

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]. Meteor Mon, 45(7):945-957(in Chinese).

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^{*}

朱怡杰^{1,2} 邱玉珺^{1,2} 陆春松^{1,2}

1 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044

2 南信信息工程大学,中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京 210044

提 要: 结合 2014 年 7—8 月第三次青藏高原大气科学试验获得的毫米波雷达资料与探空温度资料,利用模糊逻辑法反演了西藏那曲地区夏季云中水成物的相态并对其分布特征开展了研究。首先,分析了层积云、雨层云以及深对流云的典型个例,发现三类云反射率因子、多普勒速度、速度谱宽以及退偏振因子垂直分布均有较大差别,相应的云中水凝物的回波特征与相态分布差别也较大。其次,研究了液相、混合相和冰相云层的云雷达探测特征,发现液相云层在 0℃层以下的暖云层和 0℃层以上的过冷水云层均具有反射率因子高值中心,混合云层的反射率因子高值中心随高度上升变化不大,冰云层的反射率因子高值主要集中在 6 km 以上,且随高度上升而趋于集中;三种相态云层出现频率高值分别集中在地面以上 1、2~3、3~4 km 高度层;液相云层在上午出现频率最高,混合相云层高频率发生在下午,冰相云层在晚上的出现频率最高。三种相态云层出现在上午的高度与下午和晚上相比较低,出现在晚上的高度范围最大;液相云层厚度一般小于 0.3 km,冰相云层云顶位于 9 km 左右高度层时平均厚度最大,中云内的混合相和冰相厚度变化较小。

关键词: 青藏高原,那曲,Ka 波段云雷达,水成物,相态,模糊逻辑

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.005

Millimeter Wave Radar Observation of Hydrometeor Distribution Characteristics of Cloud in Summer in Nagqu, Qinghai-Tibet Plateau

ZHU Yijie^{1,2} QIU Yujun^{1,2} LU Chunsong^{1,2}

1 Department of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory for Aerosol-Cloud Precipitation of CMA, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Based on the millimeter-wave radar data and sounding temperature data obtained from the third Qinghai-Tibet Plateau Atmospheric Scientific Experiment during July—August 2014, this study inverses the phase of cloud hydrometeor in summer in Nagqu, Tibet with the fuzzy logic method and conducts analysis research on its distribution features. Firstly, the typical cases of stratocumulus, nimbostratus, and deep convective clouds are analyzed, and it is found that the vertical distribution of reflectance factor, Doppler velocity, velocity spectrum width and depolarization factor of the three types of clouds are quite different, and the characteristics of radar measurements and distribution of hydrometeor phase are also quite different. Secondly, radar reflectivity characteristics of liquid, mixed and ice clouds are studied, which shows that both warm clouds and supercooled water have high value centers of reflectivity factor.

^{*} 国家自然科学基金项目(41475035 和 41822504)共同资助

2018 年 7 月 15 日收稿; 2019 年 4 月 29 日收修定稿

第一作者:朱怡杰,主要从事云降水物理研究. Email:873496502@qq.com

通信作者:邱玉珺,主要从事大气气溶胶、云物理参量遥感反演研究. Email:qyj@nuist.edu.cn

The reflectivity distribution center of mixed clouds is invariable with height. The high reflectivity factor of ice cloud is mainly over 6 km and tends to concentrate with the increase of altitude. The high frequencies of the three phase clouds are concentrated at the heights of 1 km, 2–3 km and 3–4 km above the surface respectively. The frequency of liquid phase clouds is the highest in the morning, the frequency of mixed phase clouds is high in the afternoon and the frequency of ice phase clouds is the highest in the evening. The heights of three phase clouds in the morning are lower than that in the afternoon and evening, and the perpendicular range maximizes at night. The thickness of liquid phase clouds is generally less than 0.3 km, and the average thickness of ice phase clouds is the largest when the top of ice phase clouds is located at about 9 km height, while the thickness of mixed phase and ice phase in mid-level clouds varies only a little.

Key words: Nagqu, Qinghai-Tibet Plateau, Ka-band cloud radar, hydrometeor, phase, fuzzy logic

引 言

青藏高原是世界上海拔最高、地形最复杂的高原,它通过地形动力和热力作用影响其与附近地区以及东亚的大气环流、能量和水分循环(Wu et al, 2012; Bollasina and Benedict, 2004; 韦晋等, 2013; 徐士琦和李栋梁, 2016)。独特的地形使得周边大气强制性爬坡和绕流,因而高原上的云和降水物理过程不同于低海拔地区的情况(叶笃正, 1988)。青藏高原在夏季是一个强大的抬升热源,为大气输送了大量热量与水汽,配合高原独有的低涡、切变线和低频振荡,导致对流频发(周兵等, 2000; 刘云丰和李国平, 2016)。在高原产生的中小尺度天气系统从高原中部向东部移动并发展(师锐和何光碧, 2018),移出高原后常常在长江中下游地区造成暴雨灾害(赵艳风等, 2014)。此外,青藏高原上加热场、环流场具有显著的日变化(刘新等, 2006; 徐祥德等, 2014),云降水活动也随之产生变化(陈隆勋等, 1999; 周胜男等, 2015)。以上特征使青藏高原成为研究云微物理特征的天然试验场,开展相关工作对于了解气象因子与云的相互作用以及高原气候特征有着重要意义。

云中液态和冰相粒子的尺寸、形状和折射率不同,辐射特性差异巨大。云内水凝物的相态组成决定了云对地面的长波辐射强迫,同时影响着其生命周期以及降雨效率(Sun and Shine, 1994; Gayet et al, 2002)。确定不同相态粒子的分布特征对于设置数值模式的参数化方案以及减小气候预测模型的不确定性有着十分重要的作用。在利用卫星资料和数值模式分析云的特性与作用时,云相态的识别至关重要,因此近年来出现了许多关于云相态反演的研究。早期国外利用S波段双偏振雷达与飞机联合

探测混合相云的研究发现差分反射率因子(Z_{DR})、差分传播相移率(K_{DP})等雷达参量能有效地显示过冷水存在(Hudak et al, 2002; Wolde et al, 2003; Field et al, 2004)。Plummer et al(2010)在此基础上建立数据库,并提出了雷达反演过冷水概率分布算法。目前比较准确的云相态识别方法是联合激光雷达、毫米波云雷达以及其他被动遥感依据多种阈值进行判断(Intrieri et al, 2002; Shupe et al, 2005; Verlinde et al, 2013)。但是由于激光雷达衰减严重,对于光学厚度大的云往往只能依靠云雷达单独反演。Shupe et al(2004)提出根据毫米波雷达多普勒谱的双峰特征区分混合相云中的液态与固态粒子。Luke et al(2010)利用云雷达多普勒谱通过神经网络反演云的相态。国内也利用Ka波段、W波段云雷达进行云相态分类的研究(彭亮等, 2011; 王德旺等, 2015; 黄毅梅等, 2017)。尽管已有许多重要的研究成果,但是由于青藏高原的观测台站稀疏,地面观测资料相对缺乏,目前对青藏高原不同相态水成物的垂直结构分布特征还存在许多不确定性。

在2014年7月1日至8月31日开展的第三次青藏高原大气科学试验中,利用多种雷达探测系统与被动遥感技术开展了水汽、云和降水观测,获取了十分宝贵的外场试验资料。其中Ka波段毫米波雷达对相对较小的云粒子敏感,并且具有穿透云的能力,其可实现全天候、高分辨率探测,十分适合对不同种类云的探测。刘黎平等(2015)利用该雷达资料分析了青藏高原云的宏观特征,发现那曲地区夏季云主要集中在6 km(距地面高度)以上和4 km以下;总云量、高云的云顶、云量和云厚等云的统计参数有明显的日变化。常祎(2016)结合C波段连续波雷达、Ka波段毫米波云雷达研究了那曲地区夏季对流云结构,结果显示高原对流云平均云顶高度为

11.5 km 左右(海拔高度),最大云顶高超过 19 km;对流活动在上午较少,11 时由局地热对流发展,在 17—18 时达到最强。郑佳锋(2016)使用小粒子示踪的方法根据云雷达功率谱反演了青藏高原积云内大气垂直速度,研究表明该云雷达能够探测到微小的液滴,并且反演结果符合实际。汪会和郭学良(2018)结合雷达与卫星观测资料发现高原深对流云主要为冰相云,云内 10 km 以上(海拔高度)为丰富的小冰粒子,10 km 以下是较少的大冰晶粒子。唐洁等(2018)利用 WRF 模式以及地面观测资料进行数值模拟研究,结果显示冰相过程在高原云降水过程中具有十分重要的作用,对流云内含有较多的过冷水和霰粒子,地面降水主要由霰粒子融化产生。

以上研究主要关注了青藏高原云的宏观特征或个例分析,对于不同相态水成物的垂直结构分布特征方面的研究还需要进一步加强。本文利用模糊逻辑法对此次云雷达观测资料进行了不同相态水成物的分类,相关研究结果可为卫星反演结果的验证以及进一步了解高原云降水机理、改进参数化方案提供基础。

1 资料与方法

1.1 观测资料

资料来源于 2014 年 7 月 1 日至 8 月 31 日第三次青藏高原大气科学试验在西藏那曲站(31.4°N、92.0°E,4508.0 m)观测到的 Ka 波段云雷达和高空探测资料。其中,Ka 波段云雷达是双线偏振全相干 8 mm 波段测云雷达,以垂直方式进行全天探测,获取回波强度(Z_e)、径向速度(V_d)、速度谱宽(W_d)以及线性退偏振因子(L_{dr})数据。此雷达由中国气象科学院联合中国航天科工集团 23 所研制,系统应用了先进的信号相干积累、脉冲压缩等技术(郑佳锋,2016)。通过采用不同的脉冲宽度、相关和非相关积累,云雷达具有三种观测模式:边界层模式、卷云模式和降水观测模式,提高了对不同云类的探测能力。探测时三种模式轮流转换,数据分开储存,最后通过融合算法形成融合资料。雷达探测高度为 120 m~15 km,时间分辨率为 8.8 s,距离分辨率为 30 m。全固态硬件使雷达系统运行稳定,能获得长时间连续的探测资料。此外,本研究还使用了那曲站高空 L 波段观测获取的各高度层的气温数据,每日 07 和

19 时(北京时)各有一次观测。反演时选取与雷达观测时段较近的前后两次探空温度资料进行线性插值。

1.2 研究方法

本文主要采用 Shupe(2007)提出的一种适用于地基遥感探测的水凝物相态分类标准,将水凝物分为六类(雪、冰晶、混合相、液滴、毛毛雨、雨),结合云雷达数据和温度资料反演相态。当出现降水时,将回波强度 >5 dBz 的水凝物判断为降水粒子。 0°C 层以下径向速度 $>2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的格点被识别为雨。当温度(T)高于 0°C 时,利用反射率因子和多普勒速度区分液态水、毛毛雨和雨。当回波强度 <-17 dBz、径向速度 $<1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,将水凝物判断为液水;毛毛雨的反射率和速度介于液态水与雨之间。当 T 低于 0°C 时,引入速度谱宽来分辨冰水、液水和冰水混合相。谱宽较小时(速度谱宽 $<0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),说明云内为处于稳定状态的单一相态水凝物,回波强度 <5 dBz 则为冰粒子。谱宽较大时(速度谱宽 $>0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),混合相态的反射率因子和多普勒速度相比于过冷水较大。 0°C 以上只存在液相,所有温度低于 -40°C 的格点都判断为冰相。由于冰晶的形状为非球形,通常具有较大的线性退偏振因子。本文参照 Górsdorf and Handwerker(2006)的统计结果,引入退偏振因子阈值作为相态判断的标准之一。

由于雷达探测量对于不同水凝物不是唯一的,直接利用查找决定相态是不现实的(Liu and Chandrasekar,2000)。因此本文在 Shupe(2007)研究结果的基础上,采用模糊逻辑法对水凝物相态进行分类反演,具体步骤如下:

(1) 输入雷达反射率因子、多普勒速度、速度谱宽、退偏振因子以及温度廓线,选取梯形隶属度函数对参数进行模糊化:

$$P(x, X_1, X_2, X_3, X_4) = \begin{cases} 0 & x < X_1 \\ \frac{x - X_1}{X_2 - X_1} & X_1 \leq x < X_2 \\ 1 & X_2 \leq x < X_3 \\ \frac{X_4 - x}{X_4 - X_3} & X_3 \leq x < X_4 \\ 0 & x \geq X_4 \end{cases}$$

式中,隶属度函数(P)表示输入参量对于各相态的隶属程度,其值越接近 1 表示此相态为真实相态的

可能性越高, x 为输入的观测参量, $X_1 \sim X_4$ 表示隶属度函数的具体系数。表 1 列出了所有隶属度函数系数。令 $R_j = \sum_{i=1}^4 A_i P_{ij}$ 表示所有参数对第 j 类相态整体的隶属度, 式中 A_i 为第 i 类参数对 R_j 的权重系数, 本文采用 $A_i = 1, i = 1 \sim 5$ 分别表示参数 $Z_e, V_d, W_d, L_{dr}, T, j = 1 \sim 6$ 分别表示雪、冰晶、混合相、液滴、毛毛雨、雨 6 种相态。

(2) 使用最大隶属度对综合结果进行去模糊

化, 即选取 R_j 最大的那类相态作为反演结果输出。

为了得到更符合实际的结果, 本次研究对模糊逻辑法进行了改进, 在最大隶属度法退模糊的基础上加入几条规则: (1) 温度低于 -40°C 时只存在冰相, (2) 将降水过程中 0°C 高度以下回波强度 $> 5 \text{ dBz}$ 或径向速度 $> 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的格点判定为雨, (3) 对极少数退模糊失败的格点利用阈值分类法补充。由于研究范围仅限于那曲地区, 文中的云底、云顶等高度均设定为相对地面高度。

表 1 隶属度函数系数

Table 1 Membership function coefficient

参量	特征值	雪	冰晶	混合相	液滴	毛毛雨	雨
$P(Z_e)$	X_1/dBz	-5	-60	-40	-60	-25	-10
	X_2/dBz	0	-50	-17	-60	-17	5
	X_3/dBz	20	-10	5	-17	4	20
	X_4/dBz	25	0	10	-10	8	25
$P(V_d)$	$X_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	-0.5	-2	-2	-2	-2	-1
	$X_2/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0	-1	-0.5	-2	0.5	2.5
	$X_3/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.5	1	2	0.5	2	10
	$X_4/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	8	3	4	1.5	4	10
$P(W_d)$	$X_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0	0	0.1	0.1	0	0
	$X_2/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0	0	0.4	0.4	0.5	1
	$X_3/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	4	0.4	4	2	3	3
	$X_4/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	4	0.6	4	3	4	4
$P(L_{dr})$	X_1/dB	-35	-35	-30	-50	-50	-50
	X_2/dB	-28	-28	-28	-50	-50	-50
	X_3/dB	-10	-10	-10	-25	-25	-25
	X_4/dB	0	0	0	-20	-20	-20
$P(T)$	$X_1/^\circ\text{C}$	-100	-100	-40	-40	0	0
	$X_2/^\circ\text{C}$	-100	-100	-25	0	0	0
	$X_3/^\circ\text{C}$	0	-15	0	80	80	80
	$X_4/^\circ\text{C}$	0	0	0	80	80	80

2 结果与分析

2.1 相态分布个例

国际卫星云气候计划 (ISCCP) 项目将云的种类分为层云 (St)、层积云 (Sc)、雨层云 (Ns)、积云 (Cu)、高积云 (Ac)、高层云 (As)、卷云 (Ci)、卷层云 (Cs) 以及深对流云 (Dc) (Rossow and Schiffer, 1999)。相态分类结果表明, 青藏高原上空高云 (Ci、Cs) 与中云 (Ac、As) 出现频率较低且大部分为冰相 (梁萍等, 2010; 隆麟雪, 2016)。而低云 (St、Sc、Cu) 高度较低, As、Dc 垂直尺度大, 存在不同程度的冰相、液相、混合相云滴。因此本节选取这几种云的典型例子, 展示青藏高原不同类型云内部的相态分布

特征。

2.1.1 层积云

此次观测探测到的层积云多, 持续时间长, 云底高度多在 2 km 左右, 云体位于 0°C 层之上。图 1 为 2014 年 7 月 18 日 10:58—12:12 的降水性层积云, 云顶高度为 3~4 km, 云顶温度为 $-10 \sim -7^\circ\text{C}$ 。10:06 之前雷达探测到云的厚度约为 1 km, 反射率因子 $< -25 \text{ dBz}$, 径向速度 $< 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度谱宽只有 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 云内只存在冰相粒子 (图 1f)。随着云层增厚, 云顶增高并变得不平坦。反射率因子增大至 -15 dBz 以上, 速度谱宽 $> 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。径向速度分布均匀, 基本大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此时云内为混合相态, 除了部分降雪外, 云中还存有少量纯过冷水。云内冰晶通过贝吉龙过程 (Bergeron 过程)、淞附过程消耗过冷水滴增长使得下落速度不断增加

(图 1b)。云体下部显示出较高的退偏振因子(图 1d),对应着谱宽最大的区域,固态粒子下落速度快并与液相粒子充分混合,产生混合相降水,到达 0°C 层以下的暖区形成地面降雨。图 1e 为降雨过程中平均雷达反射率以及温度廓线,可以看出 0°C 层以下降水过程中平均反射率因子出现了迅速增大与减小过程,结合退偏振因子的突变,判断为 0°C 层亮带。在冰粒子融化期间表现出毛毛雨的雷达回波特征,因此将其归类为降雨。11:58 后云内过冷水减少,降水量也随之减小。

在那曲上空探测到的层积云多为冰相,云底高度为 1.5~2 km,云顶高度位于 3~4 km。图 2 列出了四例典型的层积云,层积云越厚,云底高度越低,其云内的混合相比比例越大,有降水的云内存在大量混合相态粒子。内部湍流较大的层积云(图 2c)过冷水的垂直分布较为均匀。此外反演结果显示,

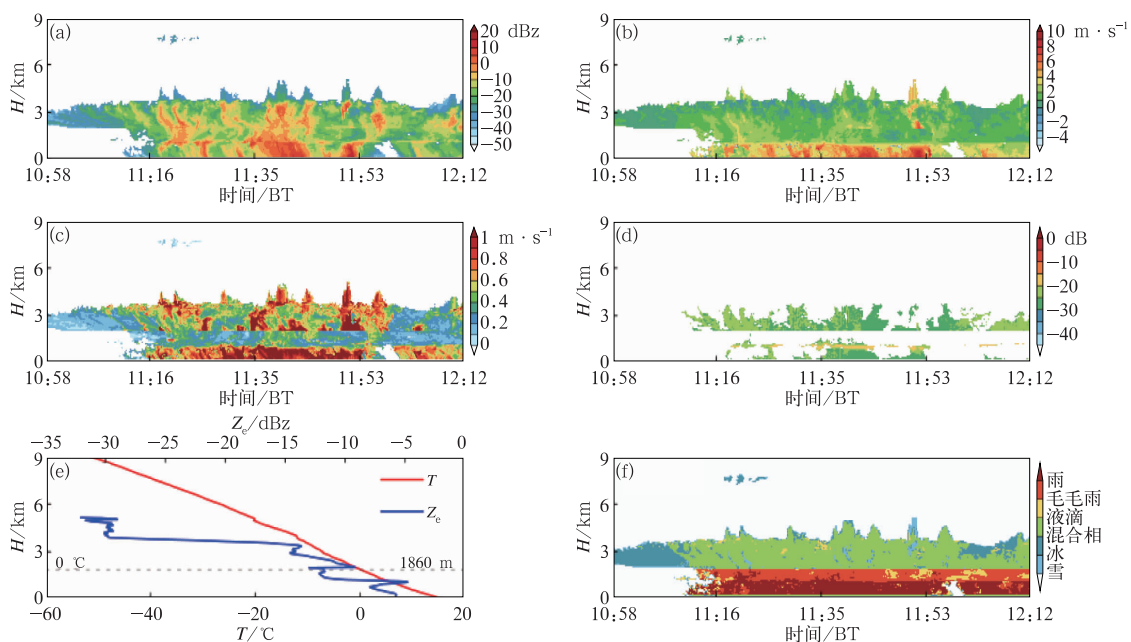


图 1 2014 年 7 月 18 日降水层积云个案

(a) Z_e , (b) V_d , (c) W_d , (d) L_{dr} ,

(e) 温度与反射率廓线, (f) 相态分类结果

Fig. 1 A case of stratocumulus in precipitation on 18 July 2014

(a) Z_e , (b) V_d , (c) W_d , (d) L_{dr} ,

(e) profiles of temperature and reflectivity, (f) phase classification

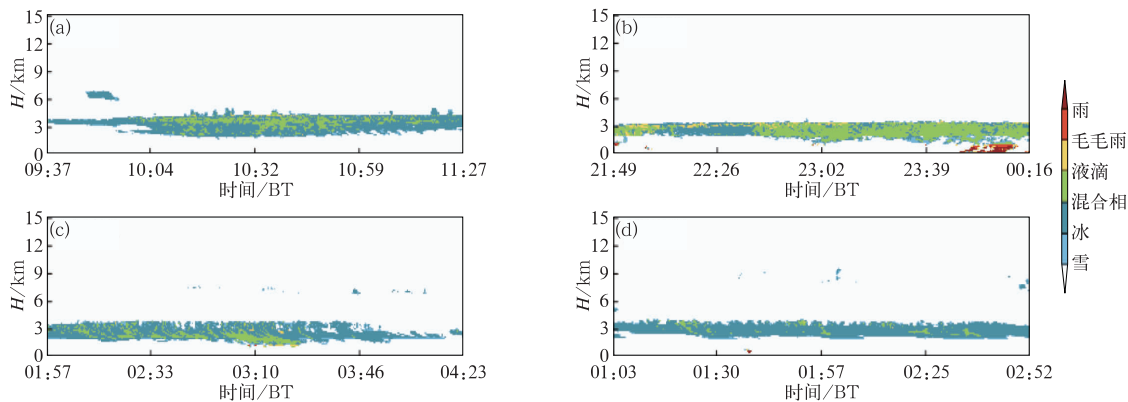


图 2 2014 年 7 月 11 日(a)和 23 日(b), 8 月 13 日(c)和 15 日(d)的混合相层积云个案

Fig. 2 Mixed phase stratocumulus on 11 (a) and 23 (b) July, 13 (c) and 15 (d) August 2014

层积云的云顶经常出现纯过冷水层。国外研究表明,这种存在于混合相层状云的现象可能与云内低浓度、小尺度冰晶以及适度的上升气流有关(Rauber and Tokay, 1991; Jiang et al, 2000; Shupe et al, 2006)。

2.1.2 雨层云

雨层云是高原上主要降水低云之一,通常是由空气大范围的缓慢抬升运动形成(Houze, 2014; 刘建军和陈葆德, 2017),云体均匀深厚,云内相态呈层状分布且十分稳定。图 3 为 2014 年 7 月 16 日探测到的雨层云, 23:30 前云顶在 7~8 km 处,云顶温度低于 -40°C 。雨层云顶部覆盖着小的冰晶粒子,以 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度下落增长,回波强度从云顶向下逐渐增强。3 km 以上速度谱宽 $<0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,退偏振因子在 -23 dB 左右,此高度以上云内基本为冰粒子,冰云层厚为 4 km。在雨层云底部 3 km 高度以下,温度高于 -9°C ,速度谱宽迅速增大至 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,说明存在下落速度不同的过冷水滴和冰晶。据统计雨层云底部混合相带厚度一般在 1~3 km,在一次降水过程中分布稳定无较大起伏。冰晶和雪花从混合相云层中下落,在 23:30 之前由于降水强度较高,没有产生反射率因子亮带,之后云层逐渐消散,出现明显亮带(图 3e)。此外,退偏振因子在整

个探测过程中始终表现出亮带特征,表明退偏振因子对粒子相态很敏感,更深入地研究其特性能够进一步提高相态识别的准确性。

2.1.3 深对流云

夏季的青藏高原是一个强对流活动区,深对流云出现频繁,导致深厚降水成为高原夏季主要降水形式。青藏高原的深对流云通常发展的很高,但强度不大(傅云飞等, 2016)。图 4 是 2014 年 7 月 5 日探测到的比较完整的一次深对流云发展过程。从温度廓线来看,云顶达到了 -75°C ,位于 12 km 的对流层顶,受到上方稳定气层的阻挡向水平方向发展形成云砧。从相态分类结果来看,在对流云内部只有位于云顶的薄冰层。18:10 之前反射率与退偏振因子都偏大,径向速度最高达到了 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,上升气流向上输送水汽,使得冰晶在云顶以下快速增长为雪花。在云的中下部出现了与上升气流相当的下沉气流,这是对流旺盛的标志。图 4e 的平均速度廓线符合降水粒子在上升气流中增大加速下落的过程。18:10 之后径向速度逐渐减小,速度谱宽降低至 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,对流中下部识别为混合相云粒子。云砧顶部与底部为冰晶层,至此对流降水过程基本结束。

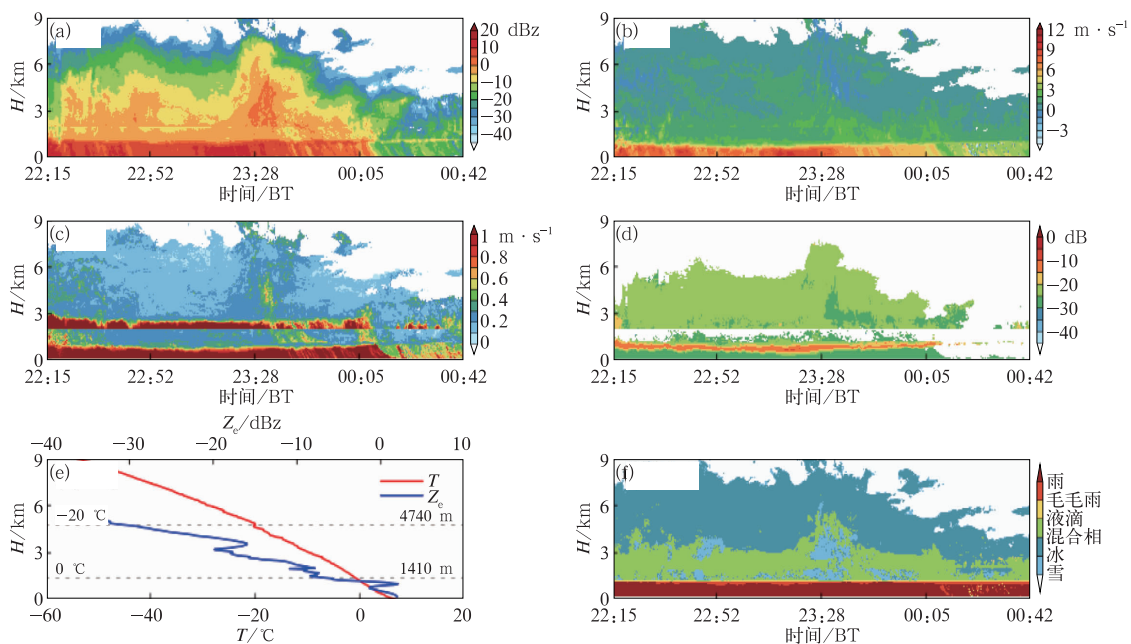


图 3 同图 1, 但为 2014 年 7 月 16 日

Fig. 3 Same as Fig. 1, but on 16 July 2014

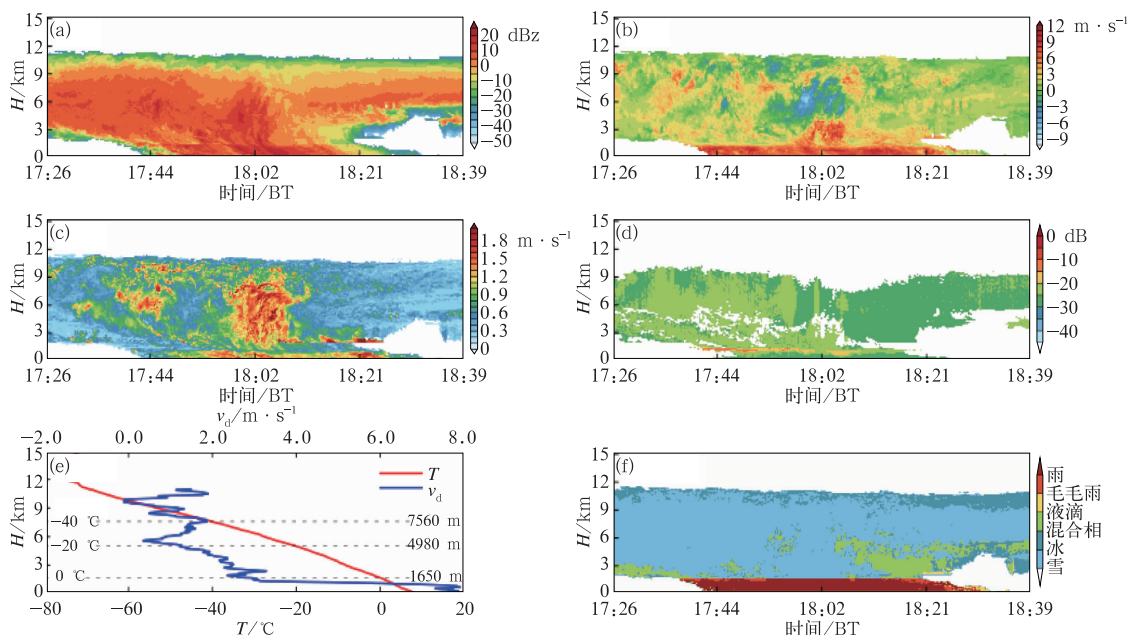


图 4 同图 1, 但为 2014 年 7 月 5 日, 且 (e) 为温度与径向速度廓线

Fig. 4 Same as Fig. 1, but on 5 July 2014, (e) profiles of temperature and radial velocity

2.2 不同相态统计特征

2.2.1 回波强度垂直分布

图 5 为三种相态云在不同高度层的回波强度频率分布。从图中可以看出:液相云层主要有两个分布中心,其中暖云层处于 0~1.5 km, 出现相对频繁。反射率因子集中在 -45~-20 dBz, 500 m 以下的暖云回波强度分布在 -45~-28 dBz, 随着高度增大频率高值中心向高反射率移动。到 1 km 左右为层积云下部暖区, 其液滴浓度与尺寸比层云的要大, 反射率达到 -35~-20 dBz。纯过冷水层则

分布在 2~3 km, 反射率主要在 -40~-25 dBz, 随高度增大集中在 -32 dBz。混合云层的反射率因子在低云范围内介于 -20~0 dBz, 在平均 0℃ 层高度以上 500 m 处达到最大频率且集中在 -7 dBz。此频率分布中心几乎不随高度发生变化, 这表明混合相的反射率因子分布是一个较为稳定的相态特征。冰云层在 0℃ 层以上分布较广, 在 2~9 km 分布相对均匀, 反射率因子 > -35 dBz。高反射率的冰相出现高度较低, 最高在 3 km 处能达到 -5 dBz。6 km 以上基本为中云、高云以及深对流云顶部冰晶层, 冰晶出现频率高且其反射率分布随高度增大而

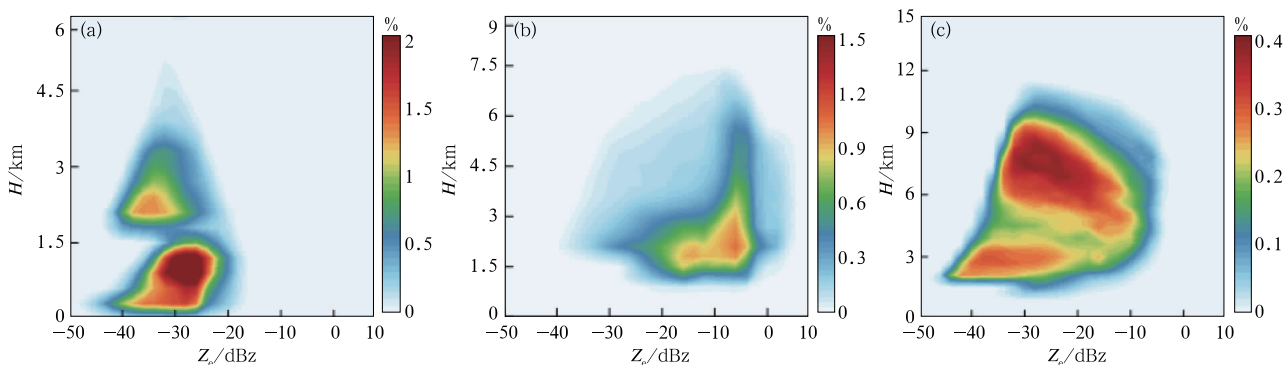


图 5 回波强度频率垂直分布特征

(a) 液相云, (b) 混合云, (c) 冰云

Fig. 5 Vertical distribution of frequency of radar reflectivity of clouds in three phases

(a) liquid cloud, (b) mixed phase cloud, (c) ice cloud

集中,高反射率的云逐渐减少,最终趋于 $-30\sim-20$ dBz。三种相态回波强度分别在 $0\sim1.5$ 、 $1.5\sim3$ km 以及 3 km 以上高度层有明显的分布中心,利用此特征对阈值进行分类可提高不同相态分类和相关反演的准确度。

2.2.2 出现频率垂直分布

图 6 统计了 7 和 8 月液相云层、混合云层、冰云层在不同高度层(相对地面高度)出现的频率。某一高度层内某一相态发生的频率定义为这个高度层内出现此相态的雷达廓线数与总雷达廓线数之比。总的来说液相云层频率随高度增大而降低,在 6 km 以上几乎没有液相云层存在。8 月液相云层在 1 km 高度以下出现的频率达到 26%,比 7 月高 6%,而 1 km 以上各高度层液相出现频率均有所减小。由观测资料统计,那曲夏季 0°C 层高度为 (1415 ± 325) m, 0°C 层以下水云出现频率达 32%。图 7 为相态温度分布以及累积频率分布,从图中可以看出,只有 35%的液相云出现于 0°C 层以上。值得注意的是,在 0°C 左右液水频率出现突变,这是因为一般混合

相或冰相粒子下落到此高度层具有较大速度,不适合液态水维持过冷状态。

混合相粒子于 $2\sim3$ km 层内出现最为频繁,总体频率高于 30%,在此高度上多为云底较高的低云。8 月 4 km 以下的混合相较 7 月有所增加,且在离地 1 km 高度以下出现冰晶粒子。5 km 以上混合相的出现频率随高度呈线性减少,但直到 9 km 处仍有少量过冷水以混合相态存在。2 km 以下云层主要以液相云存在,2 km 以上液态水主要存在于混合相云层。混合相与液相频率比值随高度增大迅速增大,这一比值在 8 月更高。混合相在 -5 和 -12°C 存在频率极大值,与过冷水整体的分布形态相似,这是因为液水以纯过冷水存在时不稳定,容易向混合相转化。混合相频率在 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 这段区域变化很小,在 $-15\sim-5^{\circ}\text{C}$ 下降较快。

冰晶在 $3\sim4$ km 的频率最高,超过 40%的时间段出现了冰相。7 月,冰云在 $8\sim9$ km 有一极大值,8 月则无此特征并且低层冰相粒子出现频率更高。9 km 以上冰相频率随高度迅速降低,最高能达到

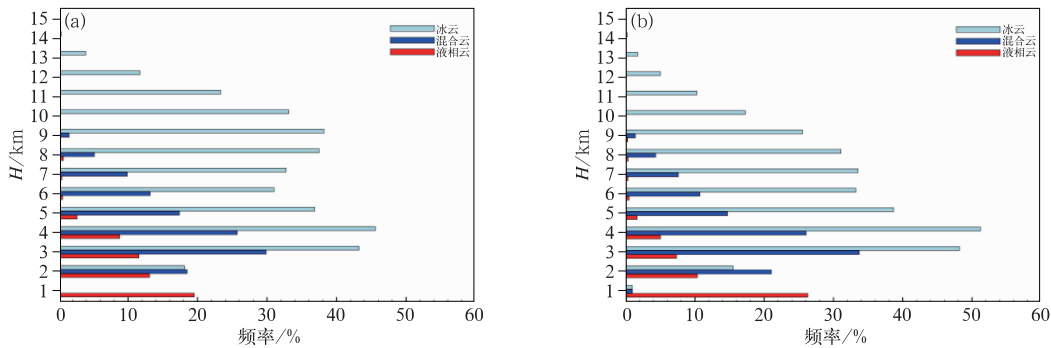


图 6 2014 年 7 月(a)和 8 月(b)三种相态云层出现频率垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of occurrence frequency of clouds in three phases in July (a) and August (b) 2014

14 km。在 $-15\sim-5^{\circ}\text{C}$ 冰晶出现频率有显著增加(图 7),26%的冰晶发生于此温度段。以上特征说明那曲地区夏季低云多、冰云比重大。总的来说,那曲地区夏季 1 km 以下的云为液态云,2 km 以下混合相发生频率比冰相高,3 km 以上冰晶所占比重较高。对比 7、8 月三种相态的高度频率分布可发现,8 月各相云粒子频率相比于 7 月均有 5 km 以下增大、5 km 以上减小的变化。由于平均温度廓线相差不大,造成这种差异的主要原因便是云出现高度的降低,这与高星星等(2017)研究得出的结论一致。

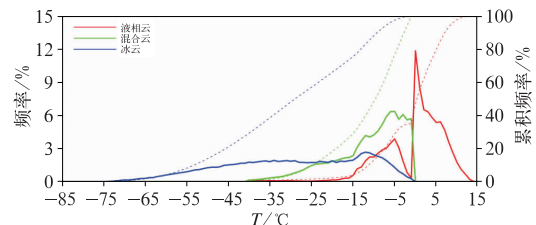


图 7 三种相态云层温度频率密度分布
(实线:频率密度,虚线:累积频率)

Fig. 7 Occurrence frequency of temperature in clouds in three phases

(solid lines: frequency density, dash lines: cumulative frequency)

图 8 分别为三种相态出现频率垂直分布与总分布的日变化。总体看来,液相云层出现频率为单峰分布,08—12 时最高,16 时之后较低,不同时刻起伏较大;混合云层与冰云变化相反,频率在 10 时之后迅速增高,14 时之后逐渐减少,22—23 时有一极大值;冰云层日变化明显,在 14 时出现频率最低,22 时达到最大值。从垂直分布来看,液相云层垂直分布较为均匀,在 04—12 时多集中在 1.5 km 以下,大多为暖云,而在 12—22 时暖云大幅减少,过冷水相对增多。混合云层在 13—17 时垂直分布范围广,在 1.5~6 km 内均有较高的发生频率,之后随着总体频率降低,3 km 以上的频率降低较快。20 时后低云中出现混合相的频率比白天更高,凌晨过后基本分布在 3 km 之下。08—14 时冰云层在高空内出现的频率不断降低,到中午仅集中于 1.5~3 km 的低云内,15—21 时主要分布在 5 km 以上,到 21 时之后垂直分布趋于均匀。结合三种相态云层频率日变化可以发现,那曲地区夏季上午以低云水成物为主,午后云滴垂直分布向高层发展,夜晚垂直发展最

为旺盛,9 km 以上的冰云频繁出现。

2.2.3 云层厚度垂直分布

图 9 为垂直方向云层总厚度的频率分布。液相云层厚度最高为 1 km 左右,总厚度大部分在 300 m 以下,前三层的频率分别为 31.3%、24.2% 和 18.3%,只有 12% 的液相云层厚度 > 500 m。混合云层的总厚度分布集中,500 m 以下的频次占 34%,而 500 m 至 1 km 的频率只有其一半,5 km 以上的各组频率均低于 1%。有 74% 的冰云厚度低于 3 km,随厚度增大频率逐渐减小,有 7% 的冰相总厚度在 5 km 以上。

图 10 展示了各相态云层厚度与云顶(云底)高度的关系,在计算厚度时将垂直距离小于 5 个库(150 m)的云层合并。由图 10a 和 d 可见,液相云层整体较薄,大多不超过 300 m。云顶在 1.5 km 以下以及处于 4.5 km 高度层的液云厚度较大。云底在 1.5 km 以上的过冷水云层极薄,平均厚度在 100 m 以内,在 4.5 km 以上整体厚度随高度不断降低。因为受 0℃ 层和对流层顶的限制,冰相与混合相云

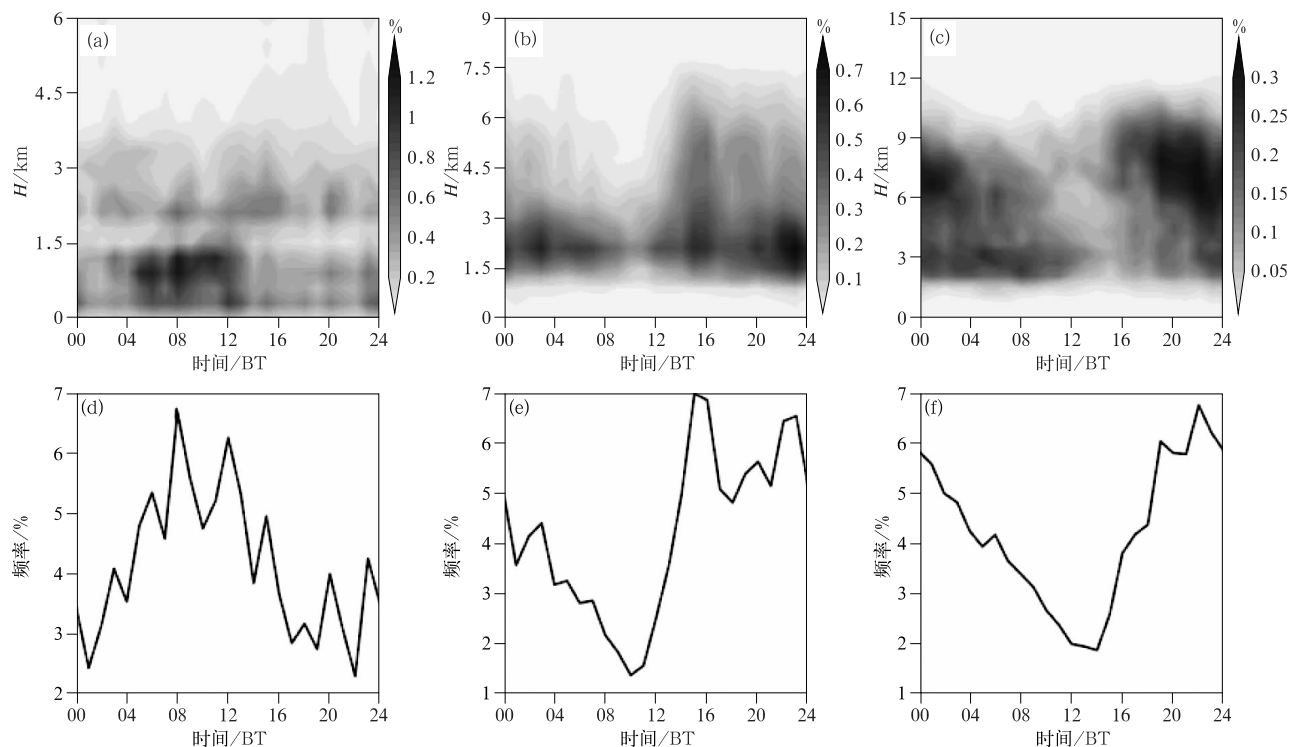


图 8 三种相态频率垂直分布(a,b,c)与频率分布(d,e,f)日变化

(a,d)液相云,(b,e)混合云,(c,f)冰云

Fig.8 Diurnal variations of vertical frequency distribution (a, b, c) and occurrence frequency (d, e, f) of clouds in three phases

(a, d) liquid cloud, (b, e) mixed phase cloud, (c, f) ice cloud

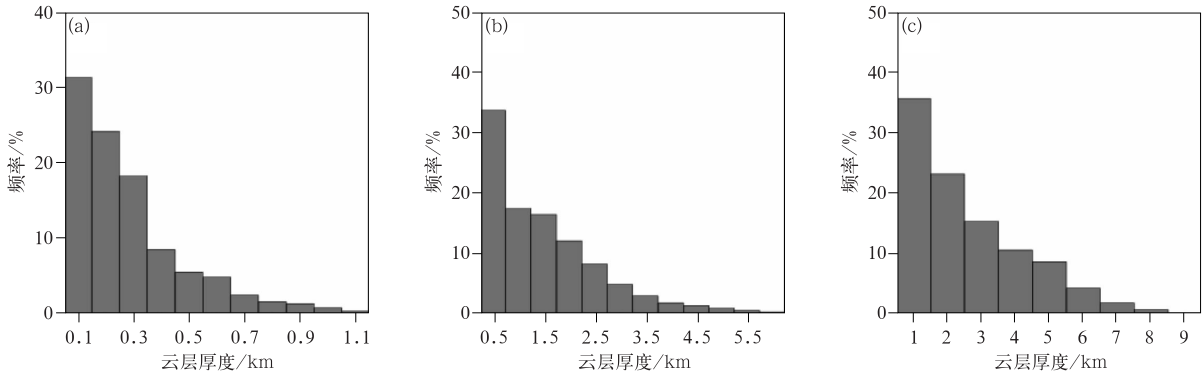


图 9 三种相态云层总厚度的频率分布
(a)液相云,(b)混合云,(c)冰云

Fig. 9 Distribution of frequency of total cloud thickness of three phases
(a) liquid cloud, (b) mixed phase cloud, (c) ice cloud

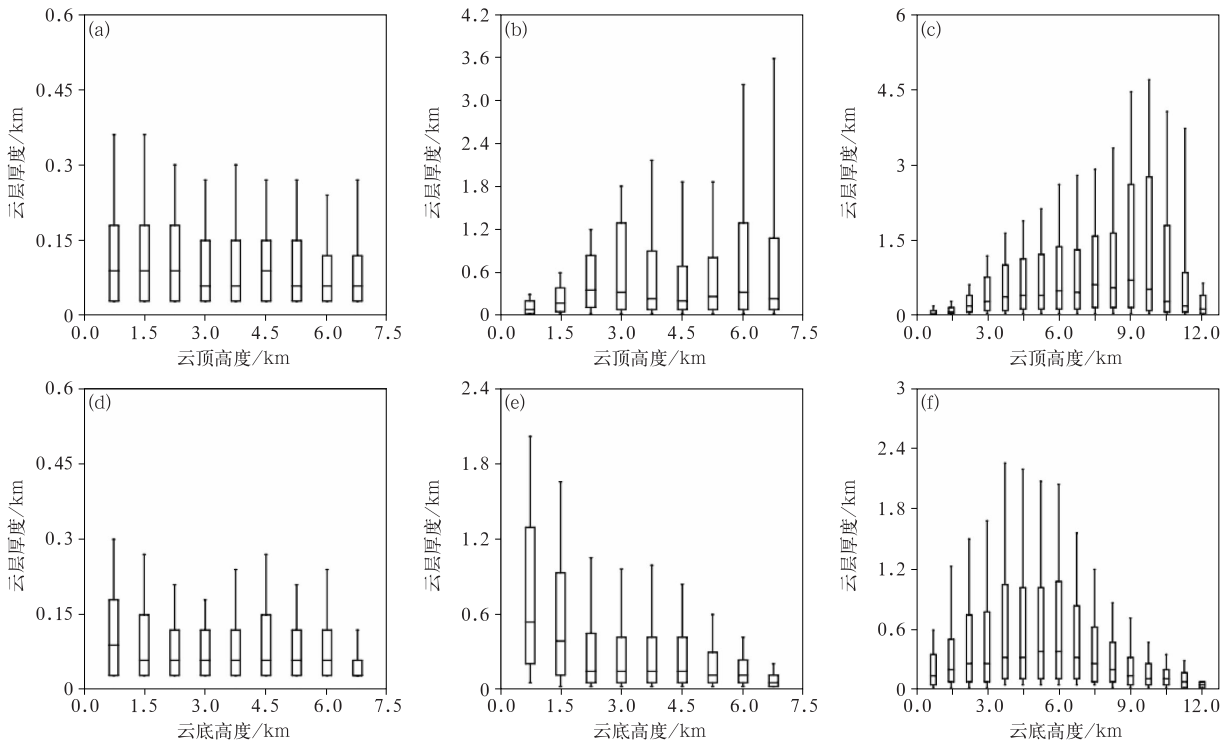


图 10 三种相态云层厚度与云顶高度(a,b,c)和云底高度(d,e,f)关系
(a,d)液相云,(b,e)混合云,(c,f)冰云

Fig. 10 Relationships between cloud thickness and cloud top height (a, b, c) and cloud base height (d, e, f) of three phases
(a, d) liquid cloud, (b, e) mixed phase cloud, (c, f) ice cloud

层厚度的上限与云顶高度呈正相关,与云底高度呈负相关。混合云层的平均厚度在云顶高度低于 3 km 随高度增大而增大,云顶高度位于 3.5~5 km 的云层厚度较小(图 10b)。云底高度低于 2 km 的混合云厚度集中的范围明显广于更高的云,且平均

厚度远超过其他高度的云,一般是强度较低的深对流云。冰云层相对较厚,少数能发展到 4 km 以上。冰云云顶高度越高,在最大厚度增大的同时厚度分布也变得分散(图 10c)。最大平均厚度对应云顶高度与最大厚度对应云顶高度都位于 9 km 处。云顶

在 10 km 之上时平均厚度迅速降低。云底高度在 4 km 以下的冰云层平均厚度随高度增大而增大,同时云底高度在 6 km 以上的冰云层平均厚度随高度增大而减少,在接近对流层顶处仍存在极薄的冰云。多数云中存在的 3~6 km 高度层内冰相与混合相层的厚度保持稳定。

3 结 论

本文结合 2014 年 7—8 月第三次青藏高原大气科学试验获得的毫米波雷达资料与探空温度资料,利用模糊逻辑法对西藏那曲地区夏季云中水成物的相态进行反演。首先通过层积云、雨层云以及深对流云的三个典型个例,分析了不同类型云中水凝物的回波特征与相态分布。然后对全部水成物进行了统计分析,得到以下主要结论:

(1) 层积云云底高度大多在 2 km,云层越厚,云内的混合相的比例越大,有降水的云内普遍为冰水混合相。雨层云云体深厚,云顶部覆盖着小冰晶粒子,云底部存在厚度小于 3 km 的均匀混合相带。深对流云发展得很高,但强度较低,对流内部只有位于云顶的较薄的冰云层,强烈的上升气流使得冰晶增长在 0℃层之上迅速形成降雪。

(2) 液相云层的反射率主要有 0~1.5 与 2~3 km 两个分布中心。冰相云层在 2~9 km 分布相对均匀,6 km 以上高反射率的云逐渐减少。混合云层的反射率因子在低云内分布集中,频率分布中心几乎不随高度而变化。不同相态水成物反射率因子分布中心以及高度分布特征有较为明显的区别。

(3) 液相云层、混合相云层、冰云层分别在 1、2~3、3~4 km 处出现频率最大。混合相温度频率分布与过冷水的分布形态类似,都在 -5℃时出现频率最大。冰云层在 -15~-5℃的频率有显著增加,这表明那曲地区夏季低云多、冰云频率高。那曲地区夏季上午以低云水成物为主,午后云滴垂直分布向高层发展,到夜晚垂直发展到最高。

(4) 大部分的液相层总厚度小于 300 m,云顶在 1.5 km 以下以及处在 4.5 km 高度层的液云厚度较大。1/3 的混合相云层的总厚度小于 500 m,云底高度低于 2 km 的混合相云厚度更大。7% 的冰相云层总厚度能达到 5 km 及以上,云顶在 9 km 左右高度处的冰云厚度达到最大,云底处于 3~6 km 高度的混合相层与冰相层的厚度变化较小。

参考文献

- 常伟,2016. 青藏高原那曲地区夏季云和降水特征分析[D]. 北京:中国气象科学研究院. Chang Y, 2016. Characteristics of convective clouds, precipitation and raindrop size distribution in summer season over Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).
- 陈隆勋,宋玉宽,刘骥平,等,1999. 从气象卫星资料揭示的青藏高原夏季对流云系的日变化[J]. 气象学报,57(5):549-560. Chen L X, Song Y K, Liu J P, et al, 1999. On the diurnal variation of convection over Qinghai-Xizang Plateau during summer as revealed from meteorological satellite data[J]. Acta Meteor Sin, 57(5):549-560(in Chinese).
- 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 Tibetan Plateau[J]. Chin J Atmos Sci, 40(1):102-120(in Chinese).
- 高星星,陈艳,张武,等,2017. 青藏高原云的气候特征及其对地气系统的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版),53(4):459-466, 480. Gao X X, Chen Y, Zhang W, et al, 2017. Climate Characteristics of clouds and their influence on the land-atmosphere system in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 53(4):459-466, 480(in Chinese).
- 黄毅梅,周毓莹,杨敏,2017. 利用 3mm 云雷达资料分析混合相垂直结构及过冷水分布[J]. 高原气象,36(1):219-228. Huang Y M, Zhou Y Q, Yang M, 2017. Using 3 mm cloud radar data to analyze frontal mixed cloud vertical structure and supercooled water[J]. Plateau Meteor, 36(1):219-228(in Chinese).
- 梁萍,陈葆德,汤绪,2010. 青藏高原云型的卫星遥感判别方法研究[J]. 高原气象,29(2):268-277. Liang P, Chen B D, Tang X. 2010. Identification of cloud types over Tibetan Plateau by satellite remote sensing[J]. Plateau Meteor, 29(2):268-277(in Chinese).
- 刘建军,陈葆德,2017. 基于 CloudSat 卫星资料的青藏高原云系发生频率及其结构[J]. 高原气象,36(3):632-642. Liu J J, Chen B D, 2017. Cloud occurrence frequency and structure over the Qinghai-Tibetan Plateau from CloudSat observation[J]. Plateau Meteor, 36(3):632-642(in Chinese).
- 刘黎平,郑佳锋,阮征,等,2015. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J]. 气象学报,73(4):635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al, 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):635-647(in Chinese).
- 刘新,吴国雄,李伟平,2006. 夏季青藏高原加热和环流场的日变化[J]. 地球科学进展,21(12):1273-1282. Liu X, Wu G X, Li W P, 2006. The diurnal variation of the atmospheric circulation and diabatic heating over the Tibetan Plateau[J]. Adv Earth Sci, 21(12):1273-1282(in Chinese).

- 刘云丰,李国平,2016. 夏季高原大气热源的气候特征以及与高原低涡生成的关系[J]. 大气科学,40(4):864-876. Liu Y F, Li G P, 2016. Climatic characteristics of atmospheric heat source over the Tibetan plateau and its possible relationship with the generation of the Tibetan Plateau vortex in the summer[J]. Chin J Atmos Sci,40(4):864-876(in Chinese).
- 隆璘雪,2016. 2007~2014 年青藏高原地区云的变化特征及其影响因素分析[D]. 云南:云南大学. Long L X,2016. Analysis of variation characteristics of cloud and influence factors over the Tibetan Plateau from 2007 to 2014[D]. Yunnan: Yunnan University(in Chinese).
- 彭亮,陈洪滨,李柏,2011. 模糊逻辑法在 3mm 云雷达反演云中水凝物粒子相态中的应用[J]. 遥感技术与应用,26(5):655-663. Peng L, Chen H B, Li B, 2011. An application of Fuzzy Logic Method to cloud hydrometeor classifications using the ARM WACR data[J]. Remote Sens Technol Appl,26(5):655-663(in Chinese).
- 师锐,何光碧,2018. 移出高原后长生命史高原低涡在不同移动路径下的大尺度环流特征及差异[J]. 气象,44(2):213-221. Shi R, He G B, 2018. Comparison analysis of circulation features of different moving tracks of long-life-cycle plateau vortexes moving out of the plateau[J]. Meteor Mon, 44(2):213-221(in Chinese).
- 唐洁,郭学良,常祎,2018. 青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征[J]. 大气科学,42(6):1327-1343. Tang J, Guo X L, Chang Y, 2018. Cloud microphysics and regional water budget of a summer precipitation process at Nagqu over the Tibetan Plateau[J]. Chin J Atmos Sci,42(6):1327-1343(in Chinese).
- 王德旺,刘黎平,宗蓉,等,2015. 基于模糊逻辑的大气云粒子相态反演和效果分析[J]. 气象,41(2):171-181. Wang D W, Liu L P, Zong R, et al, 2015. Fuzzy logic method in retrieval atmospheric cloud particle phases and effect analysis[J]. Meteor Mon, 41(2):171-181(in Chinese).
- 汪会,郭学良,2018. 青藏高原那曲地区一次深对流云垂直结构的多源卫星和地基雷达观测对比分析[J]. 气象学报,76(6):996-1013. Wang H, Guo X L, 2018. Comparative analyses of vertical structure of a deep convective cloud with multi-source satellite and ground-based radar observational data at Nagqu over the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor Sin, 76(6):996-1013(in Chinese).
- 韦晋,何金海,苏志重,等,2013. 青藏高原东南侧南风演变特征及其与中国东部春季降水的关系分析[J]. 气象,39(2):129-136. Wei J, He J H, Su Z Z, et al, 2013. Characteristics of south wind in east southern Tibetan Plateau and its relationship with eastern China spring rain[J]. Meteor Mon,39(2):129-136(in Chinese).
- 徐士琦,李栋梁,2016. 东北地区春季首场透雨的变化特征及与青藏高原地面加热场强度的关系[J]. 气象,42(3):271-279. Xu S Q, Li D L, 2016. Characteristics of the first soaking rain in North-east China and its response to surface heat source over the Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon,42(3):271-279(in Chinese).
- 徐祥德,王寅钧,赵天良,等,2014. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征[J]. 气象,40(10):1165-1173. Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al, 2014. Relationship between turbulent energy in the near-surface layer and atmospheric boundary layer thermodynamic structure over the southeastern side of Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon,40(10):1165-1173(in Chinese).
- 叶笃正,1988. 夏季青藏高原上空热力结构、对流活动和与之相关的大尺度环流现象[J]. 大气科学,12(S1):1-12. Ye D Z, 1988. The thermal structure and the convective activity over Qinghai-Tibetan Plateau in summer and their interactions with large-scale circulation[J]. Chin J Atmos Sci,12(S1):1-12(in Chinese).
- 赵艳凤,王东海,尹金方,2014. 基于 CloudSat 资料的青藏高原地区云微物理特征分析[J]. 热带气象学报,30(2):239-248. Zhao Y F, Wang D H, Yin J F, 2014. A study on cloud microphysical characteristics over the Tibetan Plateau using CloudSat data[J]. J Trop Meteor,30(2):239-248(in Chinese).
- 郑佳锋,2016. Ka 波段-多模式毫米波雷达功率谱数据处理方法及云内大气垂直速度反演研究[D]. 北京:中国气象科学研究院. Zheng J F, 2016. Doppler spectral data processing methods of Ka-band multi-mode mm-wave radar and air vertical speed retrieval in clouds[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).
- 周兵,何金海,徐海明,2000. 青藏高原气象要素场低频特征及其与夏季区域降水的关系[J]. 南京气象学院学报,23(1):93-100. Zhou B, He J H, Xu H M, 2000. LFO characteristics of meteorological elements over Tibetan Plateau and the relations with regional summer rainfall[J]. J Nanjing Inst Meteor, 23(1):93-100(in Chinese).
- 周胜男,罗亚丽,汪会,2015. 青藏高原、中国东部及北美副热带地区夏季降水系统发生频次的 TRMM 资料分析[J]. 气象,41(1):1-16. Zhou S N, Luo Y L, Wang H, 2015. Analysis of occurrence frequency of precipitation feature over Tibetan Plateau, East China and subtropical North America in boreal summer using TRMM data[J]. Meteor Mon,41(1):1-16(in Chinese).
- Bollasina M, Benedict S, 2004. The role of the Himalayas and the Tibetan Plateau within the Asian monsoon system[J]. Bull Amer Meteor Soc,85(7):1001-1004.
- Field P R, Hogan R J, Brown P R A, et al, 2004. Simultaneous radar and aircraft observations of mixed-phase cloud at the 100 m scale[J]. Quart J Roy Meteor Soc,130(600):1877-1904.
- Gayet J F, Asano S, Yamazaki A, et al, 2002. Two case studies of winter continental-type water and mixed-phase stratocumuli over the sea 1. Microphysical and optical properties[J]. J Geophys Res: Atmos,107(D21):4569.
- Görsdorf U, Handwerker J, 2006. A 36 GHz high sensitivity cloud radar for continuous measurements of cloud parameters-Experiences of 2-years operation and system intercomparison[C] // Seventh International Symposium on Tropospheric Profiling.
- Houze Jr R A, 2014. Nimbostratus and the separation of convective and stratiform precipitation[J]. International Geophysics, 104:

- 141-163.
- Hudak D, Currie B, Rodriguez P, et al, 2002. Cloud phase detection in winter stratiform clouds using polarimetric Doppler radar[C]// Proceedings of ERAD, Delft; National Research Council Canada; 90-94.
- Intrieri J M, Shupe M D, Uttal T, et al, 2002. An annual cycle of Arctic cloud characteristics observed by radar and lidar at SHEBA[J]. *J Geophys Res: Oceans*, 107(C10): 8030.
- Jiang H L, Cotton W R, Pinto J O, et al, 2000. Cloud resolving simulations of mixed-phase Arctic stratus observed during BASE: Sensitivity to concentration of ice crystals and large-scale heat and moisture advection[J]. *J Atmos Sci*, 57(13): 2105-2117.
- Liu H P, Chandrasekar V, 2000. Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements; development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 17(2): 140-164.
- Luke E P, Kollias P, Shupe M D, 2010. Detection of supercooled liquid in mixed-phase clouds using radar Doppler spectra[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 115(D19): D19201.
- Plummer D M, Göke S, Rauber R M, et al, 2010. Discrimination of mixed-versus ice-phase clouds using dual-polarization radar with application to detection of aircraft icing regions[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(5): 920-936.
- Rauber R M, Tokay A, 1991. An explanation for the existence of supercooled water at the top of cold clouds[J]. *J Atmos Sci*, 48(8): 1005-1023.
- Rossow W B, Schiffer R A, 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(11): 2261-2288.
- Shupe M D, 2007. A ground-based multisensor cloud phase classifier[J]. *Geophys Res Lett*, 34(22): L22809.
- Shupe M D, Kollias P, Matrosov S Y, et al, 2004. Deriving mixed-phase cloud properties from Doppler radar spectra[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 21(4): 660-670.
- Shupe M D, Matrosov S Y, Uttal T, 2006. Arctic mixed-phase cloud properties derived from surface-based sensors at SHEBA[J]. *J Atmos Sci*, 63(2): 697-711.
- Shupe M D, Uttal T, Matrosov S Y, 2005. Arctic cloud microphysics retrievals from surface-based remote sensors at SHEBA[J]. *J Appl Meteor*, 44(10): 1544-1562.
- Sun Z, Shine K P, 1994. Studies of the radiative properties of ice and mixed-phase clouds[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 120(515): 111-137.
- Verlinde J, Rambukkange M P, Clothiaux E E, et al, 2013. Arctic multilayered, mixed-phase cloud processes revealed in millimeter-wave cloud radar Doppler spectra[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 118(23): 13199-13213.
- Wolde M, Hudak D, Currie B, et al, 2003. Radar signatures of winter clouds from aircraft in-situ data and ground-based radar observations[C]// Preprints, 31st Conf on Radar Meteorology, Seattle: Amer Meteor Soc; 973-975.
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al, 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon[J]. *Scient Rep*, 2: 404.