

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. 气象, 41(2): 212-218.

# 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析<sup>\* 1</sup>

李思腾<sup>1</sup> 马舒庆<sup>2</sup> 高玉春<sup>2</sup> 杨玲<sup>1</sup> 蒲晓虎<sup>1</sup> 陶法<sup>2</sup>

1 成都信息工程学院电子工程学院, 成都 610225

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**提 要:** 2013 年 5 月 1 日至 6 月 8 日, 中国气象局气象探测中心在中国气象局大气探测综合试验基地进行了云高观测试验, 试验仪器包括: (1) 毫米波云雷达 (35 GHz), 观测数据为回波功率值, 时间分辨率 1 min; (2) 激光云高仪, 观测数据为后向散射光强度, 时间分辨率为 1 min; 本工作对 39 天试验数据进行对比分析, 结果表明: 毫米波云雷达数据获取率要比激光云高仪的数据获取率高 26%; 在雾霾天气时激光云高仪的数据获取率比毫米波云雷达低 51%; 降水天气对激光云高仪测量云底高度的结果影响较大, 对云雷达的测量的结果影响较小; 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。

**关键词:** 激光云高仪, 云雷达, 云底高度, 云厚度, 数据获取率

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.009

## Comparative Analysis of Cloud Base Heights Observed by Cloud Radar and Ceilometer

LI Siteng<sup>1</sup> MA Shuqing<sup>2</sup> GAO Yuchun<sup>2</sup> YANG Ling<sup>1</sup> PU Xiaohu<sup>1</sup> TAO Fa<sup>2</sup>

1 Department of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

**Abstract:** From 1 May to 8 June 2013 CMA Meteorological Observation Centre conducted an experiment of cloud height observations by using cloud radar (35 GHz), whose observation data are the echo power value and temporal resolution is 1 min and a ceilometer whose observation data are the back-scattering intensity with 1 min temporal resolution. The result of analyzing the data observed from the 39 d experiment indicates that: (1) the data acquisition ratio of cloud radar is 26% larger than that of ceilometer; (2) the ratio is 51% in fog-haze weather; (3) relatively, precipitation has more significant effect on cloud base height measured by laser ceilometer than that by cloud radar; (4) height of cloud base measured by cloud radar is almost consistent with the height by ceilometer because their average deviation is less than 300 m.

**Key words:** ceilometer, cloud radar, cloud base height, cloud thickness, data acquisition ratio

## 引 言

云是指停留在大气中上的水滴或冰晶的集合体, 是地球水分和能量循环的重要因子。云通常覆盖地球表面的 50% 左右, 是地球大气辐射收支平衡的主要调节者, 也是影响地球大气热量平衡的重要

因素。云的年、季节变化对于研究全球气候变化以及水汽收支平衡具有重要意义 (胡树贞等, 2012; 2013)。近年来云特性的研究越来越受到人们的广泛关注 (张春光等, 2007; 杨俊等, 2009; 徐兴奎, 2012; 向华等, 2014)。在云的宏观参数中, 云高、云量、云的结构 (Rossow et al, 1993) 是主要的观测要素, 其中云底的高低决定了云的分类和降水概率 (盛

\* 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201106047) 资助

2014 年 5 月 4 日收稿; 2014 年 12 月 11 日收修定稿

第一作者: 李思腾, 主要从事气象雷达探测技术应用研究. Email: Lisiteng88@126.com

裴轩等,2003;Liou et al,2004;王帅辉等,2012)。如何提高云底高度和云厚度的探测能力是气象探测领域面临的重要课题。

云资料主要来自地基观测和天基遥感两个方面。卫星观测的探测覆盖范围广,但缺点是时空分辨率低,大部分时候更适合云顶的观测,云底和云体在很多时候无法观测,不能完全满足科研和应用上的需要(章文星等,2012)。地基探测云参数有多种手段(Dong et al,2008),如云雷达、激光云高仪、热红外成像仪、全天空成像仪 WSI、总天空成像仪 TSI、探空等。其中云雷达和激光云高仪可以精确地获得高时空分辨率(郟秀书等,2008)的云的水平及垂直结构和云底高度,是非常有效的探测工具。特别是毫米波雷达,其波长更接近云粒子尺度,利用云粒子对电磁波的散射特性(Clothiaux et al,1995;刘黎平等,2014;孙晓光等,2011;王德旺等,2012),通过分析云的雷达回波可以了解云的各种特性,云的回波参数可以反映云的宏观和微观结构(黄芳等,2003;吴举秀等,2013)。但是,目前由于受到成本较高等各种条件的限制,还不能够在气象站台广泛应用(仲凌志,2009)。在仪器性能对比方面已有一部分科研人员进行了研究。黄兴友等(2013)对四台激光云高仪(CL31、CL51、CYY-2B、中科院)、两部红外测云仪(SIRIS、ZXD03)、一台全天空成像仪(江苏省无线电科学研究所有限公司)以及一部毫米波云雷达(南京信息工程大学)的测量数据进行了对比分析,取得初步成果。章文星等(2012)对2008年5—12月中美联合利用 ARM 移动观测设置(AMF)在安徽省寿县进行的大气辐射综合观测试验的结果进行了对比研究,对云雷达[ARM W-band(95 GHz)Cloud Radar]、激光云高仪(Vaisala Ceilometer)、扫描式全天空红外成像仪(SIRIS-1型)的数据进行了对比分析。今后还需要对这些仪器进行长期的比对试验,比较这些设备测量结果的一致性以及在不同天气条件下的表现。

针对目前毫米波雷达和激光云高仪前景广阔,应用越来越广泛,在中国气象局大气探测综合试验基地同时进行毫米波雷达和激光云高仪的观测试验。本文对毫米波云雷达和激光云高仪在2013年5月1日至6月8日连续观测资料数据进行了研究,通过对云回波底高、云回波顶高、云体回波厚度数据结果进行对比分析,比较两台仪器探测云性能

的差异,并对雾霾和下雨等不同天气情况与不同高度下云的数据获取率进行了对比研究,给出性能差异的分析和一些结论。

## 1 试验设备和资料

### 1.1 Ka 波段全固态测云雷达

2013年5月1日至6月8日,在中国气象局大气探测综合试验基地进行观测试验所使用的云雷达是由气象探测中心和西安华腾微波有限责任公司研制的Ka波段35 GHz的全固态垂直指向多普勒雷达,峰值功率4 W,测量高度约为12 km,垂直空间分辨率30 m,时间分辨率1~60 s可调,为了与激光云高仪在时间上匹配,将时间分辨率设置为60 s。

如今,虽然已经发展了多种自动探测设备对云进行观测(如激光雷达、全天空成像仪、红外成像仪等),获得云高、云体等信息,但这些观测设备通常情况下不能穿透厚云层探测其垂直范围、云体整体形态以及内部结构。而毫米波云雷达具有穿透云层,给出云体整体结构信息的能力(彭亮,2011;陶法等,2013;吴举秀等,2014),是探测云体厚度以及三维精细结构的重要工具。仲凌志等(2009)通过对比分析毫米波云雷达与普通测雨雷达、晴空风廓线雷达的差异,得出:毫米波云雷达具有高的时空分辨率,能探测云垂直结构和整体形态,比普通天气雷达以及风廓线雷达更适合监测云的变化。本文利用Ka波段全固态测云雷达所测的回波功率,设定回波功率比仪器噪声大2 dB为阈值,边界下沿为云回波底高,上沿为云回波顶高,提取云回波底、云回波顶高度,从而计算出云体回波厚度。

### 1.2 激光云高仪

试验使用的激光云高仪是由洛阳凯迈环测公司生产,并通过中国气象局考核的CYY-2型激光雷达(激光云高仪),垂直指向。云高最小分辨率为30 m,激光发射重复频率不小于2500 Hz,测量高度150~8000 m,时间分辨率为1 min。本文所使用的数据通过由激光云高仪得到的后向散射光强度,根据后向散射光强度提取出云回波底、云回波顶高度等云体参数信息。具体方法:后向散射光强度比仪器噪声大2 dB为阈值,大于阈值强度的区域的边界下沿为云回波底高,边界上沿为云回波顶高,再计算出云体回波厚度。

### 1.3 观测资料以及期间天气状况

本文的观测资料为2013年5月1日至6月8日云雷达和云高仪并行连续观测数据,两台仪器位于中国气象局大气探测综合试验基地,位置相距50 m。云雷达原始数据为回波功率值,激光云高仪原始数据为后向散射光强度,对原始数据进行处理,提取云回波底、云回波顶高度、云回波厚度等数据进行对比分析。资料经过初步统计,结果分为4种:(1)一段时间内云高仪和云雷达都观测到有云。(2)一段时间内云雷达观测到有云,而云高仪没有观测到云。(3)一段时间内云高仪观测到有云,而云雷达没有观测到云。(4)一段时间内云高仪和云雷达都没有观测到有云。本文中,对1、2、3情况的结果进行云回波底高、云回波厚度的定量的相互对比分析。下文简称观测结果(1)、(2)、(3)。对5月1日至6月8日云雷达和云高仪并行连续观测数据的初步统计的结果:观测到有云天数25 d;其中有6 d出现降水;雾霾天气天数10 d,其中霾天6 d,雾天4 d。

## 2 云回波底高观测数据对比分析

为了比较两台仪器测量云底高度的相对性能差异,用两台仪器测得的云回波底高进行对比分析。图1为2013年5月1日至6月8日观测期间,云雷达和云高仪共同观测到云回波底高度的点聚图。图

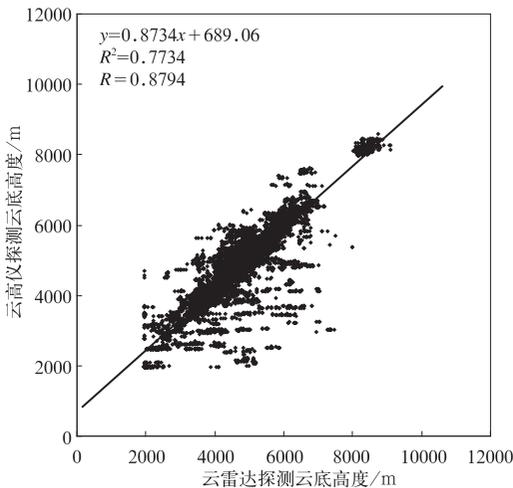


图1 2013年5月1日至6月8日云雷达与云高仪共同观测云回波底高点聚图

Fig. 1 Scatter diagram for cloud base echo height measured by cloud radar and ceilometer from 1 May to 8 June 2013

中粗直线为样本点的拟合曲线。可以看到相关系数 $R$ 达到0.8794,相关度比较高,说明云雷达和云高仪测量云底高度的一致性较好。

接下来根据云底高度不同,把数据结果分成高云回波、中云回波和低云回波分别进行对比。云高的分类规定:高于4500 m的云定义为高云,2500~4500 m为中云,2500 m以下为低云(中国气象局,2003)。排除两种仪器都没有观测到云的时间[保留观测结果(1)、(2)、(3)],观测到高云回波的时间为117 h,中云回波的时间为42 h,低云回波时间为4 h。

图2a为云雷达和云高仪观测高云回波底高数据对比,其中每个点代表2 h平均的云回波底高(对每两个小时内有数据的点进行算数平均计算,无数据点不参与计算),正方形数据点代表云雷达,三角形数据点代表云高仪,在零值的点表示2 h内其中一种仪器没有观测到云而另一种仪器观测到了云。对高云回波底总平均高度进行了计算,如表1所示,在满足观测结果(1)、(2)、(3)三个条件下,云雷达的云回波底平均高度为5929 m,云高仪云回波底平均高度为5651 m,平均相差278 m;在只满足观测结果(1)的条件下云雷达和云高仪观测云回波底平均高度分别为5366、5460 m,两者相差94 m。可以看到在观测高云回波底高时,云雷达和云高仪观测结果相差很小。图2b为云雷达和云高仪在观测中云回波底高的数据对比。图中可以看出,去除一种仪器没有观测到数据而另一种仪器观测到数据的观测结果,云雷达和云高仪所测数据一致性比较好。中云回波底总平均高度如表1所示,在满足观测结果(1)、(2)、(3)三个条件下,云雷达的云回波底平均高度为4014 m,云高仪的云回波底平均高度为4097 m,平均相差83 m;在只满足观测结果(1)的条件下云雷达和云高仪观测到云回波底平均高度分别为4042和4142 m,两者相差100 m,可以看出云雷达和云高仪在观测中云回波底高的结果基本一致。云雷达和云高仪观测低云回波底高数据对比如图2c所示,云雷达和云高仪观测到低云回波的时间为4 h,图中数据点代表每2 h中所有观测数据(1 min)的平均值。云雷达和云高仪所测总平均云回波底高分别为2259和2263 m,相差5 m;在观测结果(1)下两者相差4 m(表1),两种仪器在观测低云云高的结果一致性较好。综上所述:在无降水观测云底高度性能方面,云雷达和云高仪观测中高低各层云高的结果一致性较好,平均最大差值不超过300 m,观测结果基本相同。

表 1 云雷达与云高仪的平均云回波底高对比

Table 1 Comparison of average cloud base echo heights measured by cloud radar and ceilometer

云层高度	云雷达平均云回波底高/m	云高仪平均云回波底高/m	云雷达在观测结果 1 的条件下平均云回波底高/m	云高仪在观测结果 1 的条件下平均云回波底高/m
高云	5929	5651	5366	5460
中云	4014	4097	4042	4142
低云	2259	2263	2259	2254

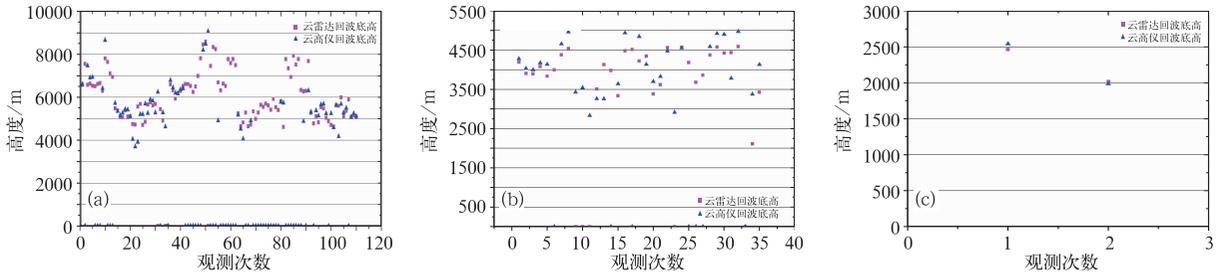


图 2 云雷达和云高仪观测各层云的云回波底高对比

(a) 高云, (b) 中云, (c) 低云

Fig. 2 Comparison of cloud base echo heights of corresponding layers measured by cloud radar and ceilometer

(a) high-level cloud, (b) mid-level cloud, (c) low-level cloud

### 3 云体回波厚度观测数据对比分析

云体厚度直接反映了两台仪器对云的穿透能力。为了比较两台仪器对云的穿透能力,本章节将对云体回波厚度数据进行对比分析,由两个仪器的观测数据得到云回波顶高,再根据上一节得到的云回波底高,可以计算出云体回波厚度,从而进行对比分析。云雷达和云高仪观测数据按照云底高度分为高云、中云、低云,并分别对这三类云的云体回波厚度观测数据进行对比分析。

云雷达和云高仪观测高、中、低云云体回波厚度数据对比如图 3a~3c 所示,其中每个数据点代表 2 h 平均云体回波厚度,零值点表示 2 h 内其中一种仪器没有观测到云。由图看出:(1)对于高云回波和中云回波观测结果,云雷达观测到有云时间比云高仪多,在高云观测结果中尤为明显;(2)在两种仪器都观测到数据时,云雷达观测到的云体回波厚度普遍大于云高仪观测的云体回波厚度。云雷达和云高仪分别观测高、中、低三类云的平均云回波顶高和平均云体回波厚度如表 2 所示。在高云时,云雷达比云高仪观测到的平均云回波顶高高出 983 m,平均云体回波厚度大 713 m,在观测结果(1)条件下,云雷达比云高仪观测到的平均云回波顶高高出 286 m,平均云体回波厚度大 384 m,可以看出云雷达在探测高云云层垂直结构的能力上要明显强于云高

仪;在中云时,云雷达观测到的平均云回波顶高比云高仪高出 1018 m,云回波厚度大 1101 m,在观测结果(1)条件下,云雷达比云高仪观测到的平均云回波顶高高出 693 m,平均云体回波厚度大 799 m,在中云云体厚度探测能力方面,云雷达探测能力也是明显强于云高仪,与高云所得结果基本一致;在低云时,云雷达观测到的平均云回波顶高比云高仪高出 249 m,云回波厚度大 253 m,在观测结果(1)条件下,云雷达比云高仪观测到的平均云回波顶高高出 320 m,平均云体回波厚度大 306 m,对于低云云体厚度的探测,云雷达探测能力强于云高仪,但相对于中、高云的探测结果,两种仪器在低云的探测结果差异有所减小。对于各层云两种仪器的总平均回波厚度与在观测结果(1)下所得的平均回波厚度均有所差异,这可能是由于样本数量的不同而导致的,但总体上云雷达所测云回波厚度要大于云高仪。综上所述,云雷达在探测各高度层的云体厚度的性能方面要明显强于云高仪,这是因为云层对于激光云高仪衰减很强,激光云高仪发射的激光在云底时就会产生很强的后向散射,激光强度迅速衰减,一般很难穿透整个云层,这在厚度、强度较大的云层体现尤其明显。根据观测数据结果,云高仪对云层的穿透能力平均在 300~400 m 之间不等,大于 1 km 一般无法穿透,而云雷达发射的毫米波可以很容易穿过较厚云层,给出清晰的云回波底与云回波顶高度,探测出云体的垂直结构和内部强度变化。

表2 云雷达与云高仪平均云顶回波高度和云回波厚度对比

Table 2 Comparison of cloud top echo heights and cloud echo thicknesses measured by cloud radar and ceilometer

云层高度	云雷达平均云回波顶高/m	云高仪平均云回波顶高/m	云雷达平均云体回波厚度/m	云高仪平均云体回波厚度/m	云雷达在观测结果(1)的条件下平均云回波顶高/m	云高仪在观测结果(1)的条件下平均云回波顶高/m	云雷达在观测结果(1)的条件下平均云回波厚度/m	云高仪在观测结果(1)的条件下平均云回波厚度/m
高云	7078	6095	1158	445	6282	5996	920	536
中云	5640	4622	1626	525	5499	4806	1475	676
低云	2845	2596	586	333	2845	2534	586	280

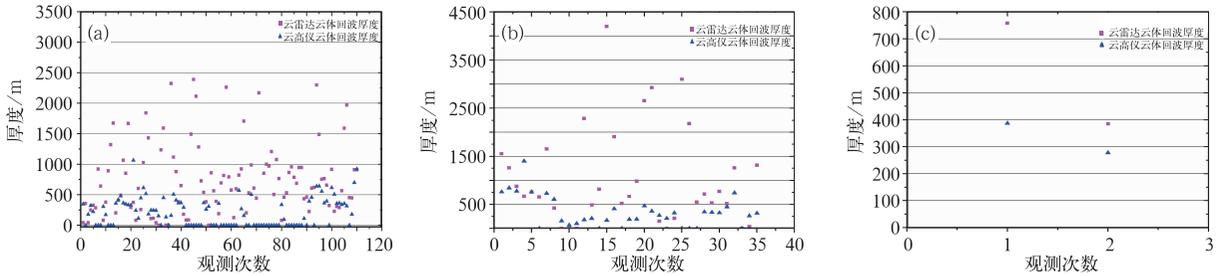


图3 云雷达和云高仪观测各层云的云回波厚度对比

(a)高云,(b)中云,(c)低云

Fig. 3 Comparison of cloud echo thicknesses of corresponding layers measured by cloud radar and ceilometer

(a) high-level cloud, (b) mid-level cloud, (c) low-level cloud

## 4 数据获取率对比

对5月1日至6月8日39 d两个仪器的观测数据进行统计,本文主要针对两台仪器对云的捕获能力进行对比研究,所以去掉云雷达和云高仪都没有观测到数据的观测结果,只统计观测结果(1)、(2)、(3)。统计后的结果:云雷达有云时间135.8 h,云高仪有云时间90.2 h,云雷达比云高仪多45.6 h,其中共同观测到有云时间50.2 h,云雷达观测到而云高仪没有观测到85.6 h,云高仪观测到而云雷达没有观测到40 h。本文为了方便两种仪器数据获取性能的对比,定义数据获取率为:其中一种仪器观测到有云时间比两种仪器总共观测到有云的时间,则云雷达总数据获取率为79%,云高仪总数据获取率为53%,总数据获取上云雷达要好于云高仪。本文进一步对不同高度与雾霾和下雨天气条件

下两种仪器的数据获取率进行对比分析,下面分别进行讨论。

### 4.1 不同云回波底高下云资料的获取率

对观测数据进行分类,把数据分为高云、中云、低云三类分别进行讨论。表3是观测期间云雷达和云高仪在不同云回波底高下的数据获取情况。可以看出:(1)在高云观测时,云雷达的数据获取率要好于云高仪,观测结果(2)观测到的时间比观测结果(3)多44.6 h,远大于观测结果(3),数据获取率云雷达比云高仪多38%,表明云高仪在观测高云时的数据获取率要明显低于云雷达,这种情况可能是因为高层云的云粒子比较稀薄,导致接收到的后向散射光强度很低,无法观测到高层云。(2)在中云观测时,云雷达与云高仪的数据获取率基本相当,云雷达略高于云高仪2%。(3)在低云情况下,云高仪的数据获取率要好于云雷达,其原因有待进一步探讨。

表3 云雷达与云高仪在不同云回波底高下的数据获取情况

Table 3 Data acquisition status of cloud radar and ceilometer in different cloud base echo heights

云层高度	云雷达观测到有云时间/h	云高仪观测到有云时间/h	观测结果(1)的条件下观测到有云时间/h	观测结果(2)的条件下观测到有云时间/h	观测结果(3)的条件下观测到有云时间/h	云雷达数据获取率/%	云高仪数据获取率/%
高云	95.4	50.7	28.6	66.7	22.1	81	43
中云	31.8	31.4	19.3	11.8	10.8	74	72
低云	1.5	3.8	1.3	0.2	2.5	38	95

### 4.2 不同天气条件下云资料的获取率

在观测到的云数据中按照不同天气条件进行分

类,对雾霾、非雾霾、降水天气两种仪器的数据获取率分别进行分析讨论。参照地面观测资料,总观测39 d期间中有10 d出现雾霾天气,其中6 d霾天、4

d 雾天。表 4 为观测期间云雷达和云高仪分别在雾霾、非雾霾天气下数据获取率对比。表中可以看出在雾霾天气中云雷达观测到有云时间比云高仪多 27.9 h,非雾霾天气中云雷达观测到有云时间比云高仪多 8.1 h。需要注意的是云高仪在雾霾天气中数据获取率仅有 33%,而在非雾霾天气时数据获取率为 64%,比雾霾天气高出 31%,说明在雾霾天气中云高仪的数据获取性能很低,远低于非雾霾天气。这是因为雾霾属于水汽和气溶胶颗粒,对激光云高仪发射的激光有很强的衰减作用,导致激光穿过很少或无法穿过近地雾霾层到达云层。而云雷达在雾霾天气和非雾霾天气中的数据获取率分别为 84%和 71%,相差相对较小,说明雾霾天气对于云雷达的数据获取性能影响较小。图 4a 和 4b 为 2013 年 5 月 18 日 04—06 时雾霾天气的观测结果,图 4a 为云雷达观测结果,在高度 1 km 处有一条很细雾霾层,云高仪观测结果如图 4b 所示,地面至高度 1.5

km 处可以看到有很强的反射带,激光无法穿过雾霾探测到天空中的云。综上所述,在雾霾天气中云雷达的数据获取能力要强于激光云高仪,即云雷达在雾霾天气中探测云高能力要强于激光云高仪。图 5 为 5 月 28 日 10—12 时一次降水的观测,图 5a 中强降水区集中在 10—11 时,最强处达到 28 dBz。在 3.9 km 高度附近可以看到明显的 0℃层亮带,云顶高度平均在 7.5 km 左右,最大值为 8.4 km。可以看到云雷达在降水天气中能观测到 0℃层亮带,并且能观测到云的垂直结构和内部强度变化,但无法区分云底和降水边界,在雨天探测云底高度能力上还有待进一步改进。图 5b 中云高仪只观测到一些无效的降水反射,可以看到降水对云高仪的影响,激光在雨中大幅度衰减,无法穿过降水探测到云底。所以对于探测降水的云层,云雷达相对于云高仪能探测到更多的云信息,云雷达能探测出 0℃层亮带和云顶高度以及云的内部细节。

表 4 云雷达与云高仪在雾霾天气和非雾霾天气中的数据获取情况

Table 4 Data acquisition status of cloud radar and ceilometer in hazy weather and non-hazy weather

天气分类	云雷达观测到有云时间/h	云高仪观测到有云时间/h	观测结果(1)观测到有云时间/h	观测结果(2)观测到有云时间/h	观测结果(3)观测到有云时间/h	云雷达数据获取率/%	云高仪数据获取率/%
雾霾天气	45.6	17.7	9.2	36.4	8.5	84	33
非雾霾天气	83.9	75.8	41.2	42.7	34.6	71	64

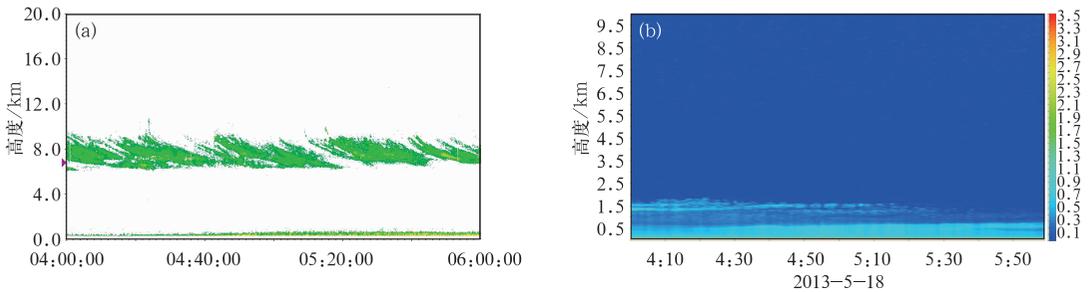


图 4 2013 年 5 月 18 日 04—06 时一次雾霾天气的观测结果 (a)云雷达,(b)云高仪

Fig. 4 Observation result of the hazy event from 04:00 to 06:00 BT 18 May 2013 (a)cloud radar, (b)ceilometer

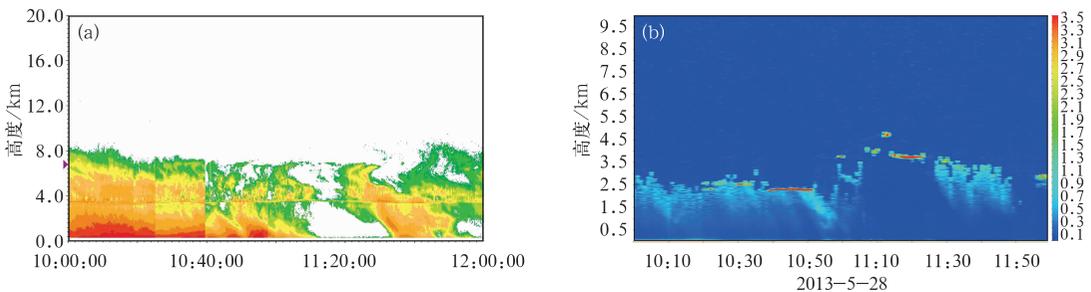


图 5 2013 年 5 月 28 日 10—12 时一次降水的观测结果 (a)云雷达,(b)云高仪

Fig. 5 Observation result of precipitation from 10:00 to 12:00 BT 28 May 2013 (a)cloud radar, (b)ceilometer

## 5 结 论

2013年5月1日至6月8日在中国气象局大气探测综合试验基地进行了Ka波段测云雷达和CYY-2型激光云高仪同步观测试验,本文对取得的观测数据进行对比分析,得到如下结论:

(1)在观测非降水云时,云雷达和云高仪观测中高云、中云、低云各层云回波底高的结果一致性较好,最大差值不超过300 m,相关系数达到0.8794,观测结果基本相同。

(2)云雷达在探测各高度层的云体厚度的性能方面要强于云高仪,观测各层云回波厚度的最大差值为1101 m。云雷达发射的毫米波可以很容易穿过云层,给出清晰的云回波底、云顶高度廓线,探测出云体的垂直结构和内部强度变化。激光云高仪探测云层厚度和内部结构的性能较弱,这是因为激光在云层里衰减非常快导致激光无法穿过整个云层。

(3)云雷达的数据获取率总体上高于激光云高仪云,雷达观测到有云时间比云高仪多出45.6 h,数据获取率高26%。在观测高云时,云雷达的数据获取率要明显高于激光云高仪,云雷达比云高仪多44.6 h,数据获取率高38%,这种情况可能是因为激光云高仪的激光对大气中的水汽和气溶胶比较敏感,激光从地面到高空衰减较大,并且高层云的云粒子比较稀薄,导致接收到的后向散射光强度很低,无法观测到高层云。

(4)云雷达在雾霾天气中探测云高的能力要强于激光云高仪,在雾霾天气中云雷达的数据获取率比云高仪高出51%,这可能是因为近地面雾霾层对激光的衰减很强,导致激光穿过很少或无法穿过雾霾到达云层。

(5)在探测降水云层方面,云雷达能探测出云体的整体结构,云顶高度,但是对降水和云底的区分不明显。激光云高仪在下雨天气中大部分情况无法正确探测出云底高度。对于两种仪器,在不同的降水情况下探测云能力还有待做更深一步的研究。

综上所述,云雷达和云高仪可以准确探测到云层的云底高度,并且云高仪对于中低层薄云的探测较为准确,但云高仪受到天气现象和大气气溶胶颗粒影响较大。云雷达在探测云层的垂直结构和内部粒子细节方面有着很强的优势,并且受到雾霾和下雨等天气现象的影响较小,但在探测薄云的能力方面还有待提高,今后通过专门的工程化过程,将大幅度降低成本,具有推广应用的价值。

## 参考文献

- 胡树贞,马舒庆,陶法,等.2012.地基双波段测云系统及其对比试验.应用气象学报,23(4):441-450.
- 胡树贞,马舒庆,陶法,等.2013.基于红外实时阈值的全天空云量观测.应用气象学报,24(2):179-188.
- 黄芳,陈洪滨,王振会.2003.37 GHz和94 GHz的大气微波衰减比较分析.遥感技术与应用,18(5):269-275.
- 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.量子电子学报,30(1):73-78.
- 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.大气科学,38(2):223-236.
- 彭亮.2011.ARM云雷达及其他相关仪器观测资料综合分析研究.中国科学院研究生院博士学位论文.
- 邵秀书,吕达仁,陈洪滨,等.2008.大气探测高技术及应用研究进展.大气科学,32(4):867-881.
- 盛裴轩,毛节泰,李建国.2003.大气物理学.北京:北京大学出版社,444-445.
- 孙晓光,刘宪勋,贺宏兵,等.2011.毫米波测云雷达融化层自动识别技术.气象,37(6):720-726.
- 陶法,马舒庆,秦勇,等.2013.基于双目成像云底高度测量方法.应用气象学报,24(3):323-331.
- 王德旺,刘黎平,仲凌志,等.2012.毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别.气象,38(6):712-721.
- 王帅辉,姚志刚,韩志刚,等.2012.CloudSat云底高度外推估计的可行性分析.气象,38(2):210-219.
- 吴举秀,魏鸣,周杰.2013.非球形冰晶的毫米波 $k-Ze$ 关系研究.遥感学报,17(6):1377-1395.
- 吴举秀,魏鸣,周杰.2014.94 GHz云雷达回波及测云能力分析.气象学报,72(2):402-416.
- 徐兴奎.2012.中国区域总云量和低云量分布变化.气象,38(1):90-95.
- 向华,张峰,江静,等.2014.利用CFSR资料分析近30年全球云量分布及变化.气象,40(5):555-561.
- 杨俊,吕伟涛,马颖,等.2009.基于自适应阈值的地基云自动检测方法.应用气象学报,20(6):713-721.
- 张春光,张玉钧,韩道文,等.2007.测云技术研究进展.光散射学报,19(4):388-394.
- 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.大气科学,36(4):657-672.
- 仲凌志.2009.毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究.中国气象科学研究院博士学位论文.
- 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.地球科学进展,24(4):383-391.
- 中国气象局.2003.地面气象观测规范.北京:气象出版社,11-15.
- Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A. 1995. An evaluation of a 94-GHz radar for remote sensing of cloud properties. J Atmos Ocea Tech, (02):201-229.
- Dong X Q, Minnis P, Xi B K, et al. 2008. Comparison of Ceres-Modis stratus cloud properties with ground-based measurements at the doe arm Southern Great Plains site. J Geophys Res, 113: D03204.
- Liou K N, 郭彩丽, 周诗健译. 2004. 大气辐射导论. 北京: 气象出版社, 122-127.
- Rossow W B, Walker A W, Gardner L C. 1993. Comparison of ISCCP and other cloud amounts. J Climate, 2394-2418.