王卫民，徐八林，雷勇，等，2024. Ka波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析[J]. 气象，50(3)：291-302. Wang W M，Xu B L，Lei Y，et al，2024. Analysis of precipitation echoes from Ka-band millimeter wave cloud radar on the southeast margin of the Tibetan Plateau [J]. Meteor Mon，50(3)：291-302(in Chinese).

Ka波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析*

王卫民[1] 徐八林[1] 雷 勇[2] 舒 斌[1] 马 芳[1]

1 云南省大气探测技术保障中心，昆明 650034

2 中国气象局气象探测中心，北京 100081

提 要： 利用丽江站新建的Ka波段毫米波云雷达获得的高时间分辨率的垂直观测资料，结合同址的地面自动气象站和雨滴谱的分钟数据、常规探空数据和附近C波段天气雷达的强度回波，分析了两次降水过程前后云雷达反射率因子Z、径向速度V_r、速度谱宽S_w的垂直变化规律。分析表明：在发生弱降水时，云雷达Z在垂直方向的变化不明显；但V_r、S_w值在0℃层稍低位置有一个明显的分界层(融化层)，粒子通过融化层后V_r、S_w都是快速变大，这个变化主要是粒子的相态由固态变成液态引发的，可以通过V_r、S_w突变值的位置来识别0℃层亮带的高度。从C波段天气雷达回波强度、剖面图及云雷达位置的时间-高度图看，对毛毛雨和小雨的回波，强度和高度差异比较明显，毛毛雨比小雨回波高度低、强度弱，与云雷达相比C波段雷达对高一些的云观测不到，对距离较远的弱降水回波无法观测到；由于相同粒子对不同波长电磁波的散射不一样，造成两种雷达垂直方向观测到的Z变化不同。对比弱降水回波，云雷达在强降水时：Z出现缺口；V_r在0℃层以上有较大的正值(弱降水的V_r都是负值)；在0℃层以上S_w变得更大(弱降水时S_w在0℃层以上值较小，在0℃层以下较大)。在强降水时，从C波段雷达回波强度时间-高度图看，垂直方向回波强度变化明显，在同一时刻回波强度由地面向空中的变化是逐渐减小的；不同时间同一高度层强度也有变化，云雷达雨衰缺口时段回波明显强于其他时段。在个例分析中，发生分钟降水量在0.3 mm以下强度的降水，云雷达可以观测到完整的云信息；发生分钟降水量在0.5 mm以上强度的降水，云雷达会有严重的雨衰，无法观测到完整的云信息。

关键词： 毫米波云雷达，分钟降水量，C波段天气雷达，降水回波分析

中图分类号： P458，P426 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.122001

Analysis of Precipitation Echoes from Ka-Band Millimeter Wave Cloud Radar on the Southeast Margin of the Tibetan Plateau

WANG Weimin[1] XU Balin[1] LEI Yong[2] SHU Bin[1] MA Fang[1]

1 Yunnan Atmospheric Detection Technology Support Center, Kunming 650034

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: This article analyzes the vertical variation patterns of the echo intensity (Z), radial velocity (V_r), and velocity spectral width (S_w) of the cloud radar before and after two precipitation processes, using high-resolution vertical observation data obtained from the newly built Ka-band millimeter wave cloud radar at Lijiang Station, combined with minutely data from ground automatic weather stations and

* 国家自然科学基金项目(42075013、41765003)、云南省重点研发计划-社会发展专项(202203AC10006)、中国气象局烤烟气象服务中心开放研究基金(KYZX2022-07)和中国气象局大气探测重点实验室课题共同资助

2023年4月19日收稿； 2023年12月18日收修定稿

第一作者：王卫民，主要从事气象信息网络建设、运维和天气雷达保障及应用气象研究. E-mail：weimin_wang2010@sina.com

通讯作者：徐八林，主要从事天气雷达应用研究. E-mail：ynxbl@sina.com

raindrop spectra at the same site, conventional sounding data, and intensity echoes from nearby C-band weather radar. Analysis shows that during weak precipitation, the vertical variation of cloud radar Z is not significant, but there is a clear boundary layer (melting layer) at a slightly lower position of the 0℃ layer for V_r and S_w values. After particles pass through the melting layer, V_r and S_w rapidly increase. This change is mainly caused by the phase state of particles changing from solid to liquid. The height of the bright band in the 0℃ layer can be identified by the position of the sudden changes in V_r and S_w values. From the time-height maps of C-band weather radar echo intensity, profile, and cloud radar position, we can see a significant difference in intensity and height between the echoes of drizzle and light rain. The height of the echoes of drizzle is lower and weaker than that of light rain. Compared to cloud radar, C-band radar cannot observe higher clouds and weak precipitation echoes at longer distances. Due to the different scattering of electromagnetic waves of different wavelengths by the same particle, the Z changes observed in the vertical direction by the two radars are different. Compared with weak precipitation echoes, during strong precipitation cloud radar shows a gap in Z, V_r has a significant positive value above the 0℃ layer (V_r for weak precipitation is negative), and S_w becomes larger above the 0℃ layer (during weak precipitation, S_w values are smaller above the 0℃ layer and larger below the 0℃ layer). During heavy rainfall, from the C-band radar echo intensity time-height map, the vertical direction echo intensity changes significantly, and at the same time, the variation of echo intensity from ground to air gradually decreases. The intensity of the same altitude layer also varies at different times, and the echo during the rain attenuation gap period of cloud radar is significantly stronger than that in other periods. The case study shows that if precipitation occurs with an intensity of less than 0.3 mm per minute, cloud radar can observe complete cloud information; if precipitation with a minimum rainfall intensity of 0.5 mm or more occurs, cloud radar will experience severe rain attenuation and cannot observe complete cloud information.

Key words: millimeter wave cloud radar, minutely rainfall, C-band weather radar, precipitation echo analysis

引 言

青藏高原作为地球的第三极，是气候变化的敏感区域，也是国内外学术界关注的热点区域。丽江地区位于青藏高原东南缘，处于横断山脉东侧和云贵高原的交接处，属于高原地区。这一地区的垂直观测长期以来只有丽江站的常规探空。常规探空存在几个问题：每天只有两个固定时次的观测，时间分辨率严重不足；从放球开始观测到结束，一次观测需要几十分钟，天气系统可能会发生变化；探空气球受水平风的影响会漂移，实际上不是垂直剖面的探空。2022年，通过“气象监测预警补短板工程”，在丽江站建设了地基遥感垂直观测系统，获得了高时间分辨率的垂直观测资料，其中包括Ka波段毫米波云雷达。利用高时间分辨率的观测资料来分析这一地区天气系统的垂直结构具有重要意义。

毫米波云雷达利用云雾和弱降水对电磁波的散射作用，对探测范围内云、雨、雾的空间位置、反射率因子、径向速度、速度谱宽参数等进行定量探测，获取目标的形状、相态和空间分布等特征。毫米波云雷达主要用于观测云和弱降水，国内外利用毫米波云雷达的观测已经有很多年，很多学者在这方面作了分析和研究。

云雷达性能方面：毫米波雷达比普通天气雷达以及风廓线雷达更适合监测云的变化（仲凌志等，2009）；毫米波云雷达有35 GHz和94 GHz两个工作波段，由于衰减和非瑞利散射，降水时94 GHz雷达反射率因子远小于35 GHz雷达反射率因子，使探测到的高云云顶高度偏低，但94 GHz云雷达抑制地物杂波的能力更强，在晴空低云探测方面具有优势（吴举秀等，2014；徐八林等，2008）；Ka波段毫米波云雷达探测能力能够基本满足云观测的使用要求，得到回波强度、垂直速度、速度谱宽、云等气象产品数据（赵静等，2016）；还有学者对毫米波云雷达的回波衰减订正、衰减特性、距离旁瓣回波问题等进行研究（冯永会等，2016；钟正宇等，2018；曾正茂等，2022）；近几年，发展了基于Ka/Ku双波段云雷达的

一些反演方法和雨区衰减订正方法的研究(刘黎平等,2021;刘黎平,2023)。

云雷达和其他观测资料对比方面:毫米波云雷达发射的电磁波能够穿透厚度较大的云层,探测出云垂直结构,所探测的云底高和云顶高与 L 波段探空结果保持良好的一致性,但由于探空气球漂移造成两者水平偏差较大,从而探测到不同的云,造成两者对云观测结果差异较大(赵静等,2017);探空气球升空后有严重的水平偏移(探空升至 15 km 平均偏移距离为 53 km),同时使用时间和空间匹配原则筛选探空和云雷达的云高样本时,二者观测的相关系数显著提高,有效减小探空漂移引起的误差(王瑾等,2022);还有学者对毫米波云雷达与激光云高仪观测数据进行对比分析(李思腾等,2015)。

云雷达获取到的弱降水信息包括反射率因子 Z、径向速度 V_r、速度谱宽 S_w 和退偏振因子 LDR 等。Gossard et al(1997)利用云雷达功率谱密度区分云和降水;刘黎平等(2015)基于云雷达探测数据分析西藏那曲地区夏季云的统计特征和不同类型云的一些宏观特征;刘黎平和周淼(2016)综合利用 Z、V_r 和 LDR 来识别 0℃层亮带位置及提取主要变化特征;李玉莲等(2019)利用不同水凝物相态下 Z、V_r、S_w 和 LDR 等对水凝物的相态进行识别;杨晓等(2019)基于毫米波雷达云回波的特征量与多参数阈值法相结合的技术,对非降水云系的回波进行了自动分类研究。

每一种设备都有特定的观测能力和局限性,在实际应用中,往往采用多种观测设备获得的数据联合分析。王柳柳等(2017)利用云雷达功率谱数据和探空数据对冻雨和降雪微物理和动力特征分析;崔延星等(2018)基于毫米波云雷达、C 波段连续波雷达和激光云高仪融合数据,对不同类型云的宏观特征进行分析,并研究广东龙门地区的夏季云参数的统计特征;丁虹鑫等(2018)联合使用云雷达、微波辐射计、L 波段探空数据,反演得到大气湿度廓线;陶法等(2020)采用 Ka 波段云雷达资料,结合地面自动气象站、激光云高仪资料,从强度、速度、线性退极化比以及晴空回波高度等方面,分析晴空回波垂直结构和变化特征;张静怡等(2022)对云雷达功率谱数据进行预处理,并采用降水现象仪对云雷达观测进行验证,在此基础上,选取具有层状云降水特性的弱降水过程,利用云雷达功率谱数据反演了雨滴谱,探究墨脱地区旱季和雨季弱降水的微物理特征;左园园等(2022)基于第三次青藏高原大气科学试验的垂直探测 Ka 波段毫米波云雷达(Ka-MMCR)、K 波段微降水雷达(K-MRR)和地面雨滴谱仪,结合天气雷达、ERA-Interim 再分析资料和 FY-2E 卫星资料,对那曲一次高原涡过境的不同云-降水垂直结构和特征进行了研究和对比;陈羿辰等(2018)、武静雅等(2021)联合多种观测资料对降雪过程进行了分析。

其他方面,岑炬辉等(2021)、胡树贞等(2022)利用 Ka 波段扫描式毫米波雷达,对降水-雾过程和海雾过程进行特征分析;董佳阳等(2022)为深入认识对流降水云结构及动力特征,使用 C 波段垂直指向雷达,分析对流垂直结构及大气垂直运动随高度分布的演变特征。

丽江站的雨季 5 月底(第 30 候)开始,10 月中旬(第 57 候)结束;全年只有一个降水峰值,出现在 7 月底;全年有接近 40%的天数出现降水,5—10 月则达到了 60%(刘翔卿等,2018)。丽江站位于云南西北,云南短时强降水(指每小时降水量≥20 mm)事件主要发生在下午和夜间,发生次数空间分布差异很大,自西北向东南增加,小值区分布在滇西北,年均不足 1 次(苏锦兰等,2021)。丽江站从 2022 年 8 月 17 日起到 12 月底,云雷达积累了 4 个多月的观测资料。查询同址地面自动气象观测站的降水量资料,逐月降水量及当月最大小时降水量见表 1,由表可知云雷达开始观测的时间不在当年的主汛期。选取这期间两次降水过程的回波进行分析,一

表 1　丽江站 2022 年逐月降水量及当月最大小时降水量

Table 1　Monthly precipitation and maximum hourly rainfall at Lijiang Station in 2022

月份	降水量/mm	最大小时降水量/mm
1	1.9	0.5
2	8.7	1.1
3	0.0	0.0
4	36.6	2.5
5	72.9	5.7
6	266.5	33.0
7	162.8	28.6
8	111.0	10.9
9	145.0	15.2
10	36.3	3.5
11	0.0	0.0
12	4.6	1.7

次是持续约 7 h 的弱降水回波，发生时间是 2022 年 10 月 17 日 06:00—13:00(北京时，下同)；另一次是小时降水量为 15.2 mm 的回波(云雷达观测区间小时降水量最大值)，发生在 9 月 4 日 00:00。本文引入云雷达同址的地面自动气象站分钟雨量、雨滴谱分钟数据，并结合常规探空数据和附近 C 波段天气雷达的回波，分析了这两个降水过程前后的回波。

1 个例分析

毫米波云雷达主要性能指标：工作波段，34.5～35.5 GHz；扫描方式，垂直固定指向；探测范围，0.12～20 km；反射率因子测量范围，－45～40 dBz；速度测量范围，－18～18 m·s^{-1}；谱宽测量范围，0～15 m·s^{-1}；天线波束宽度，≤0.4°；线性退极化比，－30～－5 dB；最小可检测信号≤－110 dBm。

云雷达位于 26°50′49″N、100°13′03″E，天线海拔高度 2382.9 m；C 波段天气雷达位于 26°43′37″N、100°2′31″E，天线海拔高度 3174 m；云雷达位于 C 波段雷达东北方向(北偏东约 53°)，直线距离约 21.97 km，天线高度差 791.1 m。由于两部雷达距离较近，忽略地球曲率半径影响，在 C 波段雷达 VCP21 观测模式时，0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°角对应到云雷达回波的高度依次约为 982、1365、1710、2095、2442、3099、4624、6513、8570 m。

1.1 一次弱降水个例分析

通过查询同址地面自动气象站观测降水量值，选取了一个有连续弱降水的时段，时间为 2022 年 10 月 17 日 06:00—13:00，持续约 7 h，最大小时降水量 1.3 mm，最大分钟降水量 0.2 mm，详见表 2 和表 3。

表 2 2022 年 10 月 17 日部分时次小时地面观测要素值

Table 2 Partial hourly ground observation element values on 17 October 2022

时间/BT	降水量/mm	温度/℃	气压/hPa	相对湿度/%
05	0.0	10.1	771.2	94
06	1.3	9.8	771.3	95
07	0.8	9.6	771.7	97
08	0.0	9.6	772.1	96
09	0.7	9.7	772.8	94
10	0.3	9.9	773.3	92
11	0.3	9.9	773.4	93
12	0.1	10.3	773.0	87
13	0.1	11.1	772.2	84

表 3 2022 年 10 月 17 日分析时段分钟降水量

Table 3 Minutely rainfall value during the analysis period on 17 October 2022

降水量/mm	观测时间/BT	降水量/mm	观测时间/BT	降水量/mm	观测时间/BT
0.1	05:22	0.1	05:33	0.1	05:48
0.0	05:23	0.1	05:34	0.1	06:16
0.0	05:24	0.0	05:35	0.1	06:17
0.1	05:25	0.2	05:36	0.2	06:18
0.0	05:26	0.0	05:37	0.1	06:19
0.0	05:27	0.0	05:38	0.1	06:20
0.1	05:28	0.1	05:39	0.0	06:21
0.1	05:29	0.0	05:40	0.1	06:22
0.1	05:30	0.0	05:41	0.0	06:23—06:45
0.0	05:31	0.1	05:42	0.1	06:46
0.1	05:32	0.0	05:43—05:47		

1.1.1 云雷达回波分析

云的相态由云内温度决定，如果温度高于 0℃，则被认为是水云，而冰云的温度一般低于－20℃，介于两者温度之间的是混合云。有学者认为区分冰云、混合云和水云的温度范围为 $T<-16$℃、0℃≤T≤－16℃和 $T>0$℃更加合理(Zhao et al，2017)。查询了云雷达同址当天 08:00 探空资料，0℃层的高度为 4327 m，－16℃层的高度约为 7508 m。05:00—08:00 地面各气象要素变化很小，可以近似认为云雷达观测时段的温度层与探空观测到的接

近,减去天线高度 2382 m,0℃、−16℃层对应云雷达的高度为 1945 m、5126 m。云雷达测到的云高约 3.6 km,这个高度是混合云。

选取云雷达的反射率因子 Z、径向速度 V_r 和谱宽 S_w 来分析,主要分析了降水持续的 05:00 前后时段。

从反射率因子 Z 看(图 1a),约 04:41 开始云高从 1.8 km 增加到 3.0 km,Z 从 04:50 开始变强由 −20 dBz 以下增加到 0 dBz 左右;05:22—05:48 降水时段,在 1.9 km 以下在 35 dBz 左右,1.9 km 以上随高度增加减小。在弱降水时段,Z 在垂直方向变化不明显。

径向速度 V_r 定义下沉运动速度为负,上升运动速度为正,从速度图看(图 1b):在弱降水时段,1.8 km 高度上下有个明显的分界,这个位置略低于探空观测到的 0℃层(1945 m),属于层状云降水的融化层,在融化层固态降水粒子(雪花、冰晶)逐渐变成液态粒子后尺寸减小、密度增加,导致粒子下落速度显著增加;通过融化层后,随着粒子下落速度增加空气阻力也加大,当达到收尾速度时粒子的下落速度基本不变(底层大气密度较大,下落速度会略变小)。05:22—05:48 弱降水时段,1.9 km 以下 V_r 集中在 −8～−7 m·s^{-1},在 2 km 以上 V_r 为 −2 m·s^{-1} 以下;04:50—05:21 无降水时段,1.9 km 以下 V_r 变化较大,大部分在 3 m·s^{-1} 左右,最大值在 −7 m·s^{-1} 以下,在 2 km 以上和降水时段一致。

谱宽 S_w(图 1c):04:50 左右开始,在融化层上下 S_w 有明显的变化,从不到 1 m·s^{-1} 变动到超过 1 m·s^{-1}。S_w 是多普勒速度的方差,反映了多普勒速度偏离平均值的程度。S_w 增加说明固态降水粒子和液态降水粒子下落速度的差异:融化层以下粒子呈现液态(雨滴),收尾速度主要取决于液态降水粒子的大小,较大的液态降水粒子下落速度较大,较小的液态降水粒子下落速度也较小,液态降水粒子的大小不完全一致,因而 S_w 较大;在融化层以上,粒子以固态为主,固态降水粒子大小对下落速度的影响较小,不同大小的固态降水粒子收尾速度相差不大,因而 S_w 也较小。

通过 V_r、S_w 图可以发现,在发生弱降水时这两个值在 0℃层(探空观测)发生突变,那么可反过来可以通过 V_r、S_w 突变值的位置来识别 0℃层亮带的高度。

再引入自动气象站的分钟降水量来分析云雷达回波。从反射率看,从 04:50 开始,回波的高度和强度开始增加;但从分钟降水量看,05:22 才开始观测到降水,05:22—05:48 持续了约 26 min,这期间有 11 min 观测到降水,除一次是 0.2 mm 外其余都是 0.1 mm(由于云雷达回波是持续的,而降水量累计到 0.1 mm 需要时间,期间分钟降水为 0 应该理解为弱降水需要几分钟的累计才到 0.1 mm,而不是没有降水)。

对比 04:50—05:21 和 05:22—05:48 这两个时段的回波,从云高、回波反射率强度及垂直廓线等无显著差异;速度、谱宽有较明显的差异。查询云雷达同址的雨滴谱分钟数据(雨滴谱数据库中只有粒子

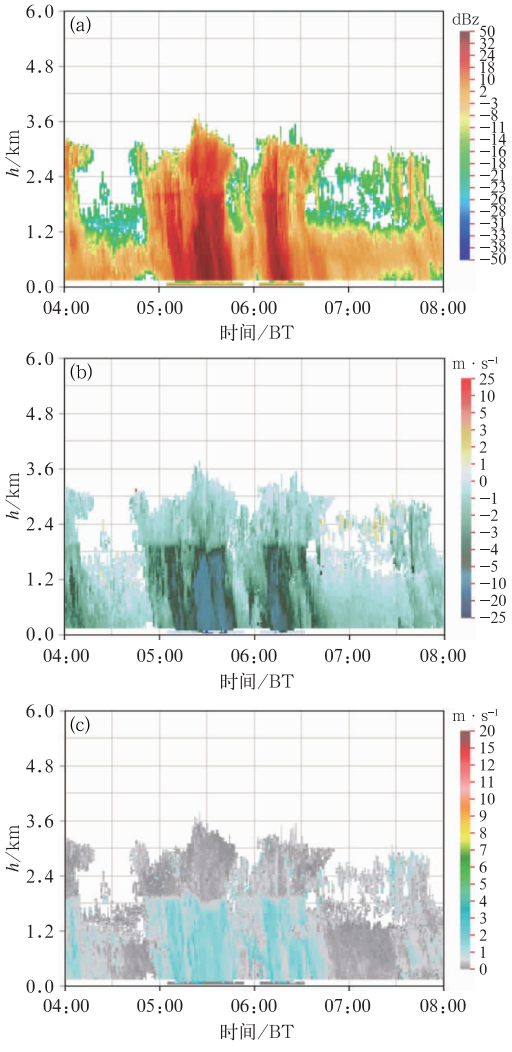


图 1　2022 年 10 月 17 日弱降水前后云雷达回波

(a)反射率因子,(b)径向速度,(c)谱宽

Fig. 1　Cloud radar echoes before and after weak precipitation on 17 October 2022

(a) Z, (b) V_r, (c) S_w

个数值，无直径、速度值，且是按秒记录，降水时段一分钟有多个值，详细统计较为困难），05:02—05:21这段时间观测到降水，有粒子个数值，说明这一时段产生的是毛毛雨这样的微量降水，但自动雨量站无法观测到。进一步分析，04:50—05:01 这段时间，粒子 V_r 值约为 $-3\ m \cdot s^{-1}$，按这个速度，在 1.8 km 的高度形成毛毛雨，落到地面需要约 10 min，与雨滴谱观测到的时间一致。

在 05:22—05:48 弱降水时段，粒子下落过程中在 1.8 km 左右速度值达到约 $-8 \sim -7\ m \cdot s^{-1}$，在随后下落过程基本保持不变，这个速度到达地面约需要 4 min。

云雷达观测到的是垂直方向的粒子，而粒子除了垂直下落外还有水平方向的移动，在同一垂直线下部的粒子是从云雷达上风方向漂移过来的粒子；另雷达探测的盲区是 120 m，按 $8\ m \cdot s^{-1}$ 的下落速度需要近 15 s；就是说，云雷达观测到的雨滴并没有垂直掉落在地面上，掉落的位置取决于粒子高度、下落速度和水平风的大小。综合来看，从 04:50 云雷达观测值显著变化，Z 变强、V_r 增大、S_w 变宽，在 1.8 km 高度开始形成毛毛雨，在 05:02 雨滴谱观测到毛毛雨；随着回波变强、雨滴变大，在 05:22 开始地面自动站观测到降水。

1.1.2 C 波段多普勒天气雷达回波分析

根据云雷达在 C 波段雷达的距离和方位，通过 CAPPI 产品的剖面提取 C 波段雷达观测回波强度在云雷达位置的时间-高度变化（图 2），图中 0 km 高度为 C 波段雷达天线高度。C 波段雷达如果在指定方位角做 RHI 扫描，则可以获得与云雷达时空一致的目标物信息；但在执行 VCP21 观测模式时，一个体扫约需 6 min，扫描 9 层，这样对于一个取样值底部和顶部时间相差约 6 min，另垂直方向的部分回波是通过插值得到，这两个因素导致与云雷达的观测值存在一定的差异；还有这个图是手工抽取的，精确度方面也有一定的欠缺。在图 2 中，从回波高度看，05:44、05:50、05:56 的三个值比云雷达要低，其他时次基本一致；从回波反射率强度看，05:21、05:27、05:33 的三个值比其他时间的要强，这个时间段在云雷达的 Z 值垂直方向上差别不明显，地面观测的雨量值表明这段时间是持续弱降水时段。

从 C 波段天气雷达回波及剖面（图 3）和时间-高度（图 2）看，对毛毛雨和小雨的回波，强度和高度差异比较明显，毛毛雨比小雨回波高度低、强度弱；与云雷达相比 C 波段雷达对高一些的云观测不到。在有弱降水的时段，云雷达的 Z 值在垂直方向变化不明显。两种雷达的 Z 值在垂直方向的变化不一致，原因分析：Z 跟目标物单位体积内水凝物粒子个数与粒子直径以及粒子的介电常数有关；在垂直方向，随着粒子下落，粒子尺寸变小（雪花、冰晶变成液态水后尺寸变小）、下落速度增加（影响到单位体积内粒子个数变少）导致 Z 变小，但液态降水粒子的介电常数比固态降水粒子的大导致 Z 变大（弗雷德里克·法布里，2021）；对同一目标物这些值是一样的，但相同粒子对不同波长电磁波的散射不一样，两种雷达的工作波长相差很大，C 波段雷达工作波长约5.4 cm，云雷达工作波长约 0.86 cm，两种雷达工作波长的差异造成垂直方向观测到的 Z 变化不同。

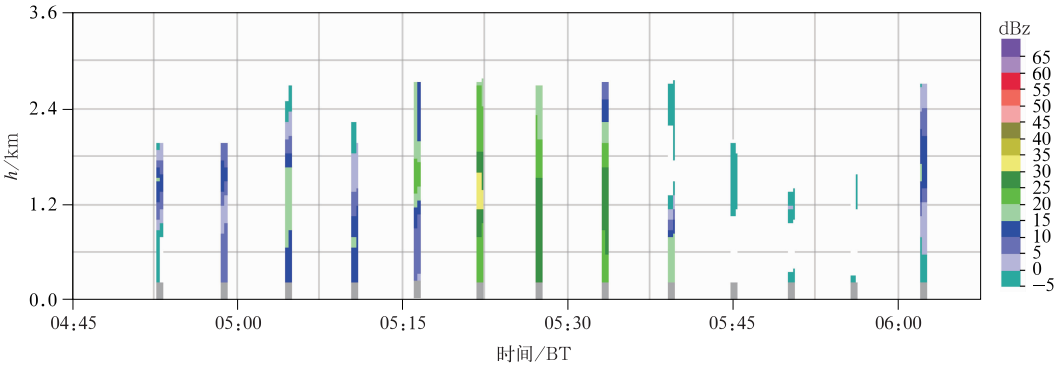


图 2 2022 年 10 月 17 日弱降水前后 C 波段雷达回波强度在云雷达位置的时间-高度变化

Fig. 2 Time-height variation of C-band radar echo intensity at cloud radar positions before and after weak precipitation on 17 October 2022

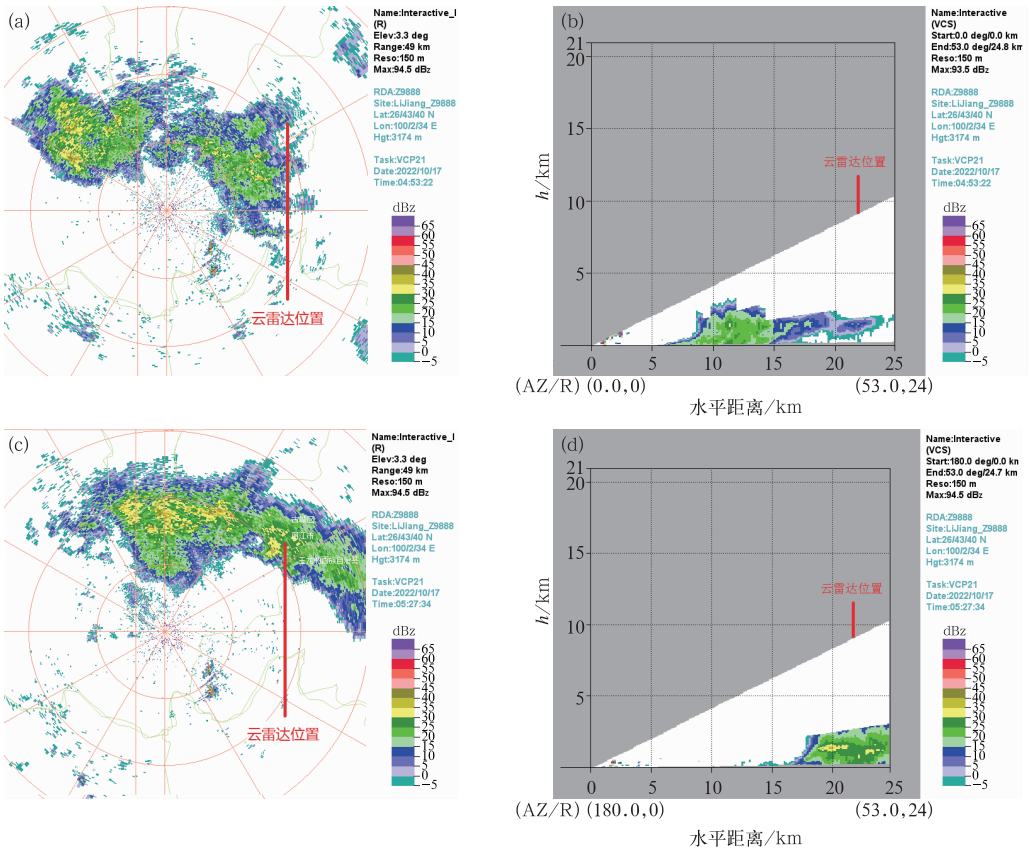


图 3　2022 年 10 月 17 日(a,b)04:53:22,(c,d)05:27:34
弱降水前后 C 波段雷达(a,c)回波及(b,d)剖面

Fig. 3　C-band radar (a, c) echo and (b, d) profile before and after weak precipitation at (a, b) 04:53:22 BT and (c, d) 05:27:34 BT 17 October 2022

1.2　一次强降水个例分析

通过查询同址地面自动气象站雨量值,选取了云雷达资料观测区间的最大小时降水量,发生在 2022 年 9 月 3 日,小时降水量为 15.2 mm。分析分钟降水量,发现降水从 22:59 开始,持续近 1 h,强降水发生在 23:06—23:23,18 min 累计降水量 9.1 mm,分钟降水量最大 0.8 mm,最小 0.3 mm,平均 0.51 mm。详见表 4、表 5。

表 4　2022 年 9 月 3 日部分时次小时地面观测要素值

Table 4　Partial hourly ground observation element values on 3 September 2022

时间/BT	降水量/mm	温度/℃	气压/hPa	相对湿度/%
20	0.0	17.6	762.1	93
21	0.0	17.1	762.8	95
22	0.0	17.2	763.6	96
23	0.2	17.3	764.4	89
24(00)	15.2	16.2	764.4	97
01	0.8	16.2	764.3	98

查询了同址探空 20:00 资料,0℃层的高度约为 5505 m,−16℃层的高度约为 8441 m,减去天线高度 2382 m,0℃、−16℃层对应云雷达的高度分别为 3123 m、6059 m,20:00—23:00 地面各气象要素变化很小,可以近似认为云雷达观测时段的温度层与探空观测到的接近。

从云雷达反射率看(图 4a),从 22:37 开始回波高度增加,约 5 min 从 3.6 km 增加到 6.6 km;从

22:50开始回波强度变强，从2 dBz以下快速增加到30 dBz以上；23:02开始出现缺口。从速度图看(图4b)，22:30开始就观测到2 km高度V_r为正值(向上)，从22:42开始观测到5 km上下高度出现V_r正值，在强降水时段回波信息不完整，23:23回波的高度达到12 km；从V_r看，22:49前后有非常明显的变化，V_r随高度而不同，3 km以上为$-2\ m\cdot s^{-1}$以下，2～3 km约-4～$6\ m\cdot s^{-1}$，2 km以下约为$-8\ m\cdot s^{-1}$；从V_r分析看，22:51开始在2 km高度形成毛毛雨(粒子速度$-5\ m\cdot s^{-1}$)，22:51开始有较大的雨滴(粒子速度$-8\ m\cdot s^{-1}$)，$-8\ m\cdot s^{-1}$下落的水滴到地面约需要4 min，雨滴小累计到可以计数也要一点时间，地面雨量站22:59观测到0.1 mm降水。从S_w看(图4c)，从22:49开始有明显的变化，3 km以下高度从不到$1\ m\cdot s^{-1}$到超过$1\ m\cdot s^{-1}$，另在23:22在10 km高度达到$2\ m\cdot s^{-1}$。

表5 2022年9月3日分析时段分钟降水量

Table 5 Minutely rainfall value during the analysis period on 3 September 2022

降水量/mm	观测时间/BT	降水量/mm	观测时间/BT	降水量/mm	观测时间/BT
0.1	22:59	0.6	23:18	0.1	23:37
0.1	23:00	0.5	23:19	0.2	23:38
0.2	23:01	0.6	23:20	0.2	23:39
0.2	23:02	0.7	23:21	0.1	23:40
0.3	23:03	0.5	23:22	0.1	23:41
0.3	23:04	0.5	23:23	0.1	23:42
0.3	23:05	0.3	23:24	0.1	23:43
0.5	23:06	0.3	23:25	0.1	23:44
0.5	23:07	0.3	23:26	0.4	23:45
0.5	23:08	0.4	23:27	0.2	23:46
0.4	23:09	0.3	23:28	0.1	23:47
0.4	23:10	0.2	23:29	0.1	23:48
0.5	23:11	0.1	23:30	0.1	23:49
0.3	23:12	0.1	23:31	0.2	23:50
0.4	23:13	0.1	23:32	0.0	23:51
0.6	23:14	0.1	23:33	0.0	23:52
0.4	23:15	0.0	23:34	0.1	23:53
0.4	23:16	0.2	23:35	0.0	23:54
0.8	23:17	0.2	23:36	0.0	23:55

对比弱降水回波，在强降水时：Z出现缺口，在缺口前后垂直方向的变化同样不明显；V_r在0℃层以下也是变大，但在0℃层以上V_r有比较大的向上的正值，超过$5\ m\cdot s^{-1}$(弱降水的V_r都是负值)；在0℃层以上S_w变得更大，达到$2\ m\cdot s^{-1}$(弱降水时S_w在0℃层以上值较小，在0℃层以下较大)。

从C波段雷达23:18(地面自动站分钟降水量最大值发生时间附近)剖面图看(图5b)，30 dBz以上回波在2.9 km以下，加天线高度差791 m，云雷达所在位置高度应在3.7 km以下，C波段雷达平显的仰角应在6.0°及以下才能观测到强回波，图5中选用4.3°。

对比23:23前后的回波(C波段雷达选取23:18和23:35)，C波段雷达强度变化明显，强度随降水减弱显著下降，但高度变化不大；云雷达在强降水时段23:06—23:23有一个明显的缺口，判定为强降水造成Ka波段毫米波严重的雨衰，导致无法观测到完整的云信息。中间出现零星的比较高的回波，原因是有0.3 mm这样的较小分钟降水量，另外强降水条件下除了雨减，天线罩表面也会有积水，观测到的回波较真实回波高度变低、强度变弱。

从强降水前后C波段雷达回波强度在云雷达位置的时间-高度变化看(图6)：从22:55—23:47回波高度在9 km左右，与C波段雷达最大扫描角度对应的高度相当(该区间云雷达观测到的回波高度最高达12 km)。从23:52开始，C波段雷达回波高度不到3 km，而这段时间云雷达观测到2层回波，除3 km以下的回波外，在8～11 km高度也有较弱的回波，这段时间23:53和00:01地面自动站各观测到0.1 mm降水，高层的弱回波C波段雷达没有观测到。云雷达在强降水时段23:06—23:23有一个明显的缺口，这期间C波段雷达在3 km以下回波

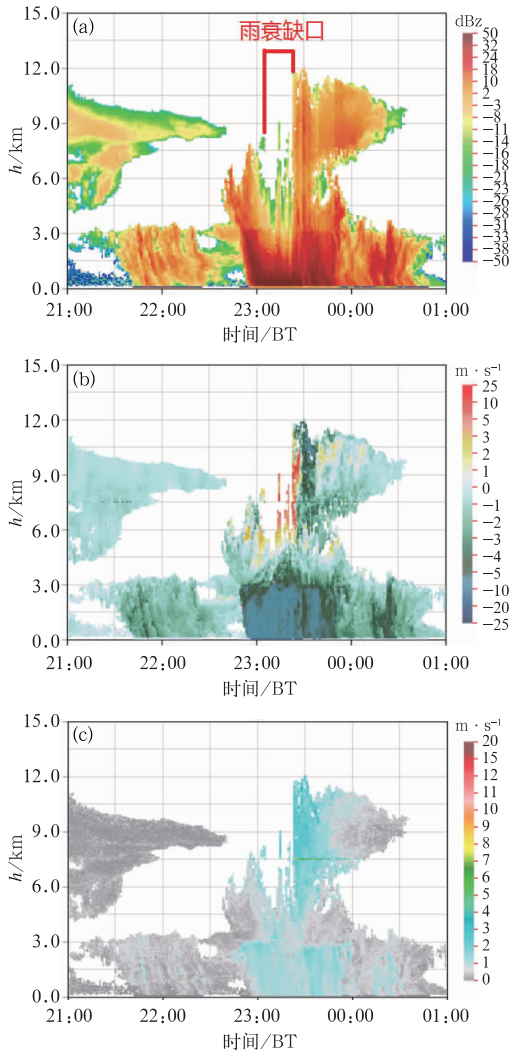


图 4　2022 年 9 月 3 日强降水前后云雷达回波

(a)反射率因子,(b)径向速度,(c)谱宽

Fig. 4　Cloud radar echoes before and after severe precipitation on 3 September 2022

(a) Z, (b) V_r, (c) S_w

强度基本上在 30 dBz 以上,部分时段达到 35 dBz,其中 23:01 在 0～3 km 达到 35 dBz 以上,对应地面分钟雨量不是最大值,原因一是空中的雨滴掉到地面需要时间,二是受水平风的影响没有掉到正下方;在地面自动站记录雨强最大值 23:18 左右,在 3～9 km 高度的回波比其他时间的取样值要更强(差值约在 10 dBz 以上)。从图 6 也可以看到,云雷达雨衰缺口对应 C 波段雷达回波强度是 30～35 dBz,回波高度达到 3.8 km 左右(加两部雷达天线高度差 791 m)。从垂直方向看,在同一时刻回波强度由地面向空中的变化是逐渐减小的;在不同时间同一高

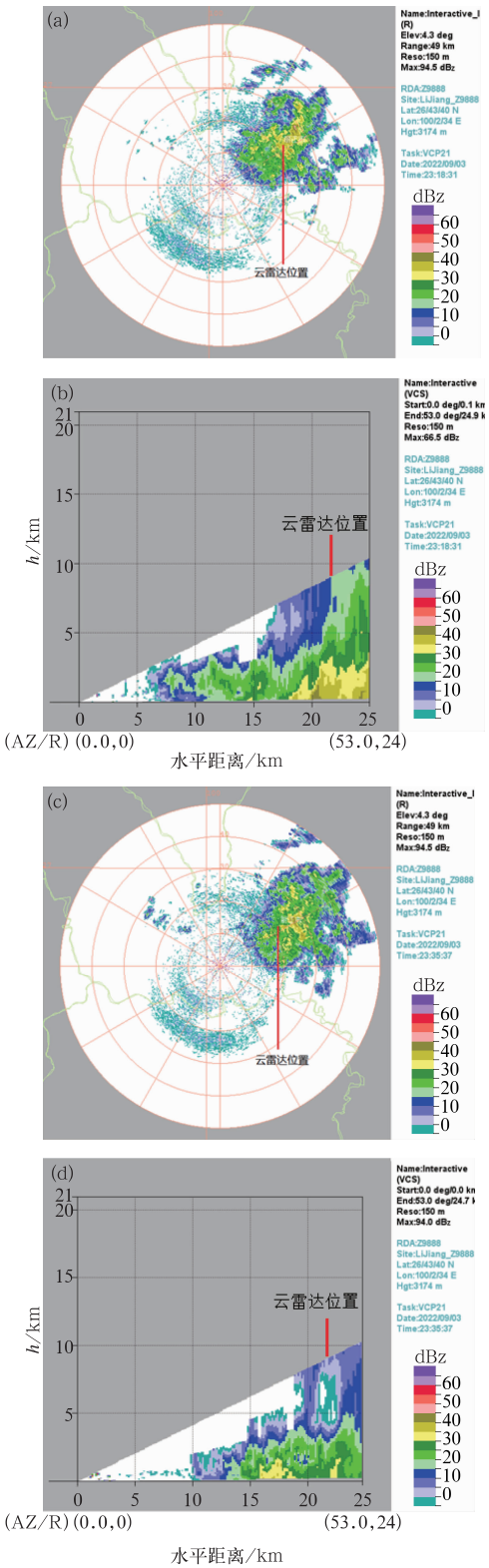


图 5　2022 年 9 月 3 日(a,b)23:18:31,(c,d)23:35:37 强降水前后 C 波段雷达(a,c)回波及(b,d)剖面

Fig. 5　C-band radar (a, c) echo and (b, d) profile before and after severe precipitation at (a, b) 23:18:31 BT and (c, d) 23:35:37 BT 3 September 2022

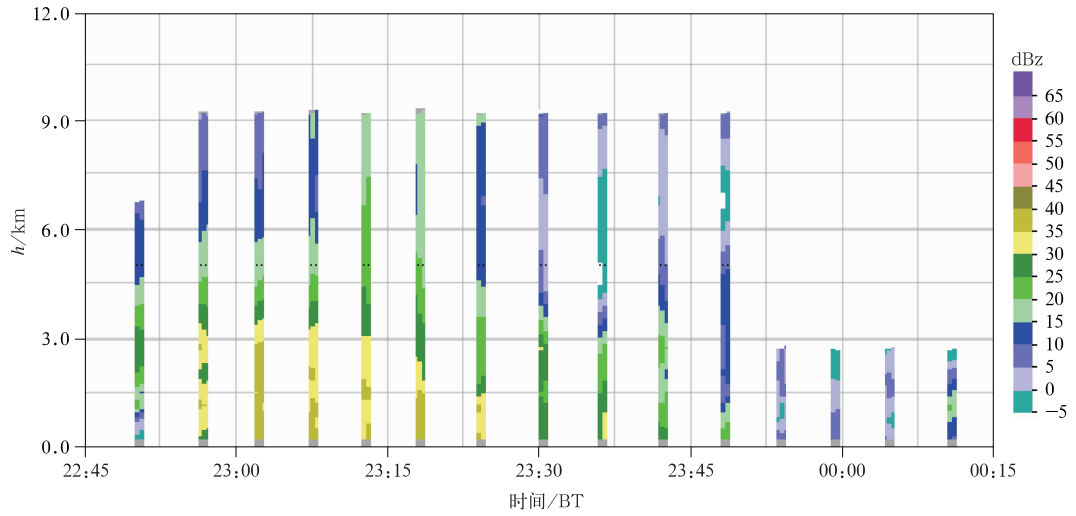


图 6 2022 年 9 月 3 日强降水前后 C 波段雷达回波强度在云雷达位置的时间-高度变化

Fig. 6 Time-height variation of C-band radar echo intensity at cloud radar positions before and after severe precipitation on 3 September 2022

度层强度有变化，假如水凝物粒子的相态基本不变（即介电常数基本不变），则此变化主要由水凝物粒子数量和大小引发，单位体积内水凝物粒子个数增加、粒子直径加大，回波强度就会变强，反应到地面就是降水量变大。

另外在云雷达回波上（图 4），22:00 前后探测到无降水的双层云，靠近地面的第一层云的云高约 3.4 km，第二层云的高度范围约 8～10 km；C 波段雷达只观测到靠近地面的这一层云，从剖面图看云高也要低一些（图 7）。

2 结 论

丽江云雷达运行了 4 个多月，获得了高时间分辨率的观测资料，本文选取了两次降水过程（一次弱降水、一次强降水），结合多种观测资料，对两次降水过程前后的回波进行分析，结论如下。

（1）Ka 波段毫米波云雷达可以清楚地观测到弱降水云的垂直结构、内部的强度变化和云高以及整个降水过程的变化。

（2）在发生弱降水时，云雷达 Z 在垂直方向的变化不明显；但 V_r、S_w 值在 0℃层稍低位置有一个明显的分界层，这个分界层属于层状云降水的融化层，粒子通过融化层后 V_r、S_w 快速变大，此变化主要是粒子的相态由固态变成液态引发的，可以通过 V_r、S_w 突变值的位置来识别 0℃层亮带的高度。

（3）个例分析中影响 Ka 波段云雷达观测的分钟雨强经验值：小于 0.3 mm 可以观测到云的详细

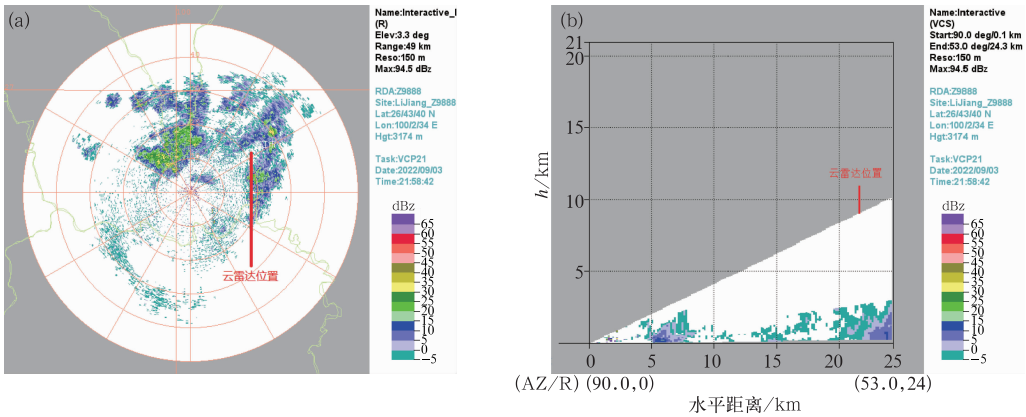


图 7 2022 年 9 月 3 日 21:58:42 C 波段雷达(a)回波及(b)剖面

Fig. 7 (a) Echo and (b) profile of C-band radar at 21:58:42 BT 3 September 2022

信息，而大于 0.5 mm 会出现严重的雨衰。这主要是考虑在个例分析时段分钟降水量平均值为 0.51 mm，且在这一段时间内分钟降水量 0.3 mm 时也能观测到较高的回波，这个经验值需要更多的数据来进一步验证。

(4)云雷达观测到弱降水回波云高大约只有 3.6 km，较强回波在 2 km 以下，由于 C 波段雷达要求看得远、遮挡小，站址往往选在高山上，与实际的地面高度差通常较大，因而对距离较远的弱降水回波无法观测到。

随着气象现代化建设的进行，气象探测的手段越来越多，不但获取的资料种类增加，而且获得资料的时空分辨率也得到了很大提高。通过地基遥感垂直观测系统获得的高时间分辨率的垂直资料，是分析天气系统垂直结构的有力工具。本文的分析还很初步，比如，仅使用了云雷达的观测资料来分析降水天气过程的垂直结构；另外由于设备建成后已经过了当年的主汛期，获取的观测样本较少，给出的结论代表性不够。在后续的工作中，将充分利用 5 套观测系统(风廓线仪、毫米波云雷达、微波辐射计、气溶胶激光雷达和 GNSS/MET)高时间分辨率的观测资料，对天气系统的垂直结构作进一步的分析和研究。

参考文献

岑炬辉，唐世浩，胡利军，等，2021. 降水-雾过程毫米波雷达探测分析[J]. 气象，47(2)：205-215. Cen J H，Tang S H，Hu L J，et al，2021. Analysis of a precipitation-fog process detected by millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon，47(2)：205-215(in Chinese).

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).

董佳阳，崔晔，阮征，等，2022. 对流降水云中大气垂直运动反演及个例试验[J]. 应用气象学报，33(2)：167-179. Dong J Y，Cui Y，Ruan Z，et al，2022. Retrieval and experiments of atmospheric vertical motions in convective precipitation clouds[J]. J Appl Meteor Sci，33(2)：167-179(in Chinese).

冯永会，王金虎，葛俊祥，2016. 毫米波测云雷达回波的衰减订正研究[J]. 微波学报，32(5)：89-96. Feng Y H，Wang J H，Ge J X，2016. Research of millimeter-wave cloud radar on attenuation correction[J]. J Microwaves，32(5)：89-96(in Chinese).

弗雷德里克·法布里，2021. 雷达气象学：原理与实践著[M]. 苏德斌，肖辉，译. 北京：气象出版社：27-30，42-43. Fabry F，2021. Radar Meteorology：Principles and Practice[M]. Su D B，Xiao H，trans. Beijing：China Meteorological Press：27-30，42-43(in Chinese).

胡树贞，王志成，张雪芬，等，2022. 毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演[J]. 气象，48(10)：1270-1280. Hu S Z，Wang Z C，Zhang X F，et al，2022. Analysis of sea fog echo characteristics and visibility inversion of millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon，48(10)：1270-1280(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，周永波，等，2019. 基于 Ka 波段毫米波云雷达资料对水凝物相态的识别研究[J]. 气象科学，39(1)：34-41. Li Y L，Sun X J，Zhou Y B，et al，2019. Recognition research of hydrometeor phase based on Ka-band millimeter wave cloud radar data[J]. J Meteor Sci，39(1)：34-41(in Chinese).

刘黎平，2023. 基于 Ka/Ku 双波段回波强度差约束和多普勒功率谱的微物理和动力参数反演方法和应用[J]. 大气科学，47(6)：1-16. Liu L P，2023. Air vertical motion and raindrop size distribution retrieval algorithm based on reflectivity spectral density data and dual-wavelength ratio constraint with Ka/Ku dual-wavelength cloud radar and its preliminary applications[J]. Chin J Atmos Sci，47(6)：1-16(in Chinese).

刘黎平，张扬，丁晗，2021. Ka/Ku 双波段云雷达反演空气垂直运动速度和雨滴谱方法研究及初步应用[J]. 大气科学，45(5)：1099-1113. Liu L P，Zhang Y，Ding H，2021. Vertical air motion and raindrop size distribution retrieval using a Ka/Ku dual-wavelength cloud radar and its preliminary application[J]. Chin J Atmos Sci，45(5)：1099-1113(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 Meteor Sin，73(4)：635-647(in Chinese).

刘黎平，周淼，2016. 垂直指向的 Ka 波段云雷达观测的 0℃层亮带自动识别及亮带的特征分析[J]. 高原气象，35(3)：734-744. Liu L P，Zhou M，2016. Characteristics of bright band and automatic detection algorithm with vertical pointed Ka band cloud radar

[J]. Plateau Meteor,35(3):734-744(in Chinese).

刘翔卿,王雷,刘阳,等,2018. 1951～2010年云贵高原大理和丽江气温、降水的气候特征分析[J]. 气候与环境研究,23(5):513-523. Liu X Q,Wang L,Liu Y,et al,2018. Climatological characteristics of air temperature and precipitation at Dali and Lijiang in the Yunnan-Guizhou Plateau from 1951 to 2010[J]. Climatic Environ Res,23(5):513-523(in Chinese).

苏锦兰,张万诚,宋金梅,等,2021. 云南小时降水的时空分布变化研究[J]. 气象,47(2):133-142. Su J L,Zhang W C,Song J M,et al,2021. Study on spatio-temporal distribution of hourly precipitation in Yunnan Province[J]. Meteor Mon,47(2):133-142(in Chinese).

陶法,官莉,张雪芬,等,2020. Ka波段云雷达晴空回波垂直结构及变化特征[J]. 应用气象学报,31(6):719-728. Tao F,Guan L,Zhang X F,et al,2020. Variation and vertical structure of clear-air echo by Ka-band cloud radar[J]. J Appl Meteor Sci,31(6):719-728(in Chinese).

王瑾,张镭,杜韬,等,2022. 探空和毫米波云雷达探测云高一致性的时空匹配原则研究[J]. 高原气象,41(5):1348-1366. Wang J,Zhang L,Du T,et al,2022. A study on the principle of space-time matching for the detection of cloud height consistency by radiosonde and millimeter-wave cloud radar[J]. Plateau Meteor,41(5):1348-1366(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).

吴举秀,魏鸣,周杰,2014. 94 GHz云雷达回波及测云能力分析[J]. 气象学报,72(2):402-416. Wu J X,Wei M,Zhou J,2014. Echo and capability analysis of 94 GHz cloud radars[J]. Acta Meteor Sin,72(2):402-416(in Chinese).

武静雅,毕永恒,孙强,等,2021. 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[J]. 大气科学,45(5):931-942. Wu J Y,Bi Y H,Sun Q,et al,2021. Observation and analysis of snowband structure in a process of cyclone frontal snowfall in Beijing with Ka-band and X-band polarized radars[J]. Chin J Atmos Sci,45(5):931-942(in Chinese).

徐八林,刘黎平,徐文君,等,2008. 利用低仰角扫描改进高山雷达低层回波探测能力浅析[J]. 气象,34(9):28-33. Xu B L,Liu L P,Xu W J,et al,2008. Improved detection using negative elevation angles for mountaintop radars[J]. Meteor Mon,34(9):28-33(in Chinese).

杨晓,黄兴友,杨军,等,2019. 毫米波雷达云回波的自动分类技术研究[J]. 气象学报,77(3):541-551. Yang X,Huang X Y,Yang J,et al,2019. A study on auto-classification of cloud types based on millimeter-wavelength cloud radar observations[J]. Acta Meteor Sin,77(3):541-551(in Chinese).

曾正茂,郑佳锋,吕巧谊,等,2022. 毫米波云雷达距离旁瓣回波质量控制及效果评估[J]. 气象,48(6):760-772. Zeng Z M,Zheng J F,Lyu Q Y,et al,2022. Quality control and effect evaluation of range sidelobe echo of millimeter wave cloud radar[J]. Meteor Mon,48(6):760-772(in Chinese).

张静怡,王改利,郑佳锋,等,2022. 青藏高原东南部墨脱地区弱降水微物理特征的Ka波段云雷达观测研究[J]. 大气科学,46(5):1239-1252. Zhang J Y,Wang G L,Zheng J F,et al,2022. Study of the microphysical characteristics of weak precipitation in Mêdog,southeastern Tibetan Plateau using Ka-band cloud radar[J]. Chin J Atmos Sci,46(5):1239-1252(in Chinese).

赵静,曹晓钟,代桃高,等,2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象,43(1):101-107. Zhao J,Cao X Z,Dai T G,et al,2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding[J]. Meteor Mon,43(1):101-107(in Chinese).

赵静,马尚昌,代桃高,等,2016. Ka波段毫米波云雷达探测能力的分析研究[J]. 成都信息工程大学学报,31(1):29-34. Zhao J,Ma S C,Dai T G,et al,2016. Analysis and research on the detection capability of Ka-band millimeter wave cloud radar[J]. J Chengdu Univ Informat Technol,31(1):29-34(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).

钟正宇,马舒庆,杨玲,等,2018. 结合风廓线雷达的毫米波衰减特性初步研究[J]. 应用气象学报,29(4):496-504. Zhong Z Y,Ma S Q,Yang L,et al,2018. Preliminary study on millimeter wave attenuation characteristics combined with wind profiler[J]. J Appl Meteor Sci,29(4):496-504(in Chinese).

左园园,郑佳锋,贺婧姝,等,2022. 一次高原涡过境的不同云-降水垂直结构和特征研究[J]. 高原气象,41(5):1251-1265. Zuo Y Y,Zheng J F,He J S,et al,2022. Study on the vertical structures and characteristics of different cloud-precipitation types during a Qinghai-Xizang Plateau vortex transit[J]. Plateau Meteor,41(5):1251-1265(in Chinese).

Gossard E E,Snider J B,Clothiaux E E,et al,1997. The potential of 8-mm radars for remotely sensing cloud drop size distributions[J]. J Atmos Oceanic Technol,14(1):76-87.

Zhao C F,Liu L P,Wang Q Q,et al,2017. MMCR-based characteristic properties of non-precipitating cloud liquid droplets at Naqu site over Tibetan Plateau in July 2014[J]. Atmos Res,190:68-76.

(本文责编:俞卫平)