

结合 Ka 和 X 波段双偏振雷达对北京一次 锋面降雪过程雪带的观测分析

武静雅^{1,2,3} 毕永恒^{1,3} 孙强^{1,3*} 吕达仁^{1,2,3}

1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室(英文缩写 LAGEO), 北京 100029

摘要 本文设计了中国科学院大气物理研究所位于同一观测站内的一部单发双收 Ka 波段双偏振雷达和一部双发双收 X 波段双偏振雷达高效结合观测的方法, 并首次将 Ka 和 X 波段双偏振雷达结合应用在降雪过程的观测中, 对 2019 年 2 月 14 日锋面气旋系统在北京地区降雪过程中雪带的形成、发展、消亡过程的宏微观结构进行了分析。结果表明, 雪带的垂直结构符合以往对层状云垂直分层的物理认识, 类似但不同于雨带由凝结增长层、丛集层、淞附层、融化层组成的四层结构, 雪带只包含由上层“播种”至下层的冰晶形成的凝结增长层、丛集层和淞附层三层。由于各层水平风速不同, 雪带的三层结构并非垂直排列。多个雪带不断生成发展维持降雪, 直至冰晶凝结生长层变空, 云从冰晶凝结生长层分裂为多层云后各自消散。证明了 Ka 和 X 波段双偏振雷达结合的必要性和高效性, 丰富了对锋面气旋系统雪带的认识, 补充了 Ka 波段和 X 波段雷达对降雪的观测研究。

关键词 Ka 和 X 波段双偏振雷达 同步观测 锋面气旋系统 雪带结构

Observation and Analysis of Snowbands Structure in a Cyclone Frontal Snowfall at Beijing with a Ka-band and an X-band Polarized Radars

Jingya Wu^{1,2,3} Yongheng Bi^{1,3} Qiang Sun^{1,3*} Daren Lyu^{1,2,3}

1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

3. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Beijing 100029

资助项目 青藏高原大气多要素垂直结构的高分辨率综合探测及对大气上下层相互作用的重要机制研究(QYZDY-SSW-DQC027), 临近空间科学实验系统(XDA17000000)子课题地基激光和微波雷达遥感观测

Funded by High Resolution Comprehensive Detection of Multi-Element Vertical Structure in the Atmosphere of the Tibetan Plateau and Study on the Important Mechanism of Interaction between Upper and Lower Atmospheres(QYZDY-SSW-DQC027) and ground-based laser and microwave radar remote sensing observation, a sub project of the adjacent space science experimental system (XDA17000000)

作者简介 武静雅, 女, 博士研究生在读, 专注雷达气象学相关研究, wujingya@mail.iap.ac.cn

收稿日期 20200108; **网络预出版日期**

Abstract:

In this paper, a simultaneous observation method of a Ka-band polarized radar and an X-band polarized radar in the same station of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences are designed for the first time. The formation and development of snowbands during the snowfall process of a frontal cyclone system in Beijing on February 14, 2019 are observed by this method, and the lifecycle and vertical structure of snowbands are analyzed. Results show that structure of snowbands is similar but different from the four-layer structure composed of condensation layer, aggregation layer, riming layer and melting layer of rainbands. Snowbands only contains condensation layer, aggregation layer and riming layer formed from seeding of upper layer cloud to lower layer cloud. Multiple snowbands continuously generate and develop to maintain the snowfall. Horizontal wind speeds vary from layer to layer, so the three layers of a snowband may not be arranged vertically. Snowflakes are formed continuously in snowbands until condensation layer becomes empty, and the cloud splits from this layer into multi-layer clouds and then dissipates respectively. It is proved that the dual frequency polarized radar simultaneous observation is necessary and efficient. It complements the observation of snowfall by Ka-band and X-band radar, and enriches the understanding of snowbands of frontal cyclone system.

Keywords: polarized radar; cyclone frontal system snowfall; snowbands structure

1. 引言

层状云降水多与大范围抬升相关，包括中尺度对流系统、热带气旋、锋面气旋系统等。其中锋面气旋系统是中纬度地区的主要云和降水源 (Houze, 2014; Businger and Reed, 1989)。锋面气旋系统常具有多尺度复合结构，由于气流场和湿度场的不同配置，系统内可能出现多种中小尺度结构。锋面气旋中小尺度相关研究结果显示其重要的中尺度结构是雨带和雪带，雨带和雪带即降水更为集中的区域，一般成带状排列。锋面层状云降水水平方向分布不均匀，一般由多个雨带或雪带组成 (Heymsfield, 1979)。

以往有许多利用雷达、飞机等设备对雨带观测分析的工作，因而目前对雨带的水平分布、垂直结构有比较全面的认识 (Hobbs et al. 1980; Rutledge and Hobbs, 1983; Stolzenburg et al., 1998; Houze et al., 2009)。目前认为雨带上部的冰晶来源可能有 3 种，分别是原位生成、由临近或上方“播种”而来以及内部嵌入的某种结构生成，上部冰晶生成后即开始生长。垂直方向上是明显的分层结构，每一层内由不同的微物理过程主导。自上而下一般为凝结增长层、碰并增长层、淞附或介电常数变化层、融化层四层。

但是，对雪带的研究集中于锋面气旋系统内温湿度场的分布、雪带的水平分布特征及其影响因素 (Sanders, 1985; Martin, 1999; Nicosia and Grumm, 1999; Jurewicz and Evans, 2004; Schultz and Schumacher 1999; Clark et al. 2002; Novak et al., 2009; Picca et al., 2014)，缺乏对雪带形成演变的过程及宏微观物理结构等更为细致的观测分析，远不如对雨带的研究深入。

对云的观测可以分为原位观测和遥感观测。原位观测多由飞机携带粒子探头进行穿云试验完成，由于云内具有复杂的动力结构，因而对某些较为危险的区域不能进行很好的探测，且飞行成本昂贵。遥感观测最主要是卫星和雷达观测，卫星由于其轨道限制，不能进行针对性的连续观测。而雷达可以时刻根据云的变化更改观测方式实现跟踪观测，且其数据的时空分辨率非常高。

由于雷达回波信号的强度与波长的 4 次方成反比，因而波长越短的雷达灵敏度越高，但是波长越短则吸收效果越明显，完备的试验应该包括双波长甚至多波长雷达。Ka 波段雷达适合于非降水云或降雪的观测，X 波段雷达对弱降水观测具有优势。Ka 波段雷达一般采用垂直对空 (DTB) 或者距离-高度 (RHI) 扫描，适合观测垂直结构，不能有效的跟踪目标结构的移动变化，X 波段雷达一般采用平面-位置 (PPI) 或 RHI 扫描，可以获得目标结构的移动变化特征及垂直结构特点。利用 X 波段雷达对目标结构跟踪并结合 Ka 和 X 波段雷

达对目标系统垂直结构进行观测,是获得包括雪带在内的弱降水系统内部中尺度结构生命史和垂直结构的高效选择。

双偏振变量可以给出更为丰富的回波信息,但不同的收发方式获得的偏振变量不同,为了同时获得全部的双偏振变量,需要结合两部以上的雷达进行观测。但由于试验条件的限制以及多部雷达配合观测和数据处理的困难,结合两部及以上数量的双偏振雷达进行同步观测的试验较少。见于文献中 X 波段和 Ka 波段双偏振雷达配合同步观测的试验仅有 7 次,集中在利用等效反射率因子或衰减等变量的差异对某一个或某两个云或降水参数进行分析,并未将偏振变量结合使用,且未应用于降雪观测中 (Nakamura et al., 1990; Gosset and Sauvageot, 1992; Martner et al., 1993; Matrosov, 1999; Vivekanandan, 2001; Liang et al., 2005; Tyynelä and Chandrasekar, 2014)。

另外,即使单独利用 Ka 波段雷达观测降雪的研究也很少,主要应用于回波变量特征与地表降雪的关系、过冷水识别、垂直速度反演等方面 (陈奕辰等, 2016; 李玉莲等, 2019; 王柳柳等, 2017)。单独利用 X 波段双偏振雷达观测降雪的工作主要针对某种结构与回波变量关系或 Z-R 关系展开,如柱状粒子生长层观测研究、Z-R 关系模拟、最佳 Z-R 关系的确定方法等 (Schrom et al. 2015, Matrosov et al., Fujiyoshi et al., 1990)。总之, Ka 和 X 波段雷达单独应用于降雪观测的工作数量较少、研究对象针对性较强,并不充分。

为了发挥采用不同观测模式、不同收发方式的 Ka 波段和 X 波段双偏振雷达结合观测降雪具有的全面、高效、准确的优势,获得锋面气旋系统中雪带发展各阶段宏微观特征,丰富对锋面气旋系统雪带的认识,补充 Ka 波段和 X 波段雷达对降雪的观测研究,本文设计了中国科学院大气物理研究所同一观测站内的一部单发双收体制 Ka 波段双偏振雷达和一部双发双收体制 X 波段双偏振雷达结合观测方法,首次将 Ka 和 X 波段双偏振雷达结合应用于降雪过程的观测中,以 2019 年 2 月 14 日冷锋气旋在北京造成明显的层状云降雪过程为对象,对此次锋面气旋中的雪带形成、发展、消亡阶段的特征进行了分析。结果表明,上述观测方法成功的获得了雪带的生命史和宏微观结构。雪带的垂直结构符合以往对层状云分层的物理认识,与雨带垂直结构类似:上部冰晶由上层播种而来,播种到下层后经历不同的生长方式,形成垂直方向明显分为凝结增长层、丛集层、淞附层三层的结构,不同于雨带,雪带内没有融化层。另外发现,当播种得到的冰晶凝结生长区开始消散“变空”时,雪带即进入消亡,降雪趋于结束。

2. 资料与方法

2.1 设备简介

本文使用的数据来源于中国科学院大气物理研究所同一观测站内的一部Ka波段双偏振雷达（以下简称为 IAPKa）和一部X波段双偏振雷达（以下简称为 IAPX），两部雷达的参数在表1中列出。

IAPKa 采用单发双收体制，获得偏振变量 LDR ， LDR 是交叉极化与水平极化回波强度的差值，表征水凝物的退偏振程度，一般随着非球形水凝物粒子相对于偏振平面倾斜角的增大而增加。IAPX 采用双发双收体制，偏振变量为 Z_{DR} 、 ρ_{hv} 和 φ_{DP} 。 Z_{DR} 是雷达水平极化与垂直极化的回波强度之差，一般 Z_{DR} 随轴比增大而增大，反映水凝物粒子的非球形程度。 ρ_{hv} 是水平极化与垂直极化回波强度的相关系数，表征探测体积内粒子的多样性， ρ_{hv} 随着粒子多样性的增加而减小，回波性质均一的水凝物的 ρ_{hv} 接近 1，常被用于区分气象和非气象回波。 φ_{DP} 是水平和垂直极化通道前向传播相位差，与非球形粒子的大小和数浓度有关。两部雷达同步观测可获得同一目标的全部偏振特性，进而对目标进行更为全面的分析。另外需要指出，IAPKa 和 IAPX 的多普勒速度均规定靠近雷达方向为正，反之为负。

表 1 IAPKa 和 IAPX 参数表

Table 1 Parameters of IAPKa and IAPX

名称	IAPKa	IAPX
工作频率	35.075GHz	9.375GHz
收发方式	单发双收（H-HV）	双发双收（HH-VV）
偏振变量	线性退偏比 LDR	差分反射率因子 Z_{DR} 相关系数 ρ_{hv} 差分相位 φ_{DP}
观测模式	zenith-pointing（DTB） Range Height Indicator（RHI）	Plan Position Indicator（PPI） RHI
PRF	3500 2800/3500（4:5）	1120/1400（4:5）
Nyquist 速度	$\pm 7.52\text{m/s}$ $\pm 30.10\text{m/s}$	$\pm 21\text{m/s}$

波束宽度	0.42°	1.1°
脉冲宽度	0.2 μs	1 μs
$ K ^2$	0.87	0.93
10km 灵敏度	-32dBZ	-12dBZ

2.2 IAPKa 和 IAPX 结合观测方式及数据处理

为最大发挥 IAPKa 和 IAPX 结合的优势，应以雪带形成、发展、消亡过程为对象，确定仰角和方位角范围进行针对性观测，并根据云的变化调整仰角方位角范围，以实现既能完全涵盖，又能避免无效观测的扫描方式，提高观测频率，获取变化细节信息。具体观测方式列在表 2 中，配合方式 1 和配合方式 2 交替进行，每进行一次配合方式 1 扫描，即 IAPX 进行 PPI 扫描获得锋面气旋系统移动变化特征的同时 IAPKa 进行 DTB 扫描获得垂直速度等特征的扫描，并确定目标雪带。随后进行 30 分钟配合方式 2 扫描，即根据配合方式 1 中确定的目标雪带，利用 IAPKa 和 IAPX 同时对相同方位雪带的垂直结构进行 RHI 观测，获得雪带的垂直特征。

表 2 IAPKa 和 IAPX 结合观测方式

Table 2 The combination method of IAPKa and IAPX

配合方式编号	目的	IAPKa 观测模式	IAPX 观测模式
1	跟踪系统的移动变化 确定目标雪带	HTB	PPI
2	同步观测雪带的垂直结构	RHI	RHI

两部雷达的数据在使用前均已进行质量控制。其中 IAPKa 的噪声主要是信噪比较低时引起的噪声，IAPX 的噪声主要是旁瓣及山区引起的噪声。

为了获得更加准确详细的雪带结构，进行分析时，对于两部雷达相同的回波变量，则选择灵敏度更高雷达的回波变量，对于两部雷达不同的双偏振变量，则进行结合使用。根据对观测结果的分析，发现雪带的生命史可以分为“播种”形成阶段、发展阶段和消亡阶段。其中消亡阶段又可以分为第一消亡阶段和第二消亡阶段。下面依次对每一阶段雪带垂直方向的宏微观结构进行分析说明。

3. 雪带形成、发展、消亡阶段宏观结构分析

3.1 播种形成阶段

9 点 20 分左右，本场降雪突然增强，雪带已在本场上空生成，需要对本场上空云随时间的变化进行分析以获得雪带形成的过程。将 8 点 32 分至 9 点 23 分时间段内 IAPKa 进行的所有 DTB 扫描的等效反射率因子 Z_{HH} 、多普勒速度 V 以及退偏振比 LDR 分别绘制在同一张图中，依次为图 1 中的 (a) (b) (c) 图。由于 IAPKa 进行了 DTB 和 RHI 扫描，因而图像中部分区域不连续。

图 1 播种形成阶段 IAPKa DTB 扫描回波变量

(a) (b) (c) 依次为 8 点 32 分至 9 点 23 分时间段内 IAPKa DTB 扫描的 Z_{HH} 、 V 以及 LDR

Figure 1 vertical scan echo of IAPKa in seeding process

(a) (b) (c) are Z_{HH} 、 V and LDR obtained by IAPKa in DTB scanning from 8:32 to 9:23 BJT

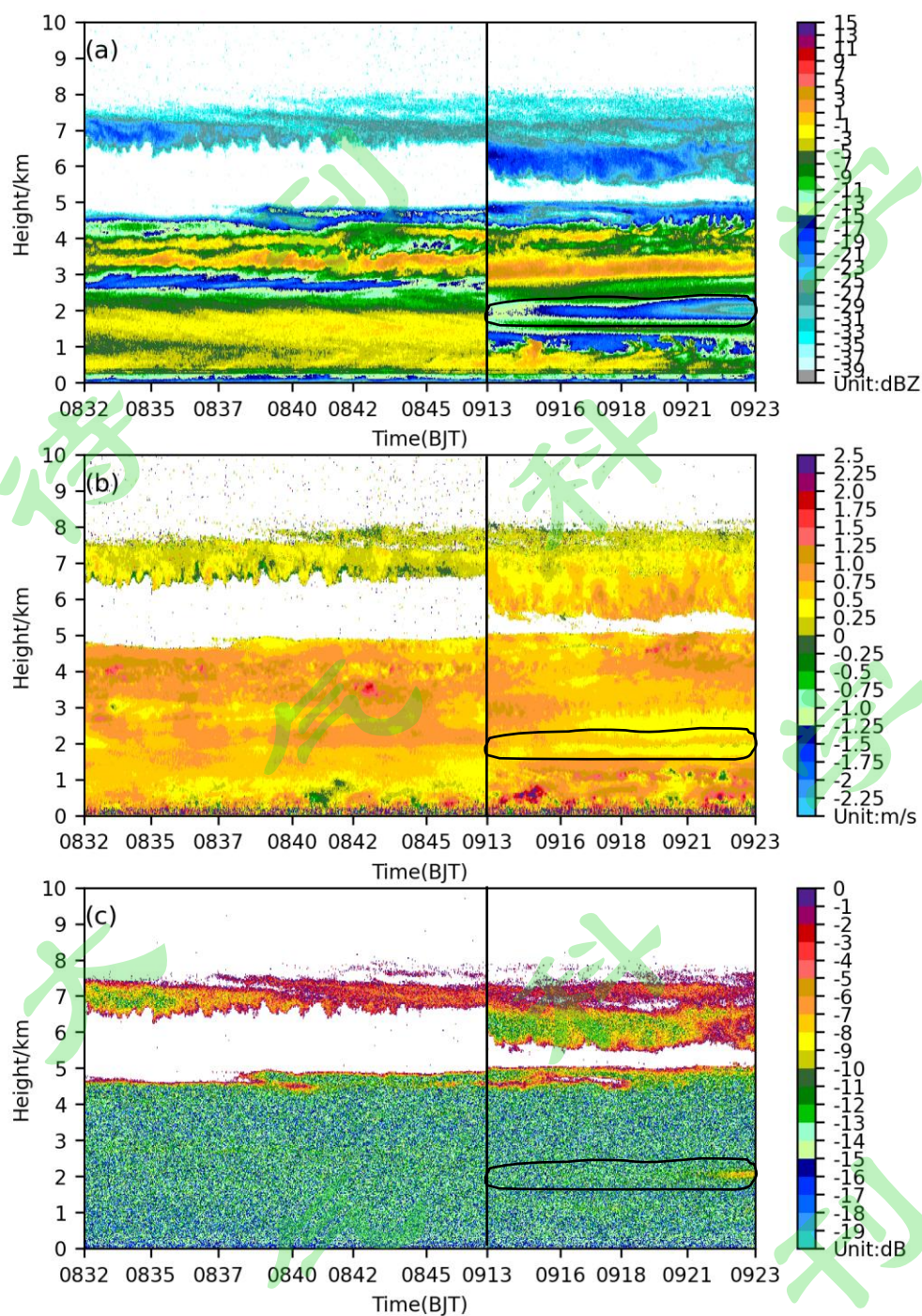


图 1 所示的时间段内，本场上空的云一直为双层结构。由 (a) 中 Z_{HH} 的垂直结构可知，9 点 13 分之前（图 1 中黑色直线左侧部分），下层云呈现为明显的分层结构，垂直方向分为三层，每个层次由 Z_{HH} 相对较高即由大粒子组成的中间部分以及 Z_{HH} 向两侧平滑减小即由小粒子组成的部分构成。由 (b) 中粒子的多普勒速度 V 可知，三层内的粒子均在下落，对下方进行“播种”。

9 点 13 分之后（图 1 中黑色直线右侧部分），距地约 2km 高度处形成了大范围 Z_{HH} 为

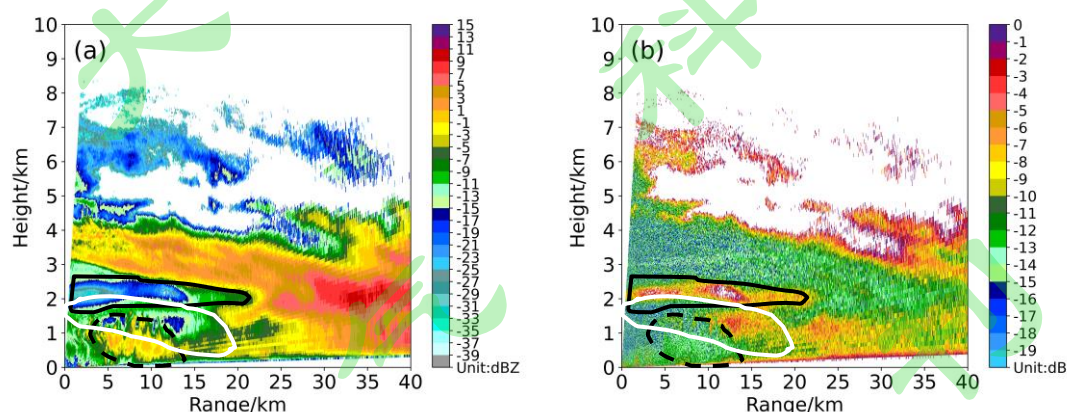
-30~-17dBZ, 垂直下落速度 0.25~0.75m/s、 LDR 较大的层次 (以黑色不规则图形标于图 1 (a) (b) (c) 中)。 Z_{HH} 较小且 LDR 较大说明此层为取向较为水平的小粒子。另外, 冰相粒子的下落速度与粒子类型、尺寸以及淞附的程度有关, 原始冰晶的下落速度一般为 0.1-0.7m/s, 除少数由 2-3 个原始冰晶聚合形成的聚合冰晶速度与原始冰晶相差不多, 大多数聚合冰晶下落速度为 1-1.5m/s, 淞附会增大粒子的下落速度, 如淞附的霰粒子下落速度为 1-3m/s (Kajikawa, 1982; Locatelli and Hobbs, 1974)。结合此层粒子的 Z_{HH} 、 LDR 以及 V 的特征推测其内部的粒子为取向较为水平的原始单冰晶粒子, 即此层为冰晶凝结增长层。

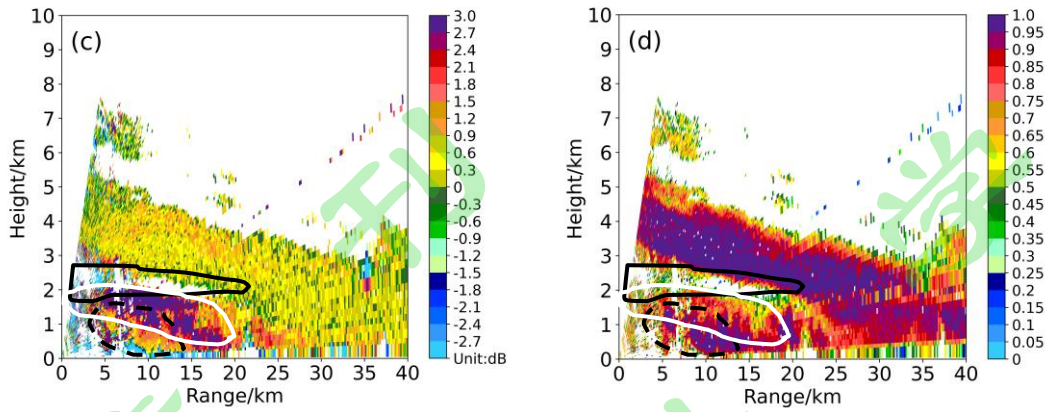
为获得上述雪带的垂直结构, 随即对此雪带进行背风 RHI 观测。分析凝结增长冰晶的发展, 获得雪带的结构, 将 9 点 30 分两部雷达 RHI 同步扫描时, IAPKa 获得的 Z_{HH} 、 LDR 以及 IAPX 获得的 Z_{DR} 、 ρ_{hv} 依次表示在图 2 (a) (b) (c) (d) 中。

图 2 9 点 30 分 IAPKa 和 IAPX 进行同步 RHI 扫描获得的 (a) IAPKa 的变量 Z_{HH} 、(b) IAPKa 的变量 LDR 、(c) IAPX 的变量 Z_{DR} 、以及 (d) IAPX 的变量 ρ_{hv}

Figure 2 (a) IAPKa variable Z_{HH} , (b) IAPKa variable LDR , (c) IAPX variable Z_{DR} and (d) IAPX variable ρ_{hv} obtained by simultaneous RHI scan of IAPKa and IAPX at 9:30 BJT

9:30





结合 Z_{HH} 、 LDR 、 Z_{DR} 、 ρ_{hv} 分析可以明显观察到此雪带的垂直结构。黑色单线为 Z_{HH} 极小、 LDR 较高区域，即前文中提到的“播种”形成的冰晶凝结增长层。白色单线区域为 Z_{HH} 较大、 Z_{DR} 极大、 ρ_{hv} 较大区域，为取向较为水平的不规则的较大雪花粒子，即丛集层。黑色单虚线区域为高 Z_{HH} 、较低 Z_{DR} 、高 ρ_{hv} 区域，此层水平风速较上一层小，因而位于上层回波区域的后方。推测此层内包含过冷水滴，雪花粒子淞附过冷水滴后介电常数增大且变得相对更加趋近于球体，导致 Z_{HH} 瞬间增大、 Z_{DR} 减小、 ρ_{hv} 增大。

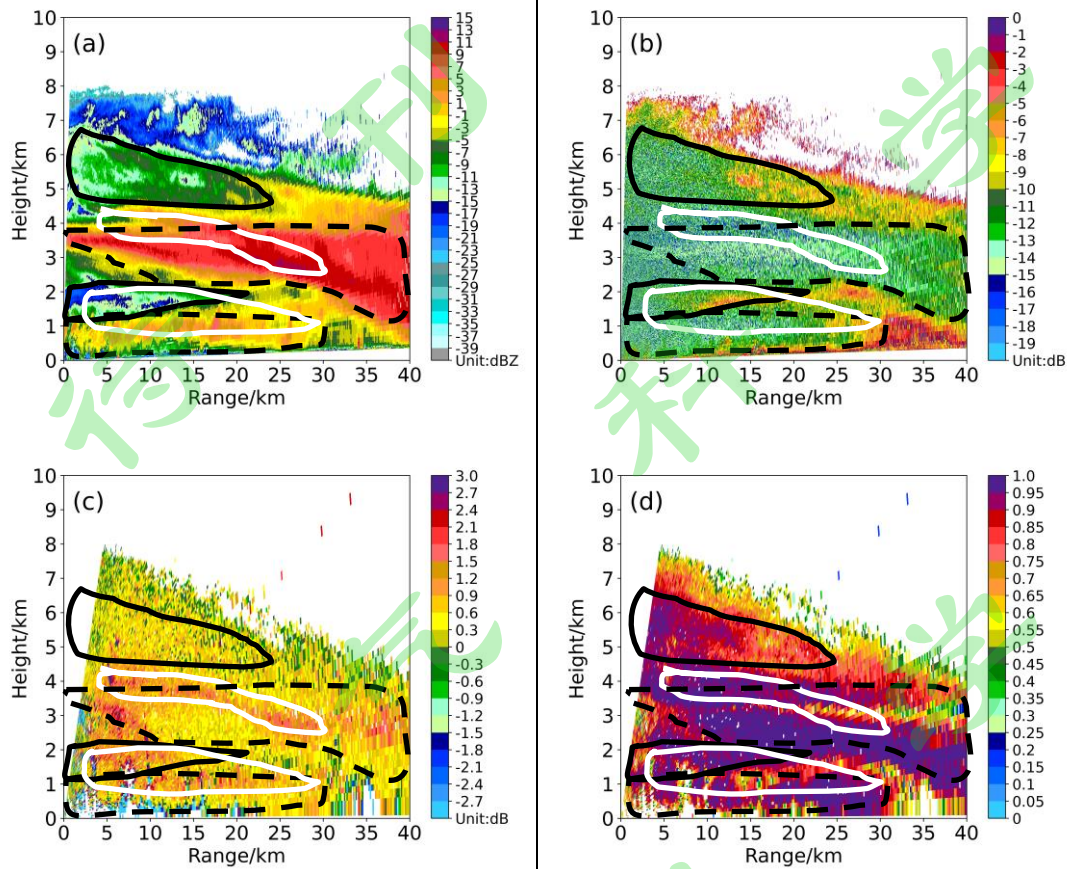
上述结构即为雪带的垂直结构，由高到低三层依次分别为“播种”形成的冰晶凝结增长层、丛集层、淞附层，并依次使用黑色单线、白色单线、黑色单虚线在图中进行标注。由于各层水平风速不同，三层并非垂直分布。可以发现， $IAPX$ 未能探测到 Z_{HH} 很小的冰晶凝结增长层，而灵敏度更高的 $IAPKa$ 获得的 Z_{HH} 和 LDR 明显的显示出冰晶凝结增长层。但双方双收的 $IAPX$ 获得的 Z_{DR} 和 ρ_{hv} 显示了冰晶凝结增长后的碰并和淞附层，体现了两部雷达结合观测具有的全面、准确、高效的特点。

3.2 发展阶段

第一个雪带形成移走后，此后陆续观测到多个雪带。图 3 至图 5 中列出了后续与第一个雪带结构相同，但凝结增长层高度、水平尺度等方面各有不同的 4 个雪带。各时刻新出现的雪带均用不规则图形标注在图中，线形与层次的对应关系如前。

图 3 列出了 10 点 36 分，本场上空的 2 个新雪带。其中一个雪带凝结增长层距地高度约 1.7km，水平范围约 30km。另外一个雪带的凝结增长层距地高度约 6km，水平范围约 40km。图 3 10 点 36 分 $IAPKa$ 和 $IAPX$ 进行同步 RHI 扫描获得的 (a) $IAPKa$ 的变量 Z_{HH} 、(b) $IAPKa$ 的变量 LDR 、(c) $IAPX$ 的变量 Z_{DR} 、以及 (d) $IAPX$ 的变量 ρ_{hv}

Figure 3 (a) $IAPKa$ variable Z_{HH} , (b) $IAPKa$ variable LDR , (c) $IAPX$ variable Z_{DR} and (d) $IAPX$ variable ρ_{hv} obtained by simultaneous RHI scan of $IAPKa$ and $IAPX$ at 10:36 BJT



12 点 46 分观测到的雪带垂直结构列在图 4 中，其凝结生长层位于距地表 3km 左右，水平尺度约 25km。

图 4 12 点 46 分 IAPKa 和 IAPX 进行同步 RHI 扫描获得的 (a) IAPKa 的变量 Z_{HH} 、(b) IAPKa 的变量 LDR 、(c) IAPX 的变量 Z_{DR} 、以及 (d) IAPX 的变量 ρ_{hv}

Figure 4 (a) IAPKa variable Z_{HH} , (b) IAPKa variable LDR , (c) IAPX variable Z_{DR} and (d) IAPX variable ρ_{hv} obtained by simultaneous RHI scan of IAPKa and IAPX at 12:46 BJT

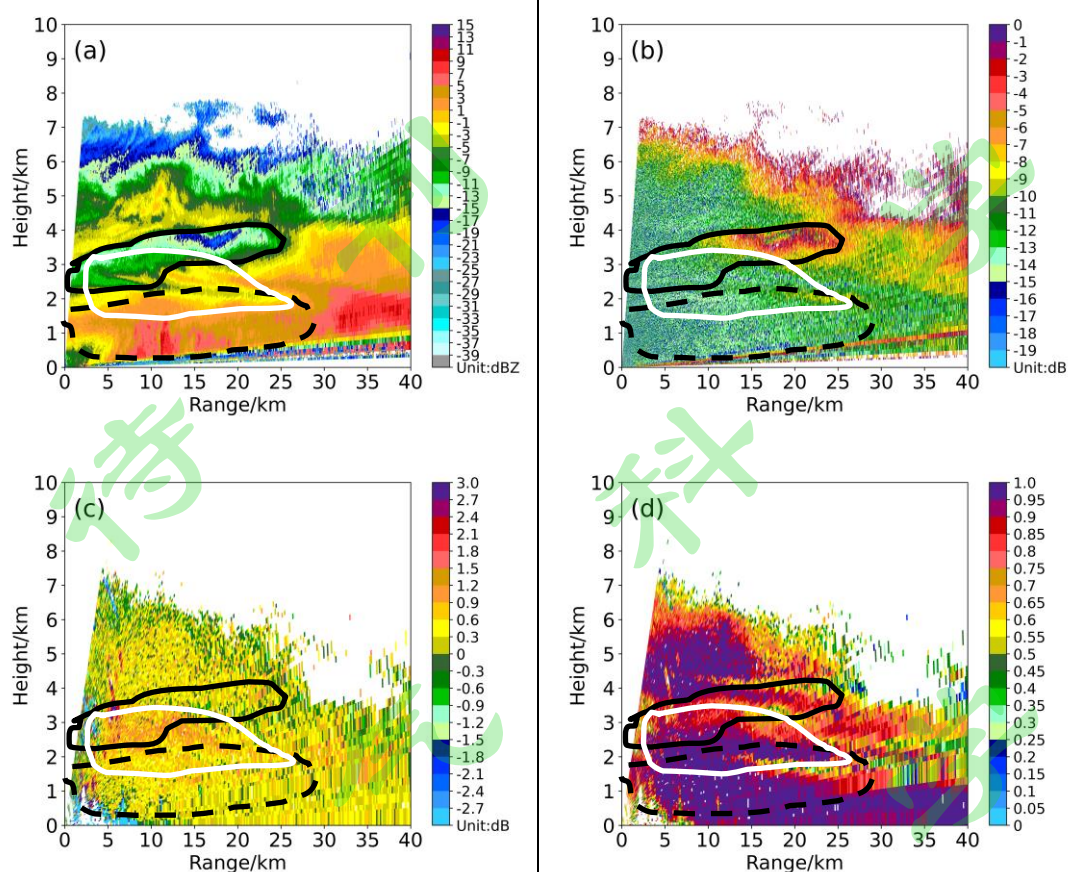
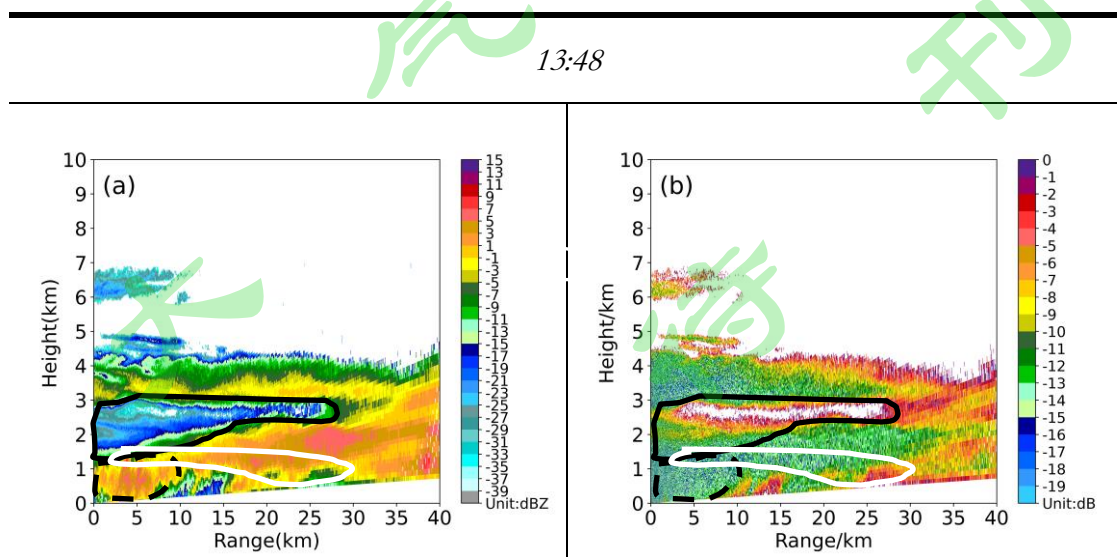
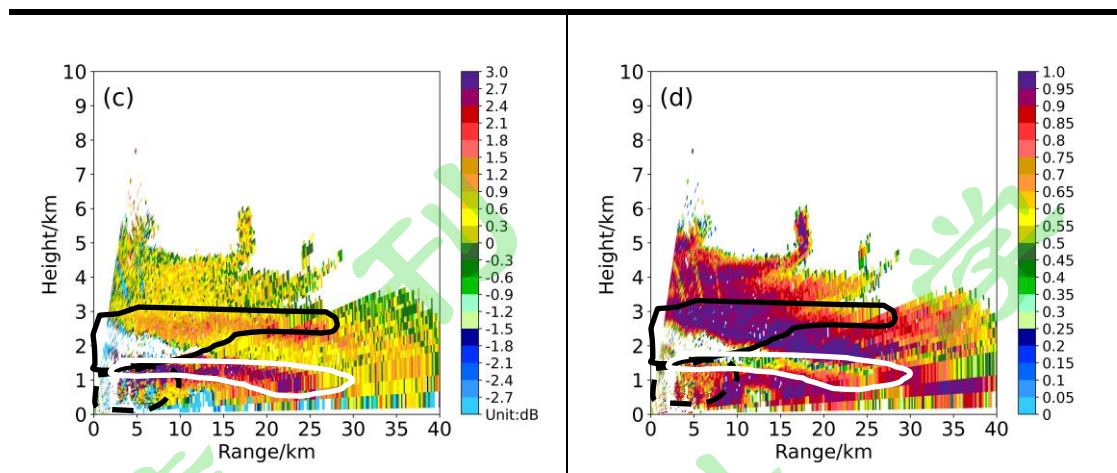


图 5 中列出了 13 点 48 分本场附近的雪带，水平范围约 30km，凝结增长层位于距地表 2km 高度处，但已开始消散“变空”，表现出从此区域分裂为多层云的趋势。

图 5 13 点 48 分 IAPKa 和 IAPX 进行同步 RHI 扫描获得的 (a) IAPKa 的变量 Z_{HH} 、(b) IAPKa 的变量 LDR 、(c) IAPX 的变量 Z_{DR} 、以及 (d) IAPX 的变量 ρ_{hv}

Figure 5 (a) IAPKa variable Z_{HH} , (b) IAPKa variable LDR , (c) IAPX variable Z_{DR} and (d) IAPX variable ρ_{hv} obtained by simultaneous RHI scan of IAPKa and IAPX at 13:48 BJT





3.3 消亡阶段

随着雪带的冰晶凝结增长层消散“变空”，云系从冰晶凝结增长层分解为两层甚至多层云。此过程中云系首先从 4km 高度处凝结增长层分裂为上下两层云，上层云迅速消散，剩余部分再次从 2km 高度凝结增长层分裂为两层后各自消散。将由 4km 高度的冰晶凝结增长层分裂的过程称为“第一消亡阶段”，由 2km 高度处的冰晶凝结增长层分裂的过程称为“第二消亡阶段”。为更加清晰的展现分裂消散的过程，在第一消亡阶段内图中仅标注凝结增长层位于 4km 的雪带，在第二次消亡阶段内图中仅标注凝结增长层位于 2km 的雪带。

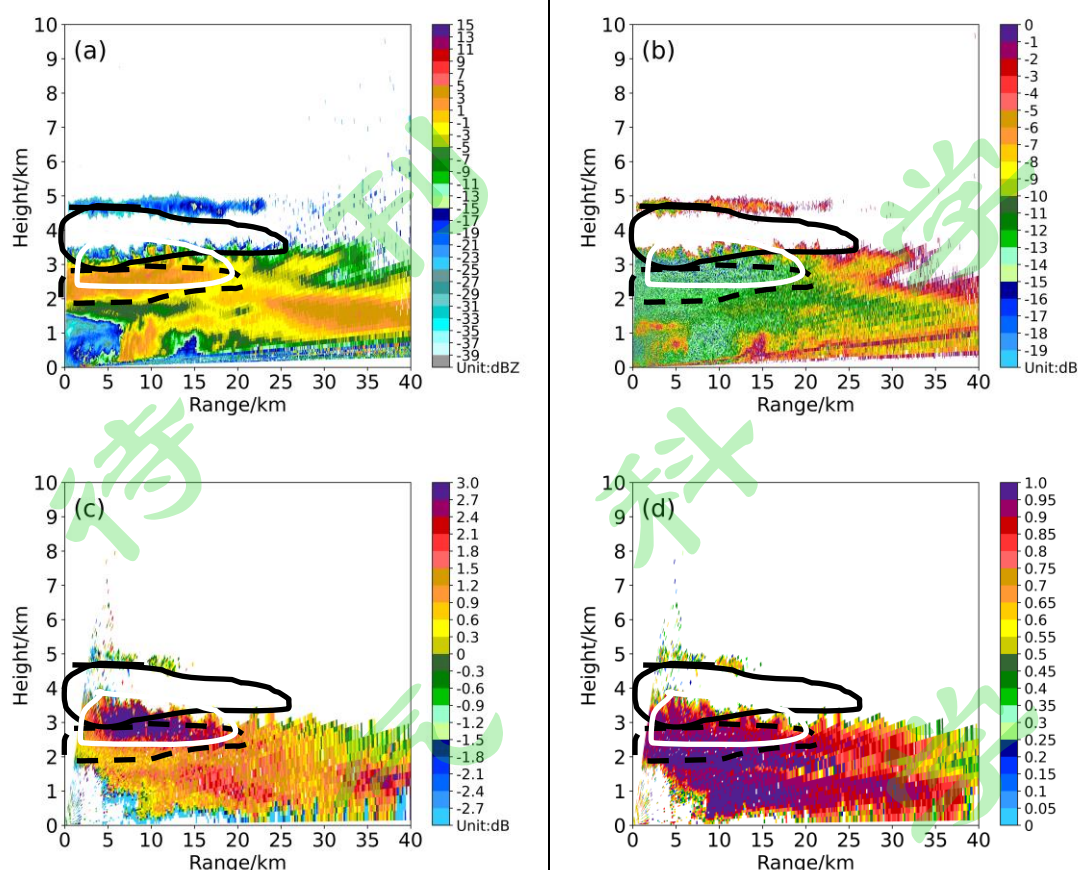
3.3.1 第一消亡阶段

16 点 12 分（图 6），4km 高度附近的冰晶凝结增长层渐弱至不能被观测到，雪带从此层完全分裂为两层云，上层云非常薄弱，冰晶丛集和淞附层留在下层云中。

图 6 16 点 12 分 IAPKa 和 IAPX 进行同步 RHI 扫描获得的 (a) IAPKa 的变量 Z_{HH} 、(b) IAPKa 的变量 LDR 、(c) IAPX 的变量 Z_{DR} 、以及 (d) IAPX 的变量 ρ_{hv}

Figure 6 (a) IAPKa variable Z_{HH} , (b) IAPKa variable LDR , (c) IAPX variable Z_{DR} and (d) IAPX variable ρ_{hv} obtained by simultaneous RHI scan of IAPKa and IAPX at 16:12 BJT

16:12



3.3.2 第二消亡阶段

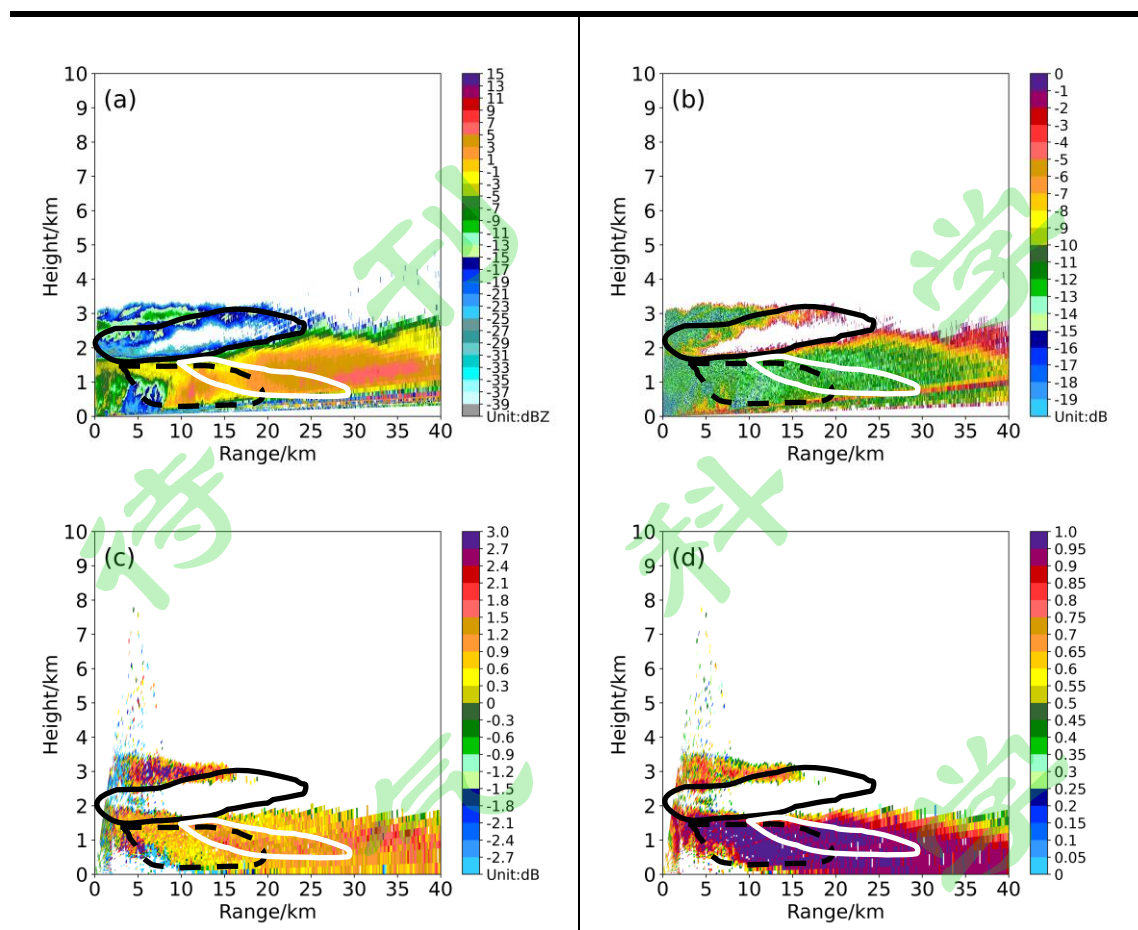
继第一消亡阶段云从 4km 高度冰晶凝结增长层分裂为两层后,上层薄弱的云在视野内消失。如图 7 所示,与第一次消亡阶段类似,一段时间后剩余的下层云中 2km 高度附近的凝结增长层也减弱至不能被观测到,下层云从此层再次分裂为两层,分裂后的上层云仍是非常薄弱的云并迅速消失,下层云独立消散。

图 7 16 点 40 分 IAPKa 和 IAPX 进行同步 RHI 扫描获得的 (a) IAPKa 的变量 Z_{HH} 、(b) IAPKa 的变量 LDR 、(c) IAPX 的变量 Z_{DR} 、以及 (d) IAPX 的变量 ρ_{hv}

Figure 7 (a) IAPKa variable Z_{HH} , (b) IAPKa variable LDR , (c) IAPX variable Z_{DR} and (d)

IAPX variable ρ_{hv} obtained by simultaneous RHI scan of IAPKa and IAPX at 16:40 BJT

16:40



4. 小结

由以上的分析可见，IAPKa 和 IAPX 结合观测，高效的获取了雪带形成、发展、消亡过程中的宏微观结构。发现“播种”至下层云的冰晶凝结增长、丛集、淞附形成了雪带的三层结构，各层水平风速不同导致雪带的三层结构并非垂直排列。雪带不断生成发展维持降雪，直至冰晶凝结增长层变空，云从此层分裂后各自消散。将本次降雪过程观测到的雪带生成演变过程总结在表 3 中。

表 3 雪带发展过程

Table 3 evolution of snowbands

阶段	雷达回波特征	内部过程	外部现象
生成	形成由上至下分为三层的中尺度结构	“播种”到下方的冰晶凝结增长、丛集、淞附形成雪带	降雪增强
发展	观测到多个如上结构	多个雪带不断形成发展维持降雪	降雪维持
消亡	如上结构中最上层减弱	从减弱“变空”的冰晶凝结增长层分裂，	云分裂为多层

	到不能被观测到	分裂后的云层各自减弱消散	各自消散,降雪 结束
--	---------	--------------	---------------

5. 主要结论

1. 本文设计了采用不同观测模式、不同收发方式的 Ka 波段和 X 波段双偏振雷达结合观测方法,首次将 Ka 和 X 波段双偏振雷达结合应用在降雪的观测中,获得了全面、准确、高效的数据,并首次将 Ka 和 X 波段双偏振雷达的双偏振变量结合使用,成功地对雪带生成、发展、消亡阶段的宏微观结构进行观测分析。体现了 Ka 和 X 波段双偏振雷达结合的必要性和高效性,丰富了对锋面气旋系统中雪带的认识,补充了 Ka 波段和 X 波段雷达在降雪过程中的应用;

2. 雪带垂直结构符合以往对层状云分层的物理认识,类似但不同于雨带垂直方向由冰晶凝结增长层、丛集层、淞附层、融化层四层组成的结构,雪带没有融化层,仅由冰晶凝结增长层、丛集层、雪花淞附层三层组成,各层水平风速不同导致雪带各层并非垂直分布。多个雪带不断生成,维持降雪的不断发

展; 3. 此过程中的冰晶凝结增长层由其上方“播种”下来的冰晶凝结增长形成,位于距地表 2km 或 4km 左右高度处,水平尺度为 20km~40km。凝结增长层不断生成冰晶,直至无法生成,云即进入消散阶段,消散时从冰晶凝结增长层分裂为多层云后各层云独自减弱消失。

6. 致谢

中国科学院大气物理研究所研究员段树和副研究员霍娟为本文工作提供了建设性的建议和帮助,在此致以诚挚的感谢!

参考文献

- 陈羿辰,金永利,丁德平,等. 2016. 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 Yichen, Jin Yongli, Ding Deping, et al. 2016. Preliminary Analysis on the Application of Millimeter Wave Cloud Radar in Snow Observation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 134-149, DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17121.
- 李玉莲,孙学金,赵世军,姬文明. 基于Ka波段毫米波云雷达多普勒谱的降雪微物理过程的分析[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(2): 245-253. Li Yulian, Sun Xuejin, Zhao Shijun, Ji Wenming. Analysis of snow microphysical process from Doppler spectra of the Ka-band millimeter-wave cloud radar[J]. J. Infrared Millim. Waves, 2019, 38(2): 245-253., DOI:10.11972/j.issn.1001-3014.2019.02.019

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. 气象, 43(12): 1473-1486. WANG Liuliu, LIU Liping, YU Jizhou, et al, 2017. Microphysics and Dynamic Characteristic Analysis of Freezing Rain and Snow Observed by Millimeter-Wave Radar. Meteorological Monthly, 43(12): 1473-1486. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.12.003.

Matrosov S Y, Campbell C, Kingsmill D E, et al. 2009, Assessing Snowfall Rates from X-Band Radar Reflectivity Measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(11): 2324-2339, doi.org/10.1175/2009JTECHA1238.1

Yasushi Fujiyoshi; Tatsuo Endoh; Tomomi Yamada; Kazuhisa Tsuboki; Yoshihiro Tachibana; Gorow Wakahama, 1990, J. Appl. Meteor. 29 (2): 147–152. doi.org/10.1175/1520-0450(1990)029

Robert S Schrom; Matthew R Kumjian; Yinghui Lu. 2015. J. Appl. Meteor. Climatol. 54 (12): 2365–2388. doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0004.1

Matrosov S Y, 2007, Modeling Backscatter Properties of Snowfall at Millimeter Wavelengths, J. Atmos. Sci., 64, 1727-1736, DOI:10.1175/JAS3904.1

Matrosov S Y, Campbell, C, Kingsmill, D E, & Sukovich E, 2009. Assessing Snowfall Rates from X-Band Radar Reflectivity Measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(11), 2324-2339. DOI:10.1175/2009JTECHA1238.1

Heymsfield A J, Matrosov S Y, & Wood, N B 2016. Toward Improving Ice Water Content and Snow-Rate Retrievals from Radars. Part I: X and W Bands, Emphasizing CloudSat. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(9), 2063-2090. DOI: 10.1175/JAMC-D-15-0290.1

Ryzhkov A V, Zrnich D S (2019) Polarimetric Microphysical Retrievals. In: Radar Polarimetry for Weather Observations. Springer Atmospheric Sciences. Springer, Cham

Nakamura, K, Inomata, H, Kozu T, Awaka J, & Okamoto, K (1990). Rain Observation by an X- and Ka-band Dual-Wavelength Radar. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 68(5), 509–521. DOI: 10.2151/jmsj1965.68.5_509

Gosset M, & Sauvageot H (1992). A Dual-Wavelength Radar Method for Ice-Water Characterization in Mixed-Phase Clouds. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 9(5), 538–547. DOI: 10.1175/1520-0426(1992)009<0538:ADWRMF>2.0.CO;2

Martner B E, Wuertz D B, Stankov, B B, Strauch, R G, Westwater E R, Gage, K S, Dabberdt W F (1993). An Evaluation of Wind Profiler, RASS, and Microwave Radiometer Performance. Bulletin of the American Meteorological Society, 74(4), 599–613.

DOI: 10.1175/1520-0477(1993)074<0599:AEOWPR>2.0.CO;2

Matrosov S Y, Kropfli, R A, Reinking R F, & Martner B E, 1999. Prospects for Measuring Rainfall Using Propagation Differential Phase in X- and Ka-Radar Bands. *Journal of Applied Meteorology*, 38(6), 766–776. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0766:PFMRUP>2.0.CO;2

Vivekanandan J, G Zhang and M K Politovich, 2001: An assessment of droplet size and liquid water content derived from dual-wavelength radar measurements to the application of aircraft icing detection. Submitted to *J. Atmos. Oceanic Tech.* DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<1787:AAODSA>2.0.CO;2

Liao L, Meneghini R, Iguchi T, & Detwiler A, 2005. Use of Dual-Wavelength Radar for Snow Parameter Estimates. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(10), 1494–1506.
doi.org/10.1175/JTECH1808.1

Tyynelä, J, & Chandrasekar V, 2014. Characterizing falling snow using multifrequency dual-polarization measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13), 8268–8283. DOI: 10.1002/2013JD021369

Houghton H G, 1968. On precipitation mechanisms and their artificial modification. *J. Appl. Meteorol.* 7, 851–859. DOI:10.1175/1520-0450(1968)007<0851:OPMATA>2.0.CO;2

Battan L J, 1959. *Radar Meteorology*. University of Chicago Press, Chicago, p. 161.

Battan L J, 1973. *Radar Observations of the Atmosphere*. University of Chicago Press, Chicago, p. 324.

Robert A Houze Jr. , 2014. *Cloud Dynamics*. Elsevier, Oxford, p. 329

Businger S, Reed R J, 1989. Cyclogenesis in cold air masses. *Weather. Forecast.* 4, 133–156. DOI: 10.1175/1520-0434(1989)004<0133:CICAM>2.0.CO;2

Heymsfield G M, 1979. Doppler-radar study of a warm frontal region. *J. Atmos. Sci.* 36, 2093–2107. DOI: 10.1175/1520-0469(1979)036<2093:DRSOAW>2.0.CO;2

Hobbs P V, Matejka T J, Herzegh P H, et al. 1980. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. I: A case study of a cold front [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37: 568–596. DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<0568:TMAMSA>2.0.CO;2

Rutledge S A, Hobbs P V, 1983. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: a model for the feeder–seeder process in warm frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.* 40, 1185–1206. DOI: 10.1175/1520-0469(1983)040<1185:TMAMSA>2.0.CO;2

Stolzenburg M, Rust W D, Smull, B.F., Marshall, T.C., 1998. Electrical structure in thunderstorm convective regions: 1. Mesoscale convective systems. *J. Geophys. Res.* 113, 14,059–14,078. DOI:

10.1029/97JD03546

Houze Jr., R.A., Lee, W.-C., Bell, M.M., 2009. Convective contribution to the genesis of Hurricane Ophelia, 2005. *Mon. Weather Rev.* 137, 2778–2800. DOI: 10.1175/2009MWR2727.1

Sanders F, and L. F Bosart, 1985: Mesoscale Structure in the Megalopolitan Snowstorm, 11–12 February 1983. Part II: Doppler Radar Study of the New England Snowband. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1398–1407. DOI: 10.1175/1520-0469(1985)042<1398:MSITMS>2.0.CO;2

Martin J E, 1999. Quasigeostrophic forcing of ascent in the occluded sector of cyclones and the trowal airstream. *Mon. Weather Rev.* 127, 70–88. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<0070:QFOAIT>2.0.CO;2

Nicosia D J, and R H Grumm, 1999: Mesoscale Band Formation in Three Major Northeastern United States Snowstorms. *Wea. Forecasting*, 14, 346–368, DOI: 10.1175/1520-0434(1999)014<0346:MBFITM>2.0.CO;2

Jurewicz M L, and M S Evans, 2004: A Comparison of Two Banded, Heavy Snowstorms with Very Different Synoptic Settings. *Wea. Forecasting*, 19, 1011–1028. DOI: 10.1175/WAF-823.1

Schultz D M, and P N Schumacher, 1999: The use and misuse of conditional symmetric instability. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2709–2732. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<2709:TUAMOC>2.0.CO;2

Clark J H E, R P James, and R H Grumm, 2002: A reexamination of the mechanisms responsible for banded precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 3074–3086. DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<3074:AROTMR>2.0.CO;2

Novak D R, B A Colle, and R McTaggart-Cowan, 2009: The Role of Moist Processes in the Formation and Evolution of Mesoscale Snowbands within the Comma Head of Northeast U.S. Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 2662–2686. DOI: 10.1175/2009MWR2874.1

Joseph C Picca, David M Schultz, Brian A. Colle, Sara Ganetis, David R Novak, Matthew J Sienkiewicz Bull.2014, The Value of Dual-Polarization Radar in Diagnosing the Complex Microphysical Evolution of an Intense Snowband, *Amer. Meteor. Soc.* 95 (12): 1825–1834. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00258.1

Kajikawa M, 1982. Observation of the falling motion of early snow flakes part I. Relationship between the free-fall pattern and the number of component snow crystals. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 60, 797–803. DOI: 10.2151/jmsj1965.60.2_797

Locatelli J D, Hobbs P V, 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *J. Geophys. Res.* 79, 2185–2197. DOI: 10.1029/JC079i015p02185

