

福建山地地区的云垂直结构和时间变化特征研究

郑佳锋¹, 彭霆威¹, 刘艺华¹, 张浩然¹, 曾正茂^{2,3}

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都, 610225

2 福建省气象信息中心, 福州, 350001

3 福建省灾害天气重点实验室, 福州, 350001

摘要 云的观测和研究对数值模式发展、气候变化评估和人工影响天气等都至关重要, 为进一步认识我国东南沿海山地地区的云结构特征和时间变化, 本文利用福建北部建瓯地区 2019~2022 年的 Ka 波段毫米波云雷达观测资料, 研究了该地区云发生率、垂直结构和参数的季节变化及日变化特征, 并从水汽和热动力条件对观测的特征和差异进行了成因探讨。结果表明: (1) 整体上, 春季的云发生率最高, 夏冬季依次随后, 秋季最低; 春夏季以低云和高云为主, 秋冬季则以低云和中云为主。(2) 春夏季的高云回波整体比低云更强, 夏季云冰相层和液相层的回波都最强, 春秋依次随后, 冬季最弱; 夏季的云底高度和云顶高度都最高、云层最厚、云层间隙也最大, 春秋依次随后, 而冬季的云层则最低、最薄、间隙最小。(3) 不同季节云垂直结构和参数的日变化特征显著, 但也存在差异。相比春季, 夏季对流启动更早、生命期更长、更为强烈, 使得各个云参数在午后增大幅度和持续时间也 longer。秋冬季逐时的云发生率、强度和其他云参数都低于春夏季, 但秋季云的日变化趋势和夏季相似, 冬季云的日变化趋势与春季相似。(4) 该地区平均比湿、水平风场和对流有效位能的季节和日变化与云雷达观测的云相关变化特征都有很好的正相关。

关键词 云垂直结构, 时间变化和特征, 毫米波云雷达, 福建山地地区

中图分类号 P401 文献标识码 A

文章标号: 2024052B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2410.24052

Vertical Structures and Temporal Variations of Clouds over the Mountainous Area of Fujian, China

ZHENG Jiafeng¹, PENG Tingwei¹, LIU Yihua¹, ZHANG Haoran¹, and ZENG Zhengmao^{2,3}

1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225

2 Fujian Meteorological Information Center, Fuzhou, 350001

3 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou, 350001

收稿日期: 2024-10-14 网络与出版日期:

作者简介: 郑佳锋, 男, 1988 年出生, 副教授, 主要从事雷达气象和云降水物理学等研究。E-mail: zjf1988@cuit.edu.cn

通讯作者: 曾正茂, E-mail: zzhengmao@163.com

资助项目: 国家重点研发计划项目 2023YFC3007501, 福建省自然科学基金项目 2023J011337, 成都信息工程大学科技创新能力提升计划项目 KYQN202307

Funded By National Key Research and Development Program of China (Grant 2023YFC3007501), Natural Science Foundation of Fujian (Grant 2023J011337), and Innovation Ability Promotion Plan Project of Chengdu University of Information Science and Technology (Grant KYQN202307)

Abstract The observation and study of clouds are of great importance for the development of numerical models, climate change estimation, weather modification, etc. To advance the understanding of structural characteristics and temporal variations of clouds in the mountainous areas along the southeast coast of China, observations from a ground-based Ka-band millimeter-wave cloud radar deployed in Jian'ou of northern Fujian, China, between 2019 and 2022, were utilized to study the characteristics, seasonal patterns, and diurnal variations of cloud occurrences, vertical structures, and parameters in this area. Additionally, the causes underlying these observed characteristics and variations are also discussed from atmospheric water vapor and thermodynamic conditions. The findings indicate that: (1) cloud occurrence exhibits seasonal variations, with the highest occurrence observed during spring, followed by summer and winter, and the lowest during autumn. Low and high clouds dominate during spring and summer, whereas low and mid-level clouds are predominant during autumn and winter. (2) Radar reflectivity factors of high clouds are generally larger than those of low clouds during spring and summer. In summer, both ice-phase and liquid-phase cloud layers exhibit the largest radar reflectivity factors, followed by spring and autumn, and the smallest reflectivity factors are observed during winter. Cloud base height and top height are highest during summer, followed by spring and autumn, respectively, while they are lowest during winter. The thickest cloud layer and largest cloud gap distance also occur during summer, followed by spring and autumn, respectively, whereas the thinnest cloud layer and smallest cloud gap distance are observed during winter. (3) Diurnal variations in cloud vertical structures and parameters are significant in different seasons, and their differences are also apparent. Compared to spring, summer exhibits earlier and stronger convection activities and a longer lifespan, resulting in larger and longer-lasting variations in cloud parameters during the afternoon. Diurnal variations in cloud occurrence, intensity, and other cloud parameters are less pronounced during autumn and winter compared to spring and summer. However, the diurnal variation trend of clouds in autumn is similar to that in summer, while the diurnal variation trend of clouds in winter is similar to that in spring. (4) Average specific humidity, horizontal wind field, and convective available potential energy show significant positive correlations with the seasonal and diurnal variations in cloud radar-observed cloud-related changes in the local area.

Keywords Cloud vertical structure, Temporal variation and characteristic, Millimeter-wave cloud radar, Mountainous area of northern Fujian

1 引言

云是地球水循环的重要组成部分，也是各类天气的载体。云垂直结构是指云各类参数的垂直分布，它是云内热力、动力和微物理过程等的综合作用结果。云垂直结构的改变会

带来大气静力稳定度、云辐射效应和潜热释放等的变化，进而影响大范围的大气环流和气候变化 (Randall et al., 1989; Wang and Rossow, 1998; 刘屹岷等, 2018)。对于各类天气系统，云垂直尺度虽远比水平尺度小，但云垂直结构的变化对天气系统的演变和云物理过程的影响却远超水平结构 (Saloni et al., 2022; Zheng et al., 2022)。因此，开展云垂直结构的观测和研究，对优化气候或天气模式、深入认识各类天气发展演变规律都具有重要意义，同时在人工影响天气和航空气象保障等领域也有重要价值 (洪延超和周非非, 2006; 曹蓓等, 2019; 周心河和熊喆, 2019)。

借助星载气象雷达和探空等观测资料，已有许多学者对不同气候区的云垂直结构进行了研究。如，汪会等 (2011) 利用 Cloudsat/CALIPSO 资料对比分析了东亚季风区、印度季风区、西北太平洋季风区和青藏高原地区的云垂直结构，结果发现，东亚季风区和青藏高原地区的春夏季云量略高与秋冬季，印度季风区夏季云量明显高于冬季；印度季风区和西北太平洋季风区的云层全年主要分布在海拔 10 km 以上，而东亚季风区的云层除夏季外主要分布在海拔 10 km 以下，青藏高原地区则全年主要位于海拔 4–11 km。尹金方等 (2013) 也用 Cloudsat 资料研究了东亚大陆降水和非降水云的垂直结构，指出降水云发展高度通常在距地面 8 km 以下，回波强度随高度增加呈先增强后减弱趋势，而非降水云主要集中在 8–12 km，回波强度随高度几乎不变。Lismalini et al. (2021) 利用探空资料研究了西太平洋热带岛屿 (苏门答腊岛) 近 50 年的云垂直结构变化，发现该地区的云底高度和云顶高度有增高的趋势，单层云的出现概率也比全球其他地区更高。李琦等 (2021) 也利用探空资料研究了我国上空云层的垂直结构，发现我国云垂直结构具有明显纬向变化，西南地区通常为云底较高的薄云，东南沿海地区通常为云底较低的厚云；早晨云底高度最低，夜晚云顶高度最高，夏季云量高于其他季节。

近年来，随着雷达遥感技术的发展，高灵敏度的地基毫米波云雷达迅速发展并逐渐成为云垂直探测的主要工具 (仲凌志等, 2009; Moran et al., 1998; Li and Moisseev, 2019; Kollias et al., 2020; 武静雅等, 2022; 刘黎平, 2023; 李浩然等, 2023)。相较于星载雷达和探空等，地基毫米波云雷达具有明显的时空分辨率优势和观测连续性，其能够穿透云层并更准确探测得到内部的回波强度和运动信息，并能反演得到云的层数、底高、顶高和厚度等 (王喆等, 2016; 吴翀等, 2017)。基于毫米波云雷达长时间的观测资料，郑佳锋等 (2021) 发现青藏高原那曲地区夏季主要以低云和高云为主；该地区云顶高度、云底高度和云层厚度在北京时间 01–09 时均逐渐减小，10–20 时逐渐增大，21–24 时又逐渐减小；总云量在从 01 时开始逐渐减小，至 13 时达到最小值后又逐渐增加。Zhao et al. (2016, 2017) 发现那曲地区的高层冰云在午后至午夜出现的概率最大，云发生率随高度增加而减少；低层水云日变化不显著，云发生率随高度增加而增加。王改利等 (2021) 对西藏墨脱的云宏观特征进行了统计，结果表明，作为印度洋暖湿季风的入口区域，墨脱地区云量远比其他地区多，以低云和中云为主；云通常从午后到晚上开始生成，在早上至中午开始消退，大部分云顶高度位于距

地面 4–7 km 之间。Liu et al. (2017) 指出华南地区的云主要集中在距地面 3 km 以下和 6–10 km 之间；低云和高云回波强度相似，中云回波强度相对较强；对流降水云的回波强度随高度增加而减小，层状降水云的回波强度随高度变化小。李慧等 (2023) 研究发现，呼和浩特地区的云类型以中高云为主；除冬季外，午后云出现概率高于上午；夏季云厚度大于冬季。

福建地处中国东南沿海、台湾海峡西侧，整体属于亚热带季风气候，是我国云和降水频发的地区之一。福建地形复杂，自古有八山一水一分田之说。同时，不同季节影响该地区的天气系统复杂多样，如冷季的中高纬冷高压和锋面系统，暖季的季风、台风、副热带高压和东风波等。在复杂地形、天气系统和大气环境的综合影响下，该地区云垂直结构如何、不同时间尺度下的差异如何等问题，目前尚未有相关的研究和报道。鉴于此，本文利用福建北部建瓯地区一部 Ka 波段毫米波云雷达连续 4 年的全天候观测资料，对福建山地地区的云垂直结构及宏观参数特征进行了研究，并揭示不同季节和不同时刻的差异。本文旨在进一步认识我国东南沿海山地地区的云物理特征，为该地区的气候、天气和人工影响天气等研究提供参考。

2 资料和方法

2.1 设备及资料

本文使用的资料观测于福建省建瓯市国家基本气象站，站点经纬度分别为 118.326°E 和 27.047°N，海拔高度为 155 m，观测时间为 2019–2022 年。如图 1a 所示，观测站点位于福建北部山地地区的峡谷平原地带，站点四面地势起伏、山脉环绕。观测设备是一部由中国航空科工集团第二十三研究所研制的固态 Ka 波段毫米波云雷达（如图 1b）。该云雷达采用垂直指向探测，工作频率为 35 GHz，波束宽度为 0.4°，探测高度范围为 0.12–20 km，时间和空间分辨率分别为 1 min 和 30 m。该云雷达全天候不间断工作，探测资料包括反射率因子 Z_e (dBZ)、径向速度 V (m s^{-1})、谱宽 W (m s^{-1})、线性退极化比 LDR (dB) 和功率谱密度等。为了综合满足不同云类的探测，该雷达设计了四种探测模式，包括边界层模式 (M_L)、中云模式 (M_M)、高云模式 (M_H) 和降水模式 (M_P)，其中 M_L 和 M_P 模式采用窄脉冲以探测低云和降水， M_M 和 M_H 模式采用宽脉冲以探测中云和高云，四个模式的主要性能参数如表 1 所示，四个模式设计原则见曾正茂等 (2022) 所述。四个模式依次探测，并采用 Liu et al. (2019) 的方法融合形成最终的观测数据，融合数据在离地 5 km 和 10 km 处的最小可测回波强度（灵敏度）分别约为 -36 dBZ 和 -30 dBZ。

为了分析不同季节和不同时刻云参数相关的大气环境要素特征，本文还用到 2019–2022 年的 ERA5 再分析资料，包括水平风场、比湿、对流有效位能 CAPE、地面温度和露点温度。本文以下分析和图形中的雷达参量高度指离地高度。

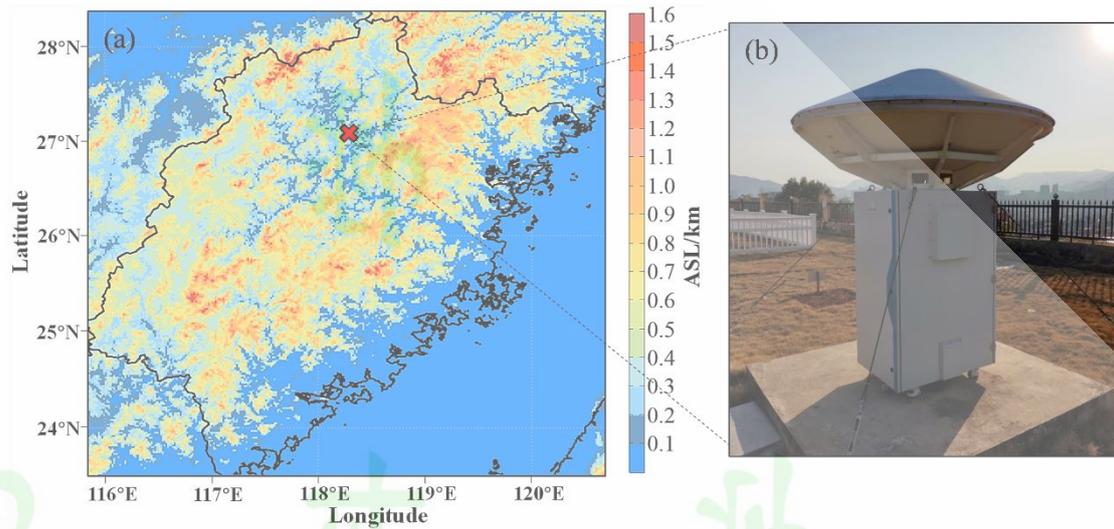


图 1 观测站点位置及周边地形图 (a) 和 Ka 波段毫米波云雷达的外景图 (b)

Fig.1 Location and surrounding terrains of the observation site (a) and the outdoor scene of the Ka-band millimeter-wave cloud radar.

表 1 Ka 波段毫米波云雷达四个观测模式的主要性能参数

Table 1. Major parameters of four operation modes of the Ka-band millimeter-wave cloud radar.

参数名称	边界层模式 (ML)	中云模式 (MM)	高云模式 (MH)	降水模式 (MP)
脉冲宽度/ μs	0.2	9	25	0.2
脉冲重复频率/Hz	16666	8333	5988	5988
相干积累数	4	2	1	1
非相干积累数	16	32	32	32
FFT 点数	256	256	256	256
距离分辨率/m	30	30	30	30
有效探测高度/km	0.12–7.5	1.47–7.5	3.87–20	0.12–20
最大不模糊速度/(m s^{-1})	8.93	8.93	12.83	12.83
速度分辨率/(cm s^{-1})	6.98	6.98	10.02	10.02

2.2 雷达数据质量控制和云宏观参数反演方法

Ka 波段毫米波云雷达在实际观测中经常出现低空悬浮物杂波和距离旁瓣假回波，为消除这两类非气象回波的影响，本文采用以下质量控制方法：

(1) 低空悬浮物回波通常由分散在边界层内的大颗粒灰霾、粉尘和昆虫等造成，此类回波一般表现出低 Z_e 和高 LDR 的特点 (Görsdorf et al., 2015)。参考曾正茂等 (2022) 的统计结果，本文采用 Z_e 和 LDR 的双阈值法对低空悬浮物回波进行初步判断和滤除，具体如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} Z_e < -5 \text{ dBZ} \text{ 且 } LDR > -22 \text{ dB} & \text{低空悬浮物杂波} \\ Z_e \geq -5 \text{ dBZ} \text{ 且 } LDR \leq -22 \text{ dB} & \text{非低空悬浮物杂波} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 由于 LDR 的回波量一般要少于 Z_e ，因此双阈值法通常无法滤除彻底。本文进一步通过设定一个 $M \times M$ 滑动小窗（本文 M 取 3），对剩余的low空悬浮物回波进行滤除，即以小窗中心为判断点，当中心及其他距离库的有效回波少于 $M^2/3$ 时，则认为窗口中心应为无效回波，给予滤除；通过移动小窗位置，达到遍历所有距离库和所有时次的云雷达资料。

(3) 固态发射机云雷达通过发射宽脉冲来提高灵敏度，以实现对中高云的探测，并利用脉冲压缩处理技术提高回波的空间分辨率。但这种技术的副作用是，当探测位置存在较强云雨信号时，脉冲压缩对旁瓣的抑制无法达到理想状态，进而在其上下一定高度范围内会出现虚假的距离旁瓣回波。这种虚假回波会对云层高度的测量造成严重影响（郑佳锋等，2021）。距离旁瓣回波的强弱和范围与云雨回波强度和雷达脉冲压缩比（PCR）有关。本文云雷达在 M_M 和 M_H 模式下会产生距离旁瓣回波，两个模式的 PCR 分别为 40 和 125。为滤除距离旁瓣回波，借鉴 Moran et al. (1998) 和 Liu et al. (2019) 采用的阈值法，在对应模式的有效探测范围内的选择任意一个距离库为中心作为判断对象，检测其上下 PCR 个距离库的范围内是否存在高出 30 dB 的回波；若存在，则判断为距离旁瓣回波，否则为正常云雨回波。

本文反演的云宏观参数包括云底高度（CBH）、云顶高度（CTH）、云层厚度（CTK）、云层数（CLN）、云层间隙（CGD）和云类，其中 CGD 是指上层云的云底到下层云的云顶之间的距离。毫米波云雷达通常采用边界检测法实现对 CBH 和 CTH 的判定，已有许多研究证明该方法反演的云底高度和云顶高度具有良好的可靠性（如王喆等，2016；吴翀等，2017；郑佳锋等，2021；周青等，2019；彭杰等，2023）。本文的反演方法如下：

(1) 自下而上检测云雷达每根径向的反射率因子，将回波底部和顶部达到或最接近 -40 dBZ（王喆等，2016）的距离库所对应高度初步视为云层的 CBH 和 CTH，二者的差视为 CTK，连续回波段的数量代表 CLN，相邻回波段的距离视为 CGD。

(2) 由于毫米波云雷达具有较高的空间分辨率，一些结构相对松散的单层云可能会被判断为多层云。因此，进一步对 CTK 小于 7 个距离库的云层进行判断，若其与上下云层的间隔大于 24 个库，就删除这层云；否则将其与邻近的云层合并（王喆等，2016；郑佳锋等，2021）。

(3) 本文将 CBH 小于 300 m 且地面距离云底不超过 10 个距离库的范围内存在回波强度大于 -5 dBZ 的云判断为降水云，而其他云判断为非降水云。

为初步分析云雷达数据的质量控制和云宏观参数的反演效果，图 2 给出了 2021 年 2 月 22 日云雷达观测个例质量控制前后的反射率因子回波对比，以及云雷达和风云四号 A 卫星（FY-4A）反演的 CTH。由图 2a 可见，原始资料在 3 km 高度以下存在大量零散的低空悬浮物杂波（图中 planktons），高层云的底部和顶部、积雨云的顶部也均存在一定的“延伸状”距离旁瓣回波（图中 range sidelobes）。由图 2b 可见，经过质量控制后，这两类非气象回波均被有效滤除。毫米波云雷达和 FY-4A 反演的 CTH 在随时间变化趋势上较为一致，但前者

结果整体更高，二者偏差在 2km 以内，这与 Liu et al. (2021) 的研究结果一致。原则上，毫米波云雷达反演的 CTH 会更为准确，这是因为其灵敏度和垂直分辨率远远更高，且静止卫星由于地面红外辐射可以穿透云层，导致卫星测量的辐射亮度偏大，一定程度会低估了云顶高度。在降水条件下，二者的结果更为接近，这是因为此时毫米波云雷达受到降水衰减影响，使得反演结果偏低。

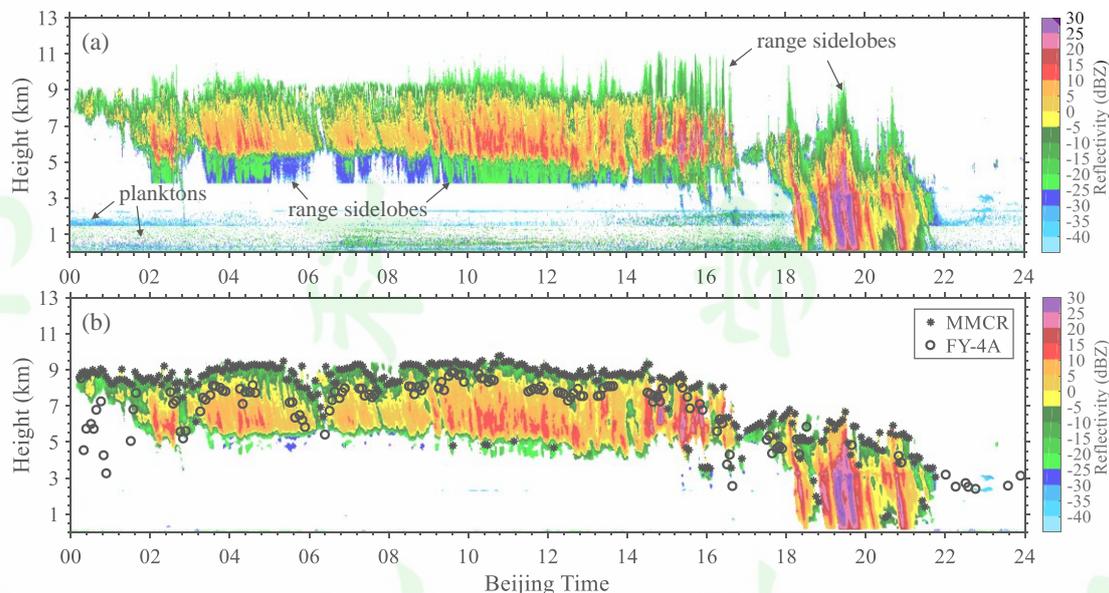


图 2 2021 年 2 月 22 日毫米波云雷达质量控制前的反射率因子回波 (a) 和质量控制后的反射率因子回波 (b)，图 (b) 中黑色星号和黑色圆圈分别代表云雷达和 FY-4A 反演的 CTH

Fig.2 Time-height cross sections of radar reflectivity before (a) and after (b) quality control observed on February 22, 2021, in subgraph (b), the black stars and circles denote cloud top heights retrieved by the cloud radar and FY-4A, respectively.

3 云发生率和季节变化

首先，对福建建瓿地区 2019~2022 年的云发生率进行统计，以分析该地区整体的云回波分布和四季差异。云发生率定义为云雷达探测到有云的廓线数量与云雷达有效工作的总廓线数量之比。统计表明，云雷达有效工作的廓线数量总数为 1977114，有云的廓线数为 794527（占比 40.19%），其中包含非降水云的廓线数为 511105（占比 25.85%）、降水云的廓线数为 283422（占比 14.34%），说明该地区非降水云的发生率高于降水云。四季（按春夏秋冬为顺序，下同）的云发生率分别为：53.86%、40.69%、27.03%、38.83%，其中非降水云的发生率分别为：33.71%、30.05%、17.53%、21.42%，降水云的发生率分别为：20.15%、10.64%、9.50%、17.41%，结果表明，春夏季的云发生率要高于秋冬季，其中春季最高，夏冬季依次随后，秋季最低。考虑到 Ka 波段毫米波云雷达探测降水云时，会因电磁波衰减、米散射、天线水膜影响和信号过饱和等问题，导致数据偏差较大、甚至出现回波缺失 (Zhe et al., 2009)，本文以下主要针对非降水云进行研究。

图 3a 为观测期间所有云和非降水云的发生率随高度分布。可见，所有云类的发生率整

体呈单峰分布，非降水云的发生率则大致呈双峰分布，以低云和高云为主，在 1.5 km 和 7.5 km 附近各存在一个峰值。图 3b 进一步给出了四个季节非降水云的发生率随高度分布，结果表明，低云的发生率峰值在四季都较为明显，而高云的发生率峰值在春夏季非常明显，但在秋冬季的发生率反而低于中云；夏季的高云峰值最高，约在 11.5 km 左右，春季的次之，约在 7.5 km 附近。四季云发生率垂直分布的差异与气象条件的变化和差异有关，春季南海季风开始活跃，西南暖湿气流为中高云的发展提供了有利条件；夏季南海季风更为强盛，季风带来的暖湿气流结合局地对流不稳定，促使更频繁和强烈的对流活动，形成更多的积雨云砧等高云；随着副高南撤、季风消退等，秋冬季的水汽和动力条件变差，高云的发展受限（柳艳菊和丁一汇，2007；黄洁，2019）。

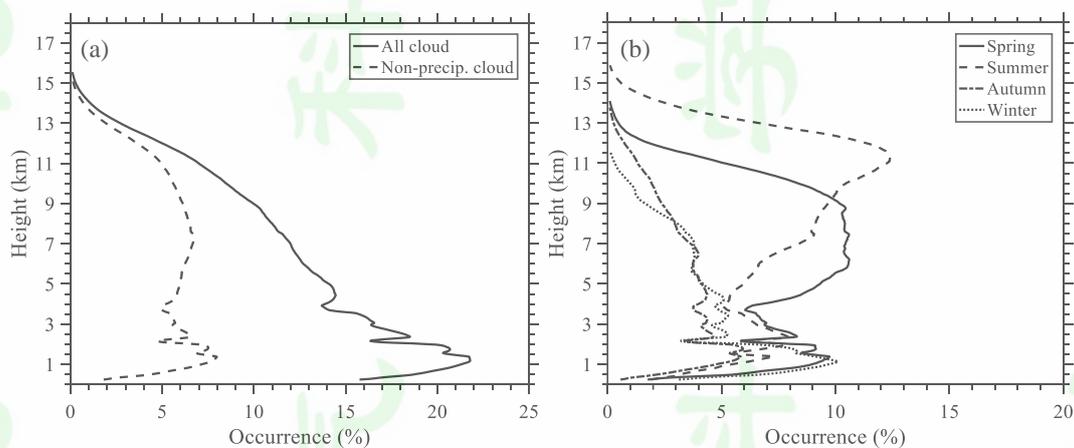


图 3 观测期间所有云和非降水云的发生率随高度分布 (a) 及四个季节非降水云发生率随高度分布 (b)
 Fig.3 Occurrences versus heights for all clouds and non-precipitating clouds during the four-year observation period (a) and occurrences versus heights for non-precipitating clouds observed in four seasons (b).

4 云垂直结构和季节变化

为研究该地区的云垂直结构和季节变化，对四个季节观测的非降水云的 Z_e 、CBH、CTH、CTK 和 CGD 分别进行统计分析。对于 Z_e ，计算其归一化高度频次分布 NCFAD，计算公式如 (2) 所示，式中 i 和 j 分别为高度和 Z_e 的区间序号， $N_{i,j}$ 表示样本频数， $\max(N)$ 表示所有区间的最大频数。NCFAD 同时反映了统计参量在各个高度层和不同值域内的概率分布（Yuter et al., 2006）。

$$\text{NCFAD} = \frac{N_{i,j}}{\max(N)} \quad (2)$$

如图 4a–4d 为四个季节 Z_e 的 NCFAD 统计结果，图 4e 为 Z_e 的中位数廓线和零度层平均高度 H_{T0} 。结果可见，春季的云主要分布在 13 km 以下，高频区集中在低层 1–2 km 和高层 7–12 km，低层高频区的强度主要为 -30–0 dBZ，高层高频区的强度主要为 -22–10 dBZ。春季，从云顶往下至 12 km 左右，回波强度逐渐减弱，这是部分高空卷云冰晶随着沉降逐渐升华的结果。从 12 km 到零度层之间，回波呈单峰分布，即先增强后减弱，峰值约在 6.5 km，该变化反映了云内冰晶通过聚合和淞附等逐渐增大，而后再逐渐破碎并升华消散的过程（吴举秀等，2013；张晋茹等，2023；Li et al., 2020）。在零度层附近，回波同样表现出

先增强后减弱的特征，增强的机制是零度层上部冰晶的快速聚并，以及冰晶融化成附着水膜的冰水混合物而导致雷达电磁波介电常数的突增，减弱主要由于完全融化的雨滴落速增大使得雷达采样体积内的粒子浓度下降（Kollias et al., 2005; Heymsfield et al., 2008）。零度层以下至近地面，随着云雨滴在空中逐渐蒸发，回波强度整体也逐渐减小。值得注意的是，四季 Z_e 的中位数廓线在 1.47 和 3.87 km 附近有突增和突减的现象，这是因为在这两个高度是云雷达不同探测模式的交界处，不同探测模式灵敏度的差异导致了这种变化。

其他季节的回波垂直分布、回波强度、以及不同相态层的特征都与春季有一定差异。夏季云发展高度最高，主要分布在 15 km 以下，秋季与春季差异不大，冬季最低，主要分布在 11 km 以下。夏季也以低云和高云为主，高层的高频区可以延伸到 10–12 km，而秋冬季的中云频率增多，无类似春夏季的高低层两个高频区。对于 8 km 以上的冰相云内，夏季的 Z_e 整体最大，春秋随后，冬季最小；对于 8 km 至零度层的混合相阶段，四季的强弱特征较乱，但对于零度层以下的液相云，依然是夏季最强，春秋依次随后，冬季最弱。

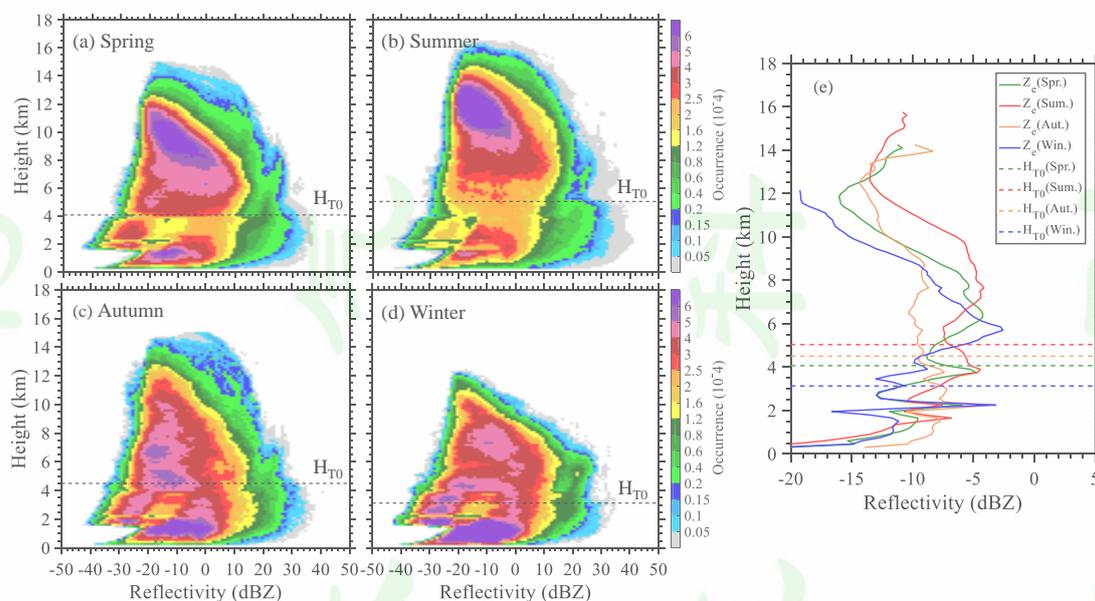


图4 四个季节 Z_e 的 NCFAD 分布 (a–d) 和 Z_e 中位数廓线和零度层平均高度 H_{T0} (e)

Fig.4 NCFADs of Z_e (a–d) and profiles of averaged Z_e and altitude of zero-degree isothermal layer (e) for four seasons.

图 5 给出了不同季节 CBH、CTH、CTK、CGD 的箱型图统计结果。可见，该地区不同季节云宏观参数的分布也存在明显差异。整体而言，因最频繁和最强烈的对流活动，夏季的云底高度和云顶高度都最高、云层最厚、云层间隙也最大，春季和秋季依次随后，而冬季的云层则最低、最薄、间隙最小。若以中位数代表这些宏观参数的主要分布，四季的 CBH 分别为：4.68 km、6.99 km、3.33 km、2.22 km，CTH 分别为：6.93 km、9.81 km、5.22 km、3.51 km，CTK 分别为：1.35 km、1.50 km、1.11 km、1.14 km，CGD 分别为：1.29 km、1.71 km、1.02 km、1.02 km。表 2 为四个季节云层数 CLN 的统计结果，结果发现，该地区全年均以单层云为主，但雨季的双层云和多层云（定义为 3 层及以上）占比明显要超过干

季，夏季最高，春季次之，而秋冬季更低。

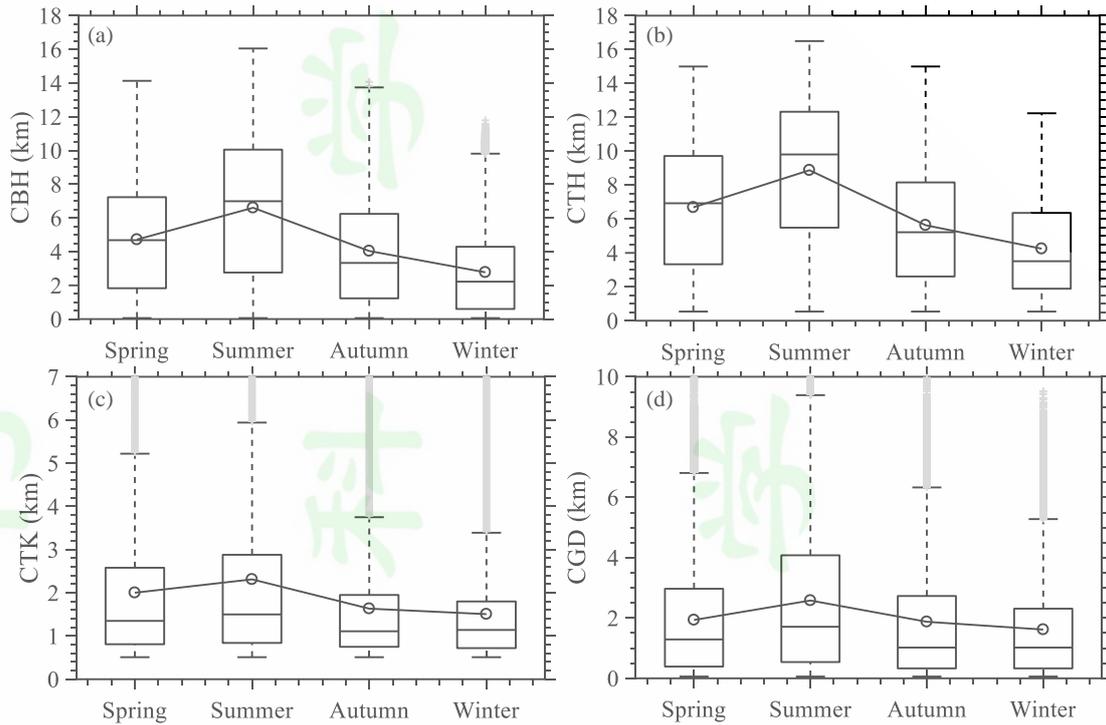


图5 四个季节 CBH、CTH、CTK 和 CGD 的箱线图 (a-d)，图中黑色框的底部和顶部分别代表第 25 和第 75 百分位数，中央横线代表中位数，圆圈代表平均值，黑色虚线分别延伸至最大值和最小值，灰色“+”号代表离群值

Fig.5 Boxplots of CBH, CTH, CTK, and CGD for four seasons. In each boxplot, the base and top edges of the black box denote 25 and 75 percentages, respectively, the center bars are medians, the circles represent averages, the black dashed lines extend to the maximum and minimum values, respectively, and the grey crisscrosses mean outliers.

表 2 四个季节单层云、双层云和多层云（指三层及以上）的样本数及占比

Table 2. Sample numbers and percentages of single-layer cloud, double-layer cloud, and multiple-layer cloud for four seasons.

季节	单层云	双层云	多层云
春季	121425 (71.13%)	39616 (23.21%)	9667 (5.66%)
夏季	99117 (63.57%)	43152 (27.68%)	13647 (8.75%)
秋季	68324 (77.98%)	15925 (18.17%)	3373 (3.85%)
冬季	75310 (77.75%)	18102 (18.69%)	3447 (3.56%)

5 云垂直结构的日变化

受太阳辐射和大气层条件等变化的影响，云的垂直结构和参数也会呈现日变化 (Zhao et al., 2017; 霍娟等, 2020)。为研究该地区云的日变化特征，进一步对逐小时的云发生率、回波强度和宏观参数展开统计和分析。

图 6a-6d 为 2019~2022 年该地区四个季节逐小时平均的云发生率随高度分布，图 6e 为全部高度层逐小时平均的发生率，其中横虚线代表日平均值。可见，在春季，云发生率整

体从 00 时（北京时间，下同）开始逐渐增大至 08 时，这段时间的低云明显增多，尤其在 05–08 时达到峰值，但中高云的发生率则逐渐减小；随后，低层的发生率逐渐减小，但中高云的发生率在 14–15 时出现了一个小峰值；19 时以后，中高云的发生率显著增大，一直延续至午夜，这段时间低云的发生率变化不明显。夏季的云发生率日变化最为明显，随着午后对流发生发展，低云和高云的发生率都从 14 时开始迅速增大，低云的峰值在 19 时左右，高云的峰值在 18–21 时；夜间 22 时至日出 08 时，对流逐渐消散、大气层趋于稳定，所有云层的发生率都逐渐较小；上午 09 至中午 13 时，所有云层的发生率为全日最低。因水汽减少和太阳辐射减弱，秋季逐时的云发生率都明显低于春夏季，且主要为低云和中云，云发生率的日变化幅度也明显低于其他季节，但逐时变化趋势大致和夏季相似。冬季的低云发生率相比秋季有明显提高，且夜间的发生率高于白天，峰值约在 05–08 时；中云的发生率在 06–16 时略高于其他时段。

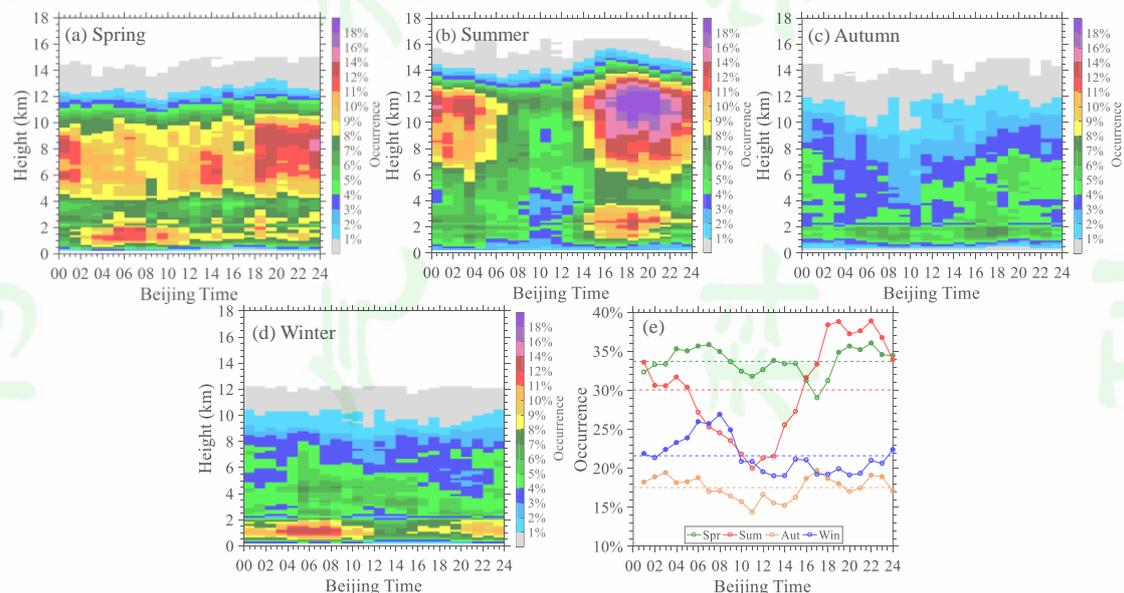


图 6 四个季节逐小时平均的云发生率随高度分布 (a–d) 和全部高度层逐小时平均的云发生率 (e)，(e) 中的横虚线为日平均值

Fig.6 Hourly averaged occurrences of clouds at various heights (a–d) and hourly averaged occurrences of clouds for all height layers (e) for four seasons, in subgraph (e), the horizontal dashed line denotes the daily average.

图 7a–7d 为四个季节逐小时平均的 Z_e 随高度分布，图 7e 为所有高度层逐小时平均的 Z_e 。可见，春季低云的回波强度在 18–20 时要强于其他时间，中高云的回波强度日变化更为显著，随着午后对流的增多，14–20 时的回波明显要强于其他时段。对于夏季，大部分时次的云回波都相对春季有所增强，中高云的强回波也伸展得更高；该季节午后到前半夜更为频繁和强烈的对流活动，使得云回波在 14–22 时明显强于其他时段；相比春季，夏季午后到前半夜的回波强度更大、持续时间也 longer，而回波强度最低值出现在上午 10 时左右。秋季的云回波强度日变化在趋势上与夏季也相似，但大部分时次的回波都有所减弱，秋季午后到前半夜的中高云强回波持续时间也更短、反射率因子更小，强回波主要集中在 18–22 时，但秋季 17–22 时的低云回波反而是四季中强度最大的。冬季的云回波强度日变化相

对不显著，只有 5–7 km 的强回波存在较为明显的日变化；从凌晨到下午，这个高度段的云回波强度随时间先减弱再增强，与其他季节不同的是，18 时之后秋季的云回波强度逐渐减弱。

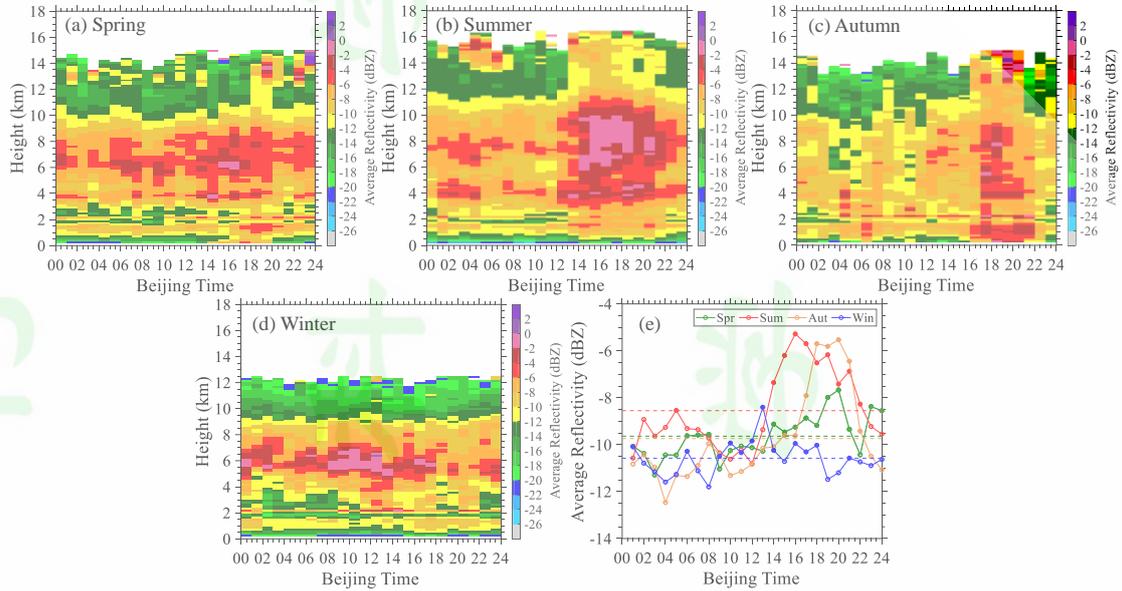


图 7 四个季节逐小时平均的 Z_e 随高度分布 (a–d) 和全部高度层逐小时平均的 Z_e (e)，(e) 中的横虚线为日平均值

Fig.7 Hourly averaged Z_e of clouds at various heights (a–d) and hourly averaged Z_e of clouds for all height layers (e) for four seasons, in subgraph (e), the horizontal dashed line denotes the daily average.

图 8a–8d 为四个季节逐小时平均的 CBH、CTH、CTK 和 CGD 曲线图，图中横虚线为日平均值。可见，所有时次的 CBH 和 CTH 都表现为夏季最大，春秋季随后，冬季最低。除了中午前后，夏季其余时刻的 CTK 也高于春季，秋冬季 CTK 则都更低。对于 CBH 的日变化，随着午后对流云发生发展，并持续到前半夜，春夏秋的云底高度也随之增高，结合图 6 的发生率结果可得出：春季因午后低云和中高云同时爆发，使得 CBH 在 13 时超过全天平均，至凌晨 03 时后才逐渐减小；夏季因午后低云爆发更早，使得 CBH 在 18 时才超过全天平均，此外，上午 10 时附近的 CBH 有个小峰值，这是由于低云在该时刻最少；秋季午后对流明显强度相对更弱，CBH 在 20–05 时超过全天平均，同时与夏季相反的是，秋季在 10 时附近因低云最多，使得 CBH 最小；冬季的 CBH 日变化差异最不显著，在中午 12 时前后的差异稍微明显。四季的 CTH 日变化趋势和 CBH 非常相似，也是受对流发生发展和云层类型的影响。对于 CTK 的日变化，春夏秋三季分别在午后至前半夜的 16–20 时、16–22 时和 18–21 时分别超过全天平均值，但在冬季的云厚日变化特征不明显。四个季节的 CGD 日变化特征都不显著，但平均而言，夏季的云层间隙最大，春秋季依次随后，冬季的最低。

图 8e 给出了四个季节每隔两小时的云层数柱状图，图中 slc、dlc 和 mlc 分别代表单层云、双层云和多层云。可见，春夏秋三季在午后至前半夜的单层云比例有所下降，反之，双层云和多层云的比例有所上升，这种变化在夏季最为明显，夏季双层云和多层云的比例

在 19 时达到最高，可达 53%；冬季的云层数日变化不显著。

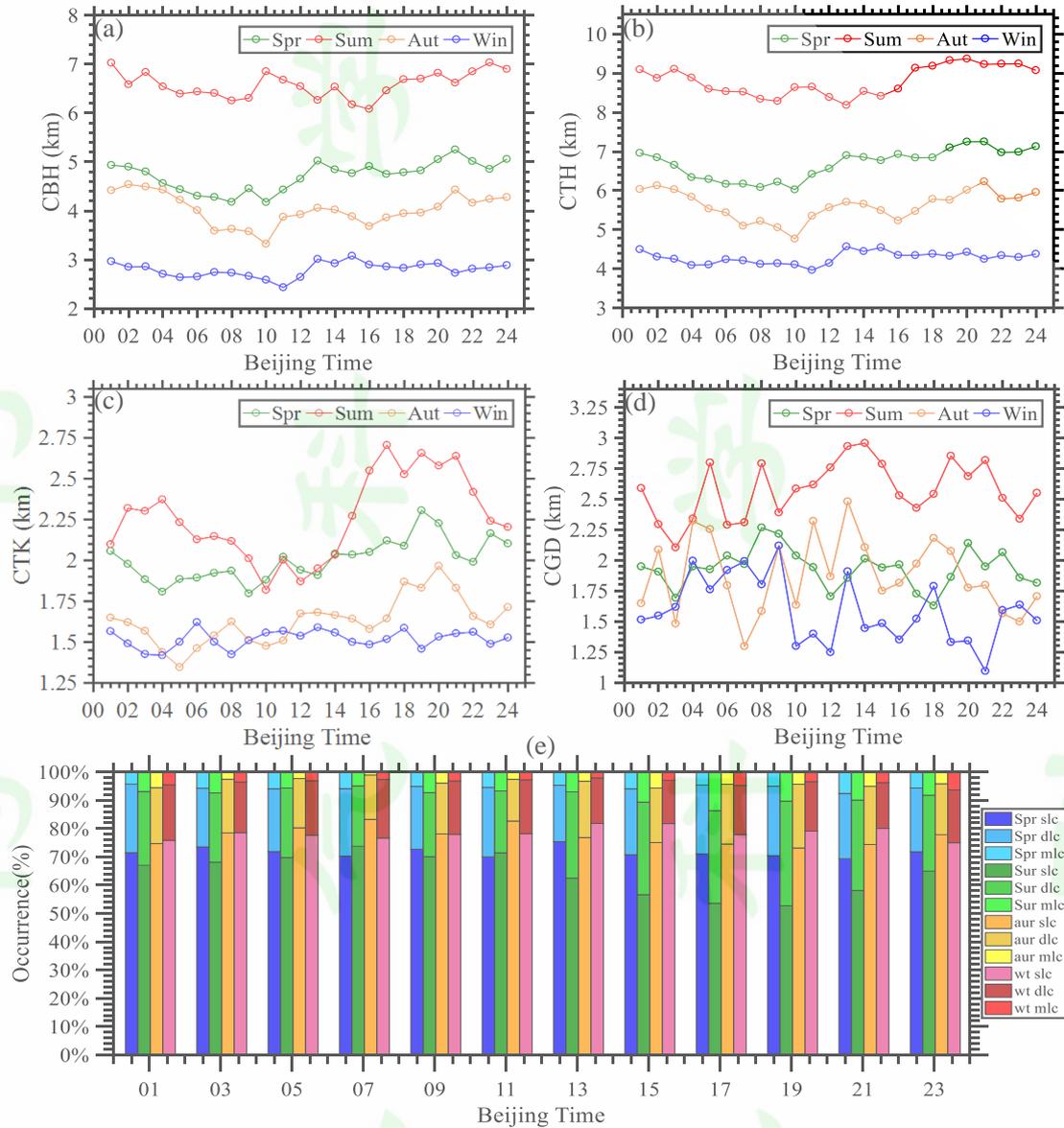


图 8 四个季节逐小时平均的 CBH、CTH、CTK 和 CGD (a-d) 和每隔两小时的 CLN 占比 (e)，(a-d) 中的横虚线代表日平均值，(e) 中 'slc'、'dlc' 和 'mlc' 分别代表单层云、双层云和多层云
 Fig.8 Hourly averaged CBH, CTH, CTK, and CGD (a-d) and percentages of CLN at 2-hour interval (e) for four seasons, in subgraphs (a-d), the horizontal dashed lines represent daily averages, in subgraph (e), the 'slc', 'dlc', and 'mlc' denote single-layer cloud, double-layer cloud, and multiple-layer cloud, respectively.

6 讨论

云的发生发展与水汽条件和热动力条件密不可分，为讨论该地区水汽和热动力条件变化对云垂直结构的影响，本文进一步利用 ERA5 再分析资料，统计了四个季节 850 hPa 的平均比湿 Q (g kg^{-1})、水平风场和对流有效位能 CAPE (J kg^{-1})，结果如图 9 和图 10。可见，在春季，东亚季风逐渐建立并向北发展，南海季风进入过渡期，使得建瓯地区的平均 Q 值增加到 9 g kg^{-1} 左右，为云的生成提供必要的水汽条件，CAPE 平均为 128.05 J kg^{-1} ，为云的

发展提供热动力条件。到夏季，东亚季风和南海季风达到最强盛期，洋面充足的暖湿空气被输送到陆地上，建瓯地区的平均 Q 值可达到 15 g kg^{-1} ；另一方面，CAPE 也显著增大，平均可达 623.66 J kg^{-1} ，该季节的水汽和动力条件都强于其他季节，促使更多积雨云等对流活动，从而生成更多高云和厚云。秋季，随着夏季风的减弱和西北冷空气的入侵，建瓯地区盛行风转为东北风，平均 Q 值接近春季，但是 CAPE 值平均只有 74.25 J kg^{-1} ，对流发展条件减弱，云层集中在中低层。随着东亚冬季风建立，来自中高纬的干冷空气通过盛行的西北风，可以远达华南和华东地区，平均 Q 和 CAPE 达到最低值，大气较为稳定，因此建瓯地区冬季多为低云，并且云层最薄。上述的水汽和热动力条件季节变化，与图 3、图 4 和图 5 中观测到的云垂直结构季节变化十分一致。

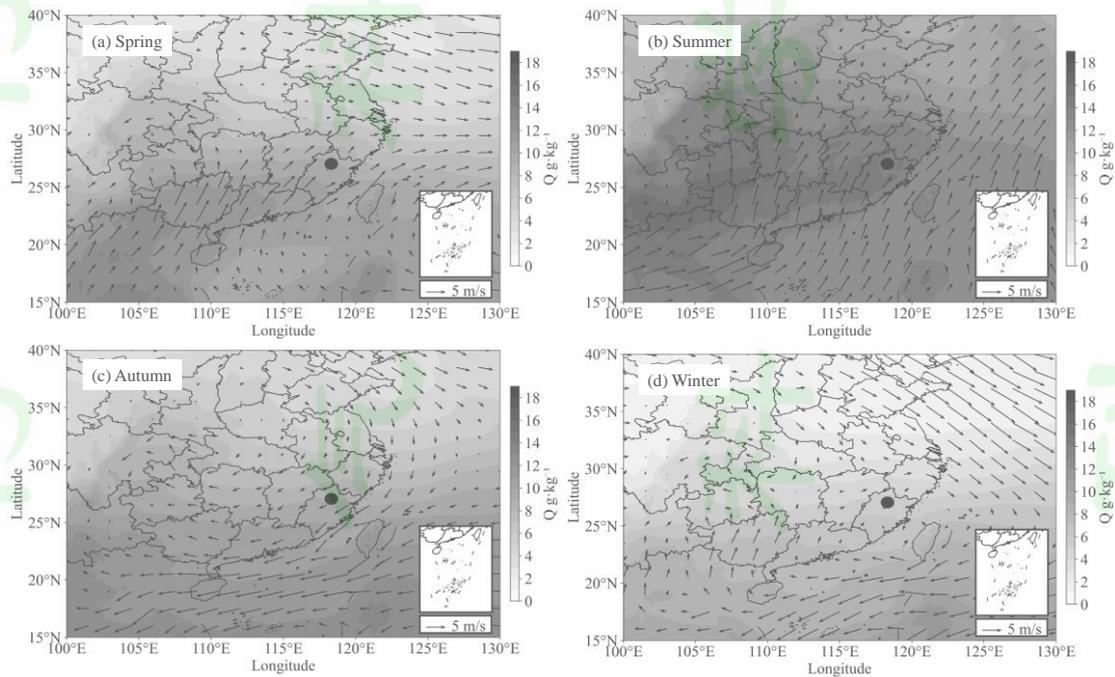


图 9 2019~2022 年四个季节 850 hPa 上的平均比湿 Q (g kg^{-1}) (填色) 和水平风场 (箭头)，黑色圆点为福建建瓯站的位置

Fig.9 Averaged specific humidities Q (g kg^{-1} , color filled) and horizontal winds (arrows) for four seasons during 2019~2022, in subgraphs, the black circles represent the position of observation site.

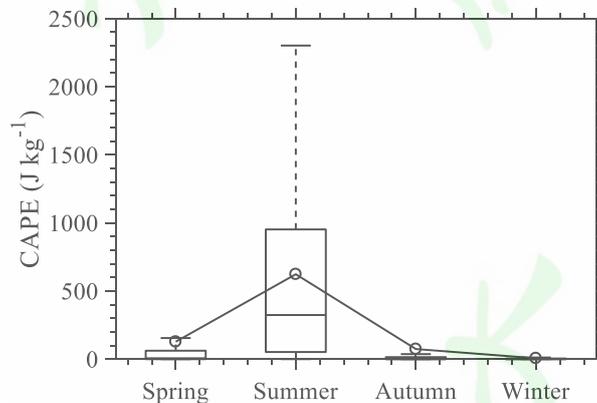


图 10 2019~2022 年观测站点上空四个季节的 CAPE (J kg^{-1}) 箱线图，箱线图中各要素的含义同图 5

Fig.10 Boxplots of CAPEs (J kg^{-1}) over the observation site for four seasons during 2019~2022, the meaning of

elements in each box is the same as depicted in captions of Fig. 5.

进一步统计了四个季节逐小时平均的 CAPE 和云抬升凝结高度 LCL，结果如图 11，其中 LCL 由地面温度和露点温度计算得到。可见，CAPE 的日变化与图 6、图 7 和图 8 中的云发生率、强度、和宏观参数的日变化也较为一致。春夏秋三季的午后 CAPE 增大，使得云发生率、云顶高度和云厚度也增大，这种对应关系在夏季最为显著；冬季的 CAPE 都接近于 0，基本没有变化，使得云垂直结构和宏观参数的浮动也较小。因温度和湿度的变化，春季和冬季的 LCL 整体比夏季和秋季的低。四季的 LCL 的日变化特征也十分显著，10–19 时的 LCL 明显高于其他时段。虽然 LCL 与实际云的云底高度还有所差距，但其增大的时刻与图 8 中 CBH 的增大时刻也较为一致，均在上午 10 时附近。

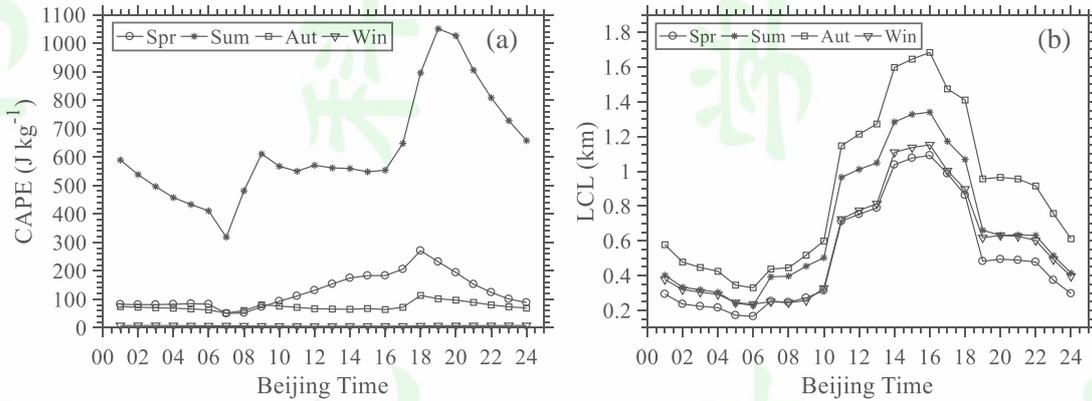


图 11 2019~2022 年观测站点上空四个季节逐小时平均的 CAPE ($J kg^{-1}$) (a) 和 LCL (m)

Fig.11 Hourly averaged CAPEs ($J kg^{-1}$) (a) and LCLs (m) (b) over the observation site for four seasons during 2019~2022.

7 结论和展望

相比于气象卫星和探空等，地基测云雷达在时空分辨率、资料连续性等方面有显著优势，本文利用福建建瓯地区 2019~2022 年的 Ka 波段毫米波云雷达资料，研究了该地区云发生率、垂直结构和参数的季节变化及日变化特征，并从水汽和热动力条件对观测的云特征和差异进行了成因探讨。主要得到以下结论：

(1) 整体而言，该地区春季的云发生率最高，夏冬季依次随后，秋季最低；春夏季主要为低云和高云，秋冬季则以低云和中云为主。

(2) 不同季节的云回波垂直分布、强度、以及不同相态层的变化特征都存在一定差异。春夏季的云发展高度高于秋冬季，高云回波整体比低云更强。对于云的冰相层和液相层，夏季的 Z_e 都最大，春秋季依次随后，冬季最低。因最频繁和强烈的对流活动，夏季的云底高度和云顶高度都最高、云层最厚、云层间隙也最大，春秋季的依次随后，而冬季的云层则最低、最薄、间隙最小。春夏季的双层云和多层云占比明显高于秋冬季。

(3) 不同季节云垂直结构和参数的日变化特征显著，但也存在差异。春夏季的高云发生率、回波强度、云底高度、云顶高度和云厚度都显著增大，但夏季对流启动更早、生命周期更长、对流更为强烈，使得各个云参数的增大幅度和峰值持续时间也更大；春夏两季

的低云日变化也有所不同，虽然低云回波都在傍晚附近达到最强，但春季的高发生率主要集中在日出前后，夏季的则也出现在傍晚附近。秋冬季逐时的云发生率、回波强度和其他云参数都低于春夏季。秋季云的发生率和回波强度的逐时变化趋势大致和夏季相似，冬季的低云发生率和回波强度与春季类似。夏季双层云和多层云的比例在午后至前半夜显著提高，在 19 时最高，可达 53%，这种趋势在春秋季节减弱，而冬季则无此特征。

(4) 与云雷达观测的云垂直结构和参数的季节变化和日变化对照，该地区平均比湿、水平风场和对流有效位能的季节变化和日变化都能很好的正相关，说明该地区云的垂直结构和参数特征很大程度受到不同季节和不同时刻水汽及热动力条件的影响，尤其是季风等关键天气系统和大气对流不稳定。

值得说明的是，目前国内大多数的固态毫米波云雷达为了提高综合能力均采用多种模式组合的探测方式，这种方式会使得雷达灵敏度在模式的交接高度上（如本文 1.47 km 和 3.87 km）产生跳变；此外雷达灵敏度自身也会随着探测高度的增加而减小。这些灵敏度随高度的变化会对垂直方向上云发生率、云底高度和云顶高度等的探测产生一定影响，诸如郑佳锋等（2021）、曾正茂等（2022）和 Liu et al.（2019）等研究中也有所体现。原则上，灵敏度随高度的变化对云参数的时间变化特征不会造成影响，但对垂直结构和参数造成的测量误差在未来仍需进一步研究和评估。

参考文献

- [1] 曹蓓, 赵震, 白爱娟. 2019. WRF 模式云参数化方案对一次深对流系统模拟的验证和改进 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 626-638. Cao Bei, Zhao Zhen, Bai Aijuan. 2019. Verification and Improvement of Cloud Microphysics Parameterization Schemes in WRF Model for Simulation of a Deep Convection System [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 626-638. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19001
- [2] Görsdorf U, Lehmann V, Bauer-Pfundstein M, et al. 2015. A 35-GHz Polarimetric Doppler Radar for Long-Term Observations of Cloud Parameters-Description of System and Data Processing [J]. J Atmos Oceanic Technol., 32: 675-690. doi: 10.1175/JTECH-D-14-00066.1
- [3] Heymsfield J A, Bansemir A, Matrosov S, et al. 2008. The 94 GHz radar dim band: Relevance to ice cloud properties and CloudSat [J]. Geophys. Res. Lett., 35(3): 3802-1-3802-6. doi: 10.1029/2007GL031361.
- [4] 洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. 大气科学, 30(5): 913-926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 913-926. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.20
- [5] 黄洁. 2021. 华南前汛期极端降水云微物理过程研究 [D]. 中国气象科学研究院. Huang Jie. 2021. Study on the Microphysical processes of Extreme Rainfall of the Pre-Monsoon Season in Southern China [D]. Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese). doi: 10.27631/d.cnki.gzqky.2021.000038
- [6] 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 Juan, Lyu Daren, Duan Shu, et al. 2020. Cloud Macro-Physical Characteristics in Beijing Based on Ka Radar Data during 2014-2017 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(1): 45-54. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18084
- [7] Kollias P, Bharadwaj N, Clothiaux E, et al. 2020. The ARM Radar Network: At the Leading Edge of Cloud

- and Precipitation Observations [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 101, 5, E588-E607, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0288.1>
- [8] Kollias P, Albrecht B. 2005. Why the melting layer radar reflectivity is not bright at 94 GHz [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(24): 1064-1067. doi: 10.1029/2005GL024074.
- [9] Li H, Moisseev D. 2019. Melting layer attenuation at Ka- and W-bands as derived from multifrequency radar Doppler spectra observations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(16): 9520-9533. doi: 10.1029/2019JD030316
- [10] 李浩然, 阮征, 刘黎平, 等. 2023. 地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展 [J]. *暴雨灾害*, 42(4): 361-371. Li Haoran, Ruan Zheng, Liu Liping, et al. 2023. Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 42(4): 361-371. doi: 10.12406/byzh.2023-075
- [11] Li H, Tiira J, von Lerber A, et al. 2020. Towards the connection between snow microphysics and melting layer: insights from multifrequency and dual-polarization radar observations during BAECC [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 20(15), 9547–9562. doi: 10.5194/acp-20-9547-2020
- [12] 李慧, 郑旭程, 苏立娟, 等. 2023. 基于毫米波云雷达的黄河流域内蒙古段云宏观特征分析 [J]. *干旱气象*, 41(3): 434-441. Li Hui, Zheng Xucheng, Su Lijuan, et al. 2023. Statistical analysis of cloud macrophysical characteristics in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin based on millimeter-wave cloud radar [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 41(3): 434-441. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-03-0434
- [13] 李琦, 蔡淼, 周毓荃, 等. 2021. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征 [J]. *大气科学*, 45(6): 1161–1172. Li Qi, Cai Miao, Zhou Yuquan, et al. 2021. Characteristics of Cloud Vertical Distribution Based on Cloud Identification by Radiosonde [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(6): 1161-1172. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.19246
- [14] Lismalini L, Marzuki M, Shafii M. 2021. Long-Term Change in Characteristics of Cloud Vertical Structures Over Sumatra from Radiosonde Observations [J]. *Jurnal Ilmu Fisika | Universitas Andalas*, 13(1): 41-53. doi: 10.25077/jif.13.1.41-53.2021
- [15] Liu B, Huo J, Lyu D, et al. 2021. Assessment of FY-4A and Himawari-8 cloud top height retrieval through comparison with ground-based millimeter radar at sites in Tibet and Beijing [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(3): 367-378. doi: 10.1007/s00376-021-0337-2
- [16] 刘黎平. 2023. 基于 Ka/Ku 双波段回波强度差约束和多普勒功率谱的微物理和动力参数反演方法和应用 [J]. *大气科学*, 47(6): 1827-1842. Liu Liping. 2023. Air Vertical Motion and Raindrop Size Distribution Retrieval Algorithm Based on Reflectivity Spectral Density Data and Dual-Wavelength Ratio Constraint with Ka/Ku Dual-Wavelength Cloud Radar and Its Preliminary Applications [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(6): 1827-1842. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21199
- [17] Liu L, Ding H, Dong X, et al. 2019. Applications of QC and Merged Doppler Spectral Density Data from Ka-Band Cloud Radar to Microphysics Retrieval and Comparison with Airplane in Situ Observation [J]. *Remote Sens.*, 11(13): 1595. doi: 10.3390/rs11131595
- [18] Liu L, Ruan Z, Zheng J, et al. 2017. Comparing and Merging Observation Data from Ka-Band Cloud Radar, C-Band Frequency-Modulated Continuous Wave Radar and Ceilometer Systems [J]. *Remote Sens.*, 9(12): 1282. doi: 10.3390/rs9121282
- [19] Liu L, Zheng J. 2019. Algorithms for Doppler Spectral Density Data Quality Control and Merging for the Ka-Band Solid-State Transmitter Cloud Radar. *Remote Sens* [J]. 11, 209. <https://doi.org/10.3390/rs11020209>
- [20] 柳艳菊, 丁一汇. 2007. 亚洲夏季风爆发的基本气候特征分析 [J]. *气象学报*, 65(4): 511-526. Liu Yanju, Ding Yihui. 2007. Analysis of the basic features of the onset of the Asian summer monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65(4): 511-526. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2007.04.005
- [21] 刘屹岷, 燕亚菲, 吕建华, 等. 2018. 基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的青藏高原云辐射及降水的研究

- 进展 [J]. 大气科学, 42(4): 847-858. Liu Yimin, Yan Yafei, Lu Jianhua, Liu Xiaolin. 2018. Review of current investigations of cloud, radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 847-858. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17281.
- [22] Moran K, Martner B, Post M, et al. 1998. An unattended cloud-profiling radar for use in climate research [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79(3): 443-455. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0443:AUCPRF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0443:AUCPRF>2.0.CO;2)
- [23] 彭杰, 王晓峰, 傅新姝, 等. 2023. 面向业务应用的上海地区毫米波云雷达观测质量评估 [J]. 大气科学学报, 46(03): 466-480. Peng Jie, Wang Xiaofeng, Fu Xinshu, et al. 2023. Operational usage-oriented evaluation of millimeter radar observations in Shanghai [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 466-480. doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.20220623001.
- [24] Randall D A, Harshvardhan, Dazlich D A, et al. 1989. Interactions among radiation, convection and large-scale dynamics in a general circulation model [J]. J. Atmos. Sci., 46(13): 1943-1970. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<1943:iarcal>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<1943:iarcal>2.0.co;2)
- [25] Saloni S, Avinash D, Kumar A M, et al. 2022. A decadal climatology of cloud vertical structure over the Indo-Gangetic Plain using radiosonde and radar observations [J]. Atmos. Res., 266, 105949. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105949
- [26] 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 Gaili, Zhou Renran, Zhaxi Suolang, et al. 2021. Comprehensive observations and preliminary statistical analysis of clouds and precipitation characteristics in Motuo of Tibet Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 79(5): 841-852. doi: 10.11676/qxxb2021.054
- [27] 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征 [J]. 大气科学, 35(6): 1117-1131. Wang Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(6): 1117-1131. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.11
- [28] Wang J, Rossow W B. 1998. Effects of Cloud Vertical Structure on Atmospheric Circulation in the GISS GCM [J]. J. Climate., 11(11): 3010-3029. <https://www.jstor.org/stable/26244244>
- [29] 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): 815-822. Wang Zhe, Wang Zhenghui, Cao Xiaozhong. 2016. Consistency analysis for cloud vertical structure derived from millimeter cloud radar and radiosonde profiles [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74(5), 815-826. doi: 10.11676/qxxb2016.057
- [30] 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 Chong, Liu Liping, Zhai Xiaochun. 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 (in Chinese), 41 (4): 659-672, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16170
- [31] 武静雅, 孙强, 毕永恒, 等. 2022. 利用 Ka 波段云雷达对青藏高原三类重要天气系统云宏观参数日变化特征的研究 [J]. 大气科学, 2022, 46(04): 1030-1040. Wu Jingya, Sun Qiang, Bi Yongheng, et al. 2022. Study of Diurnal Variation of Cloud Macro Parameters in Three Important Weather Systems over the Tibetan Plateau Using Ka-Band Cloud Radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(4): 1030-1040. doi: 10.3878/j.issn.10069895.2106.21061
- [32] 吴举秀, 魏鸣, 周杰. 2014. 94GHz 云雷达回波及测云能力分析 [J]. 气象学报, 72(2): 402-416. Wu Juxiu, Wei Ming, Zhou Jie. 2014. Echo and capability analysis of 94 GHz cloud radars [J]. Acta Meteorologica Sinica

- (in Chinese), 72(2): 402-416. doi: 10.11676/qxxb2014.001
- [33] 尹金方, 王东海, 翟国庆, 等. 2013. 基于星载云雷达资料的东亚大陆云垂直结构特征分析 [J]. 气象学报, 71(1): 121-133. Yin Jinfang, Wang Donghai, Zhai Guoqing, et al. 2013. Analysis of Cloud Vertical Structure Characteristics over East Asian Continent Based on Satellite-borne Cloud Radar Data [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 71(1), 121-133. doi: 10.11676/qxxb2013.010
- [34] Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al. 2006. Observations of Precipitation Size and Fall Speed Characteristics within Coexisting Rain and Wet Snow [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 45(10): 1450-1464. doi: org/10.1175/JAM2406.1
- [35] 张晋茹, 杨莲梅, 刘凡, 等. 2023. 基于 Ka 波段云雷达观测的中国西天山降雨云宏观物理特征研究 [J]. 大气科学, 47(3): 756-768. Zhang Jinru, Yang Lianmei, Liu Fan, et al. 2023. Macro-Micro Physical Characteristics of Rainfall Clouds in the West Tianshan Mountains Based on Ka Band Cloud Radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 47(3): 756-768. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21112
- [36] 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 Zhengmao, Zheng Jiafeng, Lyu Qiaoyi, et al. 2022. Quality control and effective evaluation of range side lobe echo of millimeter wave cloud radar [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 48(6), 760-772. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032103
- [37] 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]. *Atmos. Res.*, 190: 68-76. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.02.002.
- [38] Zhao C, Liu L, Wang Q, et al. 2016. Toward Understanding the Properties of High Ice Clouds at the Naqu Site on the Tibetan Plateau Using Ground-Based Active Remote Sensing Measurements Obtained during a Short Period in July 2014 [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 55(11): 2493-2507. doi: 10.1175/JAMC-D-16-0038.1.
- [39] Zhao W, Marchand R, Fu Q. 2017. The diurnal cycle of clouds and precipitation at the ARM SGP site: Cloud radar observations and simulations from the multiscale modeling framework [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122: 7519-7536. doi:10.1002/2016JD026353.
- [40] 郑佳锋, 杨华, 曾正茂, 等. 2021. 那曲夏季云宏观特征的毫米波雷达资料研究 [J]. 红外与毫米波学报, 40(04): 471-482. Zheng Jiafeng, Yang Hua, Zeng Zhengmao, et al. 2021. Cloud macro-physical characteristics over Nagqu in summer observed by a millimeter-wave radar [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (in Chinese), 40(04): 471-482. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2021.04.006
- [41] Zhe F, Dong X, Xi B, 2009. A Method to Merge WSR-88D Data with ARM SGP Millimeter Cloud Radar Data by Studying Deep Convective Systems [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 958-971, <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1190.1>.
- [42] Zheng X, Yang Y, Yuan Y, et al. 2022 Comparison of Macro- and Microphysical Properties in Precipitating and Non-Precipitating Clouds over Central-Eastern China during Warm Season [J]. *Remote Sens.* 14, 152. doi: 10.3390/rs14010152
- [43] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 2009. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望 [J]. 地球科学进展, 24(4): 383-391. Zhong Linzhi, Liu Liping, Ge Runsheng. 2009. Characteristics About the Millimeter-Wavelength Radar and Its Status and Prospects at Home and Abroad [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 24(4): 383-391. doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.04.004
- [44] 周青. 2019. 基于多源高时空分辨率同步观测资料的北京云垂直结构研究 [D]. 南京信息工程大学. Zhou Qing. 2019. Study on the cloud vertical structure in Beijing based on synchronous observation data with multi-source and high temporal and spatial Resolution [D]. Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese). doi: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2019.000740.

- [45] 周心河,熊喆. 2019. 区域气候模式不同积云对流参数化方案对新疆气候模拟的影响研究 [J]. 气候与环境研究, 24(2): 169-185. Zhou Xinhe, Xiong Zhe. 2019. Impacts of different cumulus convective parameterization schemes on regional climate model simulation over Xinjiang [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(2): 169-185. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18075.

刊 科 学
待 气 科 刊
大 气 待
大 气 待