

邓佩云,陶涛,林彤,等.六盘山区两种不同型号 Ka 波段云雷达对比分析[J].气象研究与应用,2022,43(4):79–84.

Deng Peiyun, Tao Tao, Lin Tong, et al. Comparative analysis of two different Ka-band cloud radars in Liupan Mountain area[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(4): 79–84.

六盘山区两种不同型号 Ka 波段云雷达对比分析

邓佩云^{1,2}, 陶涛^{1,2*}, 林彤^{1,2}, 马思敏^{1,2}, 常倬林^{1,2}

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002;

2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002)

摘要: 利用隆德气象站一次典型降水天气过程下 HMB-KPS 型与 HT101 型云雷达探测资料, 结合同期常规地面、高空观测资料以及固原站天气雷达资料, 对两种型号的云雷达在六盘山区的探测能力进行了对比分析。结果表明: (1) 在降水前后的非降水背景下, HMB-KPS 型在近地面 100m 内有一地物杂波, 比同时次的 HT101 型云雷达探测到的云系更为深厚, 回波强度值高 10dBZ 左右, 信噪比高 5~10dBZ 左右, 径向速度值高 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 谱宽值低 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 且云接地起止时间较 HT101 型云雷达早 1h。 (2) 在降水背景下, HMB-KPS 型比 HT101 型云雷达反演的回波强度较大值高 4km 左右, 回波强度值高 20dBZ 左右, 信噪比高 10~20dBZ 左右, 径向速度高 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 谱宽值低 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。相关结果可为两部云雷达在人工影响天气业务中的应用提供技术参考。

关键词: 六盘山区; 毫米波云雷达; 回波强度; 径向速度; 谱宽

中图分类号: P412.25

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.13

宁夏六盘山作为西北地区东部的主要山脉, 其干旱少雨、灾害性天气多、降水量分布不均等生态问题一直是政府、公众和学界关注的焦点^[1-3], 六盘山区云水资源开发是当下生态环境建设急需解决的问题。对六盘山区云垂直结构特征的研究, 是有效评估区域空中云水资源的利用潜力的重要途径之一, 可为当地降水预测以及人工增雨作业方案提供可参考性依据, 对缓解干旱缺水, 防御气象灾害, 改善当地生活生产水平具有重要作用。

云垂直结构反映了云体内部热力和动力特征以及微物理过程, 在辐射收支、能量平衡、水汽循环等方面对地气系统起着重要作用。毫米波测云雷达可以探测直径远小于雷达波长的粒子, 具有高灵敏度、探测小粒子、测速精度较高、时空分辨率高、长时间连续观测能力以及穿透云的能力较强等特点^[4], 并且可以连续监测云的垂直剖面变化, 描述云内部物理结构, 可为研究云的宏观特性及预测云系发展提

供良好的支撑, 在测云方面比其他仪器有明显的优势^[5]。上世纪 60 年代起, 国外陆续利用许多性能优越的毫米波雷达进行科学试验^[6-9], 我国毫米波云雷达的发展较晚, 直到进入 21 世纪后才开始发展^[10-11]。从国内外观测研究来看, 毫米波云雷达对于非降水云和弱降水云都具有很好的探测能力, 同时还能观测到云内部的动力信息^[12-13]。在探测较强云时, 毫米波雷达会受到一定的衰减, 衰减程度与云滴谱和相态有直接关系, 一般来讲, 液态云衰减要比冰云明显, 冰晶和雪不影响其探测能力, 降水过程雨强较大时, 回波信号会被严重衰减, 雨滴粒径过大会使毫米波发生米散射, 返回信号也会偏弱, 此外, 雷达天线罩表面会覆上一层水膜, 这层水膜也会造成一定的衰减^[14-16]。因此, 云雷达一般只探测直径为几粒米的云粒子到弱降水粒子的范围, 主要研究对象为非降水云、弱降水、雪、雾及沙尘暴等^[17]。常倬林等^[18]利用 HT101 型云雷达、微雨雷达等仪器, 对六盘山区一次

收稿日期: 2022-09-23

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金(2021AAC03490)、宁夏回族自治区重点研发计划(2022BEG02010)、中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放研究项目(CAMF-202211)

作者简介: 邓佩云(1993—), 女, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为大气物理学与大气环境。E-mail: 734785297@qq.com

* 通讯作者: 陶涛(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事大气物理与人工影响天气研究。E-mail: ala.no.4@163.com

人工增雨条件观测分析和效果评估进行了分析,探究了层积混合降水中的表征特征。

宁夏六盘山大气科学野外试验基地在隆德站布设了 HT101 型和 HMB-KPS 型两种不同型号云雷达,为明晰两种型号的云雷达在六盘山区的探测能力,提高云雷达在人工影响天气业务及六盘山区云和降水物理过程的相关研究中的应用水平,本文利用布设在隆德站的两部不同型号的云雷达资料对六盘山区一次典型降水过程,在降水发生前、发生时及发生后的探测性能进行对比分析研究,尝试分析两种云雷达仪器的回波强度、径向速度、速度谱宽、信噪比在降水天气过程时的表征特征及其敏感性、准确性,明晰二者的共性及差异性,为后两个云雷达仪器在不同站址观测时提供对比依据。

1 数据与方法

2019 年 9 月 26 日,宁夏六盘山野科学试验基地将 HT101 型 Ka 波段毫米波云雷达搬迁至隆德国家气象观测站,与 2019 年 8 月 22 日搭建的 HMB-KPS 型 Ka 波段毫米波云雷达进行对比观测。本文选取 2019 年 10 月 31 日至 11 月 1 日天气过程隆德国家气象观测站的 HT101 型与 HMB-KPS 型云雷达资料,结合同期六盘山区常规地面、高空观测资料以及固原站天气雷达资料,对两种不同型号的 Ka 波段云雷达产品进行个例对比分析。在数据的处理和分析中,将时间同步为 1min,对两种型号云雷达的回波强度、径向速度、速度谱宽、信噪比等产品数据统一到同一探测范围进行对比分析。两种型号云雷达的仪器及数据具体说明如下:

(1)HT101 型 Ka 波段毫米波测云雷达(西安华腾有限责任公司),波长 8.57mm,工作中心频率 35GHz,天线口径 1.6m,数据采集频率为 5s/次,垂直分辨率为 30m,最大探测高度为 20km。数据收发体制为单发单收(水平发射、水平接收),信号处理方法为谱处理。

(2)HMB-KPS 型 Ka 波段毫米波测云雷达(北京无线电测量研究所),波长 8mm,工作频段 35GHz±500MHz,天线口径 1.8m,最大探测高度为 20km,并且达到高度 30m、时间 1min 的分辨率要求,数据采集频率为 1min/次,垂直分辨率为 30m,最大探测高度为 20km。数据收发体制为单发双收,云雷达信号处理方法包括谱处理与 DSP 处理,为更好的对比分析,本文进行数据分析时采用通道

1(水平发射,水平接收)和谱处理下得到的数据。

2 结果与分析

2019 年 10 月 31 日中午至 11 月 1 日上午,六盘山区出现一次显著降水过程。此次降水过程六盘山区处在两槽一脊的环流背景下,受不断穿脊东移的冷空气影响,六盘山上游地区形成短波槽东移,配合低层暖湿气流,六盘山区出现了一次明显的自南向北降水天气过程。此次降水过程中,西吉中南部以及隆德、泾源大部降水量大于 10mm,其他地区降水量小于 10mm,从六盘山东西两侧降水分布来看,东侧的泾源站降水量最大,其次是山顶六盘山站,西侧隆德站降水最小。其中,隆德站降水从 10 月 31 日 13 时 23 分开始,降水结束在 11 月 1 日 08 时 02 分,降水持续约 19h 过程累积雨量为 9.6mm,本文采用布设在隆德站的两种不同型号的 Ka 波段云雷达观测资料,对此次降水过程前后进行重点分析,降水过程做降水云系统演变的探讨分析,以期明晰不同型号云雷达在六盘山区的探测能力。

2.1 回波强度与信噪比对比

为了分析此次降水过程中云系的垂直结构特征,对隆德站 HT101 型与 HMB-KPS 型 Ka 波段毫米波云雷达反演的回波强度进行对比分析(见图1)。由图 1 可见,两部云雷达变化趋势较为一致,在降水发生前有一云底高度>6km 的高云,两种仪器反演的顶高均于 10~12km 间波动,HMB-KPS 型比 HT101 型云雷达云顶高高出 1~2km,从回波强度的大小以及范围来看,HMB-KPS 型比 HT101 型云雷达的回波强度高 10dBZ 左右。在云系发展的过程中,HT101 型云雷达在 10 月 31 日 9 时出现底高为 4km 左右的中云,HMB-KPS 型云雷达中云云系更为深厚且出现时间较 HT101 型云雷达早 1h,回波强度也更强,随着云系的发展,云厚度增大,在降水发生前 1h,HT101 型与 HMB-KPS 型云雷达反映云系更为深厚,云内回波强度也更强,HMB-KPS 型云雷达显示的回波强度有跃增现象。此外,HMB-KPS 型云雷达在近地面有一层较均匀的回波,这是由于地物杂波引起的非气象回波,HT101 型云雷达产品在数据预处理时已去地物杂波,这一性能可较优的真实表征降雨发生前的云回波状况。

10 月 31 日 13 时 23 分降水开始,两部云雷达的回波强度均有剧增现象,在垂直结构上表现出了从高到低增大的特征,HMB-KPS 型云雷达比

HT101 型云雷达在降水过程中反演的回波强度较大值高 4km 左右,在 HT101 型云雷达上回波分布较均匀,回波强度上有一零度层亮带,高度为 1.5km 左右,为层状云降水,可更好的表征降水性质,隆德站降水在 11 月 1 日 05—06 时雨强最强,小时雨量为 1.6mm,为小雨,HMB-KPS 型云雷达反演的回波强度高出 HT101 型云雷达回波强度 20dBZ 左右,在降水过程中受到衰减的影响程度较小,主要降水时段回波强度高达 30dBZ,为大雨量级,这主要是因为 HT101 型云雷达在数据质量控制的过程中采用相干积累信号处理的关键技术,即把探测的每个脉冲的能量相加后,作为一个脉冲数据进行处理,相当增加 m 倍,可以更好的表征实际的降水过程,HMB-KPS 型云雷达回波强度的反映更为剧烈,更进一步分析表明,HMB-KPS 型云雷达反演的云顶高比 HT101 型云雷达高 2km 左右,在 10 月 31 日 18 时—24 时之间,可明显的表征云底高为 6km 左右的中、高云。

11 月 1 日 08 时 02 分,隆德站降水过程结束,两种型号的云雷达显示云系也逐渐减弱至消散。同时次 HMB-KPS 型云雷达反演的回波强度高出 HT101 型云雷达回波强度 20dBZ 左右,反演的云系

也更为深厚,云顶高度更高,对于降水结束时,HT101 型云雷达产品在六盘山区探测降水云的适用性更高,HMB-KPS 型云雷达对中高层弱云的探测能力更优。进一步结合固原站的天气雷达资料,可以看到降水区组合反射率基本在 15~25dBZ,回波顶高 4~6km,六盘山区范围组合反射率回波统计来看,强度 20dBZ 的回波占 55.8%,25dBZ 回波占 20.5%,15dBZ 回波占 15%,属于典型的层状云降水回波。

信噪比指的是信号的平均功率和噪声的平均功率之比,通过对比两种型号的云雷达反演的信噪比之间的对比分析(图 2),可以看到二者信噪比的变化趋势一致,在降水开始前 1h,云系开始接地,信噪比呈现垂直方向由上往下增大的趋势,降水开始时,信噪比均存在跃增现象,HMB-KPS 型云雷达的信噪比比同时次 HT101 型云雷达的信噪比探测的大值区高 4km,降水结束阶段,云层变为双层云,HMB-KPS 型云雷达反演的云系更为深厚,信噪比更强,随着云系的减弱至消散,HMB-KPS 型云雷达的信噪比表征的云接地结束时间较 HT101 型云雷达早 1h。综上对比分析,HMB-KPS 型云雷达的信噪比比同时次 HT101 型云雷达反演的云系更为深厚,

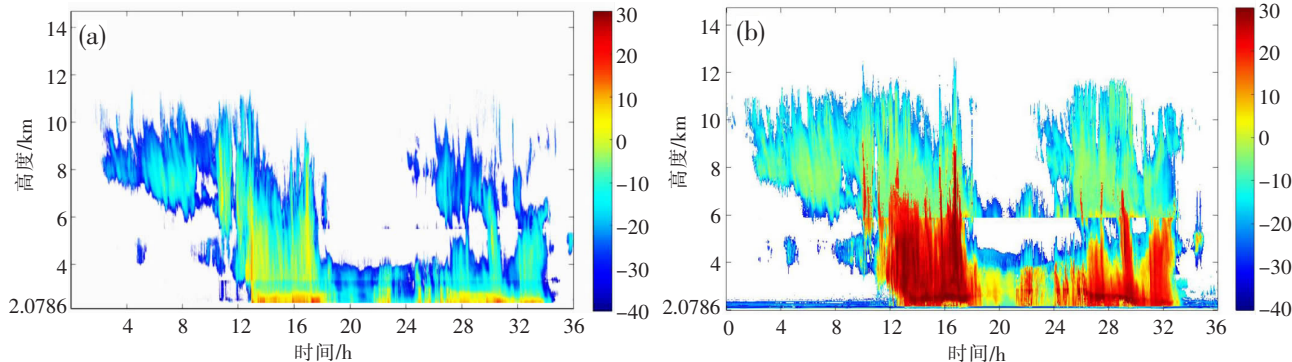


图 1 图 1 2019 年 10 月 30 日 00 时—11 月 01 日 12 时两种云雷达反演的回波强度

(a)HT101 型;(b)HMB-KPS 型

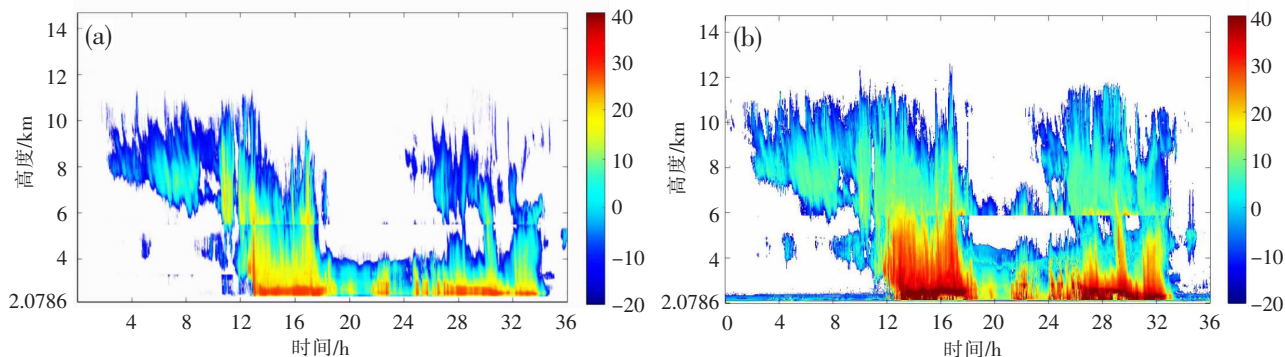


图 2 2019 年 10 月 30 日 00 时—11 月 01 日 12 时两种云雷达反演的信噪比

(a)HT101 型;(b)HMB-KPS 型

在降水前后的非降水背景下,云体内部信噪比值大 5~10dBZ 左右,在降水背景下,HMB-KPS 型比 HT101 型云雷达信噪比值高 10~20dBZ 左右,在 3~6km,两种云雷达反演的信噪比值差异最大。

2.2 径向速度与谱宽对比

由两部云雷达的径向速度图可见(图 3),二者径向速度的变化趋势一致,在降水发生前,云体内气流有微弱的上升运动,这是因为水汽到达高层大气之后发生凝结,凝结过程中向周围环境释放热量,空气吸收热量上升形成上升运动。对 HT101 型与 HMB-KPS 型云雷达径向速度产品的差异性对比分析可见,HMB-KPS 型云雷达接近雷达天线的低层有地物杂波出现,同时次 HMB-KPS 型云雷达探测到的径向速度比 HT101 型云雷达探测的径向速度略大,范围高 0.5~1km。

随着云系不断发展,水汽随上升气流上升到一定高度后液化形成大粒子降落,云系接地变为深厚的单层云,产生降水。在降水过程中,云层上部有频繁上升运动,随后积层混合云发展较为深厚,在距地面 2km 左右出现了一个范围较小的谱宽大值区(图 4),谱宽代表粒子群垂直运动偏离平均状态的

程度,可反应滴谱宽窄变化、风切变和湍流强度等,降水时出现谱宽大值区说明云体中上部湍流运动剧烈,可能是积状云中雨滴通过碰并作用增大,云系既有上升运动又有下沉运动,云体内湍流运动剧烈,对流十分旺盛。接近雷达天线的低层可以明显看到降雨形成的下落速度,其他的速度不明显。云体内均以下沉运动为主。在 10 月 31 日下午第一次降水时段结束后,两部云雷达云体内下层有明显的上升运动,这为降水过程的维持和发展提供了重要的动力因素,进一步形成 11 月 1 日 02:00 开始的第二次降水过程,第二次降水过程云体大部分区域都是下沉运动,对比分析可见,在降水过程中同时次的 HMB-KPS 型云雷达比 HT101 型云雷达的径向速度值大 $0.1\sim 0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,靠近云雷达天线有更明显的由降水引起的下沉运动,HMB-KPS 型云雷达比 HT101 型云雷达探测的径向速度范围及强度更大,HT101 型云雷达比 HMB-KPS 型云雷达探测的谱宽值高 $0.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,HMB-KPS 型云雷达在 2019 年 10 月 31 日 18 时—26 时有一明显的中高层弱云,而 HT101 型云雷达无显示。

降水过程快结束时二者云雷达云体内上升运动

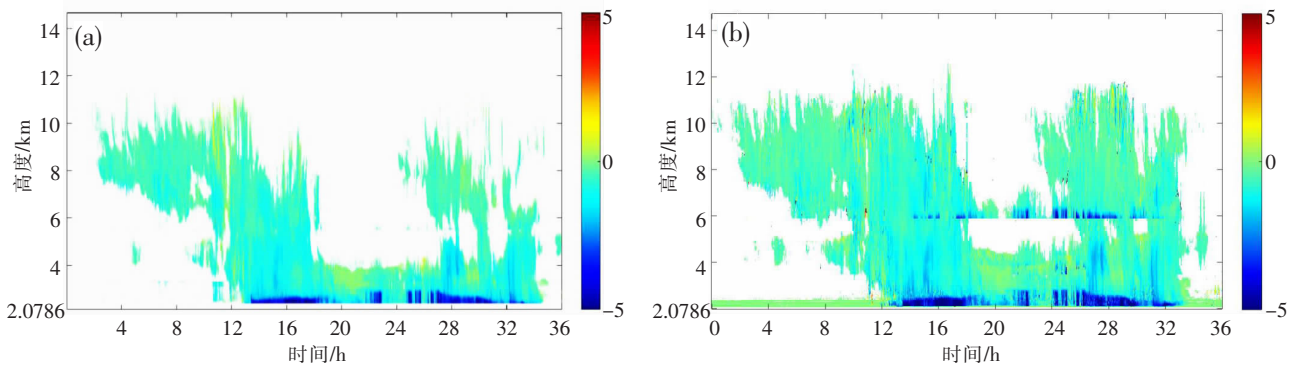


图 3 2019 年 10 月 30 日 00 时—11 月 01 日 12 时两种云雷达反演的径向速度
(a)HT101 型;(b)HMB-KPS 型

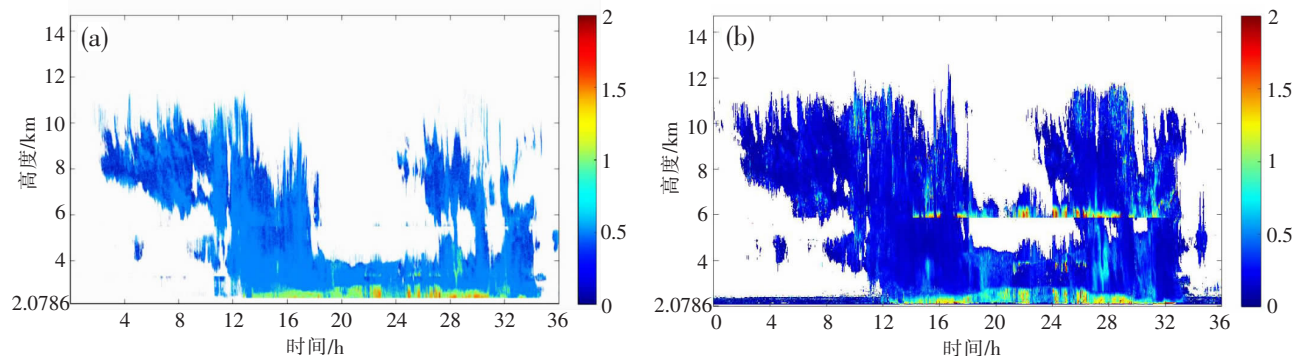


图 4 2019 年 10 月 30 日 00 时—11 月 01 日 12 时两种云雷达反演的速度谱宽
(a)HT101 型;(b)HMB-KPS 型

骤减,同时谱宽值减小,云系内对流减弱,云系也逐渐消散,降水逐渐停止,HT101 型云雷达对此过程中云系的结构特征变化更具敏感性。

从 HT101 型和 HMB-KPS 型云雷达回波强度、信噪比、径向速度、速度谱宽的对比总体来看,两部云雷达均采用了数字脉压处理、相干积累、快速傅立叶变换(FFT)等信号处理方式,因此其产品整体变化趋势一致,其差异性的原因主要由于两种类型云雷达设备本身性能的不同以及质量控制方法的不同造成了二者的差异性,HMB-KPS 型云雷达比 HT101 型云雷达的波长更短(短 0.57mm),设备的天线口径更大(大 0.2mm),导致 HMB-KPS 型云雷达对回波强度、信噪比、径向速度和速度谱宽的数值均较大,反演的云系也更为深厚,此外,HMB-KPS 型云雷达数据质量控制方法采用的是组合信号门限质量控制方法,但该方法门限若设置的太高,会损失灵敏度,因此会显示部分地物杂波,HT101 型云雷达噪声确定采用单谱计算方法,通过背景噪声消除的方法会去除杂波,因此在非降水云的近地面范围内,HT101 型云雷达的观测更接近于实况。本次对比研究可为两种不同型号的云雷达在观测规划中选址布局、仪器选型、预报中数据应用等方面有较好参考价值。

3 结论与讨论

本研究着眼于明晰云雷达在山地的探测及应用能力,首次对国内两种不同型号的云雷达资料进行了对比分析,创新性的从典型降水的不同发展阶段下的雷达产品在山地地形下的实测状况进行深入分析,研究结果发现 HT101 型和 HMB-KPS 型云雷达得到的回波强度整体变化趋势一致,但 HMB-KPS 型比 HT101 型云雷达反演的云系更为深厚,回波强度、信噪比、径向速度更大,谱宽值更小,其差异性主要由于两部云雷达设备性能的不同所导致,HMB-KPS 型云雷达比 HT101 型云雷达波长短 0.57mm,探测灵敏度更高,设备天线口径大 0.2mm,探测到的云量更多,两种类型云雷达数据处理算法以及质量控制方法的不同也是造成二者差异性的重要因素之一。

对比其他同类的研究,本文更偏重于不同型号的对比分析及应用,但因样本量较小,仅为一次个例分析,需进一步在后续的工作中加强不同天气背景下多样本个例的研究,以期为雷达参数的改进以及不同站址观测提供更可靠的对比依据。

参考文献:

- [1] 陈海波,严华生,陈文,等. 宁夏六盘山区多年降水的时空变化分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 103-110.
- [2] 李艳春. 宁夏干旱区气候承载力分布特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 96-99.
- [3] 陈豫英,冯建氏,陈楠,等. 西北地区东部可利用降水的时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2012(1): 56-66.
- [4] Bhartia P, Bahl I J. Millimeter wave engineering and applications[M]. Hoboken: Wiley, 1984: 31-35.
- [5] 仲凌志,刘黎平,葛润生. 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, 2009.
- [6] Moran K P, Martner B E, Post M J, et al. An unattended cloud profiling radar for use in climate research[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1998(79): 443-455.
- [7] MD Shupe, Kollias P, Matrosov S Y, et al. Deriving Mixed-Phase Cloud Properties from Doppler Radar Spectra[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004 (65): 1304-1322.
- [8] Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al. The Atmospheric Radiation Measurement Program Cloud Profiling Radars: Second-Generation Sampling Strategies, Processing, and Cloud Data Products [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007(24): 1199-1214.
- [9] Liu Liping, Zheng Jiafeng, Ruan Zheng, et al. The Field Experiment on Cloud and Precipitation with radars in Tibetan and preliminary results on Cloud properties[J]. Acta Meteorologica. Sinica, 2015, 73(4): 1-13.
- [10] 向敬成,张明友. 毫米波雷达及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [11] 吴新星,吴进忠. 毫米波测云雷达发展概述[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 自然科学, 2016: 54-59.
- [12] Zhang Lingzhi, Liu Liping, Feng Sheng, et al. A 35-GHz Polarimetric Doppler Radar and Its Application for Observing Clouds Associated with Typhoon Nuri [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(4): 945-956.
- [13] Zong Rong, Liu Liping, Yin Yan. Relationship between cloud characteristic and radar reflectivity based on an aircraft-cloud radar co-observation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(5): 1275-1286.
- [14] 吴举秀. 94 GHz 毫米波云雷达测云能力研究与回波分析[D]. 南京信息工程大学, 2014.
- [15] 刘黎平,谢蕾,崔哲虎. 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, 2014, 38(2): 223-236.
- [16] 黄兴友,樊雅文,李峰,等. 地基 35 GHz 测云雷达回波强度的衰减订正研究[J]. 红外与毫米波学报, 2013(4): 325-330.

- [17] 仲凌志,刘黎平,葛润生.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, 2009, 24(4):383–391.
- [18] 常倬林,党张利,贾乐,等.宁夏六盘山区一次人工增雨条件观测分析和效果评估[J].气象研究与应用, 2022, 43(3):26–30.

Comparative analysis of two different Ka-band cloud radars in Liupan Mountain area

Deng Peiyun^{1,2}, Tao Tao^{1,*}, Lin Tong^{1,2}, Ma Simin^{1,2}, Chang ZhuoLin^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China)

Abstract: This paper compares and analyses the detection capabilities of two types of cloud radar in the Liupanshan region using HMB-KPS and HT101 cloud radar data under a typical precipitation weather process at the Longde meteorological station, combined with conventional ground and high altitude observations and weather radar data from the Guyuan station during the same period. Results show that: (1) in the non-precipitation background before and after precipitation, the HMB-KPS has a ground clutter within 100m near the ground, which is deeper than HT101 cloud radar at the same time. The echo intensity is about 10dBZ higher, the signal-to-noise ratio is about 5~10dBZ higher, and the radial velocity is about $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ higher. The spectral width is about $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ lower, and the start and end time of cloud grounding is 1h earlier than HT101 cloud radar; (2) in the background of precipitation, the HMB-KPS has a higher echo intensity value of about 4km, a higher echo intensity value of about 20dBZ, a higher signal-to-noise ratio of about 10~20dBZ, a higher radial velocity of about $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ and a lower spectral width value of about $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ than the HT101 type cloud radar inversion. The results can provide a technical reference for the application of cloud radars in weather modification operations.

Key words: Liupan Mountain area, millimeter wave cloud radar, echo intensity, radial velocity, spectral width