

# 青藏高原墨脱地区云降水综合观测及初步统计特征分析<sup>\*</sup>

王改利<sup>1</sup> 周任然<sup>1</sup> 扎西索郎<sup>2</sup> 刘黎平<sup>1</sup>  
WANG Gaili<sup>1</sup> ZHOU Renran<sup>1</sup> ZHAXI Suolang<sup>2</sup> LIU Liping<sup>1</sup>

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

2. 西藏自治区墨脱气象局, 墨脱, 860700

1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2. Meteorological Bureau of Motuo County, Motuo 860700, China

2021-01-26 收稿, 2021-06-12 改回。

王改利, 周任然, 扎西索郎, 刘黎平. 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. 气象学报, 79(5): 841-852

**Wang Gaili, Zhou Renran, Zhaxi Suolang, Liu Liping. 2021. Comprehensive observations and preliminary statistical analysis of clouds and precipitation characteristics in Motuo of Tibet Plateau. Acta Meteorologica Sinica, 79(5):841-852**

**Abstract** In order to better understand the three-dimensional structure and microphysical characteristics of clouds and precipitation at the entrance of the water vapor transport channel in Yarlung Zangbo Grand Canyon, the Chinese Academy of Meteorological Sciences established a field campaign base in Motuo in 2019 under the support of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program and the National (Key) Basic Research and Development Program of China. Motuo is located at the southeastern Tibet Plateau (TP). Advanced X-band dual polarization phased array radars, Ka band cloud radars, K band micro radars, precipitation phenomenometers, and microwave radiometers are used to carry out comprehensive observations of water vapor, clouds and precipitation. One of the specific scientific goals of the campaign is to obtain a better understanding of cloud and precipitation microphysical processes and improve the parameterization scheme of the cloud-precipitation microphysical processes in numerical models. Based on cloud radar data collected for the period from January to December 2019 and precipitation phenomenometer data for the period from June 2019 to June 2020, the macroscopic characteristics of clouds and raindrop spectrum characteristics are statistically analyzed. The macroscopic characteristics of clouds indicate that the occurrence frequency of clouds in this area is relatively high, accounting for 67% of cloud radar profiles in 2019, and precipitation clouds account for 45% of the cloud cover. Occurrence frequency of cloud base height (CBHs) in both dry and rainy seasons experienced two peaks corresponding to heights of 0–1 km and 2–3 km, respectively. One striking feature is that more than 40% of the CBHs are lower than 1 km probably due to high occurrence frequency of precipitation clouds. Nearly 60% of the cloud top heights (CTHs) are between 4 and 7 km. In general, the vertical frequency distributions of CBHs and CTHs indicate that low- and mid-level clouds prevailed in Motuo during the observational period. Clouds tended to form most frequently from the afternoon to the evening and slowly dissipate from the morning to the noon time. In terms of the raindrop spectrum characteristics, the average raindrop spectral width and number concentration of large drops increased with rainfall intensity. The combination of small- and mid-size drops dominated precipitation in Motuo, and their contributions exceeded 99% of the number concentration. Convective precipitation in Motuo is identified to be maritime-like precipitation and characterized by a large normalized intercept parameter  $\lg N_w = 3.6\text{--}4.5$  (with a mean value of 4.01) and small mass-weighted mean diameter  $D_m = 1.0\text{--}1.6$  mm (with a mean value of 1.38 mm). Furthermore, the characteristic bimodality of  $\lg N_w$  was

\* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505702)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0105)和国家自然科学基金项目(41775036、42030611)。

作者简介: 王改利, 主要从事雷达气象和云降水过程研究。E-mail: wanggl@cma.gov.cn

observed in Motuo, corresponding to convective and stratiform precipitation.

**Key words** Tibetan Plateau, Radar observation, Macroscopic characteristics, Raindrop spectrum distribution, Maritime-like convective precipitation

**摘要** 为加深对雅鲁藏布大峡谷水汽通道入口处云和降水三维结构及微物理特征的认识,在第二次青藏高原综合科学考察研究专题和国家重点研发计划项目的支持下,中国气象科学研究院于2019年在西藏墨脱地区建立了野外观测试验基地,开展了水汽、云和降水的综合观测,先后布设了先进的Ka波段云雷达、微波辐射计、X波段双偏振相控阵雷达、降水现象仪、K波段微雨雷达等设备,获取了高时、空分辨率的云和降水的宏、微观数据。文中简单介绍了此次观测的情况,并利用云雷达2019年的观测数据和降水现象仪2019年6月至2020年6月的观测数据对云的宏观特征及雨滴谱特征进行了统计分析。从云的宏观特征来看,该地区云的发生率较高,云廓线占2019年云雷达观测廓线的67%,降水云廓线占总云廓线的45%。旱季和雨季云底高度的频率分布在垂直方向均有两个高值区,分别为0—1 km和2—3 km,且超过40%的云底高度低于1 km,这可能是墨脱降水云较多造成的。接近60%的云顶高度在4—7 km。总的来说,墨脱地区以中云和低云为主,云通常在下午到晚上形成,早上到中午慢慢消散;从雨滴谱分布特征来看,该地区平均的雨滴谱宽和大雨滴的浓度随雨强的增大而增大,降水以中、小粒子为主,中、小粒子浓度超过粒子数浓度的99%。对流云降水的特点是粒子直径较小,而数浓度较高。粒子质量加权平均直径( $D_m$ )的范围在1.0—1.6 mm(平均1.38 mm),标准化截距参数( $\lg N_w$ )的范围在3.6—4.5(平均4.01),表现出海洋性对流降水的特征。此外,该地区降水的 $\lg N_w$ 呈现双峰特征,分别对应于对流云和层状云降水。

**关键词** 青藏高原, 雷达观测, 宏观特征, 雨滴谱分布, 海洋性对流降水

中图法分类号 P426

## 1 引言

青藏高原占据了中国陆地面积的四分之一,是世界上海拔最高、地形最复杂的高原,平均高度超过了4000 m,被称为“世界屋脊”(刘黎平等,2015;常祎等,2016;赵平等,2018)。青藏高原特殊的动力、热力效应对于中国灾害天气的发生、发展和气候变化起重要作用,其上空的云和降水是全球大气能量和水循环的关键组成部分,因此青藏高原也被称为“亚洲水塔”和“第三极”(Xu, et al, 2008; Kang, et al, 2010; Li, 2018)。但针对青藏高原云和降水物理特征的观测数据很少,对青藏高原上空云和降水的物理特征了解不够,导致现有数值模式的参数化方案不能合理模拟和预报青藏高原的云和降水过程(刘黎平等,2015)。

对青藏高原上空云和降水的研究,卫星观测资料是非常重要的数据来源。Murakami(1983)、Fujinami等(2001)利用静止气象卫星(GMS)观测资料,研究了夏季深对流云团的日变化和青藏高原上空云活动的季节变化,发现青藏高原夏季的对流云在午后增强,傍晚达到最大值。基于TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星上的测雨雷达、云探测卫星(Cloudsat)上的云雷达和激光雷达探测数据,研究发现青藏高原对流云发展于相对干

燥和对流有效位能比较低的大气环境中,具有尺度小、相对比较弱的特点(傅云飞等,2007;李生辰等,2009;汪会等,2011)。基于MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)卫星数据分析发现,青藏高原地区的高、中、低云都有明显的季节变化,高云和中云在春季和夏季达到最大值(Li, et al, 2006)。但是,微波卫星反演在区分云和降水的液态水含量方面存在一定的不确定性(Wu, et al, 2019)。

为了推动高原气象的研究,中国科学院与中央气象局于1979年5—8月开展了第一次青藏高原气象科学试验(Tao, et al, 1986;赵平等,2018)。中外科学家于1993—1999年、2006—2009年联合开展了中日亚洲季风机制合作研究和JICA(Japan International Cooperation Agency)项目,进行青藏高原综合气象观测试验(陈隆勋,1999;Xu, et al, 2008)。为了了解青藏高原上空云和降水的物理特征,在开展的3次青藏高原大气科学试验中,也进行了一些针对降水系统的综合观测。例如,1979年开展的第一次青藏高原大气科学试验,在高原的中部(那曲)和南部(拉萨)分别架设了一部常规数字化X波段雷达进行对流云降水的观测(秦宏德,1983)。在第二次青藏高原大气科学试验时(1998),利用X波段多普勒雷达、雨量计观测网和探空系统对那曲地区

降水过程进行了综合观测(刘黎平等, 1999)。2014年开展的第三次青藏高原大气科学试验, 利用Ka波段毫米波云雷达、C波段调频连续波雷达、地面雨滴谱仪以及激光云高仪在那曲地区进行了云和降水多种雷达综合观测试验(刘黎平等, 2015)。不难看出, 过去开展的青藏高原云和降水的综合观测试验, 主要集中在那曲地区。利用这些观测试验取得的数据, 研究了季风爆发前后那曲地区对流过程的日变化特征, 对比了地基雷达与TRMM测雨雷达观测的一致性(刘黎平等, 2015); 分析了那曲地区夏季不同云类型的宏观特征及对流云结构和雨滴谱分布日变化特征(刘黎平等, 2015; 常伟等, 2016)。

青藏高原复杂的地形和下垫面特征以及广袤的面积, 使得观测站点的代表性受到很大限制。墨脱位于青藏高原东南缘, 为河谷地形, 其与高原中部海拔4500 m的那曲地区的高原山地气候特征显著不同, 墨脱的平均海拔为1200 m, 属于亚热带气候, 水汽充沛, 年平均降水量超过2000 mm(陈萍等, 2018)。墨脱作为水汽输送通道的前沿, 影响着藏东南区域内的气候变化和生态环境。因此, 在2019年开展的第二次青藏高原科学考察项目和国家重点研发计划项目的支持下, 第一次在青藏高原东南部雅鲁藏布大峡谷水汽入口处的墨脱地区建

立了云和降水的观测试验基地。这次观测试验采用了中国自主研发的Ka波段云雷达(KaCR)、X波段双偏振相控阵雷达、降水现象仪以及引进的微雨雷达、微波辐射计等最先进的探测设备, 这些观测资料填补了该地区云和降水观测的空白, 为研究藏东南地区水汽通道入口处云和降水的物理特征、大气水循环的变化规律提供数据基础。对优化数值预报模式中微物理过程参数化方案, 提升藏东南气象灾害防御能力有十分重要的意义。

## 2 观测设备和观测内容

墨脱观测试验基地的位置( $95.32^{\circ}\text{E}/29.31^{\circ}\text{N}$ , 海拔1305 m)及青藏高原地形如图1所示, 中国气象科学研究院布设在墨脱野外试验基地的观测设备有: X波段双偏振相控阵雷达、Ka波段云雷达、K波段微雨雷达、降水现象仪、微波辐射计。

X波段双偏振相控阵雷达不仅可以观测降水系统的回波分布, 而且可以观测云和降水系统的风场变化、粒子相态及滴谱分布。采用极化技术和相控阵技术相结合, 使之具有精细化的双偏振多普勒天气探测能力, 灵活的波束控制和快速扫描模式能获得超高时间和空间分辨率, 提高了对中小尺度强对流天气系统的探测精度和质量, 可获得气象目标的三维信息, 有效消除现有天气雷达探测盲区, 提

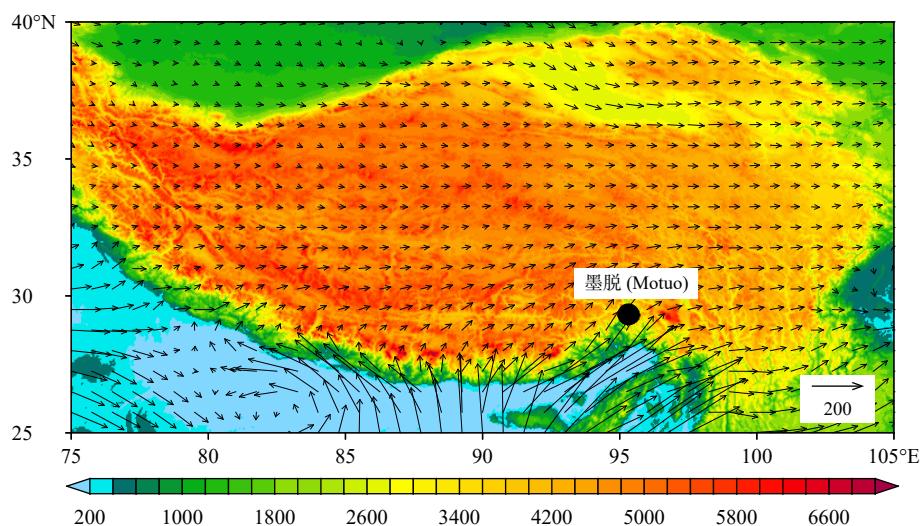


图1 西藏东南部墨脱观测场位置(黑色实心圆点)、青藏高原地形(色阶, 单位: m)及2019年7月平均垂直积分水汽通量(黑色箭头, 单位:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )

Fig. 1 Location of the Motuo observational site (black solid dot) and topography (shaded, unit: m) of the Tibetan Plateau, which is superimposed with mean vertical integral of water vapor flux in July 2019 (black arrows, unit:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )

高局部地区的短时临近预报的准确度。

Ka 波段云雷达(KaCR)是观测云和弱降水垂直廓线的重要手段,可以对云和弱降水的垂直结构进行连续观测,从而分析云和弱降水的微物理和动力参数的廓线特征。为了实现云和弱降水的连续稳定观测,中国气象科学研究院与安徽四创电子股份有限公司联合研发了固态发射机体制的 Ka 波段毫米波云雷达,该雷达采用了脉冲压缩、相干和非相干积累等技术,采用了 4 种观测模式(降水模式、边界层模式、中高层模式、卷云模式)的交替循环观测。

K 波段微雨雷达是德国 METEK 公司生产的垂直指向雷达,采用连续调频技术(FMCW),可获得降水粒子的功率谱密度,根据粒子下落速度与直径的经验公式,反演出粒子的雨滴谱、雨强等的垂直廓线。

采用华云升达(北京)气象科技有限责任公司生产的降水现象仪 DSG5 对地面雨滴谱进行测量,该仪器与德国 OTT 公司生产的雨滴谱仪类似,主要通过粒子对激光的遮挡来计算粒子的大小和速度。

美国 Radiometrics 公司生产的 35 通道 MP-3000A 型地基微波辐射计为此次墨脱野外观测提供 0—10 km 范围的水汽、温度、湿度以及液态水含量的廓线分布。

西藏墨脱野外观测基地位于西藏东南部,地处雅鲁藏布江下游。该地区是青藏高原海拔最低、最温和、雨量最充沛的地区,但交通不便,海拔落差大,雨季滑坡、泥石流频发。路途遥远和交通不便给墨脱野外观测场的建设带来了很多困难,因此这些观测设备都是陆续安装到墨脱观测场的。Ka 波段云雷达和微波辐射计开始观测时间为 2019 年 1 月,X 波段双偏振相控阵雷达和降水现象仪于 2019 年 6 月开始观测,而微雨雷达是从 2020 年 7 月开始观测。文中主要利用云雷达和降水现象仪统计分析墨脱地区云的宏观特征和雨滴谱特征,表 1 和表 2 分别给出了这两种设备的主要性能参数。

### 3 云的宏观统计特征

以 2019 年云雷达在墨脱野外试验基地的观测数据(1200261 根观测廓线)为基础,统计了藏东南雅鲁藏布大峡谷水汽通道入口处墨脱地区云的宏

表 1 Ka 波段云雷达主要性能参数

Table 1 Main operational parameters of Ka band cloud radar

	参数描述
工作体制	相干, 多普勒脉冲, 固态发射机, 脉冲压缩, 垂直观测
工作频率	33.44 GHz
探测要素	回波强度、径向速度、速度谱宽、线性退偏振因子、功率谱密度
探测范围	Z: -50—+30 dBz $V_r$ : 5.7—18.13 m/s $S_w$ : 0—4 m/s
时间分辨率	时间分辨率: 16 s
空间分辨率	距离分辨率: 30 m
探测距离	15 km(垂直)

表 2 DSG5 降水现象仪的主要性能参数

Table 2 Main operational parameters of the DSG5 precipitation phenomenometer

	参数描述
光源	红外发光二极管
发射功率	3 mW
采样面积	54 cm <sup>2</sup> (18 cm×3 cm)
工作波长	650 nm
粒子直径范围	0.062—24.5 mm
粒子速度范围	0.05—20.8 m/s
粒子等级	32×32
时间分辨率	60 s

观特征。首先采用频率分布的统计方法,确定了无云条件下近地面杂波和噪声的反射率和退偏振比阈值。利用阈值法和高斯滤波方法对云雷达数据进行质量控制,滤掉随机噪声和非气象雷达回波。[Zhou 等\(2019\)](#)对比了激光云高仪和云雷达反演的云底高度,二者差异较小(0.08 km),同时考虑到墨脱野外试验基地目前还没有架设激光云高仪,因此,参照已有的研究,将云雷达探测的回波上、下边界分别作为云顶和云底([刘黎平等, 2015; Zhang, et al, 2019](#))。研究中采用基于反射率最小阈值法(设为-40 dBz)识别云边界,从而确定每层云的厚度和云层之间的间隔([Zhang, et al, 2019](#))。对于厚度小于 7 个距离库(210 m)的云,若其与上、下云层的距离小于 10 个距离库(300 m),则与上、下云层合并。否则予以删除,从而确定出云底高度(CBH)和云顶高度(CTH)。

[图 2](#) 给出了数据质量控制前、后 Ka 波段云雷达反射率因子的对比情况, [图 2a](#) 中低于 2 km 的连

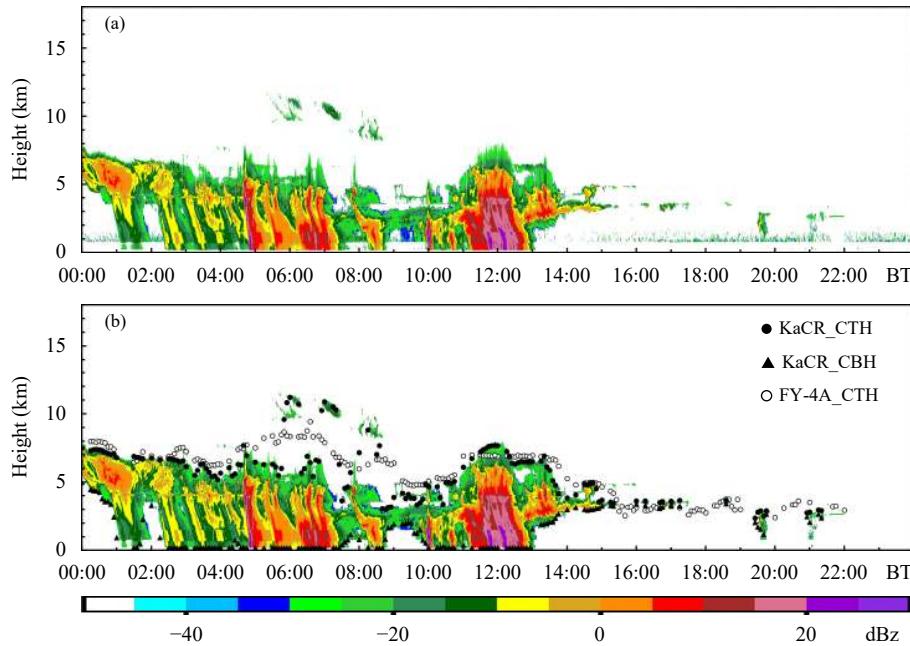


图 2 2019 年 8 月 31 日云雷达观测的数据质量控制前 (a) 和后 (b) 的反射率因子, 云雷达识别的云底和云顶高度以及 FY-4A 卫星反演的云顶高度 (b)

Fig. 2 Time-height cross sections of CR-observed radar reflectivity before (a) and after (b) quality control superimposed by KaCR-derived CBHs (solid triangles) and KaCR- (solid circles) and FY-4A-derived CTH (hollow circles)

续雷达回波可能是近地面水汽及灰尘粒子产生的噪声, 采用质量控制算法后滤除了这些近地面杂波(图 2b)。图 2b 中同时叠加了云雷达确定的云顶高度(KaCR\_CTH, 圆点表示)、云底高度(KaCR\_CBH, 三角表示)及 FY-4A 卫星反演的云顶高度(FY-4A\_CTH, 圆圈表示)。可以看到用云雷达资料确定的云顶高度和 FY-4A 卫星反演的云顶高度在没有降雨及弱降雨时一致性很好, 降雨会对云雷达信号产生强衰减, 从而低估云顶高度。

### 3.1 云底高度和云顶高度的统计特征

图 3 给出了 2019 年旱季(10 月—次年 3 月)和雨季(4—9 月)的云底高度(图 3a、c)和云顶高度(图 3b、d)发生频率随高度的分布。可以看出, 旱季和雨季的云底高度和云顶高度分布相似。对于云底高度来说, 都有两个最大可能的高度, 分别为 0—1 km 和 2—3 km。一个显著的特点是超过 40% 的云底高度低于 1 km, 这可能是墨脱的降雨云较多造成的, 因为降雨过程的云底接近地面(根据云雷达的回波底是否接地来区分降水云和非降水云)。2—3 km 的云底高度高频率对应于非降水云, Li 等(2016)的研究表明, 青藏高原低云发生率较高的原因与大尺度辐合及地形抬升作用有关。旱季

和雨季 60% 左右的云顶高度出现在 4—7 km, 但旱季云顶高度最高为 10 km 左右, 而雨季的云顶高度最高达到 12 km 左右, 这可能与雨季对流云发展比较旺盛, 云顶高度较高有关。总的来说, 墨脱地区以低云和中云为主。

根据 Wang 等(2018) 提出的云分类方法, 将云分成高云(云底高度  $\geq 6$  km)、中云( $2 \text{ km} \leq \text{云底高度} < 6$  km)和低云(云底高度  $< 2$  km)。在 2019 年观测期间, 低云最常出现, 占总云廓线的 66.7%, 这与墨脱的年降雨日数常超过 200 d 有关。其次是中云, 占总云廓线的 29.9%, 高云出现的频次最低, 占总云廓线的 3.4%。这也说明墨脱以低云、中云为主。

依据 2019 年云雷达的观测资料, 墨脱高、中、低云的云底高度中值分别为 7.1、2.9、0.2 km, 云顶高度中值分别为 8.5、4.8、6.1 km。低云的厚度最厚, 这可能与该地区的低云多为降雨云有关。

### 3.2 云底和云顶高度的时间演变

高分辨率云雷达观测的反射率因子可以确定云底和云底高度在垂直方向上的时间演变, 图 4 给出了云底和云顶高度频率在垂直方向上的日分布。为了确保每层都有足够数量的样本, 研究中按 500 m 的垂直分辨率将数据重新采样。然后通过

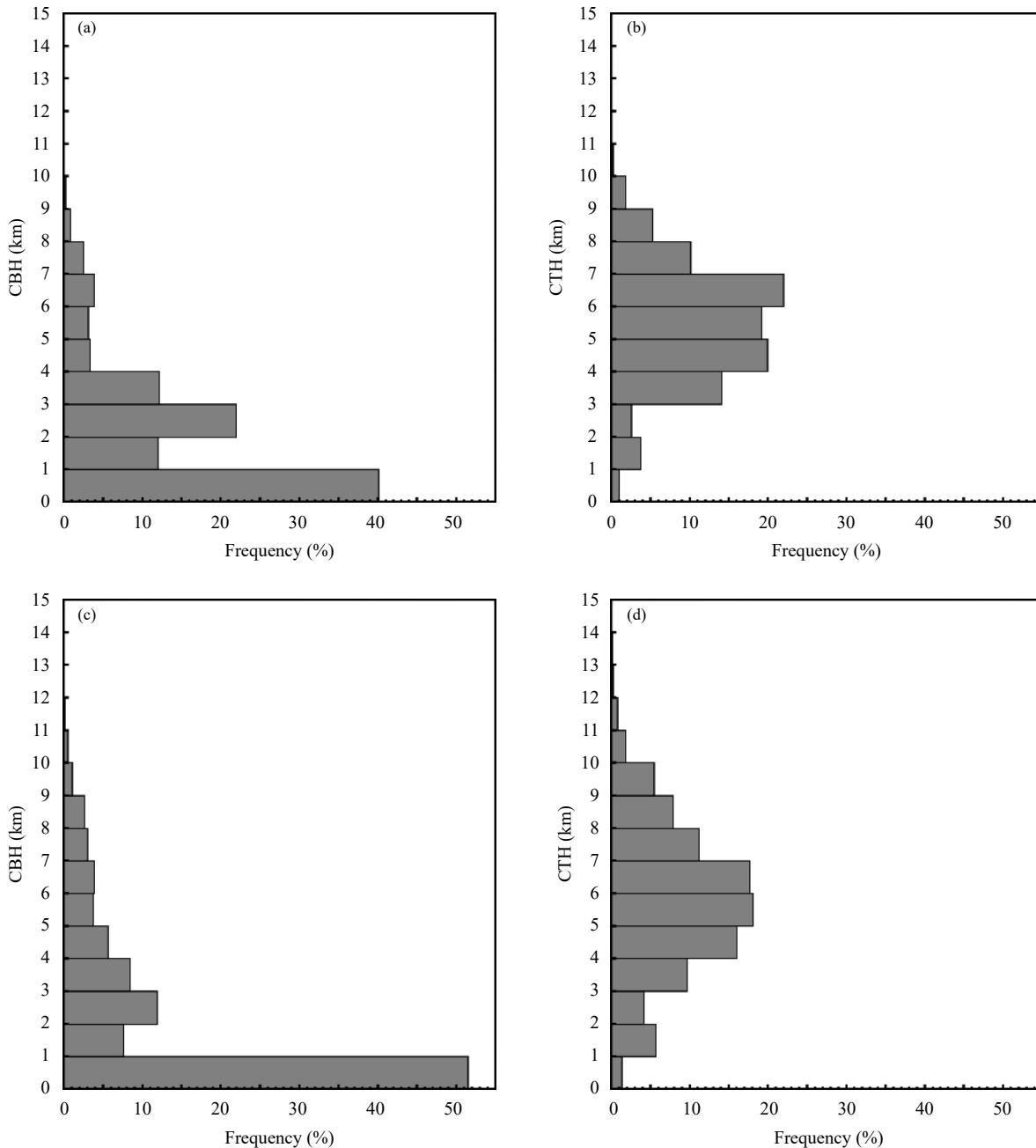


图 3 墨脱试验场云雷达观测的 2019 年旱季 (a、b) 和雨季 (c、d) 的云底高度 (a、c)、  
云顶高度 (b、d) 发生率的垂直分布

Fig. 3 Histogram of CBHs (a, c) and CTHs (b, d) obtained by the Ka band cloud radar deployed at Motuo, Tibet in dry (a, b) and rainy (c, d) seasons of 2019

每 6 h 每 500 m 间隔的云底(云顶)数量与总云量的比率来计算云底(云顶)高度频率。就云底高度的垂直分布来说(图 4a), 这些分布显示出双峰模态, 一个峰值位于 0.5 km 附近, 另一个峰值位于 2 km 附近。如前所述, 墨脱地区的降雨云较多, 当降雨时, 从云雷达获得的云底高度更接近地面, 这至少

部分解释了云底高度在靠近地面频率较高的原因。此外, 还可以看到, 云底高度 06—12 时(北京时, 下同)低于其他 3 个时段, 也就是说云底高度上午较低, 下午和晚上相对高一些。

从云顶高度的垂直分布(图 4b)可见, 发生率大致随高度升高而增大, 直到 6—7 km, 超过这个高度

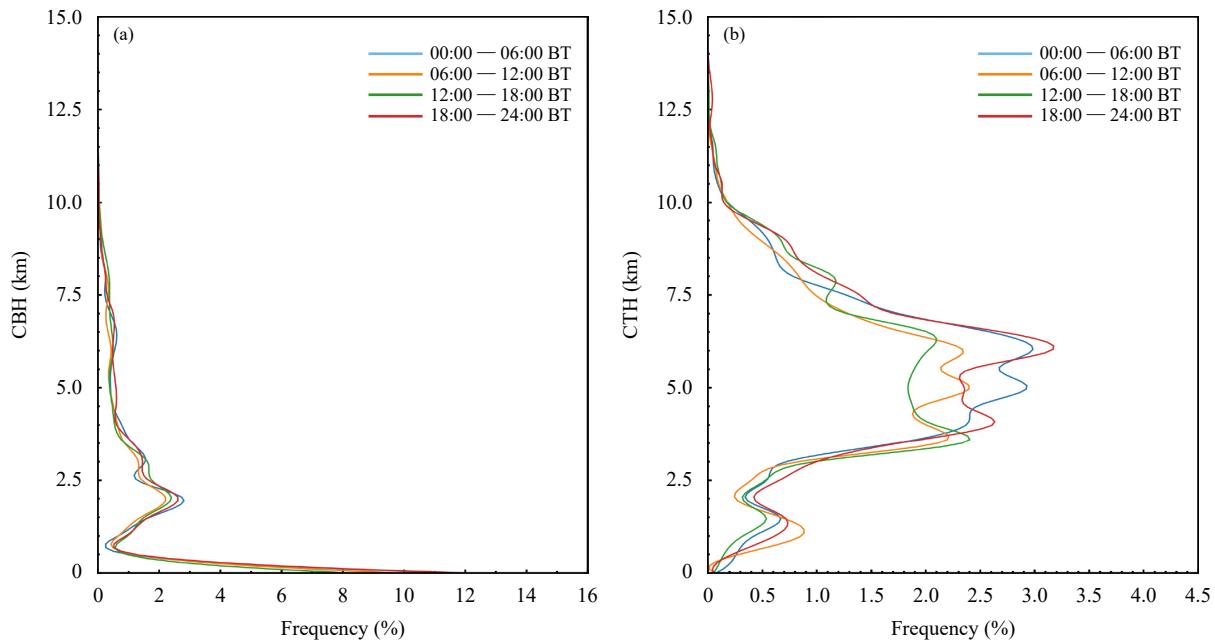


图 4 CR-云底 (a) 和云顶 (b) 高度发生率垂直分布的日变化 (以 6 h 为间隔, 垂直方向分辨率 500 m)

Fig. 4 Vertical distributions at 500 m resolution of diurnal occurrence frequency of CBHs (a) and CTHs (b) at 6 h intervals

后,发生率随着高度的升高而急剧下降。同一高度夜间(例如: 00—06, 18—24时)云顶出现的概率大于白天(例如: 06—12, 12—18时)。

图 5 给出了总云、降水云和非降水云发生率的日变化。墨脱地区的云层有着明显的日变化特征: 总云的发生率在 00—02 时最高, 然后开始逐渐降低, 12—14 时达到最低, 之后开始逐渐升高, 到 18 时又达到最高, 18—23 时基本保持不变。总的说来, 云层通常在午后到晚上生成, 早上到中午慢慢消散。这与 Murakami(1983)、Fujinami 等(2001)利用静止气象卫星资料得到的结论一致, 这可能与墨脱的河谷地形引起的山谷风有关。降水云表现出与总云相似的日变化特征, 而非降水云的日变化特征不明显。

#### 4 雨滴谱特征分析

利用 2019 年 6 月到 2020 年 6 月降水现象仪在墨脱云降水野外试验基地的观测数据, 统计了墨脱地区的雨滴谱特征。首先, 对降水现象仪的观测数据进行质量控制, 剔除了信噪比较低的前两个直径通道的数据(Tokay, et al, 2013; Chen, et al, 2017)。由于自然界中很少存在直径大于 8.0 mm 的雨滴(Wu, et al, 2019), 因此也剔除了直径大于 8.0 mm

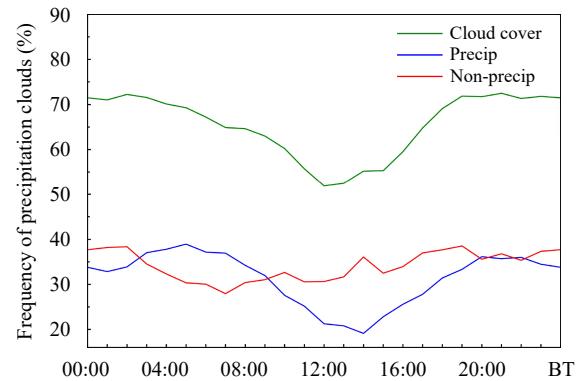


图 5 2019 年墨脱地区总云(绿线)、降水云(蓝线)、非降水云(红线)发生率的日变化

Fig. 5 Diurnal cycles of mean occurrence frequencies for total cloud (green line), precipitation cloud (blue line), and non-precipitation cloud (red line)

的数据。这样, 雨滴谱是根据 0.31—8.0 mm 的雨滴直径计算的。考虑到降水现象仪测量过程中粒子部分处于光束内造成的边缘粒子, 以及强降水过程中大风和雨滴溅到仪器表面而产生的不切实际的大而缓慢下落的粒子(Chen, et al, 2017), 研究中采用 Atlas 等(1973)提出的粒子下落速度-直径经验公式剔除一些奇异数据。滤除了超过经验公式 $\pm 60\%$ 的雨滴(图 6), 可以看出, 被滤除的雨滴直径主要小于 1 mm, 很可能和边缘粒子有关。

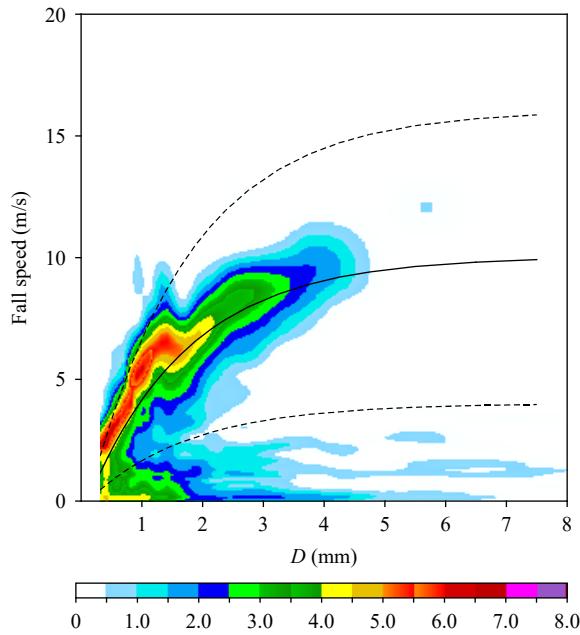


图 6 2019 年 6 月至 2020 年 6 月按粒子直径和下落速度计算的累积粒子数 (色阶, 以常用对数表示; 实线代表下落速度-直径的经验公式 (Atlas, et al, 1973), 虚线表示经验公式的 $\pm 60\%$ )

Fig. 6 Accumulated particle counts by size and terminal velocity for the observational period from June 2019 to June 2020 (The solid line indicates the empirical fall speed-diameter relationship of Atlas et al (1973), The dashed lines indicate the  $\pm 60\%$  empirical fall speed-diameter relationship)

#### 4.1 不同雨强的雨滴谱分布

以前的研究 (Bringi, et al, 2003, 2009; Tokay, et al, 1996; Chen, et al, 2017; Dolan, et al, 2018) 表明, 雨滴谱不仅随着时间、空间变化, 而且还随雨强变化。为了解墨脱地区的雨滴谱特征, 将墨脱野外试验基地 2019 年 6 月至 2020 年 6 月降水现象仪的观测数据分成 5 个雨强等级: (a)  $< 1 \text{ mm/h}$ , (b)  $1-3 \text{ mm/h}$ , (c)  $3-10 \text{ mm/h}$ , (d)  $10-20 \text{ mm/h}$ , (e)  $\geq 20 \text{ mm/h}$ 。

从墨脱地区 5 个等级雨强的平均雨滴谱分布 (DSD) (图 7) 可知, 谱宽随雨强的增强而增大, 所有雨强的雨滴谱均表现出多个极值的特征, 极值分别在 0.5、1.1 和 2.7 mm。Steiner 等 (1987), Krishna 等 (2016) 在观测中也发现了雨滴谱的这种多极值特征, 这些多极值可能是由于较高的融化层导致雨滴具有较长的下落时间, 更多的雨滴碰并、破碎过程增加了多个极值的可能性 (Steiner, et al, 1987)。可以看到雨强在  $3-10 \text{ mm/h}$  的小粒子浓度与雨强

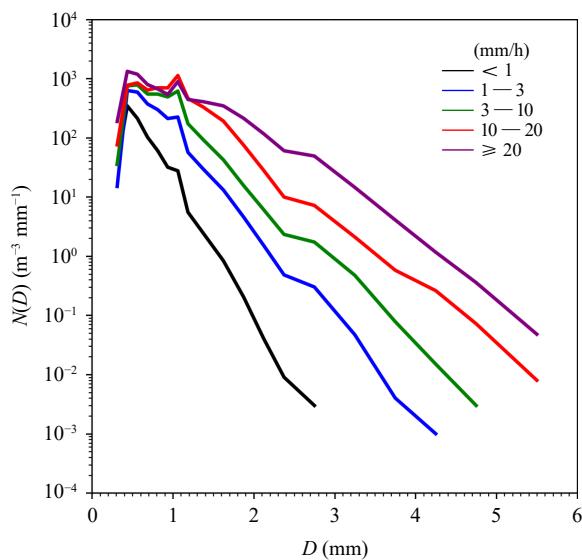


图 7 墨脱地区 5 个等级雨强的平均雨滴谱分布 (平均雨滴谱分布对应的降水参数和拟合的伽马模型参数见表 3)

Fig. 7 Average raindrop size distributions for the five levels of rainfall rate in Motuo (The corresponding integral rain parameters and fitted gamma model parameters obtained from the average DSDs are listed in Table 3)

在  $10-20 \text{ mm/h}$  及  $\geq 20 \text{ mm/h}$  的小粒子浓度比较接近。一方面, 这可能是由于降水现象仪本身的测量缺陷造成的, 在强降水时低估小粒子的浓度 (Tokay, et al, 2013; Wen, et al, 2017)。另一方面, 也可能是因为在强降水时小粒子的分裂和合并过程达到了平衡 (Wu, et al, 2019)。由每个等级雨强的平均雨滴谱计算得到的降水参数见表 3, 雨滴浓度 ( $N_r$ )、液态水含量 ( $W$ )、反射率因子 ( $Z$ )、粒子质量加权平均直径 ( $D_m$ ) 均随着雨强的增强而增大。标准化截距参数 ( $\lg N_w$ ) 先随雨强的增大而增加, 在雨强为  $10-20 \text{ mm/h}$  时达到最大 (3.973), 随后随雨强增大又减小。雨滴谱伽马分布模型形状因子 ( $\mu$ ) 同样表现出随雨强先减小后增大的特点, 而斜率参数 ( $A$ ) 则随雨强的增大而减小。

为进一步了解墨脱地区雨滴直径 ( $D$ ) 的分布及其对降水的相对贡献, 2019 年 6 月至 2020 年 6 月墨脱的雨滴谱观测数据按雨滴直径被分成了 6 个等级, 对应的雨滴直径如图 8 所示, 对降水贡献最大的是  $D < 1 \text{ mm}$  的雨滴, 占粒子数浓度的 88.9%, 对降水量 ( $R$ ) 的贡献为 56.8%。 $1 \leq D < 2 \text{ mm}$  的雨滴虽然对粒子数浓度的贡献只占了 4.5%, 但其对降水量的贡献却超过了 38%。总的来说, 墨脱地区的降

表 3 五个雨强等级及全部数据的平均雨滴谱分布对应的降水参数和拟合的伽马模型参数  
Table 3 Integral rain parameters obtained from the average raindrop size distributions for the five levels of precipitation rate and the total data

等级(mm/h)	$N_T(\text{m}^{-3})$	$W(\text{g/m}^3)$	$Z(\text{dBz})$	$D_m(\text{mm})$	$\lg N_w$	$\mu$	$A(\text{mm}^{-1})$
<1	103.3	0.015	14.2	0.846	3.369	2.155	7.272
1—3	311.8	0.089	25.6	1.104	3.688	1.701	5.162
3—10	532.3	0.225	31.5	1.262	3.860	1.270	4.175
10—20	824.6	0.602	38.1	1.511	3.973	1.475	3.622
$\geq 20$	1054.9	1.224	44.3	1.955	3.835	2.179	3.162
合计	151.2	0.035	22.0	1.087	3.312	0.227	3.888

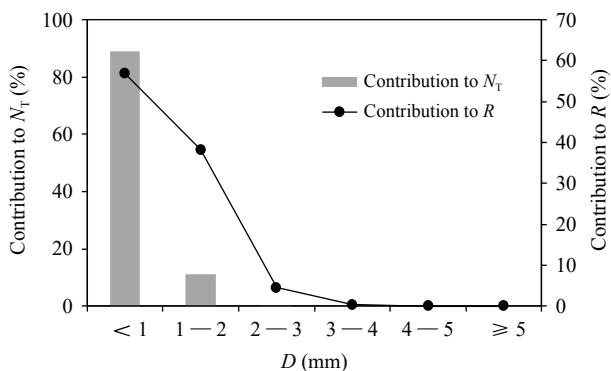


图 8 墨脱各粒子直径等级对降雨率  $R$  (黑实线) 和总数浓度  $N_T$  (灰度直方图) 的相对贡献

Fig. 8 Relative contributions of each size class to the rain rate  $R$  (solid black line) and total drop contribution  $N_T$  (gray histogram) in Motuo

水以中小粒子为主, 超过了降水粒子数浓度的 99%, 对降水量的贡献超过了 95%。

## 4.2 对流云和层状云降水的雨滴谱分布

层状云和对流云降水是自然界降水的基本类型, 为了进一步了解墨脱地区不同降水类型的雨滴谱特征, 研究中采用了基于连续采样数据标准差 (STD) 来区分层状云降水和对流云降水 (Bringi, et al, 2003; Chen, et al, 2017; Wu, et al, 2017)。如果连续 10 个 1 min 的雨滴谱数据的  $\text{STD} \leq 1.5 \text{ mm/h}$ , 则认为是层状云降水; 如果  $\text{STD} > 1.5 \text{ mm/h}$ , 且降水量  $R \geq 5 \text{ mm/h}$ , 则认为是对流云降水。通过该方法对墨脱 2019 年 6 月—2020 年 6 月雨滴谱数据进行分类, 层状云降水和对流云降水的累计时间为 120498 和 1299 min。

从墨脱地区层状云和对流云降水的平均雨滴谱(图 9)可见, 对流云降水比层状云降水的谱宽更宽, 随着粒子直径的增大, 对流云降水的数浓度要高于层状云降水的数浓度。同样可以看到层状云

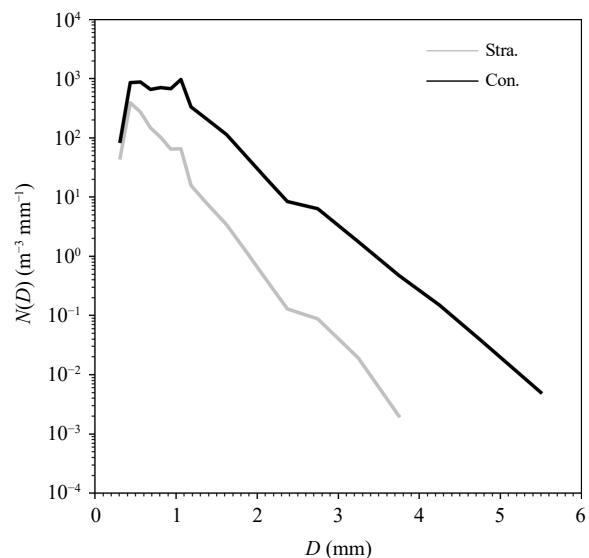


图 9 墨脱层状云 (灰色) 和对流云 (黑色) 的平均雨滴谱分布

Fig. 9 Average raindrop size spectra for stratiform (gray line) and convective (black line) precipitation in Motuo

和对流云降水的雨滴谱具有多极值的特征, 极值也分布在 0.5、1.1 和 2.7 mm 处。

图 10a、b 给出了层状云和对流云降水的  $D_m$  和  $\lg N_w$  发生率的柱状分布, 这里的  $D_m$  和  $\lg N_w$  是基于每分钟的雨滴谱数据计算的。墨脱地区层状云降水的  $D_m$  分布比较窄, 标准差较小, 层状云降水的  $D_m$  主要集中在 0.5—1.2 mm, 平均为 0.86 mm,  $\lg N_w$  分布比较广, 主要分布在 2.8—4.2, 平均 3.47。对流云降水则具有更大的  $D_m$  和  $\lg N_w$ ,  $D_m$  主要分布在 1.0—1.6 mm,  $\lg N_w$  集中在 3.6—4.5, 平均分别为 1.38 mm 和 4.01。此外, 墨脱对流云降水的  $\lg N_w$  倾斜度负值较大, 说明墨脱地区对流性降水的雨滴浓度偏向大值区。可以看出, 墨脱地区的  $\lg N_w$  具有明显的双峰结构特征, 分别对应于对流云和层状云

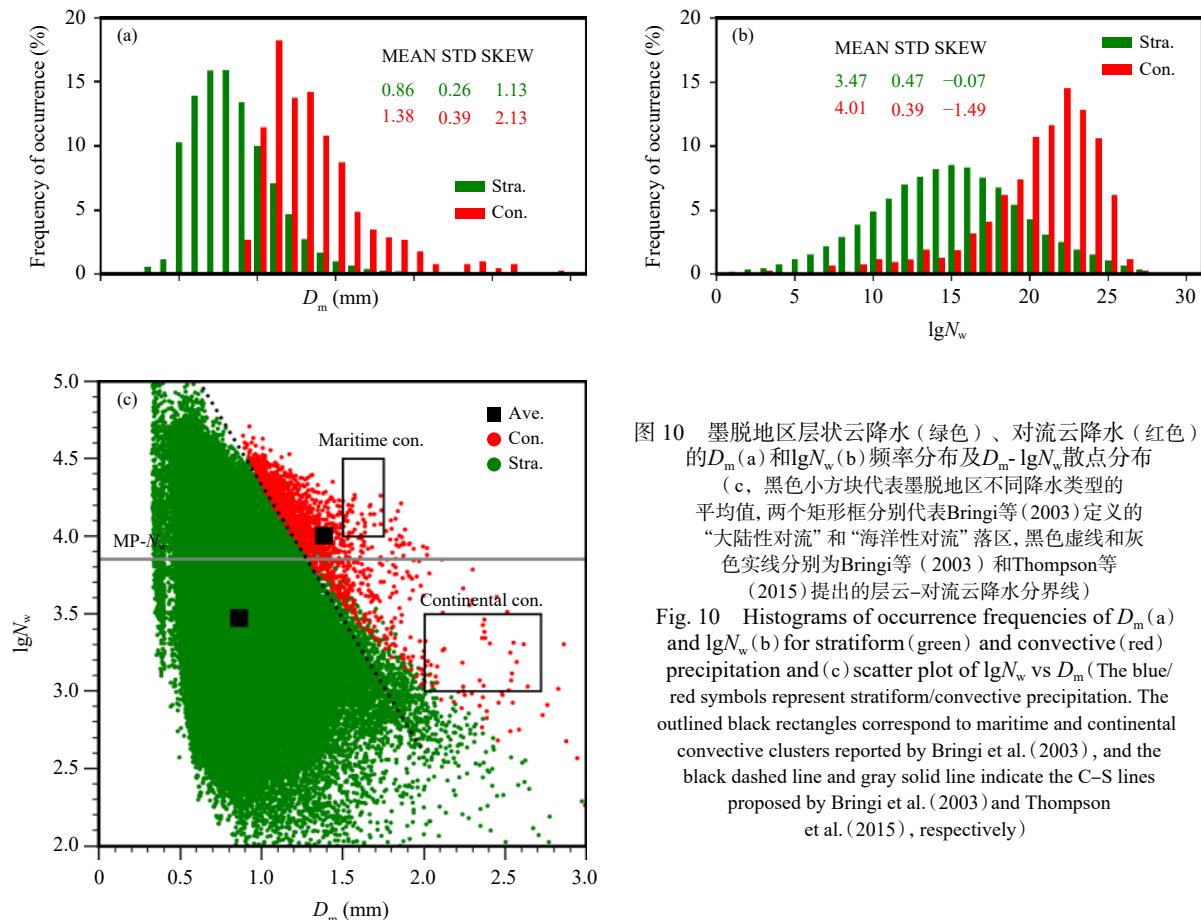


图 10 墨脱地区层状云降水(绿色)、对流云降水(红色)的 $D_m$ (a)和 $\lg N_w$ (b)频率分布及 $D_m$ - $\lg N_w$ 散点分布  
 (c, 黑色小方块代表墨脱地区不同降水类型的平均值。两个矩形框分别代表 Bringi 等(2003) 定义的“大陆性对流”和“海洋性对流”落区, 黑色虚线和灰色实线分别为 Bringi 等(2003) 和 Thompson 等(2015) 提出的层云-对流云降水分界线)

Fig. 10 Histograms of occurrence frequencies of  $D_m$  (a) and  $\lg N_w$  (b) for stratiform (green) and convective (red) precipitation and (c) scatter plot of  $\lg N_w$  vs  $D_m$  (The blue/red symbols represent stratiform/convective precipitation. The outlined black rectangles correspond to maritime and continental convective clusters reported by Bringi et al. (2003), and the black dashed line and gray solid line indicate the C-S lines proposed by Bringi et al. (2003) and Thompson et al. (2015), respectively)

降水(平均值分别为 4.01 和 3.47)。已有的研究(Bringi, et al, 2012; Thompson, et al, 2015)表明,热带地区的海洋性降水具有这种双峰特征。

从层状云和对流云降水的  $D_m$ - $\lg N_w$  数据散点分布(图 10c)可以看出,墨脱的对流云和层状云降水大部分较好地分布在 Bringi 等(2003)拟合的层云-对流云降水分界线两侧。大部分对流云接近 Bringi 等(2003) 定义的海洋性对流区域,很小一部分分布在大陆性对流区域。这说明墨脱的对流云降水趋于海洋性对流。华东和华南夏季的对流云降水也趋于海洋性对流云,海洋性对流云降水的特点是雨滴直径小而数浓度大(Wen, et al, 2016; 王梦瑶, 2019)。

由于墨脱地区的降水主要集中在 6—9 月,占了年降水量的 64%(陈萍等, 2018)。因此,研究中计算了 2019 年 6—9 月降水期平均的云底高度、0℃ 层高度及云顶高度,来探究墨脱对流云降水趋于海洋性对流的原因。2019 年 6—9 月墨脱降水云的云底、云顶高度的平均值分别为 0.3 和 6.5 km。

由于墨脱没有探空数据,采用 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis version 5) 再分析资料得到了 2019 年 6—9 月墨脱降水时段 0℃ 层的平均高度为 4.2 km。0℃ 层与云底之间的距离为暖云厚度,云顶与 0℃ 层之间的距离为冷云厚度。由此可以看出,墨脱夏季降水以暖雨过程为主,通过碰并作用产生了大量的小雨滴。这可能与夏季印度洋季风为墨脱地区输送来充沛的暖湿气流有关。

## 5 总结和讨论

在第二次青藏高原科学考察研究专题(西风-季风协同作用对亚洲水塔变化的影响)和国家重点研发计划项目(青藏高原地-气相互作用及其对下游天气气候的影响)的共同支持下,中国气象科学研究院于 2019 年开始在位于青藏高原东南部雅鲁藏布大峡谷水汽通道入口处的墨脱县建立野外观测试验基地,开展了水汽、云和降水的综合观测,先后布设了先进的 Ka 波段云雷达、微波辐射计、X 波段

双偏振相控阵雷达、降水现象仪、K波段微雨雷达等设备, 获取了高时、空分辨率的云和降水的宏、微观数据。文中利用Ka波段云雷达2019年的探测数据分析了墨脱地区云的宏观统计特征, 利用降水现象仪2019年6月至2020年6月的数据分析了雨滴谱特征, 主要结论如下:

(1) 自2019年开始, 墨脱野外观测试验基地开展的水汽、云和降水的综合观测, 成功获取了墨脱地区地基多种雷达的云探测数据及雨滴谱数据, 弥补了该地区云降水观测资料的空白, 为今后研究该地区云和降水的宏、微观物理特征提供了数据基础。

(2) 墨脱地区云量较多, 云的发生率占2019年云雷达观测廓线的67%, 降水云廓线几乎占了总云廓线的一半(45%)。云底高度表现出双峰模态, 峰值分别在0—1 km和2—3 km高度处, 分别对应于降水云和非降水云, 云底高度上午略低于其他时段。接近60%的云顶高度在4—7 km, 从云顶高度的垂直分布来看, 同一高度夜间云顶的发生率高于白天。总的来说, 墨脱地区以中云和低云为主, 云通常在午后到晚上生成, 早上到中午慢慢消散。

(3) 从雨滴谱分布特征来看, 该地区不同雨强的平均雨滴谱相似, 谱宽和较大雨滴的浓度随雨强的增大而增大。降水以中、小粒子为主, 中、小粒子对粒子数浓度的贡献超过99%, 对降水率的贡献超过95%。该地区降水的 $\lg N_w$ 呈现双峰分布, 分别对应于对流云和层状云降水。对流云降水的特点是粒子直径较小而数浓度较高,  $D_m$ 的范围在1.0—1.6 mm,  $\lg N_w$ 的范围在3.6—4.5, 表现出海洋性对流云降水的特征。

墨脱野外观测试验基地由于建站时间较短, 获取的数据有限, 本研究仅利用云雷达和雨滴谱数据进行了一些初步的分析, 结果的代表性还不强。随着数据的进一步积累, 接下来研究中将深入开展墨脱地区降水微物理特征的季节变化研究, 并将联合微雨雷达、X波段双偏振相控阵雷达数据开展藏东南雅鲁藏布大峡谷水汽通道入口处墨脱地区对流降水过程的多尺度观测分析。

**致谢:** 感谢西藏林芝市气象局、西藏墨脱县气象局、安徽四创电子股份有限公司、杭州浅海气象仪器有限公司、珠海纳瑞达科技有限公司等单位为墨脱野外观测试验提供的帮助和支持。

## 参考文献

- 常祎, 郭学良. 2016. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征. *科学通报*, 61(15): 1706-1720. Chang Y, Guo X L. 2016. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau. *Chinese Sci Bull*, 61(15): 1706-1720 (in Chinese)
- 陈隆勋. 1999. 中日亚洲季风机制合作研究. 中国科学院年报, 26. Chen L X. 1999. Research on the cooperation of Asian monsoon mechanism between China and Japan. *Chinese Acad Meteor Sci Annu Rep*, 26 (in Chinese)
- 陈萍, 李波. 2018. 藏东南水汽输送特征分析及其影响. 南方农业, 12(9): 124-125. Chen P, Li B. 2018. Characteristics of water vapor transport and its influence in southeast Tibet. *South China Agric*, 12(9): 124-125 (in Chinese)
- 傅云飞, 李宏图, 自勇. 2007. TRMM卫星探测青藏高原谷地的降水云结构个例分析. *高原气象*, 26: 98-106. Fu Y F, Li H T, Zi Y. 2007. Case study of precipitation cloud structure viewed by TRMM satellite in a valley of the Tibetan Plateau. *Plateau Meteorol*, 26: 98-106 (in Chinese)
- 李生辰, 李栋梁, 赵平等. 2009. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征. *气象学报*, 67(4): 591-598. Li S C, Li D L, Zhao P, et al. 2009. The climatic characteristics of vapor transportation in rainy season of the origin area of three rivers in Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Meteor Sinica*, 67(4): 591-598 (in Chinese)
- 刘黎平, 楚荣忠, 宋新民等. 1999. GAME-TIBET青藏高原云和降水综合观测概况及初步结果. *高原气象*, 18(3): 441-450. Liu L P, Chu R Z, Song X M, et al. 1999. Summary and preliminary results of cloud and precipitation observation in Qinghai-Xizang Plateau in GAME-TIBET. *Plateau Meteor*, 18(3): 441-450 (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. *气象学报*, 74(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 various radars. *Acta Meteor Sinica*, 74(4): 635-647 (in Chinese)
- 秦宏德. 1983. 青藏高原那曲地区强对流天气的大气静力能量垂直分布. *高原气象*, 2(1): 61-65. Qin H D. 1983. Static energy vertical distribution within convective processes in Naqu, Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteor*, 2(1): 61-65 (in Chinese)
- 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. *大气科学*, 35(6): 1117-1131. Wang H, Luo Y L, Zhang R H. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data. *Chinese J Atmos Sci*, 35(6): 1117-1131 (in Chinese)
- 王梦瑶. 2019. 基于不同天气型和污染背景的江淮与华南地区暖季降水雨滴谱分布特征研究 [D]. 南京: 南京大学. Wang M Y. 2019. Effects of synoptic weather patterns and pollution on microphysical characteristics

- of precipitation in east and south China[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese)
- 赵平, 李跃清, 郭学良等. 2018. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应: 第三次青藏高原大气科学试验. 气象学报, 76(6): 833-860. Zhao P, Li Y Q, Guo X L, et al. 2018. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The third Tibetan Plateau atmospheric scientific experiment. *Acta Meteor Sinica*, 76(6): 833-860 (in Chinese)
- Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev Geophys*, 11(1): 1-35
- Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis. *J Atmos Sci*, 60(2): 354-365
- Bringi V N, Williams C R, Thurai M, et al. 2009. Using dualpolarized radar and dual-frequency profiler for DSD characterization: A case study from Darwin, Australia. *J Atmos Oceanic Technol*, 26: 2107-2122
- Bringi V N, Huang G J, Munchak S J, et al. 2012. Comparison of drop size distribution parameter ( $D_0$ ) and rain rate from S-band dual-polarized ground radar, TRMM precipitation radar (PR), and combined PR-TMI: Two events from Kwajalein Atoll. *J Atmos Ocean Technol*, 29(11): 1603-1616
- Chen B J, Hu Z Q, Liu L P, et al. 2017. Raindrop size distribution measurements at 4500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX-III. *J Geophys Res Atmos*, 122(20): 11092-11106
- Dolan B, Fuchs B, Rutledge S A, et al. 2018. Primary modes of global drop size distributions. *J Atmos Sci*, 75(5): 1453-1476
- Fujinami H, Yasunari T. 2001. The seasonal and intraseasonal variability of diurnal cloud activity over the Tibetan Plateau. *J Meteor Soc Japan*, 79(6): 1207-1227
- Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. *Environ Res Lett*, 5(1): 015101
- Krishna U V M, Reddy K K, Seela B K, et al. 2016. Raindrop size distribution of easterly and westerly monsoon precipitation observed over Palau islands in the Western Pacific Ocean. *Atmos Res*, 174-175: 41-51
- Li J. 2018. Hourly station-based precipitation characteristics over the Tibetan Plateau. *Int J Climatol*, 38(3): 1560-1570
- Li Y Q, Liu X D, Chen B D. 2006. Cloud type climatology over the Tibetan Plateau: A comparison of ISCCP and MODIS/TERRA measurements with surface observations. *Geophys Res Lett*, 33(17): L17716
- Li Y Y, Zhang M H. 2016. Cumulus over the Tibetan Plateau in the summer based on CloudSat-CALIPSO data. *J Climate*, 29(3): 1219-1230
- Murakami M. 1983. Analysis of the deep convective activity over the western Pacific and Southeast Asia. Part I : Diurnal variation. *J Meteor Soc Japan*, 61(1): 60-76
- Steiner M, Waldvogel A. 1987. Peaks in raindrop size distributions. *J Atmos Sci*, 44(20): 3127-3133
- Tao S Y, Luo S W, Zhang H C. 1986. The Qinghai-Xizang Plateau meteorological experiment (QXPME) May-August 1979// Xu Y G. Proceedings of International Symposium on the Qinghai-Xizang Plateau and Mountain Meteorology. Boston, MA: American Meteorological Society, 3-13
- Thompson E J, Rutledge S A, Dolan B, et al. 2015. Drop size distributions and radar observations of convective and stratiform rain over the equatorial Indian and west Pacific Oceans. *J Atmos Sci*, 72(11): 4091-4125
- Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers. *J Atmos Ocean Technol*, 30(8): 1672-1690
- Tokay A, Short D A. 1996. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. *J Appl Meteor*, 35(3): 355-371
- Wang Z, Wang Z H, Cao X Z, et al. 2018. Comparison of cloud top heights derived from FY-2 meteorological satellites with heights derived from ground-based millimeter wavelength cloud radar. *Atmos Res*, 199: 113-127
- Wen L, Zhao K, Zhang G F, et al. 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data. *J Geophys Res Atmos*, 121(5): 2265-2282
- Wen L, Zhao K, Huang H, et al. 2017. Evolution of microphysical structure of a subtropical squall line observed by a polarimetric radar and a disdrometer during OPACC in Eastern China. *J Geophys Res Atmos*, 122(15): 8033-8050
- Wu Y H, Liu L P. 2017. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Tibetan Plateau and southern China. *Adv Atmos Sci*, 34(6): 727-736
- Wu Z H, Zhang Y, Zhang L F, et al. 2019. Characteristics of summer season raindrop size distribution in three typical regions of western Pacific. *J Geophys Res Atmos*, 124(7): 4054-4073
- Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. 2008. World water tower: An atmospheric perspective. *Geophys Res Lett*, 35(20): L20815
- Zhang Y, Zhou Q, Lv S S, et al. 2019. Elucidating cloud vertical structures based on three-year Ka-band cloud radar observations from Beijing, China. *Atmos Res*, 222: 88-99
- 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. *Atmos Environ*, 201: 381-390