照 $i=1, 2, 3, \dots$ 的顺序,沿雷达径向从最低探测高度向外对每一个距离库的回波强度进行衰减订正,见式(1)。

$$Z_r(i) = \left[\frac{Z_M(i)}{\tau_{i-1}} \right] \exp\{aZ_M^b(i)\Delta R\} \quad (1)$$

式中: Z_r 是毫米波云雷达订正后的回波强度, Z_M 是毫米波云雷达实际观测的回波强度, ΔR 是毫米波云雷达的探测距离库长度, a 和 b 为衰减订正系数,根据回波强度分为五个区间, τ 是毫米波云雷达两个探测距离库间的双程透过率,在不考虑回波衰减时($i=0$), $\tau=1$,当 $i \geq 1$ 时,计算如式(2)。

$$\tau_i = \tau_{i-1} \exp\{-2aZ_r^b(i)\Delta R\} \quad (2)$$

式中: a 和 b 根据张培昌和王振会(2001)提出的降雪关系系数,分别取 0.9381×10^{-9} 和 0.8749。

1.3 地面降雪量的反演

为验证毫米波云雷达的结果,通过回波强度和地面降雪量的关系,采用式(3)(Matrosov, 2007; Matrosov et al, 2008):

$$Z = 56 \times S^{1.2} \quad (3)$$

改写为(陈羿辰等, 2018):

$$S = 0.0349 \times 10^{0.08133Z} \quad (4)$$

式中: S 为地面降雪等效降水强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), Z 为云雷达的回波强度。

2 天气背景和水汽输送

2.1 天气背景

2019 年 11 月 29 日 14 时(北京时,下同) 500 hPa

高空槽处于蒙古中部至河套地区(图1),张家口地区处于高空槽前,配合低层切变线及低空显著西南气流影响,张家口地区比湿达到 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,地面场受低压系统控制,降雪过程开始。至29日20时,受东部高压脊影响,高空系统东移缓慢,张家口地区处于低层切变线右侧,且低层西南气流逐渐加强,有利于西南暖湿水汽进一步输送,相对湿度增大至90%以上,西来干冷空气与低层暖湿空气有利于强降雪产生,在20时前后张家口地区小时降雪量达到最大,到30日凌晨高空槽底部压至张家口地区,锋面系统逐渐移出,降雪过程趋于结束。

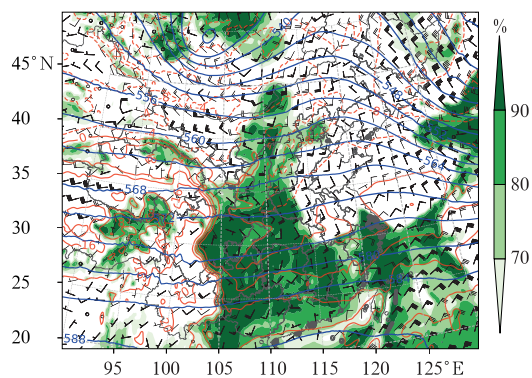
此次降雪过程从11月29日14时持续至30日01时(图2)。最大小时降雪量出现在29日19时,降雪量为1.3 mm,29日14时和30日01时的小时降雪量均为0.1 mm,29日15—24时平均小时降

雪量为0.87 mm。降雪期间气温持续下降,从14时的一3.5℃降至01时的一5.6℃。降雪开始后地面相对湿度在90%以上,地面气压变化不大。

2.2 水汽输送

降雪过程中,逐小时降雪量差距较为明显。水汽供给是否充分,直接影响降雪过程中云内冰晶的形态以及冰雪晶的转化,水汽条件差时,不利于大雪花的形成,降雪粒子会以冰晶形态降落到地面。冬季张家口地区干燥,日常观测的相对湿度在40%~50%,此次过程中,本地的水汽供给相对有限。水汽主要通过高空远距离输送,在高空槽和冷低压的控制下,西南气流输送水汽,是本次降雪持续较长时间的原因。而中高空输送的水汽在空间上是不连续的,大量的水汽在降雪初期被消耗,因此地面降雪量呈现增多—减少—再增多的趋势。

系统过境张家口地区,受山脉地形影响导致低层风被迫抬升,山谷间的局部沉降作用和对流有利于低层本地水汽的供给和输送(Geerts et al, 2015)。从张家口站的相对湿度时序图可以看出(图3),在11月29日13—15时,高空500~250 hPa有较强的上升气流,其最大值可达到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在此阶段,云雷达观测到回波顶高在8~9 km。高空槽配合地面低压,产生较强的上升气流。29日20时前后,张家口地区处于高空槽前正涡度平流区内,气旋性涡度增大产生(高空)水平辐散,补偿性上升运动增强,同时中低层西南气流显著增强,暖平流输送有利于垂



注:蓝线:500 hPa 等高线,单位:dagpm;
红线:850 hPa 温度,单位:℃;
风羽:850 hPa 风向风速;填色:850 hPa 相对湿度。

图1 2019年11月29日14时高空综合图

Fig. 1 Synoptic chart at 14:00 BT 29 November 2019

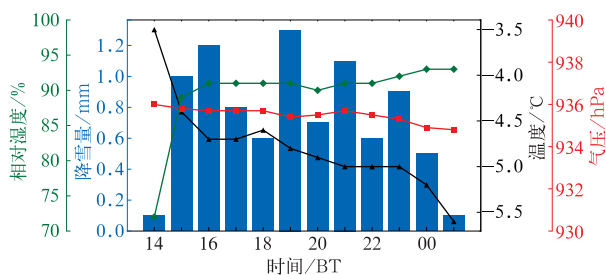
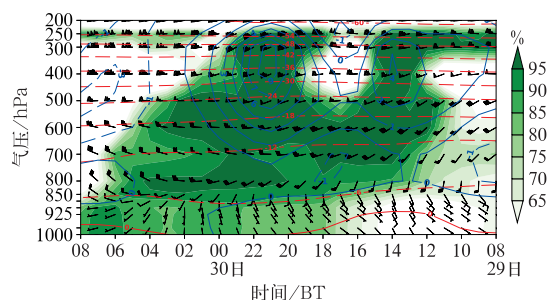


图2 2019年11月29日14时至30日01时
张家口气象站地面降雪量、温度、
相对湿度和气压

Fig. 2 Ground snowfall, temperature, relative
humidity and pressure at Zhangjiakou Station

from 14:00 BT 29 to 01:00 BT 30 November 2019



注:蓝线:垂直速度,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;红线:温度,
单位:℃;风羽:风向风速;填色:相对湿度。

图3 2019年11月29日08时至30日08时
张家口站高空时序图

Fig. 3 Upper-air time series of vertical velocity,
temperature, wind field, and relative humidity
at Zhangjiakou Station from 08:00 BT 29
to 08:00 BT 30 November 2019

直运动进一步发展,较强的垂直上升运动促使 20 时前后小时降雪量达到最大,而随着降雪过程中降水粒子不断凝结释放出潜热,又进一步促进了上升运动的发展。

3 降雪云系的宏观特征

张家口 29 日 20 时的探空结果表明(图 4),近地面 1000~850 hPa 存在东南—西南风切变,中高层的风向、风速相对稳定,低层逆温不明显。6 km 以下的相对湿度在 90% 以上,温度在 -5°C 以下,采用经验值相对湿度 90% 作为云的阈值,计算得到云底高度 840 m,云厚大于 10 km,云层中间有两个干层。此时云雷达探测的云顶高度在 5.6 km,7~8 km 探测到不连续的弱回波,最大值为 -20.5 dBz 。降雪造成激光衰减严重,云高仪未探测到高云,而底层的云底高度在 300 m 左右。29 日 11—14 时,云雷达和云高仪均探测到云底时,云高仪的云底高度比云雷达平均高 194 m。

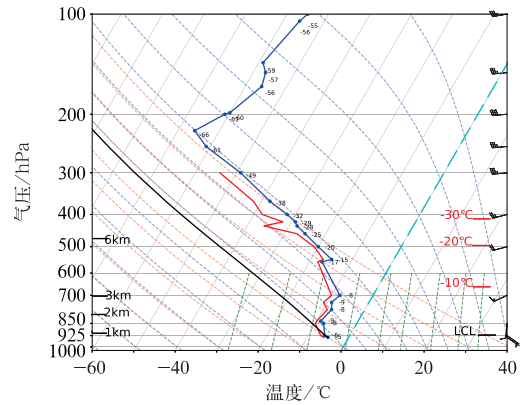


图 4 2019 年 11 月 29 日 20 时张家口探空曲线

Fig. 4 $T\text{-ln}p$ diagram at Zhangjiakou

Station at 20:00 BT 29 November 2019

3.1 毫米波云雷达回波强度的演变特征

降雪期间,云雷达回波显示全程接地(图 5a), 30 日 01 时回波开始消散,与地面降雪结束的时间一致(图 2)。降雪开始前,云雷达回波底部显示在

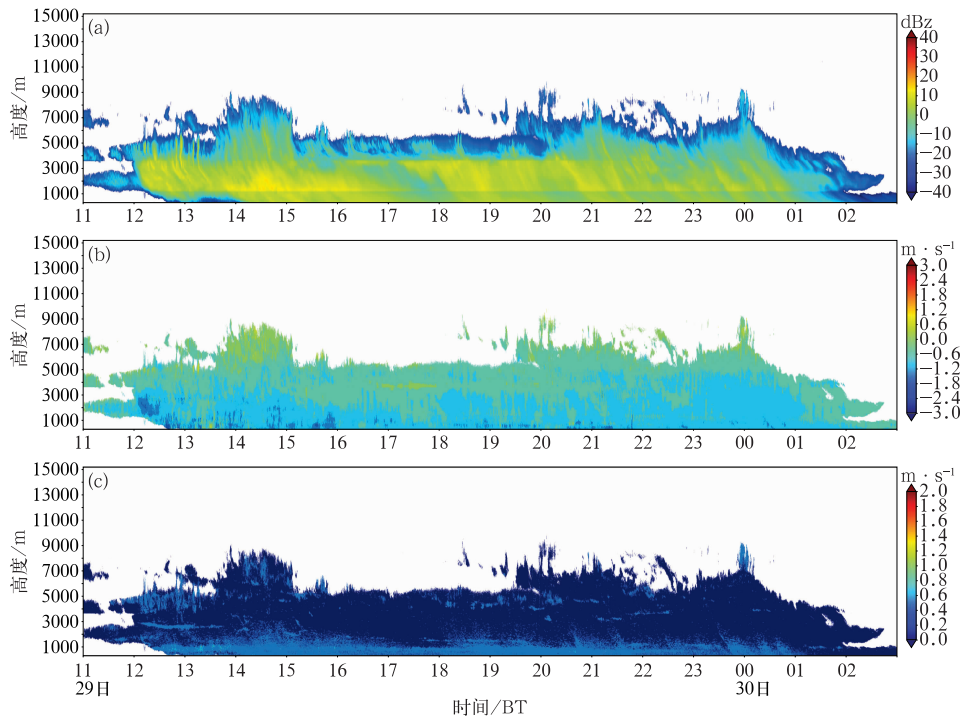


图 5 2019 年 11 月 29 日 11 时至 30 日 03 时毫米波云雷达质量控制后的

(a) 回波强度, (b) 径向速度和 (c) 谱宽

Fig. 5 (a) Cloud radar reflectivity, (b) radial velocity,

(c) spectral width from 11:00 BT 29 to

03:00 BT 30 November 2019

1~2 km左右的高度(接近850 hPa),云雷达观测到三层云系,高云云顶在7~8 km。29日13:30左右,云雷达回波开始接地,降雪开始,最大回波强度为14 dBz,在2.3 km的高度,回波顶高约为6.5 km。从图3可以发现,高层受西南气流影响,29日12—16时张家口上空的水汽充足,700 hPa以上有上升气流,最大值为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,上升气流有助于水汽的垂直输送,促进云系的垂直发展,在15时左右云雷达的回波顶高达到最大,接近9 km,6 km以上正的径向速度和谱宽分别达到 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。云系的垂直发展,云雷达的径向速度和谱宽的增强,证明了水汽凝华生成冰晶以及冰晶的聚合增长。30日01时回波消散,降雪结束,到02—03时近地面云雷达虽然观测到弱回波,但无法确认为云,可能与大气中水汽增多有关。

此次降雪过程云系的厚度变化明显,降雪期间回波最大值为25 dBz,较强的回波在10~15 dBz的范围,地面小时降雪量与云雷达强回波区域出现的时间一致。当地面小时降雪量大于1 mm时(15—16、18—19和20—21时),大于10 dBz的回波向下可延伸到地面,向上延伸到3~4 km。当降雪量小于1 mm时,大于10 dBz的回波区域减少,向上延

伸的高度变化不大,但是向下延伸在1~2 km左右。

3.2 地面降雪量的反演结果

近地面云雷达谱宽值的变化较小,降雪过程以干雪为主。29日20时,探空得到的云底高度为840 m,因此选取300、600和900 m的云雷达回波强度,反演计算降雪强度(表1)。在整个降雪时段,毫米波云雷达反演降雪强度小于地面观测的小时降雪量,600 m回波反演的降雪量与实际观测的小时降雪量的相关系数最大,最接近实际降雪量。

反演降雪量的差异主要表现在降雪的前期和后期,相差最大的时间段分别为29日15—16时和23时(图6)。在降雪前期,冰雪晶转化和液态水的输送最为频繁,云雷达的回波强度随高度变化明显,900 m回波反演的降雪量大于实际观测的降雪量,而300 m的结果远小于观测值。在降雪后期,水汽消耗殆尽,不利于冰晶的增长,雪晶尺径变小,云雷达回波减弱。三个高度的累计反演结果均小于实际降雪量,降雪后期由于云内过冷水不足,降雪中夹杂大量冰晶,因此经验公式的结果偏低。

表1 2019年11月29日14时至30日01时300、600和900 m高度
云雷达反演小时降雪量和地面降雪量的统计关系

Table 1 Statistical results of ground snowfall derived from cloud radar at altitude
300, 600 and 900 m from 14:00 BT 29 to 01:00 BT 30 November 2019

统计结果	云雷达		
	300 m	600 m	900 m
相关系数	0.8063	0.9094	0.8097
降雪小时平均值/mm	-0.2117	-0.1084	-0.0667
累计降雪差值/mm	-2.54	-1.30	-0.80

3.3 径向速度和谱宽的演变特征

毫米波云雷达探测到的径向速度,只有在云内粒子下落速度可以忽略的时候,可近似作为空气垂直速度。29日18时前后800~700 hPa(2~3 km)出现下沉气流(图3),云雷达有向下的径向速度,地面小时降雪量也达到最大。在中高层(3 km以上),云雷达正的径向速度可视为垂直上升气流存在。

29日14时前后,云雷达在1.2 km以下探测到正的径向速度,与上升气流有关(图3)。29日15—16、19—20和21—22时三个时间段均出现大的谱

宽值,垂直高度有明显的大值谱宽带,可延伸到2 km以上,这与地面小时降雪量最大的三个时段相对应,该时段内云内液态水充足,有利于冰晶转化为雪晶。

径向速度的上升气流主要存在降雪的前中期(图5b),分别为29日13—16时和29日17—18时。在降雪前期,低层1 km以下(29日14时前后)和高层4 km以上(29日13—16时)存在明显的正径向速度,云雷达回波向上发展云系最厚,14时之后云顶高度9 km。29日13—14时,1 km以下云雷达速度谱宽最大,最大值为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。降雪前期

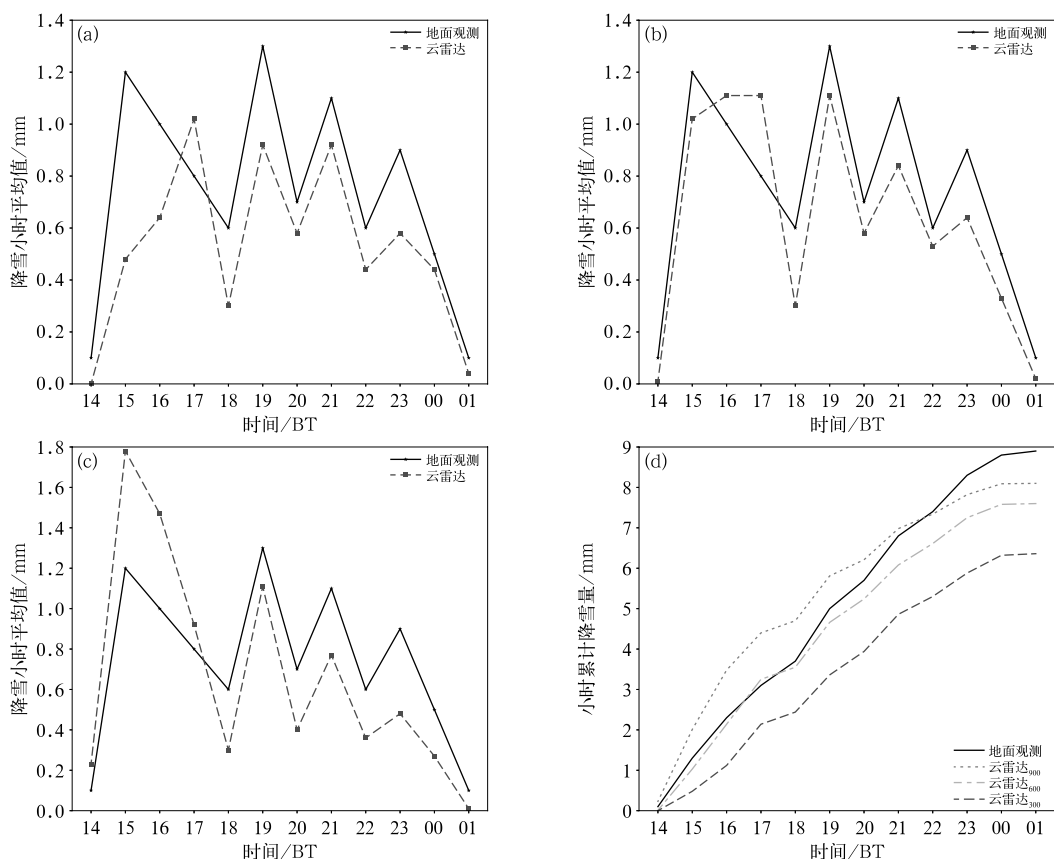


图 6 2019 年 11 月 29 日 14 时至 30 日 01 时 (a) 300 m, (b) 600 m, (c) 900 m 高度云雷达反演小时降雪量和 (d) 云雷达反演与地面观测逐小时累计降雪量的变化
Fig. 6 Retrieved hourly snowfall from cloud radar at altitudes (a) 300 m, (b) 600 m, and (c) 900 m, and (d) the hourly accumulation comparison to observation from 14:00 BT 29 to 01:00 BT 30 November 2019

的垂直径向速度和谱宽变化大, 上升气流的存在有利于水汽的垂直输送, 径向速度增大表示冰晶下落, 在水汽充足条件下, 水汽凝华以及冰晶碰并增长产生雪花(黄庚等, 2007), 雪花落到地面形成降雪。

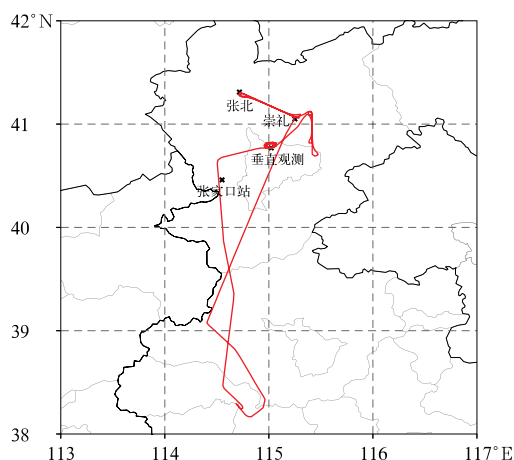
降雪前期, 中层径向速度为下沉气流, 回波强度、径向速度和谱宽的增强, 表明粒子下落速度增大, 冰晶在下落过程中碰连增长。29 日 16—23 时, 冰晶一直下落增长成为雪花落到地面, 水汽的消耗会使之后的冰晶增长受限。受雪花下落的影响, 低层的上升气流逐渐消失, 最大下落速度在 1.2 km 以下, 在 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 波动, 谱宽整体小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。29 日 17—18 时 4 km 左右出现上升气流, 600~500 hPa 的相对湿度在 95%~100%(图 3), 高空水汽的存在促使冰晶不断增长, 这也是 4 km 处云雷达谱宽较高的原因。29 日 23 时至 30 日 00 时, 粒子下落的区域垂直方向连续且宽广, 向上延伸到 5 km, 回波顶高达到 9 km, 高层存在较强的上升气

流, 最大值为 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与该时段的地面降雪增加相对应。

4 降雪云系的微观特征

4.1 飞机观测结果

在张家口站, 通过显微镜对下落地面的冰雪晶随机采样, 拍摄到的冰雪晶集中在降雪的中期阶段(29 日 17—21 时)。20:30:55—20:46:48, 空中国王 350 飞机在张家口上空 3300~6000 m 的高度开展垂直探测(图 7), 之后在崇礼和张北两点之间平飞探测, 高度层包括 3300、3600、3900 和 4200 m, 结果包括温度、湿度、云粒子探头(CDP)液态水含量、CDP 粒子浓度, 云粒子图像探头(CIP)粒子浓度和降水粒子谱仪(HVPS)粒子浓度(图 8), 机载 CDP、CIP 和 HVPS 的探测范围分别是 2~50、100~1550



注:张家口站为地面设备观测,垂直观测点在张家口站的东北方向,崇礼和张北两点之间平飞探测。

图7 2019年11月29日国王350的飞行轨迹
Fig. 7 Flight track of the aircraft King Air 350 on 29 November 2019

和 $150 \sim 47075 \mu\text{m}$ 。根据 Lawson et al (2006) 和 Lindqvist et al (2012) 的定义,对地面显微镜和机载 CPI 拍摄到的冰雪晶分类,包括板状、子弹状、柱状、玫瑰状、聚合体和不规则状等,球形则定义为液滴或液态水。

29日20:30—21:30,地面观测到的雪晶以板状和六角雪花为主(图略),地面温度在 -5°C 左右,相对湿度在90%以上;机载 CPI 拍摄到的冰晶有板状、柱状、玫瑰状和不规则状(图8),小冰晶的数量多,存在不规则霰粒子和聚合体,冰晶有粘连现象。飞机探测期间温度在 -10°C 以下,相对湿度在80%以上,云内以冰晶为主,CDP 液态水含量最大值仅为 $0.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,冰晶粒子主要分布在小于 $100 \mu\text{m}$ 的区间。从29日20时探空来看,3 km 和6 km 左右的水汽条件较好,而飞机垂直探测区间较为干燥(700~500 hPa)。20:00 开始,在850 hPa (1.5 km

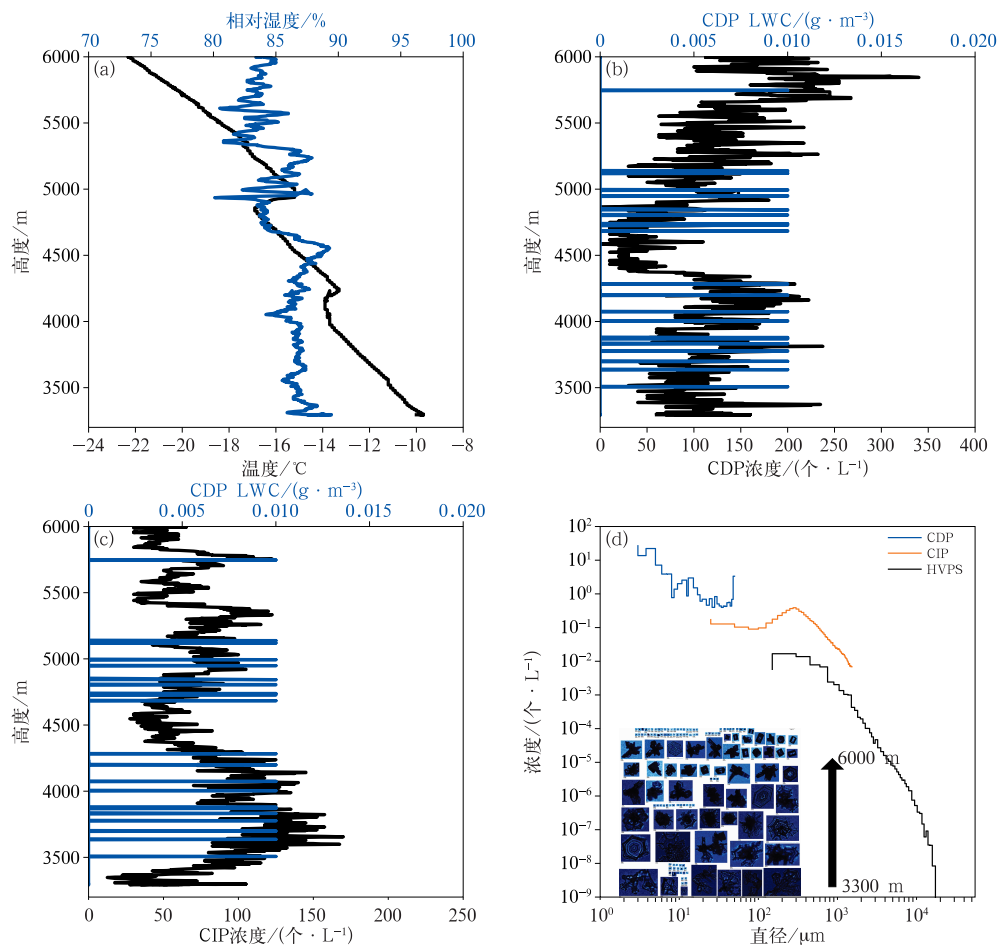


图8 2019年11月29日20:30:55—20:46:48飞机垂直探测结果

(a) 温度和相对湿度, (b) CDP 粒子浓度和 CDP 液态水含量, (c) CIP 粒子浓度和 CDP 液态水含量, (d) CDP、CIP、HVPS 粒子谱分布和 CPI 粒子图像

Fig. 8 Vertical sounding results of (a) temperature and relative humidity, (b) particle concentration and LWC from CDP, (c) particle concentration from CIP and LWC from CDP, and (d) particle spectrum distribution from all probes combined with images captured by CPI from 20:30:55 BT to 20:46:48 BT 29 November 2019

左右)左右风向偏转,700 hPa(3 km 左右)以上有较强的上升气流(图 3),云雷达也观测到正的径向速度,此时毫米波云雷达的顶高在 7 km 以上,20:30 后 3 km 以上回波整体增强,持续到 22:00 左右。温度随着高度的增加减小,6 km 高度的相对湿度小于 3 km。在飞机探测的低层和高层,CDP 粒子浓度更大,CIP 粒子浓度在低层最大,CDP 粒子浓度在高层最大。CPI 拍摄的云内粒子多为冰晶,低层冰晶有粘连现象,存在液态水、板状和玫瑰状冰晶聚合体,以及正在增长的雪晶,接近 6 km 的高度则为板状、柱状、玫瑰状等小冰晶(图 8)。根据 Lawson et al(2006)对混合云中不同冰晶形状尺径的划分,玫瑰状的尺径大于其他形状冰晶,这与探测到的 CDP 和 CIP 数据结果一致。

飞机平飞探测结果表明(图 9),3300 m 高度处的冰晶粒径和数浓度比 4200 m 高度处的大,尤其是 500 μm 以上范围的大粒子。随着粒子尺径增加,4200 m 的 HVPS 粒子浓度下降明显,尤其是 500~1000 μm 的大粒子,其浓度在 3300 m 几乎维持在 10^{-2} 个 $\cdot \text{L}^{-1}$,而 4200 m 降到 10^{-3} 个 $\cdot \text{L}^{-1}$,小于 100 μm 的粒子在 4200 m 的浓度更高。CPI 拍摄的粒子能直接反映冰晶的变化和相应的微物理过程,在 3300 m 时,CPI 拍摄到冰晶增长转化为雪晶

主要通过碰并和碰连过程,液态水和聚合体的存在证明了淞附的发生;在 4200 m 时,冰晶的形状多为玫瑰状、柱状和板状,玫瑰状聚合体和小雪晶很少,液态水更少。飞机垂直探测期间,云雷达在 4200~4800 m 有负的径向速度(图 5b),谱宽增加,冰晶在下落过程中增长,这一高度层粒子尺径变化最大,CPI 拍摄到的粒子随高度变化明显(图 8),在接近 6 km 的高度多为小冰晶,尺径小于 100 μm ,在粒子下落过程中,接连出现大的冰晶粒子、聚合体和正在增长的雪晶。飞机平飞探测期间,云雷达的径向速度在 3~5 km 增加,谱宽在 3.6 km 上下增加,在液态水存在的同时,冰晶转化为雪晶,雪晶进一步增长下落。

4.2 毫米波云雷达的微物理响应

借助飞机的探测结果,进一步研究毫米波云雷达能否体现这些微物理过程。选取毫米波云雷达 29 日 20:30—21:30 的探测结果,比较 3300 m 和 4200 m 的回波强度、径向速度和谱宽(表 2)。在此时段内,3300 m 的回波强度整体大于 4200 m 的回波强度,两个高度的径向速度均为负值,谱宽的最大值均为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但 4200 m 的谱宽仅有一个时刻为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其余均为 $0.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

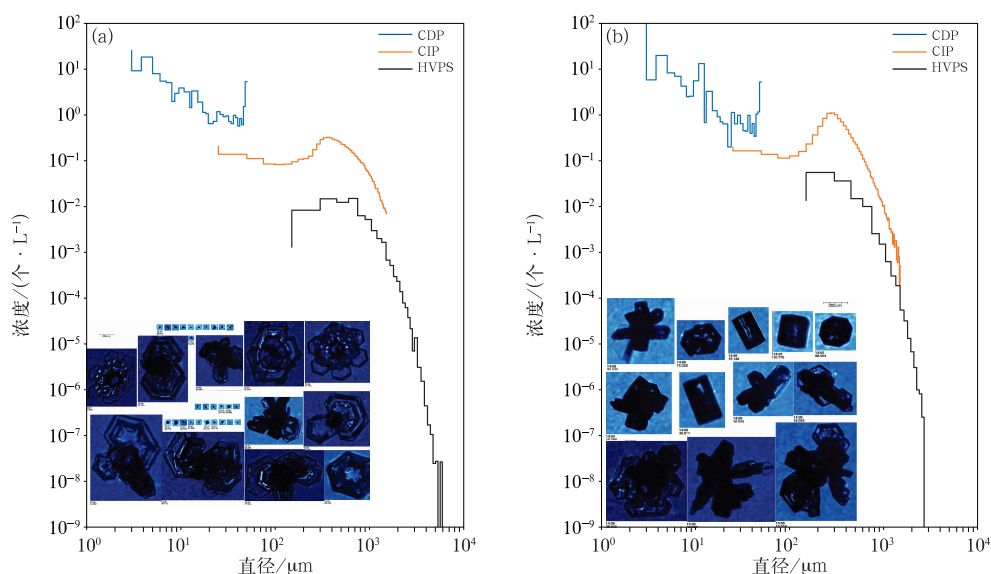


图 9 2019 年 11 月 29 日飞机在(a)3300 m(21:35:09—21:44:18)和
(b)4200 m(22:05:09—22:11:48)高度探测到的 CDP、CIP、HVPS
粒子尺径分布和 CPI 粒子图像

Fig. 9 Particle size distributions from CDP, CIP and HVPS and particle images from CPI
at altitudes (a) 3300 m (21:35:09—21:44:18 BT) and (b) 4200 m (22:05:09—22:11:48 BT)
observed by aircraft between Chongli and Zhangbei on 29 November 2019

表 2 2019 年 11 月 29 日 20:30—21:30 在 3300 m 和 4200 m 高度云雷达和飞机探测结果比较

Table 2 Comparison of cloud radar and aircraft results at altitudes 3300 m and 4200 m from 20:30 BT to 21:30 BT 29 November 2019

云雷达和飞机结果	3300 m	4200 m
Z 范围/dBz	-4.0~5.5	-7.5~4.0
V _r 范围/(m·s ⁻¹)	-1.5~0.0	-1.0~-0.5
S _w 最大值/(m·s ⁻¹)	0.5	0.5
典型粒子尺径/ μ m	>500	<500
典型粒子形状	聚合体、粘连冰晶	玫瑰状、柱状和板状
微物理过程	碰并、碰连、淞附	/

在 3300 m 高度,大尺径的冰晶浓度要大于 4200 m 高度的(图 9),尤其是 500 μ m 以上的冰晶粒子,云雷达的回波强度 90%以上在大于 0 dBz 的区间(图 10),而在 4200 m 的高度上,回波强度 87%以上在小于 0 dBz 的区间,可以推测回波强度的强弱与粒子的大小有直接的联系,回波强度大于 0 dBz 可作为大粒子存在的参考。两个高度的径向速度均为负值,3300 m 高度的径向速度在 $-0.5\sim 0.0$ m·s⁻¹ 的时段占比近 60%,4200 m 全部在 $-1.0\sim -0.5$ m·s⁻¹。4200 m 多为小于 500 μ m 的冰晶,

下落速度更为统一,3300 m 大于 500 μ m 的粒子增多,下落速度有较明显差异,既有 0.0 m·s⁻¹ 值,也有大的负径向速度。冰晶的形状、直径和微物理过程对冰晶下落速度均有影响,此次冷云降雪以冰晶为主,在 3300 m 高度小冰晶的浓度仍大于 150 个·L⁻¹(图 8b),更大的负径向速度表明冰晶依然在下落增长。3300 m 高度出现谱宽大值,而 4200 m 则几乎均为 0.0 m·s⁻¹。总体而言,探测到大于 500 μ m 的冰晶,云雷达回波强度大于 0 dBz。当大小冰晶共存时,冰晶下落和冰晶增长,在云雷达径向

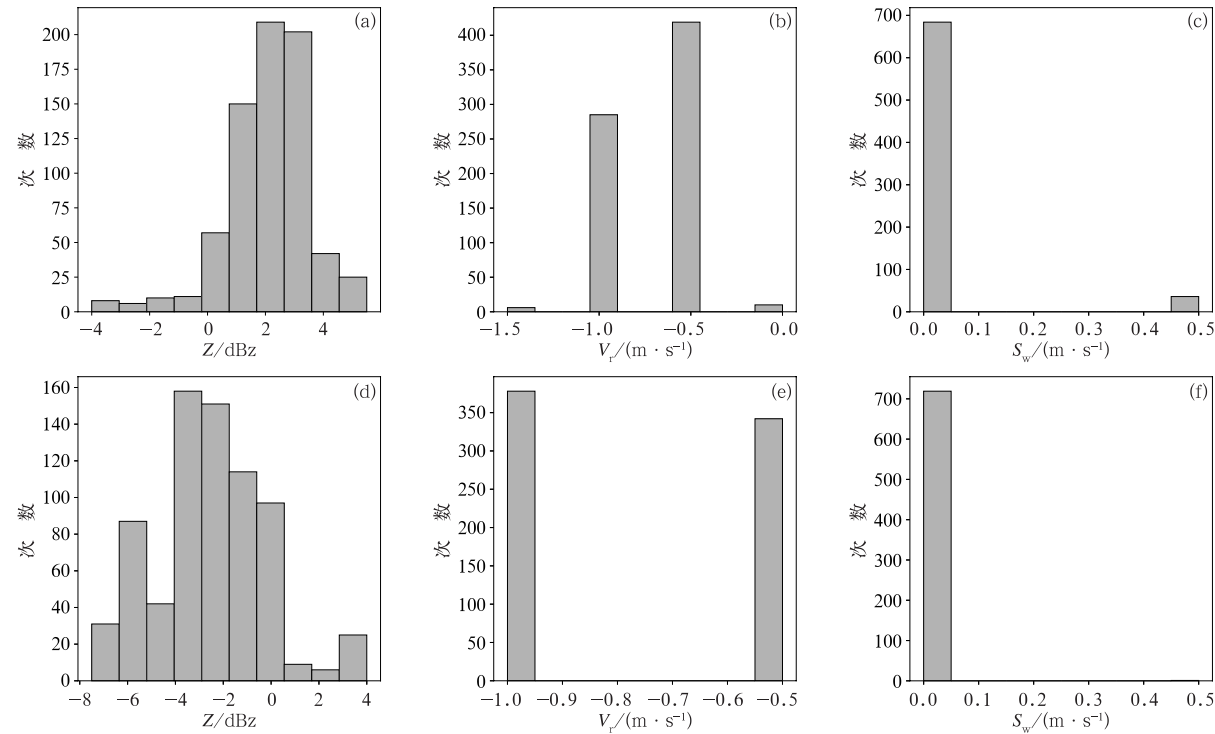


图 10 2019 年 11 月 29 日 20:30—21:30 毫米波云雷达(a~c)3300 m 和 (d~f)4200 m 高度(a,d)回波强度,(b,e)径向速度和(c,f)速度谱宽的出现次数

Fig. 10 Frequency for (a, d) reflectivity, (b, e) radial velocity, (c, f) spectral width of cloud radar at altitudes (a—c) 3300 m and (d—f) 4200 m from 20:30 BT to 21:30 BT 29 November 2019

速度上表现为较大的下落速度,在 20:30—21:30 为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,小冰晶的径向速度在 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,小的负径向速度占比在 50% 以上。

为进一步探究毫米波云雷达的垂直响应,选取飞机垂直探测阶段(20:30:55—20:46:48)的云雷达数据计算平均廓线。回波强度随着高度增加而减小且均小于 0 dBz,径向速度在 4200 m 处最小,且均为负值,速度谱宽在 4600 m 左右最大达到 $0.177 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但在其他高度谱宽平均值几乎都为 $0.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 11a)。接近 3300 m 和 6000 m 的高度,速度谱宽的方差都接近为 $0.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,接近 6000 m 的高度上,回波强度的方差最大,径向速度的方差在 3700~5000 m 高度较大(图 11b)。结冰探头和液态/总水

含量探头(Nevzorov)探测的总水含量(TWC)包括云内的液态水和冰水含量,TWC 在 4400~4700 m 显著减少,CDP 和 CIP 探测的粒子浓度均降低到 $50 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,云雷达的平均径向速度和速度谱宽增加,云雷达谱宽急剧的变化,可能反映这一高度是大小冰晶的临界高度。4500 m 以上,CDP 计算的液态水含量几乎为 $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,CDP 探测小于 $50 \mu\text{m}$ 的粒子浓度增多。在垂直探测阶段,平均径向速度均为负值(靠近云雷达的方向),结合 3300 m 和 4200 m 粒子谱的变化,冰晶粒子在下落过程增长,粒子的下落速度和粒子直径有着直接关系,不同形状冰晶的大小和下落速度的关系也不同(王令等, 2014)。在 3500~4100 m 的高度,平均径向速度减

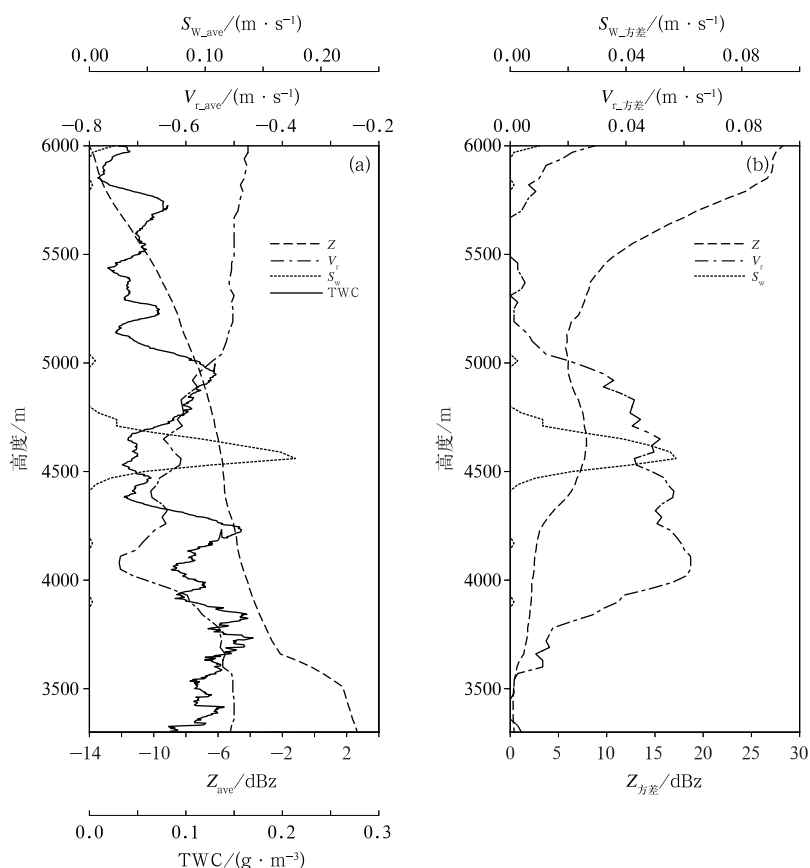


图 11 2019 年 11 月 29 日 20:30:55—20:46:48 毫米波云雷达 3300~6000 m 高度

(a) 平均回波强度(Z_{ave})、平均径向速度($V_{r,\text{ave}}$)、

平均速度谱宽($S_{w,\text{ave}}$)和飞机 Nevzorov 总水含量(TWC)的分布,

以及(b)回波强度、径向速度和速度谱宽的方差($Z_{\text{方差}}$ 、 $V_{r,\text{方差}}$ 、 $S_{w,\text{方差}}$)

Fig. 11 (a) Vertical distribution of mean reflectivity, mean radial velocity,

mean spectral width of cloud radar, and Nevzorov probe detected

TWC of aircraft observations at altitudes 3300—6000 m

from 20:30:55 BT to 20:46:48 BT 29 November 2019,

and (b) vertical variance of reflectivity, radical velocity and spectral width

小而方差增大,Nevzorov探测的总水含量在 $0.10 \sim 0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,径向速度的垂直变化难以反映更具体的微物理信息,但是在径向速度变化大的高度范围(3700~5000 m),粒子的形状、浓度和大小都有着显著变化(图9)。

20:00左右,云雷达的回波顶高开始增加,这与云内的液态水供给、冰晶转化和增长有关,云雷达出现正的径向速度。黄庚等(2007)在云室模拟发现冰晶的碰并和勾连是冰晶转变为雪花的主要过程,这一过程仅在水面饱和或过饱和时发生。液态水的存在是冰晶增长转化成为雪晶的必要条件。在降雪后期21:30左右,5 km和6 km高度层有较强的上升气流,云雷达的正径向速度最大值为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大谱宽值在3 km和6 km,为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在此期间,地面显微镜取样未发现板状和六角雪花,降落到地面的冰晶小且有破碎。高空输送来的水汽不充分,已有的水汽几乎都被消耗殆尽,高空云内小冰晶含量虽然很高,但由于缺少液态水,很难发生碰并和勾连,不利于冰晶增长及转化为雪晶,这也是降雪过程趋于结束的原因。由于降落到地面的雪晶减少,冰晶尺径变小,形状更不规则。

5 结论与讨论

本文主要基于毫米波云雷达数据和飞机观测数据,分析了2019年11月29—30日张家口降雪过程中微物理参数随高度和时间的变化,以及宏微观物理特征。通过地面、探空和飞机等观测结果的相互验证,表明了毫米波云雷达在降雪观测中的应用价值。

张家口冬季本地水汽输送有限,不利于形成大范围强度的降雪,而高空西南气流输送来的水汽有利于凝华成长为冰晶以及冰雪晶的转化。虽然此次降雪持续时间长,但是水汽输送的距离远,到达张家口高空的水汽在时间上不连续,受水汽输送影响,降雪量呈现增多—减少—再增多的趋势。

宏观特征上,云系的厚度变化明显,降雪期间回波最大值为25 dBz,地面小时降雪量与云雷达强回波出现的时间对应性好。云雷达探测到的正径向速度主要在降雪的前中期,最大值达到 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过经验公式反演地面小时降雪量,与反演降雪量的变化趋势基本一致,结果小于地面观测的小时降雪量。整体而言,600 m高度反演的结果最接近实

际观测的降雪量,300、600和900 m三个高度反演结果的最大差异出现在降雪的后期,降雪后期高空输送的水汽减少,限制冰晶增长和转化成为雪晶。

降雪前期水汽充足,回波强度开始增强,云内的垂直运动活跃,低层、中层和高层都有水汽的输送和冰晶的增长,云雷达的径向速度和谱宽增加,且垂直向上延伸的高度最大;降雪中期(29日17—21时)水汽供给不足,云雷达回波变弱,回波顶高减小,上升气流少,径向速度和谱宽变小,谱宽低值区变大;降雪后期由于低层水汽在降雪过程中被消耗殆尽,因此冰雪晶的转化条件被限制,降雪结束。

微观特征上,飞机观测表明降雪云内以冰晶为主,存在霰粒子和聚集体,CDP计算液态水的最大值为 $0.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在高层6000 m,冰晶在下落过程中增长,出现板状、柱状、玫瑰状和不规则状等冰晶,多分布在小于 $100 \mu\text{m}$ 的区间;在3300 m,CPI拍摄到冰晶碰并、碰连和淞附增长等微物理过程,证明了液态水的存在和冰晶转化雪晶的发生。飞机探测期间,探测到大于 $500 \mu\text{m}$ 的冰晶时,云雷达回波强度大于0 dBz。在4400~4700 m的高度,CDP和CIP探测的粒子浓度均降低到 $50 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,云雷达谱宽急剧变化,推测这一高度范围可能是大小冰晶的临界高度。当大小冰晶共存时,冰晶下落和冰晶增长在云雷达径向速度上,体现在出现极大值 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冰晶增长也会影响冰晶的下落速度,谱宽出现大值。无论是小冰晶的增长还是大冰晶转化为雪晶,云雷达的径向速度和谱宽都有增加。

此次降雪是一次较典型的槽前降雪,且持续时间长。通过分析云雷达数据和飞机观测数据,反映出毫米波云雷达对云和降雪的宏观特性和微物理参数有良好的观测能力,在研究降雪过程和人工增雪作业中可发挥重要的作用。

参考文献

- 陈羿辰,金永利,丁德平,等,2018.毫米波测云雷达在降雪观测中的应用初步分析[J].大气科学,42(1):134-149. Chen Y C, Jin Y L, Ding D P, et al, 2018. Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar in snow observation[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1): 134-149 (in Chinese).
- 崔延星,刘黎平,何建新,等,2018.基于云雷达、C波段连续波雷达和激光云高仪融合数据的华南夏季云参数统计分析[J].成都信息工程大学学报,33(3):242-249. Cui Y X, Liu L P, He J X, et al, 2018. Statistical analysis of South China summer cloud parameters based on cloud radar, C-band continuous wave radar and ceilometer fusion data[J]. J Chengdu Univ Informat Technol, 33

- (3):242-249(in Chinese).
- 丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018.云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J].气象,44(12):1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12):1604-1611(in Chinese).
- 郭学良,付丹红,郭欣,等,2021.我国云降水物理飞机观测研究进展[J].应用气象学报,32(6):641-652. Guo X L, Fu D H, Guo X, et al, 2021. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China[J]. J Appl Meteor Sci, 32(6):641-652(in Chinese).
- 郝倚天,陈洪滨,毕永恒,等,2018.8毫米云雷达与探空观测确定云底和云顶高度的对比分析[J].遥感技术与应用,33(6):1063-1072. Hao Y T, Chen H B, Bi Y H, et al, 2018. Comparative analysis of cloud boundary observed by millimeter wave cloud radar and radiosonde[J]. Remote Sens Technol Appl, 33(6):1063-1072(in Chinese).
- 黄庚,苏正军,关立友,等,2007.冰雪晶碰并勾连增长的实验与观测分析[J].应用气象学报,18(4):561-567. Huang G, Su Z J, Guan L Y, et al, 2007. Observation and analysis of the aggregation growth among ice-snow crystals[J]. J Appl Meteor Sci, 18(4):561-567(in Chinese).
- 黄兴友,樊雅文,李峰,等,2013.地基35GHz测云雷达回波强度的衰减订正研究[J].红外与毫米波学报,32(4):325-330. Huang X Y, Fan Y W, Li F, et al, 2013. The attenuation correction for a 35 GHz ground-based cloud radar[J]. J Infrared Millim Waves, 32(4):325-330(in Chinese).
- 黄钰,郭学良,毕凯,等,2020.北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究[J].大气科学,44(2):356-370. Huang Y, Guo X L, Bi K, et al, 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain Area in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2):356-370(in Chinese).
- 雷恒池,洪延超,赵震,等,2008.近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J].大气科学,32(4):967-974. Lei H C, Hong Y C, Zhao Z, et al, 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4):967-974(in Chinese).
- 李思腾,马舒庆,高玉春,等,2015.毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J].气象,41(2):212-218. Li S T, Ma S Q, Gao Y C, et al, 2015. Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer[J]. Meteor Mon, 41(2):212-218(in Chinese).
- 李玉莲,孙学金,赵世军,等,2019. Ka波段毫米波云雷达多普勒谱降雪微物理特征分析[J].红外与毫米波学报,38(2):245-253. Li Y L, Sun X J, Zhao S J, et al, 2019. Analysis of snowfall's microphysical process from Doppler spectrum using Ka-band millimeter-wave cloud radar[J]. J Infrared Millim Waves, 38(2):245-253(in Chinese).
- 刘黎平,谢蕾,崔哲虎,2014.毫米波云雷达功率谱密度数据的检验和在弱降水滴谱反演中的应用研究[J].大气科学,38(2):223-236. Liu L P, Xie L, Cui Z H, 2014. Examination and application of Doppler spectral density data in drop size distribution retrieval in weak precipitation by cloud radar[J]. Chin J Atmos Sci, 38(2):223-236(in Chinese).
- 刘黎平,郑佳锋,阮征,等,2015.2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J].气象学报,73(4):635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al, 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars[J]. Acta Meteorol Sin, 73(4):635-647(in Chinese).
- 刘黎平,宗蓉,齐彦斌,等,2012.云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比[J].中国工程科学,14(9):64-71. Liu L P, Zong R, Qi Y B, et al, 2012. Microphysical parameters retrieval by cloud radar and comparing with aircraft observation in stratiform cloud[J]. Strategic Study CAE, 14(9):64-71(in Chinese).
- 王令,王国荣,古月,等,2014.风廓线雷达垂直径向速度应用初探[J].气象,40(3):290-296. Wang L, Wang G R, Gu Y, et al, 2014. Application of wind profiler radar vertical radial velocity[J]. Meteor Mon, 40(3):290-296(in Chinese).
- 王柳柳,刘黎平,余继周,等,2017.毫米波云雷达冻雨-降雪微物理和动力特征分析[J].气象,43(12):1473-1486. Wang L L, Liu L P, Yu J Z, et al, 2017. Microphysics and dynamic characteristic analysis of freezing rain and snow observed by millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon, 43(12):1473-1486(in Chinese).
- 武静雅,刘黎平,郑佳锋,2016.固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析[J].气象,42(7):790-798. Wu J Y, Liu L P, Zheng J F, 2016. Contrast assessment and analysis of a solid state millimeter wave radar modes[J]. Meteor Mon, 42(7):790-798(in Chinese).
- 武静雅,孙强,毕永恒,等,2022.利用Ka波段云雷达对青藏高原三类重要天气系统宏观参数日变化特征的研究[J].大气科学,46(4):1030-1040. Wu J Y, Sun Q, Bi Y H, et al, 2022. Study of diurnal variation of cloud macro parameters in three important weather systems over the Tibetan Plateau using Ka-band cloud radar[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4):1030-1040(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,翟晓春,2017. Ka波段固态发射机体制云雷达和激光云高仪探测青藏高原夏季云底能力和效果对比分析[J].大气科学,41(4):659-672. Wu C, Liu L P, Zhai X C, 2017. The comparison of cloud base observations with Ka-band solid-state transmitter-based millimeter wave cloud radar and ceilometer in summer over Tibetan Plateau[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):659-672(in Chinese).
- 辛乐,姚展予,2011.一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析[J].气象,37(2):194-202. Xin L, Yao Z Y, 2011. Verification of GRAPES-meso precipitation forecasts based on fine mesh and station datasets[J]. Meteor Mon, 37(2):194-202(in Chinese).
- 张晋茹,杨莲梅,2019.基于毫米波云雷达的伊犁河谷两次强降雪过程云特征观测分析[J].沙漠与绿洲气象,13(5):41-48. Zhang J R, Yang L M, 2019. Observation and analysis of cloud characteristics

- in two heavy snowfall processes in Ili River Valley based on millimeter wave cloud radar[J]. *Desert Oasis Meteor*, 13(5):41-48 (in Chinese).
- 张培昌,王振会,2001. 天气雷达回波衰减订正算法的研究(I):理论分析[J]. *高原气象*, 20(1):1-5. Zhang P C, Wang Z H, 2001. A study on algorithm to make attenuation correction to radar observations of radar reflectivity factor (I): theoretical Analysis [J]. *Plateau Meteor*, 20(1):1-5 (in Chinese).
- 章文星,吕达仁,2012. 地基热红外云高观测与云雷达及激光云高仪的相互对比[J]. *大气科学*, 36(4):657-672. Zhang W X, Lü D R, 2012. Comparison of cloud base heights by ground based sky IR brightness temperature measurements with cloud radar and ceilometer in Shouxian[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(4):657-672 (in Chinese).
- 仲凌志,刘黎平,葛润生,2009. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 24(4):383-391. Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, 2009. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad[J]. *Adv Earth Sci*, 24(4):383-391 (in Chinese).
- Baker B A, Lawson R P, 2006. In situ observations of the microphysical properties of wave, cirrus, and anvil clouds. Part I: wave clouds[J]. *J Atmos Sci*, 63(12):3160-3185.
- Geerts B, Yang Y, Rasmussen R, et al, 2015. Snow growth and transport patterns in orographic storms as estimated from airborne vertical-plane dual-Doppler radar data[J]. *Mon Wea Rev*, 143(2):644-665.
- Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al, 2007. Millimeter-wavelength radars; new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 88(10):1608-1624.
- Lawson R P, Baker B, Pilson B, et al, 2006. In situ observations of the microphysical properties of wave, cirrus, and anvil clouds. Part II: cirrus clouds[J]. *J Atmos Sci*, 63(12):3186-3203.
- Lindqvist H, Muinonen K, Nousiainen T, et al, 2012. Ice-cloud particle habit classification using principal components[J]. *J Geophys Res Atmos*, 117(D16):D16206.
- Matrosov S Y, 2007. Modeling backscatter properties of snowfall at millimeter wavelengths[J]. *J Atmos Sci Atmos*, 64(5):1727-1736.
- Matrosov S Y, Shupe M D, Djalalova I V, 2008. Snowfall retrievals using millimeter-wavelength cloud radars[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 47(3):769-777.
- Nakai S, Endoh T, 1995. Observation of snowfall and airflow over a low mountain barrier[J]. *J Meteorol Soc Japan. Ser. II*, 73(2):183-199.
- Paulsen W H, Petrocchi P J, McLean G, 1970. Operational utilization of the AN/TPQ-11 cloud-detection radar[R]. United States Air Force; Air Force Cambridge Research Laboratories.
- Zhao C F, Wang Y Z, Wang Q Q, et al, 2014. A new cloud and aerosol layer detection method based on micropulse lidar measurements[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(11):6788-6802.

(本文责编:俞卫平)