

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.

毫米波云雷达与探空测云数据对比分析^{* 1}

赵 静^{1,2} 曹晓钟³ 代桃高⁴ 王志成³ 陈冬冬³ 郑 丹¹

1 成都信息工程大学大气探测重点实验室,成都 610225

2 江苏省气象科学研究所,南京 210009

3 中国气象局气象探测中心,北京 100081

4 中国人民解放军信息工程大学导航与空天目标工程学院,郑州 450001

提 要:应用中国气象局大气探测综合试验基地 2015 年 8—12 月数据,对 Ka 波段毫米波云雷达与 L 波段探空云底高、云顶高及云垂直结构的探测进行对比分析,从分析结果可以看出,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。进一步分析一些云底、云顶高度差异较大的个例,得知与探空气球的漂移造成地域偏差和 L 波段探空相对湿度探测的误差相关。研究结果表明,Ka 波段毫米波云雷达不仅探测能力强,探测精度也较高,是地基云探测的一种有效手段。

关键词:毫米波云雷达,反射率因子,云底高,云顶高,探空资料

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.011

Comparative Analysis of Cloud Observed by Millimeter Wave Cloud Radar and Sounding

ZHAO Jing^{1,2} CAO Xiaozhong³ DAI Taogao⁴ WANG Zhicheng³ CHEN Dongdong³ ZHENG Dan¹

1 Key Laboratory of Atmospheric Detection, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

3 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

4 Department of Navigation and Aerospace Engineering, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001

Abstract: This paper employs the data from atmospheric sounding comprehensive test site in CMA (China Meteorological Administration) from August to December in 2015, and carries on the contrast analysis about cloud base height, cloud top height and cloud vertical structure to the Ka-band millimeter wave cloud radar and L-band sounding data. The analysis result indicates that the electromagnetic wave transmitted by the millimeter wave cloud radar can penetrate the thick clouds to detect cloud vertical structure, keeping a good consistency with the results of sounding. Further analysis of some large differences in individual cloud base and top height shows that the difference is correlated with the sounding balloon drifting caused regional deviation and the L-band sounding relative humidity detection error. The results finally show that the detection capability of Ka-band millimeter wave cloud radar is strong, and the detecting precision is higher, thus the radar is an effective means of the ground-based cloud detection.

Key words: millimeter wave cloud radar, reflectivity factor, cloud bottom height, cloud top height, sounding data

* 江苏省气象科学研究所北极圈基金(BJG201602)和国家自然科学基金重点项目(61531019)资助
2016 年 3 月 16 日收稿; 2016 年 8 月 4 日收修定稿
第一作者:赵静,主要从事大气探测技术研究. Email:931660828@qq.com
通信作者:曹晓钟,主要研究方向为大气探测技术和大气探测信息处理. Email:caoxzh@126.com

引 言

云能够对全球辐射收支、大气能量分配以及水循环变化过程产生重大影响,在气候调节中具有举足轻重的地位。同时,云也被认为是威胁航空安全最显著性因素之一(仲凌志等,2009)。因此,对云物理参数的准确探测显得尤其重要。

云的探测从云状、云量、云底高度、云的厚度和云的移动速度到云粒子物理、化学、光学和辐射特性等十分复杂,近年来对云特性的研究也越来越广泛(宗蓉,2014)。目前现有的云观测设备型号种类繁多,包括多种主被动遥感设备及探空气球,其测量方法多样,标准不统一,在获取云信息时会受到各种条件或因素的影响。其中激光云高仪能够获得高时空分辨率的云垂直结构和云底高度,是有效的探测工具,但其发射的激光容易因雾、霾、气溶胶粒子衰减,在低能见度下无法穿透近地面的雾-霾层,影响云探测数据的获取(黄兴友等,2013)。探空气球能够穿过云层获得整层高精度的大气廓线,可用于云垂直分布的探测,但一天只有两次,且由于成本等因素,探空站的分布也较少(杨湘婧等,2011)。毫米波云雷达采用波长为毫米级的微波信号,具有探测小粒子的优势和良好的穿透能力,其利用云粒子对电磁波的散射特性,通过分析雷达回波信号反映云的宏观和微观结构、云的特性及其云的垂直变化,揭示云的时空结构和演变特征(孙晓光等,2011;武静雅等,2016)。许多学者对不同云探测设备的性能进行了对比分析(李肖露等,2016;袁松等,2012;张艳品等,2015)。其中,章文星和吕达仁(2012)对2008年5—12月中美联合利用 ARM 移动观测设备(AMF)在安徽寿县进行大气辐射综合观测试验,对不同观测设备获取的数据进行分析,在观测中低层云高方面,地基热红外观测结果稳定,但较云雷达高。黄兴友等(2013)对4台激光云高仪、2部红外测云仪、1台全天空成像仪以及1部云雷达的观测数据进行对比分析,云雷达与激光云高仪观测的最低层云底高度数据一致性较差,但与红外测云仪观测结果匹配较好。李思腾等(2015)选取2013年5—6月中国气象局大气探测综合试验基地毫米波云雷达和激光云高仪的观测试验数据,对两者的观测数据进行对比分析,发现毫米波云雷达数据获取率比激光云高仪高,且两者测得的云底高度平均相差不超过300 m。

本文选取2015年8—12月中国气象局大气探测综合试验基地 Ka 波段毫米波云雷达与 L 波段探空观测数据,分析对比毫米波云雷达与探空观测的云底高、云顶高以及云层厚度等垂直结构信息,并对出现差异较大的个例作进一步分析,给出了对比分析结果,并对两种观测结果产生差异的原因进行了分析。

1 观测资料与方法

1.1 Ka 波段毫米波云雷达

Ka 波段(8.6 mm)全固态、全相参、脉冲压缩多普勒测云雷达,工作频率为35 GHz,峰值功率为4 W,采用2.4 m口径圆形抛物面天线,垂直顶空瞄准式工作方式。探测距离可达15 km,垂直空间分辨率为30 m,时间分辨率为1~60 s可调,最小探测粒子回波强度为-40 dBz。毫米波云雷达具有较高的时空分辨率,能够穿透云粒子获得清晰的云垂直结构,且能够连续观测大气中的云而获得重要的参数信息,包括云高、云厚、云层数等信息(仲凌志等,2011;刘黎平等,2009)。

1.2 L 波段探空系统

常规探空是由探空气球携带无线电探空仪,配以无线电经纬仪或测风雷达(刘红亚等,2005)。部署在中国气象局大气探测综合试验基地(北京南郊观象台)的 L 波段高空探测系统是由 GFE(L)1 型二次测风雷达和 GTS1 型数字探空仪组成,采用二次测风雷达测距体制。该系统由我国自行设计研发,能够连续自动测定高空气温、相对湿度、气压、风向和风速等气象要素(韩成鸣等,2015),其温度测量精度: -80~40℃ 范围内 $<0.2^{\circ}\text{C}$;湿度测量精度: -25℃ 以上为5%, -25℃ 以下为10%。涉及到的其他要素还包括采样时间、距离、经纬度偏差等。

其中, GTS1 型数字探空仪采样周期为1.2 s(也称为探空秒数据),每分钟的采样频率约为50次,按照每分钟400 m的上升速度, L 波段高空探测仪的空间垂直分辨率为8 m,具有分辨率高、数据精度高以及可靠性高的特点。

1.3 探空资料分析云垂直结构方法

探空气球在上升过程中,在入云和出云时刻,

GTS1 数字探空仪测得的相对湿度会发生明显变化,对此很多学者对入云和出云的判定方法进行了研究。Wang and Rossow(1995)提出用相对湿度的阈值以及云顶和云底相对湿度负和正的跳跃变化来判断云层(WR95法);Minnis et al(2005)利用探空资料,通过对不同的温度值设定不同的相对湿度阈值判断云层,以此判断云垂直结构(MN05法);周毓荃和欧建军(2010)采用 WR95 法,利用我国 L 波段探空秒数据,计算分析了探空观测的云垂直结构,并将分析结果同 Cloudsat 卫星多个实测云垂直结构进行个例对比分析,验证了相对湿度阈值判断云垂直结构方法的可行性,以及我国 L 波段探空资料的可用性。

本文采用相对湿度阈值法,用相对湿度作为云判断的阈值,对云垂直结构进行分析。主要考虑三个方面(周毓荃和欧建军,2010;蔡森等,2014):(1)不同温度下相对湿度的合理计算,当气温低于 0°C 时,按照冰面饱和水汽压计算相对湿度,即利用实际水汽压除以冰面的饱和水汽压得到新的相对湿度;(2)云层中相对湿度最大值要大于 87% ,最小值不小于 84% ;(3)相对湿度在云顶有负的跳变、在云底有正的跳变、且跳变值在阈值处要大于 3% 。

2 毫米波云雷达探测能力分析

根据蔡森等(2014)利用 BS(Basic Score)和 TS(Threat Score)评分方法,对不同温度、不同相对湿度阈值的分析,当温度在 0°C 以上,选择以 84% 的相

对湿度阈值作为本文分析 L 波段探空云阈值。以探空第一次测到有云时为云底高度,以最后一次探测到云时为云顶高度(唐英杰等,2015)。选择 2015 年 9 月 5 日和 10 月 14 日 07:00—08:00 两个时次的的数据,进行毫米波云雷达与 L 波段探空观测云垂直结构分析对比。

根据地面人工观测数据记录显示,9 月 5 日 08 时左右出现降雨,如图 1a 所示,毫米波云雷达探测出其上空的两层云,第一层云云厚 3289 m ,且云中反射率因子强度最大达到 -32 dBz ,可清晰地反映出降水现象。第二层云出现在 $4835\sim 6849\text{ m}$ 的高层云区,与图 1b 的 L 波段探空温湿廓线观测结果基本吻合。且在高度 4 km 以下,能见度范围低于 3 km ,探空探测到近地面相对湿度大于 90% ,出现较厚水汽层,即为降雨,其观测结果也与毫米波云雷达观测结果一致。

10 月 14 日,如图 2 所示,毫米波云雷达发射的电磁波穿过厚度为 4506 m 云层,探测出高度在 $2619\sim 7125\text{ m}$ 的单层云。分析同期 L 波段探空相对湿度廓线,可以看到所探测到的云层为 $3442\sim 7730\text{ m}$ 的单层云,其厚度为 4288 m ,与毫米波云雷达所测基本匹配。

从上述分析可以看出,毫米波云雷达在出现降水天气状况下,对云垂直结构的探测结果与 L 波段探空的观测结果基本吻合。对二层云或多层云,甚至厚度达到 4000 m 的云层,都能穿透,且比较准确地探测出云的垂直结构,反映出毫米波云雷达有较强的探测能力。

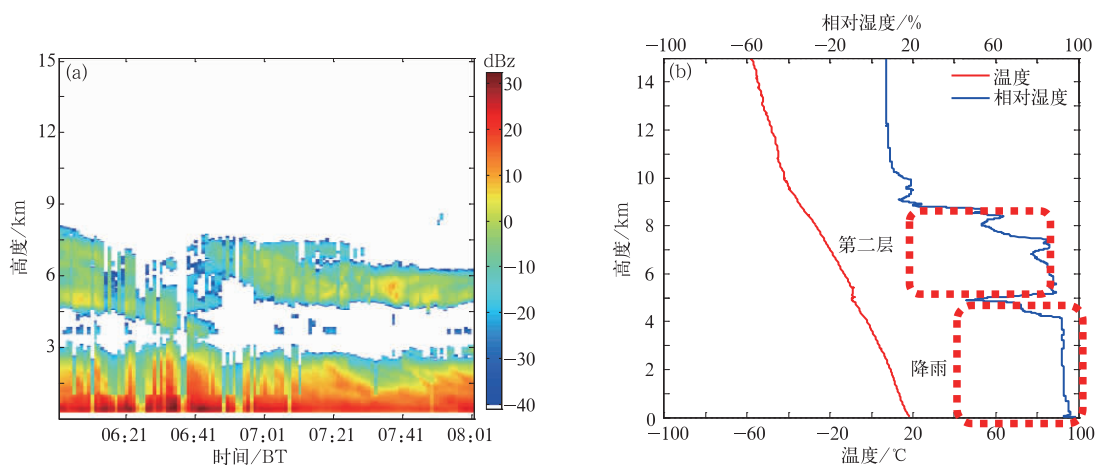


图1 2015年9月5日07:00—08:00毫米波云雷达与L波段探空测云实例对比
(a)毫米波云雷达反射率因子,(b)L波段探空温湿廓线

Fig. 1 Comparison of examples between cloud radar and sounding during
07:00—08:00 BT 5 September 2015

(a) cloud radar reflectivity factor, (b) temperature and humidity profile of sounding

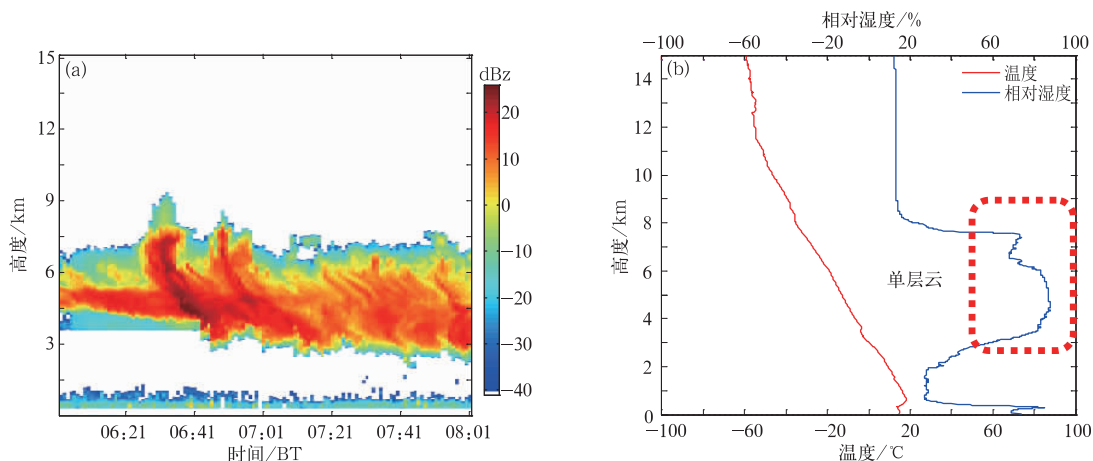


图 2 同图 1, 但为 2015 年 10 月 14 日

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for 14 October 2015

3 毫米波云雷达与探空测云实例定量分析

我国 L 波段探空资料, 时间分辨率为每日 2 次, 分别为 07:15 和 19:15, 本文选择该固定时刻作为毫米波云雷达和 L 波段探空的观测时间匹配, 选取 2015 年 8 月 1 日至 12 月 31 日的观测数据进行样本统计。经统计, L 波段探空测得有云样本为 177 个, 毫米波云雷达测得有云样本为 165 个, 两者共同测得有云样本为 133 个。其中, 在毫米波云雷达所测得 165 个样本中有 120 个样本云底接地的, 分析地面观测资料, 发现能见度在 10 km 以内, 且出现雾、霾的样本数共为 74 个, 占 61.66%(表 1)。

表 1 云雷达云底接地样本统计情况

Table 1 The sample statistics of cloud base grounding

能见度	湿度	天气现象	样本数	占比
[0, 10 km)	$\geq 80\%$	雾	46	38.33%
[0, 10 km)	$\leq 80\%$	霾	28	23.33%
[10 km, +∞)	—	其他	46	38.34%

由于近地面雾、霾天气的影响, 且目前该毫米波云雷达对近地面层观测数据的处理还不是很好, 在回波信号上出现干扰杂波, 不能有效地区分低能见度的雾、霾或者接地的云, 影响对云探测数据的分析, 因此本文在样本挑选时把毫米波云雷达近地面出现各种回波信号的数据剔除掉。同时, 对 L 波段探空选择放球后 3 min 的时刻作为观测时刻(即气球上升 180 s 后高度大约为 1.2 km 左右)。因此, 最终选定 45 个毫米波云雷达和 L 波段探空共同有

云样本进行统计分析。

如图 3 所示, 毫米波云雷达与 L 波段探空观测结果总体上基本一致。其中, 云雷达探测到的平均云底高为 3519 m, 平均云顶高为 5773 m; 探空测得平均云底高为 3548 m, 平均云顶高为 5871 m; 两者平均云底高相差 29 m, 平均云顶高相差 98 m, 匹配度较高。但同时也看到, 有些个例毫米波云雷达观测的云底(顶)高与探空相比有较大差异。分析原因可能是观测方式不同造成的。毫米波云雷达向固定的垂直天顶方向发射毫米波, 每 1 min 观测一次, 每一次观测对应的都是该地点和该时刻的瞬时云高信息变化情况; 而探空仪则由于气球始终处于上升运动, 入云与出云之间有一定时间差, 对于局地来说, 云的变化有时非常快。另外探空气球施放后, 探空气球不断垂直上升, 在水平方向上还会随风漂流, 所探测的云与毫米波云雷达所处地点上空的云可能不一定是同一个云。另外探空仪上搭载的温湿传感器对环境变化的响应时间存在滞后(张日伟等, 2012), 因此这几个方面可能是造成这种差异的原因。

4 毫米波云雷达与探空测云个例分析

因此在所选取的 45 个共同有云样本中, 分别挑选了云底、云顶高度差异较大的样本做进一步分析。主要分析这些样本, 在毫米波云雷达探测到云时, 探空气球有多大的水平漂移范围(详见表 2)。表 2 中列出了每个样本在毫米波云雷达所探测的云底和云顶高度时, 探空气球水平漂移的距离。由于 L 波段探空秒数据资料中提供了较为精确的定位信息, 本

文是通过探空经纬度偏差计算探空气球距测站的偏移水平位置(水平距离和垂直高度)。

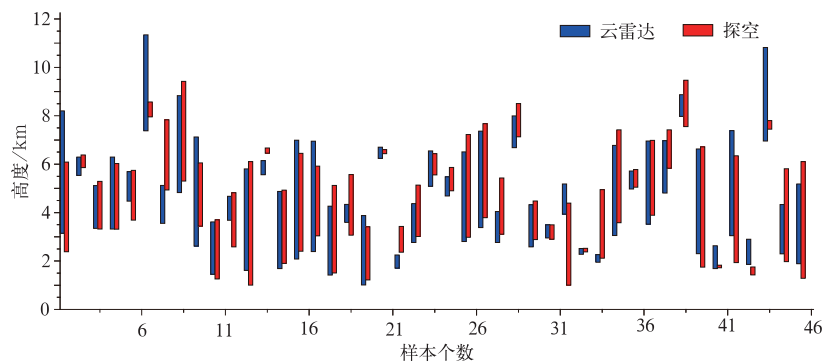


图 3 毫米波云雷达与 L 波段探空 45 个共同有云样本对比

Fig. 3 Comparison of 45 cloud samples of cloud radar and sounding

表 2 云底(顶)高度差异较大样本探空漂移情况

Table 2 Cloud base (top) height differences in sample sounding drift

样本号	垂直上升高度/m	水平漂移距离/m
样本 1	3150	5036.1
	8203	14772.2
样本 6	7382	10061.6
	11341	22967.1
样本 7	3557	3376.8
	5120	7839.1
样本 13	5568	10193.4
	6150	12517.0
样本 18	3599	6716.1
	4338	9197.9
样本 21	1710	3397.3
	2250	4410.5
样本 31	3939	8981.7
	5182	11647.9
样本 33	1951	956.2
	2266	1379.0
样本 42	1859	779.2
	2903	1908.0
样本 43	6958	9162.1
	10821	18309.4

从表 2 可以看出,造成两者云顶高度观测结果差异较大的样本有一个共同点,即它们的水平漂移距离相对较大,因此两者有可能探测到不同的云层,从而造成了较大的差异。对此,本文又从表 2 中挑选了 2 个具有代表性的个例做了以下的详细分析。

图 4 为两种观测的云底高度差异对比组图,图 4a 是 2015 年 12 月 27 日 18:00—20:00 云雷达观测到的回波强度(对应表 2 中的样本 31),云底高度在 3939 m,云厚约 1243 m,云内粒子最大回波强度为 15 dBz,最小值为 -32 dBz。图 4b 是该时段 L 波

段探空的温湿廓线图,根据相对湿度阈值法判断条件,在 1 km 左右探测到相对湿度超过 84% 的薄弱云层,可视为云底。在 4~6 km 的高空,相对湿度先有正的跳变,然后有负的跳变,可视为第二层云的云底和云高。图 4c 中探空气球在 1 km 左右高度时,水平偏移距离为 1428.5 m,在 4 km 左右高度时,水平偏差约 9 km。根据自动气象站数据显示,当天傍晚能见度为 14 km,相对湿度为 57%;根据人工观测云记录,观测到云底为 1500 m 的波状云;在可见光测云云图上也确实发现天顶存在波状云(图 5)。由此可见,虽然毫米波云雷达在 4 km 左右探测到的中高层云与 L 波段探空测得云底高度相吻合,但没有探测到 1 km 左右的近地面薄弱云层,由于此种个例较少,具体原因还有待进一步研究。探空虽然已漂移到距离测站水平距离 1428.5 m 处,但仍然探测到低层存在非常薄的云,与人工观测相应证。

图 6 为另一组毫米波云雷达与 L 波段探空的云观测对比组图,图 6a 为 2015 年 10 月 6 日 18:00—20:00 的云雷达回波强度(对应表 2 中的样本 6),毫米波云雷达探测到平均云底高度在 7382 m 左右的卷云,平均云顶高度为 11341 m,云内粒子最小回波强度为 -18 dBz。图 6b 为 L 波段探空温湿廓线,温度在 0 °C 以下采用冰面饱和水汽压计算云阈值,计算出云底为 7954 m,随着高度增加,相对湿度缓慢降低,没有明显的负跳变,在高度约为 8570 m,相对湿度跳变值达到 3%,可视其为云顶。图 6c 显示探空气球从 5 km 的高空开始水平偏移距离急剧增大,高度在 8 km 时,气压为 340 hPa,水平偏移距离约为 14 km。这表明毫米波云雷达与 L 波段探

空探测的云的位置差异较大,可能造成了两者对云顶高度探测的较大差异。陈哲(2010)对我国探空气球的水平漂移的总体特征做过分析,气压在200 hPa左右,北京地区水平漂移距离的标准差基本在10~25 km。另外,探空相对湿度的绝对误差为5%~

15%(8 km 以下范围),8 km 以上绝对误差随高度的增加而增大,最大可达到 25%~30%。该个例中,两者探测到的云底高度都已在 7 km 以上了,因此,L 波段探空湿度相对误差的精度降低也可能是造成两者偏差的另一个原因。

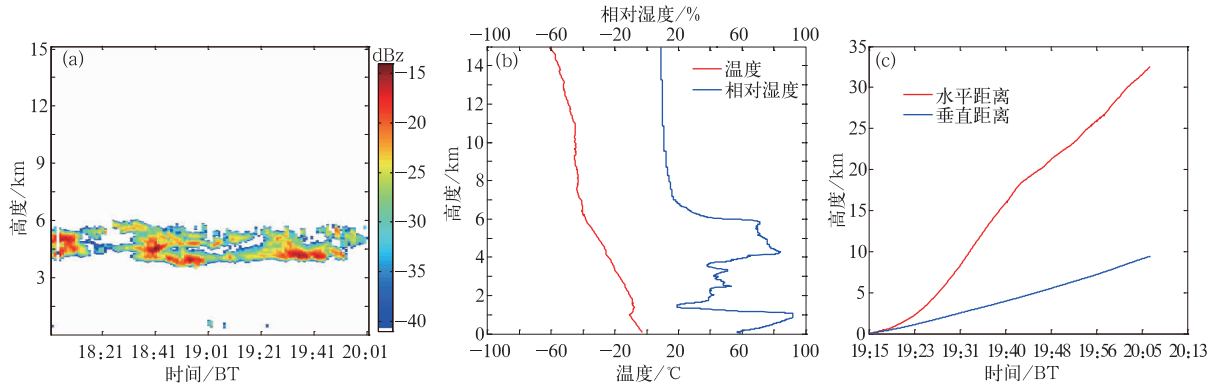


图 4 云底高度差异对比

(a)毫米波云雷达反射率因子,(b)L 波段探空温湿廓线,(c)探空气球距测站的偏移位置
Fig. 4 Contrast of cloud base height difference
(a)cloud radar reflectivity factor, (b)temperature and humidity profile of sounding,
(c)weather balloon offset from the station

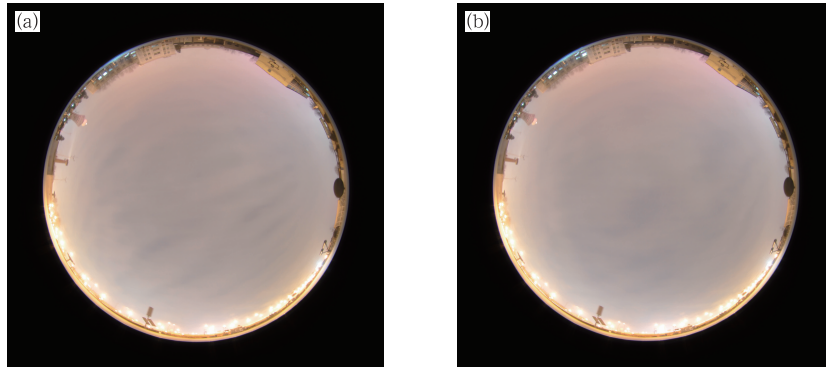


图 5 2015 年 12 月 27 日(a)19:00 与(b)19:20 可见光测云云图

Fig. 5 Visual cloud pictures at (a) 19:00 BT and (b) 19:20 BT 27 December 2015

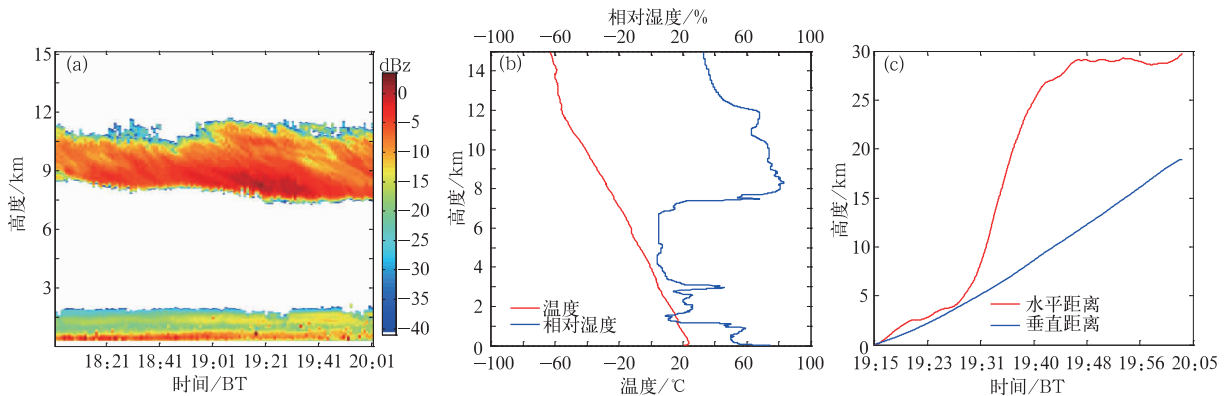


图 6 同图 4,但为云顶高度

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for cloud top

5 结论

本文对2015年8月1日至12月31日毫米波云雷达与L波段探空资料进行对比分析,得出以下结论:

(1)毫米波云雷达有较强的探测能力,尤其是能穿透厚度较大的降雨云层,对二层云甚至多层云,也能比较准确地探测出云垂直结构的变化。

(2)毫米波云雷达探测的云底(顶)高与L波段探空相比,平均偏差在200 m以内,两者的观测结果基本保持一致。

(3)造成毫米波云雷达与L波段探空对云观测结果差异较大的一个原因,是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。另外,L波段探空相对湿度探测的绝对误差随高度的增加而增大,也可能是造成两者对云观测结果出现差异的一个原因。

致谢:感谢中国气象局大气探测综合试验基地与北京南郊观象台提供的数据支持。

参考文献

- 蔡森,欧建军,周毓荃,等,2014. L波段探空判别云区方法的研究[J]. 大气科学,38(2):213-222.
- 陈哲,2010. 中国探空气球水平漂移总体特征分析[J]. 气象,36(2):22-27.
- 韩成鸣,李耀东,史小康,2015. 云分析预报方法研究进展[J]. 地球科学进展,30(4):505-516.
- 黄兴友,夏俊荣,卜令兵,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.
- 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.
- 李肖霞,王柏林,郭伟,等,2016. 激光云高仪试验数据对比分析[J].

气象,42(6):764-769.

- 刘红亚,薛纪善,沈桐立,等,2005. 探空气球漂移及其对数值预报影响的研究[J]. 应用气象学报,16(4):518-525.
- 刘黎平,仲凌志,江源,等,2009. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析[J]. 气象科技,37(5):567-571.
- 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[J]. 气象,37(6):720-726.
- 唐英杰,马舒庆,杨玲,等,2015. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比[J]. 应用气象学报,26(5):1-9.
- 武静雅,刘黎平,郑佳锋,2016. 固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析[J]. 气象,42(7):790-798.
- 杨湘婧,徐祥德,陈宏尧,等,2011. L波段高空分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型[J]. 气象,37(12):1504-1510.
- 袁松,程华,王东勇,等,2012. 模式再分析与实际探空资料的对比分析[J]. 气象科学,32(1):62-67.
- 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[J]. 大气科学,36(4):657-672.
- 张日伟,严卫,韩丁,等,2012. 基于Rs92探空资料的云垂直结构判定及其分布研究[J]. 遥感技术与应用,27(2):231-236.
- 张艳品,章文星,吕达仁,等,2015. 卫星(IASI探测仪)观测云顶高与地基云雷达观测的对比验证[J]. 大气科学,38(5):874-884.
- 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.
- 仲凌志,刘黎平,葛润生,等,2011. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究[J]. 气象学报,69(2):352-362.
- 周毓荃,欧建军,2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象,36(11):50-58.
- 宗蓉,2014. 毫米波雷达对云宏观特性的探测和研究[D]. 南京:南京信息工程大学:89.
- Minnis P, Yi Y H, Huang J P, et al, 2005. Relationships between radiosonde and RUC-2 meteorological conditions and cloud occurrence determined from ARM data[J]. Geophys Res, 110(D2): D23204.
- Wang J H, Rossow W B, 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations[J]. J Appl Meteor, 34: 2243-2258.