

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观测研究

武静雅^{1,2,3} 孙强^{1,3} 毕永恒^{1,3*} 田玉芳^{1,3} 王一楠^{1,3} 吕达仁^{1,2,3}

1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

摘要: 青藏高原上空云宏观参数的日变化受大尺度环流、当地太阳辐射和地表过程的联合作用, 对辐射收支、辐射传输及感热、潜热的分布等有重要影响。由于缺乏持续定量的观测手段, 对各类天气系统云宏观参数日变化特征的了解还十分不足。多波段多大气成分主被动综合探测系统 APSOS (Atmospheric Profiling Synthetic Observation System) 的 Ka 波段云雷达是首部在青藏高原实现长期观测云的雷达。本文基于 2019 年全年 APSOS 的 Ka 波段云雷达资料, 研究了西风槽、切变线和低涡三类重要天气系统影响下的有云频率、单层非降水云或者降水云非降水时段的云顶高度、云底高度和云厚日变化的时域和频域特征, 给出了统计回归方程。主要结论有: (1) 西风槽系统日均有云频率为 56.9%, 切变线系统为 50.8%, 低涡系统达 73%; (2) 尽管西风槽和切变线系统的成因不同, 但两类系统云宏观参数的日变化趋势和主要谐波周期相似: 日变化趋势基本为单峰单谷型, 日出前最低, 日落前最高。有云频率表现为日变化和半日变化, 单层云云顶高度、云底高度和云厚主要表现为日变化; (3) 低涡系统云宏观参数的日变化特征与前两类系统明显不同: 日变化趋势表现为多峰多谷型, 虽然有云频率和单层云云顶高度、云底高度主要谐波中均以日变化振幅最大, 但频谱分布分散, 云厚主要变化中振幅最大的是周期为 4.8 小时的波动; (4) 给出了各系统有云频率、单层云云顶高度、云底高度和云厚日变化的统计回归方程。

关键词: APSOS, Ka 波段云雷达, 云宏观参数, 日变化, 西风槽, 切变线, 低涡

Diurnal variation of cloud macro parameters in three important weather systems over the Tibetan Plateau using Ka-band Cloud Radar

Jingya Wu^{1,2,3} Qiang Sun^{1,3} Yongheng Bi^{1,3*} Yufang Tian^{1,3} Yinan Wang^{1,3} Daren Lyu^{1,2,3}

1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

3. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2021-04-12; **网络预初版日期**

作者简介 武静雅, 女, 博士研究生在读, 专注雷达气象学相关研究, wujingya@mail.iap.ac.cn

通讯作者 毕永恒, 男, 工程师, 专注雷达气象学相关研究, byh@mail.iap.ac.cn

吕达仁, 男, 研究员, 主要从事大气物理学相关研究, ludr@mail.iap.ac.cn

资助项目 青藏高原大气多要素垂直结构的高分辨率综合探测及对大气上下层相互作用的重要机制研究 (QYZDY-SSW-DQC027);

第二次青藏高原科考国家专项-人类活动与生存环境安全-“大气成分的垂直分布探测及反演” (2019QZKK0604)

中科院先导专项-鸿鹄专项-地基激光和微波雷达遥感观测子课题 (XDA17010103)

Abstract: The diurnal variation of cloud macro parameters over the Tibetan Plateau is affected by the combined effects of large-scale circulation, local solar radiation and surface processes, and has an important influence on the radiation budget, transmission of radiation and the distribution of sensible and latent heat. Due to the lack of continuous quantitative observation means, the understanding of the diurnal variation characteristics of cloud macro parameters in various weather systems is still very insufficient. Ka-band cloud radar of APSOS (Atmospheric Profiling Synthetic Observation System) is the first radar to realize long-term cloud observation in the Tibetan Plateau. In this paper, data of APSOS Ka-band cloud radar in 2019 are used to study the time-domain and frequency-domain diurnal variation characteristics of cloud frequency, single-layer cloud top height, cloud bottom height and cloud thickness under the influence of westerly trough, shear line and vortex system. Main conclusions are as follows: (1) The daily mean cloud frequency is 56.9% for the westerly trough system, 50.8% for the shear line system and 73% for the vortex system; (2) Although the genesis of westerly trough and shear line system is different, the diurnal variation trend and main harmonic period of cloud macro parameters of the two systems are similar: the diurnal variation trend is sinusoidal, the minimum value appears before sunrise and the maximum value appears before sunset. The main harmonics of cloud frequency are diurnal (24 hours) and semidiurnal (12 hours) harmonics, and the diurnal harmonics have the largest amplitude among the main harmonics of cloud top height, cloud bottom height and cloud thickness; (3) The diurnal variation characteristics of cloud macro parameters in vortex system is different from that in the first two systems. The diurnal variation of cloud parameters in the vortex system is multi-peak type. Although the harmonic amplitude of diurnal period is the largest among the main harmonics of cloud frequency, single layer cloud top height and cloud bottom height, the spectrum distribution is discrete, and the maximum harmonic period of cloud thickness amplitude is 4.8 hours; (4) The statistical regression equations of diurnal variation of cloud frequency, single layer cloud top height, cloud bottom height and cloud thickness are given.

Key words: APSOS, Ka-band radar, cloud macro parameters, diurnal variation, westerly trough, shear line, vortex

1 引言

青藏高原是世界上最高、地形最复杂的大高原。国内外的许多研究表明，青藏高原的动力和热力作用对我国灾害性天气和气候异常、东亚大气环流、亚洲季风甚至全球气候都有显著影响（叶笃正和高由禧，1979；Adler et al., 2003；吴国雄等，2018）。

有云频率、云底高度、云顶高度和云厚等宏观参数的日变化受到大尺度环流、当地太阳辐射和地表过程的联合影响，又反过来影响上空感热和潜热的分布、辐射能传递、地表辐射收支等（汪宏七和赵高祥，1994；Wu and Liu, 2003）。研究云参数的日变化特征，不仅有助于理解青藏高原云的形成机制，也有助于理解青藏高原天气气候变化的规律（李昀英等，2003；宇如聪等，2014）。

毫米波云雷达（W/ Ka 波段）是观测云的最优雷达（Houze, 2014）。2006 年美国国家宇航局（NASA）发射的云探测卫星 CloudSat 上搭载的 W 波段云廓线雷达 CPR（The Cloud Profiling Radar）可以观测青藏高原云宏观参数（Stephens et al., 2002）。一些作者利用其产品对青藏高原云系垂直结构进行了研究，如对青藏高原、高原南坡和南亚季风区云厚差异的对比（王胜杰等，2010），对东亚季风区、印度季风区、西北太平洋季风区和青藏高原四个不同区域云量、云垂直结构及其季节变化特征的对比（汪会等，2011），以及高原地区和毗邻陆地和海洋地区云系垂直结构特征及其季节变化特征的对比（Yan et al., 2016）等。但是，由于 Cloudsat 太阳同步运行轨道的限制，CPR 只能正午及半夜前后经过高原上空，无法获得高原云的日平均及日变化特征。另外，W 波段云雷达相对 Ka 波段云雷达单位距离衰减大，星地距离导致其衰减不可忽视。有研究表明，Cloudsat 的资料无法观测到云顶高度在距地 2.5km 内的低云（Chan and Comiso, 2011）。

我国第三次青藏高原大气科学试验中使用了一部 Ka 波段云雷达，据此研究了夏季短时段的云底高度、云顶高度、云厚等云参数的日变化特征（刘黎平等，2015；常祎和郭学良，2016；张涛等，2019）。由于该试验只在夏季短期开展，无法获得全年各季节各类天气系统云参数日变化统计特征。

不同天气系统云的形成机制不同，云参数的日变化特征会存在差异。分别了解各类天气系统的有云频率、云底高度、云顶高度和云厚日变化特征，一方面可以提高其应用时的地区和天气系统针对性，另一方面可以为天气系统机理研究、数值模拟研究提供重要观测事实和统计特征。青藏高原主要的天气系统包括西风槽、切变线、低涡、西南季风等，不同系统主要发生季节不同，西风槽系统主要影响时间为每年 10 月至次年 5 月，切变线、低涡和西南季风的主要

影响时间为 6 月至 9 月（叶笃正等，1977；李国平等，2002；李跃清等，2011）。目前已观测到的西南季风云系个例较少，本文中不涉及该类天气系统，待有足够个例后再行分析研究。

中国科学院大气物理研究所牵头研制的国家重大科研仪器设备“多波段多大气成分主被动综合探测系统(Atmospheric Profiling Synthetic Observation System, 简称 APSOS)”可以对地表至热层低层进行观测。该系统安装在西藏羊八井国际宇宙线观测站(30.21° N, 90.43° E; 海拔 4300 米)(Lu et al., 2018)。APSOS 由多部先进的主动和被动遥感仪器组成, 包括激光雷达 5 部, Ka 波段云雷达, 太赫兹波谱仪及地基观测仪器, 其中的 Ka 波段雷达于 2018 年 7 月开始观测, 是首部实现了对青藏高原云全年不间断观测的毫米波云雷达。而且相较于 CPR, Ka 波段云雷达的衰减更小, 加之其与云层距离更近, 可以获得更加准确的云参数。蒋秋菲曾利用这部雷达资料研究了 2017 年冬季云顶高度、云底高度、云厚日变化以及冰水含量(蒋秋菲, 2019)。

基于 2019 年 APSOS 的 Ka 波段云雷达的连续观测资料, 本文分析得到了 2019 年青藏高原西风槽、切变线和低涡系统三类重要天气系统有云频率、单层非降水云或者降水云非降水时段的云顶高度、云底高度和云厚的日变化时域特征。为探究各云参数日变化时域特征的主要影响因素的特征, 对各参数的日变化进行了频域分析, 获得了代表各参数日平均值的直流分量和代表主要影响因素的谐波。并进一步根据主要谐波进行拟合, 给出了各参数日变化的回归方程, 提供数值模拟等研究使用。

2 资料与方法

由于青藏高原观测站较为稀疏, 采用单个观测站资料判断天气系统可能引起较大误差。本研究中采用欧洲中期天气预报中心高时空分辨率(时间分辨率 1 小时, 空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)的 ERA5 的 500hpa 位势高度场和水平风场资料来判断 2019 年西风槽、低涡和切变线系统(以下简称为三类系统)影响 APSOS 站的起止时间。筛选了各天气系统影响时间段内 APSOS 的 Ka 波段云雷达等效反射率因子数据, 计算得到各天气系统影响时间段内有云的时间段、有云时云层数和各层云的云底高度、云顶高度、云厚参数。由于降水会引起 Ka 波段雷达的较大衰减, 进一步筛选得到未发生降水时的数据用于分析。各天气系统影响 APSOS 站起止时间判定方法、Ka 波段云雷达简介及云宏观参数计算方法如下:

2.1 各天气系统影响 APSOS 站时间段判断方法

表 1 列出了三类系统影响羊八井 APSOS 站开始时间和结束时间的判断标准及 2019 年影响总次数和总时长。三类系统各自均有足够长的观测时间, 其中最短的低涡系统去除降水影响总

时长最短亦达到 227 小时，表明利用这些资料进行云参数日变化的统计结果具有较好的代表性。

表 1 西风槽、低涡和切变线系统影响 APSOS 站起止时间的判断标准及总时长

Table 1 criteria for judging the start time and end time of APSOS station influenced by Westerly Trough, Vortex and Shear Line

判断标准 系统名称	位势高度场	水平风场	开始条件/ 结束条件	2019 年影响总次数 /总时长 (小时)	去除降水后时 长 (小时)
西风槽	APSOS 站位 于槽前	APSOS 站位 于槽前风 场内	2 个条件同时满足/ 至少 1 个条件不再满足	29 次/1328	1170
切变线	--	APSOS 站位 于风场切 变区内	满足条件/不满足条件	15 次/295	247
低涡	闭合低压形 成	APSOS 站位 于低涡流 场区内	2 个条件同时满足/ 至少 1 个条件不再满足	17 次/321	227

2.2 Ka 波段云雷达简介及云宏观参数计算方法

2.2.1 Ka 波段云雷达简介

APSOS 的 Ka 波段云雷达长期不间断以垂直对空方式观测其上方云层，获得等效反射率因子、径向速度、速度谱宽和线性退偏振比数据，其主要参数列在表 2 中。本文筛选了 2019 年西风槽、切变线和低涡影响 APSOS 站时间段内该雷达的等效反射率因子数据。为了形象的展示三类系统云的特征，图 1 的 (a) (b) (c) 分别给出了西风槽、切变线和低涡系统影响下一整天云的反射率因子特征，可以看出西风槽系统云没有切变线系统云发展旺盛，但二者基本以单层云为主，低涡系统云发展最旺盛，云系最为复杂。

表 2 Ka 波段调频连续波雷达参数表

Table 2 Parameters of Ka-band FMCW Radar

参数名称	单位	数值
雷达工作波长	cm	0.86
时间分辨率	s	0.125

径向距离分辨率	<i>m</i>	30
发射机输出峰值功率	<i>kW</i>	0.04
发射脉冲宽度	μs	120
水平波束宽度	($^{\circ}$)	0.38
垂直波束宽度	($^{\circ}$)	0.38
天线增益	<i>dB</i>	50.9
馈线总损耗	<i>dB</i>	2.2
10km 最小可测回波强度	<i>dBZ</i>	-32.9

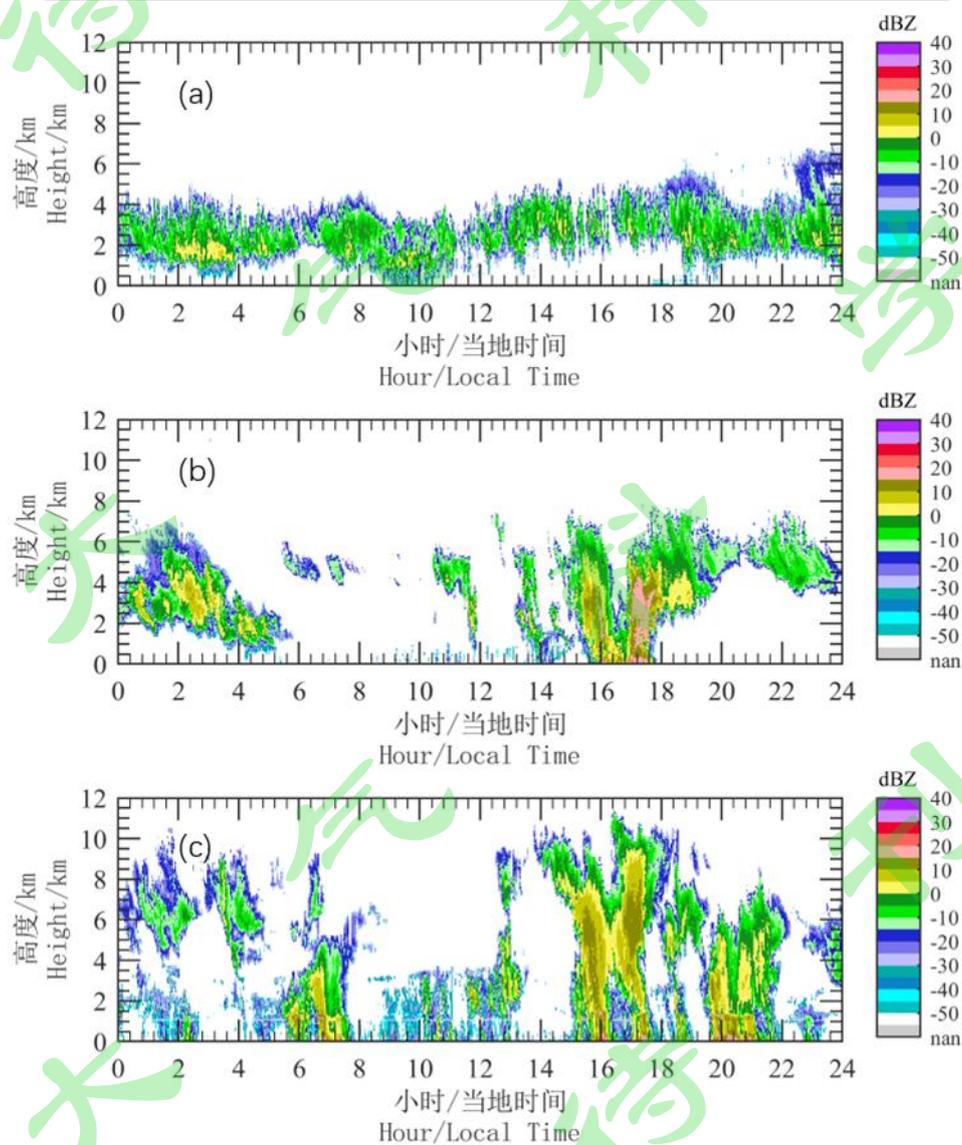


图 1 (a) 西风槽 (b) 切变线 (c) 低涡系统影响下云的反射率因子特征

Figure 1 Radar reflectivity characteristics of clouds under the influence of (a) westerly trough (b) shear line (c) vortex system

2.2.2 云宏观参数计算方法

利用筛选得到的雷达等效反射率因子数据确定三类系统影响下的有云时间段、有云时各层云的云底高度、云顶高度和云厚。具体算法为：选取第一个时刻的等效反射率因子数据，从最低距离库开始逐库向上判断，如果某个库及其上面连续 5 个库均有回波信号，并且等效反射率因子值全部大于对应高度的灵敏度，则认为该库所在高度为首层云云底高度，继续逐库向上判断，如果某个库回波信号有效，但其上面连续 5 个库都没有有效回波信号，则判定该距离库所在高度为首层云云顶高度。依据此方法继续逐库向上判断，依次识别第二、第三、第四层等云的云底高度和云顶高度参数。对后续每一时刻的等效反射率因子数据用同样方法进行判断直至结束，至少有一层云存在的时刻判定为有云时刻。

2.3 云参数日变化频域特征分析方法

通过对某一云参数日变化时域特征进行傅里叶分析，获得代表日平均值的直流分量和代表主要影响因素的主要谐波。具体方法为：将谐波按振幅由大到小排列，逐一加入拟合，当拟合优度不再明显上升，即认为主要谐波已参与了拟合。以有云频率 p 为例， p 为观测统计得到的有云频率，对 p 进行傅里叶分析，可以得到直流分量（日均有云频率） p_0 以及主要谐波 p' ， p 的回归方程可以表示为直流分量 p_0 与主要谐波 p' 的和，即 $p=p_0+p'$ 。

3 三类系统有云频率日变化的时域和频域特征

3.1 时域特征

图 2 (a) (b) (c) 分别给出了西风槽、切变线和低涡系统有云频率的日变化、日均有云频率（频域分析的直流分量）以及拟合函数曲线。每一小时有云频率定义为该小时半小时前至半小时后时间段内有云时刻所占百分比，利用 Ka 波段云雷达计算得到的三类系统影响下的有云时刻统计得到各天气系统有云频率日变化曲线，依次如图 2 (a) (b) (c) 中黑色线所示。西风槽有云频率日变化曲线为单峰单谷型，谷值出现在 8 时为 38%（本文所有时间均为当地地方时），峰值出现在 17 时为 74%。切变线有云频率日变化曲线也是单峰单谷型，谷值出现在 7 时为 30%，峰值出现在 17 时为 73%。低涡有云频率日变化曲线为多峰多谷型。8-20 时为有云频率较高的时间段，21 时-7 时是有云频率较低的时间段，在两段时间均包含多个峰值和谷值。最低谷值出现 7 时为 50%，最大峰值出现在 15 时为 88%，9 时和 19 时均出现接近最高值的峰。

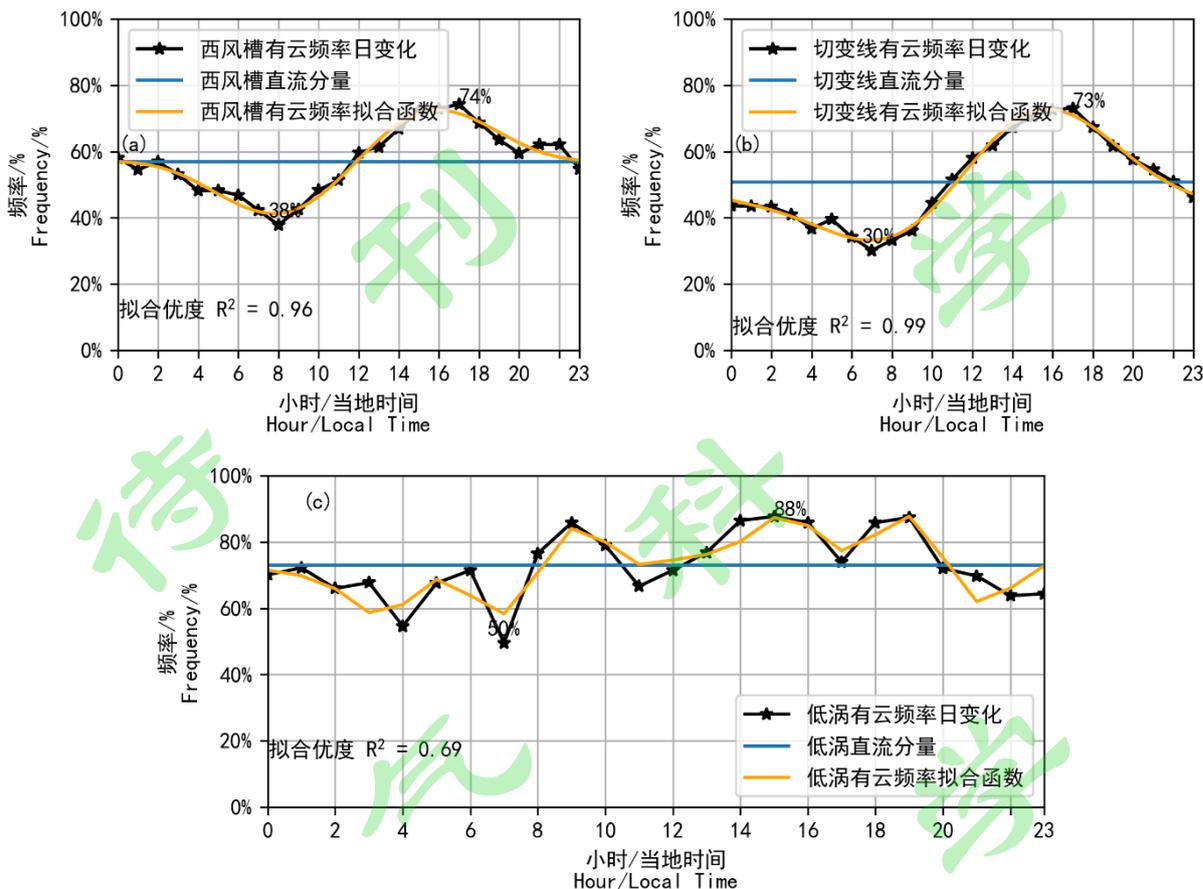


图 2 (a) 西风槽 (b) 切变线及 (c) 低涡系统有云频率日变化时域特征、直流分量及回归方程曲线

Figure 2 Diurnal variation characteristics, main harmonics and regression equation of cloud frequency of (a)westerly trough, (b)shear line and (c)vortex system

3. 2 频域特征

对三类系统有云频率日变化频域特征进行分析，直流分量和主要谐波振幅、初相位列在表 3 中，有云频率日变化回归方程（为方便分析，本文回归方程中频率单位使用 h^{-1} ）曲线及拟合优度依次列在图 2 (a) (b) (c) 中。西风槽系统日平均有云频率为 56.9%，主要受日变化和半日变化周期谐波调制，拟合优度是 0.96。切变线系统日平均有云频率为 50.8%，主要受日变化和半日变化周期谐波调制，拟合优度是 0.99。低涡系统日平均有云频率为 73%，受日变化周期谐波调制作用最大，但还受到其它 3 个周期谐波的调制，拟合优度是 0.69。

总之，通过对三类天气系统有云频率日变化的时域和频域分析可以看出，西风槽和切变线日变化特征相似，均为单峰单谷型，谷值出现在日出前，峰值出现在 17 时。主要谐波周期均为日变化和半日变化周期，利用日变化周期和半日变化周期的谐波拟合，就已经达到很高的拟合优度。而低涡系统日变化特征为多峰多谷型，包含 4 个主要谐波，其中调制作用最大的是日变化周期的谐波，即使采用四个谐波拟合，其拟合优度亦仅为 0.69。低涡系统的日均有云频

率远高于前两类天气系统，受谐波调制作用最小，切变线系统有云频率受谐波调制最大，西风槽系统次之。

表 3 西风槽、切变线及低涡系统有云频率傅里叶分析直流分量和主要谐波参数

Table 3 amplitude of DC component, main frequency parameters of Fourier decomposition and for diurnal variation of cloud frequency in westerly trough, shear line and vortex system

天气系统	西风槽	切变线	低涡
傅里叶分析参数			
直流分量振幅(%)	56.9	50.8	73.0
一次谐波振幅(%)	12.5	17.6	9.50
周期(小时)\初相位(rad)	24\1.60	24\1.89	24\2.30
二次谐波振幅(%)	5.50	5.40	--
周期(小时)\初相位(rad)	12\ -1.50	12\ -1.54	--
五次谐波振幅(%)	--	--	5.50
周期(小时)\初相位(rad)			4.8\0.074
三次谐波振幅(%)	--	--	4.00
周期(小时)\初相位(rad)			8\0.83
七次谐波振幅(%)	--	--	3.80
周期(小时)\初相位(rad)			3.4\2.75

4 三类系统单层云云顶高度、云底高度和云厚日变化的时域和频域特征

4.1 时域特征

研究过程中发现，三类系统基本以单层云为主，了解各系统单层云云底高度、云顶高度和云厚日变化特征十分必要。图 3 给出了西风槽、切变线和低涡系统单层云平均云顶高度（本文高度均为距地面高度）、平均云底高度、平均云厚及各参数离散度的日变化曲线。西风槽系统单层云云顶高度、云底高度和云厚日变化曲线是单峰单谷型，谷值基本出现在日出前，峰值出现在日落前，各参数离散度日变化不明显，均有相对较小的几小时。切变线系统的单层云云顶高度、云底高度和云厚日变化曲线也是单峰单谷型，谷值基本出现在日出前，峰值出现在日落前，各参数离散度日变化不明显，均有相对较小的几小时。谷值及其出现时间、峰值及其出现时间、离散度值及其较小的时间段与西风槽系统的不同。低涡系统单层云的云顶高度、云底高度、云厚日变化曲线与前两类系统完全不同，2-12 时云顶高度、云底高度相对较低，其余时

间段内相对较高，但两段时间内均具有多个峰谷值。4-11 时是云顶高度、云底高度离散度相对较小的时间段，其余时间离散度相对较高，但是两段时间内均存在多个峰谷值。云厚和云厚离散度呈多峰多谷型，不存在相对较高的时间段。云顶高度、云底高度和云厚的最大峰值均出现在 14 时。

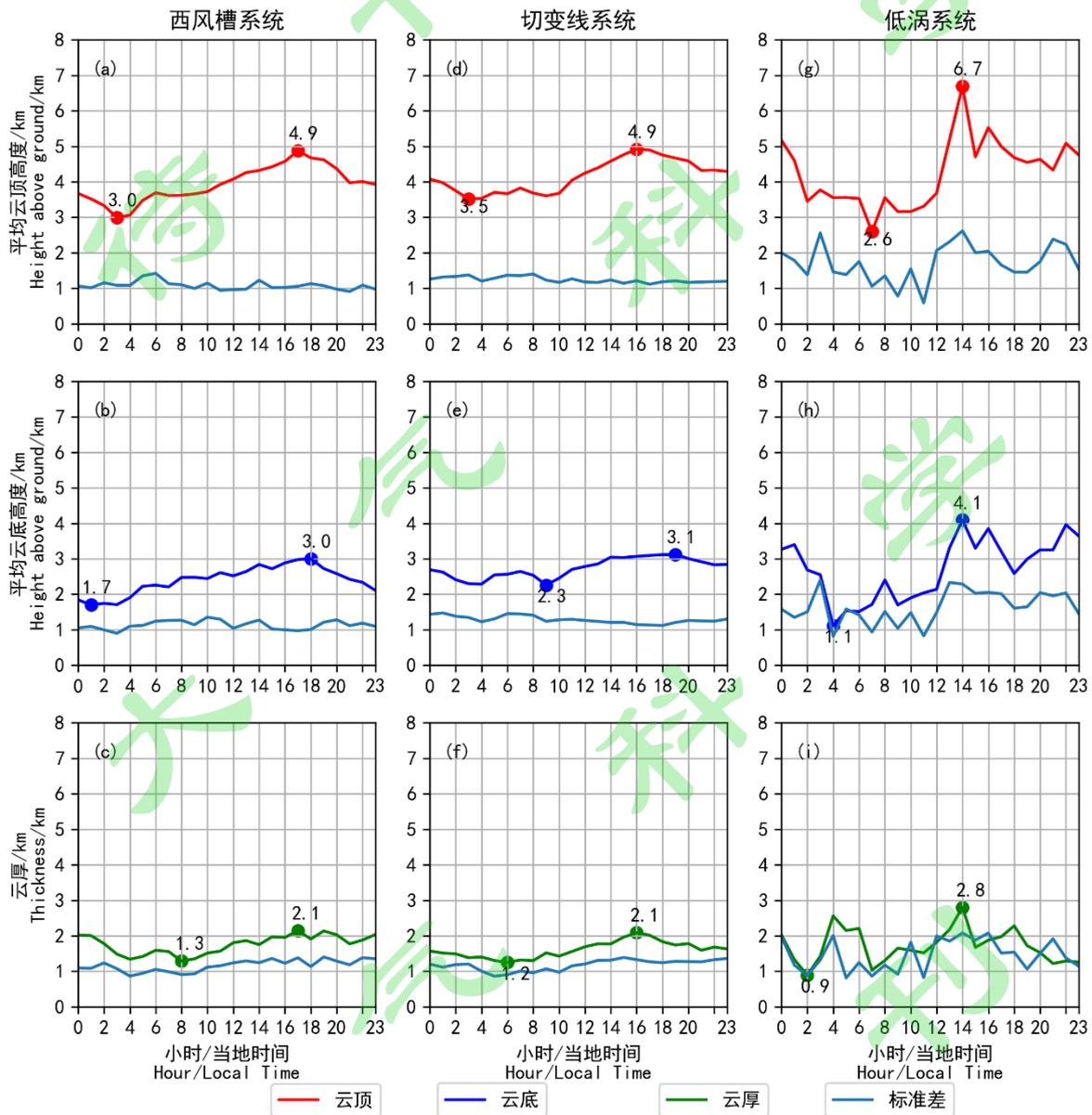


图 3 三类系统单层云云顶高度、云底高度、云厚及离散度的日变化

Figure 3 diurnal variation of cloud base height, cloud top height and cloud thickness in westerly trough, shear line and vortex system

4.2 频域特征

三类系统单层云云顶高度、云底高度、云厚日变化频域特征分析的直流分量和主要谐波参

数列在表 4 中，回归方程曲线及拟合优度依次如图 4 (a) (b) (c) 中所示。西风槽系统日均云顶高度是 3.841km，主要谐波周期包括日变化、半日变化、6 和 8 小时周期，拟合优度是 0.87。日均云底高度是 2.234km，主要谐波周期包含日变化和半日变化周期，拟合优度是 0.82。日均云厚是 1.554km，主要谐波周期包含日变化、6 和 8 小时周期，拟合优度是 0.55。切变线系统日均云顶高度是 4.074km，主要谐波周期包括日变化、8、6 小时和半日变化周期，拟合优度是 0.91。日均云底高度是 2.670km，主要谐波周期包括日变化、8、6 小时周期，拟合优度是 0.77。日均云厚是 1.348km，主要谐波周期包括日变化、半日变化、4、6、2.18 和 8 小时周期，拟合优度是 0.67。低涡系统日均云顶高度是 4.080km，主要谐波周期包括日变化、8 小时、半日变化、2、4.8、3、1.6 小时周期，拟合优度是 0.4。日均云底高度是 2.523km，主要谐波周期包括日变化、半日变化、8 小时周期，拟合优度是 0.34。日均云厚是 1.565km，主要谐波周期包括 4.8、6 小时、半日、1.14、日变化、1.7、2、1.4、8 小时周期，拟合优度是 0.28。

总之，日均云顶高度由高到低为低涡系统、切变线系统、西风槽系统，日平均云底高度由高到低依次为切变线系统、低涡系统、西风槽系统，日平均云厚由厚到薄依次为低涡系统、西风槽系统、切变线系统。由各系统云参数主要谐波数目可见，西风槽系统频谱分布最集中，低涡系统频谱分布最分散，切变线系统居中。各系统中云底高度频谱分布最集中，云厚频谱分布最分散。除低涡系统云厚振幅最大的谐波是 4.8 小时周期谐波，其它云参数日变化振幅最大谐波均为日变化周期谐波。

表 4 西风槽、切变线及低涡系统单层云云顶高度、云底高度、云厚傅里叶分析直流分量和主要谐波参数

Table 4 DC component , main frequency parameters of fourier decomposition of cloud top, cloud bottom

and thickness of single layer cloud of westerly trough, shear line and vortex system

天气系统		天气系统		
		西风槽	切变线	低涡
频谱参数	直流分量(km)	3.841	4.074	4.080
	主要谐波振幅(km)	0.751	0.679	0.849
	周期(小时)\初相位(rad)	24\1.825	24\1.522	24\1.137
		0.188	0.129	0.453
		12\2.445	8\0.578	8\0.625
		0.174	0.107	0.396
		6\ -0.890	6\ -0.552	12\ -1.224

		0.106	0.088	0.381
		8\0.303	12\ -2.81	2\ -1.674
				0.338
				4.8\0.135
				0.321
				3\1.744
				0.277
				1.6\ -0.217
云底高度	直流分量(km)	2.234	2.670	2.523
	主要谐波振幅(km)	0.697	0.488	0.773
	周期(小时)\初相位(rad)	24\2.190	24\1.553	24\1.139
		0.120	0.102	0.449
		12\2.693	8\1.604	12\ -0.552
			0.099	0.410
			6\ -0.553	8\0.255
云厚	直流分量(km)	1.554	1.348	1.565
	主要谐波振幅(km)	0.376	0.305	0.388
	周期(小时)\初相位(rad)	24\1.020	24\1.812	4.8\ -0.156
		0.157	0.092	0.276
		6\ -0.585	12\ -2.055	6\0.078
		0.111	0.086	0.243
		8\ -0.372	4\ -1.387	12\ -2.544
			0.067	0.224
			6\0.870	1.14\0.473
			0.056	0.222
			2.18\ -1.743	24\ -2.980
			0.054	0.218
			8\ -0.708	1.7\2.013
				0.218

2\ -1.671
 0.196
 1.4\ -2.29
 0.191
 8\ 2.300

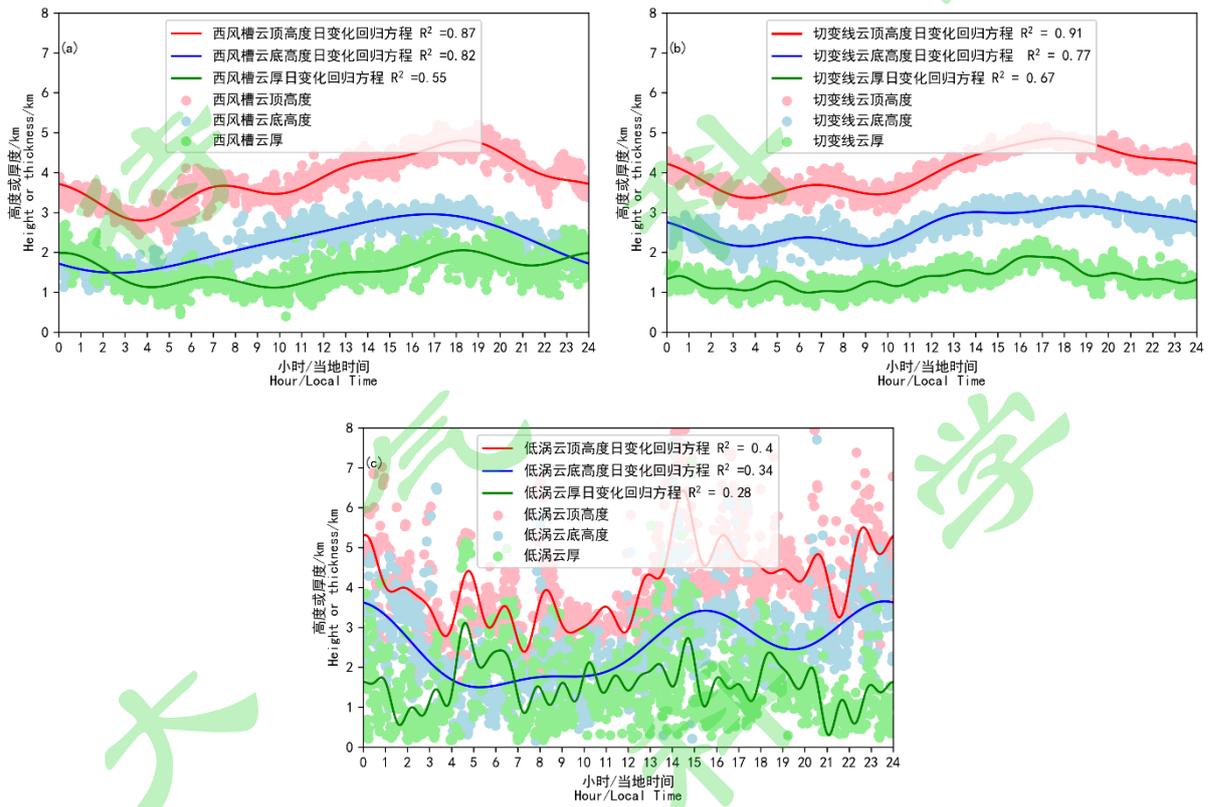


图 4 (a) 西风槽 (b) 切变线 (c) 低涡系统单层云云顶高度、云底高度、云厚日变化回归方程曲线

Figure 4 diurnal variation of cloud base height, cloud top height and cloud thickness of (a)westerly trough, (b)shear line and (c)vortex system

5 结论:

长期以来, 由于缺乏持续定量的观测手段, 对高原云宏观参数日变化的了解十分不足。APSOS 的 Ka 波段雷达是首部实现了对青藏高原云全年不间断观测的毫米波云雷达, 本文利用该资料首次揭示了青藏高原三类重要的天气系统(西风槽、切变线和低涡系统)的云宏观参数日变化的时域和频域特征, 并给出了统计回归方程。可为相关研究和应用人员了解青藏高原云宏观参数日变化, 改进模式模拟中的不确定性提供参考依据, 为云参数研究分析提供了一种新方法, 主要结论有:

- (1) 西风槽系统有云频率、单层云云顶高度、云底高度和云厚时域日变化趋势呈单峰单谷型,

谷值出现在日出前，峰值出现在日落前。有云频率、单层云云底高度日变化频谱中主要谐波周期为日变化和半日变化周期，单层云云顶高度频谱主要谐波周期是日变化、半日变化、6 和 8 小时周期，单层云云底高度频谱主要谐波周期是日变化和半日变化周期，单层云云厚主要谐波周期是日变化、6 和 8 小时周期；

- (2) 切变线系统有云频率、单层云云顶高度、云底高度和云厚日变化时域特征、频域特征与西风槽类似。时域日变化趋势也呈单峰单谷型，谷值出现在日出前，峰值出现在日落前，但峰谷值出现具体时间与西风槽系统不同。有云频率日变化频谱主要谐波周期是日变化和半日变化周期，单层云云顶高度频谱主要谐波周期是日变化、8、6 小时和半日变化周期、云底高度频谱主要谐波周期是日变化、8 和 6 小时周期，云厚频谱主要谐波周期是日变化、半日变化、4、6、2.2 和 8 小时周期；
- (3) 低涡系统的有云频率、单层云云顶高度、云底高度日变化的时域、频域特征与前两类系统完全不同，时域表现为多峰多谷型，虽然有云频率白天较夜间高，云顶高度、云底高度 12-2 时较 2-12 时高，但两段时间内包含多个峰值和谷值，并不单调。云厚日变化时域也是多峰多谷型，但不存在相对较高时间段。有云频率、单层云云顶高度、云底高度频谱中最大振幅的谐波周期也是日变化周期，但是频谱分布十分分散，云厚频谱谐波中振幅最大的谐波周期是 4.8 小时；
- (4) 根据主要谐波得到了三类系统有云频率、单层云云顶高度、云底高度和云厚日变化统计回归方程和拟合优度（方程中频率均使用 h^{-1} ，y 代表有云频率、T 代表云顶高度，B 代表云底高度，H 代表云厚，t 代表时间），总结在表 5 中，以便相关研究使用。

表 5 西风槽、切变线和低涡系统有云频率、单层云云顶高度、云底高度及云厚日变化回归方程和拟合优度

Table 5 The regression equation and goodness of fit of daily variation of cloud frequency, single-layer cloud top height, cloud bottom height and cloud thickness in westerly trough, shear line and vortex system

天气系统	西风槽	切变线	低涡
云参数			
有云频率	$y(t) = 0.569 + 0.125 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.6\right) + 0.055 \cos\left(\frac{\pi t}{6} - 1.501\right)$ $R^2=0.96$	$y(t) = 0.508 + 0.176 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.892\right) + 0.054 \cos\left(\frac{\pi t}{6} - 1.542\right)$ $R^2=0.99$	$y(t) = 0.73 + 0.095 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 2.3\right) + 0.055 \cos\left(\frac{5\pi t}{12} + 0.074\right) + 0.04 \cos\left(\frac{\pi t}{4} - 0.83\right) + 0.038 \cos\left(\frac{7\pi t}{12} + 2.75\right)$ $R^2=0.69$
云顶高度	$T(t) = 3.841 + 0.751 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.825\right) + 0.188 \cos\left(\frac{\pi t}{6} + 2.445\right) + 0.174 \cos\left(\frac{\pi t}{3} - 0.89\right) + 0.106 \cos\left(\frac{\pi t}{4} + 0.303\right)$ $R^2=0.87$	$T(t) = 4.074 + 0.679 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.522\right) + 0.129 \cos\left(\frac{\pi t}{4} + 0.578\right) + 0.107 \cos\left(\frac{\pi t}{3} - 0.552\right) + 0.088 \cos\left(\frac{\pi t}{6} - 2.81\right)$ $R^2=0.91$	$T(t) = 4.080 + 0.849 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.137\right) + 0.453 \cos\left(\frac{\pi t}{4} + 0.625\right) + 0.396 \cos\left(\frac{\pi t}{6} - 1.224\right) + 0.381 \cos(\pi t - 1.674) + 0.338 \cos\left(\frac{\pi t}{2.4} + 0.135\right) + 0.321 \cos\left(\frac{2\pi t}{3} + 1.744\right) + 0.277 \cos\left(\frac{5\pi t}{4} - 0.217\right)$ $R^2=0.40$
云底高度	$B(t) = 2.234 + 0.697 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 2.19\right) + 0.12 \cos\left(\frac{\pi t}{6} + 2.693\right)$ $R^2=0.82$	$B(t) = 2.670 + 0.488 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.553\right) + 0.102 \cos\left(\frac{\pi t}{4} + 1.604\right) + 0.099 \cos\left(\frac{\pi t}{3} - 0.553\right)$ $R^2=0.77$	$B(t) = 2.523 + 0.773 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.139\right) + 0.449 \cos\left(\frac{\pi t}{6} - 0.552\right) + 0.410 \cos\left(\frac{\pi t}{4} + 0.255\right)$ $R^2=0.34$

云厚

$$H(t) = 1.554 + 0.376 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.02\right)$$

$$+ 0.157 \cos\left(\frac{\pi t}{3} - 0.585\right)$$

$$+ 0.111 \cos\left(\frac{\pi t}{4} - 0.372\right)$$

$$R^2=0.55$$

$$H(t) = 1.348 + 0.305 \cos\left(\frac{\pi t}{12} + 1.812\right)$$

$$+ 0.092 \cos\left(\frac{\pi t}{6} - 2.055\right)$$

$$+ 0.086 \cos\left(\frac{\pi t}{2} - 1.387\right)$$

$$+ 0.067 \cos\left(\frac{\pi t}{3} + 0.870\right)$$

$$+ 0.056 \cos\left(\frac{2\pi t}{2.18} - 1.743\right)$$

$$+ 0.054 \cos\left(\frac{\pi t}{4} - 0.708\right)$$

$$R^2=0.67$$

$$H(t) = 1.565 + 0.388 \cos\left(\frac{5\pi t}{12} - 0.156\right)$$

$$+ 0.276 \cos\left(\frac{\pi t}{3} + 0.078\right)$$

$$+ 0.243 \cos\left(\frac{\pi t}{6} - 2.544\right)$$

$$+ 0.224 \cos\left(\frac{2\pi t}{1.14} + 0.473\right)$$

$$+ 0.222 \cos\left(\frac{\pi t}{12} - 2.98\right)$$

$$+ 0.218 \cos\left(\frac{2\pi t}{1.7} + 2.013\right)$$

$$+ 0.218 \cos(\pi t - 1.671)$$

$$+ 0.196 \cos\left(\frac{10\pi t}{7} - 2.29\right)$$

$$+ 0.191 \cos\left(\frac{\pi t}{4} + 2.3\right)$$

$$R^2=0.28$$

6 讨论:

本文的工作首次给出了由云雷达全年不间断定量观测的三类天气系统的云特征统计结果,初步统计揭示了云系移动变化过程中与太阳辐射、地表相互作用过程的相互关系,特别是日变化及其谐波过程的关系,有关的物理过程分析将是下一步的工作。

致谢:

本工作所用 APSOS 云雷达资料由 APSOS 全大气层观测站提供,部分作者是该系统的科技人员。在此感谢 APSOS 的宣越健正研级高级工程师对观测站的全方位贡献。博士研究生孙晓光、陈泽,硕士研究生刘博、赵薇、陈文琳等人也参与了观测工作。感谢南京恩瑞特实业有限公司的刘一峰高工,李小永工程师,高磊工程师等对 Ka 波段云雷达的技术支持。

参考文献:

- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present) [J]. Journal of Hydrometeorology, 4(6):1147-1167.
- Chan M A, Comiso J C. 2011. Cloud features detected by MODIS but not by CloudSat and CALIOP [J]. Geophysical Research Letters, 38:L24813.
- 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 [J]. 科学通报, 61(15):1706-1720.
- Chang Yi, Guo Xueliang. 2016. Diurnal variation

characteristics of convective cloud structure and raindrop distribution in summer Over Naqu of Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 61(15):1706-1720.

Houze R A Jr. 2014. Cloud Dynamics[M]. Oxford: Elsevier, 329pp.

蒋秋菲. 2019. 双频云雷达在青藏高原云参数观测的比较研究[D]. 成都信息工程大学硕士学位论文, 17pp. Jiang Qiufei. 2019. A comparative study of cloud parameters observed by two different frequency cloud radars over the Tibetan Plateau[D]. Master's thesis of Chengdu University of Information Engineering, 17pp.

李国平, 赵邦杰, 杨锦青. 2002. 地面感热对青藏高原低涡流场结构及发展的作用[J]. 大气科学, 26(4):519-525. Li Guoping, Zhao Bangjie, Yang Jinqing. 2002. A Dynamical Study of the Role of Surface Sensible Heating in the Structure and Intensification of the Tibetan Plateau Vortices[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 26(4):519-525.

李跃清, 郁淑华, 彭骏, 等. 2011. 青藏高原低涡切变线年鉴 2009[M]. 北京: 科学出版社, 300pp. Li Yueqing, Yu Shuhua, Peng Jun, et al.. 2001. 2009 yearbook of vortex and shear line over Tibetan Plateau[M]. Beijing: Science Press, 300pp.

李昉英, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析[J]. 气象学报, 61(6):733-743. Li Yunying, Yu Rucong, Xu Youping, et al.. 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 61(6):733-743.

刘黎平, 郑佳锋, 阮征, 等. 2015. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J]. 气象学报, 73(4):653-674. Liu Liping, Zheng Jiafeng, Ruan Zheng, et al.. 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):653-674.

Lu D R, Pan W L, Wang Y N. 2018. Atmospheric Profiling Synthetic Observation System in Tibet[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 35(3):264-267.

Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The Cloudsat mission and the A-Train[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 83(12):1771-1790.

汪宏七, 赵高祥. 1994. 云和辐射 (I): 云气候学和云的辐射作用[J]. 大气科学, 18(z1):910-932. Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. 1994. Cloud and Radiation—— I: Cloud

Climatology and Radiative Effects of Clouds[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 18(z1):910-932.

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, 35(6):1117-1131.

王胜杰, 何文英, 陈洪滨, 等. 2010. 利用 CloudSat 资料分析青藏高原、高原南坡及南亚季风区云高度的统计特征量[J]. 高原气象, 29(1):1-9. Wang Shengjie, He Wenying, Chen Hongbin, et al.. 2010. Using CloudSat data to analyze the statistical characteristics of cloud height over the Tibetan Plateau, the southern slope of the plateau and the South Asian monsoon region[J]. Plateau Meteorology, 29(1):1-9.

Wu G X, Liu Y M. 2003. Summertime quadruplet heating pattern in the subtropics and the associated atmospheric circulation[J]. Geophysical Research Letters, 30(5):5-1

吴国雄, 刘屹岷, 何编, 等. 2018. 青藏高原感热气泵影响亚洲夏季风的机制[J]. 大气科学, 42(3):488-504. Wu Guoxiong, Liu Yimin, He Bian, et al.. 2018. Review of the Impact of the Tibetan Plateau Sensible Heat Driven Air-Pump on the Asian Summer Monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 42(3):488-504.

叶笃正, 高由禧, 陈乾. 1977. 青藏高原及其紧邻地区夏季环流的若干特征[J]. 大气科学, 1(4):289-299. Ye Duzheng, Gao Youxi, Chen Qian. 1977. On some features of the summer atmospheric circulation over the Tsinghai-Tibetan plateau and its neighbourhood[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1(4):289-299.

叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 278pp. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. Meteorology of the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Science Press, 278pp.

宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 2014. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 72(5):948-968. Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al.. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(5):948-968.

张涛, 郑佳锋, 刘艳霞. 2019. 利用 Ka 波段云雷达研究青藏高原对流云和降水的垂直结构及

微观物理特征[J]. 红外与毫米波学报, 38(6):777-789. Zhang Tao, Zheng Jiafeng, Liu Yanxia. 2019. A study on the vertical structure and microphysical characteristic of convective cloud and precipitation over Tibetan Plateau by using Ka-band cloud radar[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 38(6):777-789.