暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

利用毫米波测云仪探测数据分析宜昌冬季云垂直结构特征

赖晨 万霞 周旭 曾体贤 饶传新

Winter clouds vertical structure of Yichang based on millimeter-wave cloud radar data

LAI Chen，WAN Xia，ZHOU Xu，ZENG Tixian，RAO Chuanxin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-074

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

青藏高原东侧甘孜云雷达观测的非降水云垂直结构特征分析
Vertical structure of non-precipitation cloud obtained from cloud radar observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau
暴雨灾害. 2020, 39(5): 442-450 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.002

地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展
Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars
暴雨灾害. 2023, 42(4): 361-371 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-075

毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展
Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar
暴雨灾害. 2021, 40(3): 231-242 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.002

四川盆地秋季一次层状云弱降水过程的微物理特征观测分析
Analysis on the microphysical characteristics of weak precipitation process observation of a stratiform cloud in Sichuan Basin in autumn
暴雨灾害. 2022, 41(4): 445-457 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.009

基于云高仪探测数据的湖北省襄阳市云宏观特征分析
Analysis of cloud macro-physical characteristics in Xiangyang of Hubei Province based on ceilometer data
暴雨灾害. 2024, 43(2): 234-242 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-188

一种X波段相控阵天气雷达反射率因子订正算法
A reflectivity factor correction algorithm for X-band phased array radars
暴雨灾害. 2023, 42(4): 446-454 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-025

关注微信公众号，获得更多资讯信息

赖晨,万霞,周旭,等.2025.利用毫米波测云仪探测数据分析宜昌冬季云垂直结构特征[J].暴雨灾害,44(4):491−503. LAI Chen, WAN Xia, ZHOU Xu, et al. 2025. Winter clouds vertical structure of Yichang based on millimeter-wave cloud radar data [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):491−503 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−074

利用毫米波测云仪探测数据分析宜昌冬季云垂直结构特征

赖晨[1, 2], 万霞[1, 3], 周旭[3], 曾体贤[3, 4], 饶传新[5]

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205; 2. 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074; 3. 中国气象局人工影响天气中心/中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 100081; 4. 成都信息工程大学光电工程学院, 成都 610225; 5. 三峡国家气候观象台, 宜昌 443000)

摘　要: 毫米波测云仪 (以下简称测云仪) 是地基垂直观测系统的重要组成部分, 用于云垂直结构的观测, 可获取云的宏微观物理量。对宜昌(地基垂直观测系统全国第二个示范站)新建成的毫米波测云仪进行探测能力检验, 有助于后续多站点的系统建设和资料应用。利用 2022 年 11 月—2023 年 1 月三峡国家气候观象台测云仪观测资料, 结合风云四号 (FY-4A) 卫星和同址观测的气溶胶激光观测仪 (以下简称激光观测仪)、DSG5 型降水现象仪对该地区云的云顶高度、云底高度和雷达反射率因子进行分析, 检验测云仪探测能力并揭示宜昌地区冬季云的垂直分布规律, 结果表明: (1) 非降水条件下, 测云仪与激光观测仪探测高云和中云的云底高度一致性较高, 相关系数分别为 0.8 和 0.74, 测云仪探测的云顶高度与 FY-4A 云顶高度产品的相关系数为 0.54; 弱降水条件下, 测云仪的雷达反射率因子与降水现象仪的反演结果的相关系数为 0.66。(2) 宜昌地区冬季云出现率在垂直方向上均呈双峰分布, 主峰位于 3 km 以下, 云出现率在午后开始增大, 非降水云出现率的最大值出现在晚上 (21:00—22:00), 降水云出现率最大值出现在傍晚 (18:00—20:00)。(3) 云底高度和云顶高度在垂直方向上均呈双峰分布, 主峰位于对流层中下层, 夜晚到午夜降水云云底的抬高预示了降水的减弱。(4) 冬季非降水云的雷达反射率因子的大值区主要出现在午后, 最大值可达 20 dBz; 降水云的雷达反射率因子的大值区主要集中在中午和傍晚, 最大值超过 30 dBz, 雷达反射率因子大值区对应地面降水量大值区。

关键词: 毫米波测云仪; 云出现率; 云底高度; 云顶高度; 雷达反射率因子

中图法分类号: P426.5　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−074

Winter clouds vertical structure of Yichang based on millimeter-wave cloud radar data

LAI Chen[1, 2], WAN Xia[1, 3], ZHOU Xu[3], ZENG Tixian[3, 4], RAO Chuanxin[5]

(1. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Institute of Heavy Rain*, *China Meteorological Administration*, *Wuhan* 430205; 2. *Hubei Meteorological Information and Technological Support Cente*, *Wuhan* 430074; 3. *China Meteorological Administration Weather Modification Center/China Meteorological Administration Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory*, *Beijing* 100081; 4. *School of Optoelectronic Engineering Sciences*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225; 5. *Three Gorges National Climatological Observatory*, *Yichang* 443000)

Abstract: As an important part of the ground-based vertical observation systems, the millimeter-wave cloud radar (referred to as the cloud radar) can be used to observe cloud vertical structures and obtain cloud macro/micro-physical parameters. The detection capability test of the newly built cloud detector in Yichang (the second national ground-based vertical observation system) will be helpful for the subsequent system construction and data applications in other places. In this study, the cloud radar observations at Three Gorges National

收稿日期: 2024−04−28; **定稿日期**: 2025−01−13

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (42230612); 湖北省气象局科研项目 (2025Y10; 2025Y12); 湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金项目 (2023AFD093; 2023AFD107; 2022CFD018)

第一作者: 赖晨, 主要从事雷达气象数据分析相关研究。E-mail: laichenqx@163.com

通信作者: 万霞, 主要从事雷达探测技术和云物理研究。E-mail: wanx@whihr.com.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

Climatological Observatory from November 2022 to January 2023 are utilized. To test the detection capability of the cloud radar and reveal the vertical cloud structures in winter, the cloud base height (CBH), cloud top height (CTH), and radar reflectivity factor are compared with the measurements from the aerosol lidar observation instrument, FY-4A satellite, and the DSG5 precipitation phenomenon instrument, respectively. The results are as follows. (1) Under non-precipitation conditions, the cloud radar is well consistent with aerosol lidar observation instruments in detecting high and medium CBH, with correlation coefficients of 0.8 and 0.74, respectively. The correlation coefficient between the CTH detected by cloud radar and FY-4A is 0.57. Under weak-precipitation conditions, the reflectivity factor correlation coefficient between the cloud radar and precipitation phenomenon instrument is 0.66. (2) The occurrence frequency in winter shows a bimodal distribution in the Yichang region, with main peaks below 3 km. The cloud occurrence begins to increase in the afternoon, with the maximum values of non-precipitating clouds occurring in the evening (21:00-22:00) and the maximum values of precipitation clouds appearing at dusk (18:00-20:00). (3) Both the CBH and CTH exhibit bimodal distributions in the vertical distributions, with the main peak in the middle and lower layers of the troposphere. The elevation of the cloud base from evening to midnight indicates a decrease in precipitation. (4) The maximum radar reflectivity factor of non-precipitating clouds in winter is 20 dBz and mainly occurs in the afternoon. The maximum value of precipitating clouds exceeds 30 dBz and mainly occurs in the noon and dusk. Larger reflectivity factors in the low layers correspond to larger ground precipitation.

Key words: millimeter-wave cloud radar; cloud occurrence frequency; cloud base height; cloud top height; radar reflectivity factor

引　言

云通过太阳辐射改变全球能量平衡和水汽循环, 对天气和气候系统的变化有重要影响 (Huang, 2013)。云的辐射效应主要取决于云的垂直结构, 如云顶高度 (Cloud Top Height, CTH)、云底高度 (Cloud Base Height, CBH) 和云层的物理厚度等。前人研究发现, 云边界 (CTH 和 CBH) 的变化比云-辐射相互作用更为重要 (Kogan et al., 1998), CBH 能显著影响云层和地表之间的能量交换 (Wang et al., 2015)。高时间分辨率探测设备可获取云出现的时间频率, 基于泰勒冻结假设, 时间上的云出现率可以间接代表云量的多少, 云出现率是刻画云宏观特征的重要参数 (赵传峰等, 2021)。雷达反射率因子主要用于描述云滴或雨滴粒子对电磁波的散射特性, 可以对云的回波强度、类型和分布进行定量的分析和判断, 为气象预报和灾害预警提供重要依据 (俞小鼎等, 2006)。因此, 分析研究云边界、云出现率和雷达反射率因子对了解云的宏微观物理特征具有重要意义。

毫米波云雷达 (以下简称云雷达) 作为地基云探测的主要手段, 近年来被广泛用于科学研究。毫米波测云仪(以下简称测云仪)工作在 Ka 波段,与云雷达具有相似的硬件系统和技术参数, 天线固定做垂直指向扫描, 业务观测数据已接入中国气象局天衡天衍综合显示平台。从观测设计来看, 测云仪是垂直观测的云雷达, 以获取测站上空连续时间序列的云廓线。万蓉等 (2024) 通过多场长江中游梅雨锋云-降水观测试验, 探索了云雷达的观测方法, 编制了湖北省地方标准《毫米波云雷达观测规范》。毕永恒等 (2022) 对安装在西藏羊八井的双频 (Ka/W 波段) 云雷达性能进行分析, 结果表明离地 10 km 处 Ka 波段和 W 波段云雷达的探测灵敏度分别为−39.2 dBz 和−33.0 dBz; Ka波段雷达对于云层边缘区域如云顶、云底部分容易出现漏测情况, 致使 CTH 的低估和 CBH 的高估。刘黎平等 (2015) 利用第三次青藏高原试验中的云雷达分析了那曲地区夏季云总云量、云顶、云厚的日变化特征。王改利等 (2021) 结合云雷达和降水现象仪对青藏高原墨脱地区云出现率、CBH、CTH 及雨滴谱特征进行了统计分析。胡树贞等 (2022) 利用毫米波云雷达结合 L 波段探空雷达对云区边界识别算法进行改进。陶法等 (2020) 利用 2017—2019 年中国气象局大气探测试验基地 Ka 波段云雷达对探测到的晴空回波强度和高度的季节变化及日变化特征进行分析, 并结合地面自动气象站与激光云高仪区分了云回波和晴空回波。

云雷达不仅可用于云的宏观统计特征分析, 也可联合其他设备进行雨、雪等天气过程的综合观测, 并开展诊断分析。范思睿等 (2022) 利用 Ka 波段云雷达联合雨滴谱仪、L 波段探空和地面常规观测手段等对四川盆地秋季一次层状云弱降水过程进行观测, 揭示了层状云的宏微观结构特征及雨滴谱分布特征, 并对云中融化层 (零度层亮带) 进行详细的对比分析。傅新姝等 (2020) 联合云雷达、微波辐射计、微雨雷达和风廓线雷达分析了 2020 年梅雨期上海一次强降水过程中大气热力、动力、云雨等垂直结构特征。陈羿辰等 (2018) 利用云雷达联合称重式雨量计、气球探空和 S 波段天气雷达对北京 2015 年冬季降雪进行了观测, 主要研究了降雪系统的宏观结构特征、微物理变化、雪粒子含水量和对地面降雪量估测。

由此可见, 云雷达在云参数特征统计、云-降水天气分析及预报领域具有较大潜力。综合考虑云雷

达的探测优势和生产成本, 中国气象局在全国范围内探空站点配备地基垂直观测系统, 包括测云仪、微波辐射计、风廓线雷达、气溶胶激光观测仪 (以下简称激光观测仪) 和 GNSS/MET(张明等, 2024)。目前, 全国范围内已布设的测云仪约 175 部, 多站点测云仪已进入业务试运行阶段, 其探测能力和数据质量控制方法等均亟待分析。由于测云仪工作波长短, 强降水时回波信号容易受到衰减, 致使测云仪观测到的回波强度小于云目标的实际回波强度, 强降水时易出现回波部分缺失的现象 (冯永会等, 2016), 故分析测云仪的数据时, 宜选取非降水和弱降水时段的云回波。

本研究拟利用 2022 年 11 月—2023 年 1 月布设在宜昌三峡国家气候观象台 (全国第二个地基遥感垂直观测系统示范站) 的测云仪观测数据, 结合风云四号 (FY-4A) 卫星和同址观测的激光观测仪、DSG5 型降水现象仪以及地面雨量计资料分析测云仪的探测能力, 揭示站点及周边地区冬季云出现率、CBH、CTH 和雷达反射率因子的分布规律。

1 设备与数据

1.1 设备介绍

图 1 给出测云仪安装的站点位置及其周边地形图。测云仪安装于宜昌三峡国家气候观象台, 观象台地处三峡库区湖北段的东部, 为鄂西武陵山脉和秦巴山脉向江汉平原的过渡地带, 属于亚热带季风性湿润气候区。山脉地势有益于水汽的大量聚集, 地形的抬升作用为云的形成和发展提供了有利条件 (Robert et al., 2012)。

该测云仪工作在 Ka 波段, 波长为 8.56 mm, 距离库长为 30 m。使用固态发射机, 采用多普勒、全相参、脉冲压缩技术, 以垂直观测的方式获取云的雷达反射率因子 (Z)、径向速度 (V)、速度谱宽 (W) 和线性退极化比 (Linear Depolarization Ratio, LDR) 的垂直廓线, 同时记录功率谱密度数据 S, 主要技术参数见表 1。

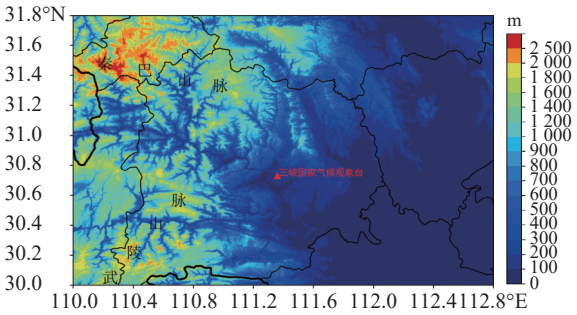


图 1 毫米波测云仪安装的站点位置及其周边地形图

Fig. 1 Geographic position and terrain of the observation site

表 1 毫米波测云仪主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the Millimeter-wave Cloud Radar

参数名称/单位	参数值
发射频率/GHz	35
天线增益/dB	52
发射机峰值功率/kw	45.5
水平波束宽度/°	0.4
垂直波束宽度/°	0.4
接收机增益/dB	50
波长/m	0.008 57
库长/m	30

为提高测云能力, 测云仪采用四种观测模式: 边界层模式 BL、中云模式 MI、卷云模式 CI 和降水模式 PR, 不同观测模式的相关参数见表 2。通过采用不同脉冲宽度、相干和非相干累积数, 以满足固态发射机测云仪低空探测和弱云探测的需求。BL 和 PR 使用窄脉冲, 主要针对低层和弱降水云的观测, 具有较小的探测盲区和较高的最小可测雷达反射率因子; MI 和 CI 采用宽脉冲, 主要用于中云和高云的探测, 针对云的高度高、反射率因子小和垂直运动较小等特点, 具有较大的距离盲区和较小的最小可测雷达反射率因子。观测时, 测云仪循环采用多种模式进行观测, 一种模式获取到一个径向数据后, 马上转换到另外一个模式进行观测, 最后形成融合数据。1 min 内完成廓线观测、多组模式数据融合、数据质量控制和数据保存。

表 2 毫米波测云仪观测模式的相关参数

Table 2 Observation mode parameters of Millimeter-wave Cloud Radar

参数名称	脉冲宽度	脉冲重复频率/HZ	相干累积数	非相干累积数	FFT 点数	距离分辨率/m	距离库数	探测盲区/m	最大不模糊距离/m	最大不模糊速度/($m\cdot s^{-1}$)	速度分辨率/($m\cdot s^{-1}$)	5 km处最小可测反射率因子/dBz
边界层模式(BL)	0.2 μs	16 666	4	16	256	30	250	30	9 000	8.93	0.035	−22.10
中云模式(MI)	8 μs/5 MHz	8 333	2	32	256	30	250	1 200	18 000	8.93	0.035	−35.11
卷云模式(CI)	24 μs/5 MHz	5 988	1	32	256	30	700	3 600	25 000	12.83	0.05	−36.87
降水模式(PR)	0.2 μs	5 988	1	32	256	30	700	30	25 000	12.83	0.05	−16.08

1.2 数据简介及质量控制

本文在开展云特征研究时，将雷达回波的边界定义为云边界，每根廓线雷达回波的下边沿为云底，上边沿为云顶 (吴翀等, 2017; 万霞等, 2020)。若廓线垂直方向上连续 5 个距离库均有回波则视为云回波；若相邻回波块之间的空隙小于或等于 150 m (连续 5 个距离库)，则认为两个回波块属于同一片云，回波块之间的空隙为云内缝隙；若相邻回波块之间的空隙大于 150 m (连续 5 个距离库)，则认为两个回波块为当前大气条件下的两层云 (霍娟等, 2020)。定义雷达回波不及地的云廓线为非降水云廓线；雷达回波及地且厚度达到 150 m的云廓线为降水云廓线。根据定义，单层降水云的 CBH 记为 0；两层或三层降水云的第一层 (靠近地面) CBH 记为 0。

宜昌地区 11 月至次年 1 月为干季，降水较少，适宜测云仪观测资料的分析研究。本文中测云仪连续观测时间为 2022 年 11 月 1 日—2023 年 1 月 31 日，获取总廓线数共 82 080 条，包含云回波廓线 53 658 条，其中非降水云廓线 40 616 条，降水云廓线 13 042 条。FY-4A 采用全圆盘数据的 CTH 产品，时间分辨率为 15 min；激光观测仪采用 CBH 产品数据，时间分辨率为 5 min，空间分辨率 15 m；DSG5 型降水现象仪采用粒子浓度和粒子直径数据，时间分辨率为 1 min；地面雨量计采用逐分钟雨量数据，用于分析宜昌地区降水变化特征。

对于 Ka 波段的测云仪观测数据，常见的质量问题包括：直流干扰、同频干扰、脉冲压缩引起的虚假回波、多脉冲拼接引起的拼接缝、孤立噪点、径向干扰、速度模糊和低层晴空回波等 (陶法, 2021)。在进行资料分析前需对测云仪初始观测数据做质量控制，主要采用阈值法 (郑佳锋等, 2016; 曾正茂等, 2022)。

图 2 显示了 2023 年 1 月 16 日宜昌测云仪观测质控前雷达反射率因子以及质控后雷达反射率因子。质控前 (图 2a)，00:00—24:00 (北京时，下同) 近地面 0—1 km 处出现了非气象悬浮物回波，其回波值均小于−30 dBz，这些回波干扰会影响对 CBH、CTH 以及降水回波的识别。云回波在约 14:40 出现一根竖线干扰回波 (蓝色箭头标注)。由于采用了宽脉冲和窄脉冲的压缩技术，可能使云回波产生距离旁瓣，导致 CBH 低估或 CTH 高估。15:00—20:00 云体中部出现较强回波，在云体底部出现明显的距离旁瓣 (红色箭头标注)，因此 CBH 可能被低估。先根据郑佳锋等 (2016) 提出的 Z-LDR 组合逻辑阈值法，选择 Z 为 0 dBz 和 LDR 为−20 dB 作为判别阈值，主要滤除近地面的低层悬浮物回波。再利用 Moran 等 (1998) 提出的方法，识别和滤除距离旁瓣回波。最后，逐条云廓线沿径向识别连续相邻雷达距离库信号，消除图 2a 中的竖线干扰。经过质控后的观测数据见图 2b 所示。文中分析使用的数据均为测云仪质量控制后的数据。

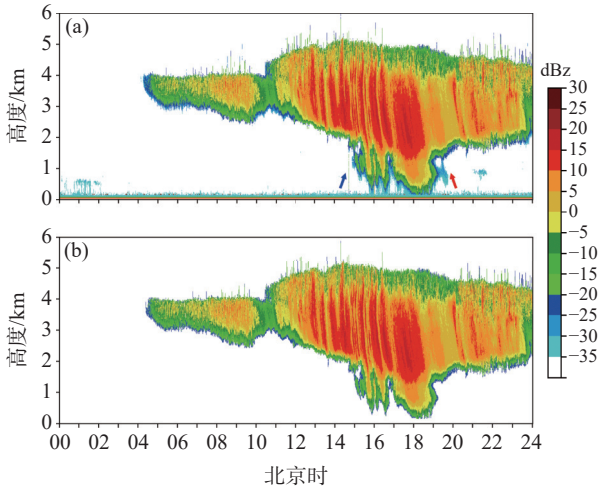


图 2 2023 年 1 月 16 日宜昌测云仪观测质控前 (a)、后 (b) 雷达反射率因子 (蓝色箭头表示干扰回波；红色箭头表示距离旁瓣回波)

Fig. 2 Reflectivity factor (a) before and (b) after quality control observed by Yichang cloud radar on January 16, 2023 (Blue arrows indicate interference echoes, red arrows indicate distance sidelobe echoes)

2 探测能力检验

2.1 云底高度探测

利用云雷达探测非降水云的 CBH，是目前地基获取云体底部边界的主要手段。为了解宜昌测云仪对 CBH 的探测能力，可利用同址激光观测仪 CBH 产品数据，与测云仪观测的非降水云的低云、中云和高云的 CBH 进行对比分析。参照世界气象组织对低云 (0~2.5 km)、中云 (2.5~5 km)和高云 (> 5 km) 的划分标准 (WMO., 1956)，图 3 给出了 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌测云仪与激光观测仪探测不同类型的 CBH 散点分布，可以看到，总体上激光观测仪探测低云的 CBH 大于测云仪的探测结果，二者探测 CBH 的相关系数 (CC) 为 0.54，偏差 (BIAS) 为 0.3 km，均方根误差 (RMSE) 为 0.45。对于中云和高云，两种设备探测到的 CBH 一致性较好 (图 3)。宜昌测云仪和激光观测仪探测中云和高云的 CBH 一致性与吴翀等 (2017) 在青藏高原地区的研究结果近似。也进一步说明，垂直指向的测云仪窄波束探测 CBH，受地形影响较小。

与激光观测仪相比，测云仪在观测中会出现对 CBH“缺测”或“测不准”的现象。图 4 分别给出

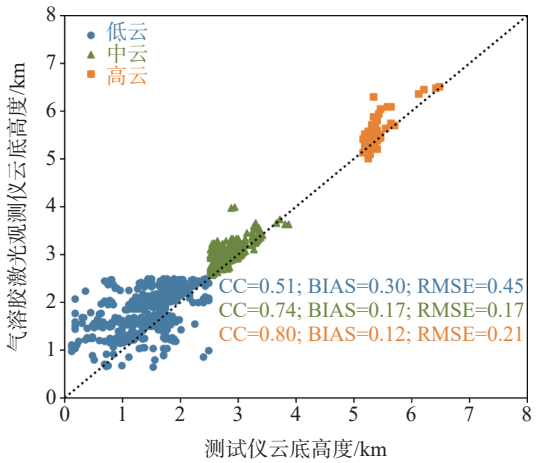


图 3 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌测云仪与气溶胶激光观测仪探测不同类型的云底高度散点图 (CC、BIAS 和 RMSE 分别表示相关系数、偏差和均方根误差)

Fig. 3 Scatter plot of different types of cloud base height (CBH) from Yichang cloud radar and aerosol lidar observation instrument from November 2022 to January 2023 (CC, BIAS and RMSE indicate correlation coefficient, bias and root mean squared error)

2023 年 1 月 22 日和 26 日测云仪与激光观测仪探测 CBH 特征。图 4a 显示, 22 日 01:00—02:00 测云仪探测 CBH 约为 2.5 km, 此时激光观测仪探测的 CBH (约 2 km) 低于测云仪的探测结果, 测云仪表现为“测不准”; 03:00—08:00 及 16:00—24:00 激光观测仪探测 CBH 约为 2.5 km, 此时测云仪未识别到云层, 无 CBH 值, 测云仪表现为“缺测”。图 4b 显示, 26 日 05:00—06:00 激光观测仪探测到 CBH 约为 2 km, 此时测云仪未识别到云层, 无 CBH 值; 06:00—07:30 测云仪探测的 CBH (2.4 km) 高于激光观测仪 (2 km); 07:30—17:30 测云仪探测的 CBH 低于激光观测仪, 但变化趋势一致; 17:30—24:00 两种 CBH 匹配一致性较好。

低层回波信号中包含大气分子瑞利散射和气溶胶粒子的米散射信号, 高空大气气溶胶粒子浓度较低时, 回波信号以大气分子的瑞利散射信号为主 (齐思齐, 2020)。因此, 测云仪探测中云和高云的 CBH 与激光观测仪的结果一致性较好。

2.2 云顶高度探测

CTH 是表征云特性的重要参数指标, 激光观测仪受到衰减的影响, 无法穿透厚云层探测到 CTH。研究表明, 卫星的 CTH 产品检验地基遥感探测的 CTH 可靠性较高 (Zhang et al., 2019; Zhou et al., 2021), 故采用 FY-4A 卫星的 CTH 产品与测云仪探测的 CTH 进行对比。FY-4A 卫星为格点场定量产品, 采用等经纬度投影, 经纬度分辨率为 0.05°×0.05°, 时间分辨率为 1 h, 在提取三峡国家气候观象台定点 CTH 时需对其进行插值处理。由于降水条件下, 测云仪探测到的云回波信号发生衰减, 云顶可能发生“塌陷”现象, 此时获得的 CTH 小于云的实际顶高, 故采用 15 min 内非降水云的平均 CTH 与对应时间 FY-4A 的 CTH 产品对比。图 5 给出了 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌测云仪与 FY-4A 反演的非降水云的 CTH 散点图。测云仪探测得到的 CTH 与 FY-4A 遥感的 CTH 相关系数为 0.57, 偏差为−1.42 km, 均方根误差为 1.83 km, 具有一定的可靠性。

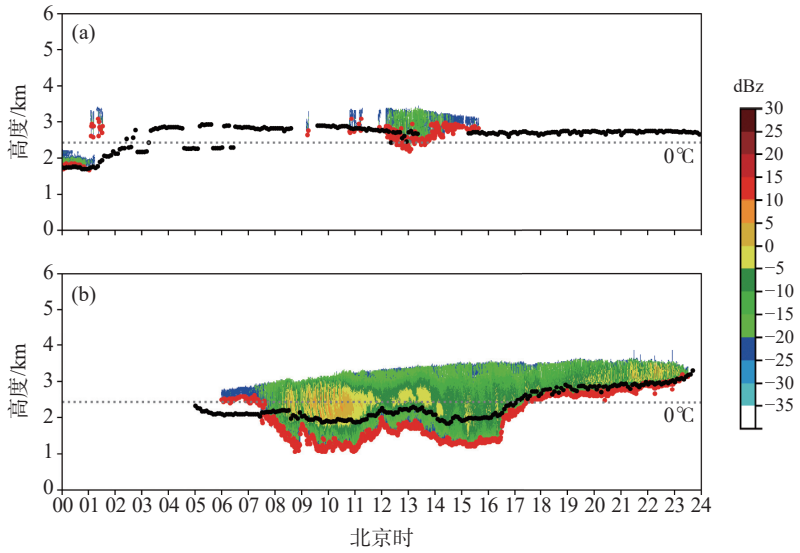


图 4 2023 年 1 月 22 日 (a) 与 26 日 (b) 宜昌测云仪观测的雷达反射率因子 (红色点和黑色点分别表示测云仪和激光观测仪观测的云底)

Fig. 4 Radar reflectivity factors observed by the Yichang cloud radar on (a) January 22, 2023, and (b) January 26, 2023 (The red dots represent the CBH observed by the cloud radar and the black dots represent the CBH observed by the aerosol lidar observation instrument)

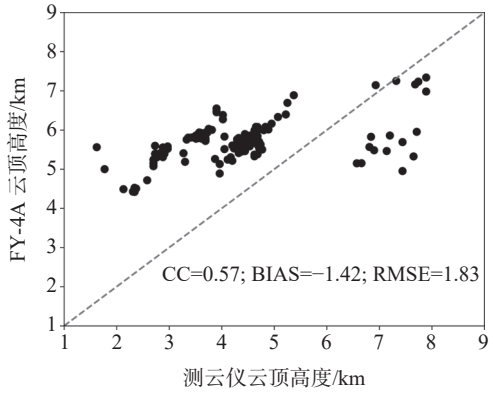


图 5 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌测云仪与 FY-4A 探测非降水云的云顶高度散点图

Fig. 5 Scatter plot of non-precipitating cloud top height (CTH) from Yichang cloud radar and FY-4A from November 2022 to January 2023

2.3 雷达反射率因子探测

本文利用 DSG5 型降水现象仪探测到的粒子浓度和粒子直径反演雷达反射率因子, 与测云仪探测的雷达反射率因子值对比, 以验证测云仪探测雷达反射率因子的可靠性 (Liu et al., 2020)。由于强降水时段雨滴粒子较大, 已不满足瑞利散射条件, 可选取弱降水时段降水现象仪观测的粒子浓度和粒子直径, 使用三参数 Gamma 分布表示地面实际降水滴谱来反演 Z (Zhang et al., 2001; Smith, 2003)

$$Z=\sum_{i=1}^{L} D_i^6 N(D_i)\Delta D_i \tag{1}$$

式中 L 是粒子直径分级总个数, D_i 是粒子分级中第 i 个分级的等效体积直径, $N(D_i)$ 是单位等效直径 D 内的粒子数浓度, ΔD_i 是第 i 个分级的等效直径宽度 (Zhao et al., 2017)。研究选取观测期间小雨时段降水现象仪观测的粒子浓度和粒子直径, 将反演结果与测云仪在离地 300 m 高度处探测的反射率因子进行对比 (Liu et al., 2020)。图 6 给出了 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌测云仪探测的雷达反射率因子与降水现象仪反演的雷达反射率因子散点图。观测和反演的两种雷达反射率因子的相关系数为 0.66, 偏差为−0.17 dB, RMSE 为 2.95 dB。小雨天气条件下, 测云仪探测的雷达反射率因子与降水现象仪数据反演的结果相比, 相关性较高, 偏差小于 1 dB, 故宜昌测云仪探测的雷达反射率因子可靠性较好。

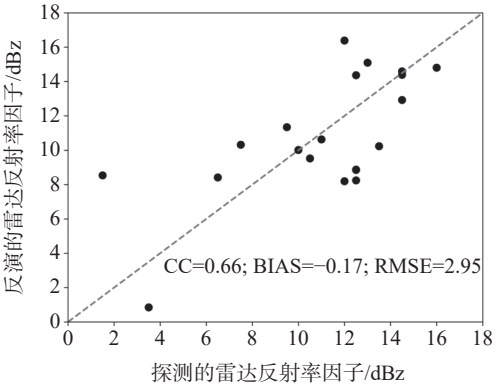


图 6 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌测云仪探测的雷达反射率因子与降水现象仪反演的雷达反射率因子散点图

Fig. 6 Scatter plot of cloud radar reflectivity from Yichang cloud radar and rain droplet retrieval from precipitation phenomenon instrument in Yichang from November 2022 to January 2023

3 云垂直结构探测结果

3.1 云出现率

定义测云仪获取的非降水云廓线数与廓线总数的比值为非降水云出现率; 降水云廓线数与廓线总数的比值为降水云出现率 (刘黎平等, 2015; 霍娟等, 2020; 田磊等, 2021)。图 7 给出 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云和降水云出现率平滑前后的垂直分布, 为确保观测数据的有效性, 计算时从廓线的第 6 库开始取数据, 150 m 以下非降水云和降水云出现率计为 0。从图 7b 可以看出, 冬季宜昌地区非降水云的云出现率曲线呈明显的双峰分布。非降水云出现率最大值 (主峰) 约为 16.5%, 位于 3 km 高度; 次大值 (副峰) 约为 3%, 位于 7 km 高度。降水云出现率最大值 (主峰) 约为 9.5%, 位于 0.15 km; 次大值 (副峰) 约为 0.5%, 位于 9 km 高度。宜昌地区以山地为主, 测站以西山地海拔最高可达 2 km, 测站以东毗邻江汉平原, 测站地处三峡库区湖北段的东部, 河道对水汽有导流作用。高大地形和水汽密集对宜昌地区云的生成和发展具有重要作用。与具有大地形和丰富水汽的青藏高原相比, 两地云出现率在垂直方向上均呈现双峰型分布 (Wan et al., 2022)。不同的是, 青藏高原地区云出现率大值高于宜昌地区; 高原云出现率最大值所在高度 (2~4 km), 比宜昌地区云出现率最大值所在高度高约 1 km。

云的日变化是降水时空分布特征的最基本周期信号, 揭示云出现率日变化特征对于了解不同地区不同类型降水发生机制、改进模式降水参数化方案有着重要作用 (梁哲宇, 2023)。以雷达库长 30 m 为垂直距离间隔, 统计不同高度上非降水云以及降水云出现率。图 8 给出 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云和降水云归一化出现率日变化。图 8a 显示, 地面以上 3~4 km 高度处, 午后 (12:00) 非降水云出现率先出现较大值 (>0.8%), 晚上 (21:00—22:00) 非降水云出现率达到峰值 (1%) 后开始逐渐减小。由图 8b 可知, 降水云出现率的大值区也主要集中在下

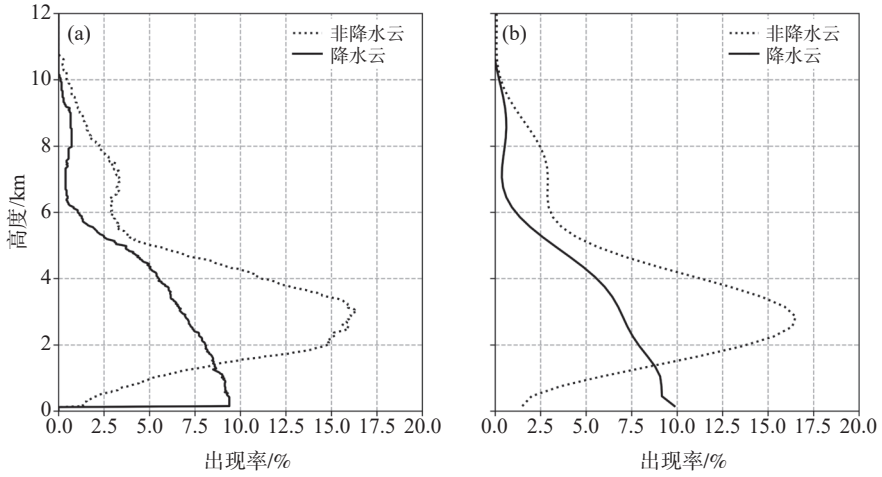


图 7 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云和降水云出现率平滑前 (a) 和平滑后 (b) 的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of non-precipitating and precipitating clouds occurrence frequency (a) before and (b) after smoothing in Yichang from November 2022 to January 2023

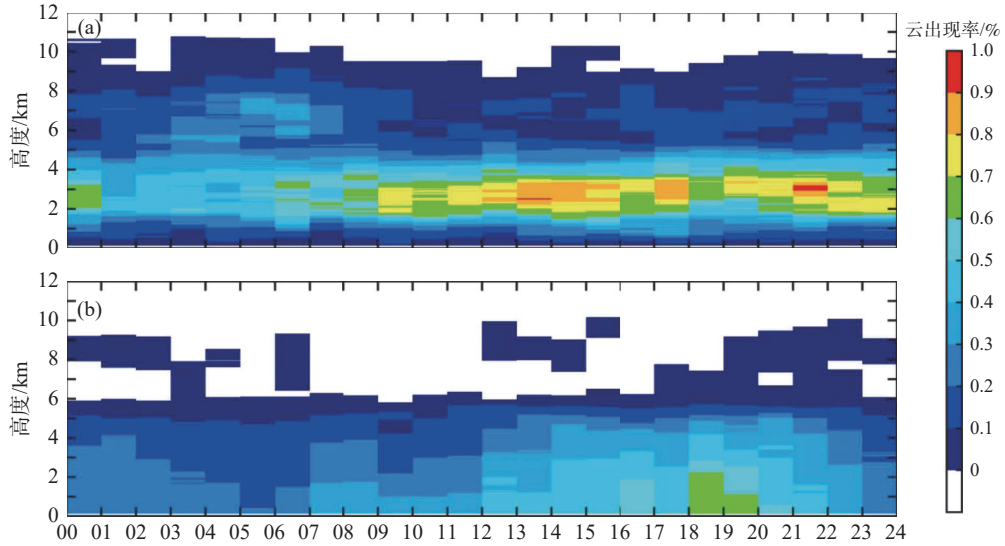


图 8 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云 (a) 以及降水云 (b) 出现率日变化

Fig. 8 Diurnal variation of (a) non-precipitating and (b) precipitation clouds occurrence frequency in Yichang from November 2022 to January 2023

午至夜间, 傍晚 18:00—20:00 出现最大值 (约 0.7%), 即该时段可能产生较强降水。同时, 6 km 以上降水云出现率出现多个独立的小值区 (<0.2%), 说明降水可能由两层或三层云作用产生。综合来看, 该地区冬季午后云出现率开始增大直至晚上, 傍晚可能出现较强降水。

定义非降水云出现率与降水云出现率之和为总云出现率。图 9 给出 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云、降水云和总云出现率逐小时变化。非降水云和降水云出现率日变化均呈双峰型分布: 非降水云出现率两个峰值 (37% 和 34%) 分别出现在 07:00 和 22:00; 降水云出现率两个峰值 (10% 和 15%) 分别出现在 09:00 和 19:00, 非降水云出现率谷值与降水云出现率峰值相对应, 这可能与宜昌周边特殊地形有关, 山地和河谷均会对水汽的生成造成

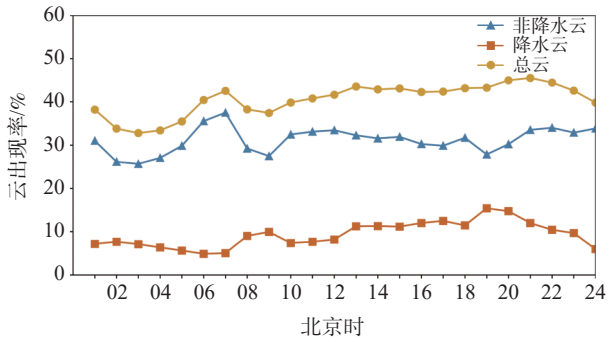


图 9 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云、降水云和总云出现率日变化

Fig. 9 Hourly changes of cloud occurrence frequency of non-precipitation cloud, precipitation cloud, and total cloud in Yichang from November 2022 to January 2023

影响 (毛成忠等, 2023)。总云出现率午后 (13:00) 开始逐渐增大, 至 21:00 达到最大值 (约 50%) 后迅速减

小。可能由于夜间辐射降温, 大气边界层易形成逆温层, 大气层结趋于稳定 (李海飞等, 2017), 使得总云出现率下降。总体来说, 观测期间非降水云出现率明显高于降水云。

总之, 宜昌地区冬季云出现率在垂直方向上呈双峰分布, 非降水云出现率最大值高于降水云出现率的最大值; 总云出现率在午后陡增, 到晚上达到最大值后逐渐减小, 降水云多在上午和傍晚出现。

3.2 云底高度和云顶高度

CBH 与大气中的水汽抬升和凝结有关, CTH 常与大气动力学特征密切相关, 在强对流云团发展中也是关键的指示因子 (霍娟等, 2020), 因此, 分析云的顶高和底高分布对了解该地区云-降水转化机制十分重要。通过测云仪观测到的雷达反射率因子, 可获取 CBH 和 CTH 在垂直方向上的分布。为确保每层都有足够数量的样本, 按 1 km 高度分辨率对数据重新采样。图 10 给出 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云和降水云的 CBH 和 CTH 的概率密度函数 (PDF) 图。宜昌地区冬季非降水云的 CBH 和 CTH 分别分布于 0~10 km 和 0~11 km, 均呈双峰型分布, 主峰分别位于 1~2 km 和 3~4 km, 副峰分别位于 6~7 km 和 7~8 km (图 10a, b)。由于 1.2 节将降水云的 CBH 定义为 0, 降水云的 CBH 主要集中于 0~1 km (图 10c), 而具有两层或三层结构的降水云的 CBH 集中于 0 ~ 10 km。总的来说, 降水云的 CBH 亦呈双峰分布。图 10d 显示, 降水云的 CTH 分布于 0~11 km, 呈双峰型分布, 主峰和次峰分别位于 5~6 km 和 8~9 km。简而言之, 宜昌地区 CBH 和 CTH 的双峰分布, 与前人对青藏高原墨脱地区、长江中游地区和华北地区云结构特征的结论一致 (Zhang et al., 2019; Zhou et al., 2021; Fang et al., 2023)。

图 11 给出 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云和降水云的 CBH 与 CTH 日变化盒型图。时间间隔为 1 h, 以确保每个时间间隔内都有足够数量的廓线样本。从平均值来看, 一天之中非降水云 CBH 呈双峰分布, 主峰出现在凌晨 04:00—05:00, 平均 CBH 最大值约为 4.5 km; 副峰出现在傍晚 16:00—17:00, 平均 CBH 最大值约为 3 km (图 11a)。CTH 亦呈双峰分布, 主峰和副峰的出现时间与 CBH 一致, 平均 CTH 的最大值分别为 6 km 和 5 km (图 11b)。说明非降水云内的垂直运动在凌晨较为活跃。降水云 CBH 的平均值峰值主要出现在晚上至午夜 (图 11c), CTH 的平均值从午后开始逐渐增大至午夜 (图 11d)。从晚上到午夜, 降水云的云底抬高预示了降水的减

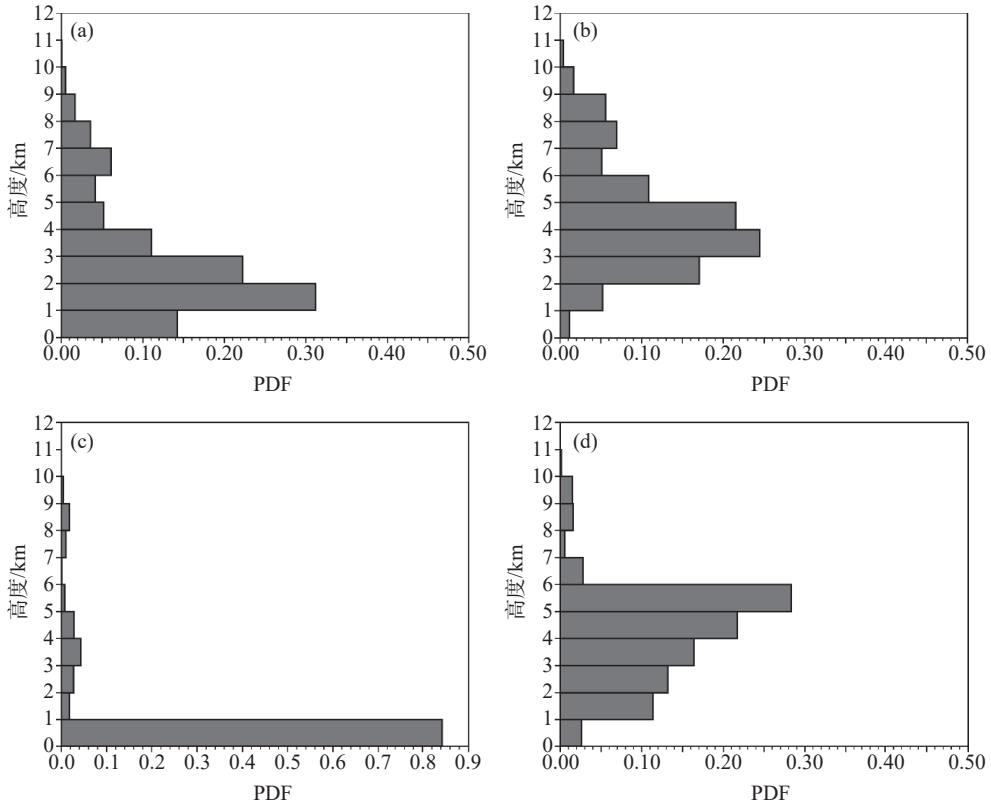


图 10 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云 (a, b) 以及降水云 (c, d) 的云底高度 (a, c) 和云顶高度 (b, d) 的概率密度函数 (PDF)

Fig. 10 The probability density function (PDF) of (a, b) non-precipitation cloud and (c, d) precipitation cloud (a, c) CBH and (b, d) CTH in Yichang from November 2022 to January 2023

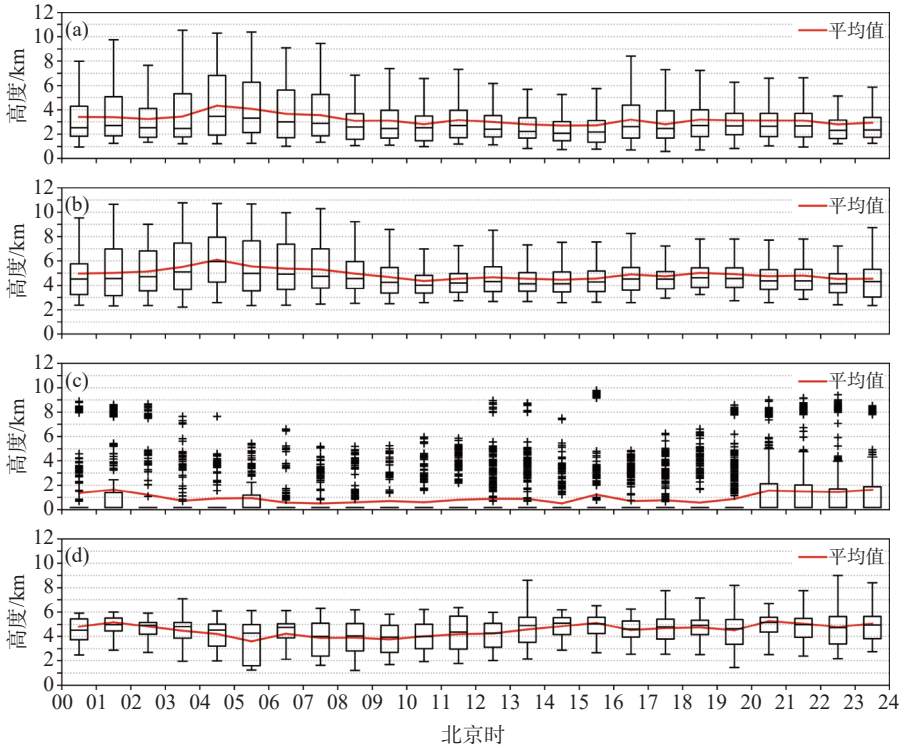


图 11 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云的云底高度 (a) 和云顶高度 (b) 以及降水云的云底高度 (c) 和云顶高度 (d) 日变化图

Fig. 11 Diurnal distributions of non-precipitation cloud (a) CBH and (b) CTH, and precipitation cloud (c) CBH and (d) CTH in Yichang from November 2022 to January 2023

弱。田磊等 (2021) 对冬季六盘山地区的 CBH 和 CTH 的研究发现, 山区的 CBH 和 CTH 的大值出现在日出前。这一结论与宜昌地区冬季非降水云的 CBH 和 CTH 变化一致。

综合来看, 冬季宜昌地区非降水云和降水云的 CBH 和 CTH 在垂直方向上均呈双峰分布。凌晨非降水云的 CBH 和 CTH 较高, 夜晚到午夜降水云云底的抬高预示了降水的减弱。

3.3 雷达反射率因子

测云仪探测云粒子遵循瑞利散射原理, 根据公式 (1), 雷达反射率因子与探测体积内水凝物直径和数浓度有关。根据观测期间三峡国家气候观象台所有时次的 GPS 探空温度数据进行统计平均, 得到 0 ℃ 温度线所在高度约为 2.4 km, −40 ℃ 温度线所在高度约为 10.2 km (图略)。

图 12 给出 2022 年 11 月—2023 年 1 月非降水云和降水云的雷达反射率因子垂直分布图, 每条箱线高度间隔为 600 m。非降水云雷达反射率因子的变化区间为−25~15 dBz; −40 ℃ (10.2 km) 等温线沿垂直方向向下, 反射率因子平均值先有一段明显的增加, 在 4.8 km 达到最大, 之后又减小。降水云雷达反射率因子在−20~25 dBz 之间变化, 反射率因子最大值较非降水云大 10 dBz, 在−40 ℃ (10.2 km) 温度线以下存在两个反射率因子峰值, 分别位于 7.2 km (0 dBz) 和 1.8 km (5 dBz), 这可能与固态降水云中冰晶粒子的沉积与冻结过程相关 (Zhang et al., 2019)。同时, 1.8 km 处雷达反射率因子最大值比 7.2 km 处大 5 dB, 这是因为 1.8 km/7.2 km 分别位于零度层以下/以上, 1.8 km 处粒子相态主要以液态形式存在, 其反射率因子变化区间大于 7.2 km 附近的固态粒子 (孙继松, 2014; 王德旺等, 2015)。值得注意的是, 沿 0 ℃ 温度线 (2.4 km) 以下, 降水云雷达反射率因子变化幅度比非降水云雷达反射率因子变化幅度大, 这可能是因为液态雨滴粒子主要集中在对流层的中下层 (袁敏等, 2023)。由于毫米波信号因降水受到衰减, 探测到降水云的雷达反射率因子值小于实际值。

根据表 2 显示, 测云仪不同观测模式在 5 km 处的最小可测回波反射率因子存在差异, 因此最小可测回波强度与观测模式、高度有关。实际观测中, 测云仪可能存在无法识别弱云回波 (反射率因子值小于该高度处的最小可测反射率因子值) 的情况。因此, 图 12 中非降水云和降水云对应高度的雷达反射率因子变化区间可能会更大, 最小值更小。

同样以雷达库长 30 m 为垂直距离间隔, 1 h 为时间间隔, 统计不同高度上非降水和降水云的雷达反射率因子日变化趋势 (图 13)。降水云和非降水云反

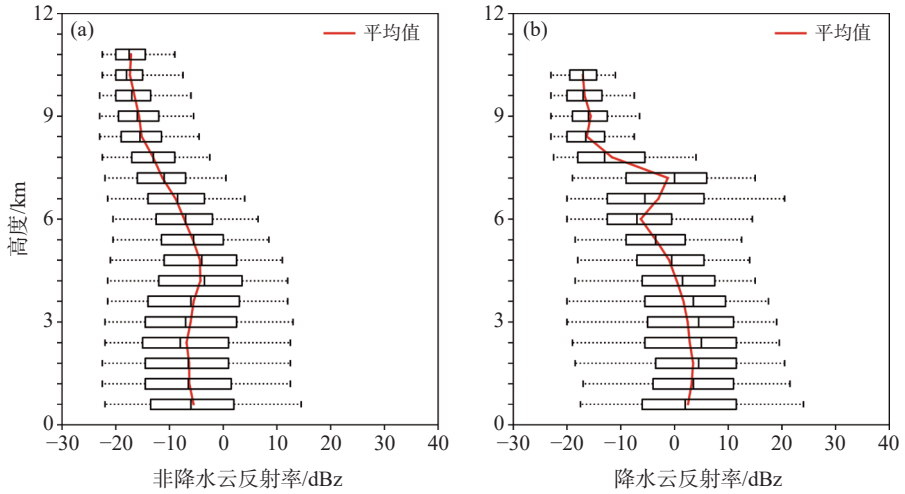


图 12 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云 (a) 和降水云 (b) 的雷达反射率因子垂直分布图

Fig. 12 Vertical distributions of the radar reflectivity factor of (a) non-precipitating cloud and (b) precipitating cloud in Yichang from November 2022 to January 2023

射率因子最高均达到近 11 km, 非降水云反射率因子集中在−20 ~ 10 dBz, 大于−5 dBz 区域主要集中分布在 1 ~ 7 km 之间, 说明宜昌地区非降水云主要也分布在 1 ~ 7 km 高度上。降水云反射率因子主要集中在 0 ~ 25 dBz, 最大值可达 30 dBz, 考虑到降水云回波的衰减, 实际雷达反射率因子值大于 30 dBz。降水云反射率因子大值区低于非降水云, 主要分布在近地面附近, 雷达反射率因子变化区间亦整体高于非降水云, 这是因为降水云中含有降水粒子, 降水粒子落至地面, 其雷达反射率因子普遍高于非降水云 (宗蓉等, 2014)。另外, 图 13a 显示宜昌地区非降水云大值区主要出现在 07:00—09:00 (1~2 km) 和 14:00—15:00 (6~7 km), 这可能是因为太阳辐射在日出后逐渐增强和午后快速增强, 此条件下的热力、动力因素更容易使得云层变厚和云回波的雷达反射率因子值增大 (田磊等, 2021)。

图 14 给出 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云以及降水云雷达反射率因子和地面小时累计降水量的日变化。结合降水云的雷达反射率因子 (图 13b) 和地面降水量 (图 14) 可知, 反射率因子大值区主要出现在 09:00—13:00 和 16:00—20:00 的 3 km 以下, 极大值位于近地面 0~1 km, 与降水量大值区对应。晚上 (21:00—23:00) 云的中上部反射率因子出现大值区 (>15 dBz), 近地面反射率因子值约为 15 dBz, 对应时间段内降水量较小。结合 0 ℃ 温度线高度 (2.4 km), 降水云在 3 km 高度开始出现反射

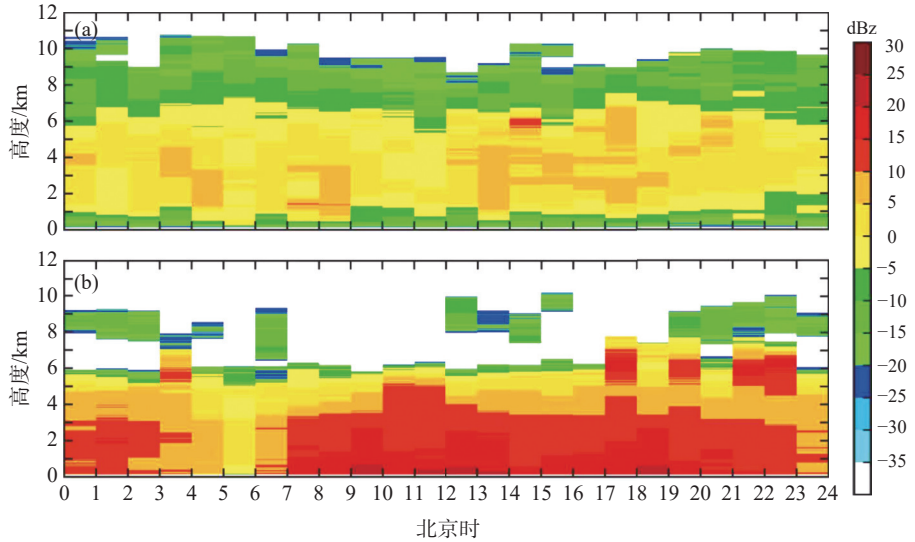


图 13 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云 (a) 和降水云 (b) 不同高度雷达反射率因子 Z 日变化

Fig. 13 Diurnal variation of radar reflectivity factor of (a) non-precipitating cloud and (b) precipitating cloud in Yichang from November 2022 to January 2023

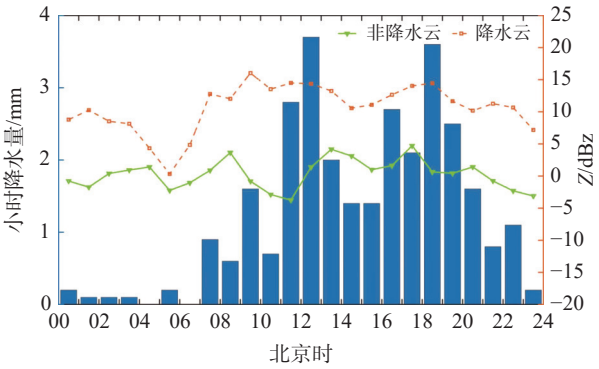


图 14 2022 年 11 月—2023 年 1 月宜昌非降水云以及降水云雷达反射率因子 Z 和地面小时降水量 (柱状) 的日变化

Fig. 14 Diurnal variation of non-precipitation and precipitation cloud radar reflectivity factor Z and hourly accumulated precipitation in (columnar) Yichang from November 2022 to January 2023

率因子大值直至地面, 最大值约为 25 dBz。降水量峰值出现在中午 (12:00—13:00) 和傍晚 (18:00—19:00), 晚上到午夜降水减弱, 与图 11c 中降水云的云底抬高互相印证。

宜昌地区冬季非降水云和降水云出现率的日变化均呈现双峰分布, 大值区均出现在下午和凌晨。同样地, 非降水云的雷达反射率因子的较大值也出现在午后; 不同的是, 降水云的雷达反射率因子较大值出现在上午和傍晚。这可能跟宜昌地区多山的高大地形有关, 众多学者在青藏高原地区的大地形下对云的日变化研究有类似结论 (王改利等, 2021; 周任然, 2021)。非降水云出现率的最大值出现在地面以上 2~4 km (−5~1 ℃), 表明冬季对流层中下层多出现混合相态的非降水云; 降水云出现率的最大值出现在近地面 0~2 km, 主要作用于地面降水。非降水云的 CBH 明显高于降水云。非降水云出现率大于降水云出现率, 表现为宜昌地区冬季少雨。

4　结论与讨论

本文利用湖北宜昌三峡国家气候观象台测云仪 2022 年 11 月 1 日—2023 年 1 月 31 日的观测数据, 分别与 FY-4A、激光观测仪和 DSG5 型降水现象仪探测的 CBH、CTH 和雷达反射率因子进行对比, 初步分析了测云仪的探测能力, 并揭示了冬季宜昌地区云出现率、CBH、CTH 和雷达反射率因子的垂直分布和日变化规律, 得到的主要结论如下:

(1) 非降水条件下, 测云仪与激光观测仪探测高云和中云的 CBH 一致性较高, 相关系数分别为 0.8 和 0.74, 测云仪探测的 CTH 与 FY-4A CTH 产品的相关系数为 0.57。弱降水条件下, 雷达反射率因子与降水现象仪反演雷达反射率因子的相关系数为 0.66。

(2) 非降水云和降水云出现率在垂直方向上均呈双峰型分布。非降水云出现率双峰出现在 07:00 和 22:00, 降水云多在上午和傍晚出现, 总云出现率在午后陡增, 到晚上达到最大值后逐渐减小。

(3) 非降水云和降水云的 CBH 和 CTH 在垂直方向上均呈双峰形态, 凌晨非降水云的 CBH 和 CTH 较高, 夜晚到午夜降水云云底的抬高预示了降水的减弱。

(4) 非降水云的雷达反射率因子大值区主要出现在午后, 最大值可达 20 dBz; 降水云的雷达反射率因子大值区主要集中在中午和傍晚, 最大值超过 30 dBz, 雷达反射率因子大值区与地面降水量大值区对应。

随着新技术的发展, 云雷达能够长时间连续稳定、可靠运行, 已经广泛应用于云的观测 (刘黎平等, 2015)。由于其灵敏度和时空分辨率高, 不仅可用于探测云的宏观结构, 还可以展示云的微物理特征。借鉴科研用途的云雷达探测方法和数据应用, 业务观测测云仪既可独立对云的宏观特征做统计分析, 也可联合微波辐射计、风廓线雷达等设备对不同天气过程云的热动力特征以及云粒子相态、尺寸大小等微观特征做综合分析, 可作为天气雷达的补充探测和降水相态预报的参考。本文研究结果表明, 测云仪联合地基垂直观测系统其他设备对当地气候分析以及降水预报具有重要作用, 后续值得深入研究。

致谢: 航天新气象科技有限公司张亚飞工程师对本文撰写提供了技术支持和指导, 谨致谢忱。

参考文献 (References):

毕永恒,霍娟,吕达仁,等.2022.西藏羊八井 Ka&W 双频毫米波云雷达性能及观测分析[J].红外与毫米波学报,41(2):470−482. Bi Y H, Huo J, Lyu D R, et al. 2022. Ka&W dual-frequency millimeter-wave cloud radar at Yangbajing performance and comparison [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves,41(2):470−482 (in Chinese). doi:10.11972/j.issn.1001−9014.2022.02.014

陈羿辰,金永利,丁德平,等.2018.毫米波测云雷达在降雪观测中的应用初步分析[J].大气科学,42(1):134−149. Chen Y C, Jin Y L, Ding D P, et al. 2018. Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar on snow observation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(1):134−149 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1705.17121

范思睿,王维佳.2022.四川盆地秋季一次层状云弱降水过程的微物理特征观测分析[J].暴雨灾害,41(4):445−457. Fan S R, Wang W J. 2022. Analysis on the microphysical characteristics of weak precipitation process observation of stratiform cloud in Sichuan Basin in autumn [J]. Torrential Rain and Disasters,41(4):445−457 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.04.009

冯永会,王金虎,葛俊祥.2016.毫米波云雷达回波衰减订正研究[J].微波学报,32(5):89−96. Feng Y H, Wang J H, Ge J X. 2016. Research of

millimeter-wave cloud radar on attenuation correction [J]. Journal of Microwaves,32(5):89−96 (in Chinese). doi:10.14183/j.cnki.1005−6122.201605021

傅新姝,顾问,彭杰,等.2020. 2020 年梅雨期上海一次强降水过程垂直结构的综合观测分析[J].暴雨灾害,39(6):658−665. Fu X S, Gu W, Peng J, et al. 2020. Observational analysis of vertical structure of a heavy precipitation event in Shanghai during Meiyu period in 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,39(6):658−665 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.06.014

胡树贞,陶法,王志成,等.2022.基于 L 波段探空的云区边界识别改进算法[J].沙漠与绿洲气象,16(1):56−61. Hu S Z, Tao F, Wang Z C, et al. 2022. Improving algorithm of cloud region boundary recognition based on L-Band sounding [J]. Desert and Oasis Meteorology, 16(1):56−61 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2022.01.008

霍娟,吕达仁,段树,等.2020.基于 2014~2017 年 Ka 毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征[J].气候与环境研究,25(1):45−54. Huo J, Lyu D R, Duan S, et al. 2020. Cloud macro-physical characteristics in Beijing based on Ka radar data during 2014-2017 [J]. Climatic and Environmental Research,25(1):45−54 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2019.18084

李海飞,乐满,杨飞跃,等.2017.基于地基云雷达资料的淮南地区冬季云宏观特征[J].干旱气象,35(6):1011−1014. Li H F, Le M, Yang F Y, et al. 2017. Analysis on macroscopic characteristics of winter cloud in Huainan area of Anhui based on Groud-based cloud radar data [J]. Journal of Arid Meteorology,35(6):1011−1014 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2017)−06−1011

梁哲宇.2023.基于 SACOL 站 KAZR 雷达观测的降水日变化特征研究[D].兰州大学. Liang Z Y. 2023. Diurnal variation of precipitation based on KAZR observation at the SACOL site [D]. Lanzhou:Lanzhou University (in Chinese)

刘黎平,郑佳锋,阮征,等.2015. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J].气象学报,73(4):635−647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al. 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the vavious radars [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(4):635−647 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.041

毛成忠,肖湛臻,杨志彪,等.2023.地理经纬双向过渡带和复杂地形下气候的过渡性和特异性——以宜昌市为例[J].中低纬山地气象,47(1):31−37. Mao C Z, Xiao Z Z, Yang Z B, et al. 2023. The transition and specificity of climate in the geographical longitude latitide Two-Way transition zone and complex Terrain—Take Yichang city as an example [J]. Mid-low Latitude Mountain Meteorology,47(1):31−37 (in Chinese)

齐思齐.2020.利用双波段偏振激光雷达观测研究气溶胶与云的识别及气溶胶吸收特性[D].兰州：兰州大学. Qi S Q. 2020. Study on discrimination of aerosols and clouds and aerosols absorption properties by using dual-wavelength polarization lidar observation [D]. Lanzhou: Lanzhou Univerisity (in Chinese)

陶法,官莉,张雪芬,等.2020. Ka 波段云雷达晴空回波垂直结构及变化特征[J].应用气象学报,31(6):719−728. Tao F, Guan L, Zhang X F, et al. 2020. Variation and vertical structure of clear-air echo by Ka-band cloud radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(6):719−728 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200607

陶法.2021.基于毫米波云雷达粒子谱反演及应用研究[D].南京:南京信息工程大学. Tao F. 2021. Research on particle spectrum retrievation and application based on millimeter wave cloud radar [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

田磊,桑建人,姚展予,等.2021.基于 Ka 波段云雷达的六盘山顶云特征分析[J].气象与环境学报,37(2):84−90. Tian L, Sang J R, Yao Z Y, et al. 2021. Preliminary analysis of cloud macro characteristics over the Liupan mountain based on Ka-band cloud radar [J]. Journal of Meteorology and Environment,37(2):84−90 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2021.02.12

万蓉,万霞,徐桂荣,等.2024.毫米波云雷达观测规范[S]. DB42/T2187-2024. Wan R, Wan X, Xu G R, et al. 2024. Specifications for millimeter wave cloud radar observation. DB42/T2187-2024 (in Chinese)

万霞,徐桂荣,万蓉,等.2020.青藏高原东侧甘孜云雷达观测的非降水云垂直结构特征分析[J].暴雨灾害,39(5):442−450. Wan X, Xu G R, Wan R, et al. 2020. Vertical structure of non-precipitation cloud obtained from cloud radar observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,39(5):442−450 (in Chinese). doi:10.3963/j.issn.1004−9045.2020.05.002

王德旺,刘黎平,宗蓉,等.2015.基于模糊逻辑的大气云粒子相态反演和效果分析[J].气象,41(2):171−181. Wang D W, Liu L P, Zong R, et al. 2015. Fuzzy logic method in retrieval atmospheric cloud partical phases and effect analysis [J]. Meteorological Monthly, 41(2):171−181 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2015.02.005

王改利,周任然,扎西索郎,等.2021.青藏高原墨脱地区云降水综合观测及初步统计特征分析[J].气象学报,79(5):841−852. Wang G L, Zhou R R, Zhaxi S L, et al. 2021. Comprehensive observations and preliminary statistical analysis of clouds and precipitation characteristics in Motuo of Tibet Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica, 79(5):841−852 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.054

吴翀,刘黎平,翟晓春.2017. Ka 波段固态发射机体制云雷达和激光云高仪探测青藏高原夏季云底能力和效果对比分析[J].大气科学,41(4):659−672. Wu C, Liu L P, Zhai X C. 2017. The comparison of cloud base observations with Ka-band solid-state transmitter-based millimeter wave cloud radar and ceilometer in summer over Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,41(4):659−672 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1701.16170

俞晓鼎,姚秀萍,熊廷南,等.2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Principles and Business Applications of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese)

袁敏,李玫,闫美林,等.2023. GPM 卫星探测四川“5·21”特大暴雨的降水结构特征分析[J].高原山地气象研究,43(4):35−41. Yuan M, Li M, Yan M L, et al. 2023. Structural characteristics of ‘5.21’ heavy rainstorm in sichuan detected by GMP satellite [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(4):35−41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.04.005

曾正茂,郑佳锋,吕巧谊,等.2022.毫米波云雷达距离旁瓣回波质量控制及效果评估[J].气象,48(6):760−772. Zeng Z M, Zheng J F, Lyu Q Y, et al. 2022. Quality control and effect evaluation of range sidelobe

echo of millimeter wave cloud radar [J]. Meteorological Monthly, 48(6):760−772 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.032103

张明,徐桂荣,杜裕,等.2024.三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨[J].暴雨灾害,43(5):587-597. Zhang M, Xu G R, Du Y, et al. 2024. Error analysis and correction method of temperature and humidity profile in Ground-based remote sensing vertical observation system of Three Gorges [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):587-597 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−199

孙继松.2014.从天气动力学角度看云物理过程在降水预报中的作用[J].气象,40(1):1−6. Sun J S. 2014. Role of cloud physics in precipitation forecasting by synoptic dynamics [J]. Meteorological Monthly, 40(1):1−6 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.01.001

赵传峰,杨以坤.2021.地基云遥感反演进展及挑战[J].暴雨灾害,40(3):243−258. Zhao C F, Yang Y K. 2021. Progress and challenges of ground-based cloud remote sensing [J]. Torrential Rain and Disasters,40(3):243−258 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.03.003

郑佳锋,刘黎平,曾正茂,等.2016. Ka 波段毫米波云雷达数据质量控制方法[J].红外与毫米波学报,35(6):748−757. Zheng J F, Liu L P, Zeng Z M, et al. 2016. Ka-band millimeter wave cloud radar data quality control [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves,35(6):748−757 (in Chinese). doi:10.11972/J.ISSN.1001−9014.2016.06.018

周任然.2021.青藏高原东南部墨脱地区云降水的综合观测及云特征分析[D].北京:中国气象科学研究院. Zhou R R. 2021. Comprehensive observation and cloud characteristics analysis of cloud precipitation in southeastern Qinghai Tibet Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

宗蓉,刘黎平,银燕.2014.基于飞机观测资料的降水粒子反射率因子阈值分析[J].大气科学学报,37(4):469−475. Zong R, Liu L P, Yin Y. 2014. Analysis of drizzle reflectivity threshold using in-situ measurements [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,37(4):469−475 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130601001

Fang J, Huang K, Du M, et al. 2023. Investigation on cloud vertical structures based on Ka-band cloud radar observations at Wuhan in Central China [J]. Atmospheric Research,281:1−11. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106492

Kogan Z N, Kogan Y L. 1998. The effect of cloud geometrical thickness variability on optical depth [C]. The 8th ARM Science Team Meeting, Washington DC, USA: 377-380

Huang Y. 2013. On the longwave climate feedbacks [J]. Journal of Climate,26:7603−7610. doi:10.1175/Jcli−D−13−00025.1

Liu L, Gao W. 2020. Statistical analysis of microphysical and dynamical parameters for clouds and precipitation over Nauq Tibetan Plateau in summertime using Ka-band cloud radar [J]. Atmosphere,11(8):818. doi:10.3390/atmos11080818

Moran K P, Martner B E, Post M J, et al. 1998. An unattended cloud-profiling radar for use in climate research [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,79:443−455. doi:10.1175/1520−0477(1998)079

Organization W M. 1956. International cloud atlas: abridged atlas [M]. Genewa: World Meteorological Organization

Robert A H J. 2012. Orographic effects on precipitating clouds [J]. Review of Geophysics,50(1):47. doi:10.1029/2011RG000365

Smith P L. 2003. Raindrop size distributions: exponential or Gamma-Does the difference matter [J]. Journal of Applied Meteorology, 42(7):1031−1034. doi:10.1175/1520−0450(2003)0422.0.CO;2

Wan X, Zheng J F, Wan R, et al. 2022. Intercomparison of cloud vertical structures over four different sites of the eastern slope of the Tibetan Plateau in summer using Ka-band Millimeter-Wave radar measurements [J]. Remote Sensing,14(15):3702. doi:10.3390/rs14153702

Wang F, Guo J, Zhang J, et al. 2015. Multi-sensor quantification of aerosol-induced variability in warm clouds over eastern China [J]. Atmospheric Environment,113:1−9. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.04.063

Zhang G, Vivekanandan J, Brandes E. 2001. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements [J]. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing,39(4):830−841. doi:10.1109/36.917906

Zhang Y, Zhou Q, Lyu S S, et al. 2019. Elucidating cloud vertical structures based on three-year Ka-band cloud radar observations from Beijing, China [J]. Atmospheric Research,222:88−99. doi:10.1016/j.atmosres.2019.02.007

Zhao C, Liu L, Wang Q, et al. 2017. MMCR-based characteristic properties of non-precipitating cloud liquid droplets at Naqu site over Tibetan Plateau in July 2014 [J]. Atmospheric Research,190:68−76. doi:10.1016/j.atmosres.2017.02.002

Zhou R R, Wang G L, Zhaxi S N. 2021. Cloud vertical structure measurements from a ground-based cloud radar over the southeastern Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research,258:1−11. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105629

(责任编辑　杨　浩)