

毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析^{*1}

王 喆^{1,2,3} 王振会^{1,2} 曹晓钟⁴
WANG Zhe^{1,2,3} WANG Zhenhui^{1,2} CAO Xiaozhong⁴

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, 中国气象局气溶胶-云-降水重点实验室, 南京, 210044
2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044
3. 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081
4. 中国气象局气象探测中心, 北京, 100081

1. Collaborative Innovation Centre on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, CMA Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
3. CMA Training Centre, Beijing 100081, China
4. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China

2016-03-09 收稿, 2016-05-31 改回.

王喆, 王振会, 曹晓钟. 2016. 毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析. 气象学报, 74(5):815-826

Wang Zhe, Wang Zhenhui, Cao Xiaozhong. 2016. Consistency analysis for cloud vertical structure derived from millimeter cloud radar and radiosonde profiles. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(5):815-826

Abstract Millimeter cloud radar is one of the powerful instruments for cloud vertical structure observation. It can continuously monitor cloud changes and obtain complete information of cloud vertical structure including the cloud base height, cloud top height, and cloud thickness etc. Meanwhile, radiosonde observations can directly and accurately describe the vertical structure of atmospheric humidity due to its in situ measurement advantages. Observations of radiosonde can be further processed to generate cloud vertical structure information, which can then be used as a data source to validate the cloud vertical structure observed by millimeter cloud radar and assess the performance of millimeter cloud radar for cloud vertical structure observations. In this study, based on the millimeter cloud radar reflectivity data and sounding data collected at Beijing Observatory from 28 October 2014 to 17 February 2015, appropriate methods for calculations of cloud boundary height from the millimeter cloud radar and radiosonde observations are designed or selected, and their consistency is analyzed. The results show that the cloud vertical structures derived from cloud radar and radiosonde observations have a good consistency regarding to the cloud base height, cloud top height in low or middle level, and its vertical stratification. Due to the limitation of the detection capability of the millimeter cloud radar, it can not detect cloud tops above 10 km height. Thereby large differences are found in high-level cloud top height between millimeter cloud radar and radiosonde observations.

Key words Millimeter cloud radar, L-band radiosonde, Cloud vertical structure, Consistency analysis

摘 要 在众多种针对云垂直结构的探测中,毫米波雷达可获取云底、云顶、云厚等完整的云垂直结构信息,并可以连续监测云的垂直剖面变化,是有力的探测手段之一。而无线电探空因其直接的测量优势,能直观、确切地描述大气湿度垂直结构,可

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41275043,61531019)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介:王喆,主要从事云的遥感探测研究。E-mail:wzhe1124@126.com

通讯作者:王振会,主要从事大气探测与大气遥感研究。E-mail:eiap@nuist.edu.cn

将其进一步处理生成云垂直结构信息,并作为一种数据源用于与毫米波雷达云垂直结构探测结果进行比对,以评估毫米波雷达针对云宏观垂直结构的探测性能,为毫米波雷达更好地应用于云探测提供参考。通过获取位于北京南郊观象台的毫米波雷达 2014 年 10 月 28 日至 2015 年 2 月 17 日长达 113 天连续观测的反射率因子以及探空温、压、湿数据,设计或选取合适的方法对二者进行云边界的计算,并进行云高(包括云底高和云顶高)以及云层数的一致性比对分析。结果认为,除对于高层云的云顶高度毫米波雷达由于探测限制不能探测到 10 km 以上的云顶,某些时刻与探空产生较大差异外,在云底高度以及中低云的云顶高度上可以与探空观测取得很好的匹配效果,对于云的垂直分层上二者也有较强的一致性。该毫米波雷达具有较为准确并连续刻画 10 km 以下云垂直结构的能力。

关键词 毫米波测云雷达, L 波段无线电气球探空, 云垂直结构, 一致性分析

中图法分类号 P412.15

1 引言

云与大气的动力过程、热力过程、水汽循环、能量收支等密切相关,由于其时空分布变化的复杂性,迄今为止仍是大气科学研究中十分关键的不确定因素(Stephens, 2005)。云垂直结构分布的差异产生不同的辐射强迫效应(Naud, et al, 2013),从而显著地影响大气环流(Wang, et al, 1998),是气候变化的关键驱动因子之一。云体结构一定程度上决定了强对流风暴等天气系统的发展方向和强度,云的分布、形态、生消变化等是未来天气变化的重要表征,云也是目前公认的数值预报模式中重要的不确定因素之一(韩成鸣等, 2015)。研究不同云的宏观或微观结构特征及演变规律对科学实施人工影响天气尤为重要(周毓荃等, 2008)。云高等也是民航、空军等非常关注的气象要素之一(严卫等, 2012)。由于其在大气科学研究、气象业务中的重要地位及其观测的复杂性,如何准确、及时地获取云垂直结构的信息,对于气候分析研究、天气预报、人工影响天气以及国民经济和军事等诸多领域都十分重要。

云垂直结构包括云底高、云顶高、云厚度、云层数等相关信息。目前对云垂直结构的观测主要通过人工目测、卫星遥感、探空、地基遥感等方式进行。人工目测是最为古老的观测方式,结合云状等信息,通过人的经验,估测出云底高度的大致范围,若底层云是透明或半透明,还能对云层数信息做出粗略判断。目前随着自动气象观测技术的发展,人工目测基本被地面自动观测或卫星观测所取代。卫星利用其搭载的主动或被动遥感探测仪器自上而下对地进行大尺度、广覆盖的探测,静止气象卫星对某一固定地点观测具有较高的时间分辨率,然而由于其仪器性能、反演能力、下垫面特性等的限制和影响,对获

取低云和区域性云信息不太理想,基本只能获取云顶信息;一些主动遥感探测设备搭载在极轨气象卫星上,如美国的 Cloudsat 和 CALIPSO 分别搭载了云廓线雷达(CPR)和云-气溶胶激光雷达(CALIOP),利用雷达探测原理可以获取星下点附近完整的云垂直结构信息,但由于极轨卫星观测方式的局限性,不能够固定连续地观测某一固定地点的云信息,观测时间分辨率较低(Qian, et al, 2012)。

近年来,随着地基遥感观测自动化的深入推进,利用地基主、被动遥感垂直探测设备测云的技术不断发展。地基遥感垂直探测最主要的特点就是时间连续性好,具备实时监测仪器布设地点大气状态及其演变过程,若大范围布网则可进行广域探测。其中测云设备包括激光云高仪、热红外成像仪、毫米波雷达等。激光云高仪基于激光雷达原理,通过激光回波信号云层点识别及激光测距判断云高,然而由于其发射波长短,受大气中气溶胶等非云粒子干扰较大,在雾、霾环境中探测能力减弱,并且激光在云层中衰减严重,云光学厚度较大时基本不能准确得出云顶高度信息。全天空热红外成像仪观测云高利用热红外辐射被动遥感原理反演云底亮温,进而计算得出云底高度(章文星等, 2012),但仍然不能获得云底以上的云垂直结构信息。

毫米波雷达与激光雷达类似,是一种主动遥感设备,主要以毫米波段电磁波作为发射源,向天空发射脉冲电磁波并接收云中液态水或冰晶粒子的后向散射回波,通过测距判断云的位置。毫米波雷达在气象探测中具有较强的探测云、雾、沙尘暴等小粒子的能力,可穿透云进而描述云内部的三维结构,获取云底、云顶、云厚等完整的云垂直结构信息,并可以连续监测云的垂直剖面变化。仲凌志等(2009)通过

梳理对比分析毫米波雷达的研究进展,认为毫米波雷达极大地改善了外场试验中云的探测结果,在云物理特征研究等方面具有积极意义。中国气象局气象探测中心已于2013年开始在北京南郊观象台布设毫米波雷达并进行测云的对比试验工作,用以评价毫米波雷达性能、测云的能力及其准确性等。随着中国毫米波雷达探测技术的不断改进,其测云业务能力逐渐显现,成本不断降低,具备大范围布网的业务和科研优势。

无线电气球探空因其对高空大气直接测量,一直是垂直大气信息的重要来源(Faccani, et al, 2009),是大气科学研究领域中最为基础的资料之一。应用探空资料对云高的计算有多种方法,如温度露点差法(Poore, et al, 1995)、相对湿度阈值法(Wang, et al, 1995)、二阶导数法(Chernykh, et al, 1996)等。虽然探空一般情况下一天只有两次,时间分辨率较低,但是它能直观、确切地描述大气湿度垂直结构并进一步处理生成云垂直结构信息,可作为一种数据源用于与毫米波雷达云垂直结构探测结果进行比对。

本研究通过获取位于北京南郊观象台的毫米波雷达2014年10月28日至2015年2月17日长达113天连续观测的反射率因子以及探空温、压、湿数据,计算二者云底和云顶高度,并进行一致性对比分析,以评估毫米波雷达针对云宏观垂直结构的观测

性能,为毫米波雷达更好地应用于云观测提供参考。

2 资料简介

使用布设在北京南郊观象台(39°48′22″N, 116°28′10″E,海拔32 m)的Ka波段固态多普勒测云雷达的观测数据。该雷达采用宽窄脉冲相结合的脉冲压缩技术解决距离分辨率、近距离盲区等问题。雷达垂直于天顶观测,垂直分辨率30 m,时间分辨率为1 min。毫米波雷达探测性能见表1。在113天的观测时段内,该雷达基本处于连续工作状态。L波段探空气球施放位置位于毫米波雷达西侧158 m处,每日两次放球,时间分别为07时15分和19时15分(北京时,下同)。探空仪采用国产GTS1型,能够连续测定大气温度、湿度、气压、风向和风速等气象要素,采样周期为1.2 s,按照400 m/min的气球上升速度推算,其探测空间垂直分辨率约为8 m,具有高分辨率和实时采集的能力(李伟等, 2009;周毓荃等,2010)。为进行毫米波雷达与探空比较,挑选毫米波雷达逐日07—08、19—20时两个时段的观测,113天应产生226个时段的观测,但由于雷达自身状态等原因,其中有22个时段无数据或数据不可用,因此得到可对比数据204组。本研究还获取了相应时段的可见光全天空成像仪(高太长等,2010)观测照片,用以获知当时的天气现象,为对比工作提供参考。

表1 Ka波段毫米波测云雷达性能
Table 1 Ka-band millimeter cloud radar parameters

性能名称	参数指标	性能名称	参数指标
工作频率	35 GHz±200 MHz	波束宽度	0.25°
波长	8.6 mm	天线扫描方式	垂直天顶瞄准
脉冲重复频率	10—20 kHz	探测精度	≤1 dBz
发射时宽	20 μs/0.2 μs	垂直分辨率	30 m
发射功率	≥50 W	时间分辨率	1—60 s可调
天线口径	2.4 m	发射机体制	全固态发射机

3 云高判定方法

3.1 毫米波雷达云高的判定

雷达接收云中液态水或冰晶遇到雷达波束产生的后向散射信号,通过测距直观地判定云的位置。理想情况下回波信号和云是对应的,而实际上由于

雷达自身工作状态稳定性、信号处理问题或者非观测目标物的干扰,会产生一定程度的杂波或非云回波,对云边界判定产生干扰(Ulaby, et al, 1981)。通过对本次试验观测数据进行观察分析与探空数据以及全天空成像仪所拍摄的当时天气状况进行初步对比,发现有两种形式的杂波:1 km以下的杂波

呈现出一定的时间连续性,但低空并没有云或降水,初步分析可能是由于毫米波雷达波长较短,对近地面灰尘、昆虫群、水汽等较为敏感(周唯一,2008),而1 km以上由于雷达工作状态不稳定有时会出现类似于图1a所呈现的“随机噪声”状态的杂波。基于以上几点考虑,对毫米波雷达云高判定算法做如下设计。

首先,进行滤波处理。为保证回波信号与云完

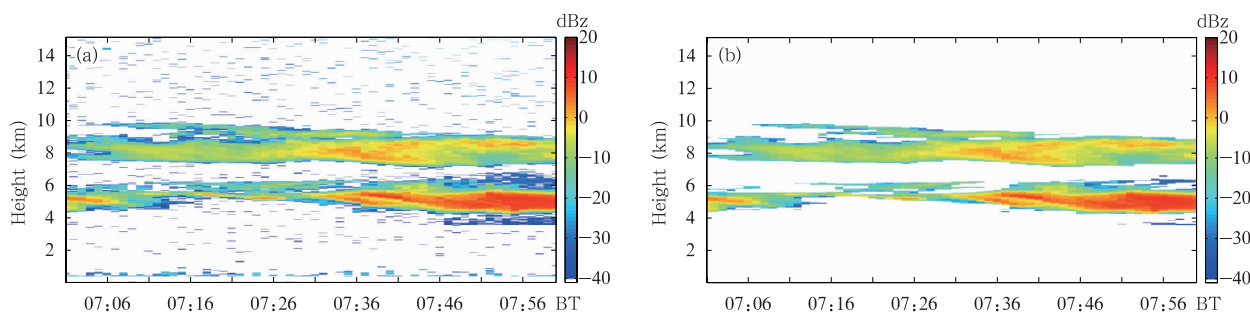


图1 滤波处理前(a)后(b)的对比

Fig. 1 Comparison before (a) and after (b) the filtering process

然后,根据反射率阈值查找云边界。Clothiaux等(1999)通过分析用于美国大气辐射测量计划(ARM)的35 GHz毫米波测云雷达(MMCR)对从卷云、薄层云一直到降水云的观测,认为云的雷达反射率因子动态范围为 $-50 \sim -20$ dBz,且对低于 -30 dBz弱回波的观测需要特殊的雷达观测技术,与雷达本身性能密切相关。此处所用毫米波雷达根据其自身观测性能,在反射率产品生成时将最低阈值设置成为 -40 dBz,低于 -40 dBz的距离库(雷达回波信号处理中沿射线方向按距离分成的小的距离单元)则被赋空值。从第一条时间序列线开始,自下而上判断每个距离库。如果从某个库开始有回波信号,将其作为云底位置,之后继续向上扫描直到遇到无效值,将此库作为该层云的云顶高度。依此类推判断是否有上一层云,直到最上面的距离库位置判断完成。然后对下一条时间序列线按照上述方法进行云高判断,直到最后一条时间序列线判断完毕。

由于毫米波雷达观测时间分辨率很高,对于一些结构相对松散的云来说(例如图1、图3d所示的回波图像),虽然直观地看出是双层云结构,但其中含有不少的“云空隙”,按照上述算法有可能将整层的松散云系分析成不同层的云,造成云垂直结构分层的时间不连续或跳变,对试验分析产生较大干扰,

好对应,利用 3×3 网格对基数据进行高斯滤波处理,以剔除呈现噪声状态的杂波,而1 km以下的连续性非云回波无法滤掉,将其全部剔除。至于剔除1 km以下回波是否会影响整体的一致性统计分析,通过分析226个时段的探空云高(探空云高判定算法后文描述),发现只有3个时段云底高度低于1 km,可以认为全部剔除1 km以下回波的操作基本不会对本次一致性对比分析造成太大影响。

因此需要对找到的云边界进行质量控制。利用上一步找到的云边界计算各云层的厚度和相邻云层的间隔距离,对于厚度小于7个距离库(即210 m)的云层,如果其与上下库的间隔大于24个库(即720 m),就删除这层云;否则将其与前后较邻近的云层合并。最终,得到毫米波雷达每一层的完整云边界。

3.2 L波段探空云高的判定

探空判定云高有多种方法,但本质都是利用湿度变化来区分云与大气。Poore等(1995)通过设定温度露点差的阈值并结合温度来判断云高(简称PWR95法)。Wang等(1995)对PWR95法进行改进,针对能由探空仪上的湿敏仪器直接导出的相对湿度进行阈值设定,直接利用相对湿度进行云边界判断(WR95法)。Chernykh等(1996)基于前述两种方法,并针对仅有标准气压层数据的探空,开发了二阶导数法(CE96法),先用温度和相对湿度的二阶导数判断云层的存在,再用温度露点差检验进一步判断云层。此外,Dimitrieva-Arrago等(1999)、Minnis等(2005)也针对不同的研究目的对上述某种方法进行了改进等(DS99法、MNS05法)。周毓荃等(2010)在利用探空数据分析云垂直结构时认为,由于相对湿度阈值法判断云层垂直结构的连续

性,以及其测量的直接性,认为用相对湿度值(WR95法)作为云判断的阈值比较合理。因WR95法的产生是基于较低垂直分辨率的探空,Zhang等(2010)在利用RS92型探空仪分析云垂直结构时,针对其2 s一次的高垂直分辨率探空数据,对WR95法进行了改进(ZHA10法):设定相对湿度阈值下限(min-RH),并将其由固定值变为随高度的变化值;取消云底和云顶相对湿度3%跳变的判定;保留了PWR95的最小云厚限制;取消了“单层云”云底和云顶高度赋值的处理方式(这是因垂直分辨率的提高,几乎不会出现“单层云”,即单独某一层相对湿度的跳变);为避免云水平缝隙的影响,设置“inter-RH”阈值(略低于min-RH),若相邻两湿层间距小于300 m或这两层之中的相对湿度均大于inter-RH,将两层合并。Costa-Surós等(2014)通过对PWR95、WR95、CE96、DS99、MNS05、ZHA10等6种方法进行对比,认为ZHA10具备一定优势,同时也对ZHA10进行了改进,将最小云厚阈值提高至400 m(ZHA10i法),改进后探空与其他观测的云高匹配度进一步得到提高。

文中采用ZHA10i法判定云高,具体步骤如下(Zhang, et al, 2010; Costa-Surós, et al, 2014): (1)采用Alduchov等(1996)的马格努斯形式饱和水汽压近似估计方程,将对应低于0℃层的相对湿度值转换为基于冰面的相对湿度(图2);(2)自下而

上进行判定,若相对湿度高于min-RH,将其视为湿层底高;(3)其上若相对湿度持续高于min-RH,视为同一层;(4)当相对湿度降到min-RH以下或超过廓线顶层时,将该层视为湿层顶高;(5)弃掉底高低于120 m且厚度小于400 m的湿层;(6)若湿层中最大相对湿度大于与湿层底高相对应的max-RH时,将其视为云层;(7)弃掉云顶高度低于280 m的云层;(8)若相邻两云层间距小于300 m或这两层之中的相对湿度均大于inter-RH,将两层合并;(9)弃掉厚度小于400 m的云层。

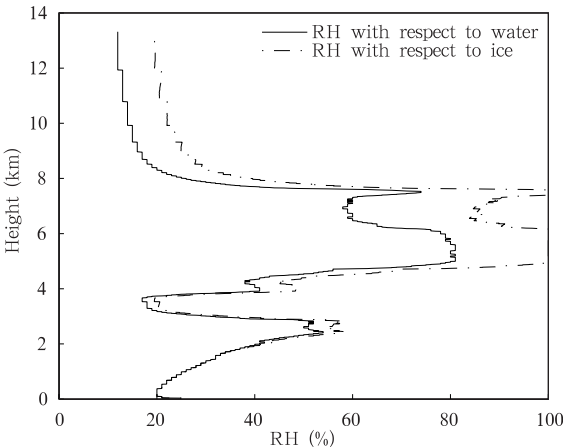


图2 探空相对湿度廓线(基于液面和冰面)
Fig. 2 Relative humidity profiles of radiosonde observations (with respect to water and ice surface respectively)

表2 与高度相关的相对湿度阈值(ZHA10i)

高度范围 (km)	相对湿度阈值(%)		
	min-RH	max-RH	inter-RH
0—2	92—90	95—93	84—82
2—6	90—88	93—90	80—78
6—12	88—75	90—80	78—70
>12	75	80	70

3.3 毫米波雷达与探空观测的时空匹配问题

毫米波雷达以0°天顶角垂直向上每分钟观测一次,每次观测都是对应该地点和该时刻的瞬时云高信息;而探空则由于气球的上升而具有时间过程,入云与出云时刻不同。对于局地来说,云的变化非常快,因此时间差异对二者云高观测一致性判定的影响是显著的。欧建军(2011)考虑到这种差异,将

探空的入云时刻与出云时刻分别对应毫米波雷达相应的观测时刻。实际上,探空气球受风的影响随着其不断上升也会显著偏离放球点经纬度位置,产生空间差异。这种复杂性是本试验进行二者时空匹配的难题。Costa-Surós等(2014)利用15 min间隔的GOES静止气象卫星图像判断气球漂移路径是否为同类型云系,将飘过不同类型云系的探空资料剔除,

但实际上这也是一种主观判断。此处进行一致性分析时,针对二者时空匹配的问题根据不同需要做两种考虑和假设:(1)考虑到风对气球和云的移动同时产生影响,假设二者的水平移动是一致的,这恰恰可以抵消时间差异的影响,因此可以选择某一固定时刻(如放球时刻07时15分与19时15分)作为二者的观测时刻匹配(记为“假设1”);(2)考虑到气球在对流层上升大约需要1 h(Zhang, et al, 2013),取毫米波雷达1 h的平均云高来尽可能抵消时空差异影响,即选择07—08、19—20时的云高平均(记为“假设2”)。

4 一致性分析

4.1 个例分析

按照云底高度和云层数的不同(低云、中云、高云,以及双层或多层云),选取代表性个例(图3a—e),直观地对比二者的云底、云顶、云层数是否一致。为方便对观测时刻进行表述,将上午放球时段称为“08时”、下午称为“20时”。

图3a观测时间为2015年1月14日08时。可见光全天空成像仪显示为阴云密布的天气,白天光

线较暗,云层较厚。从毫米波雷达回波图上可以看出云高较低,云层厚度在2—4 km,云底高度由06时30分的4 km左右逐渐降低,到07时50分降至1 km以下,而云顶高度发展一直较为稳定,维持在6 km左右。且在观测时刻(07时15分前后),毫米波雷达显示为上下两层云且下薄上厚(图中黑色虚线框所示)。对比探空云高,二者云高、云层数分布较为一致。图3b观测时间为2014年10月28日20时。毫米波雷达显示为层状云,云底高度4 km左右,云厚度小于2 km。可见光全天空成像仪图像也显示当时的天空被层状云覆盖,云层较薄有时透光,云的纹理较强。对比此次观测,探空与毫米波雷达一致性很好,但从毫米波雷达数据分析可看出,在10 km左右高度有极薄的卷云,探空数据并没有反映出来。图3c在由可见光全天空成像仪拍摄的图像上显示为透光的卷层云,云层很薄,毫米波雷达07时15分以后的观测结果与探空较为一致,但厚度比探空要薄。图3d是发展较为稳定的双层云,毫米波雷达与探空均分析出上、下两层云,且云高分布较为一致,但对下层云,探空比毫米波雷达探测到的要薄,而上层云云顶高度毫米波雷达比探空探测

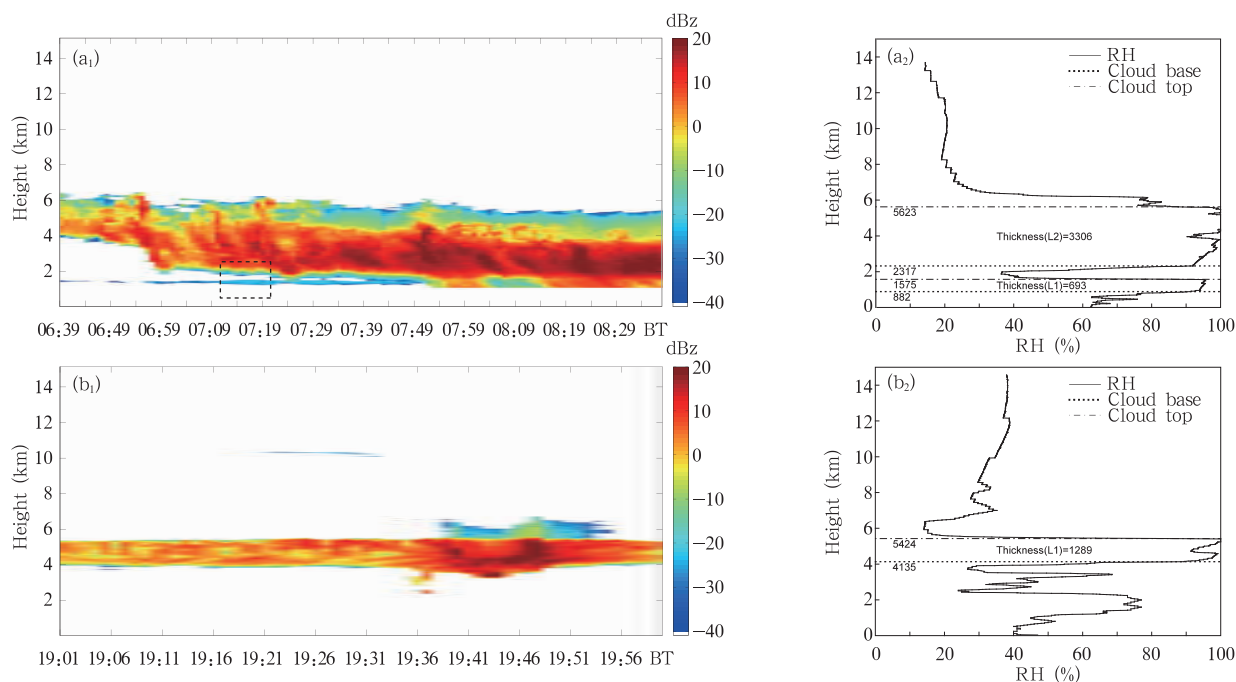
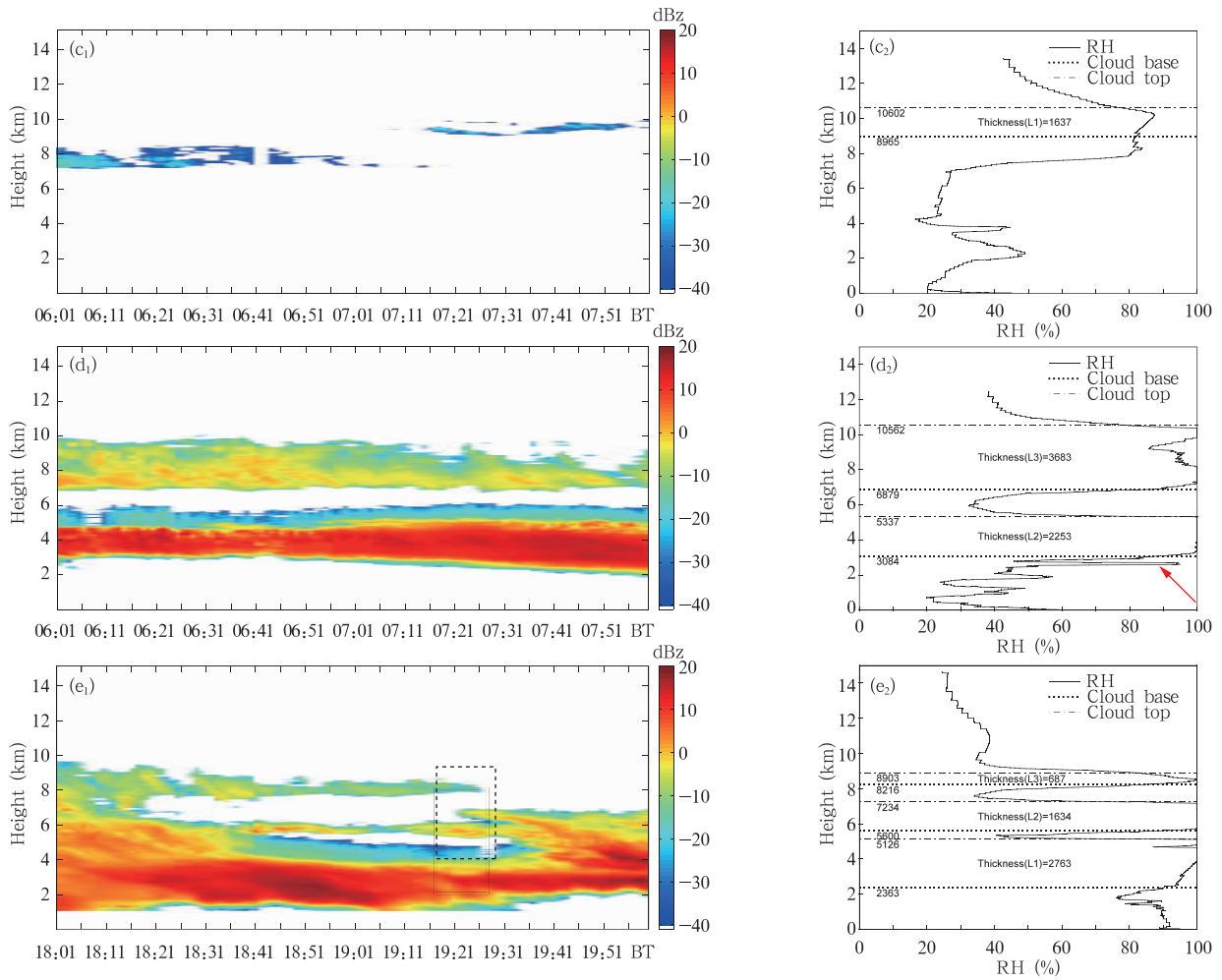


图3 毫米波雷达与探空得到的云垂直结构对比的5个例分析(a. 2015年1月14日08时, b. 2014年10月28日20时, c. 2015年1月7日08时, d. 2015年1月5日08时, e. 2014年11月29日20时)

Fig. 3 Comparisons of five cases of cloud vertical structure derived from radar and radiosonde observations at 08:00 BT 14 January 2015 (a), 20:00 BT 28 October 2014 (b), 08:00 BT 7 January 2015 (c), 08:00 BT 5 January 2015 (d) and 20:00 BT 29 November 2014 (e)



续图 3

Fig. 3 Continued

的要低。此外也可看出,按照 ZHA10 法会有 3 层云被分析出,而经过改进后的 ZHA10i 将最下层薄云剔除(箭头处),只保留上面两层,与毫米波雷达一致,反映改进后的探空云高分析方法更为合理。图 3e 显示毫米波雷达与天空都分析出 3 层云,云高分布一致,下层云毫米波雷达云底高度比探空要低。

4.2 统计分析

利用 204 个观测数据对毫米波雷达和探空进行云层数的一致性统计分析。对于“假设 1”方案在所匹配观测时刻得到的毫米波雷达观测数据中,无云 156 例,单层云 38 例,双层云 8 例,3 层及 3 层以上云 2 例;相应的探空数据,无云 131 例,单层云 51 例,双层云 19 例,3 层云 3 例。对每个观测时刻二者的云层数进行比对:若二者层数一致或都为无云,

记为“完全一致”;若二者都观测到云但层数不一致,记为“近似一致”;若一个有云一个无云,记为“不一致”。比对发现,204 个观测中有 158 个“完全一致”,占比 77.5%,13 个“近似一致”,占比 6.4%,33 个“不一致”,占比 16.2%。若将二者一致的无云观测去除,得到 77 个对比个例,其中“完全一致”31 个,“近似一致”13 个,“不一致”33 个,“完全一致”和“近似一致”共 44 个,在这 77 个个例中占比 57.1%。

针对云底高、云顶高和云厚度分别进行统计分析。对于多层云,取最下层云的底高和最上层云的顶高作为用于比对的云底高度和云顶高度。毫米波雷达云高的提取有两种方案:(1)按照“假设 1”,直接提取瞬时的“观测时刻”云高(标记为 height_i), (2)按照“假设 2”取 1 h 平均(标记为 height_m)。

要进行云高的一致性分析必须取二者都观测到云的时段(记为“有效时段”)。“假设1”的有效时段43个,“假设2”的有效时段56个。后者比前者的有效时段多,显然是因为“假设2”避免了毫米波雷达恰好在“假设1”情况下的观测时刻无云的情况。两种方案的平均云高和云厚见表3,可以看出二者平均云底高差异不大,而平均云顶高探空要比毫米波雷达高出1300—1500 m。

由于“假设2”的有效个例比“假设1”要多,代表

性更好,选择“假设2”的情况对二者的每次云高观测进行一致性比较。图4a可以看出,二者云底高度较为吻合,一致性很好,相关系数高达0.92;图4b云顶高度二者变化趋势也较为一致,相关系数达到0.82,但也显示出探空云顶高度普遍高于毫米波雷达云顶高度,特别是云顶高度高于10 km以上时尤为明显。通过图5的散点分析,云底高度大多数散点探空略高于毫米波雷达并基本沿着1:1线分布,一致性较好,少数点探空低于毫米波雷达且较为远

表3 平均云高与云厚度对比(单位:m)

Table 3 Comparison of average cloud height and cloud thickness (unit: m)

假设方案	毫米波云底高	探空云底高	毫米波云顶高	探空云顶高	毫米波云厚	探空云厚
height_i	3778	3734	6675	8143	2897	4409
height_m	4186	4011	6669	7988	2483	3977

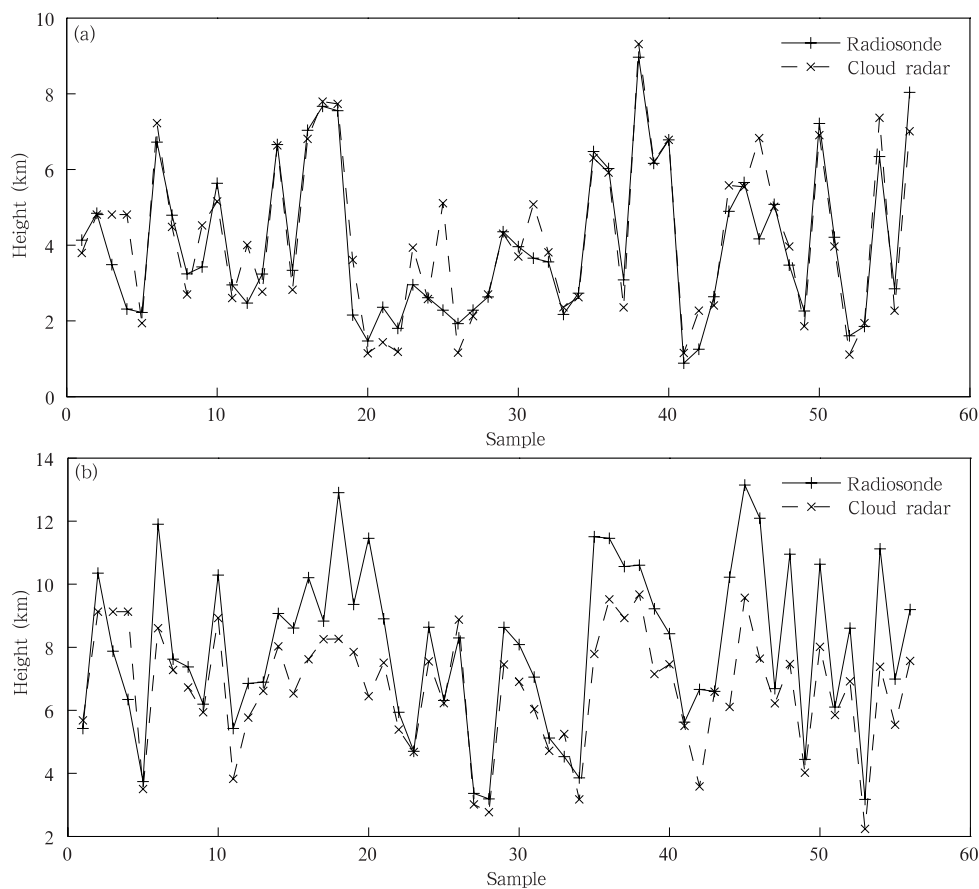


图4 云高比较曲线

(a. 云底高度, b. 云顶高度; 横坐标表示不同观测的时间顺序)

Fig. 4 Comparisons of cloud height observations by cloud radar and radiosonde

(a. the cloud base height, b. the cloud top height; the abscissa indicates the time sequence of different observations)

离 1 : 1 线。云顶高度散点大多分布在 1 : 1 线上方,反映了针对大多数云顶高度观测,毫米波雷达比探空要低且呈现出系统性的偏差。毫米波雷达与探空云高差值绝对值的平均与标准差等统计量见表 4。

表 4 云高一致性统计信息

Table 4 Statistics of cloud height consistency			
	相关系数	差值平均(m)	标准差(m)
云底高度	0.92	578	640
云顶高度	0.82	1518	1326

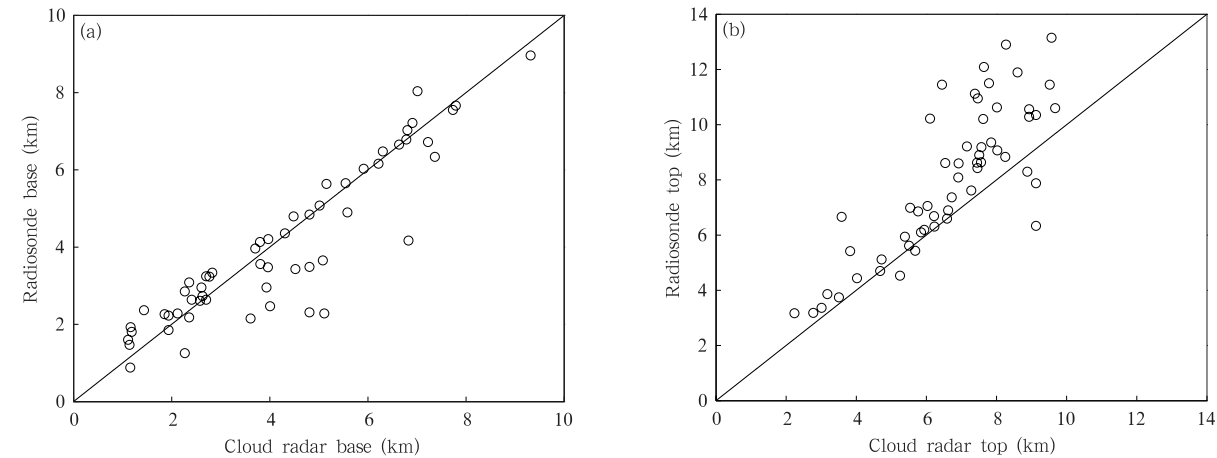


图 5 云高散点分布(a. 云底高度,b. 云顶高度)
Fig. 5 The scatter plot of cloud height observations
(a. the cloud base height, b. the cloud top height)

4.3 毫米波雷达和探空云顶高度差异的进一步分析

针对测云雷达对云顶高的判别比探空的要低这一现象,首先考虑是否由毫米波雷达云衰减造成。仲凌志(2009)得出,随着距离的增加,衰减订正值越来越大,强度越强,订正差值越大,但对于强度较弱的云区、尤其是 - 20 dBz 以下的云,订正前后相差很小,且订正前后云顶高度并没有明显变化、云的垂直结构并没有变化。本研究根据雷达本身探测性能将反射率因子判断云区的阈值设定为 - 40 dBz(反射率因子大于 - 40 dBz 均判断为云),这是相当“灵敏”的,远小于 - 20 dBz。毫米波雷达有雨时衰减影响更大(Hollars, et al, 2004),但文中所使用的 56 个有效时段个例都没有出现降水。故判断云衰减不是造成该现象的主要原因。为了寻求原因,经对 56 个有效时段个例进行逐一辨别分析,得出云高差异主要由探空湿延迟、时空匹配差异、毫米波雷达云高算法以及毫米波雷达探测能力的局限造成。以下选取两个代表性个例进行分析。

图 6 所示毫米波雷达明显区分出强回波区和弱回波区的两层云,但因二者紧贴,最终判定为同一层云,云层自 06 时 55 分至 07 时 40 分较为稳定,07

时 40 分之后上方弱回波云消失。探空分析出的下层云与雷达强回波区完好对应,而 07 时 40 分之前的弱回波区则分析无云,但在对应的弱回波区高度上方,探空分析出云厚为 544 m 的薄云,毫米波雷达在对应高度可以看出在 07 时 25—30 分有一小块弱回波,其他时段未观测到。该个例比较有代表性,从时空匹配的角度看,云的移动和演变过程恰好在观测时段(07—08 时)内出现了较大的变化,给二者的匹配造成了不确定性;从毫米波雷达探测能力上看,由于阈值设定为 - 40 dBz,探空所示的高层薄云极有可能使回波低于 - 40 dBz 从而无法显示,但因毫米波雷达的高时间分辨率探测,只要云回波稍微强一点即被捕捉到,二者一致性可以据此合理解释;从毫米波雷达云高算法来看,这样一小块回波由于未达到厚度阈值会被“质量控制”步骤滤掉,即使未被滤掉,因其出现时间短暂,在用“假设 2”进行 1 h 平均时云高也会被“平均掉”。综上分析,造成本个例二者云高差异是时空匹配、毫米波雷达探测能力、毫米波雷达云高算法以及试验分析假设不完善综合作用的结果。当然,亦不排除是由探空云判定算法过于灵敏造成(Costa-Surós, et al, 2014)。

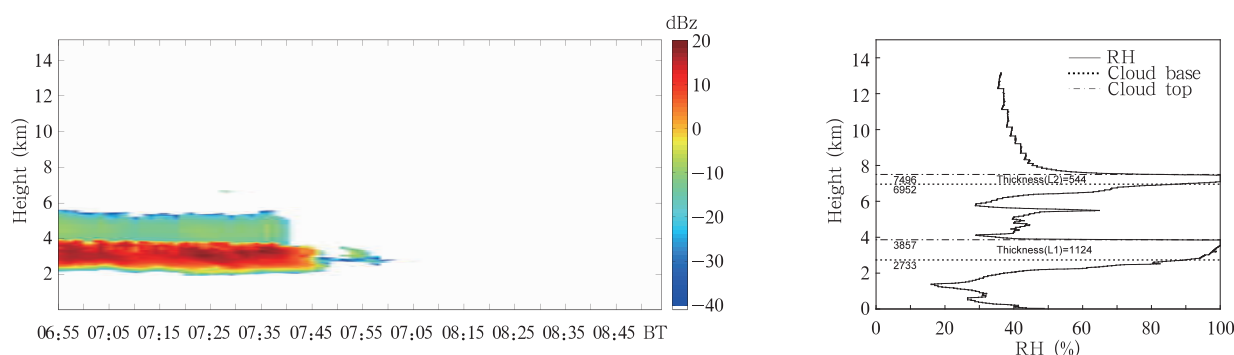


图6 2015年1月3日08时毫米波雷达与探空得到的云垂直结构对比

Fig. 6 Comparison of cloud vertical structure derived from radar and radiosonde observations at 08:00 BT 3 January 2015

图7所示该个例毫米波雷达云顶高度在07时15分为9750 m,这是56个个例中毫米波雷达云顶高度最高值。这符合该雷达的设计和制造规格——最高探测高度10 km。而探空计算出的云顶高度为13 km以上,在56个个例中探空云高高于10 km的多达16组。从图7、图3c中可以看到探空仅出云后湿度下降较慢,有两种可能:(1)实际湿度下降较

慢,云高差异则是毫米波雷达10 km探测能力限制造成;(2)传感器滞后效应,即在低温环境下(特别是 -30°C 以下)探空湿度传感器测量准确性大幅度下降,滞后性远大于常温(李峰等,2012)。这两种原因都会造成探空云高高于毫米波雷达观测云高的结果,产生系统性的偏差。

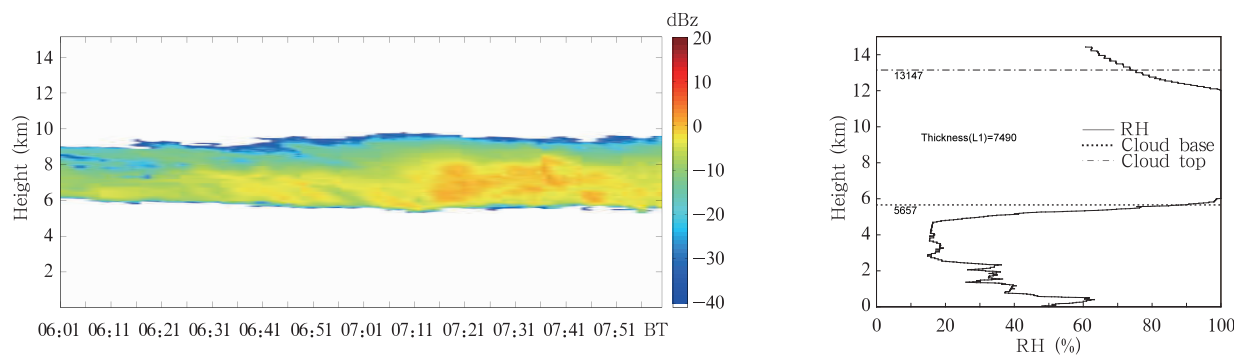


图7 2015年1月24日08时毫米波雷达与探空得到的云垂直结构对比

Fig. 7 Comparison of cloud vertical structure derived from radar and radiosonde observations at 08:00 BT 24 January 2015

5 结论与讨论

利用2014年10月28日至2015年2月17日北京南郊观象台Ka波段毫米波测云雷达以及L波段探空的204个时次的观测数据进行对比分析,设计或选取合适的方法对二者进行云边界的计算,并进行针对云高(包括云底高和云顶高)以及云层数的一致性对比分析,得出结论认为:除对于高层云的云顶高度该毫米波雷达由于观测限制不能探测到

10 km以上的云顶,某些时刻与探空产生较大差异外,在云底高度以及中低云的云顶高度上可以与探空观测取得很好的匹配效果,对于云的垂直分层上二者也有较好的一致性。该毫米波雷达具有较为准确并连续刻画10 km以下云垂直结构的能力。

本研究尝试以探空作为“真值”对毫米波雷达云垂直结构探测能力进行评判。实际上,由于探空仪器的湿延迟误差、气球上升过程中风产生的水平漂移影响所造成的时空匹配差异以及探空判定云高算

法本身,可能会对探空云垂直结构的准确性造成一定影响。毫米波雷达反射率数据经过高斯滤波处理可以滤除杂波,但不可避免地会对正常云回波产生一定影响,且质量控制环节的不完善也会产生云边界判定误差。此外,文中对低层连续回波的处理是直接将1 km以下回波抹除,对于本试验观测时段(秋冬季)来说影响不大,但对于夏季低云较多的情况,可能并不适合。本研究的毫米波雷达云高判定方法如何提升普适性亦需要进一步深入研究。

致 谢:感谢中国气象局气象探测中心提供观测数据支持。感谢深圳市气象局宗蓉博士对毫米波雷达云高算法提供技术支持。

参考文献

- 高太长,刘磊,赵世军等. 2010. 全天空测云技术现状及进展. 应用气象学报, 21(1): 101-109. Gao T C, Liu L, Zhao S J, et al. 2010. The actuality and progress of whole sky cloud sounding techniques. J Appl Meteor Sci, 21(1): 101-109 (in Chinese)
- 韩成鸣,李耀东,史小康. 2015. 云分析预报方法研究进展. 地球科学进展, 30(4): 505-516. Han C M, Li Y D, Shi X K. 2015. Overview of researches on cloud analysis and prediction methods. Adv Earth Sci, 30(4): 505-516 (in Chinese)
- 李峰,杨荣康,邢毅. 2012. 我国探空测湿传感器的温、湿特性试验与分析. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 4(6): 517-521. Li F, Yang R K, Xing Y. 2012. Temperature & humidity characteristics test and analysis of China-made radiosounding humidity sensor. J Nanjing Univ Inform Sci Technol (Nat Sci Ed), 4(6): 517-521 (in Chinese)
- 李伟,邢毅,马舒庆. 2009. 国产GTS1探空仪与VAISALA公司RS92探空仪对比分析. 气象, 35(10): 97-102. Li W, Xing Y, Ma S Q. 2009. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of Vaisala Company. Meteor Mon, 35(10): 97-102 (in Chinese)
- 欧建军. 2011. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Ou J J. 2011. The method of cloud vertical structure analysis using upper-air observation and its studying of application[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)
- 严卫,韩丁,赵现斌等. 2012. 基于毫米波雷达、无线电掩星和探空仪资料的云边界高度对比研究. 地球物理学报, 55(7): 2212-2226. Yan W, Han D, Zhao X B, et al. 2012. Comparative research of cloud boundary heights based on millimeter-wave radar, radio occultation and radiosonde data. Chin J Geophys, 55(7): 2212-2226 (in Chinese)
- 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. Zhang W X, Lü D R. 2012. Comparison of cloud base heights by ground based sky IR brightness temperature measurements with cloud radar and ceilometer in Shouxian. Chinese J Atmos Sci, 36(4): 657-672 (in Chinese)
- 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[D]. 北京:中国气象科学研究院,南京:南京信息工程大学. Zhong L Z. 2009. Calibration and capability analysis of China new generation of cloud radar-HMBQ and its preliminary application in retrieving cloud microphysics parameters[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (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. 地球科学进展, 24(4): 383-391. Zhong L Z, Liu L P, Ge R S. 2009. Characteristics about the millimeter-wave-length radar and its status and prospect in and abroad. Adv Earth Sci, 24(4): 383-391 (in Chinese)
- 周唯一. 2008. 毫米波雷达地杂波特性的分析与研究[D]. 南京:南京理工大学. Zhou W Y. 2008. Analysis and research of millimeter-wave radar ground clutter characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology (in Chinese)
- 周毓荃,赵殊慧. 2008. CloudSat卫星及其在天气和云观测分析中的应用. 南京气象学院学报, 31(5): 603-614. Zhou Y Q, Zhao S H. 2008. CloudSat satellite and its application in weather and cloud observation. J Nanjing Inst Meteor, 31(5): 603-614 (in Chinese)
- 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. 气象, 36(11): 50-58. Zhou Y Q, Ou J J. 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research. Meteor Mon, 36(11): 50-58 (in Chinese)
- Alduchov O A, Eskridge E E. 1996. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. J Appl Meteor, 35(4): 601-609
- Chernykh I V, Eskridge R E. 1996. Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings. J Appl Meteor, 35(8): 1362-1369
- Clothiaux E E, Moran K P, Martner B E, et al. 1999. The atmospheric radiation measurement program cloud radars: Operational modes. J Atmos Oceanic Technol, 16(7): 819-827
- Costa-Surós M, Calbó J, González J A, et al. 2014. Comparing the cloud vertical structure derived from several methods based on radiosonde profiles and ground-based remote sensing measurements. Atmos Meas Tech, 7(8): 2757-2773
- Dimitrieva-Arrago L R, Shatunova M V. 1999. The approximate method of the cloud boundaries definition and its vertical distribution restoration. Res Act Atmos Ocean Model, 28: 4.5-4.6
- Faccani C, Rabier F, Fourrié N, et al. 2009. The impacts of AMMA radiosonde data on the French global assimilation and forecast system. Wea Forecasting, 24(5): 1268-1286
- Hollars S, Fu Q, Comstock J, et al. 2004. Comparison of cloud-top height retrievals from ground-based 35 GHz MMCR and GMS-5

- satellite observations at ARM TWP Manus site. *Atmos Res*, 72 (1-4): 169-186
- 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 (D23): D23204
- Naud C M, Muller J P, Clothiaux E E. 2003. Comparison between active sensor and radiosonde cloud boundaries over the ARM Southern Great Plains Site. *J Geophys Res*, 108(D4): 4140
- Poore K, Wang J H, Rossow W B. 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations. *J Climate*, 8(3): 550-568
- Qian Y, Long C N, Wang H, et al. 2012. Evaluation of cloud fraction and its radiative effect simulated by IPCC AR4 global models against ARM surface observations. *Atmos Chem Phys*, 12 (4): 1785-1810
- Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review. *J Climate*, 18(2): 237-273
- Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. 1981. *Microwave Remote Sensing-Active and Passive-Volume I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Advanced Book Program/World Science Division
- Wang J H, Rossow W B. 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations. *J Appl Meteor*, 34(10): 2243-2258
- Wang J H, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM. *J Climate*, 11 (11): 3010-3029
- Zhang J Q, Chen H B, Li Z Q, et al. 2010. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar. *J Geophys Res*, 115(D7): D00K30
- Zhang J Q, Li Z Q, Chen H B, et al. 2013. Validation of a radiosonde-based cloud layer detection method against a ground-based remote sensing method at multiple ARM sites. *J Geophys Res*, 118(2): 846-858