

任丹阳,曹梅,王瑞英,等.毫米波云雷达及探空反演的云垂直结构对比分析[J].陕西气象,2023(6):1-9.

文章编号:1006-4354(2023)06-0001-09

毫米波云雷达及探空反演的云垂直结构对比分析

任丹阳¹,曹梅¹,王瑞英¹,白水成²,樊婷丽¹,庞菲菲¹

(1. 西安市气象局,西安 710016;2. 陕西省气象局,西安 710014)

摘要:利用2021年9月9日—2022年1月31日泾河国家基本气象站毫米波云雷达(简称云雷达)的反射率因子及L波段探空雷达的温度、相对湿度数据,根据时空匹配方法,对比分析了二者探测和识别云的垂直结构特征(包括云底高度、云顶高度、云层数)的一致性。结果表明:云雷达和探空数据对低、中、高的单层云、双层云及临近降水云的垂直结构的识别结果基本一致;二者对于单层云的云底高度以及双、多层云的云顶高度识别一致性更好,探空识别的云底高度整体略高于云雷达的。引起二者识别云层数不一致的原因:一是因为低层相对湿度较大以及探空识别云算法的敏感性;二是当云体的结构松散时,加上探空漂移作用导致二者识别的云体不一致。在二者识别云层一致的情况下,识别单层云的垂直结构的差异是由于探空仪在低温条件的低敏感以及云雷达对高层薄云的探测能力引起;对于双层和多层云,主要是由于时空匹配方法对于短时间内垂直结构显著变化的云的识别还需要进一步改进。

关键词:云雷达;L波段探空;云垂直结构;云顶高度;云底高度

中图分类号:P412.15

文献标识码:A

云的形成与消亡能够反映大气运动的热力及动力过程,它与辐射的相互作用对全球的水循环、大气环流及气候变化产生重要影响^[1]。观测云的垂直结构特征(云的高度、厚度、层数及云量)的手段丰富,卫星遥感能够实现大范围的观测,静止卫星和极轨卫星观测分别具有较高的时间分辨率和空间分辨率,在探测云顶高度上具有一定的优势^[2]。地基遥感观测时间分辨率高且能实现长时间的连续观测,并且可以与多种探测设备配合,共同反演云特征或彼此进行验证^[3]。激光雷达对云底高度的探测较准确,但激光束受高层云、较厚的云层以及降水的影响探测信号衰减严重。L波段探空雷达能获得每日两个固定时段的高精度大气垂直廓线^[4],可用于反演云的垂直结构分布特征。云雷达是目前较为理想的云的宏微观参数测量工具,作为一种主动遥感设备,它能通过发射毫米波段的电磁波来探测云的垂直结构,具有高的灵敏

度和时空分辨率^[5]。关于结合多种探测手段互相验证云的垂直结构,目前已经完成的研究包括采用WR95相对湿度阈值法^[6]或者ZHA10法^[7],利用我国业务布网单一或者多个站点的L波段探空数据识别的云的垂直结构与卫星^[8-9],云雷达^[10-11],激光云高仪^[12-13]实测得到的垂直结构进行对比分析,统计探空识别云区的相对湿度阈值及其随高度的变化,得到适用于L波段探空数据的云垂直结构判断方法。这些研究提高了对云的高度识别的准确率,并分析了由于观测手段不同所引起云垂直结构差异的原因。

本研究利用泾河国家基本气象站的2021年9月9日—2022年1月31日连续145 d云雷达的反射率因子及L波段探空雷达的温度及相对湿度数据,根据相对阈值法,并考虑时空匹配方法提取了探空识别的云顶及云底高度,对二者观测得到的云的垂直结构进行一致性比较,分析了二

收稿日期:2022-12-26

作者简介:任丹阳(1995—),女,汉族,陕西商洛人,硕士,助理工程师,从事大气物理与探测方向研究。

基金项目:西安市科协青年人才托举计划项目(095920221313);西安市气象局“揭榜挂帅”项目(04)

者识别云的垂直结构差异的原因,评估了云雷达探测云的垂直结构的观测性能,为云雷达更好地应用于云的观测提供参考。

1 观测数据及处理方法

1.1 云雷达观测数据及识别云的方法

本研究所使用的云雷达是由西安华腾微波公

司研制,利用云粒子对毫米波的散射特性来反演云的宏观和微观结构,可探测获取云、雨等气象目标的分布、回波强度、径向速度、速度谱宽等宏观数据,能够实现连续观测云的结构变化,并反演生成云底高、云顶高、云厚、云量等二次数据。探测性能见表1。

表1 泾河国家基本气象站毫米波云雷达的主要性能及技术指标

性能	技术指标	性能	技术指标
发射机制	全固态	反射率因子	-40~+30 dBz
工作频率	35 GHz±200 MHz	径向速度	-15~+15 m/s
天线扫描方式	固定垂直指向	速度谱宽	0~15 m/s
天线口径	≥1.6 m	垂直距离分辨率	30 m
波束宽度	≤0.6°	探测高度范围	≥15 km

云雷达的数据质控主要包括两方面:一是近地面非气象杂波的滤除,参考雷达反射率因子廓线识别云的方法^[14],满足云回波的最大厚度大于120 m和云回波的速度谱宽大于0.5 m²/s²。二是由于云雷达数据时空分辨率高,对于一些结构相对松散的云来说,按照上述算法有可能将整层的松散的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。本研究对此的质控算法是参考文献^[10],对于厚度小于7个距离分辨率(210 m)的云层,如果其与上下层的间隔大于24个距离分辨率(720 m),删除这层云;否则将其与前后较邻近的云层合并,最终提取得到云雷达每一层的完整云边界。

1.2 L波段雷达探空数据及其识别云的方法

L波段高空气象探测系统能够实现从地面到30 km高空的温度、相对湿度、气压、风向和风速等气象要素的连续观测,主要由GFE(L)型二次测风雷达和GTS1型数字探空仪组成。探空气球携带探空仪的平均上升速度在400 m/min左右,探空仪采样周期为1.2 s,探空数据的空间垂直分辨率为8 m。本文主要采用相对湿度阈值法^[5,7]对探空数据识别的云垂直结构进行分析:首先判定云底的条件是云中相对湿度最大值不小于87%,且相对湿度在云底有连续递增,递增的变化值要大于3%;判定云顶的条件是云中相对湿度

最小值不大于84%,且在云顶有连续递减,递减的变化值同样要大于3%。其次是考虑不同温度下相对湿度的合理计算,当温度≥0℃时,相对湿度即为水面相对湿度,直接利用探空仪测得的相对湿度即可;当温度<0℃时,按照冰面饱和水汽压重新计算相对湿度,即根据实际水汽压除以冰面的饱和水汽压得到新的冰面相对湿度^[15],主要计算公式参考公式(1)和(2)。

$$e_s = 6.112 \exp\left(\frac{17.67t}{t+243.5}\right), \quad (1)$$

$$e_{s0} = 6.11 \left[10 \left(\frac{9.5t}{t+265.5} \right) \right], \quad (2)$$

式中 e_s 为水面饱和水汽压(hPa), e_{s0} 为冰面饱和水汽压(hPa), t 为温度(℃),温度的适用范围为-45~60℃。

由于利用相对湿度阈值法判别云层时,会有厚的无云夹层或云层出现,所以湿层和云层的判定标准^[9]分别为:云夹层小于300 m且相对湿度大于最小阈值时归为云层,云层厚度小于80 m且相对湿度小于最大阈值时归为湿层。

1.3 时空匹配方法

本研究选取的数据为2021年9月9日—2022年1月31日泾河国家基本气象站云雷达连续观测的反射率因子及云顶、云底高度数据,L波段探空雷达的温度、相对湿度观测数据。L波段探空雷达位置与云雷达的距离约20 m,释放探空

气球的位置在云雷达 100 m 范围内,北京时间每日 07:15 和 19:15 分别完成一次观测。研究表明,取云雷达 07:00—08:00 和 19:00—20:00 的平均云高来抵消时空差异影响的方法能够较为准确地识别明显的非单层云的垂直结构^[10]。考虑到探空气球在对流层上升时间约 1 h 及气球释放后的水平漂移等因素,本研究选取云雷达每日 07:00—08:00 和 19:00—20:00 两个时段的平均云底和云顶高度分别与相应时间的探空数据识别的云底、云顶高度进行对比分析。

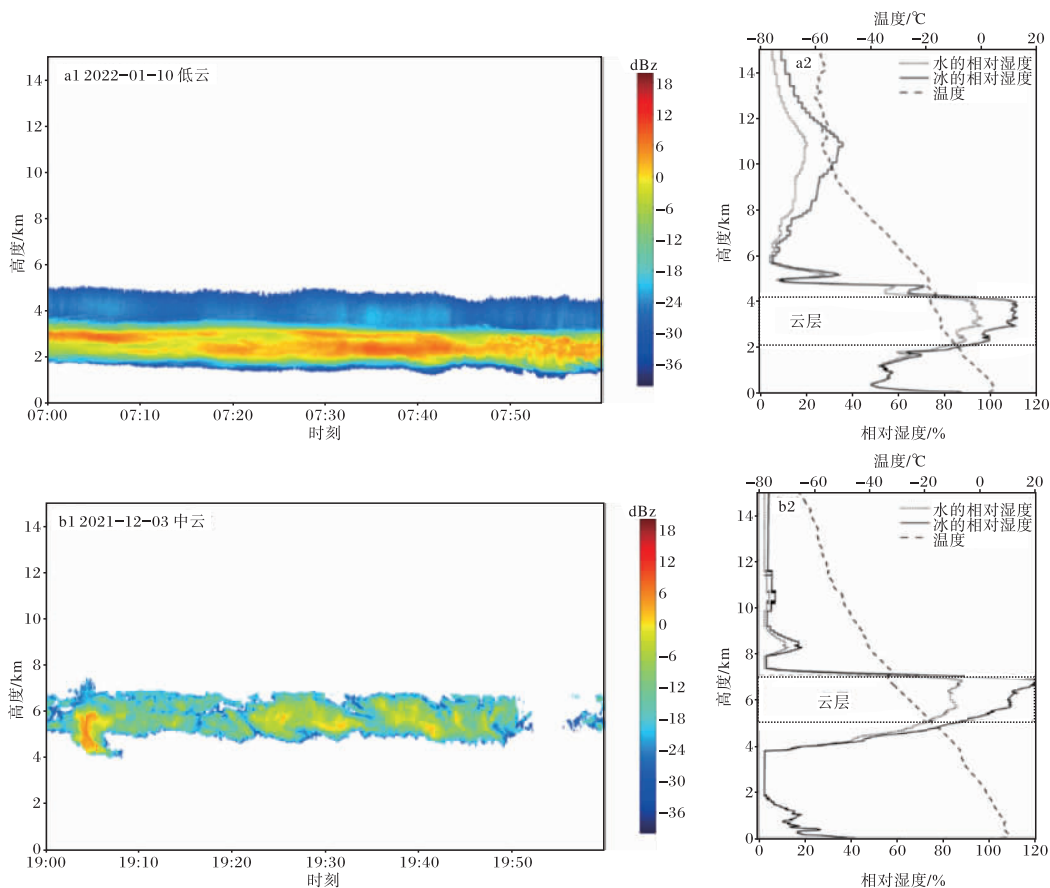
2 云雷达和探空识别云垂直结构的对比分析

2.1 个例分析

为了直观地对比云雷达和探空观测各类云的垂直结构的结果,从共同观测有云样本中按照不同类型的云选取代表性个例,按照云底高度(低云、中云、高云)、云层数(双层)以及临近降水(云雷达识别云为起始高度,地面无降水)五种情况,其中低云的云底高度 <2.5 km, 2.5 km $<$ 中云的云底高度 <4.5 km,高云的云底高度 >4.5 km,

详细比较二者探测的云底、云顶、云层数的一致性。

图 1a1~图 1e1 和图 1a2~图 1e2 分别为云雷达探测和探空识别的低云、中云、高云、双层云及临近降水云的垂直结构。从云雷达的反射率因子图(图 1a1)可看出,云的垂直结构分布比较均匀,全程维持在 3 km 左右,云高在 2.0~4.7 km 左右;图 1a2 中探空识别云高为 2.0~4.2 km,云层厚度较云雷达探测的低。图 1b1 云雷达显示云底高度 4.8~6.6 km,图 1b2 探空识别的云底高度 4.9~6.9 km,二者云底高度较为一致,探空的云顶高度偏高 300 m 左右。图 1c1 云厚度随时间递减,期间平均云底高度在 8.2~9.2 km,可以看出这是一个较薄的高云,图 1c2 中探空识别云的高度为 8.3~9.3 km。图 1d1 是由中云和高云组成的双层云,其中中云的高度在 2.5~3.5 km,云结构较为完整和均匀,高云前 30 分钟由厚转薄,后 30 分钟较为均匀,云的高度为 5.4~7.3 km;对应的图 1d2 探空识别结果显示中云为



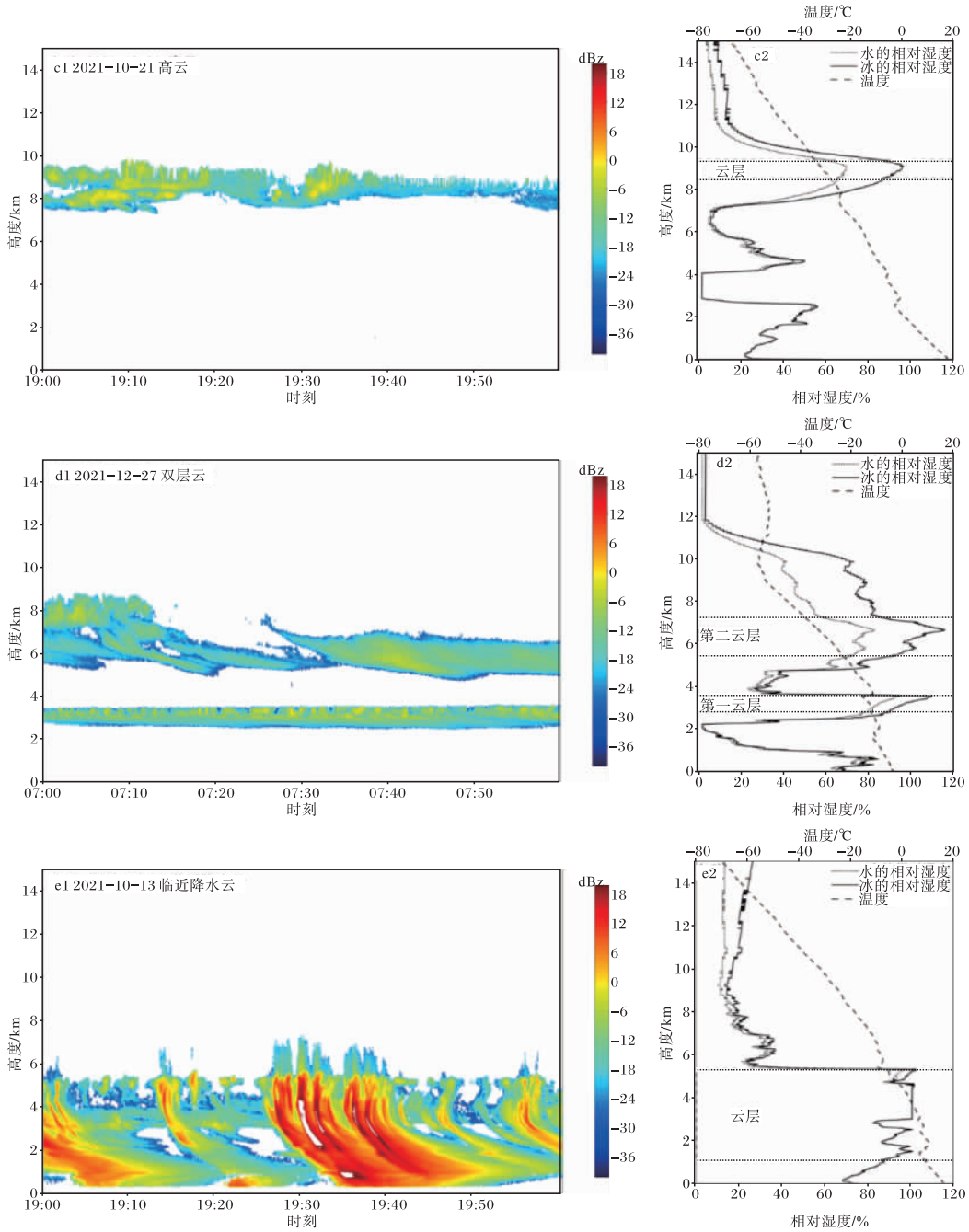


图1 泾河国家基本气象站云雷达(a1~e1)与相应时段探空(a2~e2)识别五种不同类型的云的垂直结构

2.6~3.6 km,高云为5.3~7.3 km。从图1e1可以明显看到云雷达识别的云顶高度在5.3 km左右,图1e2探空识别的云的高度为0.8~5.3 km。根据地面自动气象站小时降水量,2021年10月13日23:00开始有一次降水过程,探空数据探测到近地面相对湿度已经超过90%,有较厚的湿层,且湿层维持到2.6 km左右,云雷达也探测到了地面的湿层,二者对云顶高度的识别结果是基

本一致的。通过对比以上五种不同垂直结构的云,可以看出云雷达对云垂直结构的探测结果与探空的识别结果基本一致。对于不同类型的云层,都能够比较准确地探测出云的垂直结构,并且对10 km以下的非降水云及邻近降水云的云顶高度都有较强的探测能力。

2.2 云垂直结构特征统计及差异分析

根据上述匹配原则共选取云雷达及探空数据

各 290 组。对云雷达和探空识别云的数量进行统计,结果见表 2。云雷达和探空均识别有云和无云的比例共占 83.5%,各自识别有云的比例也是十分接近的,说明二者都能基本刻画云的垂直结构特征。结合泾河地面自动气象站的小时订正降水量,进一步将有降水的情况进行单独统计,期间云雷达识别云为起始高度(云雷达探测高度的下限为 300 m)且有降水量的比例占 13.1%。考虑到降水会对云雷达的信号产生衰减,所以这 38 个样本不参与之后的云雷达及探空识别云垂直结构的一致性的对比分析。主要从两个角度分析云雷达观测和探空识别云垂直结构的差异:一是云层数不一致时,云底和云顶高度的不一致;二是云层数一致时,云底或云顶高度的不一致。

表 2 2021-09-09—2022-01-31 日泾河国家基本气象站云雷达及探空识别云的分类及统计

云的分类	样本数/个	占比/%
云雷达和探空均识别有云	111	38.3
云雷达识别有云	114	39.3
探空识别有云	119	41.0
云雷达和探空均识别无云	131	45.2
云雷达识别云为起始高度	38	13.1

将云雷达识别有云的 114 个样本进一步分为单层、双层和多层云(三层、四层云),统计得到云雷达识别为单层、双层和多层云时探空对应的识别结果如下表 3。可以看出云雷达识别的以单层云为主,其次是双层和多层云;而探空识别的云层数与云雷达的相比,对单层云的识别率最高,其次是双层和多层云。在云雷达和探空均识别到云的前提下,云层数不一致的样本中,单层云有 29 个,双层和多层云共有 11 个。

表 3 泾河国家基本气象站云雷达识别不同层数云对应的探空识别结果

云层数	云雷达样本数/个	探空样本数/个	探空识别率/%
单层	82	53	64.6
双层	28	17	60.7
多层	4	2	50.0

对比分析这 40 个样本的云底及云顶高度发现,二者识别不一致主要表现为两种情况:一是层数不一致时,探空识别显示 3 km 以下存在低云或者中云,而云雷达未探测到有云。原因可能是低层相对湿度较大时(如秋冬季节低层有雾或降水过程前后近地面相对湿度较大),探空由于在低层设置的阈值较低,识别算法的敏感性容易将其误判为云层,从而低估真实的云底高度。这类样本有 18 个,代表个例如图 2a 所示,云雷达识别的云在 6.2~7.5 km,而探空识别的云有 2.1~2.8 km 和 6.4~8.1 km 两层。二是虽然识别层数不一致,但是二者识别的高云的云底和云顶高度差别不大,这类样本有 9 个,包括三种情况:(1)云雷达识别为单层云时探空识别为双层云;(2)云雷达识别为双层云时探空识别为多层云;(3)云雷达识别双层云而探空识别为单层云。(1)和(2)可能是由于高云的结构比较松散且不连贯,加上探空的漂移导致与云雷达识别的云体不一致,代表个例如图 2b 所示。(3)产生的原因可能是由于云体厚度大,所以整层的相对湿度都保持在较高的水平,而探空识别云的相对湿度阈值未随高度增加而设置变化,代表个例如图 2c 所示,说明在高层应该考虑降低相对湿度的阈值来识别云。

当探空与云雷达识别的云层数一致的情况下,对二者识别云底高度和云顶高度进行统计,并对其一致性进行分析。图 3 为云雷达和探空识别的云层数一致时,单层云的云底及云顶高度相关性,可以看出对于单层云,云雷达和探空识别的云底高度较为一致,大多沿着 $Y=X$ 线分布,探空的云底高度整体略高于云雷达的云底高度,相关系数为 0.90。而二者识别的云顶高度的相关系数为 0.62,这与之前的研究表明针对大多数云顶高度观测,云雷达比探空要低且呈现出系统性的偏差的现象一致^[9]。

经统计发现,观测期间探空识别单层云的云顶高度有 88.7% 都高于云雷达观测,探空识别的云顶高度大于 10 km 的样本有 18 个,最高达到 16 km;而云雷达仅有 4 个,最高达到 12 km。剔除其中三个误差较大样本后二者识别的云顶高度

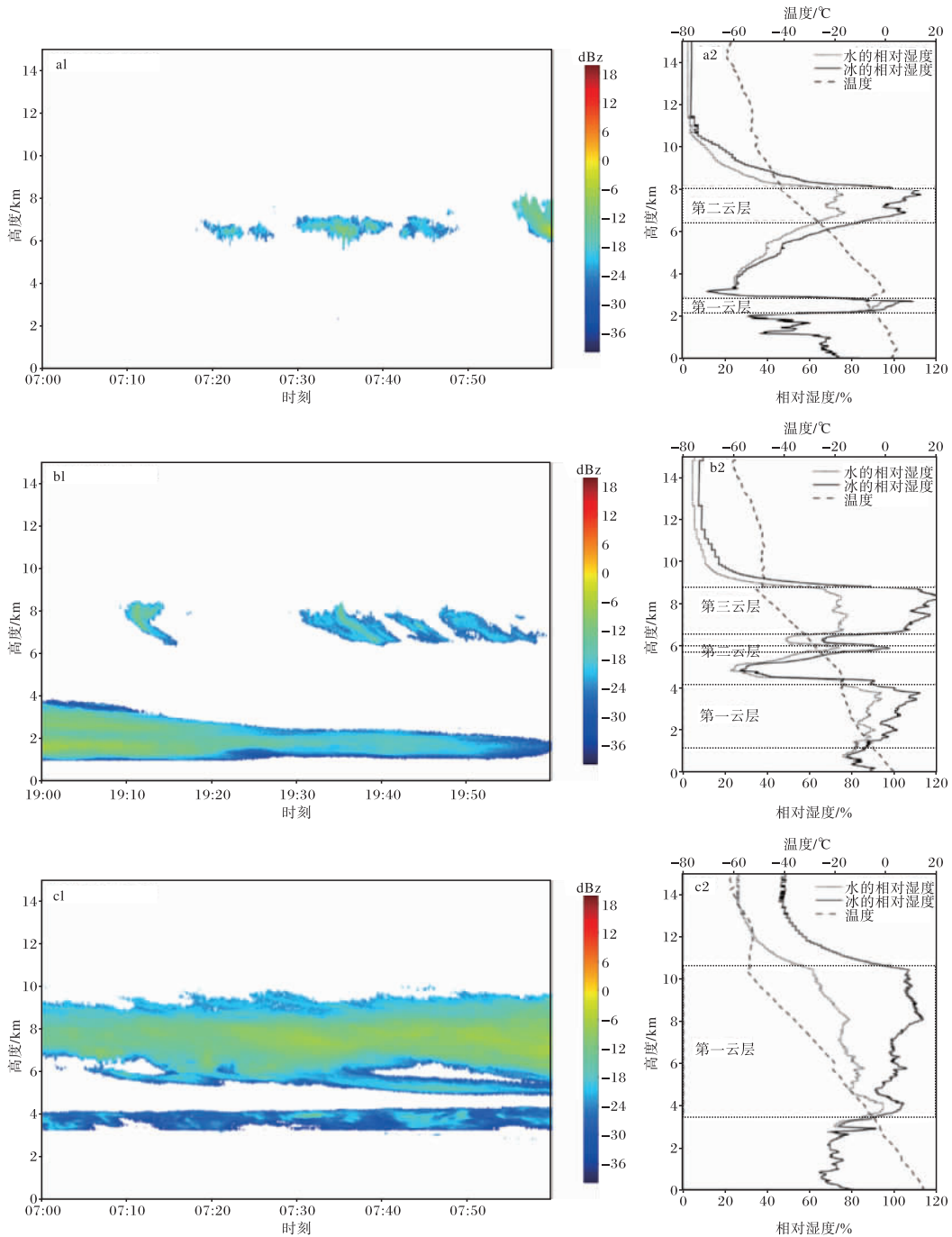


图2 泾河国家基本气象站云雷达与探空识别云不一致的三种情况
(a 2021-12-15T07—08, b 2022-01-28T19—20, c 2021-10-31T07—08)

的相关系数为 0.85,而这三个个例都是探空识别的云顶高度超过 10 km,显著大于云雷达探测到的,且云底高度都比较低,云层厚度超过 4 km。针对云雷达识别的云顶高度远低于探空的云顶高度这一现象,由于统计时已经筛选掉降水时段的个例,所以不存在云雷达信号因雨衰减较大所造

成的影响。以下选取个例分析可能的原因。

图4是2021年12月31日07:00—08:00云雷达和探空识别的云垂直结构对比。可以看出在探测云层一致的情况下,云雷达识别的云顶高度比探空识别的低6~7 km,一方面可能是由于探空仪探测的滞后性^[16],因为在10 km处,温度已

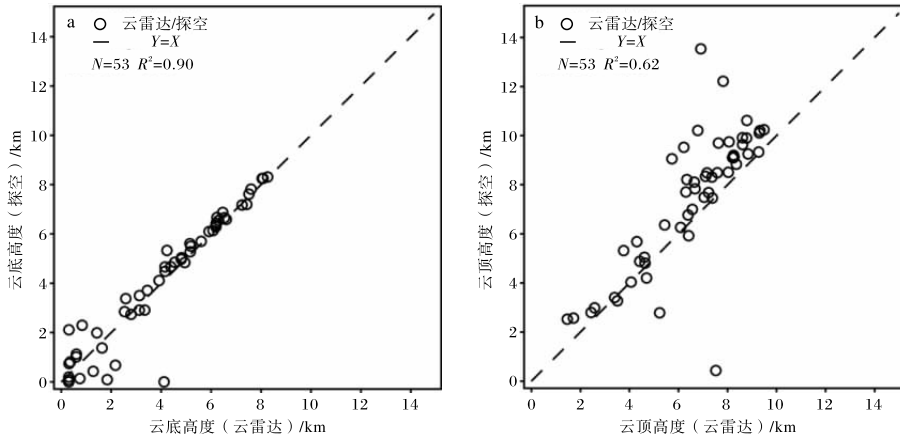


图3 泾河国家基本气象站云雷达与探空同时识别单层云时云底(a)及云顶(b)高度相关性

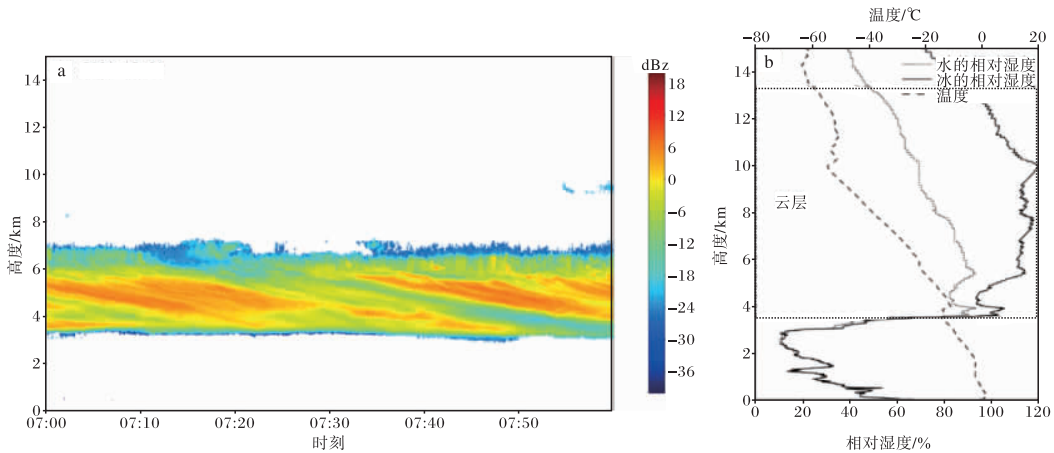


图4 2021-12-31T07—08 泾河国家基本气象站云雷达(a)和探空(b)识别的云垂直结构对比

经开始逐渐低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,研究表明当温度 $<-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,探空仪探测的相对湿度下降十分缓慢^[17];另一方面从云雷达探测能力上看,19:55之后,10 km处有一小段高云的回波,且探空在10 km左右相对湿度也有一个明显的增加,但是这段薄

的高云由于厚度未达到云雷达的云厚度阈值而被质控掉。

对于双层和多层云,取最下层云底高度和最上层云顶高度用于对比。图5为云雷达和探空识别的云层数一致时的双层和多层云的云底及云顶

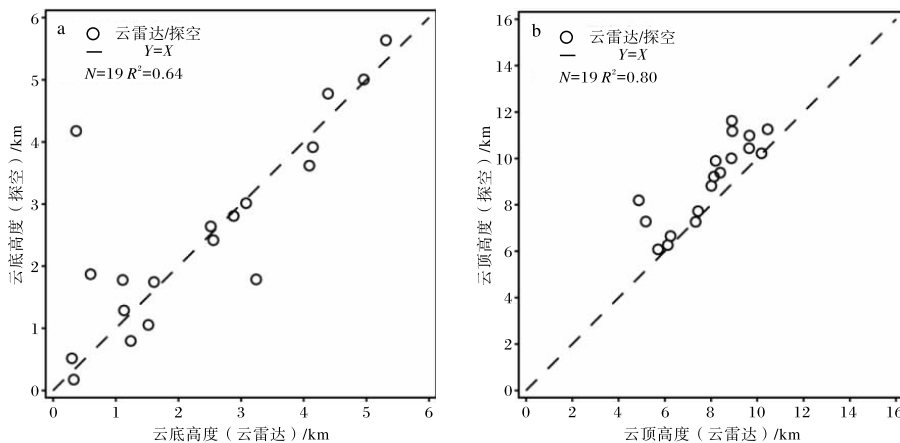


图5 泾河国家基本气象站云雷达与探空同时识别双层和多层云时云底(a)及云顶(b)高度相关性

高度的相关性。其中对于云顶高度的识别二者的相关系数有 0.80, 一致性较好; 而对于云底高度的识别相关系数为 0.64, 经分析发现剔除其中误差较大的个例(2021年9月20日19:00—20:00)后云底高度的相关系数可以达到 0.88。

结合9月20日19:00—20:00的云雷达的反射率因子图(图6a)可以看出, 在07:15之前云雷达识别出两层云, 19:15—19:30期间未识别到云, 而19:30之后为一层云, 虽然后期没有降水过程, 但云雷达的云底高度逐渐降低, 1 h内云垂直

结构有非常明显的变化; 而探空识别的两层云的云高分别在4.2~4.7 km和7.0~7.3 km, 其中圈出来的部分由于云层厚度小于80 m归为湿层(图6b)。因为探空观测的开始时间都在19:15—19:20之间, 考虑到探空气球的水平漂移, 以及19:50之后按照400 m/min的平均升速来计算, 探空气球的高度已经达到5 km以上, 无法捕捉到较低的云层。综上分析, 二者云高差异较大说明本研究使用的时空匹配方法对短时间内垂直结构变化明显的云的识别还需要进一步改进。

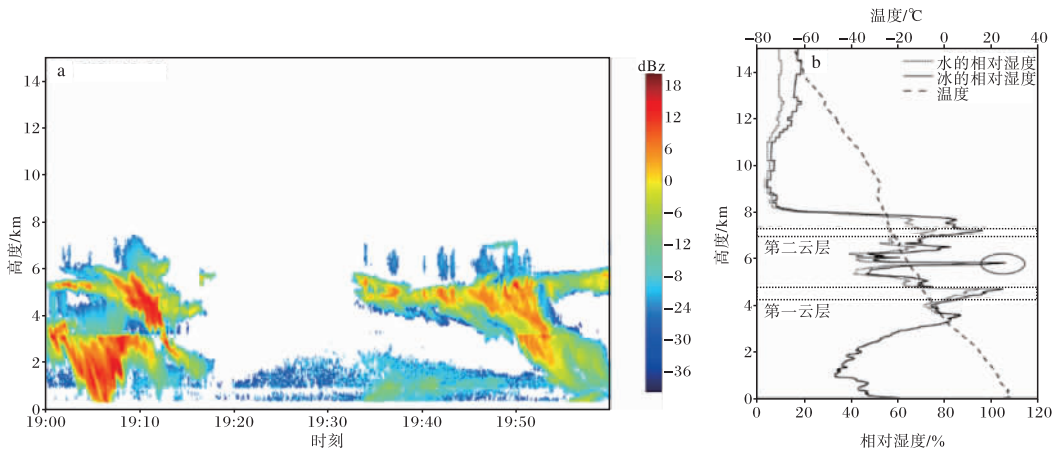


图6 2021-09-20T19—20 泾河国家基本气象站云雷达(a)和探空(b)识别的云垂直结构对比

3 结论

利用2021年9月9日—2022年1月31日泾河国家基本气象站的云雷达及L波段探空数据, 基于云雷达的反射率因子数据, 通过去除地物杂波、云边界质量控制进行云高、云厚及云层数识别, 根据相对湿度阈值法对探空数据的云垂直结构进行了分析, 结合时空匹配方法将二者识别的云垂直结构的一致性进行了对比分析, 并对造成二者云高识别偏差的原因进一步分析, 得到主要结论如下。

(1)在290组匹配数据中, 云雷达和探空识别的云层数一致或都为无云的情况占总体样本比例为85.3%, 且对低、中、高的单层云、双层云及临近降水云五种不同垂直结构的云的识别结果基本一致。

(2)在二者识别云层一致的情况下, 二者对单层云的云底高度识别一致性更好, 相关系数为0.90。对双层和多层云的云顶高度识别一致性较

好, 相关系数为0.80, 且探空识别的云底高度整体略高于云雷达的云底高度。

(3)引起二者识别云层数不一致的原因主要包括: 一是在降水过程前后或者冬季有雾的天气相对湿度较大, 加上相对湿度阈值法在识别云时的敏感性导致; 二是云体的结构比较松散, 加上探空漂移导致二者识别的云体不一致。

(4)二者识别的单层云的垂直结构存在差异是由于探空仪在低温条件下测量相对湿度的滞后性以及云雷达对高层薄云的探测能力引起; 对于双层和多层云的识别不一致说明时空匹配方法对于短时间内垂直结构有明显变化的云的识别还需进一步改进。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report [R]. Cambridge, United

- Kingdom; Cambridge University Press. 2013.
- [2] YANG Y K, ZHAO C F, FAN H. Spatiotemporal distributions of cloud properties over China based on Himawari-8 data [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 240: 104927.
- [3] 赵传峰, 杨以坤. 地基云遥感反演进展及挑战[J]. *暴雨灾害*, 2021, 40(3): 243-258.
- [4] 曹梅, 王斌, 杨珍, 等. 地基微波辐射计与探空数据对比分析[J]. *陕西气象*, 2021(5): 47-54.
- [5] 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, 37(5): 567-571.
- [6] WANG J H, ROSSOW W B. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(10): 2243-2258.
- [7] ZHANG J Q, CHEN H B, LI Z Q, et al. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D7) D00K30.
- [8] 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.
- [9] 蔡森, 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, 38(2): 213-222.
- [10] 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.
- [11] 吕珊珊, 周青, 张勇. 基于毫米波雷达观测及探空反演的云垂直结构对比分析[J]. *气候与环境研究*, 2021, 26(1): 18-30.
- [12] 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): 100-107.
- [13] 李琦, 蔡森, 周毓荃, 等. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征[J]. *大气科学*, 2021, 45(6): 1161-1172.
- [14] KALAPUREDDY M C R, SUKANYA P, DAS S K, et al. A simple biota removal algorithm for 35 GHz cloud radar measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(3): 1417-1436.
- [15] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理学*[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2000: 12-13.
- [16] 李峰, 杨荣康, 邢毅. 我国探空测湿传感器的温、湿特性试验与分析[J]. *南京信息工程大学学报*, 2012, 4(6): 517-521.
- [17] 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, 22(4): 453-462.