

徐桂荣,王晓芳,万蓉,等.2024.青藏高原东侧九龙夏季非降水云的观测特征[J].暴雨灾害,43(2):135–145. XU Guirong, WANG Xiaofang, WAN Rong, et al. 2024. Observational characteristics of summer non-precipitating clouds in Jiulong on the east side of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Torrential Rain and Disaster*, 43(2):135–145 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-148

青藏高原东侧九龙夏季非降水云的观测特征

徐桂荣¹, 王晓芳¹, 万蓉¹, 李平^{2,3}, 李雨生⁴, 王俊超¹

(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. 四川省气象探测数据中心, 成都 610072; 3. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;

4. 杭州浅海科技有限责任公司, 杭州 310056)

摘要:青藏高原东侧九龙地区是西南涡多发区, 利用该地区新型探测设备开展云探测, 有助于增强对西南涡多发区云特征的认识。利用2018—2019年6—8月九龙站地基微波辐射计资料, 分析了该地区夏季非降水云的出现率、液态水路径及过冷水路径的观测特征。结果表明: 九龙夏季非降水云出现率月均值在67%~82%之间, 以低云和中云为主, 高云较少; 低云出现率表现为白天低、夜间高, 而中云和高云则相反; 云出现率的垂直分布表现为单峰形态, 在约2 km高度存在云出现率峰值8.1%; 受大气热力层结日变化影响, 云出现率的单峰垂直分布呈现日夜差异。另外, 九龙夏季非降水云的液态水路径均值为 $0.433 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中低云、中云、高云的液态水路径均值分别为 0.665 、 0.240 、 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 低云的液态水路径日变化特征与其出现率相似, 而中云和高云的液态水路径日变化特征不明显。此外, 九龙夏季非降水云中冷云的过冷水路径均值为 $0.154 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中低云、中云、高云的过冷水路径均值分别为 0.065 、 0.166 、 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 总体上过冷水路径在液态水路径中的占比约为34.3%~38.8%, 过冷水路径占比随云的高度而增大, 这使得中云和高云的过冷水路径日变化与其液态水路径相似。与同纬度华中地区相比, 九龙夏季非降水云具有明显不同的特征, 这与两地之间的大气水汽特征差异密切相关。

关键词: 青藏高原; 西南涡; 非降水云; 云出现率; 液态水路径; 过冷水路径

中图分类号: P426.5

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2023-148

Observational characteristics of summer non-precipitating clouds in Jiulong on the east side of the Qinghai-Tibet Plateau

XU Guirong¹, WANG Xiaofang¹, WAN Rong¹, LI Ping^{2,3}, LI Yusheng⁴, WANG Junchao¹

(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. Sichuan Provincial

Meteorological Observation and Data Centre, Chengdu 610072; 3. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters

in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072;

4. Hangzhou Shallow-Sea Technology Co., Ltd, Hangzhou 310056)

Abstract: Jiulong is located on the east side of the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) and is a region prone to southwest vortex. Cloud detection with new-type detection equipment in this region helps enhance the knowledge of cloud characteristics in the southwest vortex-prone region. In this study, based on the ground-based microwave radiometer data from June to August of 2018–2019 in Jiulong, the observational characteristics of cloud occurrence frequency (COF), liquid water path (LWP), and supercooled liquid water path (SLWP) for non-precipitating clouds during the summer seasons are investigated. The results are as follows. The monthly average COF of summer non-precipitating clouds in Jiulong is between 67%–82%, with low and middle clouds being the main types, and high clouds being less common. For low clouds, the COF is low in daytime and high in nighttime, while it is the opposite for middle and high clouds. The vertical distribution of COF presents an unimodal pattern, with a peak of 8.1% at a height of about 2 km. Due to the diurnal variation of atmospheric thermal stratification, the unimodal pattern of COF shows diurnal differences. Moreover, the average LWP of summer non-precipitating clouds in Jiulong is $0.433 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, with the average LWPs of low, middle, and high clouds being 0.665 , 0.240 , and $0.102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The diurnal variation of LWP in

收稿日期: 2023-07-17; 定稿日期: 2023-12-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41975058); 国家自然科学基金重大研究计划项目(91637211); 国家重点研发计划项目(2018YFC1507201)

第一作者: 徐桂荣, 主要从事大气探测和云-降水研究。E-mail: grxu@whhr.com.cn

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

low clouds is similar to their COF, while the diurnal variations of LWP in middle and high clouds are not significant. Additionally, the average SLWP of cold clouds among summer non-precipitating clouds in Jiulong is $0.154 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, with the average SLWPs of low, middle, and high clouds being 0.065, 0.166, and $0.102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. On the whole, the proportion of SLWP in LWP is about 34.3%–38.8%. The proportion of SLWP increases with the height of the cloud, which makes the diurnal variations of SLWP in middle and high clouds similar to that of LWP. Compared with central China, the characteristics of summer non-precipitating clouds in Jiulong are significantly different, and this is closely related to the different characteristics of atmospheric water vapor between the two regions.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; southwest vortex; non-precipitating cloud; cloud occurrence frequency; liquid water path; supercooled liquid water path

引言

云是地球系统的重要组成部分,其形成、演变和在全球的分布是动力、热力和微物理过程相互作用的结果(Khvorostyanov and Curry, 2014)。云在地-气系统能量辐射收支平衡和水循环中起着重要的作用,直接影响着地球系统的辐射平衡、热量平衡和温湿分布,参与多种正负反馈过程(Rossow and Schiffer, 1999; Stephens, 2005; Zhao and Garrett, 2015)。云具有多样性特征,这使得云在地球能量收支平衡中的作用复杂。一方面,低云通过反射大部分太阳辐射,起到冷却作用;另一方面,高云吸收较暖地面和低层大气的长波辐射,减少了地-气系统对太空的长波辐射,起到增暖作用(Ramanathan et al., 1989; Frey et al., 1999)。此外,成云致雨是地球系统水循环的重要过程,云的演变对降水有直接影响,云对辐射的调节能力和形成降水的多少与云的宏微观特征紧密相关(Albrecht, 1989; 杨军等, 2011; Garrett and Zhao, 2013)。因此,云的宏微观特征的精密观测对理解云降水物理过程、地球能量辐射收支平衡以及提高模式的可预报性是非常重要的。

西南低涡(以下简称西南涡)是在青藏高原复杂地形与大气环流相互作用下,形成于我国西南地区 700 hPa 或 850 hPa 等压面上,具有气旋式环流的 α 中尺度闭合低压系统,它的发生、发展及其移动往往引起本地和下游广大地区异常强降水,并带来严重的暴雨洪涝灾害(卢敬华, 1986; 何光碧, 2012; 李跃清和徐祥德, 2016)。西南涡全年各月均会出现,以 4—9 月居多,其中 5—8 月移出源地的西南涡几率最大。西南涡多出现在三个地区,分别是九龙、巴塘、德欣、康定、昌都一带,四川盆地和小金地区,由此分别称为九龙涡、盆地涡和小金涡(李国平, 2013; 陈炜和李跃清, 2019; 郁淑华等, 2021)。由于西南涡源地集中在青藏高原东部与四川盆地接壤的陡峭地形地带,与地形有关的大气动力作用复杂,使得西南涡的云降水系统具有显著的区域特点。譬如,西南涡暴雨比南海西行台风暴雨的降水云团更大,云顶高度更高,两者的降水云团活动垂直方

向的连续性也有差异(李德俊等, 2010)。由于云是地球系统水循环中的重要一环,在合适的大气环境下云会演变发展成降水云团进而产生降水,加强对西南涡源地的云探测与研究,能够增强对西南涡源地大气云特性的认识,对研究西南涡及其降水云团的发生发展也具有科学价值。

西南涡多发于青藏高原东侧,而青藏高原地形复杂,地面气象观测站稀少,基于常规地面气象观测资料开展的青藏高原云的研究比较有限。自 20 世纪 70 年代末以来,随着卫星技术和遥感应用水平的不断提高,卫星资料逐步用于青藏高原云的研究(陈葆德等, 2008)。特别是进入 21 世纪,人们基于多源卫星资料的研究,增强了对青藏高原云的宏观和微观特征及云辐射效应的认知,对青藏高原云的发生、发展、东移及其与降水的相关联系有了更多的理解(徐祥德等, 2001; 傅云飞等, 2016; 刘屹岷等, 2018)。与此同时,地基云遥感探测技术也取得快速发展,可以提供连续、高时间分辨率的云观测数据,被广泛应用于云特征的评估诊断研究和过程机理研究(赵传峰和杨以坤, 2021),这为青藏高原云的研究增加了新手段。近 10 a,我国学者陆续在青藏高原布设了 Ka 波段毫米波云雷达(吴翀等, 2017; 朱怡杰等, 2019; Wan et al., 2022)、Ku 波段微降水雷达(王改利等, 2021)、C 波段连续波雷达(刘黎平等, 2015)、X 波段相控阵偏振雷达(王改利等, 2021; 张蔚然等, 2022)等多源地基遥感设备开展云-降水综合观测,评估了不同云遥感设备在青藏高原的云探测能力,获取了青藏高原高时空分辨率的云和降水宏微观垂直结构特征,有力推进了青藏高原地基遥感云的研究。

地基微波辐射计是一种被动遥感设备,可以测量 22~30 GHz 和 51~59 GHz 频段的大气辐射亮温,由于这些亮温值与大气水汽、氧分子和云液态水的辐射相关,利用测量的亮温值和地面气象参量,采用神经网络训练得到的反演模型,可以反演得到 0—10 km 的大气温度、水汽密度、相对湿度和云液态水含量廓线以及整层大气水汽含量和云液态水路径(Liquid Water Path, LWP) (Ware et al., 2003; Crewell et al., 2004;

Westwater et al., 2004)。由于云的微波发射与云中液态水含量成正比,地基微波辐射计被证明是确定云液态水路径最准确的方法之一(Westwater, 1978; Liljegren et al., 2001; Crewell and Löhnert, 2003)。此外,地基微波辐射计利用搭载的红外测温仪(infrared radiation thermometer, IRT)可以探测云底温度,结合反演的温度廓线可以计算得到云离地面高度即云底高度(Ware et al., 2003; Xu et al., 2015)。鉴于地基微波辐射计可以全天候观测,观测时间间隔为分钟级别,它已成为在固定点探测长期连续云底高度和云液态水路径的地基云测量仪器(赵传峰和杨以坤, 2021)。Xu等(2021)利用华中地区三个台站6 a的微波辐射计观测资料,分析得到了华中地区非降水云的云出现率和云液态水路径的多尺度时变特征。此外,地基微波辐射计因其探测能力在青藏高原地区具有较好的适用性,已逐渐成为青藏高原云-降水探测体系中的重要设备之一(刘黎平等, 2015; 徐桂荣等, 2019; 王改利等, 2021)。本文旨在利用青藏高原东部2018—2019年6—8月九龙站的地基微波辐射计观测资料,分析该地区夏季非降水云的云出现率(Cloud Occurrence Frequency, COF)、液态水路径LWP以及过冷水路径(Supercooled Liquid Water path, SLWP)的观测特征,以期增强对九龙涡地区云特征的认识。

1 数据与方法

1.1 数据说明

九龙站(101.52°E, 29.02°N, 2 925 m)位于青藏高原东侧,即川西高原与四川盆地接壤的陡峭地形地带(图1)。本文所用数据包括九龙站的地基微波辐射计和GPS探空观测数据。

地基微波辐射计数据来自中国气象局武汉暴雨研究所2018—2019年6—8月在九龙站开展的青藏高原云物理结构与特征的科学观测试验(徐桂荣等, 2019)。所用地基微波辐射计为美国Radiometrics公司生产的MP-3000A型号,可以观测21个K波段(22~30 GHz)和14个V波段(51~59 GHz)的微波通道大气亮温,利用辐射传输方程,并辅以神经网络建模技术,可以通过观测的微波亮温和地面气象参量,反演得到0—10 km的大气温度、水汽密度、相对湿度和云液态水含量廓线以及整层大气水汽含量和云液态水路径。该设备搭载有天顶观测的IRT,可以测量晴空大气背景亮温和云天云底亮温,结合地基微波辐射计反演的温度廓线能够估算云底高度。此外,地基微波辐射计还搭载有一个降雨传感器,并用标识Rain来指示降雨与否, Rain=1指示有降雨发生, Rain=0指

示没有降雨发生。地基微波辐射计MP-3000A反演的大气参量廓线的时间分辨率约为3 min,廓线的垂直分辨率在0—500 m高度为50 m, 500—2 000 m高度为100 m, 2 000—10 000 m为250 m。GPS探空数据来自中国气象局成都高原气象研究所2013—2019年6月21日—7月31日开展的西南涡加密观测科学试验,该探空系统使用芬兰维萨拉公司GPS (RS41)探空设备,每秒传输一次数据,垂直间隔小于10 m,每天进行4次(02、08、14、20时,北京时,下同)探空观测(李跃清和徐祥德, 2016; 卢萍和李跃清, 2020)。本文采用九龙站2013—2017年的GPS探空数据作为地基微波辐射计的神经网络训练数据库,用以构建九龙站本地化反演模型,而九龙站2018—2019年的GPS探空数据用来评估同期地基微波辐射计反演大气温度的适用性。

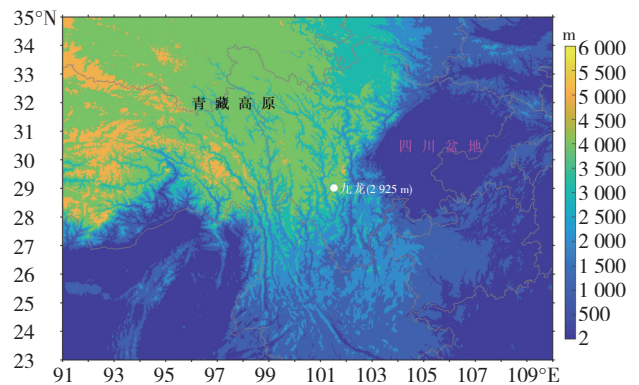


图1 九龙站(白色圆点)地理位置及周边地形(填色)

Fig.1 Geophysical location of Jiulong station (white dot) and its surrounding terrain (shaded)

1.2 研究方法

由于IRT需结合地基微波辐射计反演的温度廓线来估算云底高度,因此有必要对地基微波辐射计反演温度廓线的适用性进行评估。本文以GPS探空观测为参考值,对地基微波辐射计反演温度廓线的精度进行分析。由于GPS探空每6 h观测一次而地基微波辐射计约3 min观测一次,在对两种探测数据进行时间匹配时,选取最邻近GPS探空观测时刻(02、08、14、20时)的地基微波辐射计温度廓线进行时间配对。另外,考虑到GPS探空廓线垂直分辨率约为10 m,高于地基微波辐射计温度廓线的垂直分辨率50~250 m,在对两种探测数据进行空间匹配时,将GPS探空廓线采用线性插值法插值到地基微波辐射计温度廓线的58个高度上进行空间配对。完成上述时空匹配后,采用简单而直接的对比分析方法来评估地基微波辐射计温度廓线的适用性,主要考查地基微波辐射计温度与GPS探空温度之间的相关系数(R)、平均偏差(Bias)以及均方差(RMSE)。图2给出九龙站2018—2019年6月15日—7月31日云天时地基微波辐射计温度与GPS探空

温度的对比结果,从散点图可见,地基微波辐射计温度与GPS探空温度具有很好的相关性,两者的相关系数达到0.99以上,平均偏差仅有0.1℃,均方差为1.2℃;从偏差廓线可见,地基微波辐射计温度与GPS探空温度的偏差随高度变化不大,两者的偏差范围在-0.5~0.3℃之间,两者的均方差范围在0.7~1.8℃之

间。综上可知,采用九龙站GPS探空加密数据构建的本地化反演模型具有可靠的精度,地基微波辐射计温度廓线与GPS探空温度廓线吻合度高,系统偏差小,离散度也较小。由此可以估算出,基于地基微波辐射计温度廓线和IRT观测云底亮温计算的云底高度误差在300 m以内,云底高度数据具有较好的可靠性。

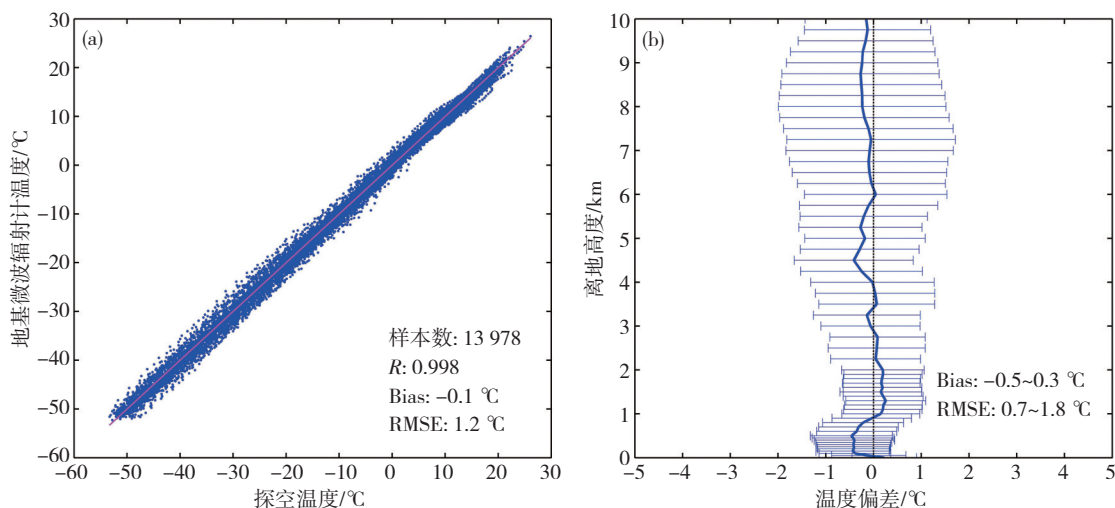


图2 2018—2019年6月15日—7月31日九龙站云天时地基微波辐射计温度与GPS探空温度的散点图(a)和偏差廓线(b)

Fig.2 (a) Scatter plot and (b) deviation profile between ground-based microwave radiometer and GPS sounding temperatures in the cloudy sky at Jiulong station from June 15 to July 31 of 2018–2019

根据地基微波辐射计的降雨传感器观测标识和IRT估算的云底高度(Cloud Base Height, CBH)数据,将天气状况分为晴空、云天、雨天或雾天等三类。当Rain=0且CBH=-1(即无云底高度值)时,判别为晴空;当Rain=0且CBH>0 km时,判别为云天;当Rain=1时或Rain=0且CBH=0 km时,判别为雨天或雾天(徐桂荣等,2019)。通过此方法,得到2018—2019年6—8月九龙站地基微波辐射计观测的晴空、云天和雨天或雾天的样本分别为13 913、58 566和7 540组。本文着重分析九龙非降水云(即云天)的观测特征,为考查不同高度云的特征差异,利用IRT的云底高度数据,将云天的云分为低云、中云和高云等三类。当CBH≤2 km时为低云;当2 km<CBH<6 km时为中云;当CBH≥6 km时为高云(Wang, 2013; Xu et al., 2021)。经此分类,在九龙站58 566组云天样本中,可以得到低云、中云和高云的样本分别为27 911、26 545和4 110组。基于上述数据及分类,来分析九龙站夏季非降水云的云出现率、液态水路径和过冷水路径的观测特征。

2 结果分析

2.1 云出现率特征

基于2018—2019年6—8月九龙站地基微波辐射计观测数据,图3给出九龙夏季不同天气状况的出现

率。分析可知,晴空出现率的逐月变化较大,最大值出现在8月,约为25%,最小值出现在7月,约为9%。雨天或雾天的出现率的逐月变化相对较小,最大值出现在6月,约为13%,最小值出现在8月,约为7%。与晴空以及雨天或雾天相比,云天的出现率具有明显的高值,最大值出现在7月,约为82%,而6月和8月的出现率在67%左右;其中低云出现率的逐月变化较大(28%~43%),中云次之(30%~35%),高云最小(5%~6%),且低云和中云的出现率最大值均出现在7月。由上可知,九龙夏季非降水云出现率月均值在67%~82%之间,高发于7月;从不同高度云类来看,低云出现最频繁,中云稍逊,而高云的出现率远低于低云和中云,夏季低云、中云和高云的平均出现率分别为34.4%、32.6%和5.2%。可见青藏高原九龙地区夏季非降水云以低云和中云为主,而高云较少。陈葆德等(2008)指出青藏高原及周边地区的云状有明显的地域特性,青藏高原北侧盛行高云,青藏高原主体盛行积雨云,而青藏高原东南侧云、贵、川地区多为层状低云。万霞等(2020)利用青藏高原东侧甘孜站Ka波段云雷达2019年6—8月观测资料分析了该地区非降水云垂直结构特征,发现甘孜云天的主导云系为低云,特别是单层云时,低云出现率可达约57%,这与本文得到的分析结果是相近的。从九龙和甘孜两地不同探测设

备的观测结果来看,青藏高原东侧夏季非降水云中低云占主导,其出现率高于中云和高云。另外,九龙夏季非降水云出现率的月均值在67%~82%之间,其中低云出现率的月均值在28%~43%,远高于Xu等(2021)得到的华中地区夏季低云出现率的月均值13%~28%。由于云多是由大气水汽抬升凝结而成,在青藏高原大气水汽含量低于华中地区的大气环境条件下,九龙低云出现率高于华中地区说明九龙地区大气低层上升运动频繁。而大气低层上升运动多发,这种低层大气的辐合环境有利于西南涡低压系统的形成,若配合有充沛的大气水汽流入,便容易发生降水天气(何光碧,2012;姚秀萍等,2021)。因此,开展九龙地区云的观测特征研究,有助于更好认识该地区西南涡发生的云环境和大气背景。

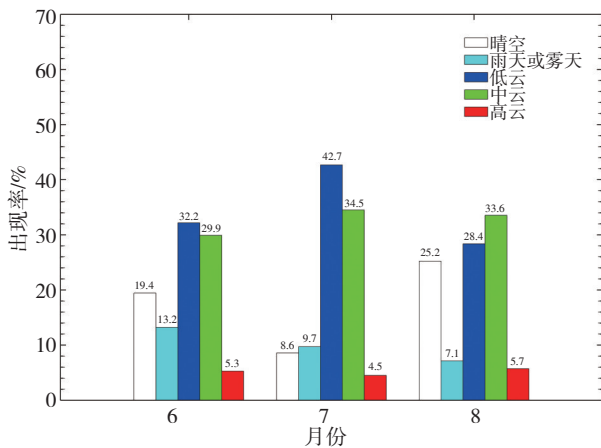


图3 2018—2019年6—8月九龙站不同天气状况的出现率

Fig.3 Occurrence frequencies of different sky conditions at Jiulong station during June to August of 2018-2019

图4给出2018—2019年6—8月九龙站非降水云的云出现率的日变化,可见对所有非降水云而言,云出现率的日变化波动较小,夜间云出现率稍高于白天。然而,不同高度云的出现率展现出的日变化有差异。其中,低云的出现率表现为白天低、夜间高的日变化特征,且日变化的波动幅度大,波动范围为15%~56%,云出现率的最小值出现在15时而最大值出现在06时。中云的出现率日变化特征与低云相反,表现为白天高、夜间低,日变化的波动幅度小于低云,波动范围为20%~48%,云出现率的最小值出现在04时而最大值出现在13时。高云的出现率日变化特征与中云相似,即白天高、夜间低,但日变化的波动幅度明显小于中云,波动范围为2%~9%,云出现率的最小值出现在07时而最大值出现在16时。由上可见,不同高度云的出现率日变化特征是有差异的。低云的生成多是近地层空气的上升运动或辐射冷却造成的,近地层大气水汽含量对云的形成具有重要作用,而青藏高原

东侧近地层大气具有白天干暖、夜间湿冷的日变化特征(徐桂荣等,2019),使得夜间低云的形成条件优于白天,形成低云出现率夜间高、白天低的日变化特征。在中云和高云的形成中,大气对流活动起着关键作用,需要更强的上升运动将空气抬升至足以凝结成云的高度,而青藏高原深厚对流活动多出现在白天(李国平,2002),这可能是造成中云和高云的出现率白天高、夜间低的一个重要因素。

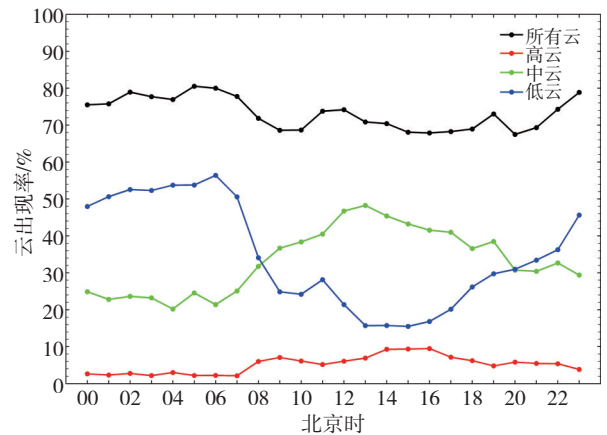


图4 2018—2019年6—8月九龙站非降水云的云出现率日变化

Fig.4 Diurnal variation of cloud occurrence frequency for non-precipitating clouds at Jiulong station during June to August of 2018-2019

进一步分析九龙非降水云出现率的垂直分布发现,夏季各月份非降水云出现率的垂直分布特征具有很好的一致性,即云出现率的垂直分布均呈现单峰分布特征,且峰值高度均在约2 km高度,6、7、8月的峰值分别为6.9%、9.2%和7.8%,整个夏季峰值为8.1%(图5a)。Wan等(2022)利用云雷达观测资料分析九龙夏季云结构发现,九龙非降水云中底层云的出现率峰值出现在约2 km高度,这与本文利用地基微波辐射计观测到的非降水云出现率的峰值高度一致的,说明九龙地基微波辐射计探测云底高度的性能是可靠的。为探究九龙非降水云出现率垂直分布形成的大气条件,对九龙云天微波辐射计观测的温度廓线进行统计分析发现,九龙云天2 km高度的气温约为0℃,这正是水汽的凝结温度,说明云出现率的垂直分布与大气温度层结密切相关。此外,九龙夏季非降水云出现率的单峰垂直分布呈现日夜差异,在水汽平均凝结高度(约2 km)以下,夜间04时的云出现率高于白天14时,而在水汽平均凝结高度(约2 km)以上,白天14时的云出现率高于夜间04时(图5b)。这是受青藏高原低层大气白天干热、夜间湿冷的热力层结日变化的影响所致(徐桂荣等,2019),夜间湿冷的大气条件有利于水汽在较低高度凝结成云,与此相反,白天干热的大气条件使得水汽要上升到较高高度才易凝结成云。可见,

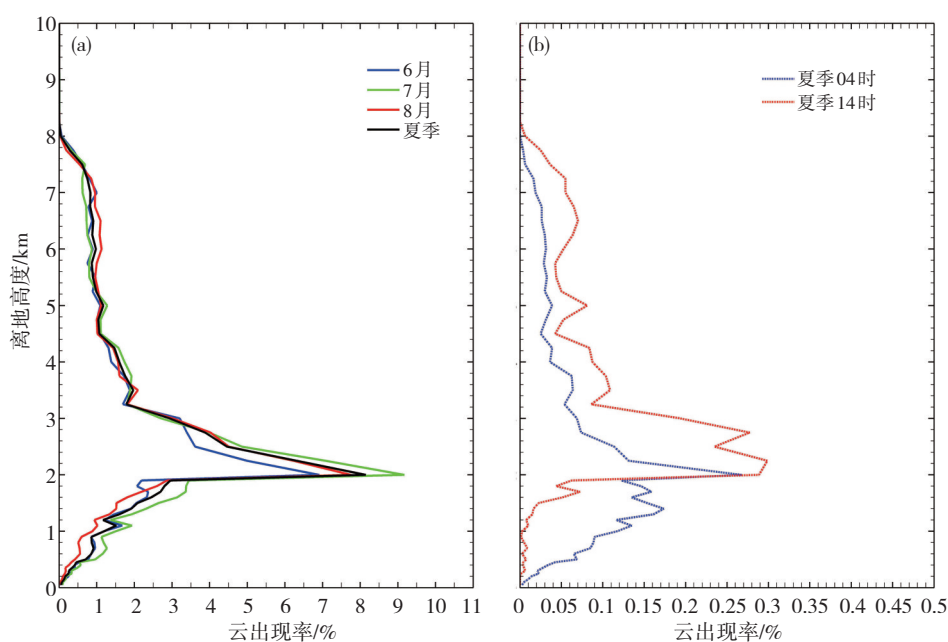


图5 2018—2019年6—8月九龙站非降水云出现率的垂直分布(a)以及夏季04时和14时非降水云出现率的垂直分布(b)

Fig.5 Vertical distribution of cloud occurrence frequency for non-precipitating clouds (a) from June to August and (b) at 04:00 BT and 14:00 BT in summer at Jiulong station during 2018–2019

青藏高原云特征与该区域大气环境条件密切相关,加强对青藏高原云的探测和认识有助于更好理解青藏高原大气环境特征。

2.2 云液态水路径特征

对2018—2019年6—8月九龙站非降水云的液态水路径(图6)进行分析发现,所有非降水云的液态水路径逐月波动范围为 $0.346\sim 0.498\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最大值出现在7月,最小值出现在8月。其中,低云的液态水路径远高于中云,而高云的液态水路径远低于中云。低云的液态水路径波动范围为 $0.558\sim 0.719\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最大值出现在7月,最小值出现在8月。中云的液态水路径的逐月变化特征与低云相似,波动范围为 $0.208\sim 0.273\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最大值出现在7月,最小值出现在8月。高云的液态

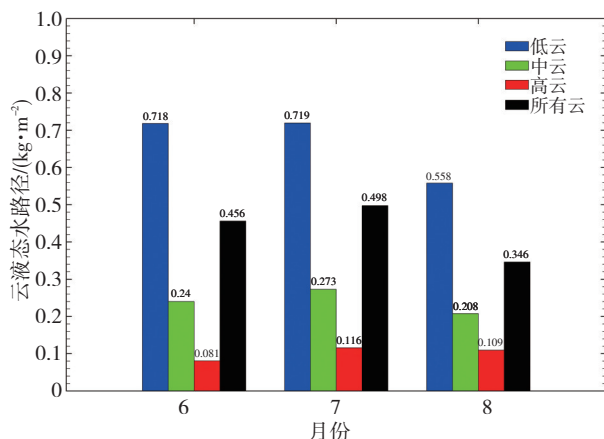


图6 2018—2019年6—8月九龙站非降水云的液态水路径

Fig.6 Liquid water path of non-precipitating clouds at Jiulong station from June to August of 2018–2019

水路径波动范围为 $0.081\sim 0.116\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最大值出现在7月,最小值出现在6月。显然,不论是低云、中云和高云,其液态水路径均在7月出现夏季峰值。对整个夏季而言,非降水云的液态水路径均值约为 $0.433\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,而低云、中云和高云的液态水路径均值分别约为 0.665 、 0.240 和 $0.102\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

图7给出2018—2019年6—8月九龙站非降水云的液态水路径日变化。可见低云的液态水路径具有白天小、夜间大的日变化特征,其日变化的波动范围为 $0.372\sim 1.230\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最小值出现在11时而最大值出现在18时。与低云不同,中云的液态水路径日变化特征不明显,日夜差异不大,波动幅度较小,波动范围为 $0.152\sim 0.394\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最小值出现在05时而最大值出现在02时。高云的液态水路径与中云相似,未表现出明显的日变化特征,波动幅度也较小,波动范围为 $0.060\sim 0.198\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最小值出现在00时而最大值出现在19时。对所有非降水云而言,其液态水路径的日变化特征与低云相似,说明低云的贡献是主要的。低云的液态水路径日变化特征与图4展示的低云出现率的日变化特征是相对应的,即低云白天出现率低、液态水路径小而夜间出现率高、液态水路径大,两者分别从云发生频率和云水含量反映了青藏高原白天干暖、夜间湿冷的大气特点,这为青藏高原夜雨的发生提供了良好的大气环境条件(李国平,2002)。另外,有研究表明,西南涡夜间发生的概率大于白天(湛贵珣和何光碧,2008),而且与西南涡密切相关的重力波也

具有明显的夜发性(陈炜和李跃清,2019),九龙地区云水的日变化特征是否与西南涡和重力波的这种夜发性有关联是值得后续探讨的问题。

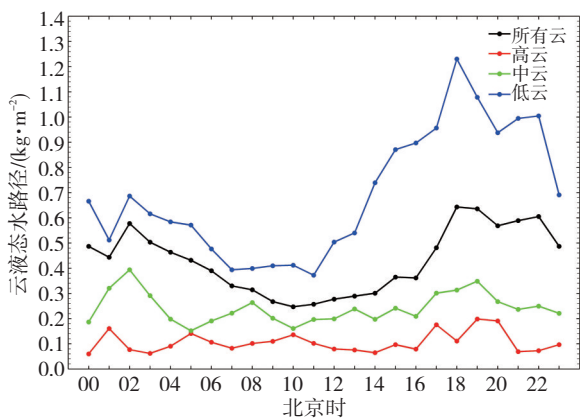


图7 2018—2019年6—8月九龙站非降水云的液态水路径日变化

Fig.7 Diurnal variation of liquid water path for non-precipitating clouds at Jiulong station from June to August of 2018–2019

2.3 冷云的过冷水路径特征

混合相云在气候系统中有着潜在的重要影响,加强对混合相云中过冷水的探测有助于深入理解云的演变和辐射特性(Sun and Shine, 1995; Luke et al., 2010)。地基微波辐射计可以探测云底温度和云液态水路径,这为识别云相态和过冷水路径提供了一个手段,而且地基微波辐射计探测的过冷水精度与过冷水探测器的估算精度相当(Ware et al., 2003)。由于地基微波辐射计没有云顶温度的探测数据,因此,本文利用云底温度为依据来识别非降水云中的冷云,即云底温度介于0~−40℃之间的云,并分析所识别的冷云的过冷水路径特征。

图8展示了2018—2019年6—8月九龙站非降水云中冷云的过冷水路径的逐月变化。可见所有冷云的过冷水路径逐月波动范围为0.134~0.171 kg·m^{−2},最大值出现在7月,最小值出现在8月。其中,低云的过冷水路径最小,中云的过冷水路径最大,而高云居中,这说明低云中冷云出现率较低,而且过冷水多出现在中云内。低云的过冷水路径波动范围为0.042~0.079 kg·m^{−2},最大值出现在7月,最小值出现在8月。中云的过冷水路径的逐月变化特征与低云相似,波动范围为0.140~0.181 kg·m^{−2},最大值出现在7月,最小值出现在8月。高云的过冷水路径波动范围为0.081~0.116 kg·m^{−2},最大值出现在7月,最小值出现在6月。对整个夏季而言,非降水云中冷云的过冷水路径均值约为0.154 kg·m^{−2},而低云、中云和高云的过冷水路径均值分别约为0.065、0.166和0.102 kg·m^{−2}。另外,对比发现,过冷水路径和液态水路径具有相似的逐月变

化特征,而且高云的过冷水路径数值与液态水路径数值相同(图6、8)。表1给出九龙站夏季非降水云液态水路径中过冷水路径的占比,可见总体上非降水云液态水路径中过冷水路径的占比约为34.3%~38.8%。另外,过冷水路径占比随云的高度而增大,低云的占比最低,约为7.5%~10.9%,中云次之,约为66.5%~73.3%,而高云最高,达100%,这说明高云被观测到的液态水均是过冷水。显然,气温的垂直分布对过冷水的形成有重要影响。

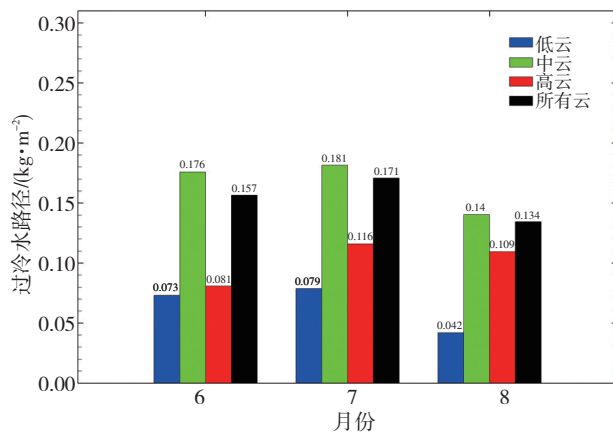


图8 2018—2019年6—8月九龙站非降水云中冷云的过冷水路径

Fig.8 Supercooled liquid water path of cold clouds among non-precipitating clouds at Jiulong station from June to August of 2018–2019

表1 2018—2019年6—8月九龙站非降水云液态水路径中过冷水路径的占比(单位:%)

Table 1 Proportion of supercooled liquid water path in liquid water path for non-precipitating clouds at Jiulong station from June to August of 2018–2019 (unit: %)

月份	低云	中云	高云	所有云
6	10.2	73.3	100	34.3
7	10.9	66.5	100	34.3
8	7.5	67.6	100	38.8

对九龙站夏季非降水云中冷云的过冷水路径日变化进行分析发现,除低云外,中云和高云的过冷水路径日变化与其液态水路径相似,即白天相对较小而夜间相对较大,且中云的过冷水路径大于高云(图9)。这是因为中云和高云的液态水路径中过冷水路径占比大,使得两者的日变化具有较好的相似性。另外,本文采用云底温度来采样过冷水路径,受气温日变化影响,该方法得到的低云过冷水路径主要出现在00—13时,而且过冷水路径明显小于中云,总体上也比高云过冷水路径小。此外,由于中云的过冷水路径大于高云和低云,所有冷云的过冷水路径日变化主要受中云过冷水路径调制,具有与中云相似的日变化特征。

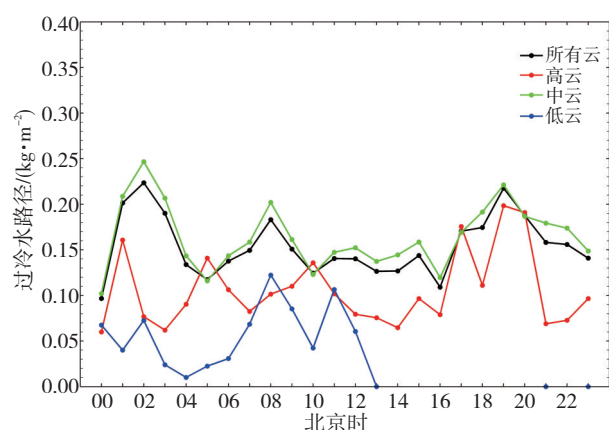


图9 2018—2019年6—8月九龙站非降水云中冷云的过冷水路径日变化

Fig.9 Diurnal variation of supercooled liquid water path for cold clouds among non-precipitating clouds at Jiulong station from June to August of 2018–2019

3 讨论

地基微波辐射计配载有天顶观测的IRT,可以测量晴空大气背景亮温和云天云底亮温,结合地基微波辐射计反演的温度廓线可估算出云底亮温对应的高度,进而得到云底高度(Ware et al., 2003; Xu et al., 2015)。因此,地基微波辐射计估算云底高度与其反演的温度廓线准确度密切相关。本文在图2中展示了地基微波辐射计温度与GPS探空温度具有很好的相关性,两者的相关系数达到0.99以上,平均偏差仅有0.1℃,均方差为1.2℃,这说明基于地基微波辐射计温度廓线和IRT计算的云底高度误差在300 m以内,云底高度数据具有较好的可靠性。本文利用九龙地基微波辐射计云底高度数据分析发现,九龙非降水云的出现率峰值在约2 km高度,这与Wan等(2022)利用九龙云雷达观测资料分析得到的非降水云中底层云的出现率峰值高度是吻合的。另外,王改利等(2021)利用青藏高原墨脱云雷达资料分析发现,云出现率峰值高度除了降水时出现在近地层外,另一个峰值高度出现在2—3 km高度,而万霞等(2020)分析甘孜云雷达资料也发现,2—4 km高度是低云云底高度出现的峰值区,这些研究结果说明2 km高度附近是青藏高原云出现的高发区域。此外,九龙地基微波辐射计观测到的非降水云的云底高度的垂直分布(图5),也与Wan等(2022)利用九龙云雷达观测得到的非降水云中底层云云底高度的垂直分布结构相似。需要指出的是,九龙云雷达的探测高度可达20 km,这远高于地基微波辐射计最高探测高度10 km,因此,云雷达可探测地基微波辐射计探测不到的10 km以上的云,这使得Wan等(2022)利用九龙云雷达观测到的云出现率高于地基微波辐

射计。

基于地基微波辐射计的云探测能力,Xu等(2021)利用6 a地基微波辐射计资料分析了华中地区非降水云的统计特征。将本文分析结果与Xu等(2021)的结果对比发现,九龙夏季非降水云出现率月均值(67%~82%)低于华中地区(83%~95%),其中九龙低云出现率(28%~43%)远高于华中地区(13%~28%),而九龙中云出现率(30%~35%)低于华中地区(31%~53%),特别是九龙高云出现率(5%~6%)远低于华中地区(21%~43%)。这是因为云是由大气水汽冷却凝结而成,大气水汽越多,云越容易出现,反之,则云较难形成(Wang, 2013)。华中地区海拔远低于青藏高原,大气水汽含量比青藏高原高(Xu et al., 2011),而且夏季适逢华中地区梅雨期,大气水汽更是充沛,并能被对流系统输送到更高的高度,而青藏高原大气水汽较华中地区少,能被对流系统输送到较高高度的大气水汽有限。因此,九龙夏季非降水云的出现率低于华中地区,且以低云和中云为主,而高云远低于华中地区;同时,也造就了非降水云出现率垂直结构在九龙地区呈单峰形态(峰值在约2 km高度),而在华中地区呈双峰形态(主峰约在6.25 km高度,次峰约在2.5 km高度)。另外,大气水汽主要来自地球表面蒸发,因而低层大气水汽是整层大气水汽的主要贡献者,并调制着整层大气水汽的日变化(Wang, 2013; 徐桂荣等, 2019)。有研究表明,华中地区整层大气水汽具有白天高、夜间低的日变化特征,而青藏高原整层大气水汽的日变化则相反,即白天低、夜间高(Xu et al., 2011)。这就造成非降水云中的水云(以低云和中云为主)出现率在九龙和华中地区具有相反的日变化特征,譬如,九龙低云出现率白天低、夜间高,而华中地区低云出现率白天高、夜间低(Xu et al., 2021)。

云形成于大气水汽,因而云液态水路径的大小与大气水汽的多寡密切相关。本文分析结果显示,九龙夏季非降水云中的低云、中云、高云的液态水路径分别为0.665、0.240、0.102 kg·m⁻²,这些数值均低于Xu等(2021)得到的华中地区夏季非降水云中的低云、中云、高云的液态水路径(即0.762、0.311、0.122 kg·m⁻²),这种差异与青藏高原大气水汽含量低于华中地区有很大关系(Xu et al., 2011)。然而,由于九龙非降水云中以低云和中云为主,而高云出现率(5%~6%)远低于华中地区(21%~43%),这使得九龙非降水云的液态水路径均值(约为0.433 kg·m⁻²)反而高于华中地区(约为0.353 kg·m⁻²) (Xu et al., 2021)。此外,云液态水路径主要来自水云,而水云多存在于低云,因此低云的液态水路径日变化与其出现率日变化具有相似特征,即九

龙低云的液态水路径白天小、夜间大,与九龙低云出现率的日变化相对应;而华中地区低云的液态水路径日变化,也与其低云出现率的日变化相似。需要指出的是,华中地区高云出现率较高,高云多为冰云,在太阳辐射下云中冰晶融化会增加云水含量,因此华中地区高云液态水路径受太阳辐射调制具有明显的日变化特征,即云液态水路径白天大、夜间小(Xu et al., 2021);而九龙高云出现率较低,因此九龙高云液态水路径受太阳辐射调制弱,没有明显的日变化特征。

综上所述,地基微波辐射计对于10 km以下的云底高度具有较好的探测能力,而且是目前确定云液态水路径最准确的方法之一(Westwater, 1978; Liljegren et al., 2001; Crewell and Löhnert, 2003),加上地基微波辐射计的探测时间分辨率为分钟级别,具有全天候自动观测的特点,结合地基微波辐射计反演的温度廓线,还可以探讨云相态及云中过冷水路径特征,这为研究云的宏微观特征及其变化提供了新的手段。不过,地基微波辐射计是基于单层云模式进行遥感反演的(Ware et al., 2003),而且地基微波辐射计配载的IRT不能穿透云,因此,对于多层云以及10 km高度以上云的探测,还需借助云雷达、激光雷达、星载雷达等设备进行综合观测。此外,本文侧重研究非降水云是因为,降水时云底被认为接地,云底高为0 km,加之地基微波辐射计配载的IRT不能穿透云,因而地基微波辐射计无法得到有降水时各类云的结果,开展有降水时各类云的观测与研究需借助云雷达和测雨雷达等设备。

4 结论

本文利用2018—2019年6—8月青藏高原东侧西南涡多发区九龙站的地基微波辐射计资料,统计分析了该地区夏季非降水云出现率、云液态水路径及过冷水路径的观测特征,得到主要结论如下:

(1) 九龙夏季非降水云出现率月均值在67%~82%之间,高发于7月,非降水云以低云和中云为主,而高云较少,低云、中云和高云的平均出现率分别为34.4%、32.6%和5.2%。不同高度云的出现率具有日变化差异,其中低云的出现率表现为白天低、夜间高,而中云和高云的出现率均表现为白天高、夜间低,这与不同高度云的形成机制有关。非降水云出现率的垂直分布表现为单峰形态,峰值高度位于约2 km高度,峰值高度的云出现率均值约为8.1%;受大气热力层结日变化影响,非降水云出现率的单峰垂直分布呈现日夜差异。

(2) 九龙夏季非降水云的液态水路径均值约为 $0.433 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,其中低云、中云和高云的液态水路径均

值分别约为 0.665 、 0.240 和 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。低云的液态水路径表现出与低云出现率相似的日变化特征,即低云的云液态水路径白天小、夜间大,但中云和高云的液态水路径的日变化特征不明显。低云的出现率和液态水路径与青藏高原低层大气白天干暖、夜间湿冷的变化特征有关。

(3) 九龙夏季非降水云中冷云的过冷水路径均值约为 $0.154 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,过冷水多出现于中云,高云次之,低云最少,低云、中云和高云的过冷水路径均值分别约为 0.065 、 0.166 和 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。总体上非降水云液态水路径中过冷水路径的占比约为34.3%~38.8%,过冷水路径占比随云的高度而增大,低云的占比最低约为7.5%~10.9%,中云次之约为66.5%~73.3%,而高云最高,达到100%,气温的垂直分布对过冷水的形成有重要影响。中云和高云的过冷水路径日变化与其液态水路径相似,即白天小而夜间大。

(4) 青藏高原与华中地区之间大气水汽特征差异造就两地夏季非降水云具有不同特征。九龙夏季非降水云出现率月均值(67%~82%)低于华中地区(83%~95%),其中九龙低云出现率(28%~43%)远高于华中地区(13%~28%),而九龙高云出现率(5%~6%)远低于华中地区(21%~43%)。由于青藏高原大气水汽少于华中地区,九龙夏季非降水云中的低云、中云、高云的液态水路径均低于华中地区。然而,由于九龙非降水云中高云出现率远低于华中地区,这使得九龙非降水云的液态水路径均值反而高于华中地区,而且九龙高云的液态水路径日变化受太阳辐射的调制明显不如华中地区。

参考文献(References):

- 陈葆德,梁萍,李跃清.2008.青藏高原云的研究进展[J].高原山地气象研究,28(1):66-71. Chen B D, Liang P, Li Y Q. 2008. An overview of research on clouds over the Tibetan Plateau [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 28(1):66-71 (in Chinese). doi:1674-2184(2008)01-0066-06
- 陈炜,李跃清.2019.青藏高原东部重力波过程与西南涡活动的统计关系[J].大气科学,43(4):773-782. Chen W, Li Y Q. 2019. Statistical relationship between gravity waves over the eastern Tibetan Plateau and the Southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 43(4): 773-782 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18130
- 傅云飞,潘晓,刘国胜,等.2016.基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究[J].大气科学,40(1):102-120. Fu Y F, Pan X, Liu G S, et al. 2016. Characteristics of precipitation based on cloud brightness temperatures and storm tops in summer over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 40(1):102-120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15165
- 何光碧.2012.西南低涡研究综述[J].气象,38(2):155-163. He G B. 2012. Re-

- view of the southwest vortex research [J]. *Meteorological Monthly*, 38(2): 155–163 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.02.003
- 李德俊, 李跃清, 柳草, 等. 2010. 基于 TRMM 卫星探测对宜宾夏季两次暴雨过程的比较分析[J]. *气象学报*, 68(4): 559–568. Li D J, Li Y Q, Liu C, et al. 2010. Comparative analysis between two summer heavy rain events in Yibin based on the TRMM data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(4): 559–568 (in Chinese). doi:0577-6619/2010/68(4)-0559-68
- 李国平. 2002. 青藏高原动力气象学[M]. 北京: 气象出版社. Li G P. 2002. *Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau* [M]. Beijing: China Meteorology Press (in Chinese)
- 李国平. 2013. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题[J]. *沙漠与绿洲气象*, 7(3): 1–6. Li G P. 2013. Advances in Tibetan Plateau Vortex and Southwest Vortex research and related scientific problems [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 7(3): 1–6 (in Chinese)
- 李跃清, 徐祥德. 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. *气象科技进展*, 6(3): 134–140. Li Y Q, Xu X D. 2016. A review of the research and observing experiment on southwest China vortex [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 6(3): 134–140 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.018
- 刘黎平, 郑佳锋, 阮征. 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. 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(4): 635–647 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.041
- 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 Y M, Yan Y F, Lü J H, et al. 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*, 42(4): 847–858 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17281
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论 [M]. 北京: 气象出版社. Lu J H. 1986. *Introduction to the southwest China vortex* [M]. Beijing: China Meteorology Press (in Chinese)
- 卢萍, 李跃清. 2020. 9 年夏季连续加密探空观测的九龙站边界层特征分析[J]. *高原气象*, 39(5): 1058–1069. Lu P, Li Y Q. 2020. Analyses of the boundary layer characteristics by intensive sounding observation data at Jiulong station in summer for 9 years [J]. *Plateau Meteorology*, 39(5): 1058–1069 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00098
- 湛贵珣, 何光碧. 2008. 2000~2007 年西南低涡活动的观测事实分析[J]. *高原山地气象研究*, 28(4): 59–65. Shen G X, He G B. 2008. The observed facts analysis of southwest vortex [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 28(4): 59–65 (in Chinese). doi:1674-2184(2008)04-0059-07
- 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:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.002
- 王改利, 周任然, 扎西索朗, 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 Moutuo 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
- 徐桂荣, 张文刚, 万霞, 等. 2019. 地基微波辐射计反演的青藏高原东侧甘孜大气湿廓线分析[J]. *暴雨灾害*, 38(3): 238–248. Xu G R, Zhang W G, Wan X, et al. 2019. Analysis on atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(3): 238–248 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.03.006
- 徐祥德, 周明煜, 陈家宜, 等. 2001. 青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图景[J]. *中国科学(D 辑)*, 31(5): 428–440. Xu X D, Zhou M Y, Chen J Y, et al. 2001. A comprehensive physical image of the dynamical and thermal structures of the land-atmosphere processes in the Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 31(5): 428–440 (in Chinese). doi:10.1360/zd2001-31-5-428
- 杨军, 陈宝君, 银燕, 等. 2011. 云降水物理学[M]. 北京: 气象出版社. Yang J, Chen B J, Yin Y, et al. 2011. *Physics of clouds and precipitation* [M]. Beijing: China Meteorology Press (in Chinese)
- 姚秀萍, 马嘉理, 刘俏华, 等. 2021. 青藏高原夏季降水研究进展[J]. *气象科技进展*, 11(3): 66–74. Yao X P, Ma J L, Liu Q H, et al. 2021. Research progress on summer precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 11(3): 66–74 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.009
- 郁淑华, 高文良, 彭骏. 2021. 2012—2017 年不同涡源西南低涡多发的影响因素分析[J]. *暴雨灾害*, 40(6): 577–588. Yu S H, Gao W L, Peng J. 2021. Analysis of influencing factors on frequent occurrence of Southwest China Vortexes with different vortex sources from 2012 to 2017 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 40(6): 577–588 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.002
- 张蔚然, 刘黎平, 吴翀. 2022. X 波段相控阵偏振雷达观测墨脱地区云降水宏观特征的统计研究[J]. *大气科学*, 47(1): 1–16. Zhang W R, Liu L P, Wu C. 2022. Statistical characteristics of cloud precipitation in the Moutuo area observed by X-band dual-polarization phased array radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 47(1): 1–16 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21050
- 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
- 朱怡杰, 邱玉珺, 陆春松. 2019. 青藏高原那曲夏季云中水成物分布特征的毫米波雷达观测[J]. *气象*, 45(7): 945–957. Zhu Y J, Qiu Y J, Lu C S. 2019. Millimeter wave radar observation of hydrometeor distribution characteristics of cloud in summer in Nagqu, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Meteorological Monthly*, 45(7): 945–957 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.005
- Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudi-

- ness [J]. *Science*,245(4923):1227–1230. doi:10.1126/science.245.4923.1227
- Crewell S, Löhnert U. 2003. Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry:2. Sensor accuracy and synergy [J]. *Radio Science*,38:8042. doi:10.1029/2002RS002634
- Crewell S, Bloemink H, Feijt A, et al. 2004. The BALTEX BRIDGE campaign:an integrated approach for a better understanding of clouds [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,85:1565–1584. doi:10.1175/BAMS-85-10-1565
- Frey R A, Baum B A, Menzel W P, et al. 1999. A comparison of cloud top heights computed from airborne lidar and MAS radiance data using CO2 slicing [J]. *Journal of Geophysical Research*,104:24547–24555. doi:10.1029/1999JD900796
- Garrett T, Zhao C F. 2013. Ground-based remote sensing of thin clouds in the Arctic [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*,6(5):1227–1243. doi:10.5194/amt-6-1227-2013
- Khvorostyanov V I, Curry J A. 2014. *Thermodynamics, kinetics, and micro-physics of clouds* [M]. New York: Cambridge University Press
- Liljegren J C, Clothiaux E E, Mace G G, et al. 2001. A new retrieval for cloud liquid water path using a groundbased microwave radiometer and measurements of cloud temperature [J]. *Journal of Geophysical Research*,106:14485–14500. doi:10.1029/2000JD900817
- Luke E P, Kollias P, Shupe M D. 2010. Detection of supercooled liquid in mixed-phase clouds using radar Doppler spectra [J]. *Journal of Geophysical Research*,115: D19201. doi:10.1029/2009JD012884
- Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate:Results from the Earth radiation budget experiment [J]. *Science*,243(4887):57–63. doi:10.1126/science.243.4887.57
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,80:2261–2287. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2
- Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system:a critical review [J]. *Journal of Climate*,18:237–273. doi:10.1175/JCLI-3243.1
- Sun Z, Shine K P. 1995. Parameterization of ice cloud radiative properties and its application to the potential climatic importance of mixed-phase clouds [J]. *Journal of Climate*,8:1874–1888. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<1874:poicrp>2.0.co;2
- Wan X, Zheng J, 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*,14:3702. doi:10.3390/rs14153702
- Wang P K. 2013. *Physics and dynamics of clouds and precipitation* [M]. New York: Cambridge University Press
- Ware R, Carpenter R, G ü ldner J, et al. 2003. A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid [J]. *Radio Science*,38: 8079. doi:10.1029/2002RS002856
- Westwater E R. 1978. The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual-frequency ground-based microwave radiometry [J]. *Radio Science*,13:677–685. doi:10.1029/RS013i004p00677
- Westwater E R, Crewell S, Mätzler C. 2004. A review of surfaced-based microwave and millimeter-wave radiometric remote sensing of the Troposphere [J]. *URSI Radio Science Bulletin*,310:59–80. doi:10.23919/UR-SIRSB.2004.7909438
- Xu G, Cui C, Li W, et al. 2011. Variation of GPS precipitable water over the Qinghai-Tibet Plateau:possible teleconnection triggering rainfall over the Yangtze River Valley [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*,22(2):195–202. doi:10.3319/TAO.2010.09.09.01(TibXS)
- Xu G, Xi B, Zhang W, et al. 2015. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*,120:10313–10323. doi:10.1002/2015JD023438
- Xu G, Zhang W, Wan X, et al. 2021. Cloud occurrence frequency and cloud liquid water path for non-precipitation clouds using ground-based measurements over central China [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*,215:105575. doi:10.1016/j.jastp.2021.105575
- Zhao C F, Garrett T J. 2015. Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing [J]. *Geophysical Research Letters*,42(2):557–564. doi:10.1002/2014GL062015

(责任编辑 唐永兰)