

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 Chong, Liu Liping, Zhai Xiaochun. 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 659–672, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16170

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

吴翀¹ 刘黎平^{2,1} 翟晓春³

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国海洋大学, 青岛 266100

摘 要 激光云高仪和云雷达是探测云底的两种设备, 但其探测能力和探测结果有一定的差异, 对比分析两种设备的测云效果有助于正确认识它们的探测优势, 推进我国云雷达在云探测中的应用。本文提出了基于云雷达数据的云底和云顶高度分析方法, 利用 2014 年夏季第三次青藏高原大气科学试验云雷达、激光雷达和激光云高仪数据, 统计了三种设备探测青藏高原低云、中云和高云的云底高度偏差、探测率, 分析了激光云高仪探测云底偏高的原因, 根据探测结果提出了固态发射机体制雷达探测青藏高原低云的优化观测模式, 模拟分析了探测效果。结果表明: (1) 云雷达对高云的探测能力要明显优于激光云高仪, 但其对低云的探测能力有待改进, 激光云高仪探测云底下部的边界层内的云雷达回波信号可能是非云降水回波; 低层云的遮挡作用明显降低了激光云高仪对多层云的观测能力; 与激光云高仪相比, 云雷达仍然会漏掉一些高云和中云。(2) 激光云高仪探测的中云和高云的云底很多在云雷达回波内部, 云雷达和激光云高仪观测的云底的时空对应关系比较差。(3) 增大激光发射功率和优化固态发射机体制云雷达观测模式可提高云的观测能力, 微波和激光雷达数据融合可全面了解不同类型云的宏观特征。这一工作为云雷达和激光雷达数据的应用, 评估激光云高仪和云雷达探测青藏高原云的能力, 讨论设计优化的云观测方案, 为推进我国云观测技术的发展提供了重要参考依据。

关键词 云底探测 云雷达 激光云高仪 观测模式优化 青藏高原

文章编号 1006-9895(2017)04-0659-14

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16170

The Comparison of Cloud Base Observations with Ka-Band Solid-State Transmitter-Based Millimeter Wave Cloud Radar and Ceilometer in Summer over Tibetan Plateau

WU Chong¹, LIU Liping^{2,1}, and ZHAI Xiaochun³

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2016-05-03; 网络预出版日期 2017-01-25

作者简介 吴翀, 男, 1989 年出生, 博士研究生, 主要从事雷达气象研究。E-mail: wuchong89@foxmail.com

通讯作者 刘黎平, E-mail: lpliu@cma.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91337103、41375038, 财政部/科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY201406001

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91337103, 41375038), China Meteorological Administration Special Public Welfare Research Fund (Grant GYHY201406001)

2 State Key Laboratory of Severe Weather, China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Ocean University of China, Qingdao 266100

Abstract Understanding the observation abilities and advantages of ceilometer and cloud radar will be helpful for their operational applications in cloud observation. During the summer of 2014, the third Tibetan Plateau Atmospheric Science Experiment was carried out and clouds were observed using Ka-band solid-state transmitter-based millimeter wave cloud radar, Lidar and ceilometer. Based on the cloud measurements in this experiment, the algorithm to determine cloud base using cloud radar observations was developed. The biases of cloud base and data acquisition ratios by ceilometer and cloud radar for low clouds, medium clouds and altocumulus were analyzed. Reasons for the overestimation of cloud base by ceilometer were explained. The improved observation mode was introduced and the observation skill was simulated. The results indicate that (1) the cloud radar observation ability for altocumulus are better than that of ceilometer, the cloud radar echoes below the ceilometer-derived cloud bases are possibly clutter, and its observation for low clouds should be improved. Blockages of low clouds affect the observations of medium cloud and altocumulus by ceilometer. Compared with ceilometer, the cloud radar missed some shallow altocumulus. (2) Most of cloud bases observed by ceilometer are located within the cloud echoes observed by cloud radar. The temporal and spatial correspondences of cloud base observed by cloud radar and ceilometer are poor. (3) Increasing the transmitter power of ceilometer and improving the operational mode of cloud radar can improve the cloud observation abilities. The cloud radar and ceilometer data merging would enhance cloud observation abilities. The research results provide references for usages of cloud radar and ceilometer data and evaluation of observation abilities of cloud radar and ceilometer. They are also helpful in designing operational modes for cloud radar, and promoting the development and application of advanced cloud observation technology.

Keywords Cloud base observation, Cloud radar, Ceilometer, Operational mode improved, Tibetan Plateau

1 引言

云是影响天气气候的重要因子之一,它的存在能够影响大气中的辐射传输过程,从而改变辐射能量的时空分布,而且云还通过参与水循环过程改变地球上水的分布状况。云底和云顶高度是重要的云宏观物理特征参数,与云的类型、云对辐射影响等密切相关,不同云类型、云量以及云高在天气气候中所起的作用又各不相同,中云和低云由于云顶对太阳辐射较强的反射而使大气和地表降温,而高云则相反,高云由于对太阳辐射的透射效应以及云体发射红外辐射而使得大气与地表升温。研究不同类型的云和不同动力条件下云底高度及其演变规律,有助于分析天气系统,有助于研究云对全球气候变化的影响,也有助于航空飞行的安全。

云底高度的观测手段多种多样,主要有:目测法、探空气球法(Zhang et al., 2010)、红外辐射测云仪(Thurairajah and Shaw, 2005)、云雷达(Clothiaux et al., 2000)等。目测法是最早采用的方法,也是国内气象业务上使用的主要方法。但目测法的标准不统一、主观性强、观测不连续、且费时费力(黄兴友等, 2013);探空气球法采样速度快、抗干扰能力强,但由于观测不连续、人工依赖性强,限制

了它的应用;红外辐射测云仪接收云底辐射亮温,根据辐射传输方程反演云底高度,能够昼夜观测,数据获取率高。但云底辐射亮温受到气溶胶、水汽等因素影响,导致算法复杂程度大,测量误差较大(陶法等, 2013)。

近几年来,对激光回波的实时高分辨率数据采集方式逐步取代了脉冲技术工作方式,智能、便携、实时和动态范围大是新一代激光云高仪的特点(Gaumet et al., 1998)。激光云高仪对于地面可见的云的观测效果比较好,但受雾霾影响比较严重,对多层云的观测能力有限。

云雷达尤其是毫米波雷达,利用云粒子对电磁波的散射特性,通过分析云的雷达回波可以了解云的宏观和微观结构,云雷达的探测云的优势在于可以穿透云或者降水,探测到多层云。而当有比较浓的低层云出现时,激光云高仪很难观测到上层云的情况。云雷达对于对流性云效果较佳但是对薄云难以形成有效测量(曹念文等, 2012; 闫宝东等, 2013)。虽然毫米波雷达的灵敏度有所提高,但常常会漏测一些比较浅薄,而且只含有小粒子的云。另外,云雷达观测云底常常会受到大的降水粒子的影响,昆虫、漂浮的植物等也会影响云雷达探测。在这些情况发生时,激光云高仪往往会获取到更为准

确的云底,但当降水比较强时,激光雷达也不能穿透。为此, Clothiaux et al. (2000) 提出了利用云雷达和激光云高仪联合确认云底高度的方法。李思腾等 (2015) 利用北京地区的云雷达和激光云高仪观测的云底高度数据,分析了北京地区 5 月 1 日至 6 月 8 日两种探测手段探测的云底的差别,发现:毫米波云雷达和激光云高仪测得云底高度平均相差不超过 300 m, 比较接近,雾霾对激光云高仪观测影响比较大。云雷达对高云的获取率要明显高于激光云高仪,对中云两种设备获取率基本相当,对于低云激光云高仪获取率比较高,但这一研究基本没有包括形成降水的云。黄新友等 (2013) 也分析不同波长和发射功率的激光云高仪、两部红外测云仪、全天空成像仪以及毫米波云雷达观测云底的结果,结果表明:三台激光云高仪测量结果比较一致,两部红外测云仪在测量低云时一致性稍差,云雷达与激光云高仪测量的最低层云底高度数据一致性较差,但与红外测云仪的测量结果匹配较好。但这些研究并没有涉及到激光云高仪和云雷达观测青藏高原云的效果,由于青藏高原云以对流云为主,云类型、云高度分布和覆盖等与其他地区有明显差异 (汪会等, 2013), 所以研究两种设备观测青藏高原云的效果就显得非常重要。

近年来星载云雷达和激光雷达技术得到了飞速发展,2006 年, CloudSat 卫星的发射成功为全球云降水三维结构观测提供了一种基于主动遥感数据的全新方法。在太阳同步轨道“午后列车 (A-Train)”中同步飞行的 CloudSat 与 CALIPSO 卫星能够协同观测,得到云雷达和激光雷达观测的完整的云分布信息。CloudSat 上搭载的 W 波段毫米波云廓线雷达 (CPR) 能够观测到云的垂直结构,能够探测到 90% 冰云和 80% 水云 (Stephens et al., 2002)。CALIPSO 卫星上的激光雷达则能够探测到低于云雷达探测阈值的较薄的冰云的云顶。所以, CloudSat 与 CALIPSO 卫星联合观测能够客观、准确地判别垂直廓线内是否有云,且其观测产品也可以与其他卫星资料进行对比,分析我国及周边云量分布 (王帅辉等, 2010 年)。

2014 年夏季,在气象行业专项“第三次青藏高原大气科学试验项目”支持下,中国气象科学研究院在那曲开展了水汽、云和降水的综合观测,使用了国内最先进的 Ka 波段毫米波云雷达、Ku 波段微波降水雷达、C 波段连续波雷达和激光雷达,并配以

微波辐射计、雨滴谱等设备,获取了高时空分辨率的云和降水宏微观垂直结构特征数据,并利用云雷达数据对那曲地区夏季云的云顶云底高度、云厚、云量、云层数,垂直分布等特征的日变化进行了初步统计分析,对不同类型云的宏观特征进行了讨论 (Liu et al., 2015)。青藏高原上空云和降水微物理过程不同于低海拔地区的情况,高原上地面加热强烈,因此对流抑制因素在中午以后会迅速减小,因此积云对流更容易触发,比平原地区更加频繁;而由于高原水汽含量较低,因此对流有效位能值通常较小,结合低的水汽含量,导致高原上的对流云顶和强回波顶离地面都偏低,对流系统的水平尺度也偏小,这样云雷达和激光云高仪观测云的结果就不同于其他地区。对于对流云为主的青藏高原云观测,两种观测手段对云底观测结果的一致性如何,如何评估两种观测手段对云的观测能力,优化固态发射机体制云雷达观测方案等目前研究都没有涉及过。

为此,本文利用这次外场试验的云雷达、激光雷达和激光云高仪数据,通过个例分析和统计分析方法,分析了毫米波雷达和激光云高仪观测云底的高度对应关系,研究了青藏高原低云、中云和高云的探测效率,云底的偏差等,分析了两种设备探测不同高度云的能力。为综合应用云雷达和激光云高仪数据提供基础。

2 观测设备和数据

云的垂直观测地点选在那曲气象局 (31.48°N, 92.01°E, 4507 m) (NQMET),加密观测时段为 2014 年 7 月 1 日至 2014 年 8 月 31 日。云的探测设备主要包括: Ka 波段云雷达、激光云高仪和激光雷达。

Ka 波段云雷达使用固态发射机,采用多普勒雷达和偏振雷达技术,以垂直观测方式获取云和弱降水的回波强度 Z , 径向速度 V_r , 速度谱宽 S_w 和退偏振因子 L_{DR} 的垂直廓线,同时记录功率谱密度数据 S_z , 主要技术性能指标见表 1。该雷达采用了 Ka 波段,以尽量获取更大的后向散射能量,同时减小小气和降水粒子的衰减;采用固态发射机的主要目的是为了实现连续观测,因云特征的统计分析对云降水物理研究非常重要。为了提高雷达观测云的能力,在高原观测时采用了三种观测模式:边界层模式 (M1)、卷云观测模式 (M2) 和降水观测模式 (M3),通过采用不同脉冲宽度、相关和非相关积

累,以满足固态发射机云雷达低空探测和弱云探测的需求。云雷达观测模式分为两类,一是窄脉冲模式,分为边界层模式 M1 和降水模式 M3,二是宽脉冲卷云模式 M2 (主要参数见表 2)。M1 和 M3 主要针对低层和中层的云和弱降水的观测,具有较小的探测盲区和比较高的最小可测回波强度,这两个模式的主要差别在于 M1 采用了四次相干积累,减小了 6 dB 的最小可测回波强度,同时,最大不模糊径向速度减小了 3 倍,径向速度分辨率增加了 3 倍。M2 主要用于中层和高层云的探测,针对该类目标高度高、回波强度弱和垂直运动较小等特点,采用高占空比的调频宽脉冲波形,具有较大的距离盲区和较小的最小可测回波强度。根据相干积累数、非相干积累数和 PRF (脉冲重复频率),可以计算得到三种观测模式每个径向数据的驻留时间 (即获取一个径向数据所需时间) 为 2 s,再加上模式转化时间,三种模式轮回一个观测的周期为 9 s。在观测时,雷达循环采用三种模式进行观测,一种模式获取到一个径向数据后,马上转换到另外一个模式进行观测,1 小时该雷达可以获取到 400 个径向的雷达数据。三种模式数据分开存储,并形成融合后数据。外场试验期间,该雷达在设备正常情况下进行连续观测。

表 1 云雷达 3 种工作模式主要参数

Table 1 Major parameters for the three operational modes for the cloud radar

项目	3 种工作模式		
	边界层模式 (BL)	卷云模式 (CI)	降水模式 (PR)
脉冲宽度	0.2 μ s	12 μ s/5MHz, 12 μ s/2.5MHz	0.2 μ s
脉冲重复周期	120 μ s	120 μ s	120 μ s
相干积累数	4	2	1
FFT 点数	256	256	256
非相干积累数	16	32	64
驻留时间	2s	2s	2s
距离库数	256, 128	512, 256	512, 256
距离分辨率	30 m	30 m	30 m
探测盲区	30 m (理论) 120 m (实际)	1800 m (理论) 2010 m (实际)	30 m (理论) 120 m (实际)
最大不模糊距离	18 km	18 km	18 km
最大不模糊速度	4.67 m s^{-1}	9.34 m s^{-1}	18.67 m s^{-1}
速度分辨率	0.018 m s^{-1}	0.036 m s^{-1}	0.073 m s^{-1}
灵敏度 (5 km)	-24 dBZ@5 km	-38 dBZ@5 km	-18 dBZ@5 km

在分析云雷达探测云底参数时 (第 3 和第 4 节), 采用融合数据, 在分析观测模式优化时 (第 5

节), 采用卷云模式观测数据和边界层观测模式数据。

激光雷达是由中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室与中国海洋大学合作研制的, 与现有的云雷达构成水汽和云综合探测系统。该激光雷达基于拉曼光谱和高光谱分辨率技术的水汽和云探测技术, 实现一种多波长测量水汽和云。该雷达主要由如下几部分组成: 激光器、接收望远镜、天空背景光抑制系统、数据采集和信号处理子系统、标定子系统和二次产品生成分析软件系统。该激光雷达采用的波长为 1064 nm、532 nm 和 355 nm, 可探测和反演水汽密度、云退偏振比、云底高度、大气消光系数、大气后向散射系数廓线; 测云通道 532 nm 的单脉冲能量是 120 mJ, 脉冲重复频率 30 Hz。系统最大探测距离 20 km, 水汽混合比探测距离为 0.2~5 km, 云底和云退偏振比探测范围为 0.2~15 km。2013 年该雷达在四川理塘进行了观测。该激光雷达只有在每天约 09:00~12:00、14:00~19:00、20:00~23:00 (北京时间, 下同) 三个时段进行有人值守的常规观测 (Wu et al., 2015)。

激光云高仪为 VAISALA CL31, 波长 910 nm, 脉冲能量为 1.2 μ J, 云探测范围 0~7.6 km, 数据的时间分辨率为 16 s, 高度分辨率 5 m。这款激光云高仪是垂直指向, 根据后向散射信号自动算出测点上方层云底高度数据产品。具体方法: 后向散射光强度比仪器噪声大 2 dB 为阈值时, 大于阈值强度的区域的边界下沿为云底高。该激光云高仪在观测期间工作正常, 基本为连续观测。

3 分析方法

3.1 云雷达云底、云顶分析方法

本文以云雷达三种模式融合的数据作为分析数据, 把云雷达观测的有效云信号的边界作为云边界。在实际处理时, 采用沿距离把云雷达每个径向数据分成一段一段连续的有效数据段, 如果相邻两个回波段的间距小于一定阈值 (90 m), 则把这两个段合并为一个段, 如果段的长度小于设定的阈值 (120 m), 则删除这个数据段。这样连续的有效的数据段的下沿为云底, 上沿为云顶。如果云底没有及地, 则这个回波段为云, 否则定义为降水。

利用激光雷达数据反演云底高度的方法主要有 Pal et al. (1992) 的微分零交叉法, 将回波信号的微分值从负变正的零点处判定为云底, 该方法直

接使用原始回波信号进行云底云顶高度的判定,但当信噪比较低或噪声起伏过大时容易产生误判。本文采用改进的微分零交叉法(王箫鹏等,2013),以微分零交叉法为基础,结合阈值法提取云底高度,从而有效避免误判。

3.2 激光云高仪、激光雷达和云雷达云底数据匹配方法

在定量对比激光云高仪探测的云底与云雷达观测的回波强度和云底时,需要进行数据的时间匹配。激光云高仪、激光雷达和云雷达云底观测数据的时间分辨率分别为 16 s、30 s 和 9 s。在分析时,以时间分辨率低的数据为标准,寻找时间最近的高时间分辨率的数据,这样就形成了时间间隔一致的两种(或者三种)云高数据。每个径向上,激光云高仪最多有 3 个云底高度,激光雷达可观测最多 5 层的云底高度,云雷达设置了最多 10 个云层,为了形成一一对应的云底高度数据对,必须对不同数据进行匹配。两种观测数据分四种情况:①全部没有观察到云底,②全部观测到了云底,③激光云高仪观察到云底而云雷达没有观察到云底,④激光云高仪没有观察到云底而云雷达观测到了云底。云底匹配原则是:只对②情况进行配对,对应任意一个激光云高仪观测的云底,根据距离最近原则,来匹配云雷达的云底或者是激光雷达观测的云底。而云雷达观测的降水不参加配对。

4 云雷达观测的云结构与激光云高仪和激光雷达观测的云底的个例分析

为了更清楚分析激光云高仪观测的云底与云雷达结果的对比,分别选取了 2014 年 7 月 19 日和 7 月 9 日两次云比较多的个例进行分析。图 1 给出了 2014 年 7 月 19 日云雷达观测的回波强度和径向速度的时间高度图,其中激光云高仪观测的云底用黑点标出,纵坐标表示的高度为距地面的高度(下同)。为了便于分析,我们把云分为低云[云底高度低于 2.5 km(距地面高度)]、中云(云底高度在 2.5~4.5 km 之间)和高云(云底高于 4.5 km)。其中,低云包括了云雷达探测到的及地降水,高云包括了云底高于激光云高仪探测范围的云。

从这个个例可以看出,有 3 块形成降水的对流云经过观测点,这些对流过程形成的高云大部分时间都存在,回波强度在-25~0 dBZ 之间。对于大部

分高云,激光云高仪观测的云底处在比较强的回波内部,明显高于云雷达观测的云底,偏差在 0.8 km 左右。因中低层云的遮挡,激光云高仪不能观测到部分高层云。从径向速度来看,激光雷达观测的云底对应的粒子下落速度小于 1.0 m s^{-1} ,因云粒子下落速度引起的云底偏差不大,主要原因需要进一步分析。从这个个例中没有发现云雷达明显漏测高云。在 3 km 高度左右存在一层浅薄的低云,回波强度低于-25 dBZ,两种观测同时观测到这种云底高度比较一致,但云雷达往往漏测部分云,激光云高仪也会漏测部分中云。对于低云,激光云高仪观测到了较为连续的约 1.2 km 高度的云层,而云雷达因采用了短脉冲观测,灵敏度低,基本漏测了这层云。在这层云下方,云雷达却观测到了一些回波,主要分布在 13:00~19:00,对比图 1c 我们可以看到,对应的云雷达这些回波,激光的后向散射也有一定的能量,但散射能量不大,也没有明显的界限,没有云的特征。另外,根据 Clothiaux et al. (2000) 对比云雷达、激光云高仪和激光雷达的研究结果,这些回波为生物、浮尘或者雷达杂波。

对于云雷达观察到已经形成降水的对流云,如 06:00~09:00 过程,激光云高仪虽然能够穿透 10 dBZ 回波强度的弱降水 1 km 以上,并观测到云底,但此时激光云高仪观测的云底的可靠性变差,本文不讨论激光云高仪观测的降水云底的正确性。对于 19:30 左右的那块对流云,回波强度超过了 10 dBZ,径向速度小于 -5 m s^{-1} (径向速度正定义为向上,负值为下落速度),已经形成降水,云雷达观测的云底要明显低于激光云高仪的结果,激光云高仪也能有效穿透该云测到云底。

从以上分析可以看出,云雷达观测高云能力比较强,因高灵敏度的观测模式在 2.1 km 以下是盲区,严重影响了云雷达对低云的观测;激光云高仪观测中云和低云能力比较强,但低云的遮挡影响了其对高云观测;两种云底的差异比较大,云底的时空对应比较差,其复杂程度远远超过了稳定性层云。另外,云雷达在激光云高仪观测的云底下方经常观察到回波,这些回波可能是生物、浮沉或者雷达杂波,在处理这些数据时应该非常小心。

为了进一步分析激光云高仪观测中云和降水云的结果,我们给出了 7 月 9 日过程的分析结果(图 2)。这次过程大部分云已经形成了降水,对于早上的中云,激光云高仪观测的云底大部分在云雷达观

测的较强 (-5 dBZ) 的回波上部, 部分云底在云雷达观测的云顶, 对于 22:00~24:00 情况也是如此。云雷达因不同观测模式最小可测回波强度的变化, 比较弱的云的云底被估计为 2.1 km (M2 模式最小可测高度), 云的实际高度应该低于这个高度。从

径向速度来看, 比较强的回波强度对应的粒子下落速度 (包含空气本身的运动) 在 1 m s^{-1} 左右, 这些云中已经包含了比较大的有一定下落速度的粒子。对于这些中云, 两种探测设备给出的云底有一定偏差。分析 14:00~16:00、19:00~21:00 这两块降水

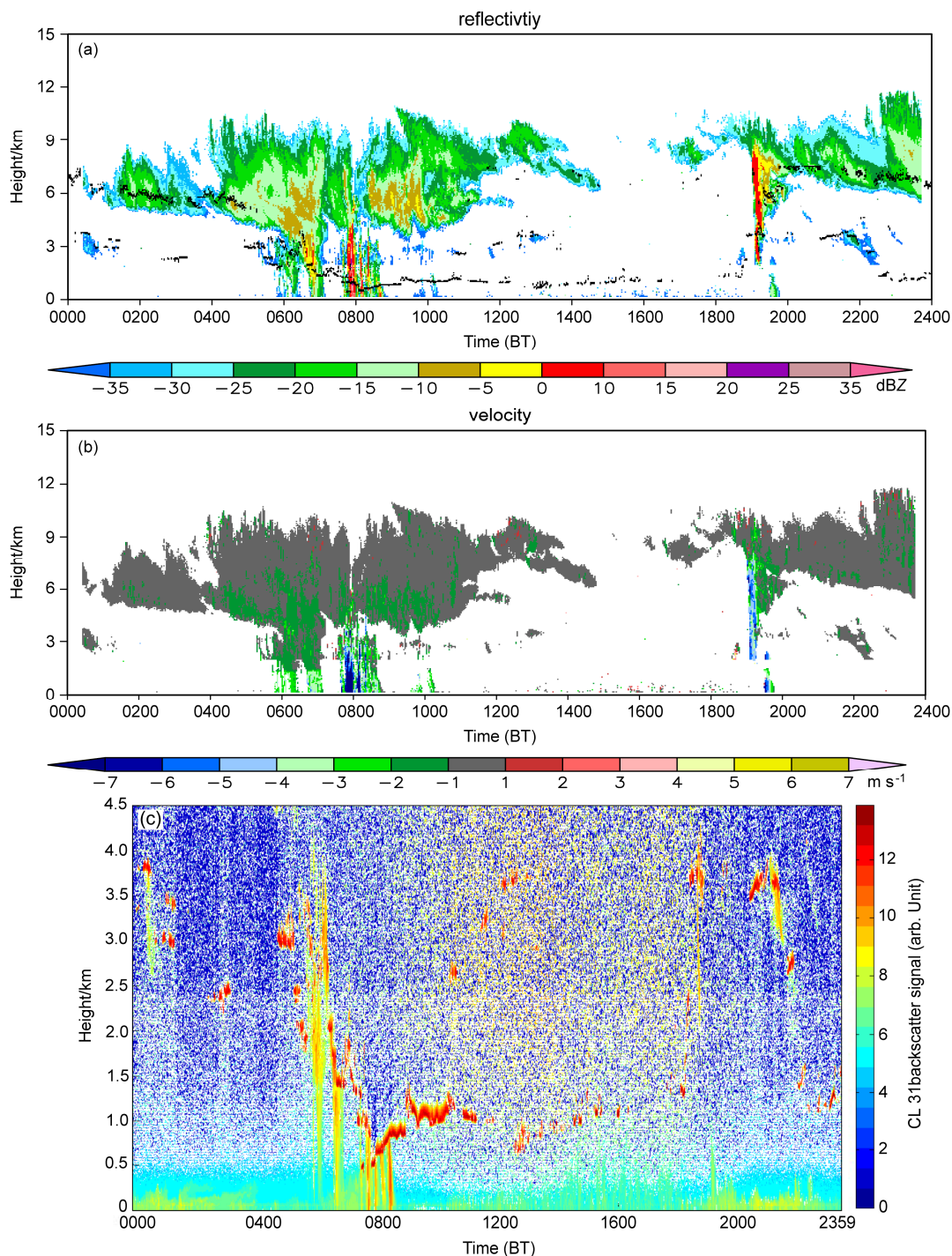


图1 2014年7月19日云雷达观测的(a)回波强度和(b)径向速度的时间—高度剖面,(c)激光云高仪散射能量图。其中(a)中黑色点表示激光云高仪观测的云底

Fig. 1 Time–height cross sections of (a) reflectivity and (b) radial velocity from cloud radar, and (c) scattering energy from ceilometer for 19 July 2014. The black dots in (a) indicate the ceilometer-derived cloud-base heights

云发现, 激光云高仪能穿透 15 dBZ 的降水云 2 km 以上, 给出的云底都在零度层以上。

为了比较激光云高仪激光发射功率对云底观测的影响, 图 3 给出了 7 月 19 日激光云高仪观测的云底与激光雷达观测结果的对比, 激光雷达不是连续观测的, 只有 10:50~12:50、14:50~23:00 时段的数据。从结果来看, 对于浅薄的低云和中云, 两种激光测云结果非常一致, 但是对于深厚的高云 (20:00~23:00), 激光雷达观测的云底要低于激光云高仪的结果, 偏差在 0.9 km 左右。通过与图 1 的比较发现, 激光雷达观测的深厚高层云的云底与云雷达观测结果更加接近。

以上两个个例分析, 为进一步分析和解释激光云高仪与云雷达观测云底的统计特征提供了更直观的印象。

5 激光云高仪与云雷达观测的云底的统计分析

5.1 激光云高仪与云雷达观测不同高度云的能力分析

与云雷达和激光云高仪探测云有关的两个重要问题是云雷达是不是能够观测到所有的云底和云顶? 因激光衰减造成激光云高仪漏测上层云的比例大概是多少? 为此, 我们采用 2014 年 7 月 5 日至 8 月 4 日云雷达和激光云高仪连续观测数据, 对比两种设备探测的云底频次随高度的变化来分析这些问题。不同高度云底探测频次定义为在一定高度范围内 (90 m 间隔), 激光云高仪或云雷达观测的云底次数与总观测次数的比值 (图 4)。从图中可以看出: 对应低云和中云 (4.5 km 以下), 激光云高仪和云雷达观测的云底频次分布的最大值在 2 km 高度左右, 而且分布趋势比较一致, 但云雷达对低云和中云的有效探测次数偏小。对于高云来说, 云雷达观测到了在 6 km 高度上 2.5% 的云底频次最大值, 这要远远高于激光云高仪观测的结果。如图 1 中 12:00~15:00 情况, 就是激光云高仪可探测到比较多的低云, 但探测高云次数比较少, 而云雷达正好相反。造成这种现象的可能原因一是低层云对激光波束衰减所致, 二是激光云高仪观测能力有限。为了进一步分析这种原因, 利用配对的激光云高仪云底数据与云雷达观测数据, 分析了云雷达漏测率 (图 4c), 这个参量定义为激光云高仪云底位置上, 云雷达没有有效观测的次数与激光云高仪

观测到有云的次数的比值。对比图 4a、b 和 c 可以看出: 对应中云和低云, 激光云高仪观测的云的次数高于云雷达, 云雷达漏测是必然的; 但对于云雷达漏测频次最高的位置恰恰在云雷达观测到云底频次最高的高度, 在这个高度上, 激光云高仪观测到的云的频次并不高。从这种现象我们可以推断: 云雷达不能观测到的比较浅薄中云和低云, 在有中低云存在的情况下, 由于衰减影响激光云高仪不能探测到高层的高云, 即使是比较强的高云也是如此; 另外当中低层没有云, 而高层存在浅薄的高层云或者高积云时, 激光云高仪却可以观测到, 由于这些云主要是由小的冰晶和云滴组成, 云雷达就有可能观测不到这些云了。这个个例见 7 月 26 日云雷达与激光云高仪观测结果的对比 (图 5), 18:00~23:00 激光云高仪观测到了大量的高云, 而云雷达却漏测了。

为了进一步分析两种设备对不同时段和不同高度探测效果, 我们给出了激光云高仪和云雷达探测云底频次的时间—高度图 (图 6)。比较两种设备探测的云高频次的时间—高度分别发现: 激光云高仪对 4.5 km 以上高云的探测能力非常差, 只能捕捉到 00:00~01:06 时段, 16:00~24:00 时段, 6 km 高度上的一些云。对于 3.5~4.5 km 的中云来说, 激光云高仪获取的云底也非常少, 但对 3.5 km 高度以下的低云, 激光雷达探测能力明显高于云雷达。对于低云探测, 云雷达表现比较差, 激光雷达观测的 1.5 km 高度的主要云底被云雷达提高到 2.0 km 高度上, 主要原因是这个高度层上下, 云雷达可测最小回波强度的跳到。在 1.5 km 高度及以下, 云雷达观测的真正的云底就非常少了, 主要观测到的是及地的降水。我们知道, 云降水粒子尺度远远大于激光波长, 粒子对激光散射能量与粒子的平方成正比; 而云降水粒子尺度与毫米波雷达波长相当, 对毫米波雷达波的后向散射能量基本与粒子尺度的六次方成正比 (忽略米散射效应), 这样就使得激光云高仪的回波能量对大粒子不敏感, 而云雷达回波能量对大粒子非常敏感, 在有雨滴落到云底以下情况下, 云雷达很难探测降水系统内部的云底, 这时对云底就出现了低估。

我们分别统计了激光云高仪和云雷达观测低、中、高云的探测效率。定义在一次云雷达或者激光云高仪的观测数据中, 只要有一个云底出现就记为有云信号, 有云信号的径向数与总探测次数的比值

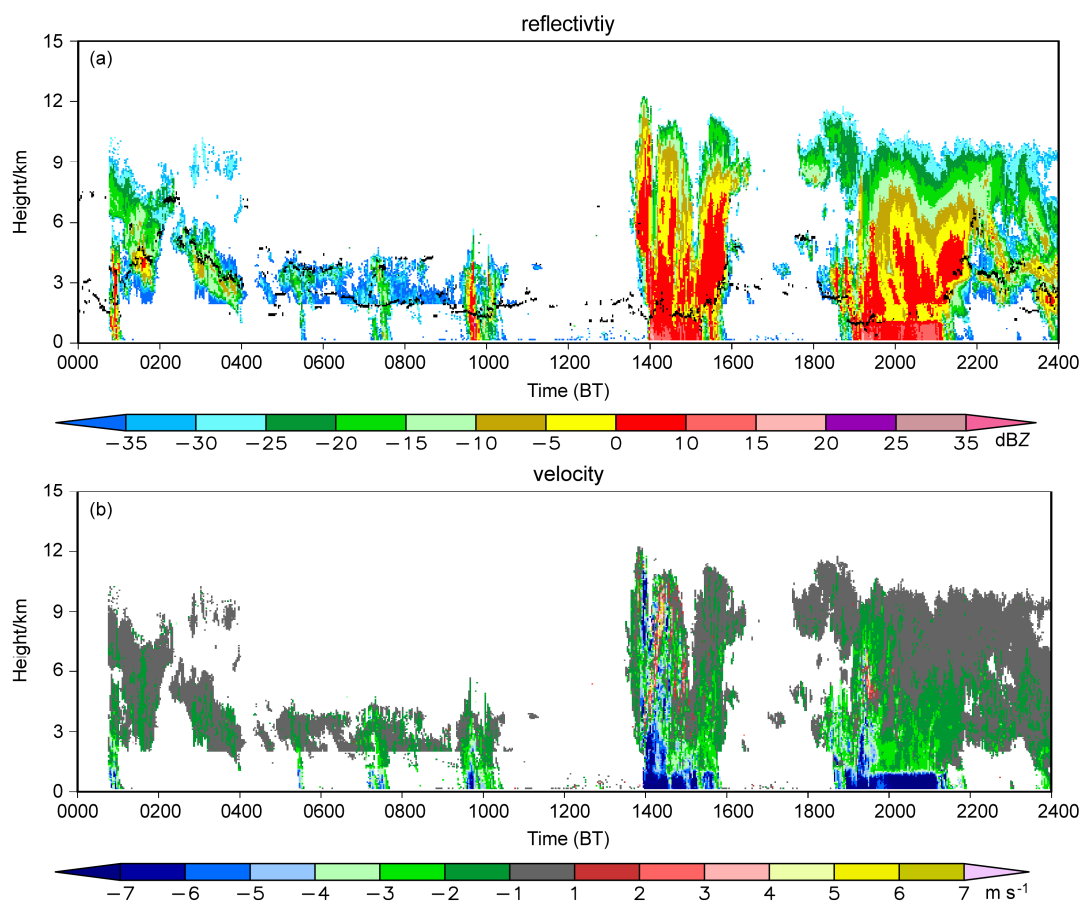


图2 同图1, 但为2014年7月9日的个例

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for 9 July 2014

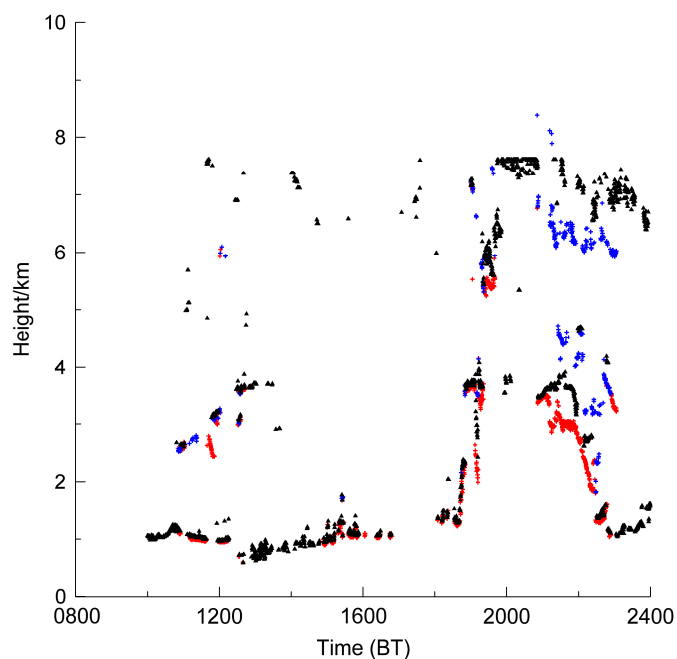


图3 2014年7月19日激光雷达观测的第一层云(红色点)、第二层云(蓝色点)云底高度与激光云高仪观测结果(黑色点)的对比

Fig. 3 Comparison between lidar-derived cloud-base heights (red dots are for the first layer cloud bases and blue dots for the second layer cloud bases) and ceilometer-derived cloud-base heights (black dots) during 19 July 2014

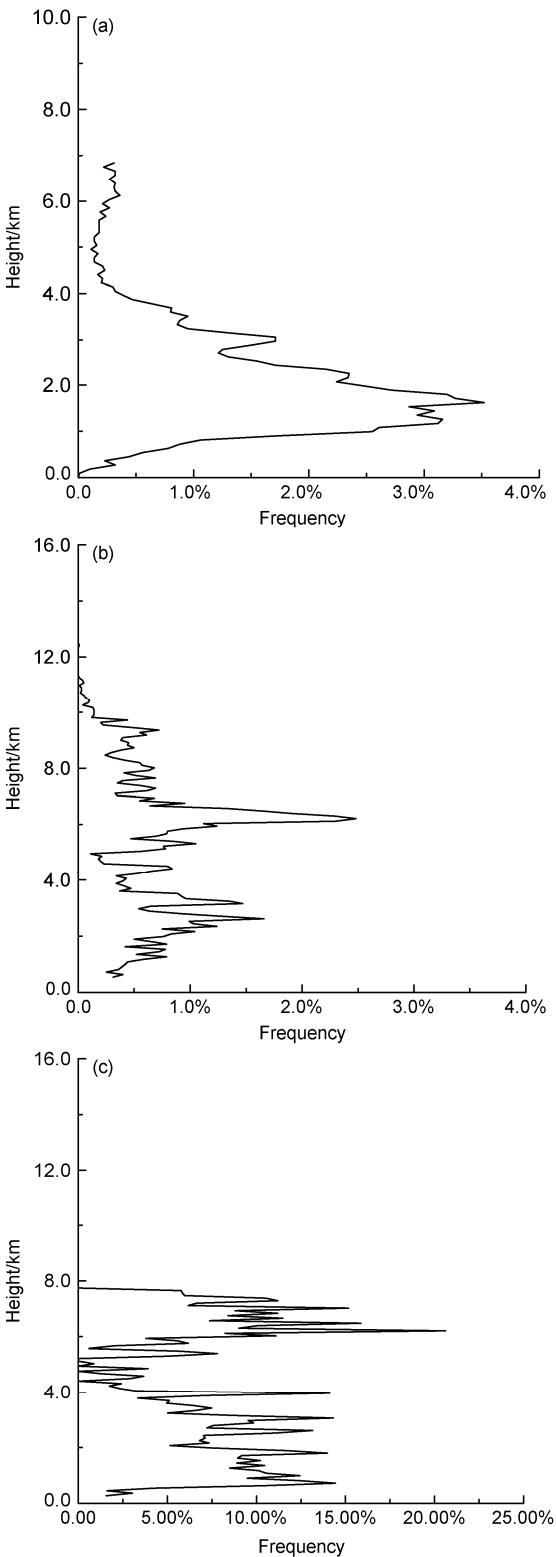


图4 (a)激光云高仪和(b)云雷达观测云底频次和(c)激光云高仪漏测的频次随高度的变化
Fig. 4 Occurrence frequencies of cloud-base heights from (a) ceilometer and (b) cloud radar, and (c) frequency of cloud detections missed by ceilometer

为云总探测效率,观测到某种云(低、中和高云)径向数与总探测次数的比定义为这种云的探测效率。因有多层云的存在,不同类型云探测效率的总和会大于100%。为了分析超过激光云高仪观测范围外的高云,单独列出的7 km以上的云和及地的降水。表2给出了激光云高仪和云雷达对三种类型云探测效率的对比结果。从对比分析可以看出:云雷达探测的云信号的效率比激光云高仪高14.1%。云雷达探测到的低云的频次(41.5%)也要明显低于激光云高仪结果(52.2%),主要原因是该雷达在低层灵敏度比较低和大量的降水发生的缘故。云雷达对中云和高云的探测效率要明显高于云高仪,特别是高云,云雷达探测率为51.1%(考虑了高于7 km高度以上的云),而激光云高仪仅为9.2%。从云层数来说,激光云高仪观测的单层云占95%,两层云4.5%,三层云0.5%,对于云雷达来说,单层、两层、三层和更多层云的比例分别是:52.0%、30.8%、3.5%和13.7%。从这些结果可以看出,激光云高仪观测多层云的能力比较差。

从三种云的平均云底高度观测结果来看(表3),低云和中云云雷达观测的云底高度平均高0.22 km和0.18 m,对高云来说,云雷达观测的平均云底高度要低0.46 km。

表2 激光云高仪和云雷达观测的三种类型云的探测效率的对比

Table 2 Data acquisition ratios by ceilometer and cloud radar for different types of clouds

	探测效率				
	云信号	低云	中云	高云	高云(>7 m)
激光云高仪	77.2%	52.2%	19.9%	9.2%	
云雷达	91.3%	41.5% (其中 27.8%降水)	23.3%	24.7%	27.2%

表3 激光云高仪和云雷达探测的三种云平均云底高度对比
Table 3 Averaged cloud-base heights of different types of clouds by ceilometer and cloud radar

	云底高度/km		
	低云	中云	高云
激光云高仪	1.56	3.20	6.33
云雷达	1.78	3.38	5.87

5.2 激光云高仪与云雷达云底位置分析

为了分析,我们统计了云高仪观测的云底与云雷达有效观测的高度的关系,图7给出了激光云高仪观测的云底与云雷达有效观测点的最小距离(云雷达观测点高度减去激光云高仪的高度)的概率分

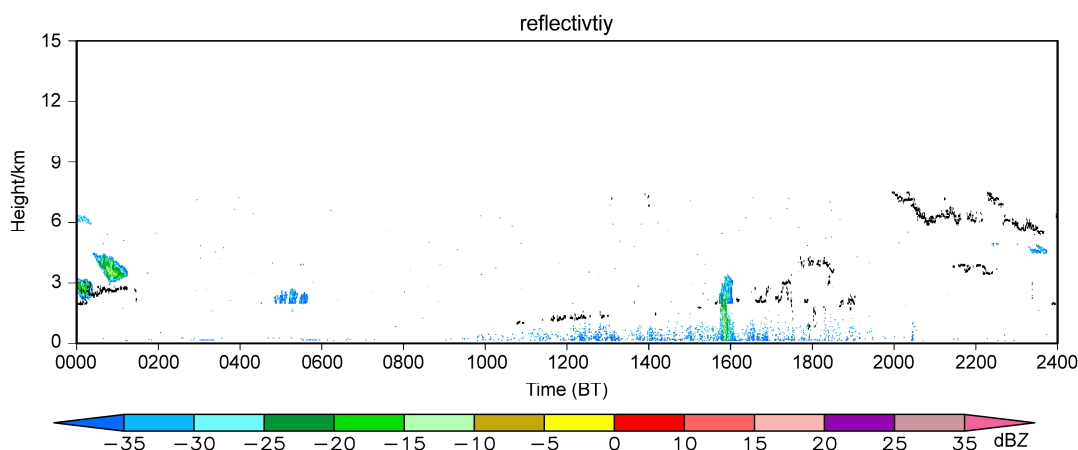


图5 2014年7月26日云雷达观测的回波强度时间—高度剖面。黑点表示激光云高仪观测的云底

Fig. 5 Time-height cross section of reflectivity for 26 July 2014. The block dots indicate ceilometer-derived cloud-base heights

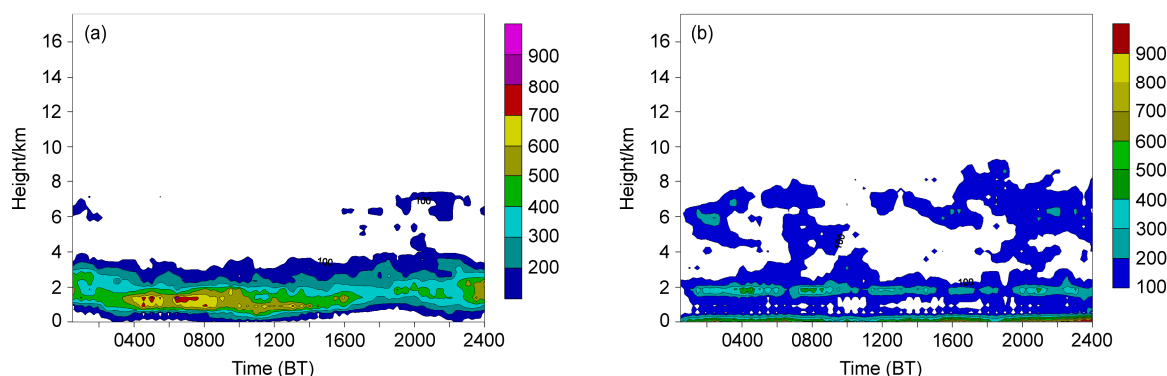


图6 2014年7月5日至8月4日 (a) 激光云高仪和 (b) 云雷达探测的云底的时间—高度频次分布

Fig. 6 Time-height cross sections of occurrence frequencies of (a) ceilometer-derived cloud-base heights and (b) cloud radar-derived cloud-base heights at various levels from 5 July to 4 August 2014

布, 正值表示云雷达有效观测点高于激光云高仪观测的云底, 其中纵坐标采用了对数坐标。频次小于1%的高度差分别为-330 m 和 660 m。距离偏差大于300 m 的次数占总观测次数比例不超过0.18%。也就是说超过99.82%的激光云高仪观测的云底300 m 以内可以发现云雷达观测信号。

将2014年7月5日至8月4日云雷达和激光云高仪获取的云底高度数据进行时间匹配, 形成一一对应的云底高度数据对, 给出了这一个月连续观测的云底的对比(图8)。值得注意的是: 只有激光云高仪和云雷达同时观测到云信号的情况, 才被统计到图8中, 云底的匹配是以最近距离为标准的。从对比结果可以看出: 对于图中红框内结果, 实际存在多层云, 激光云高仪未能穿透低层云, 只观测到了低云或者中云, 因云雷达在2.1 km 以下灵敏度比较低, 未能观测到对应的云, 而只观测到了比较

高的中云和高云, 经过位置匹配, 就形成了红框的结果。这种情况云雷达和激光云高仪观测的并不是一个目标, 不能反映实际的云高对比情况。对于激光云高仪观测的2.5 km 以上的中云和高云, 激光云高仪观测的云底往往高于云雷达观测结果, 此时激光云高仪观测的云底处在云雷达回波内部。云雷达观测到的2.1 km 附近的云高很多情况是两种模式融合后, 这一高度上下云雷达可测最小回波强度变化造成的, 实际的云底要低于这一结果。对于青藏高原对流性为主的云来说, 两种观测方法得到的云底的匹配是非常困难的。

为了进一步分析两种设备探测云的差别, 我们统计了云雷达探测的云底对应的回波强度和激光云高仪云底对应的云雷达回波强度的概率分布(图9), 从图中可以看出: 云雷达云底回波强度大部分处在-40~-30 dBZ 之间, 主要与雷达可测的最小回

波强度随高度变化有关。激光云高仪云底对应的回波强度分布比较宽,而且强度要大的多,这就说明很多情况下,激光云高仪观测的不是云雷达的边

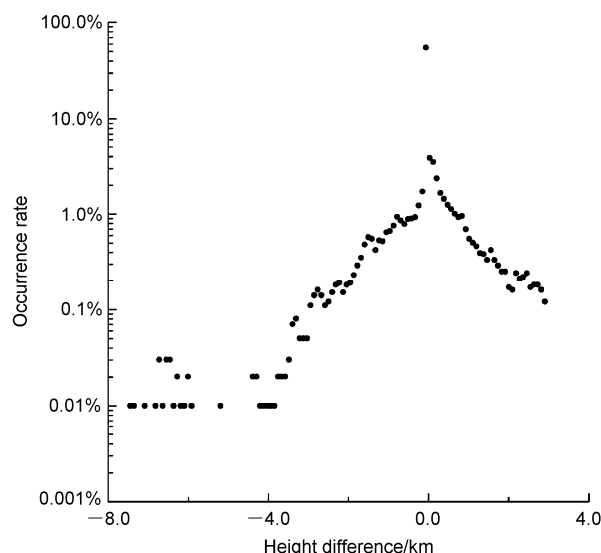


图7 激光云高仪观测的云底与最近的云雷达有效观测云信号的高度差频次分布,格距采用90 m

Fig. 7 Occurrences rate distributions of the height differences between the ceilometer-derived cloud-base heights and the nearest significant cloud radar detection, the bin size is 90 m

缘,而是到了云内部。特别是部分超过 0 dBZ 的回波强度,应该是在降水回波的内部。

我们计算了激光云高仪测量的云底对应的回波强度概率分布随高度的变化(图 10),这一概率分布是高度间隔为 0.5 km,回波强度间隔为 2 dB 统计得到的,对于中云和高云,激光云高仪的云底对应的回波强度主要处在-25.0 dBZ 周围,这比云雷达的最小可测回波强度大了 10 dB 左右。对于低云,激光云高仪云底对应的回波强度分布非常广,在 1.5 km 高度以下,回波强度比较强,这种情况很多对应降水回波,概率分布最大的区域为 1.5 高度和-5 dBZ,激光云高仪部分回波超过了 5 dBZ。

5.3 固态发射机制云雷达观测模式优化的考虑

根据以上激光云高仪和云雷达观测结果可以看出:云底在 1 km 以下的云非常少,而在 1 km 到 2 km 范围内的云非常多;由于现有的云雷达高分辨率模式的最小可测回波强度的范围为 2.1 km,这样就影响了 2 km 以下云的观测。固态发射机制云雷达工作稳定,可实现云的长期连续观测,但因发射机峰值功率比较低,必须通过脉冲压缩的方式,实现高灵敏度探测,但这样就会增加探测盲区。为了同时满足最小探测距离和最小可测回波强度,必

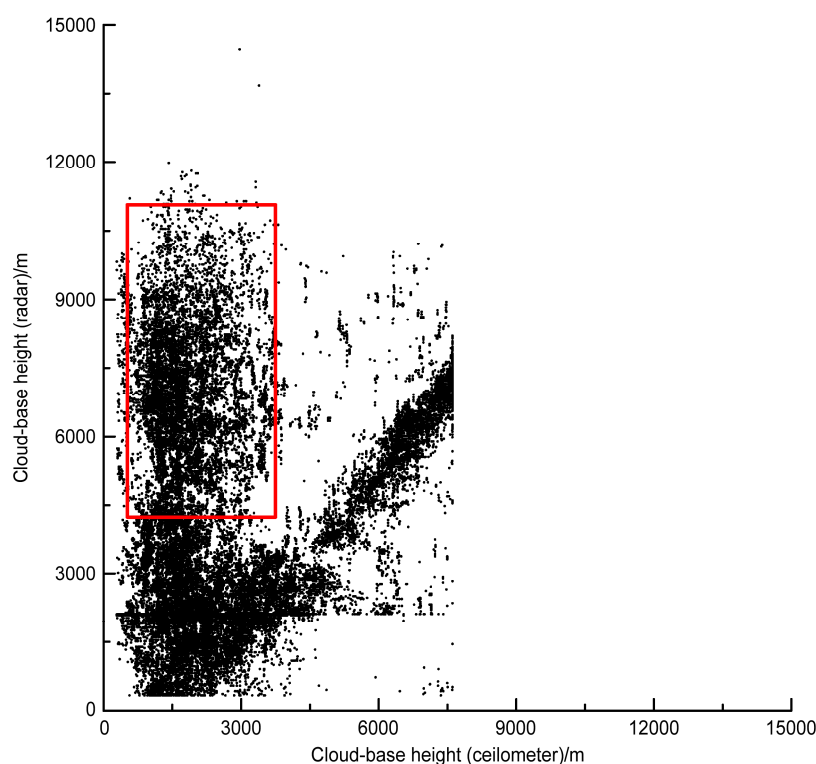


图 8 2014 年 7 月 5 日至 8 月 4 日激光云高仪与云雷达观测的云底高度的对比

Fig. 8 Scatter plot of cloud-base heights from cloud radar and ceilometer from 5 July to 4 August 2014

须增大相干积累次数,如果把卷云模式相关积累提高到 4 次,但最大可测径向速度范围就会缩小到 4.67 m s^{-1} ,这种情况非常容易出现径向速度模糊或者功率谱密度数据的部分模糊现象。因本云雷达主要观测云和降水过程动力过程和微物理过程,增加相干积累不合适。如果仅观测云的宏观特征,不考虑径向速度观测,增加相干积累、减小脉冲宽带是可行的。

为此我们提出了在不增加观测时间的新卷云模式,即把卷云模式的脉冲宽带减小到 $6\text{ }\mu\text{s}$,其他参数保持不变。这样,卷云模式理论上的最小可测高度变为 900 m ,实际为 1.1 km 。与原有的卷云模式相比,在 2.1 km 以上,最小可测回波强度增大 3 dBZ ,在 1.1 km 到 2.1 km 之间,原先只能使用边界层模式数据,现在可以使用卷云模式数据,最小可测回波强度减小了 11 dB ,这非常有助于对低云的

探测。下面我们用青藏高原数据,通过分析云底高度和探测率的变化,模拟分析新增模式对云观测的影响。

(1) 对中云和高云探测的影响

在这一高度范围内,人为剔除新卷云模式最小可测回波强度以下的数据,只采用高于最小可测回波强度的数据分析云底和探测率,与原先卷云模式的结果进行对比。

(2) 对低云探测的影响

仅考虑新卷云模式观测最小高度 1.1 km 到原模式最小探测高度 2.1 km 高度范围内,分别采用边界层模式数据和新的卷云灵敏度,分析对新卷云模式对低层云观测率的影响。 1.1 km 以下探测结果不发生变化。

表 4 和表 5 分别给出了新模式探测云的效率和云平均高度的情况。从结果看, $1.1\sim 2.5\text{ km}$ 高度内,因最小可测回波强度减小了 11 dB ,云探测效率提高近 10% ,而 2.1 km 以上最小可测回波强度增加 3 dB ,中云和 $4500\sim 7000\text{ m}$ 高度的高云的探测效率减小了 1.2% 和 1.4% ,而对超过 7 km 的高云的探测影响就比较大了,探测效率减小了 4.2% 。从平均云高来看,雷达可测回波强度的变化的影响不大。

表 4 云雷达观测模式优化前后模拟分析的三种类型云的频次的对比

Table 4 Data acquisition ratios by cloud radar with old and new operational modes for different types of clouds

	频次			
	低云 (小于 2.5 km)	中云 ($2.5\sim 4.5\text{ km}$)	高云 ($4.5\sim 7.0\text{ km}$)	高云 (大于 7.0 m)
原模式	38.7%	23.1%	24.6%	27.1%
新模式	48.3%	21.9%	23.2%	22.9%

当然,这只是利用现有观测模式数据对新设计的卷云模式观测结果的模拟分析,更可靠的分析还

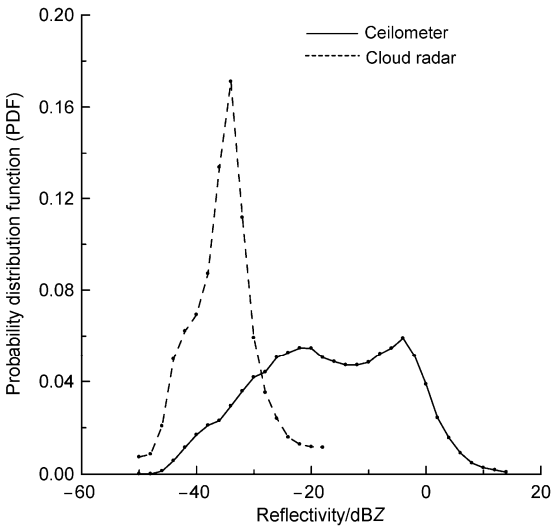


图 9 云雷达和激光云高仪探测的云底对应的回波强度的概率分布
Fig. 9 Probability distributions of reflectivity at the cloud base from cloud radar and ceilometer observations

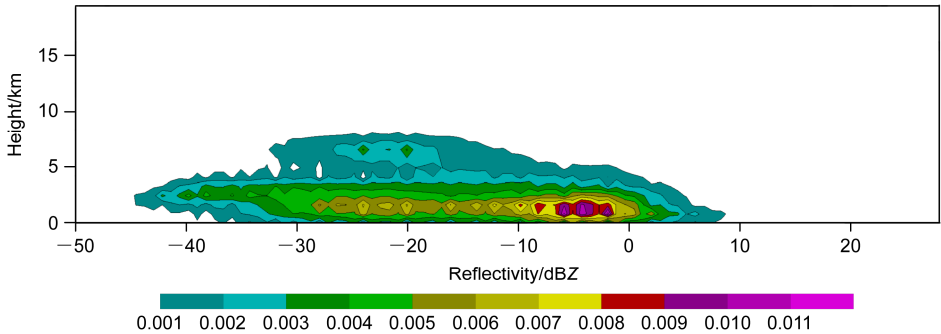


图 10 激光云高仪云底对应的回波强度概率分布随高度的变化
Fig. 10 Variation of probability distributions of reflectivity at the cloud base with height based on ceilometer observations

需要获取新模式观测结果。

表 5 云雷达观测模式优化前后模拟分析的三种类型云平均云底高度的对比

Table 5 Averaged cloud base heights for different types of clouds by cloud radar with old and new operational modes

	平均云底高度/km		
	低云 (小于 2.5 km)	中云 (2.5~4.5 km)	高云 (4.5~7.0 km)
原模式	1.62	3.39	5.58
新模式	1.56	3.38	5.87

6 结论和讨论

本文利用 2014 年夏季 1 个月的第三次青藏高原大气科学试验获取的 Ka 波段毫米波云雷达、激光雷达和激光云高仪数据,提出了云雷达探测云底的方法,分析这三种设备探测不同高度云底高度偏差、探测率,分析三种设备的探测能力。得到如下结论:

(1) 对于青藏高原云来说,云雷达云总探测效率、中云和高云探测效率,要高于激光云高仪,云雷达探测到多层云的次数也明显高于激光云高仪,但低云探测效率(包括及地的降水回波)低于激光云高仪,而且也会漏测一些浅薄的高云。低层云的遮挡是影响激光云高仪观测高云效果差的主要原因。

(2) 云雷达与激光雷达探测中云和高云的云底非常一致,而激光云高仪过低估计了云底,改进激光发射功率和信号接收能力可提高激光探测高层云的能力。

(3) 激光云高仪探测的中云和高云的云底很多处在云雷达回波内部。由于受低层云对激光的衰减作用和云雷达在低层观测能力的限制,两种云底观测结果的时空对应比较差,激光云高仪高估高云云底比较明显。

(4) 因固态发射机制云雷达在低层探测灵敏度影响,云雷达探测低层弱云能力比较差。兼顾低层云探测和高层云探测、云和弱降水探测,对于固态发射机制雷达是比较困难的。

参考文献 (References)

曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 2012. 南京北郊气溶胶观测 [J]. 激光与光电子学进展, 49 (6): 060101. Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, et al. 2012. Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city [J]. Laser & Optoelectronics Progress (in Chinese), 49 (6): 060101, doi:10.3788/LOP49.060101.

Clothiaux E E, Ackerman T P, Mace G G, et al. 2000. Objective

determination of cloud heights and radar reflectivities using a combination of active remote sensors at the ARM CART sites [J]. J. Appl. Meteor., 39 (5): 645–665, doi:10.1175/1520-0450(2000)039<0645:ODOCHA>2.0.CO;2.

Gaumet J L, Heinrich J C, Cluzeau M, et al. 1998. Cloud-base height measurements with a single-pulse erbium-glass laser ceilometer [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 15 (1): 37–45, doi:10.1175/1520-0426(1998)015<0037:CBHMWA>2.0.CO;2.

黄兴友, 胡汉峰, 夏俊荣, 等. 2013. 云底高度的激光云高仪、红外测云仪以及云雷达观测对比分析 [J]. 量子电子学报, 30 (1): 73–78. Huang Xingyou, Hu Hanfeng, Xia Junrong, et al. 2013. Comparison and analysis of cloud base height measured by ceilometer, infrared cloud measuring system and cloud radar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics (in Chinese), 30 (1): 73–78, doi:10.3969/j.issn.1007-5461.2013.01.013.

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 Siteng, Ma Shuqing, Gao Yuchun, et al. 2015. Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41 (2): 212–218, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.009.

Liu Liping, Zheng Jiafen, Ruan Zheng, et al. 2015. Comprehensive radar observations of clouds and precipitation over the Tibetan Plateau and preliminary analysis of cloud properties [J]. J. Meteor. Res., 29 (4): 546–561, doi:10.1007/s13351-015-4208-6.

Pal S R, Steinbrecht W, Carswell A I. 1992. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent [J]. Appl. Opt., 31 (10): 1488–1494, doi:10.1364/AO.31.001488.

Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83 (12): 1771–1790, doi:10.1175/BAMS-83-12-1771.

陶法, 马舒庆, 秦勇, 等. 2013. 基于双目成像云底高度测量方法 [J]. 应用气象学报, 24 (3): 323–331. Tao Fa, Ma Shuqing, Qin Yong, et al. 2013. Cloud base height measurement methods based on dual-camera stereovision [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (3): 323–331, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.03.008.

Thurairajah B, Shaw J A. 2005. Cloud statistics measured with the infrared cloud imager (ICI) [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 43 (9): 2000–2007, doi:10.1109/TGRS.2005.853716.

王帅辉, 韩志刚, 姚志刚. 2010. 基于CloudSat和ISCCP资料的中国及周边地区云量分布的对比分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 767–779. Wang Shuaihui, Han Zhigang, Yao Zhigang. 2010. Comparison of cloud amounts from ISCCP and CloudSat over china and its neighborhood [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 767–779, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.09.

汪会, 罗亚丽, 张人禾. 2013. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征 [J]. 大气科学, 35 (6): 1117–1131. Wang Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. 2013. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1117–1131, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.11.

- 王箫鹏, 宋小全, 闫宝东, 等. 2013. 激光雷达观测珠海市云底高度研究 [J]. 光电子·激光, 24 (11): 2192–2197. Wang Xiaopeng, Song Xiaoquan, Yan Baodong, et al. 2013. Research on the observation of cloud-base height for the city of Zhuhai of China with lidar [J]. Journal of Optoelectronics-Laser (in Chinese), 24 (11): 2192–2197.
- Wu Songhua, Song Xiaoquan, Liu Bingyi, et al. 2015. Mobile multi-wavelength polarization Raman lidar for water vapor, cloud and aerosol measurement [J]. Opt. Express, 23 (26): 33870–33892, doi:10.1364/OE.23.033870.
- 闫宝东, 宋小全, 陈超, 等. 2013. 2011 春季北京大气边界层的激光雷达观测研究 [J]. 光学学报, 33 (S1): s128001. Yan Baodong, Song Xiaoquan, Chen Chao, et al. 2013. Beijing atmospheric boundary layer observation with lidar in 2011 spring [J]. Acta Optica Sinica (in Chinese), 33 (S1): s128001.
- Zhang Jinqiang, Chen Hongbin, Li Zhanqing, et al. 2010. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar [J]. Journal of Geophysical Research, 115 (D7): D00K30, doi:10.1029/2010JD014030.