氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

基于毫米波雷达观测及探空反演的云垂直结构对比分析

吕珊珊 周青 张勇

Comparison of Cloud Vertical Structure Retrieved from Radiosonde and Millimeter Wave Cloud Radar

L Shanshan ZHOU Qing ZHANG Yong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19133

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于年毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征

Cloud Macro-Physical Characteristics in Beijing Based on Ka Radar Data during 2014-2017

气候与环境研究. 2020, 25(1): 45 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18084

气溶胶激光雷达和无线电探空观测边界层高度的对比分析

Comparitive Analysis of Planetary-Boundary-Layer Height Based on Aerosol Lidar and Radiosonde

气候与环境研究. 2019, 24(5): 650 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19051

淮河流域风场垂直结构特征分析

Analysis of the Vertical Structure of Wind Fields in Huaihe River Valley

气候与环境研究. 2019, 24(3): 333 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18010

CPR雷达探测北半球夏季多层云系结构统计特征分析

Structures of Multi-layer Clouds in Boreal Summer Based on CPR Radar Measurements

气候与环境研究. 2018, 23(1): 124 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17033

山东中西部一次超级单体分裂过程的雷达回波结构和环境条件分析

Analysis of Environmental Conditions and the Structure of Radar Echo for a Supercell Splitting Process in the Midwestern Shandong Province

气候与环境研究. 2020, 25(3): 320 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19022

青藏高原一次冰雹强对流天气过程的诊断及雷达回波特征分析

Diagnostic Analysis and Radar Echo Features of a Hailstorm Severe Convective Weather Process over the Tibetan Plateau

气候与环境研究. 2019, 24(5): 611 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18127

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吕珊珊, 周青, 张勇. 2021. 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, 26(1): 18−30. LÜ Shanshan, ZHOU Qing, ZHANG Yong. 2021. Comparison of Cloud Vertical Structure Retrieved from Radiosonde and Millimeter Wave Cloud Radar [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (1): 18−30. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19133

基于毫米波雷达观测及探空反演的云垂直结构对比分析

吕珊珊 周青 张勇

中国气象局气象探测中心，北京 100081

摘 要 针对北京南郊观象台的 Ka 波段毫米波雷达以及 L 波段探空设备的观测原理和特点，提出了适用于各设备的云垂直结构判定方法，并基于二者 2016 年 12 月 13 日至 2017 年 3 月 13 日长达 91 d 的时空同步观测数据，结合激光云高仪、葵花 8 卫星、全天空成像仪等多源辅助数据，对探空与毫米波雷达观测结果（包括云底高、云顶高、云层数等）进行了对比，并对云高偏差的原因进行了分析，结论如下：毫米波雷达与探空判定的云垂直结构普遍具有较好的一致性，统计时段探空观测云顶高度比毫米波雷达平均高 422 m，而云底高度则平均偏低 350.7 m，导致二者观测云高差异主要包括二者观测原理不同、探空仪湿延迟、气球漂移引起的时空匹配偏差、探空判识云高算法的局限性、降雨时毫米波雷达的衰减等多方面。

关键词 毫米波雷达 探空 云垂直结构 对比 分析

文章编号 1006-9585(2021)01-0018-13 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19133

Comparison of Cloud Vertical Structure Retrieved from Radiosonde and Millimeter Wave Cloud Radar

LÜ Shanshan, ZHOU Qing, and ZHANG Yong

Meteorological Observation Center, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract Owing to the synchronizing continuous observation of Ka-band millimeter-wave cloud radar (MMCR), L-band radiosonde, ceilometer, Himawari-8 satellite, and Total Sky Imager (TSI) from 13 December 2016 to 13 March 2017, at Beijing Nanjiao Weather Observatory (BNWO), the cloud vertical structure (CVS, including cloud bottom height, cloud top height, cloud layers, etc.) derived from radiosonde and MMCR is compared, and the causes of observation deviation are analyzed. The results show that cloud top heights observed by MMCR are lower by 422.0 m on average, while cloud base heights are higher by 350.7 m. Generally, there is a good consistency between them. The difference of physical theory, balloon drifting, attenuation of MMCR during precipitation, and the limitations of algorithm for retrieving CVS, among others, are found to be the main causes of the deviation.

Keywords Millimeter-wave cloud radar, Radiosonde, Cloud vertical structure, Comparison, Analysis

收稿日期 2019-08-30；**网络预出版日期** 2020-08-30

作者简介 吕珊珊，女，1992 年出生，本科，工程师，主要从事云、气溶胶的综合协同观测及应用分析。E-mail: nancy19922008@163.com

通讯作者 周青，E-mail: zhouqing@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划 2017YFC1501802、2017YFC1501701，灾害天气国家重点实验室开放课题 2016LASW-B15

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2017YFC1501802 and 2017YFC1501701), Open Foundation of State Key Laboratory of Disaster Weather of China (Grant 2016LASW-B15)

1　引言

云的形成与消亡伴随着大气垂直运动以及潜热释放和吸收，反映着大气的热力过程和动力过程，并且通过形成、发展、移动及消散过程参与全球水循环。云垂直结构（云顶和云底高度、云层的数量和厚度）通过改变大气中辐射和潜热的分布从而影响大气环流（Wang and Rossow, 1998; Li et al., 2005; Rossow et al., 2005），Crewell et al.（2004）指出云对太阳辐射的多次散射和吸收对大气中的绝热加热有重大影响，而云非绝热加热的垂直梯度相比水平梯度对大气环流的影响更大（Rind and Rossow, 1984）。

为了提高对云物理过程的理解，进而提高大尺度气候模式（包括全球环流模式）的预测能力，需要对云垂直结构进行更准确的观测。以激光雷达、毫米波雷达、激光云高仪等为代表的地基遥感探测设备是云的自动化观测有力工具，其中激光雷达和云高仪能够准确探测云底高度，但由于在云内的波束衰减无法探测云顶，毫米波雷达能够对云垂直结构（包括云顶、云底及云层数等）进行高精度的连续观测，然而在降雨时会受到信号衰减。另一方面，卫星上搭载的被动遥感传感器如国际卫星云气候计划（International Satellite Cloud Climate Project, ISCCP）和中分辨率成像仪（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS）在观测云时也有着各自的不足，例如当光学厚度低于 0.3～0.5 时 ISCCP 无法区分薄云和气溶胶（Rossow and Garder, 1993）；ISCCP 和 MODIS 均对低云量产生低估，而对中云存在高估（Li et al., 2006），虽然星载被动辐射计时间分辨率高，但通常只能给出云顶信息，无法观测云垂直结构。搭载在热带降水测量计划（TRMM）卫星上的降水雷达和微波辐射计尽管能够穿透云和降水获得精细化三维结构，但由于其波段的限制无法观测到小云滴粒子。美国的 Cloudsat 搭载了云廓线雷达（CPR），可以精细探测到云中较小的水滴和冰晶粒子并穿透光学厚度较厚的云层，从而获取星下点附近完整的云垂直结构信息。云—气溶胶激光雷达（CALIOPSO）则可以获得超出 CPR 探测阈值范围的较薄云层信息（谭瑞婷等, 2018），相关研究表明 CALIOPSO-CloudSat 与 ISCCP 以及地面观测资料结合可获得更完整精确的云垂直结构（Naud and Chen, 2010; 方乐锌等, 2016），但由于极轨卫星观测周期长，无法对固定地点开展持续稳定观测。

无线电气球探空因其可以穿越大气层从而测量大气温、湿、压、风等参数，是研究大气物理学和天气动力学过程的基础资料之一，也被用作其他高空探测技术的基础参考资料（Wang et al., 2000; Zhang et al., 2010, 2018）。按照云的热力学特性，未饱和湿空气绝热抬升而达到饱和时就会形成云，因此通过探空获得的大气热力学廓线对判定云垂直结构具有一定的指示意义，目前探空观测云垂直结构方法有温度露点差法（PWR95 法）（Poore et al., 1995）、相对湿度阈值法（WR95 法）（Wang and Rossow, 1995）、二阶导数法（CE96 法）（Chernykh and Eskridge, 1996）等, 这些方法都是基于研究湿度参量（相对湿度、温度露点差等），通过设定其在一定条件下随不同高度的变化阈值进行云高的判别。国内外对于探空与其他地基、天基遥感设备的观测比对开展了大量工作（Zhang et al., 2010; 赵静等, 2017），Naud et al.（2003）利用 1996 年 11 月至 2000 年 10 月期间在 ARM-SGP 站点的主动遥感设备（云高仪、云雷达等）观测数据与基于 WR95 法和 CE96 法的探空观测云高结果进行了对比，发现 WR95 法容易将低层的湿层误判为云层，且这两种方法判定的云顶高度高于云雷达结果。Zhang et al.（2012）通过 2009 年在昆明开展的为期一周的对流层上部及平流层下部观测试验，针对 WR95 法和 CE96 法对低温霜点湿度计、Vaisala 探空仪和国产探空仪 3 种仪器的适用性进行了分析和比较，提出了适合每种探测设备的云垂直结构判定方法（ZHA10、ZHA12 法）。周毓荃和欧建军（2010）认为相对湿度阈值法在判断云层具有连续性和测量的直接性，因此基于相对湿度法，利用我国探空秒数据，计算分析了单层云和多层云的垂直结构，并将得到的分析结果同 Cloudsat 卫星实测云垂直结构进行了对比分析。王喆等（2016）基于改进了的 ZHA10 法研究了云垂直结构，并与毫米波雷达观测结果进行了比对，结果表明毫米波雷达对于某些高层云的云顶高度与探空差异较大以外，对于云底高度以及中低云的云顶高度均与探空一致性较好。总之，这些研究都清楚地肯定了无线电探空仪数据在云垂直结构方面的研究价值，然而不同方法的云观测结果略有差异，并且也与地基主动遥感设备观测结果产生偏差，这主要是由于地基遥感设备采取

的是垂直天顶方向观测，而探空气球由于上升过程中会受到风的影响从而产生水平漂移，不同型号的探空仪引起的漂移偏差程度不同，Wang et al.（2003）发现 Vaisala 探空仪性能优于 Sippican 探空仪，尤其在对流层中低层。

本研究通过获取位于北京南郊观象台 2016 年 12 月 13 日至 2017 年 3 月 13 日长达 91 天连续观测的探空大气廓线数据，利用基于 ZHA12 法改进的相对湿度阈值法（即 ZHA18 法）计算云垂直结构（云底高度、云顶高度及云层数等），并与同址架设的 Ka 波段毫米波雷达（Millimeter-Wave Cloud Radar, MMCR）观测结果进行了一致性比较，并对引起二者观测结果差异的原因进行了分析。

2 观测数据与方法

2.1 探空资料及判定云边界方法

2002 年 1 月 1 日，国产第一部 L 波段高空气象探测系统在中国气象局大气探测综合试验基地（北京南郊观象台，39.81°N，116.47°E，海拔高度 32 m）正式投入业务使用，其中，GTS1 型数字探空仪采样周期为 1.2 s，垂直分辨率约为 8 m。通过 2010 年在广东阳江举办的第 8 届世界气象组织国际探空比对，我国 GTS1 型探空仪与芬兰 Vaisala 温度偏差在 0.4 K 以内，气压和风的偏差均较小，14 km 高度以下湿度偏差约为 4%～6%（李伟等, 2011），因此总体来说国产探空仪的性能是较为可靠的。

通过无线电探空分析云垂直结构主要利用云的含水特性，基于探空所获得的大气温度、湿度廓线来反演云垂直结构。基于前人研究并根据国产探空仪 GTS1 探测性能表现，本研究主要针对以下方面对 ZHA12 法（Zhang et al., 2012）进行改进（简称 ZHA18 法）：1）由于 GTS1 探空仪在高于 500 hPa 的高空存在约 10% 的干偏差（Bian et al., 2011），因此 ZHA12 法中相对湿度阈值都要相应减少 10%；2）ZHA12 法中的最低云底高度均根据当地的天气状况和气候特点进行设置，因此本研究中也应考虑北京地区的实际情况，这里统计了北京南郊观象台 2014 年 1 月至 2017 年 12 月长达 4 年的激光云高仪观测到的低于 500 m 的云底高度频率分布，如图 1 所示，累计出现频率达 50% 处的云底高度值为 290 m，因此这里的最低云底高度设置为 290 m；

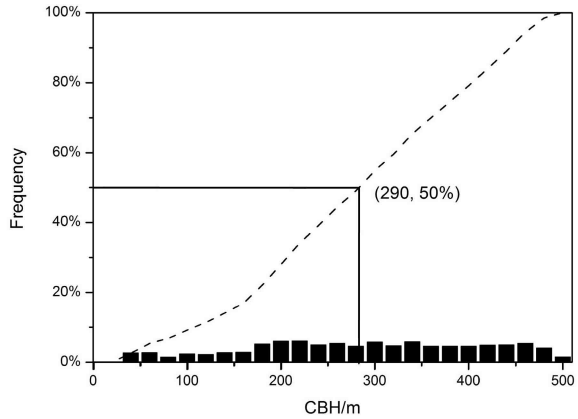


图 1 北京南郊观象台激光云高仪 2014～2017 年观测低于 500 m 云底高度的直方图分布。虚线表示累计频率，实线表示 50% 频率处的云底高度

Fig. 1 Histogram of cloud base height (CBH) lower than 500 m during 2014 –2017 for ceilometer at Beijing Nanjiao Weather Observatory (BNWO). Dashed line indicates the accumulated frequency and solid lines indicate the frequency of 50%

3）ZHA12 法中对云厚的约束条件是：低云>30.5 m，中高云>61 m，而 ZHA10i 法（Costa-Surós et al., 2014）通过比对各种算法将 ZHA10 法的厚度改为 400 m，王喆等（2016）用 ZHA10i 判识的云垂直结构和云雷达进行了比对，发现 ZHA10i 与 ZHA10 相比，避免了将结构松散的单层云识别为多层云，结果更准确合理，这里也对云厚条件进行修正：低云>400 m，中高云>300 m。

因此，ZHA18 法估算云高的算法主要包括以下几方面：1）当温度低于 0 ℃ 时，采用马格努斯方程计算基于冰面的相对湿度（Zhang et al., 2012）；2）依据相对湿度阈值（包括 min-RH、max-RH 和 inter-RH）是高度的函数，不同高度选取不同阈值来进行判断，自下而上进行判定，将相对湿度观测值超过该高度上（见表 1）min-RH 阈值时的高度作为湿层底高。3）当湿层底高以上高度层的相对湿度持续高于 min-RH 时，该高度层将视为同一云层，直到相对湿度降到 min-RH 以下或超过廓线顶层时，则将高度层作为该湿层的顶高；4）湿层可视为云层的判断条件是：湿层的相对湿度最大值高于该湿层底高对应的 max-RH。5）最低云底高度设为 290 m，低于该高度的云层将不考虑。6）判断两云层是否合并的条件是：两个邻近云层间距小于 300 m 或者这两层之中的相对湿度均大于 inter-RH。7）如果低云厚度小于 400 m 或中/高云厚度小于 300 m，则删除该云层。

表 1　与高度相关的相对湿度阈值（ZHA18 法）

Table 1　Relative humidity threshold that varies with height (ZHA18 method)

高度范围/km	相对湿度阈值		
	min-RH	max-RH	inter-RH
0~2	83%	85%～84%	84%～83%
2～8	83%～82%	84%～83%	83%～82%
8～14	82%～80%	83%～81%	82%～79%
>14	80%	81%	79%

2.2　毫米波雷达资料及判定云边界方法

用于和探空进行比对的毫米波雷达布设在探空气球施放地点东侧 158 m 处，是一部 Ka 波段全固态、全相参、脉冲多普勒雷达，型号为 HT101 型，由中国气象局气象探测中心和西安华腾微波有限责任公司联合研制。该雷达采用 2 μs、5 μs、20 μs 这三种脉冲宽度交替发射的模式，即采用宽脉冲和窄脉冲交叉使用，采用宽脉冲进行发射从而提高平均功率，保证了雷达系统具有探测距离≥10 km 的能力；而在接收机中设置一个与发射信号频谱相匹配的压缩网络，使宽脉冲的发射信号变成窄脉冲，保证雷达系统近距离遮挡盲区≤0.1 km，从而提高距离分辨率。Ka 波段毫米波雷达的大时宽信号脉冲宽度为 20 μs，扩大了探测距离，脉冲压缩比为 100，而小时宽信号压缩后脉冲宽度为 0.2 μs，使其返回信号的距离分辨率达到 30 m，因此保持了良好的距离分辨力，从而满足了精细化探测需求（仲凌志等, 2011）。雷达垂直指向天顶观测，垂直分辨率 30 m，时间分辨率为 1 min。毫米波雷达利用云粒子对毫米波的散射特性反演云的宏观和微观结构，能够连续监测云的水平和垂直结构变化，时空分辨率高，抗干扰性好，具有较好的多普勒分辨力，测速精度较高（Hobbs et al., 1985; Kollias et al., 2007），可以提供云体内部细微的结构变化和运动情况。

对于云顶高度、云底高度等宏观垂直结构的确定，国内外学者一般通过利用毫米波雷达反射率数据来反演，包括数据质量控制、云信息识别等过程。本研究主要采用以下两步来识别云高：

（1）基于神经网络算法消除干扰回波及低空非气象杂波。毫米波雷达常见杂波包括低空浮游物（昆虫、鸟类等）、随机干扰信号等，这里主要参考 Luke et al.（2008）方法，通过提取雷达反射率因子、速度、谱宽和功率谱数据等多个特征，然后采用后向反馈（BP）神经网络对这些回波特征进行训练分类，完成对非气象回波的识别。

（2）采用反射率阈值法确定云边界并进行质量控制。Clothiaux et al.（1999）利用美国大气辐射测量计划（ARM）的 35 GHz 毫米波雷达对不同类型的云（包括卷云、层云、降水云等）进行了分析，认为云的雷达反射率因子动态范围为－50~20 dB*Z*，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为−40 dB*Z*，将高于－40 dB*Z* 的距离库提取出来视为云回波。从毫米波雷达获取的每条廓线自下而上判断，当某个距离库反射率≥−40 dB*Z*，则将其所在高度作为云底位置，继续往上判断只要高于阈值便视为同一云层，直到遇到反射率低于−40 dB*Z* 并将此距离库高度作为该层云的云顶高度，依此类推判断第二层云，直到整条廓线判断完毕。此外，为避免将一层结构松散的云误判为不同层的云，要对找到的云边界进行质量控制。这里采用王喆等（2016）判断云边界的方法，对于厚度小于 210 m 云层，如果其与上下库的间隔大于 720 m，就删除这层云；否则将其与前后较邻近的云层合并。

2.3　其他观测资料

为了进行更全面细致地比对，这里还获取了对应时段的激光云高仪观测云底高度、葵花 8 卫星（Himawari-8，简称 HW8）观测云顶高度以及可见光全天空成像仪的拍摄照片用以辅助参考。其中激光云高仪位于毫米波雷达西南侧约 64 m 处，每 1 min 可获得云底高度产品。可见光全天空成像仪也与毫米波雷达同址架设，通过全天空镜像拍摄获取天空可见光亮度（辐射）分布，根据云天的天空亮度（辐射）小于晴空的原理来区分云和晴空（高太长等, 2010），每 10 min 可拍摄一张 4288×2848 像素的照片。HW8 卫星搭载了许多具有高光谱、高时空分辨率的先进传感器，其观测数据被广泛应用于天气预报、气候研究、地表监测、水文服务等各个领域，国内外利用 HW8 卫星观测产品与地基遥感设备开展联合观测和比较研究，并进行云的气候态特征分析，例如 Chen et al.（2018）利用 HW8 数据对 2016 年京津冀地区夏季的云顶高度分布情况开展了研究，Zhou et al.（2019）利用北京南郊观象台毫米波雷达观测云顶高度和云底高度，分别与同时段的 HW8 卫星观测云顶高度以及激光云高

仪观测云底高度数据进行比对验证，并着重分析了降水对观测差异的影响。本文利用国家卫星气象中心开发的 FYGAT 算法（Min et al., 2017）反演计算得到了云顶高度产品，时间分辨率为 10 min，空间分辨率为 2 km，这里按照最邻近法提取了距离南郊观象台最近的格点数据。北京南郊观象台毫米波雷达、激光云高仪和探空的相对位置如图 2 所示。

本研究选取了 2016 年 12 月 13 日至 2017 年 3 月 13 日共计 91 天的毫米波雷达、激光云高仪和葵花 8 卫星连续观测资料以及每日两个时次的北京市观象台探空资料。其中探空放球时间分别为 07:15（北京时间，下同）和 19:15，每次探空持续时间约为 90 min。毫米波雷达观测模式为垂直天顶向上，每 1 min 观测的是固定地点瞬时的云信息；而探空仪则由于气球上升导致入云和出云之间有一定时间差，尤其对于局地变化较快的云来说会带来一定的云垂直结构观测偏差。王喆等（2016）考虑两种匹配方法，一是假定风对气球和云的移动同时产生影响，二者的水平移动是一致的，因此选择固定时刻作为二者的观测时刻匹配；二是考虑到气球在对流层上升大概需要 1 h，取毫米波雷达在施放探空气球后的 1 h 的平均云高来进行二者的时空匹配，并且通过试验分析发现第 2 种匹配方式有效个例更多，因此本文参照王喆等（2016）的匹配方式，选择 07:00 至 08:00、19:00 至 20:00 的毫米波雷达云高平均值来与探空进行比对。

3 探空与毫米波雷达观测实例分析

研究时段内按照上述时空匹配方法共产生 182 组匹配数据，二者观测云层数一致或都观测为无云的情况为 128 个，占比例的 70.4%；一方判识有云而另一方判断无云的情况为 34 个，占比 18.7%；二者均判断有云但云层数不一致的情况为 20 个，

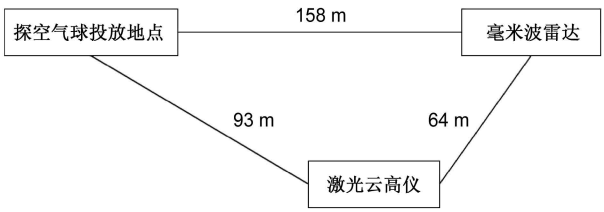


图 2 毫米波雷达、激光云高仪和探空气球投放点的空间位置

Fig. 2 Position of millimeter-wave cloud radar (MMCR), ceilometer, and radiosonde

占比 11%。探空与毫米波雷达同时观测到云的情况为 47 个，其中毫米波雷达观测到单层云 27 个，双层云 15 个，三层及以上云 5 个，探空观测到单层云 27 个，双层云 9 个，三层及以上云 11 个。

对探空和毫米波雷达同时观测云情况下的云顶高度、云底高度进行比较，对于多层云，取最下层云的云底和最上层云的云顶用于比对，如图 3 所示，二者总体上基本一致，其中探空平均云顶高度为 7174 m，云底高度为 4120.5 m，而毫米波雷达平均云顶高度为 6751.6 m，云底高度为 4471.2 m。因此毫米波雷达观测云顶高度平均低于探空约 422 m，标准差为 1494 m，毫米波雷达观测云底高度则平均高于探空约 350.7 m，标准差为 1557 m。

为更直观详细地比较毫米波雷达和探空观测结果，从这 47 个共同观测有云样本中按照不同类型的云选取出代表性个例（图 4）来分析。图 4a1 观测时间为 2016 年 12 月 21 日 08:00，从毫米波雷达回波图上可以看出该时刻为较厚的均匀层状云，07:00 至 08:00 云底高度和云顶高度平均值分别为 1632 m、7640 m，同时期探空探测到 1803～7906 m 范围的单层云，厚度约为 6100 m，与毫米波雷达观测结果较为一致。图 4a2 观测时间为 2017 年 1 月 7 日 08:00，毫米波雷达与探空均观测到结构紧凑的双层云，探空观测下层云的云底高度与毫米波云雷达非常一致，仅相差 25 m，而探空观测到上层云的云顶高度则偏高约 400 m，从图中还可看到激光云高仪观测云底相对云雷达偏高。图 4a3 观测时间为 2017 年 1 月 5 日 08:00，从可见光全天空成像仪图像（图 5a）上来看，天空布满均匀的雨层云，云底很低，两者均分析出三层云，且每层云的云高位置均较一致。图 4a4 和图 4b4 中毫米波雷达与探空均分析出双层云，对于第一层云探空云底高度相比毫米波雷达偏低约 500 m，而对于第二层云探空云顶高度相比毫米波雷达偏高约 900 m，此例中通过 WR95 法未识别出 8 km 处的第二层云（图 4c），而通过与毫米波雷达以及全天空成像仪（图 5b）进行对比验证了第二层云的存在，因此 ZHA18 法通过在高层降低相对湿度阈值来判识云相比 WR95 法更具有合理性。

4 探空与毫米波雷达观测偏差分析

尽管上述实例中探空与毫米波雷达观测一致性

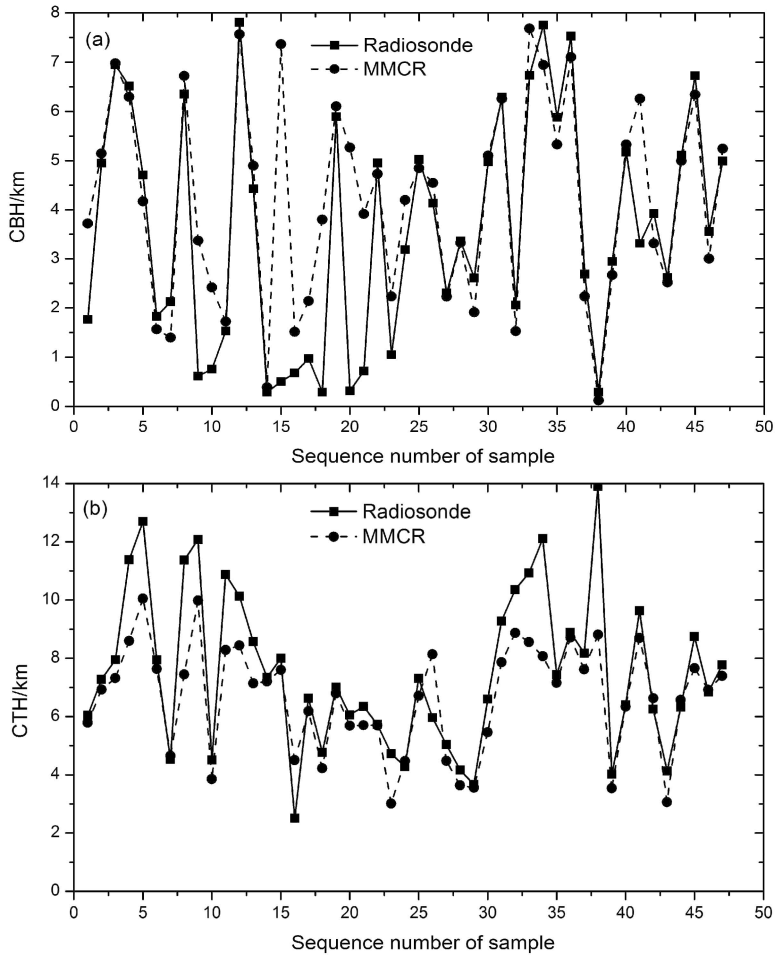


图 3　探空与毫米波雷达云高比较曲线：（a）云底高度；（b）云顶高度。横坐标表示两者共同观测到云的样本序号

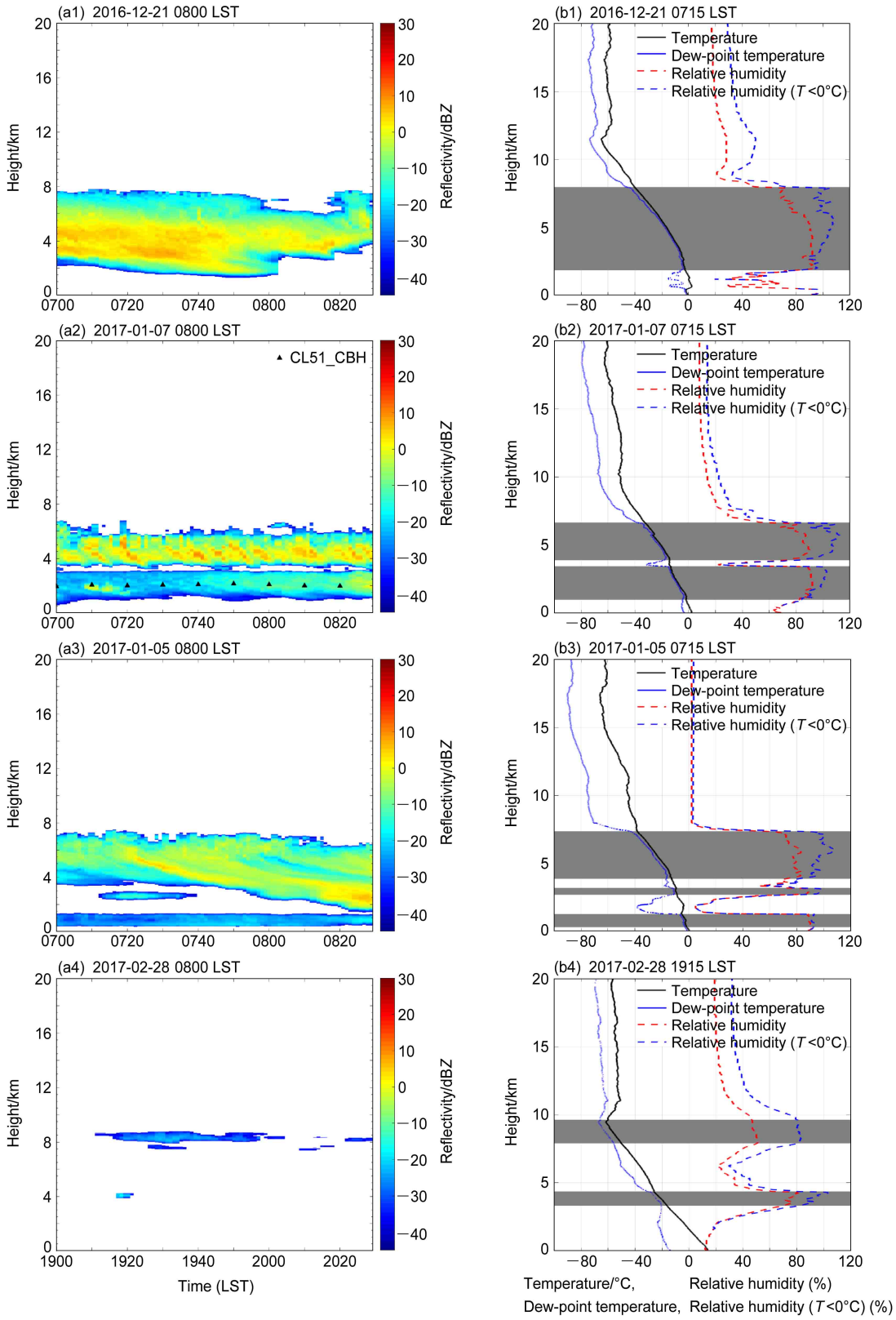
Fig. 3　Comparisons of cloud height observations by MMCR and radiosonde: (a) Cloud base height (CBH); (b) cloud top height (CTH). The abscissa indicates the sequence of samples simultaneously observed by MMCR and radiosonde

较好，然而统计时段中仍有一些个例二者观测云边界偏差较大，这里选取典型个例逐一分析，引起二者云高偏差较大的原因主要包括二者观测原理不同、探空仪湿延迟、二者观测方式不同引起的时空匹配偏差、设备判识云高算法的局限性、降雨时毫米波雷达的衰减等。

首先，探空与毫米波雷达由于观测原理和方法不同，结果存在一定偏差。从热力学特性来看，湿空气块因绝热抬升达到饱和的高度为云底形成的理论高度，此时探空观测到的相对湿度持续稳定在较高数值，而对于毫米波雷达而言，此时虽然水汽达到饱和开始形成云滴，但还不足以对雷达产生散射回波，毫米波雷达对云粒子产生回波需要满足两个条件：一是浓度要求，即单位体积内达到一定数量的云滴粒子，二是云滴粒径要达到一定尺寸大小，只有湿空气块进一步抬升过程才能达到要求，因此毫米波雷达观测云底比探空总体偏高。

其次，毫米波雷达和探空观测方式不同导致了观测目标的时空匹配偏差。毫米波雷达通过垂直天顶观测获得的是当前时刻当前位置的云信息，而探空气球由于始终在上升并且在水平方向上还会受到风的影响产生位置漂移，因此有可能二者观测到的并不是同一片云。这里统计了研究时段内各条探空廓线数据在 1～15 km 范围内各高度的水平漂移量，用“箱图”来表示（图 6）。由图可知，2 km 的垂直高度（代表低云的最大高度范围）产生的漂移量为 0.34～9.88 km 之间，平均值为 3.69 km；在 6 km 高度上（代表中云和高云的分界），漂移量扩展到 4.19～29.33 km，平均值为 15.56 km；当达到 15 km 的高度，漂移量已经达到 29.73～112.42 km，平均值达到 68.21 km。因此，由于探空气球的水平漂移引起的与毫米波雷达时空匹配差异会导致云垂

直结构的观测偏差。在毫米波雷达和探空观测云顶高度偏差较大的样本中，统计毫米波雷达探测到云顶高度时探空气球产生的水平漂移距离，如图 7 所示，可见二者云顶高度差异较大的样本，他们的水平漂移距离一般都较大，例如 2017 年 2 月 15 日 20:00（样本序号 36）探空观测云顶高度比毫米波



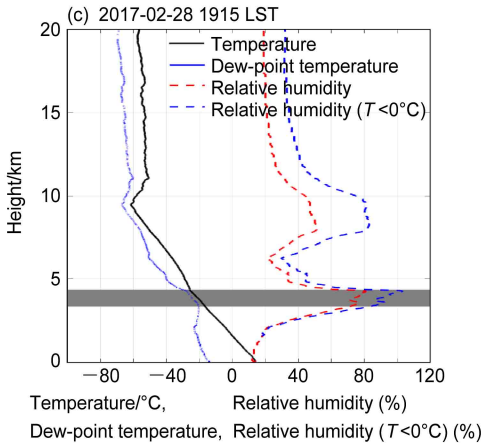


图 4　（a1−a3）毫米波雷达（a2 中三角形表示同时段激光云高仪 CL51 观测到的云底高度）与（b1−b3）探空观测云垂直结构对比个例分析，（a4）毫米波雷达反射率、（b4）ZHA18 法及（c）WR95 法在同一天判识的探空云垂直结构。灰色区域表示云区

Fig. 4　Comparisons of different cloud vertical structure cases derived from (a1−a3) MMCR and (b1−b3) radiosonde observations; (a4) MMCR radar reactivity, cloud vertical structure radiosonde observations from (b4) ZHA18method and (c) WR95 method. Gray areas denote cloud areas

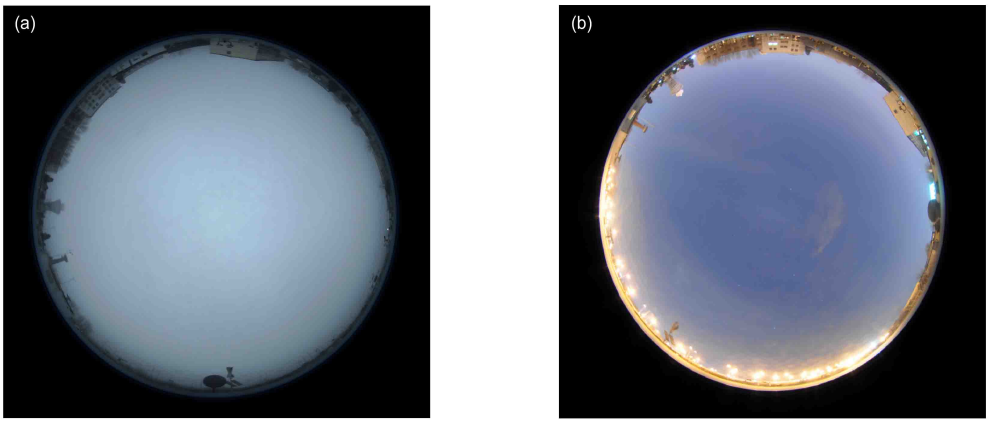


图 5　2017 年（a）1 月 5 日 08:00 和（b）2 月 28 日 20:00 的可见光全天空成像仪图像

Fig. 5　Photos taken by Total Sky Imager (TSI) at (a) 0800 LST 5 Jan 2017 and (b) 2000 LST 28 Feb 2017

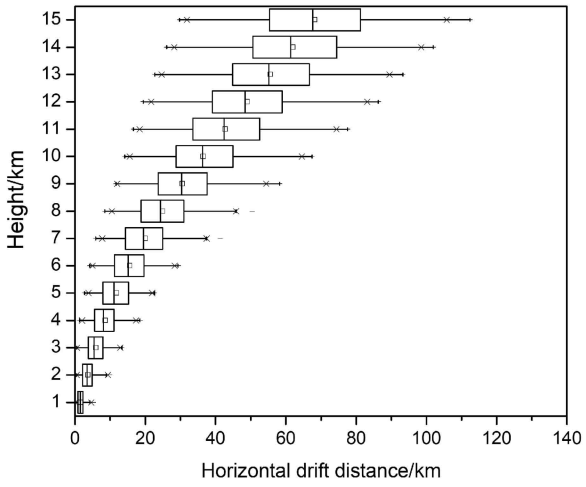


图 6　各垂直高度上的水平偏移量箱图

Fig. 6　Boxplot showing the displacement of the radiosonde launched from Beijing in every 1 km in height

雷达高 4 km，而探空气球在云顶处的水平漂移距离超过了 30 km，因此二者也许探测到的不是同一目标云，时空匹配的偏差导致了观测结果的差异。根据王喆（2018）研究结论，北京南郊观象台上空受中纬度西风带影响，8 km 高度上探空气球一般向东偏移，因此与地基固定遥感设备铅直方向探测相比，探空气球的水平漂移确实是一个问题，因此对于较均匀、中低高度的云而言，毫米波雷达和探空观测协同性较好。

除了探空气球漂移情况，国产探空仪搭载的温湿传感器对环境变化的响应时间存在滞后也是导致二者偏差的原因。李伟等（2009）通过研究发现，GTS1 型探空仪温度传感器时间常数大，湿度传感器为碳膜湿敏电阻，在低温（尤其是−30℃ 以下）环境下湿度变化幅度明显变小，滞后性远大于常温，

测量稳定性略差。例如 2016 年 12 月 20 日 20:00（图 8）毫米波雷达观测云顶高度平均值为 10.05 km，而探空观测云顶高度超过 12 km，可以看到 10 km 以上高度气温降到−50℃ 以下，湿度随高度缓慢下降，因此湿度传感器的湿延迟使得探空观测云顶高于毫米波雷达，除此之外，毫米波雷达对含有小颗粒的云顶探测灵敏度不足也是导致二者云顶高度偏差的原因。

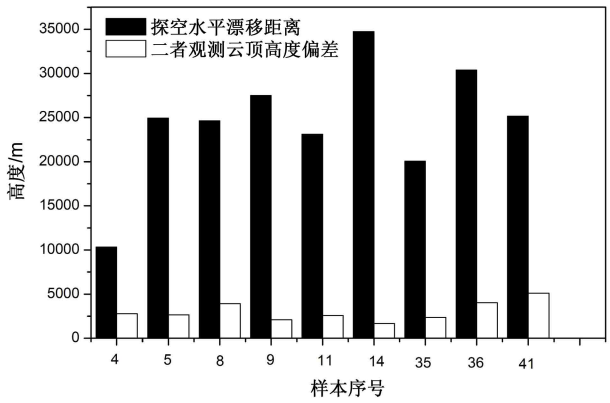


图 7　云顶高度差异较大的样本探空水平漂移情况

Fig. 7　Displacement of radiosonde in cases with larger CTH differences between radiosonde and MMCR

此外，毫米波雷达在下雨时受到衰减，导致所观测的云顶高度相比探空偏低。例如图 9 表示 2017 年 2 月 21 日两者观测的云垂直结构对比，图中可看到毫米波雷达反射率因子最强达到 30 dBZ 且回波接地，清晰地反映出了降水现象，探空探测相对湿度从近地面到高空约 5 km 均大于 90%，表示较厚的水汽层，与云雷达观测结果一致，当天自动站于 13:00 开始产生间歇性小雪，从全天空成像仪（图 10a）来看为雨层云，天空零星飘着雪花，至 23:00 累计降水量为 5.4 mm，其中 19:00 至 20:00 降水量为 1.5 mm，该时段毫米波雷达、探空

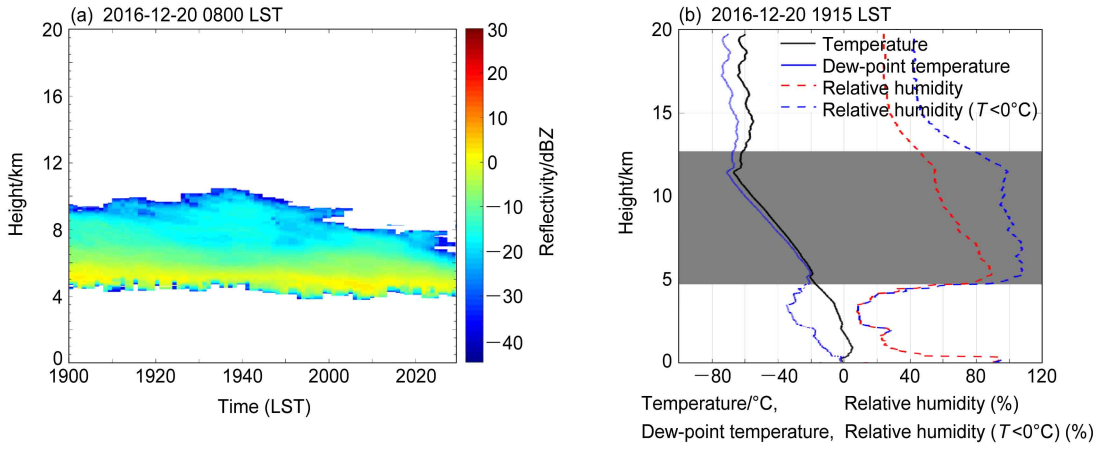


图 8　2016 年 12 月 20 日（a）毫米波雷达与（b）探空得到的云垂直结构对比

Fig. 8　Comparison of cloud vertical structure derived from (a) radar and (b) radiosonde observations on 20 Dec 20 2016

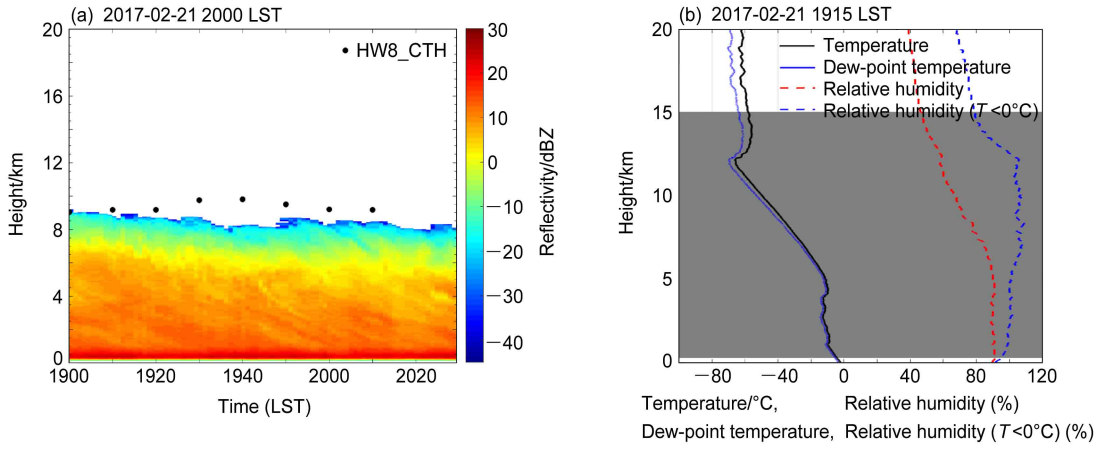


图 9　2017 年 2 月 21 日（a）毫米波雷达（圆形表示葵花 8 卫星观测到的云顶高度）与（b）探空观测云垂直结构对比

Fig. 9　Comparison of cloud vertical structure derived from (a) radar (CTHs observed by HW8 are denoted by circle) and (b) radiosonde observations on 21 Feb 2017

观测云底高度均低于 500 m，一致性较好，而探空观测云顶高度相对最高，为 15064 m，葵花 8 卫星反演得到云顶高度平均为 8909～9802 m，毫米波雷达观测云顶相对最低，平均为 8810 m。这是因为毫米波雷达在观测气象目标物时均会受到不同相态降水粒子对雷达电磁波衰减的影响（Lhermitte, 1990）。王金虎等（2017）通过研究液相和冰相降水粒子对不同频率毫米波雷达的衰减特性影响，发现 35 GHz 毫米波雷达衰减系数随着冰相粒子降雨率增大而增大。

探空判识云高算法的局限性也可能导致二者观测云高偏差。图 11 表示 2016 年 12 月 25 日 08:00 的对比个例，毫米波雷达探测到两层云，而探空则探测到三层云，毫米波雷达观测第一层云的云底高度为 2523 m，第二层云的云顶高度为 9980 m，探空相比毫米波雷达则在低空多判识出一层云，云底高度为 618 m。从探空温湿度廓线来看，在近地面约 300 m、1000 m、3300 m 处出现了不同程度的逆温，大气层结比较稳定，全天空成像仪显示为蔽光性波状云（图 10b），并且自动站 08:00 观测低云量为 0，天气现象为“霾”，因此探空在低层识别的云层有可能为误判。图 12 为 2017 年 1 月 6 日 08:00 的另一个个例，毫米波雷达探测到一丝较薄的卷云，平均云底高度在 7365 m，云顶高度为 7605 m，而探空观测到两层云，上层云云高与云雷达较一致，而低层探测到约 1500 m 厚度的低云，云底高度约 500 m，两者相差较大。结合其他观测结果来看，自动站 08:00 观测低云量为 0，天气现象为“霾”，当天的 PM2.5 数据也显示空气中气溶胶粒子浓度较大（图 13），这两个例子均说明低空气溶胶吸湿后导致某一层相对湿度偏高，探空

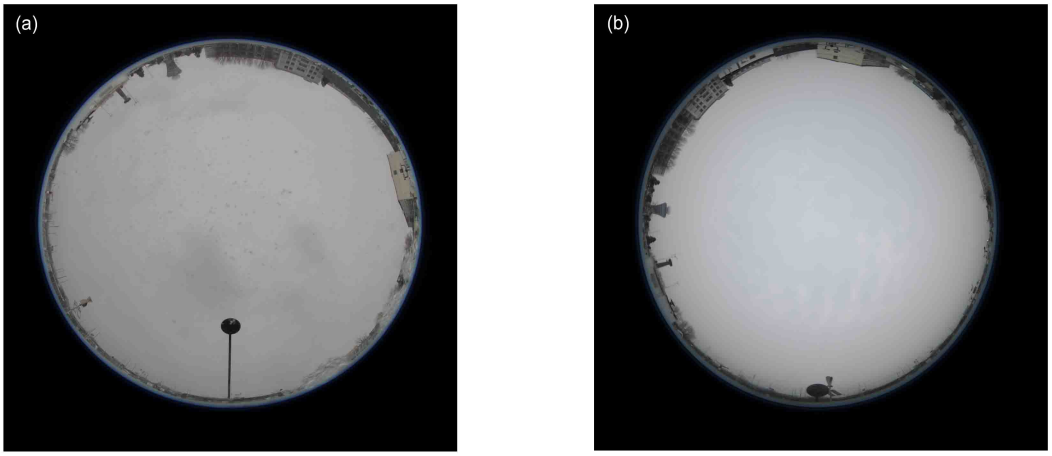


图 10　（a）2017 年 2 月 21 日 13:00 与（b）2016 年 12 月 25 日 08:00 可见光全天空成像仪图

Fig. 10　Photos taken by Total Sky Imager (TSI) at (a) 1300 LST 21 Feb 2017 and (b) 0800 LST 25 Dec 2016

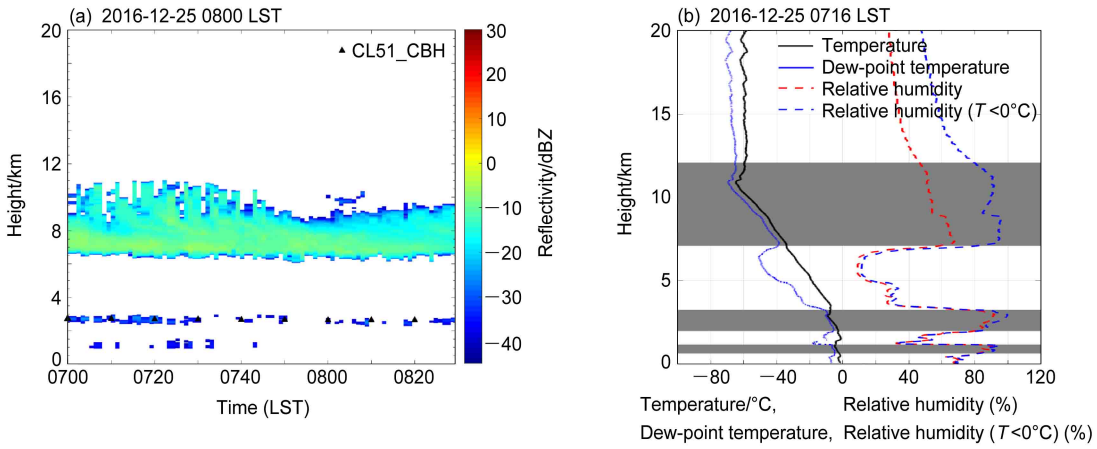


图 11　2016 年 12 月 25 日 08:00（a）毫米波雷达与（b）探空观测云垂直结构对比

Fig. 11　Comparison of cloud vertical structure derived from (a) radar and (b) radiosonde observations at 0800 LST 25 Dec 2016

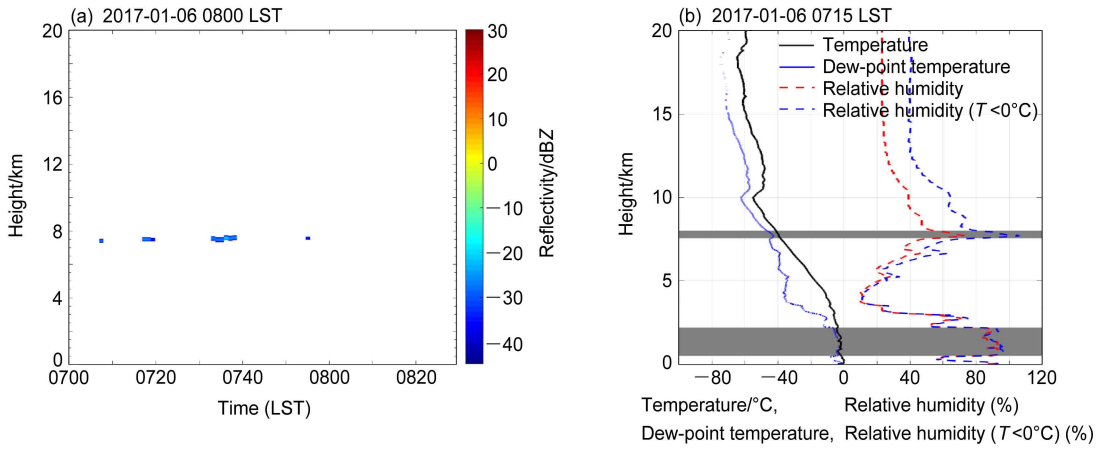


图 12 同图 11，但为 2017 年 1 月 6 日

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for 6 Jan 2017

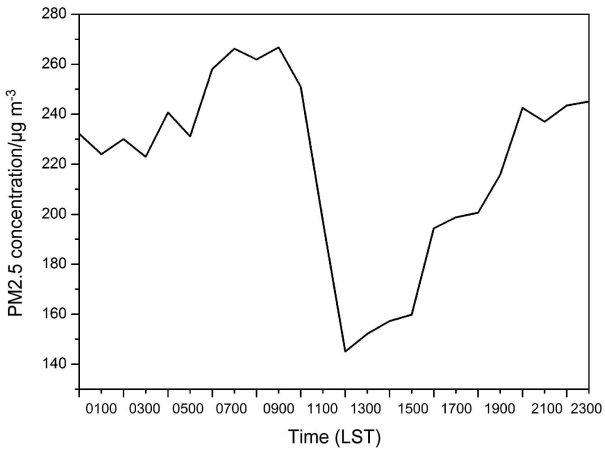


图 13 2017 年 1 月 6 日 00:00 至 23:00 的 PM2.5 浓度变化

Fig. 13 Time series of PM2.5 concentration from 0000 LST to 2300 LST 6 Jan 2017

将低空气溶胶吸湿后与水汽混合形成的稳定湿层误判为云层，而该湿层虽然达到饱和但由于粒径大小和浓度均达不到毫米波雷达产生散射回波的要求，因此该情况下毫米波雷达探测结果相对准确，这也表明了利用多种遥感技术手段进行比对校验的重要性。

5 小结

本文获取了 2016 年 12 月 13 日至 2017 年 3 月 13 日长达 91 天的北京南郊观象台 Ka 波段毫米波雷达以及 L 波段探空的时空同步连续观测数据，基于改进了的相对湿度阈值法（ZHA18 法）计算云垂直结构，基于毫米波雷达反射率因子数据通过神经网络去除杂波、云边界质量控制进行云高识别，通过时空匹配，并结合激光云高仪、葵花 8 卫星、全天空成像仪等多源数据将探空与毫米波雷达观测的云垂直结构（包括云底高、云顶高、云层数等）进行了一致性比较，并对二者云高偏差的原因进行了进一步的分析，结论如下：

（1）毫米波雷达与探空观测云垂直结构的一致性总体较好。在 182 组匹配数据中，毫米波雷达和探空观测层数一致或都为无云的情况占总体样本比例为 70.4%；平均而言，探空观测云顶高度比毫米波雷达平均高 422 m，而云底高度则平均偏低 350.7 m，且通过多源设备互相校验说明了本研究中采用的 ZHA18 法通过在高层降低相对湿度阈值来判识云相比 WR95 法更具有合理性。

（2）针对探空观测云底偏低、云顶偏高的现象进行了差异分析，认为差异主要包括二者观测原理不同、探空仪湿延迟、二者观测方式不同引起的时空匹配偏差、探空判识云高算法的局限性、降雨时毫米波雷达的衰减等多方面。由于探空气球上升过程中产生水平漂移，而毫米波雷达则是固定地点垂直天顶观测，因此二者时空匹配偏差导致了云高观测结果的差异，此外国产探空仪搭载的温湿传感器对环境变化的响应滞后也是导致探空观测云顶偏高的原因之一。毫米波雷达在下雨时受到衰减，则将会导致观测云顶高度偏低。此外，ZHA18 法有时会将水汽和气溶胶混合的低空湿层误判为云层，需要结合其他观测结果进行校验改进。

总之，本文运用探空和毫米波雷达识别的云垂直结构在北京冬春季具有较好的一致性，如何进一步改进各设备判识云垂直结构的方法，提高综合气象观测设备比对校验的效率和应用价值是未来需要开展的工作。

致谢　感谢北京气象探测中心李林以及中国气象局大气探测试验基地陶法、王志成等相关人员提供数据支持。

参考文献（References）

Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al. 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH [J]. Adv. Atmos. Sci., 28(1): 139−146. doi:10.1007/s00376-010-9170-8

Chen D D, Guo J P, Wang H Q, et al. 2018. The cloud top distribution and diurnal variation of clouds over East Asia: Preliminary results from advanced himawari imager [J]. J. Geophys. Res., 123(7): 3724−3739. doi:10.1002/2017JD028044

Chernykh I V, Eskridge R E. 1996. Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings [J]. J. Appl. Meteor., 35(8): 1362−1369. doi:10.1175/1520-0450(1996)035<1362:docaal>2.0.co;2

Clothiaux E E, Moran K P, Martner B E, et al. 1999. The atmospheric radiation measurement program cloud radars: Operational modes [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 16(7): 819−827. doi:10.1175/1520-0426(1999)016<0819:TARMPC>2.0.CO;2

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 [J]. Atmos. Meas. Tech., 7(8): 2757−2773. doi:10.5194/amt-7-2757-2014

Crewell S, Bloemink H, Feijt A, et al. 2004. The Baltex Bridge Campaign: An integrated approach for a better understanding of clouds [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85(10): 1565−1584. doi:10.1175/bams-85-10-1565

方乐锌, 李昀英, 孙国荣, 等. 2016. 基于 CloudSat–CALIPSO 资料的全球不同类型云的水平和垂直分布特征 [J]. 气候与环境研究, 21(5): 547−556.　Fang Lexin, Li Yunying, Sun Guorong, et al. 2016. Horizontal and vertical distributions of clouds of different types based on CloudSat–CALIPSO data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(5): 547−556. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15240

高太长, 刘磊, 赵世军, 等. 2010. 全天空测云技术现状及进展 [J]. 应用气象学报, 21(1): 101−109.　Gao Taichang, Liu Lei, Zhao Shijun, et al. 2010. The actuality and progress of whole sky cloud sounding techniques [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 21(1): 101−109. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.014

Hobbs P V, Funk N T, Weiss Sr R R, et al. 1985. Evaluation of a 35 GHz radar for cloud physics research [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2(1): 35−48. doi:10.1175/1520-0426(1985)002<0035:EOAGRF>2.0.CO;2

Kollias P, Szyrmer W, Zawadzk I, et al. 2007. Considerations for spaceborne 94 GHz radar observations of precipitation [J]. Geophys. Res. Lett., 34(21): L21803. doi:10.1029/2007GL031536

Lhermitte R. 1990. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 7(3): 464−479. doi:10.1175/1520-0426(1990)007<0464:AASOMW>2.0.CO;2

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 [J]. 气象, 35(10): 97−102.　Li Wei, Xing Yi, Ma Shuqing. 2009. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of vaisala company [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35(10): 97−102. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.10.012

李伟, 赵培涛, 郭启云, 等. 2011. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果 [J]. 应用气象学报, 22(4): 453−462.　Li Wei, Zhao Peitao, Guo Qiyun, et al. 2011. The international radiosonde intercomparison results for China-made GPS radiosonde [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 22(4): 453−462. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2011.04.008

Li Y, Liu X, Chen B. 2006. Cloud type climatology over the Tibetan Plateau: A comparison of ISCCP and MODIS/TERRA measurements with surface observations [J]. Geophys. Res. Lett., 33(17): L17716. doi:10.1029/2006gl026890

Li Z Q, Cribb M C, Chang F L, et al. 2005. Natural variability and sampling errors in solar radiation measurements for model validation over the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains region [J]. J. Geophys. Res., 110(D15): D15S19. doi:10.1029/2004jd005028

Luke E P, Kollias P, Johnson K L, et al. 2008. A technique for the automatic detection of insect clutter in cloud radar returns [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 25(9): 1498−1513. doi:10.1175/2007jtecha953.1

Min M, Wu C Q, Li C, et al. 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series [J]. J. Meteor. Res., 31(4): 708−719. doi:10.1007/s13351-017-6161-z

Naud C M, Chen Y H. 2010. Assessment of ISCCP cloudiness over the Tibetan Plateau using CloudSat-CALIPSO [J]. J. Geophys. Res., 115(D10): D10203. doi:10.1029/2009JD013053

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]. J. Geophys. Res., 108(D4): 4140. doi:10.1029/2002jd002887

Poore K D, Wang J H, Rossow W B. 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. J. Climate, 8(3): 550−568. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0550:CLTFAC>2.0.CO;2

Rind D, Rossow W B. 1984. The effects of physical processes on the hadley circulation [J]. J. Atmos. Sci., 41(4): 479−507. doi:10.1175/1520-0469(1984)041<0479:TEOPPO>2.0.CO;2

Rossow W B, Garder L C. 1993. Validation of ISCCP cloud detections [J]. J. Climate, 6(12): 2370−2393. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<2370:VOICD>2.0.CO;2

Rossow W B, Zhang Y C, Wang J H. 2005. A statistical model of cloud vertical structure based on reconciling cloud layer amounts inferred from satellites and radiosonde humidity profiles [J]. J. Climate, 18(17): 3587−3605. doi:10.1175/jcli3479.1

谭瑞婷, 冼桃, 傅云飞. 2018. CPR 雷达探测北半球夏季多层云系结构统计特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23(1): 124−138.　Tan Ruiting, Xian Tao, Fu Yunfei. 2018. Structures of multi-layer clouds

in boreal summer based on CPR radar measurements [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(1): 124−138. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17033

Wang J H, Rossow W B. 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations [J]. J. Appl. Meteor., 34(10): 2243−2258. doi:10.1175/1520-0450(1995)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2

Wang J H, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. J. Climate, 11(11): 3010−3029. doi:10.1175/1520-0442(1998)011<3010:eocvso>2.0.co;2

Wang J H, Rossow W B, Zhang Y H. 2000. Cloud vertical structure and its variations from a 20-yr global rawinsonde dataset [J]. J. Climate, 13(17): 3041−3056. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3041:cvsaiv>2.0.co;2

Wang J H, Carlson D J, Parsons D B, et al. 2003. Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dew-point hygrometer and its climate implication [J]. Geophys. Res. Lett., 30(16): 1860. doi:10.1029/2003gl016985

王金虎, 葛俊祥, 魏鸣, 等. 2017. 两种相态降水粒子对微波、毫米波衰减特性的影响分析 [J]. 遥感技术与应用, 32(6): 1048−1055. Wang Jinhu, Ge Junxiang, Wei Ming, et al. 2017. Effects analysis of two-phase precipitations on microwave and millimeter-wave attenuation characteristics [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 32(6): 1048−1055. doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.1048

王喆. 2018. 基于地基毫米波雷达等多种资料的云高观测对比研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 53pp. Wang Zhe. 2018. Comparative analysis on cloud height data derived from a ground-based millimeter-wave radar and other instruments [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information science and Technology, 53pp.

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 [J]. 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 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74(5): 815−826. doi:10.11676/qxxb2016.057

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]. J. Geophys. Res., 115(D7): D00K30. doi:10.1029/2010jd014030

Zhang J Q, Chen H B, Bian J C, et al. 2012. Development of cloud detection methods using CFH, GTS1, and RS80 radiosondes [J]. Adv. Atmos. Sci., 29(2): 236−248. doi:10.1007/s00376-011-0215-4

Zhang Y, Zhang L J, Guo J P, et al. 2018. Climatology of cloud-base height from long-term radiosonde measurements in China [J]. Atmos. Sci., 35(2): 158−168. doi:10.1007/s00376-017-7096-0

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. Zhao Jing, Cao Xiaozhong, Dai Taogao, et al. 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(1): 101−107. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.011

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. Zhong Lingzhi, Liu Liping, Ge Runsheng, et al. 2011. A study of the calibration of the new generation of millimeter-wave length cloud radar (HMBQ) and its detection capability [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69(2): 352−362. doi:10.11676/qxxb2011.030

Zhou Q, Zhang Y, Li B, et al. 2019. Cloud-base and cloud-top heights determined from a ground-based cloud radar in Beijing, China [J]. Atmos. Environ., 201: 381−390. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.01.012

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. Zhou Yuquan, Ou Jianjun. 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(11): 50−58. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.11.008