

文章编号: 2096-1618(2018)03-0242-08

基于云雷达、C波段连续波雷达和激光云高仪融合数据的华南夏季云参数统计分析

崔延星^{1,2}, 刘黎平², 何建新¹, 吴 翀²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:单独利用云雷达研究云参数, 由于降水对毫米波雷达衰减影响, 反演误差较大。利用毫米波雷达、C波段连续波雷达和激光云高仪的融合数据, 可以减小降水对统计结果的影响, 较准确地确定云边界。云相态分类方法将云分为冰云、水云和混合云, 利用2016年5-8月的融合数据对广东龙门地区夏季云的云顶和云底高度、云厚、云量、云层数等特征的日变化进行初步统计分析, 对不同类型云的宏观特征进行讨论。反演3种云的云内液态水含量, 分析含水量的分布特征。研究结果表明: 龙门地区云顶高度、云厚、云量、云层数和不同高度上云的发生频次有较明显的日变化特征。广东龙门地区夏季的云顶高度主要集中在4 km以下和8 km以上, 5~6 km高度范围内云的发生频次较少。午后出现多层云的频率较高。混合云夏季出现的频率相对最低, 水云发生频率相对稳定。冰云发生频率和夏季总云发生频率变化趋势大致相同。夏季水云的积分液态水含量(*LWP*)相对变化幅度较小, 且总*LWP*和混合云*LWP*变化趋势基本保持一致, 当*LWP*较高时, 混合云为主要贡献。夏季混合云的平均*LWP*约是水云的2.5倍。

关键词:云雷达; 云特征参数; 液态水含量; 日变化

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.03.004

0 引言

云是最常见的天气现象之一, 覆盖地球上超过一半的地区。云是由大气中水汽凝结成的水滴、过冷水滴、冰晶或者它们混合构成的, 是大气水循环的重要组成部分, 是地球大气的能量、水分以及动量平衡的关键因素。因此对云和降水的探测及研究就显得尤为重要。目前探测云的方法主要有机载探测、微波辐射计、地面雷达观测和卫星反演, 激光云高仪及探空设备等。每种探测方法都有各自的优点, 但也存在缺陷。卫星扫描间隔时间长, 空间分辨率低; 天气雷达对回波较弱的云不敏感; 机载雷达、释放探空气球等只能探测空中某一点, 不能实现连续的时间和空间的探测; 激光雷达、激光云高仪等因为波长太短, 无法获取到云的内部结构。因此, 由于时间分辨率和空间分辨率较低, 这些手段无法穿透较厚的云层, 无法精确反映云系及其内部结构的连续演变过程, 不能观测到随时间变化的云微物理参数等信息^[1-2]。

利用毫米波云雷达可以连续观测不同动力条件下云的水平及垂直结构的变化, 获得准确的云内宏、微观

参数, 揭示各种天气形成的物理机制, 可以从中分析得到云的动力过程及云的微物理参数^[3]。

利用毫米波云雷达数据对云特征参数进行研究分析, 相关学者做了很多工作。秦宏德^[4]分析了青藏高原那曲地区对流云的统计特征和1979年夏季大气静力能量的垂直分布及与对流发展的关系。刘黎平等^[5]通过多普勒雷达观测的资料给出了那曲地区降水的日变化、不同雨量计测量降水的对比分析、多普勒雷达资料的个例分析及云的数值模拟等初步结果。李曦等^[6]利用毫米波雷达的功率谱数据估算层状云中的空气湍流谱宽值, 并反演层云微物理参数。仲凌志等^[7]使用中国自主研发的新一代毫米波云雷达并参考国外的研究成果完成对云的反演, 给出初步的反演结果。Zhao等^[8]用云雷达卷云模式观测情况统计了那曲地区的高冰云的微物理特性, 并反演冰水含量和云冰粒子的有效半径。Mace等^[9]利用毫米波谱数据反演卷云的微物理特性。Matrosov等^[10]提出一种利用云雷达的反射率和多普勒速度获取冰云微物理垂直结构的探测方法。Schmidt等^[11]利用云雷达分析高积云中对流云团的发展过程和趋势。樊雅文等^[12]利用南京信息工程大学的Ka波段毫米波雷达对广东阳江的一次测云个例进行研究, 结合回波强度的垂直廓线

初步分析了 6 类云型的宏微观特征。

尹金方^[13]利用 CloudSat 卫星观测结果统计分析东亚大陆降水云和非降水云的微物理垂直结构及季节变化。周毓荃等^[14]利用 FY2C 卫星和探空数据反演了云结构特征参数,并分析了云顶高度、云厚、有效粒子半径等云特征参数与降水的关系。林丹^[15]利用 MODIS 卫星资料对西南地区的水云云水含量和水云粒子有效半径进行分析。张晓等^[16]基于 CloudSat 卫星资料统计了青藏高原东部 2006–2010 年 6–8 月云垂直结构的空分布。可以看出,早期对云内特征参数的分析研究多是用卫星观测数据对云的垂直结构及微物理参数进行反演。但是卫星资料的分辨率相对较低,获取的云内垂直结构精度有限。虽有些采用地面雷达资料,但主要是对一次天气过程中的云内微物理结构进行分析,观测数据时间较少,缺少对一个地区进行日变化等的统计分析。

利用 2016 年 5–8 月的广东省龙门外场观测中多种探测仪器的观测资料,对 2016 年华南地区夏季云参数进行统计分析。利用 Ka 波段毫米波云雷达、C 波段连续波雷达以及激光云高仪的融合数据,根据当地每天两次的探空数据得到当日不同高度对应的温度,将云分为水云、混合云和冰云,统计 3 种云类型出现的频次分布以及对应的云底和云顶温度的概率分布,对华南夏季云内的云水、云冰以及总的云液态水含量进行反演,并着重对云及其液态水含量的日变化特征进行分析研究。

1 数据与分析方法

1.1 观测设备与数据

2016 年中国气象科学研究院在广东龙门开展云降水物理观测试验。此次外场试验进行同步观测的仪器包括 Ka 波段毫米波云雷达、C 波段调频连续波雷达、Ku 波段微雨雷达、微波辐射计、HSC-PS32 雨滴谱仪、Vaisala 激光云高仪等。为了对 2016 年华南地区夏季云参数进行统计,文中将利用毫米波雷达、连续波雷达和激光云高仪的融合数据,并联合微波辐射计及探空资料进行分析。

Ka 波段云雷达采用脉冲多普勒、全固态和线性极化的探测技术,以垂直探测方式获取云和弱降水的回波强度、径向速度、速度谱宽以及功率谱密度数据。C 波段连续波雷达采用调频连续波、全固态和单发单收的探测机制,以垂直观测方式探测降水云。激光云高仪是由芬兰公司 Vaisala 设计制造,探测对象是云和边

界层高度,垂直高度分辨率是 5 m,探测范围是 0~7.6 km。其中两部雷达的主要工作参数如表 1 所示。

表 1 Ka 波段云雷达和 C 波段连续波雷达主要参数		
指标名称	Ka 波段云雷达	C 波段连续波雷达
雷达体制	脉冲多普勒、单发双收、线性极化、全固态	脉冲多普勒、单发单收、全固态
工作频率	33.44 GHz±10 MHz	530 MHz±3 MHz
探测波长	8.6 mm	5.4 mm
探测目标	非降水云、弱降水云、毛毛雨	云和降水
探测范围	0.12~15 km	0.15~15 km
探测要素	回波强度、径向速度、速度谱宽、功率谱密度	回波强度、径向速度、速度谱宽、功率谱密度
垂直分辨率	30 m	30 m
时间分辨率	8.8 s	6 s
灵敏度/5 km	-38 dBZ	-32 dBZ

文中所用的数据是根据刘黎平等^[17]的方法融合而成的。Ka 波段毫米波云雷达对非降水云和弱降水云的探测效果较好。由于毫米波的波长较短,对云滴粒子的散射特性明显,能够穿透云层,探测到云体的内部垂直结构。激光云高仪在近地面高度对云的观测效果比较好。激光云高仪虽具有便携、实时观测云底高度等优点,但是受雾霾等天气影响严重,并且不容易穿透较厚的云层,观测多层云的效果十分有限。毫米波云雷达能够在高层云的观测中起关键作用,而 C 波段调频连续波雷达可以观测低层云、中层云及降水云。所以对三者观测设备的数据进行融合可以发挥各个探测设备自己的优点。

为提高云和降水的探测能力,毫米波云雷达采用了 3 种观测模式:边界层模式(CR1)、卷云模式(CR2)、降水模式(CR3)^[18]。边界层模式主要是利用探测分辨率很小的径向速度,对近地面的云进行观测。卷云模式对于回波较弱和范围较小的云具有较高的灵敏度,但是该模式不能观测到低于 2.1 km 高度的云和降水。降水模式则是通过降低分辨率对降水进行观测。在观测过程中,3 种模式交替进行。融合数据方法如下:

去除信噪比低于-12 dB 的云雷达数据、低于-24 dB 的 C 波段连续波雷达数据和两者差异较大的无效数据。把连续波雷达的反射率和速度数据以及云高仪的云底高度数据匹配到云雷达的时间高度的网格上,时间分辨率为 9 s,垂直高度上分辨率为 30 m。订正云雷达 CR1, CR2, CR3 模式的反射率差异,然后根据公式(1)对云雷达的反射率进行衰减订正,减少由于米散射和系统偏差造成的云雷达和连续波雷达的差异。

$$Z = -4.58 + 1.12Z_{Ka} + 0.008Z_{Ka}^2 \tag{1}$$

其中 Z_{KA} 是云雷达经过衰减和系统误差订正过后的反射率。

如果云雷达的 CR3 模式或连续波雷达的反射率大于云雷达的 CR1 或 CR2 模式的最大反射率,则认为此时的 CR1 模式和 CR2 模式下的数据无效。当毫米波云雷达和连续波雷达都为有效数据时,如果两者的反射率差值大于 2 dB,则选用反射率较大的数据减少衰减对融合数据的影响,否则就选用分辨率比较高的数据以保证融合数据的分辨率。

融合数据个例如图 1~5 所示。

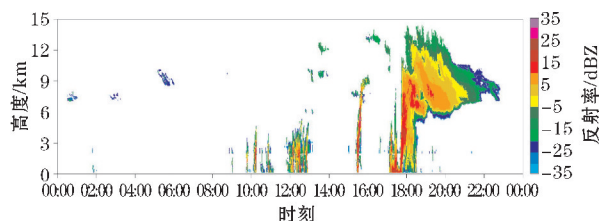


图1 2016年7月4日Ka波段毫米波云雷达反射率

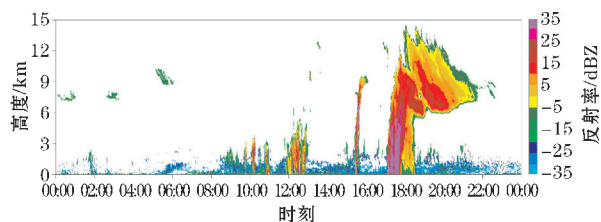


图2 2016年7月4日C波段连续波雷达反射率

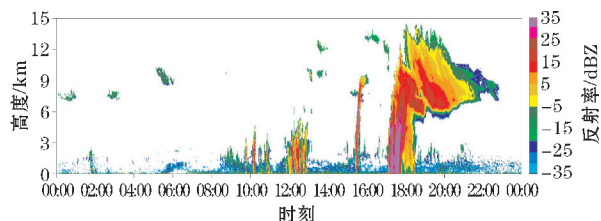


图3 2016年7月4日毫米波雷达与连续波雷达融合后的反射率

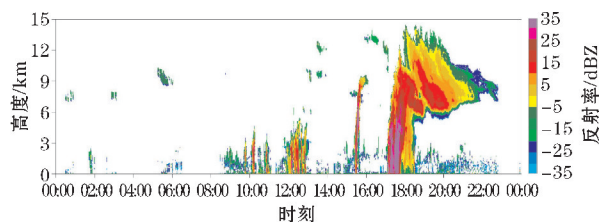


图4 2016年7月4日毫米波雷达、连续波雷达与激光云高仪融合数据反射率

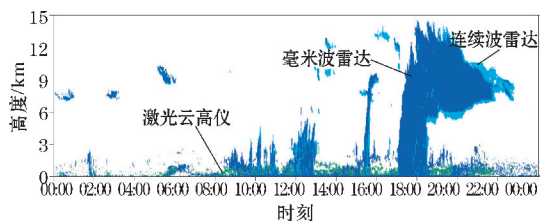


图5 三者融合数据的数据来源

1.2 云的分类方法

利用融合后的回波强度顶温度,参考 Zhao 等^[19],谢晓林等^[20],将云分成水云(暖云)、冰云(冷云)和混合云。Heng 等^[21]提出,云中液态水含量(LWC)和冰水含量(IWC)是描述云结构的关键变量。云的相态由云内温度决定,如果温度高于 0℃,这个云被认为是水云,而冰云的温度一般低于 -20℃,介于两者温度之间的是混合云。液态水部分随着温度的降低线性降低。但是此分类方法基于 CloudSat 云雷达,分辨率较低。Zhao 发现区分冰云、混合云和水云的温度范围为 $T < -16℃$, $0℃ \leq T \leq -16℃$,和 $T > 0℃$ 更加合理。

因此对于云雷达、C波段连续波雷达和激光云高仪的融合数据,利用每天两次的探空数据,计算各个时刻不同高度对应的温度。由于在一天之内,零度层高度变化不大,可以将每天探空的平均 0℃ 所在高度作为零度层高度。所以,当云顶温度分别为 $T < -16℃$ 、 $0℃ \leq T \leq -16℃$ 和 $T > 0℃$ 时,云中粒子分别为固态、液态与固态并存和液态。

利用融合数据进行云分类时,根据 Matthew D. Shupe^[22]基于地面传感器的云相态分类方法,建立云滴粒子、降水粒子和冰相粒子随回波强度和温度的分布模型。主要的分类步骤如下:

(1)以融合数据回波强度为基础,去掉近地面的干扰回波和噪声,以每条时间廓线为研究对象,逐一进行云类的识别,以给定的融合数据的回波顶为云顶,以融合数据的回波底为云底或雨底。将垂直方向上相连大于 1 km 的强度廓线视为一个云层;

(2)判断回波顶温度,将云分为 3 类,当此时的云顶温度高于 0℃ 为水云,云顶温度小于 0℃ 且云底温度大于 0℃ 为混合云,云底温度小于 0℃ 为冰云;

(3)判断云层是否产生降水时,认为一个时间廓线内距离地面高度 2 km 以内的回波强度 $Z > -15$ dBZ 的即产生降水。此时零度层顶至回波底,当 $Z > 5$ dBZ 认为回波信息来自于雨,当 $-15 \leq Z \leq 5$ dBZ 时,云和雨在回波信息中的比例中随着回波强度线性变化,当 $Z < -15$ dBZ 时,回波强度都来自于云;

(4)零度层顶至 -16℃ 所在高度,回波强度信息来自云滴粒子和冰相粒子,且云滴粒子和冰相粒子在回波强度中的比例随着温度线性变化。-16℃ 以上高度的回波信息全部来自冰相粒子。

1.3 云内含水量的反演方法

基于不同的探测设备可以反演云的各种特征参量,对于云雷达的融合数据来说可以由回波强度反演出云内的液态水含量、冰水含量、平均粒子的有效半径、降雨强度等。液态水含量(LWC)和冰水含量

(*IWC*)是重要的云微物理参数,单独使用雷达或微波辐射计来反演液态水含量都有其局限性,基于云的相态分类反演液态水含量和冰水含量,效果较好^[23]。

水云降水时,此时云顶温度高于零度层温度,回波强度信息来自云滴粒子和降水粒子;混合云降水时,此时云顶温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\leq T\leq-16\text{ }^{\circ}\text{C}$,云顶与零度层间的回波强度信息包含云滴粒子和冰相粒子,而零度层下的回波信息来自云滴粒子和降水粒子;冰云降水时,此时 $T<-16\text{ }^{\circ}\text{C}$,云顶与 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度间的回波强度信息全部来自冰相粒子, $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度与零度层间的回波信息来自云滴粒子和冰相粒子,零度层下为云滴粒子和降水粒子。

利用雷达反射率因子反演 *LWC*,*IWC* 和有效粒子半径 *Re* 的经验公式为

$$LWC = aZ_e^b$$
$$IWC = cZ_e^d$$
$$R_e = fZ_e^g$$

表2 不同的 *Z-LWC* 经验关系比较

作者	经验关系	观测对象
Atlas	$LWC = 4.564Z^{0.5}$	非降水云
Sauvageot	$LWC = 14.54Z^{0.76}$	非降水云
Baedi	$LWC = 0.457Z^{0.19}$	毛毛雨
Matrosov	$LWC = 2.4Z^{0.5}$	非降水云
刘黎平	$LWC = 0.1289Z^{0.559}$	小雨
Shupe	$LWC = 0.00116Z^{0.935}$	雨层云

表2给出几组常用的 *Z-LWC* 经验关系。对于上述经验关系,谢晓林评估了各个参数变化对于广东地区 *LWC* 廓线反演的影响。因此,当为非降水粒子时采用 Atlas 的经验关系,毛毛雨采用 Baedi 的经验关系,小雨采用刘黎平的经验关系。根据 Sauvageot 的研究,基于毫米波雷达的云反演云内 *LWC* 和 *IWC* 时,将 -15 dBZ 作为降水粒子和非降水粒子的界限, 5 dBZ 作为毛毛雨和小雨的界限,分别采用相应的经验关系^[24]。

由于云内温度 $T>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,云滴粒子为液态,当 $T<-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,即零度层以上高度云滴粒子中存在冰相粒子。以每日的探空温度的平均零摄氏度所在高度作为零度层所在高度,当 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\leq T\leq-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液态云滴粒子与冰相粒子共存,且液态云滴粒子与温度呈线性关系。此时的 *LWC* 为

$$LWC_2 = LWC_1 \times \frac{T - T_{-16\text{ }^{\circ}\text{C}}}{T_{0\text{ }^{\circ}\text{C}} - T_{-16\text{ }^{\circ}\text{C}}}$$

当 $T<-16\text{ }^{\circ}\text{C}$,云内全部为冰相粒子,此时 *LWC* 视为0。积分液态含水量 *LWP* 为反演得到的每个高度上的液态含水量 *LWC* 在垂直高度上的叠加,即:

$$LWP = \int LWC \cdot \Delta h$$

其中 Δh 为毫米波云雷达探测的垂直间距,垂直分辨率 30 m 。

对于混合云和冰云,云内存在冰相粒子,可由反射率因子反演冰水含量 *IWC*。表3给出了几组 *Z-IWC* 经验关系。

表3 不同的 *Z-IWC* 经验关系比较

作者	经验关系	观测对象
Atlas	$IWC = 0.064Z^{0.58}$	冰云
Brown and Francis	$IWC = 0.16Z^{0.66}$	热带冰云
Liu and Illingworth	$IWC = 0.097Z^{0.59}$	卷云
Mace	$IWC = 0.103Z^{0.576}$	卷云
Shupe	$IWC = aZ^{0.63}$; <i>a</i> 随时间变化	小雨
Protal	$IWC = 0.09Z^{0.58}$	全球冰云
	$IWC = 0.082Z^{0.54}$	中高纬度冰云
	$IWC = 0.103Z^{0.6}$	热带冰云

因广东位于低纬地区,采用 Protal 提出的 *Z-IWC* 经验关系来反演和统计冰水含量。

2 华南夏季云参数统计初步特征

2016年6~8月,云雷达、连续波雷达和云高仪等观测设备获取到了连续变化的云垂直结构数据,研究利用这一时段的雷达探测数据,分析统计云底、云厚、云层数和云垂直分布的日变化,并结合对于云的分类,对水云、混合云和冰云的参数进行统计分析。

为更直观展现云分类的结果,选取一天既有水云、混合云还有冰云发生的个例。此个例为2016年6月28日一天的融合数据回波强度图,从图6中可以看出从大约06:30-16:00(北京时,下同)产生对流云降水。在降水开始阶段是水云降水,云顶高度在4 km左右,最大回波强度23.6 dBZ。08-09时,在降水云上方6.5 km处,还有一层云厚小于2 km的积云。从09时开始对流变强,此时产生混合云降水,零度层高度大约在5.2 km高度,云顶高度可达10 km,最大回波强度可达30 dBZ以上,到16时以后,降水逐渐减弱。18-22时为冰云,云底高度9 km左右,云顶高度可达13 km,回波强度较小。

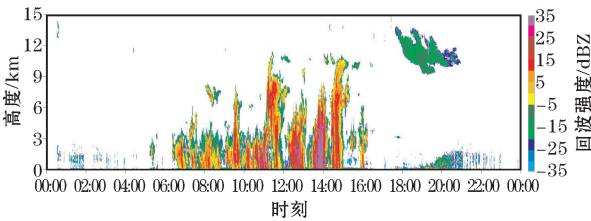


图6 2016年6月28日融合数据回波强度图

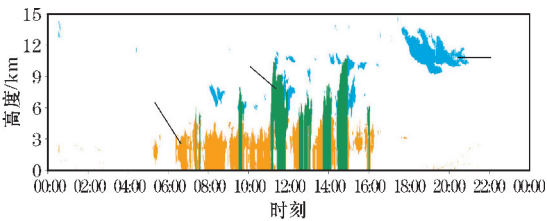


图 7 2016 年 6 月 28 日云相分类图

对于云雷达的探测数据,因云雷达底部干扰回波和噪声较多,对距离地面2 km以下高度的回波进行处理。去除掉近地面的杂波和噪声,然后利用上文提到的云分类方法,分别计算平均的云顶、云底高度、云厚和云层数等参量,并对反演得到的云内含水量进行统计。对该时间范围内云顶和云底高度进行了统计分析后得到日变化结果,从图 8 可以看出:龙门地区的云顶高度主要集中在4 km以下高度(低云)和8 km以上高度(高云),云底主要分布于3 km以下和4 km以上高度,7-12 时云的发生频次较少。5~6 km高度范围内的云顶和云底较少。云顶高度有比较明显的日变化,一天中,00-07 时云顶高度主要在6 km以上高度,07-12时云顶高达到最低并集中在 2~4 km,12 时以后高云明显增多,云顶高度多在8 km以上,并最高可达12 km。最高云顶在 10 时后迅速增加,20 时后逐渐减少。进一步分析发现,当 07-12 时低云多为层积云或雨层云,12 时后的高云多为深对流云或者是高积云。在图 8 中,能够看到在2.1 km高度处云底分布比较多,主要原因是毫米波云雷达的 3 种观测模式,在 2.1 km上灵敏度较高。

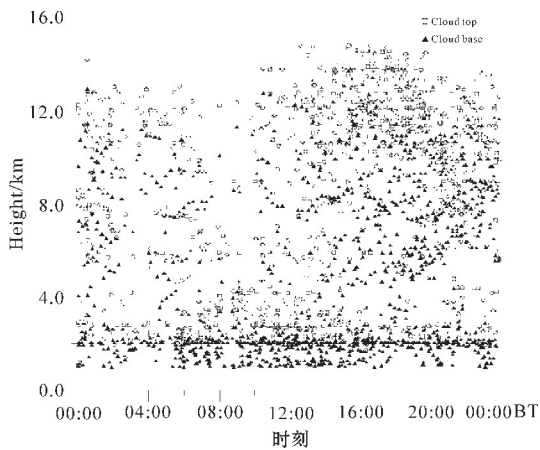


图 8 2016 年 6 月 19 日-8 月 21 日云顶和云底高度的日变化

为更直观分析一天云层厚度的变化,将云厚定义为:云顶和云底高度的差,对于同一时刻多层云的云厚进行叠加,并对 1 小时内的云厚按照1 km间隔进行分类统计,得到不同云厚所占比例的日变化(图 9)。可以看出,云厚在2 km以下的比例最高,大约占该时刻总云厚的30%以上,6 km以上厚度的云发生的频率在

10%以下。中高厚度的云的日变化比较明显,超过 4 km以上厚度的云发生的频率从 06-12 时急剧增加,12-14 时的云厚略有减小,14 时后云厚继续增加,在 18 时云层厚度整体达到最大,18 时后云厚迅速减小,到夜间云厚在8 km以上的频率最小。3 km以下云厚日变化不明显,夜间 20 时至次日上午 10 时的浅薄云厚的频率较其他时刻稍高。

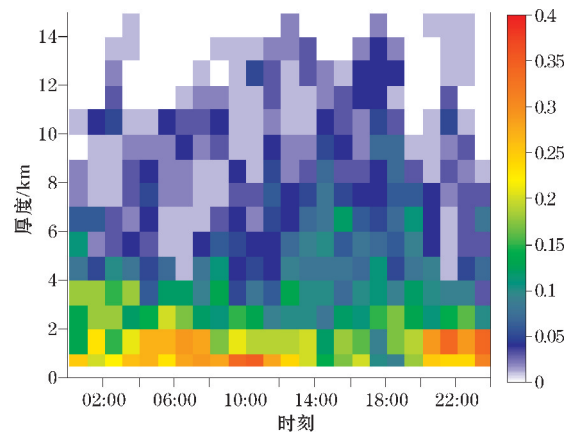


图 9 2016 年 6 月 19 日-8 月 21 日云厚度的日变化

为了解不同高度上云的分布情况,对不同高度上云发生频次的日变化进行统计,不同高度上云发生的频次定义为该时刻有云的廓线数与总的雷达廓线数之比。如图 10 所示为时间间隔 1 小时,高度1 km内的不同高度云频次的日变化。华南地区云主要分布在 12 km高度以下,云的分布日变化明显。06-12 时,从刚开始的低云逐渐发展为低云、中云和高云并存。在 06-20 时4 km高度以下云发生频率比较高可达40%以上。16-20 时有明显的多层云,8 km高度以上高层云出现频率在30%左右,且云高最高可达13 km。夜间云发生频次比白天低,出现云的频率在20%以下。

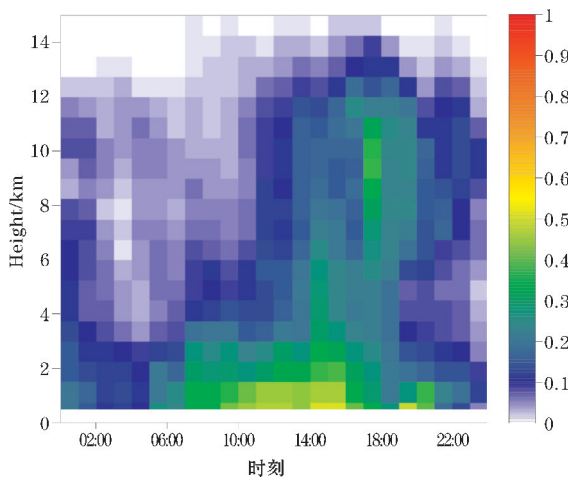


图 10 2016 年 6 月 19 日-8 月 21 日不同高度上云发生频次的日变化

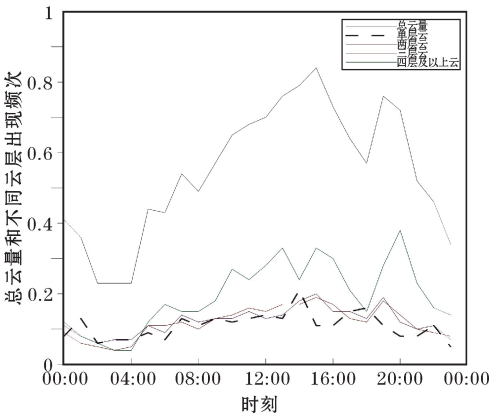


图 11 总云量和不同云层发生频次的日变化

利用云雷达的数据进行统计,得到总云量、单层云、两层云、三层云和四层云及以上相对发生的频次的日变化(图 11),发现夏季广东龙门地区云总量日变化趋势明显,在上午 4–15 时,云量处于增加趋势,并在 15 时达到最大值 0.8,而且在 20 时后云量迅速减少达到 0.3 左右。并且在总云量中,四层云及以上发生频次占比最高,且变化趋势同总云量大体相同。单层云、两层云和三层云所占比例接近,发生频次在 0.1~0.2,且变化幅度较小。

利用观测期间的数据,由上文的云分类方法,分别统计每日的总云、水云、混合云和冰云的发生频率。总云发生的频率定义为一天内有云覆盖的时间廓线占总的雷达观测的廓线数的比例,水云、混合云和冰云同理。其中,总云包括水云、混合云和冰云。考虑到多层云的状况,同一时刻可能会存在多种云存在。如图 12 所示,在 2016 年夏季观测期间,除了 7 月 23–28 日云量较少外,总云出现的频率多在 40% 以上。水云、混合云和冰云中,混合云出现的频率相对最低,混合云的日平均出现频率约为 12%,在 7 月 10–11 日,8 月 1 日混合云出现频率明显升高,期间产生混合层云降水。水云发生频率相对稳定,多集中在 20%~30%。当总云出现频率高于 60% 时,此时冰云出现频率较高,冰云发生频率和总云发生频率变化趋势大致相同。

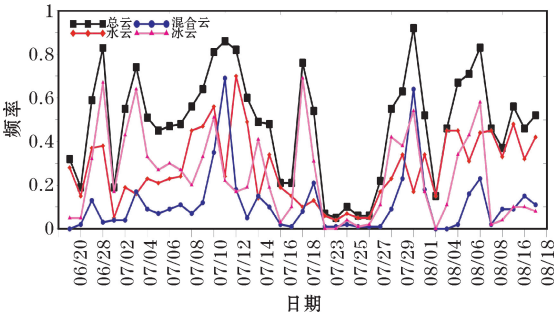


图 12 2016 年 6 月 19 日–8 月 21 日总云、水云、混合云和冰云出现频率

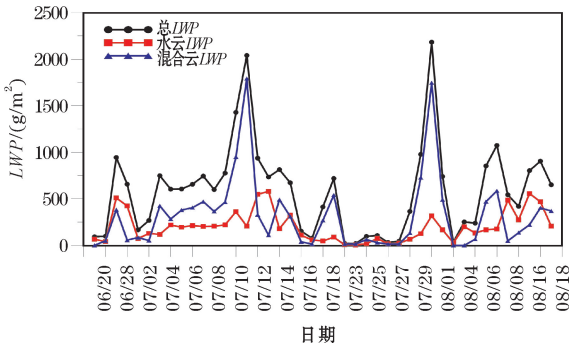


图 13 2016 年 6 月 19 日–8 月 21 日总云、水云和混合云 LWP 日平均值分布

如图 13 所示为 2016 年 6 月 19 日–8 月 21 日总云、水云、混合云的 LWP 日平均值分布。LWP 的日平均值定义为一天的平均单位时间廓线内的 LWP。由图中可以看出夏季观测期间的水云 LWP 相对变化幅度较小,水云日最大 LWP 不超过 560 g/m²。总 LWP 和混合云的 LWP 随时间变化,其波动较大。且总 LWP 和混合云 LWP 变化基本保持一致,与图 12 总云、水云和混合云出现频率对比发现,当总 LWP 较高时,此时云内混合云的占比最高,混合云的 LWP 此时也较高,最高可达 1790.71 g/m²。

同理,由 Z-IWC 关系可得总云、混合云和冰云的 IWP 日平均值分布。在图 14 中看到,在该次观测期间,对应图 12 中总云和冰云发生频率图,可知当该日的总云出现频次较小时,该日的 IWP 总量较小。当 IWP 总量较大时超过 100 g/m² 时,大多数情况下此时混合云占 IWP 的主要贡献。在有冰云发生的情况下,冰云 IWP 变化幅度较小。与 LWP 日变化平均值分布对比发现,8 月 16–19 日, LWP 较大而 IWP 含量趋近于零。对比回波强度图(图 15)发现,此期间的云以水云为主,云顶高度不超过 7 km,且该时间内多为对流云。

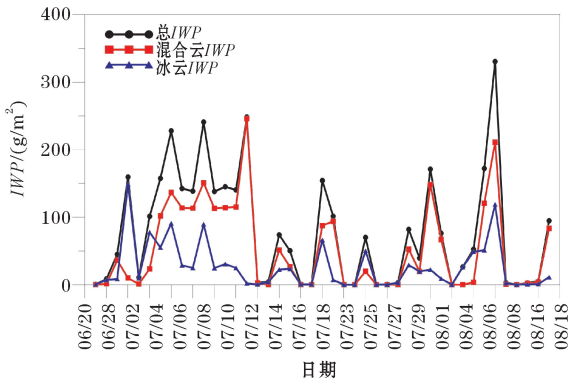


图 14 2016 年 6 月 19 日–8 月 21 日总云、混合云 and 冰云 IWP 日平均值分布

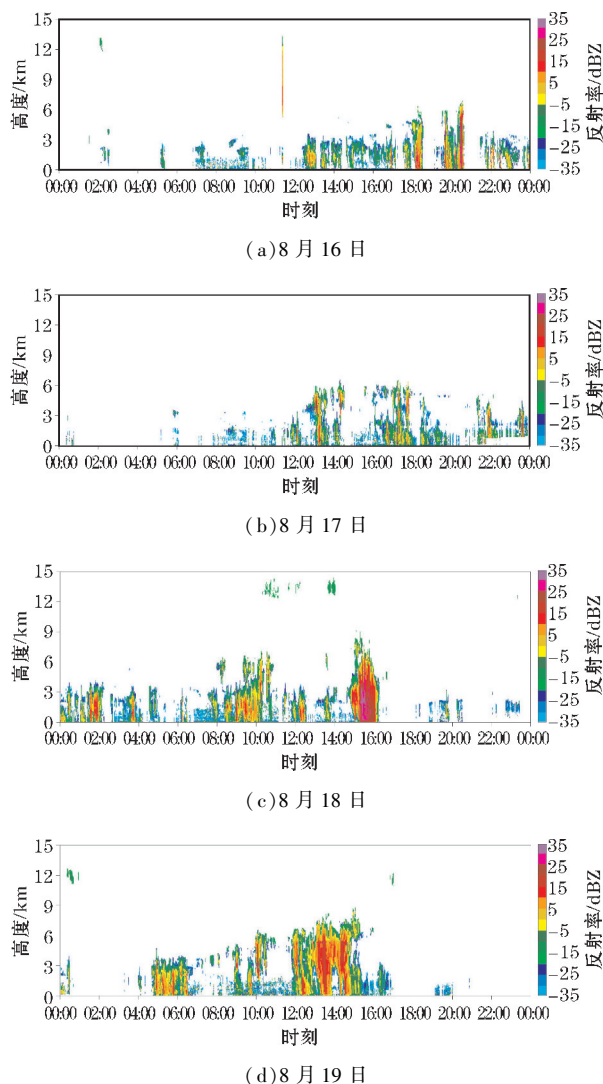


图15 2016年8月16–19日融合数据反射率

3 结论

利用2016年广东龙门夏季外场观测试验的毫米波云雷达、C波段连续波雷达和激光云高仪融合数据,利用云相态分类方法,对云分为冰云、水云和混合云,并研究分析了广东龙门地区的夏季云参数的统计特征。得到了以下的主要结论:

(1) 龙门地区夏季云主要集中在龙门地区的云顶高度主要集中在4 km以下高度和8 km以上高度,5~6 km高度范围内的云发生频次较少。云顶高度、云厚、云量、云层数和不同高度上云的发生频次有较明显的日变化。在上午04–06时,云量及云厚等都达到一天内最低,随后至午时,云不断发展,由层积云或雨层云发展为深对流云或者是高积云。16–20时有明显的多层云情况。

(2) 水云、混合云和冰云中,混合云夏季出现的频率相对最低,水云发生频率相对稳定,多集中在20%~30%。当总云出现频率高于60%时,此时冰云出现频率较高,冰云发生频率和总云发生频率变化趋势大致相同。

(3) 夏季观测期间的水云LWP相对变化幅度较小。总LWP和混合云的LWP随时间变化波动较大。且总LWP和混合云LWP变化基本保持一致,当LWP较高时,混合云为主要贡献。在有冰云发生的情况下,冰云LWP变化幅度较小,且冰云比混合云LWP小。

在对云进行分类时温度的选择阈值,和对云内含水量反演时因降水回波强度较大选用不同公式造成的误差,都会对统计分析日变化规律和反演结果造成影响。可以进一步分析3种云的滴谱分布规律,以便对其日变化特征有更深入的认识。

参考文献:

- [1] 赵玉春,王叶红. 近30年华南前汛期暴雨研究概述[J]. 暴雨灾害,2009(3):193–202,228.
- [2] Su-Bin OH, Yeon-Hee KIM, Ki-Hoon KIM, et al. Verification and Correction of Cloud Base and Top Height Retrievals from Ka-band Cloud Radar in Boseong, Korea[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016(1):73–84.
- [3] 仲凌志,刘黎平,葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2009(4):383–391.
- [4] 秦宏德. 青藏高原那曲地区强对流天气的大气静力能量垂直分布[J]. 高原气象, 1983, V2(1):61–65.
- [5] 刘黎平,楚荣忠,宋新民,等. GAME-TIBET 青藏高原云和降水综合观测概况及初步结果[J]. 高原气象, 1999, 18(3):441–450.
- [6] 李曦,周筠璐,刘黎平,等. 毫米波云雷达反演层云微物理参数的个例试验[J]. 成都信息工程学院学报, 2013, 28(3):274–283.
- [7] 仲凌志. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2009.
- [8] Zhao C, Liu L, Wang Q, et al. Toward Understanding the Properties of High Ice Clouds at the Naqu Site over the Tibetan Plateau Using Ground-based Active Remote Sensing Measurements Obtained during a Short Period in July 2014[J]. American Meteorological Society, 2016.
- [9] Mace G G, Heymsfield A J, Poellot M R. On retrieving the microphysical properties of cirrus clouds using the moments of the millimeter-wavelength Doppler spectrum[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(D24): AAC-1-AAC 22–26.
- [10] Matrosov S Y, Korolev A V, Heymsfield A J. Profiling Cloud Ice Mass and Particle Characteristic Size from Doppler Radar Measurements[J]. Jour-

- nal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2002, 19:1003–1018.
- [11] Schmidt J M, Flatau P J, Yates R D. Convective Cells in Altocumulus Observed with a High-Resolution Radar[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 71(6):2130–2154.
- [12] 樊雅文, 黄兴友, 李锋. 毫米波雷达测云个例研究[J]. 大气科学学报, 2013, 36(5):554–559.
- [13] 尹金方. 东亚区域云和降水微物理特征及云微物理参数化方案构建[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [14] 周毓荃, 蔡森, 欧建军, 等. 云特征参数与降水相关性的研究[J]. 大气科学学报, 2011, 34(6):641–652.
- [15] 林丹. 利用 MODIS 卫星产品分析西南地区云水特征[J]. 气象科技, 2015, 43(1):138–144.
- [16] 张晓, 段克勤, 石培宏. 基于 CloudSat 卫星资料分析青藏高原东部夏季云的垂直结构[J]. 大气科学, 2015(6):1073–1080.
- [17] Liu L, Zheng R, Zheng J, et al. Comparing and Merging Observation Data from Ka-Band Cloud Radar, C-Band Frequency-Modulated Continuous Wave Radar and Ceilometer Systems[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12):1282.
- [18] Liu L, Zheng J, Wu J. A Ka-band solid-state transmitter cloud radar and data merging algorithm for its measurements[J]. 大气科学进展, 2017, 34(4):545–558.
- [19] Zhao C, Liu L, Wang Q, et al. MMCR-based characteristic properties of non-precipitating cloud liquid droplets at Naqu site over Tibetan Plateau in July 2014[J]. Atmospheric Research, 2017, 190:68–76.
- [20] 谢晓林, 刘黎平. 云雷达联合微波辐射计反演混合性降水层云液态水含量的方法研究[J]. 暴雨灾害, 2016(1):1–9.
- [21] Heng Z, Fu Y, Liu G, et al. A Study of the Distribution and Variability of Cloud Water Using ISCCP, SSM/I Cloud Product, and Reanalysis Datasets[J]. Journal of Climate, 2014, 27(9):3114–3128.
- [22] Shupe M D. A ground-based multisensor cloud phase classifier[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34.
- [23] Comstock J M, Protat A, McFarlane S A, et al. Assessment of uncertainty in cloud radiative effects and heating rates through retrieval algorithm differences: Analysis using 3 years of ARM data at Darwin, Australia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(10):4549–4571.
- [24] Luke E P, Pavlos K, Shupe M D. Detection of supercooled liquid in mixed - phase clouds using radar Doppler spectra[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D19):5548–5554.

Statistical Analysis of South China Summer Cloud Parameters based on Cloud Radar, C-band Continuous Wave Radar and Ceilometer Fusion Data

CUI Yan-xing^{1,2}, LIU Li-ping², HE Jian-xin¹, WU Chong²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: Because of the effect of precipitation on the attenuation of millimeter wave radar, the inversion error is larger using cloud radar to study cloud parameters alone. A millimeter-wave radar, C-band continuous wave radar and laser data fusion of Ceilometers, precipitation can reduce the impact of statistical results, and can more accurately determine the boundaries of clouds. Using cloud phase classification method, the cloud was divided into ice cloud, water cloud and hybrid cloud, and the diurnal variation of cloud top and cloud bottom height, cloud thickness, cloud cover, cloud number and other characteristics of summer cloud in Longmen of Guangdong Province. A preliminary statistical analysis was conducted to discuss the macro features of different types of clouds. The cloud water liquid water content of three kinds of clouds was inverted, and the distribution characteristics of water content were analyzed. The results show that the occurrence frequency of cloud top height, cloud thickness, cloud amount, cloud layer and different height in Longmen area has obvious diurnal variation. The cloud tops mainly in this area is mainly concentrated below 4 km and above 8 km, and clouds with the height of 5–6 km are less frequent. There is a higher frequency of multi-layer clouds afternoon. The frequency of mixed clouds in summer appears to be the lowest, and the frequency of water clouds is relatively stable. The frequency of ice clouds and summer total cloud frequency changes roughly the same. The relative change of liquid water path (*LWP*) in summer was smaller, and the trend of *LWP* in total *LWP* and mixed cloud remained basically the same. When *LWP* was high, the hybrid cloud was the main contribution. The average *LWP* of summer hybrid clouds is about 2.5 times the water clouds.

Keywords: cloud radar cloud characteristic parameters; liquid water content; daily variation