

引 用 格 式:Hao Yitian,Chen Hongbin,Bi Yongheng,*et al.*Comparative Analysis of Cloud Boundary Observed by Millimeter Wave Cloud Radar and Radiosonde[J].Remote Sensing Technology and Application,2018,33(6):1063-1072.[郝倚天,陈洪滨,毕永恒,等.8 毫米云雷达与探空观测确定云底和云顶高度的对比分析[J].遥感技术与应用,2018,33(6):1063-1072.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2018.6.1063

8 毫米云雷达与探空观测确定云底和 云顶高度的对比分析

郝倚天^{1,2},陈洪滨^{2,3,4},毕永恒²,段 树²,李 军²,
张金强^{2,3,4},宣越建²,赵 宇²

(1.成都信息工程大学 电子工程学院,四川 成都 610225;
2.中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测重点实验室,北京 100029;
3.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,江苏 南京 210044;
4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:利用地基 Ka 波段云雷达和无线电探空仪数据进行云边界识别和对比分析研究。结果表明,8 毫米波云雷达探测的云底高度比无线电探空仪观测偏低约 300 m,大多数情况下二者识别的云底高度接近;而判定的云顶高度偏差较大。雷达与探空云底高度判别偏差较大时,在云下常存在大气“干层”,此时雷达探测更为灵敏;探空仪水平漂移及其湿度传感器的探测误差随高度增加是造成两者偏差的主要原因。通过计算和对比雷达反射率的时空变化率,给出了云雷达确定云底和云顶高度的一个可信度判据。

关 键 词:云雷达;探空仪;云高度;识别算法;可信度
中图分类号:TN959.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2018)06-1063-10

1 引 言

根据国际卫星云气候学计划(ISCCP)的卫星观测资料以及地面观测资料显示,全球形态各异、尺度不一的云覆盖着 60% 以上的天空^[1-2]。云的宏微观时空特征及其天气与气候效应研究一直是气象和大气科学关注的重点和热点^[3]。云主要通过反射太阳辐射、吸收地球红外辐射来影响地气系统辐射收支,因此单层或多层云垂直分布引起的辐射加热/冷却对大气动力学、热力学和水循环等有重要影响^[4]。近年来,云—气溶胶—辐射相互作用、云参数遥感反演以及云辐射特性参数化等研究工作不断深入。

目前,云宏观和微观参数的探测主要手段有机载仪器、微波辐射计、微波雷达、卫星主被动遥感反演、云高仪和无线电探空等。毫米波雷达较降雨雷达对云粒子更为敏感,空间分辨率高,且穿透能力强于红外和可见光探测仪器,适于非降水云的探测研究。无线电探空是气象观测的重要手段之一,可获取地面至~30 km 高空范围内温度、湿度、气压、风向和风速的垂直分布特征^[5]。云层一般对应着大气高相对湿度,因此相对湿度探空廓线可用于云层的检测^[6]。

近年来,国内外学者陆续利用上述技术手段开展了云的观测和分析研究。利用美国能源部大气辐

收稿日期:2017-12-02;修订日期:2018-09-07
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0603504)资助。
作者简介:郝倚天(1993—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要从事气象探测技术研究。E-mail:haoyitian@qq.com。
通讯作者:陈洪滨(1960—),男,江苏镇江人,研究员,主要从事微波主被动遥感、大气辐射传输、卫星气象学和平流层遥感与探测方面的研究。E-mail:chb@mail.iap.ac.cn。

射测量计划 (ARM) 南部大平原 (SGP) 站点 14 年 (1997~2010) 毫米波云雷达 (MMCR)、微脉冲激光雷达 (MPL) 和维萨拉云高仪观测资料, Kennedy 等^[7] 分析了当地的云量 (CF), 认为使用 MMCR 和 MMCR+MPL 的方式在确定总云量的方面误差很小。Clothiaux 等^[8] 使用 ARM 计划俄克拉荷马州 CART 站点相同仪器确定云高和雷达反射率, 发现使用 MMCR 和 MPL 联合观测数据的云高的误差大约 5.9%, 仅使用 MMCR 的数据将使误差增加到 22%~34%。同时他们注意到 MMCR 在较低高度的数据经常被非气象目标 (例如昆虫) 的回波干扰。通过分析 2012 年广东、河北、吉林等地的 456 云雷达观测个例, 王德旺等^[9] 统计了云雷达探测到的融化层亮带宏观参量, 提出了识别零度层亮带和厚度的算法。李思腾等^[10] 对比分析了 2013 年 5 月 1 日至 6 月 8 日期间 35 GHz 毫米波云雷达和激光云高仪数据, 结果表明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。

也有学者利用无线电探空仪获得了云底和云顶高度垂直结构信息。Zhang 等^[11] 利用 ARM 移动观测设备地基云雷达 (MMCR) 和 Vaisala RS92 无线电探空仪的资料分析了寿县上空云分布特征, 低、中、高和深对流云的出现比例分别为 20.1%, 19.3%, 59.5% 和 1.1%; 各类云的平均云底高度、云顶高度和云厚度分别为 5 912 m、7 639 m 和 1 727 m。唐英杰等^[12] 利用 2014 年 11 月 20 日至 12 月 31 日中国气象局大气探测综合试验基地 L 波段高空探测系统的观测资料获得了云底和云顶高垂直结构信息, 并与毫米波云雷达和激光云高仪的观测结果对比, 得出结论毫米波云雷达与探空观测云底、云顶高度的相关系数分别为 0.93 和 0.78; 云雷达观测的云底高度均略低于激光云高仪和探空, 云雷达观测的云顶高度略高于探空观测。王喆等^[13] 利用北京南郊气象台 2014 年 10 月 28 日至 2015 年 2 月 17 日毫米波雷达和探空数据, 设计方法对二者进行云边界的计算, 并进行云高及云层数的一致性比对分析, 结果认为云雷达探测的云底高度以及中低云的云顶高度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。

为了研究高原不同类型云对地表太阳短波辐射的影响, 2013 年 7 月 17 日至 8 月 10 日, 中国科学院大气物理研究所 (以下简称“大气所”) 在内蒙古自

治区锡林郭勒盟太仆寺旗宝昌镇郊区 (41.829°N, 115.256°E, 海拔高度 1 443 m) 开展了综合外场观测试验, 使用了 Ka 波段毫米波云雷达和无线电探空仪。本文首先对比分析了两种仪器判别的云底和云顶高度垂直结构信息; 然后, 深入讨论了两者的差异较大个例的原因; 最后, 结合云雷达和探空廓线资料的时空变化率, 提出云雷达判别云底高的可信度判据。

2 仪器资料和方法

2.1 毫米波云雷达

试验采用南京恩瑞特公司生产的多普勒毫米波测云雷达, 工作在 Ka 波段 (35 GHz), 峰值功率为 28 kW, 圆形抛物面天线, 大部分时间采用垂直天顶观测模式。探测距离可达 15 km, 空间垂直分辨率 30 m, 时间分辨率 1~60 s 可调, 最小探测回波强度为 -55 dBZ。毫米波云雷达具有较高的时空分辨率, 能够穿透非降水云层获得清晰的云垂直结构, 且能够连续观测云高、云厚和云层数等信息^[14]。雷达主要技术指标及参数如表 1 所示。

表 1 毫米波云雷达技术指标
Table 1 Technical specifications of the millimeter wave cloud radar

参数名称	参数值
工作频率/GHz	35.075
峰值功率/kW	28
脉宽/ μ s	0.2
天线直径/m	1.5
天线增益/dB	>50
波束宽度/ $^{\circ}$	0.4
最大探测距离/km	40
距离分辨率/m	30
时间分辨率/s	0.3
发射机型式	磁控管脉冲发射机
基本产品	Z、V、W、LDR

内蒙太仆寺旗试验一共持续 25 天 (2013 年 7 月 17 日至 8 月 10 日), 除 7 月 22、23 日缺测外, 共获得 23 d 云雷达观测资料。雷达大部分时间对天顶连续观测, 部分时间进行距离—高度显示 (RHI) 的垂直剖面扫描观测。雷达测云总时长 345 h, 其中低云 (回波底高小于 2 km) 时长 3.5 h, 占比 1.0%; 中云 (回波底高 4~6 km) 时长 38.5 h, 占比 11.2%; 高云 (云底 6 km 以上) 时长 72.8 h, 占比 21.1%; 降水云 (回波及地) 时长 32.5 h, 占比 9.4%; 无云及其他情况 197.45 h, 占比 57.3%。

2.2 无线电探空仪

试验中采用航天科工集团第 23 研究所研制生产的 GPS 数字探空仪(简称长峰探空仪),能够同时接收多个探空信号的地面多通道接收机由大气物理研究所与该所合作研制。该探空系统连续测定地面至平流层中层的气温、相对湿度、气压、风向和风速^[15]。其良好的性能在 2010 年广东阳江的无线电探空国际对比试验中得到验证,主要技术参数如表 2 所示。

表 2 长峰探空仪技术指标		
Table 2 Technical specification of the Changfeng radiosonde		
温度	测量范围	-90~60℃
	不确定度	0.5℃
风	测量范围	0~150m/s(风速)0~360°(风向);0.2m/s(风速)
	不确定度	2°(风向)
湿度	测量范围	0~100% RH
	不确定度	5%RH(高度小于 8 km)
工作频率/MHz		400.15~406(连续可调)
测量周期/s		1

探空仪测量的采样和数据发送频率是 1 Hz,探空气球升速 4~6 m/s,垂直分辨率约为 5 m。无线电探空资料时段为 7 月 22 日到 8 月 3 日,其中 7 月 26、27、28、30 和 31 日每天施放 6 次,其余日期每天施放 3 次,共获取 53 条探空廓线,其中穿云探空观测 11 次。需要说明的是,原始数据中云雷达回波高度是回波距地面的高度,而探空数据的高度是海拔高度,本文分析云底和云顶高时都换算为距测站地面的高度。

此外,本研究还使用了 7 月 23 日至 8 月 3 日的可见光全天空成像仪资料和人工观测记录,帮助确认云型和云量。

2.3 方法

2.3.1 云雷达识别云边界算法

如果 8 毫米波云雷达在地面之上没有晴空回波干扰,则可以将云雷达探测到的最低回波出现高度判别为云的下边界。

由于近地面雾、霾天气的影响(夏季内蒙试验未出现雾或霾天气),或者由于地物的影响,也可能与雷达回波信号在近地面层的处理算法不完善有关,雷达回波会出现干扰杂波^[16]。目前我们对这部分回波认识还不够,将之简单地归为地物杂波不合适。当前普遍的做法是舍弃底层若干个距离库。当雷达发射水平或垂直偏振波而同时接收正交偏

振波时,可以获取退偏振比(LDR)信息^[17],有退偏比产品时,利用退偏比阈值可以区分气象回波和非气象回波。

利用退偏比区分非气象回波结果如图 1 所示。在原始反射率图中(图 1(a)),可以看到底层存在非气象回波,在退偏比图中(图 1(b))这部分近地回波与云雨等气象回波的退偏比有很大的差异,通过选定合适的阈值(本文里选-8 dB)即可将这部分回波剔除,剔除结果如图 1(c)所示。

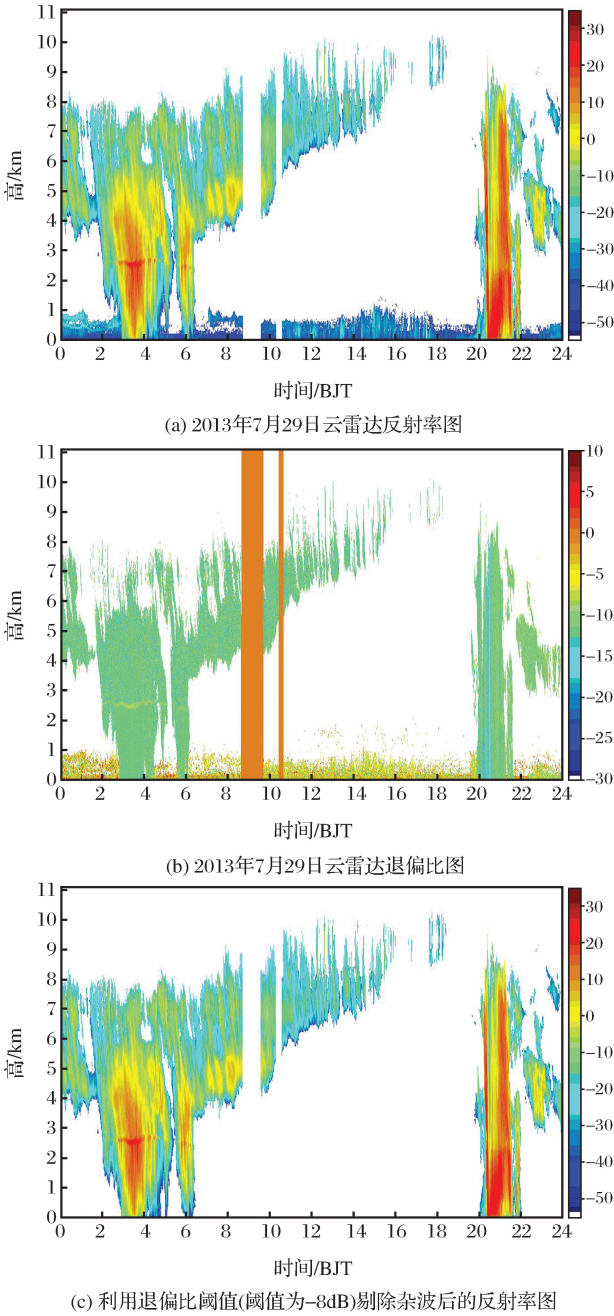


图 1 利用退偏比区分近地面非气象回波
Fig.1 Distinguishing near-surface non-meteorological echoes with LDR

本文参考宗蓉^[18]提出的利用反射率和谱宽阈值确定云边界的方法,具体如下,从最低的距离库开始逐库向上判断,如果某个库及其上面连续 5 个库均有回波信号,并且反射率值和谱宽值都大于选定的阈值,则认为该库所在高度为云底高度;同样,云顶高度之下的某个库及其下面连续 5 个库均没有回波信号,则认为该库所在高度为云顶高;之后进行云边界合并和删除,对于厚度小于 210 m(7 个距离库)的云层,如果它与上下库的距离大于 300 m(10 个库),则删除该云层;否则,该云层与就近云层合并。云边界识别结果如图 2 所示,蓝色点表示云底边界,红色点表示云顶边界。可以看到,利用这种算法识别的结果是直观有效的。

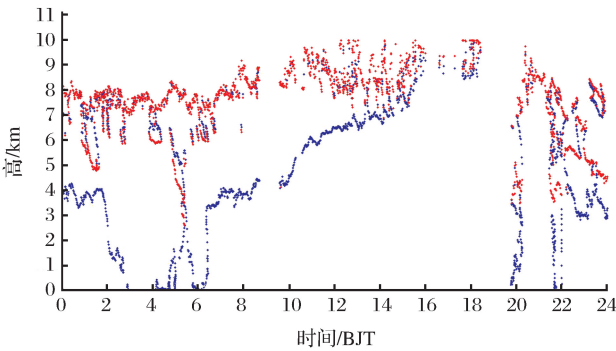


图 2 云边界识别结果
(蓝色表示云底高,红色表示云顶高)
Fig.2 Cloud boundary detection by radar

2.3.2 无线电探空仪识别云边界算法

利用探空数据判断云边界主要有 3 种方法:温度露点差阈值法^[19]、温度和相对湿度随高度二阶导数法^[20]、相对湿度阈值法。其中方法 3 由 Wang 等^[21-22]在 1995 年提出,按下述步骤判定云层的位置:①当某层的相对湿度 $\geq 84\%$,且该层的下一层与该层之间存在相对湿度 $>3\%$ 的增加,则该层位置被判定为湿度层的底部;②湿度层底部位置以上的相对湿度 $\geq 84\%$ 的各个高度层视为同一湿度层;③当某层的相对湿度 $\leq 84\%$,且该层与该层的上一层之间存在相对湿度 $>3\%$ 的减小,则该层位置被判定为湿度层的顶部;④若该湿度层内最大的相对湿度 $> 87\%$,则该湿度层被判定为云层;⑤云层的最小云底高度设定为地面高度 500 m,该高度的设定是基于地面人工观测的统计结果;⑥云底高度和云顶高度都为同一高度的单高度层的云层,云底位置设定为该层与下面观测层的中间位置,云顶位置设定为该层与上面观测层的中间位置。本文采用 WR95 法判断云边界,气温小于 0℃时的相对湿度按照冰面

饱和水汽压计算^[23]。
另外处理探空数据时选择释放气球 1 min 以后,即上升约 300 m 以后的数据。这是因为在刚释放气球时,它的测量还不稳定。
2013 年 7 月 29 日 08:36 探空资料的湿度廓线如图 3 所示,利用选定的相对湿度阈值可以确定云底高和云顶高。

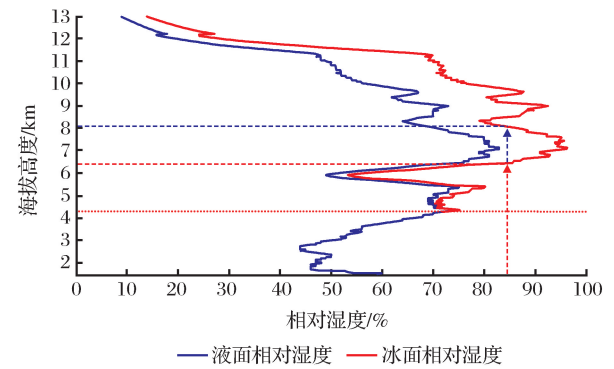


图 3 2013 年 7 月 29 日 08:36 探空资料相对湿度廓线
(蓝色为液面相对湿度,红色为冰面相对湿度,
红三角处为识别到的云底,蓝三角处为云顶)

Fig.3 Relative humidity profile of radiosonde on
29th July 2013

3 个例分析

试验期间的 11 次探空穿云个例,同时配有云雷达、可见光全天空成像仪和人工观测数据。识别结果如表 3 所示。

表 3 11 次个例识别结果
Table 3 Detection results of 11 cases

次数	日期	北京时	探空资料反演的 云底/云顶高/m	云雷达识别的 云底/云顶高/m
1	7.26	09:00	10 130/10 320	9 570/10 440
2	7.29	08:36	6 439/8 040	5 880/9 290
3	7.29	09:01	6 545/7 813	5 820/8 450
4	7.30	17:26	5 215/5 440	5 190/1 1940
5	7.30	16:54	9 004/1 1080	8 550/1 1320
6	7.30	20:28	7 104/1 1530	7 200/1 1460
7	7.31	11:59	9 915/11 020	9 300/10 950
8	7.31	16:00	4 600/4 691	5 940/11 940
9	8.1	08:53	5 775/8 309	5 220/8 370
10	8.1	12:00	7 913/9 627	7 950/9 330
11	8.2	08:59	7 151/8 202	6 390/8 760

由图 4 可见,云雷达和探空资料探测的 11 个云底高个例吻合较好,其相关系数为 0.945。探空资料探测云底高度要比云雷达平均偏高 ~ 300 m。而云

顶高度 11 次个例总的相关系数是 0.046,除了 2 次个例(个例 4 和个例 8)差异巨大外(相差 5 000 m 以上),其余 9 次中有 4 次个例(个例 1、6、7 和 9)基本吻合(相差 100 m 以内),5 次个例有差异但差异不大(个例 2、3、5、10、11,最大的个例 2 相差 1 250 m,其余的~300 m,总体上探空识别的云顶比云雷达的要高,这与云底的识别情况相同);剔除个例 4 和 8 后,相关系数为 0.956。查看这两次个例的相对湿

度廓线(如图 5 所示),可见个例 4 中在大约 11 km 处有一个湿层,与云雷达识别到的云层高度相符。但这个湿层的相对湿度没有达到判断阈值,再考虑到探空仪湿度传感器在 8 km 以上的不可靠性,利用相对湿度廓线识别 8 km 以上的云时应将阈值相应减小。个例 8 的相对湿度廓线在 6 km 以上的形状不符合经验,判断仪器故障。11 次样本的云底和云顶对比结果散点图如图 4(a)、(b)所示。

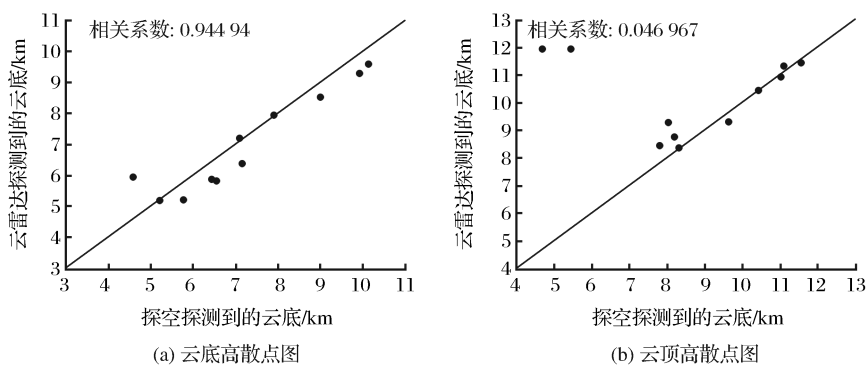


图 4 11 次样本云雷达与探空识别结果的对比

Fig.4 Comparison of radar and radiosonde detection results of 11 cases

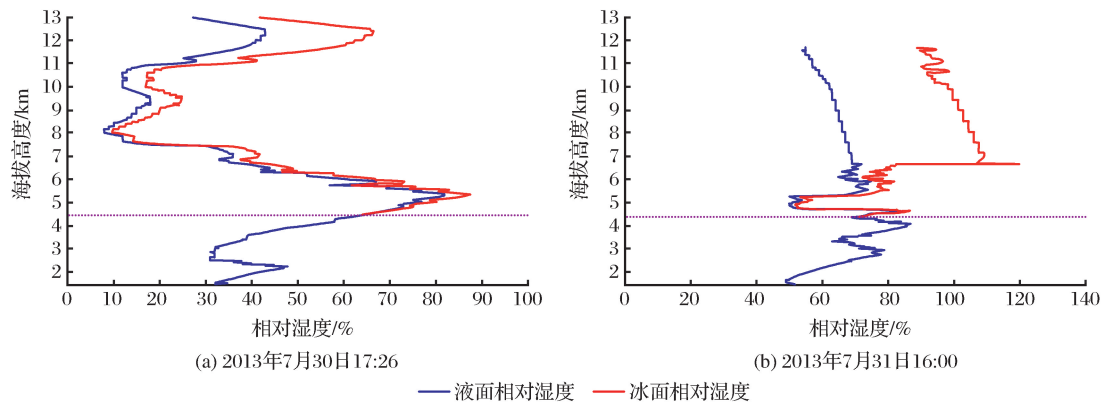


图 5 个例 4 和个例 8 的相对湿度廓线

Fig.5 Relative humidity profiles of the case 4 and case 8

4 误差分析

4.1 云下的“干层”

在以上的 11 次个例中,除了个例 4 和 7 外,从探空资料的相对湿度廓线上看,识别到云底的高度之下 500 m 左右会有一个相对湿度较上下都要低的“干层”,而在云雷达的资料上则反应不出这样的特征,图 6 为个例 2 的探空(图 6(a))和云雷达探测结果(图 6(b)),探空反演云底高度,相对湿度阈值取 84%,高度是 6 439 m;对应时间的云雷达反射率高度是 4 440 m,加上海拔 1 440 m,云底高度 5 880 m。

由于这个干层的存在,这部分空气的相对湿度并未达到探空资料反演云底的阈值,但其上部的云滴依然在重力作用下自然下落,雷达依然可以探测到落到“干层”的云滴,并将其识别为云底,故导致云雷达识别云底高度结果偏低。上述原因导致云雷达识别云底高度结果偏低。在云底没有“干层”存在的第 4 次个例,二者反演的云底高几乎相同,相差仅 25 m。图 7 为个例 4 的探空(图 7(a))和云雷达探测结果(图 7(b)),探空反演云底高度,相对湿度阈值取 84%,高度是 5 215 m;对应时间的云雷达反射率高度是 3 750 m,加上海拔 1 440 m,云底高度 5 190 m。

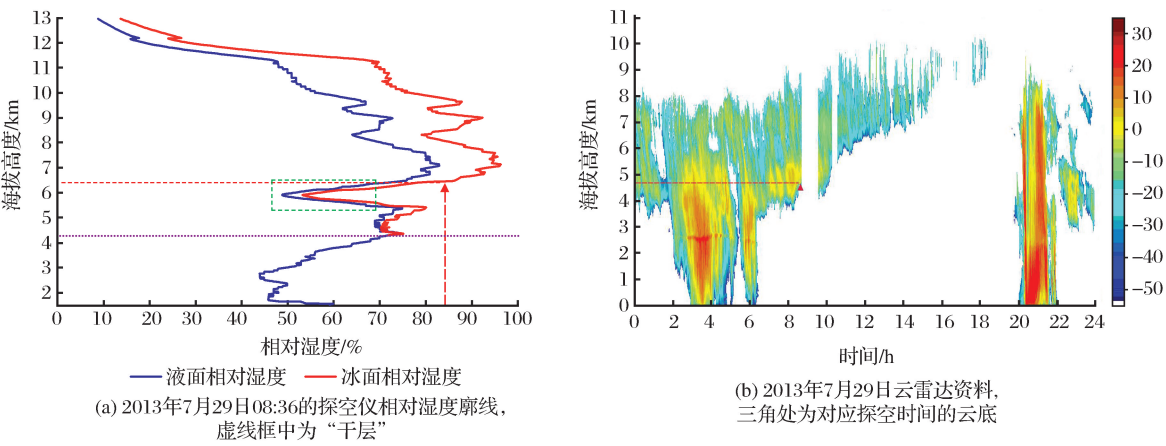


图 6 2013 年 7 月 29 日 08:36 的探空仪相对湿度廓线和云雷达资料

Fig.6 Relative humidity profile at 08:36 on 29th July 2013 and MMCR data on 29th July 2013

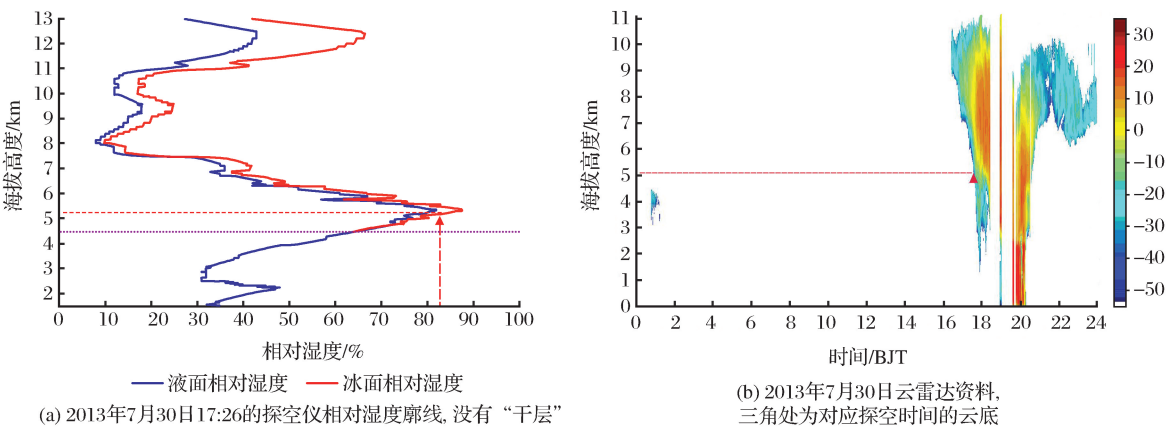


图 7 2013 年 7 月 30 日 17:26 的探空仪相对湿度廓线和云雷达资料

Fig.7 Relative humidity profile at 17:26 on 30th July 2013 and MMCR data on 30th July 2013

这种“干层”的形成原因是在这个高度层上,有干燥的空气输送过来。第 2 次个例水平风向廓线和风速如图 8 所示。“干层”出现在海拔高度 6 000 m 附近,水平风向是西北,风速 10 m/s 左右。西北方向干空气平流导致高层出现“干层”。

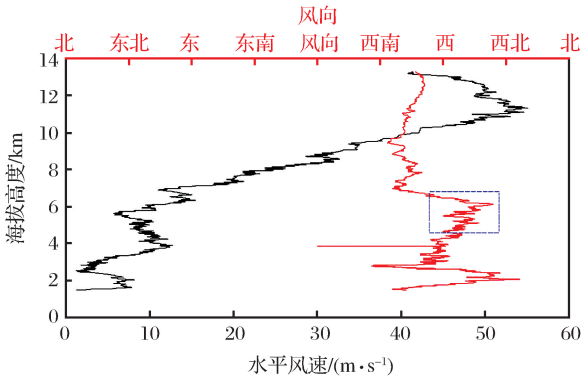


图 8 2013 年 7 月 29 日 08:36 的探空仪水平风向廓线和风速廓线

Fig.8 Horizontal windspeed and direction profiles at 08:36 on 29th July 2013

4.2 探空仪漂移

对于探空气球而言,在试验区域附近到达气压 200 hPa 时,水平漂移距离的标准差是在 25 ~ 30 km^[24]。表 4 给出 11 次个例的水平漂移距离统计结果,其中个例 2 的气球上升轨迹如图 9 所示,可以看出本次个例中最大水平漂移达到 50.8 km。

云雷达和探空反演云底结果较为吻合三次个例(4、6 和 10),探空仪在云底高度处的水平漂移分别为 4.29 km、10.38 km 和 15.52 km。其他几次存在较大高度差的个例中,在云底高度上的水平漂移最大为 20.06 km(个例 7)。在云顶的高度上,除了个例 8 是 6.39 km 以外,其余都在 10 km 以上,最大者为个例 10 达 28.38 km。探空气球漂移会在一定程度上造成探空仪和云雷达探测目标不一致,进而影响了两者的 consistency。但是个别有偏差的个例在云底高度处的水平漂移并不是很大,说明水平漂移并不一定能够引起云底高度偏差,特别是对水平尺度较大且比较均匀的层云。

除水平漂移外,探空仪搭载的湿度传感器在 8 km 以下湿度的绝对误差为 5%~15%,8 km 以上绝对误差随高度上升而增大,最大可达 25%~30%^[16]。在第 1、5 和 7 次个例中,识别到的云底高都在 8 km 以上,且 11 次个例识别到的云顶高都在 8 km 以上,因此传感器本身误差的增加也是造成偏差的原因。

表 4 11 次个例的水平漂移距离

Table 4 The horizontal drift distance results of 11 cases

次数	云底高度上的 水平位移/km	云顶高度上的 水平位移/km	最大水平位 移距离/km
1	12.12	12.13	24.43
2	8.79	11.98	58.82
3	8.81	13.03	48.32
4	4.29	22.97	35.14
5	14.88	22.55	34.03
6	10.38	27.16	34.76
7	20.06	24.82	49.33
8	6.40	6.39	25.38
9	4.95	15.57	54.79
10	15.52	28.38	30.71
11	14.21	25.23	61.85

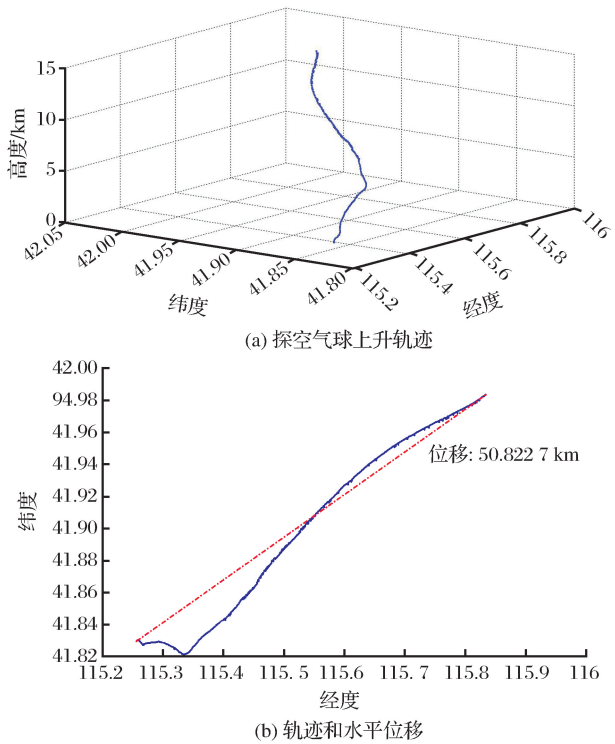


图 9 2013 年 7 月 29 日 08:36 探空气球上升轨迹和最大水平漂移距离

Fig.9 Trajectory of the sounding balloon and max horizontal drift distance at 08:36 on 29th July 2013

4.3 云雷达识别云底高和云顶高的可信度分析

从云雷达回波垂直分布可以得到云的高度值,但有时在时间序列上跳跃很大(图 2),有必要给出一个可信度的信息。进一步分析 11 次个例,将云雷达资料划分成两类:3 次与探空资料识别结果一致性好的个例(个例 4、6 和 10)和其余 8 次有偏差的个例,用于归纳分析云雷达反演云底高度可信度;将云雷达资料划分成三类:4 次与探空资料识别结果一致性好的个例(个例 1、6、7 和 9),2 次相差很大的个例(个例 4 和 8)和其余 5 次有偏差的个例,用于归纳分析云雷达反演的云顶高度可信度。

对于云底,直观来看 3 次反演结果一致的个例探测的云均为高云、薄云,云量低,且前后一段时间内较均匀,而其他个例的云较密实,云量高,前后一段时间可能还有降水,如图 10 为个例 10(图 10(a))和个例 2(图 10(b))的全天空成像仪照片,可以看出个例 10 的云是高云、薄云,个例 2 中的云厚且密实。

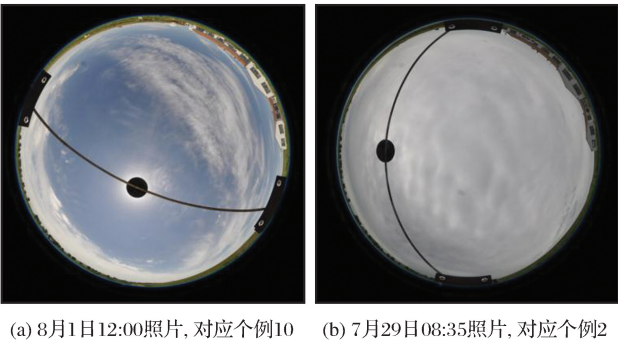


图 10 可见光全天空成像仪照片

Fig.10 Photos of the visible sky imager

为了归纳云底和云顶高可信度,先定义两个量。雷达反射率在时间上的变化率和反射率在高度上的变化率(用 G_{Zt} 和 G_{Zh} 表示),它们分别表示反射率(Z)在时间和空间上的变化情况,值越小表示反射率变化越小,反之越大。 G_{Zt} 和 G_{Zh} 定义如下:

$$G_{Zt} = \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{Z_{i+1} - Z_i}{\Delta t} \right| / (n - 1) \tag{1}$$

$$G_{Zh} = \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{Z_{i+1} - Z_i}{\Delta h} \right| / (n - 1) \tag{2}$$

其中: $\Delta t=0.3\text{ s}$, $\Delta h=30\text{ m}$, n 表示取的库的个数, i 表示从云底(或云顶)某点($i=1$)到所选的第 n 个库($i=n$)的序数。在时间上(水平方向,时间分辨率 0.3 s),以取云底(或云顶)某点到之前 5 min 的库计算为宜,故在式(1)中 $n\approx 1000$;在高度上(垂直方向,垂直分辨率 30 m),以取云底(或云顶)某点到该层云厚度的下 1/4 处(或上 1/4 处)的库计算为宜,

故在式(2)中 n 的取值与云的实际厚度有关,当云厚 2 000 m 时 $n = 17$ 。计算后取对数,即使用 dBG_{Zt} 和 dBG_{Zh} ,如式(3)和式(4)所示。

$$dBG_{Zt} = 10\lg G_{Zt}$$

(3)

$$dBG_{Zh} = 10\lg G_{Zh}$$

(4)

Z 的计算采用以下公式:

$$Z = 10dBZ/10$$

(5)

11 次个例云底的 G_{Zt} 和 G_{Zh} 计算结果见表 5。

表 5 11 次个例云底的反射率、 G_{Zt} 和 G_{Zh}

Table 5 The reflectivity at cloud bottom, G_{Zt} and G_{Zh} of 11 cases

次数	dBG_{Zt}	dBG_{Zh}	云底反射率(dBZ)
1	-47.4	-40.9	-35
2	-41.7	-10.0	-27
3	-42.0	-12.1	-30
4	-37.7	-30.9	-25
5	-45.8	-38.9	-41
6	-37.4	-25.3	-23
7	-42.7	-38.2	-32
8	-49.0	-10.7	-37
9	-41.9	-18.9	-33
10	-40.4	-25.0	-24
11	-41.2	-19.3	-37

云雷达和探空资料反演的云顶高度对应较好时(4、6、10),云雷达的云底反射率 $dBZ \geq -25$, $dBG_{Zt} > -41$, $-31 \leq dBG_{Zh} \leq -25$;探空与雷达偏差大时(1、

2、3、5、7、8、9、11),云雷达的云底反射率 $dBZ < -25$, $dBG_{Zt} \leq -41$, $dBG_{Zh} < -31$ 或 $dBG_{Zh} > -25$ 。

11 次个例云顶的 G_{Zt} 和 G_{Zh} 计算结果见表 6。

表 6 11 次个例云顶的反射率、 G_{Zt} 和 G_{Zh}

Table 6 The reflectivity at cloud top, G_{Zt} and G_{Zh} of 11 cases

次数	dBG_{Zt}	dBG_{Zh}	云顶反射率(dBZ)
1	-39.9	-38.2	-30
2	-31.3	-25.3	-26
3	-30.8	-21.6	-23
4	-29.8	-17.1	-19
5	-32.0	-28.8	-27
6	-35.7	-33.5	-25
7	-38.9	-37.1	-27
8	-29.6	-14.2	-17
9	-36.6	-38.0	-28
10	-30.4	-25.5	-37
11	-32.7	-22.9	-27

云雷达和探空资料反演的云顶高度对应较好时(1、6、7、9),云雷达的云顶反射率 $dBZ \geq -30$, $dBG_{Zt} \leq -35$, $dBG_{Zh} \leq -30$;二者偏差 1 km 以内时(2、3、5、10、11), $-35 < dBG_{Zt} < -30$, $-30 < dBG_{Zh} < -20$;二者偏差 1 km 以上时(4、8),云雷达的云顶反射率 $dBZ \geq -19$, $dBG_{Zt} \geq -30$, $dBG_{Zh} \geq -20$ 。将依据反射率、 dBG_{Zt} 和 dBG_{Zh} 归纳的云边界可信度判据加入图 2 的云边界图,得到带可信度的云边界图,如图 11 所示。

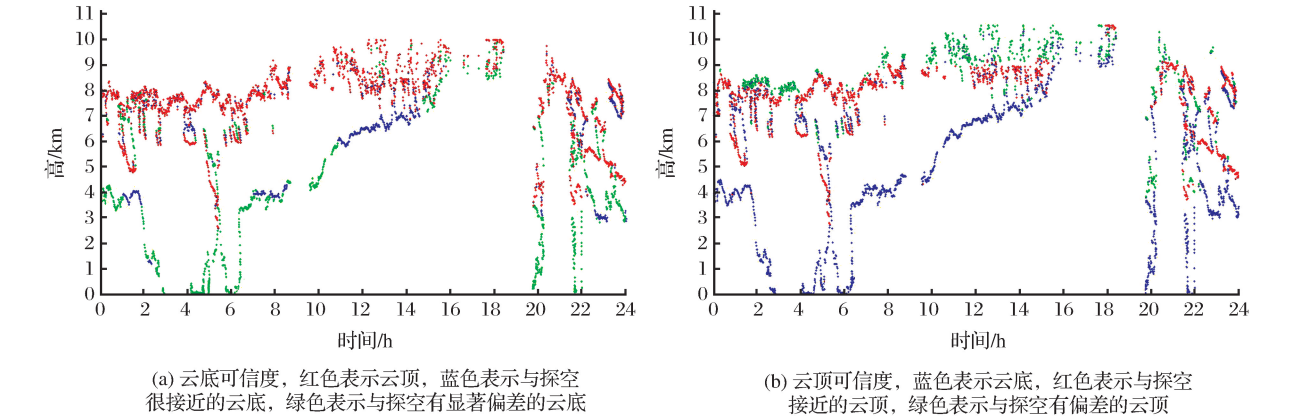


图 11 加入可信度判据的云边界识别结果

Fig.11 The result of cloud boundary recognition with the credibility criterion

5 结 语

利用中国科学院大气物理研究所 2013 年 7~8 月在内蒙古自治区锡林郭勒盟太仆寺旗宝昌镇外场

试验观测资料,对比分析了毫米波云雷达和无线电探空仪数据反演的云底、云顶高度,主要结论如下:

(1)利用毫米波云雷达反射率可以直接得到云边界,利用云雷达的退偏比产品可以去除 HTI 图像

中的非气象回波等杂波。

(2)通过11次毫米波云雷达和无线电探空仪反演云边界的个例分析,发现云底高度二者判断整体吻合较好,偏差约为300 m;云顶的判断除了两次差异5 km以上的个例和一次差异1.2 km的个例外,其他个例吻合较好,偏差约300 m。

(3)造成两种仪器判别偏差的原因有:西北方干空气引起的云底“干层”影响;探空仪的水平漂移;探空仪湿度传感器的探测误差随高度上升而增加。

(4)通过计算和对比云底和云顶时间和空间上的反射率变化率,归纳给出了云雷达识别云底和云顶高的可信度判据。需要注意的是,由于观测时间有限,本文研究结果源于11次个例分析,可信度判据的普适性有待于今后开展更多同类试验进行检验。

参考文献(References):

- [1] Rossow W B, Schiffer R A. Advances in Understanding Clouds from ISCCP[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1990, 80(11): 2261-2287.
- [2] Qiu Jinhuan, Lu Daren, Chen Hongbin, *et al.* Modern Research Progresses in Atmospheric Physics[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 628-652. [邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 628-652.]
- [3] Huang Xingyou, Xia Junrong, Bu Lingbing, *et al.* Comparison and Analysis of Cloud base Height Measured by Ceilometer, Infrared Cloud Measuring System and Cloud Radar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 73-78. [黄兴友, 夏俊荣, 卜令兵, 等. 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, 2013, 30(1): 73-78.]
- [4] Zhang Jinqiang, Chen Hongbin, *et al.* Dynamic and Thermodynamic Features of Low and Middle Clouds Derived from Atmospheric Radiation Measurement Program Mobile Facility Radiosonde Data at Shouxian, China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33: 21-33.
- [5] Cai Miao, Ou Jianjun, Zhou Yuqua, *et al.* Discriminating Cloud Area by Using L-Band Sounding Data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, (2): 213-222. [蔡淼, 欧建军, 周毓荃, 等. L波段探空判别云区方法的研究[J]. 大气科学, 2014, (2): 213-222.]
- [6] Zhou Yuquan, Ou Jianjun. The Method of Cloud Vertical Structure Analysis Using Rawinsonde Observation and Its Applied Research[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(11): 50-58. [周毓荃, 欧建军. 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, 2010, 36(11): 50-58.]
- [7] Kennedy A D, Dong X Q. Cloud fraction at the ARM SGP Site-Instrument and Sampling Considerations from 14 Years of ARSCL [J]. Theor. Appl. Climatol, 2014, 115: 91-105.
- [8] Clothiaux E E, Acherman T P. Objective Determination of Cloud Heights and Radar Reflectivities Using a Combination of Active Remote Sensors at the ARM CART Sites[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39: 645-665.
- [9] Wang Dewang, Liu Liping, Zhong Lingzhi, *et al.* Analysis of the Characters of Melting Layer of Cloud Radar Data and Its Identification[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(6): 712-721. [王德旺, 刘黎平, 仲凌志, 等. 毫米波雷达资料融化层带特征的分析及识别[J]. 气象, 2012, 38(6): 712-721.]
- [10] Li Siteng, Ma Shuqing, Gao Yuchun, *et al.* Comparative Analysis of Cloud Base Heights Observed by Cloud Radar and Ceilometer[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(2): 212-218. [李思腾, 马舒庆, 高玉春, 等. 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J]. 气象, 2015, 41(2): 212-218.]
- [11] Zhang Jinqiang, Chen Hongbin, Li Zhanqing *et al.* Analysis of Cloud Layer Structure in Shouxian, China Using RS92 Radiosonde Aided by 95 GHz Cloud Radar[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: 1-13.
- [12] Tang Yingjie, Ma Shuqing, Yang Ling, *et al.* Observation and Comparison of Cloud-base Heights by Ground-based Millimeter-wave Cloud Radar[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(6): 680-687. [唐英杰, 马舒庆, 杨玲, 等. 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, 2015, 26(6): 680-687.]
- [13] Wang Zhe, Wang Zhenhui, Cao Xiaozhong. Consistency Analysis for Cloud Vertical Structure derived from Millimeter Cloud Radar and Radiosonde Profiles[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(5): 815-826. [王喆, 王振会, 曹晓钟. 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[J]. 气象学报, 2016, 74(5): 815-826.]
- [14] Liu Liping, Zhong Lingzhi, Jiang Yuan, *et al.* Cloud Radar and Its Field Experiments in China[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, (5): 567-571. [刘黎平, 仲凌志, 江源, 等. 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, 2009, (5): 567-571.]
- [15] Li Wei, Zhao Peitao, Guo Qiyun, *et al.* The International Radiosonde Intercomparison Results for China-made GPS Radiosonde[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 20(4): 453-462. [李伟, 赵培涛, 郭启云, 等. 国产GPS探空仪国际比对试验结果[J]. 应用气象学报, 2011, 20(4): 453-462.]
- [16] Zhao Jing, Cao Xiaozhong, Dai Taogao, *et al.* Comparative Analysis of Cloud Observed by Millimeter Wave Cloud Radar and Sounding[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(1): 101-107. [赵静, 曹晓钟, 代桃高, 等. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象, 2017, 43(1): 101-107.]
- [17] Xin Yan. Study on the Parameters of Polarization Radar in the Orientation Normal Distribution of Small Spheroidal Raindrops[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016. [辛岩. 椭球粒子群取向正态分布下偏振雷达参数研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.]
- [18] Zong Rong. Studies of Cloud Macro-and Microphysical Properties Using China New Generation Millimeter-Wavelength Ra-

- dar[D].Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013.[宗蓉.毫米波雷达对云宏微观特性的探测和研究[D].南京:南京信息工程大学, 2013.]
- [19] Poore K D, Wang J H, Rossow W B. Cloud Layer Thicknesses from a Combination of Surface and Upper-air Observations [J]. *Climate*, 1995, 8(3): 550-558.
- [20] Chernykh I V, Eskridge R E. Determination of Clouds Amount and Level from Radiosonde Soundings [J]. *J Appl Meteor*, 1996, 35: 1362-1369.
- [21] Wang J H, Rossow W B. Determination of Cloud Vertical Structure from Upper-air Observations [J]. *J Appl Meteor*, 1995, 34: 2243-2258.
- [22] Zhang Jinqiang. Comparative Study of Cloud Detection by Radiosonde and Ground Active Remote Sensing Observation [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics Chinese Academy of Science, 2011.[张金强.无线电探空仪探测云层及与地基主动遥感观测的对比研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所, 2011.]
- [23] Liu Gongbo, Hu Zhijin. A New Method for Calculating the Saturated Water Vapor Pressure over Ice [J]. *Meteorological Monthly*, 1994, (1): 24-26.[刘公波, 胡志晋.一种新的计算冰面饱和水汽压方法[J].气象, 1994, (1): 24-26.]
- [24] Chen Zhe. Characteristics of the Overall Sounding Data Drift in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(2): 22-27.[陈哲.中国探空气球水平漂移总体特征分析[J].气象, 2010, 36(2): 22-27.]

Comparative Analysis of Cloud Boundary Observed by Millimeter Wave Cloud Radar and Radiosonde

Hao Yitian^{1,2}, Chen Hongbin^{2,3,4}, Bi Yongheng², Duan Shu²,
Li Jun², Zhang Jinqiang^{2,3,4}, Xuan Yuejian², Zhao Yu²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The observation data obtained by a Ka-band cloud radar and radiosondes during July to August 2013, in Inner Mongolia were used to detect the cloud boundary. The results show that the Cloud Base Height (CBH) determined by the cloud radar is about 300 m lower than that from the radiosonde, and the CBHs from two equipments are close in most cases; however, the heights of cloud top are largely different. The analysis of the case with larger CBH deviation indicates that the radar detection is more sensitive than the radiosonde because of the presence of an atmosphere "dry layer" under the cloud base; The main causes of the deviation are the horizontal drift of the radiosonde and the humidity sensor error that increases with increasing height. By calculating and comparing the variation rate of cloud reflectivity, a credibility criterion is given for cloud radar detection of the height of cloud base and cloud top.

Key words: Cloud radar; Radiosonde; Cloud boundary; Detection Algorithm; Credibility criterion