

利用 KAZR 云雷达对 SACOL 站云宏观特性的研究

朱泽恩, 郑创, 葛颢铭*, 黄建平, 付强

兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: gejm@lzu.edu.cn

2016-10-31 收稿, 2016-11-21 修回, 2016-11-22 接受, 2017-02-28 网络版发表

国家自然科学基金(41430425, 41575016, 41521004, 41375021)和兰州大学中央高校基本科研业务费专项(LZUJBKY-2016-k01)资助

摘要 云是气候系统中最为重要的因子之一, 对地气系统的辐射收支有显著影响. 然而由于云在气候模式中的表征和反馈作用不能很好地被描述, 因而也是造成气候预测存在较大不确定性的重要因子. 兰州大学半干旱气候与环境监测站(SACOL)于2013年7月引进了Ka-Band Zenith Radar(KAZR), 在西北干旱区进行云的长期连续观测. 本文利用云雷达观测数据, 首先实现了目前ARM用于云检测的业务算法. 在此基础上对2014年SACOL站上空云宏观特性进行统计, 初步分析了云底、云顶和云厚的分布变化, 结果表明: 云底在1.5和5.5 km处出现频率最高, 云顶发生频率在2.5和8.5 km处达到峰值; 67%的云层厚度分布在2 km以内; 月平均总云量的发生频率为44%~76%, 低云、中云和高云的发生频率分别为13%, 30%和34%; 单层云、双层云和三层云占到云总数的98%, 其中夏秋季多层云发生频率较高; 各个季节不同类型的云都具有一定的日变化特征; 通过KAZR与CloudSat和CALIPSO卫星的观测比对, 结果表明CloudSat对厚云的穿透性好, 但无法探测到反射率因子低于-30 dBZ的弱云, CALIPSO对弱云最敏感, 但信号受云滴粒子衰减较快, 对于厚度较大的云探测的云底高度偏高.

关键词 云雷达(KAZR), 信号识别, 云宏观特性, CloudSat, 云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测(CALIPSO)

云是影响气候变化最为重要的因子之一, 对地气系统的辐射收支、能量平衡及水循环都有重要作用^[1,2]. 首先云对整个地气系统的辐射收支平衡有重要影响: 一方面云可以反射太阳短波辐射, 对地气系统产生冷却效应; 另一方面云捕获地表和对流层下层发射的热红外辐射, 并向外发射长波辐射, 对地气系统具有保温作用. 这两种相反作用的净结果决定了云对地气系统的辐射强迫调整和反馈作用^[3,4]. 其次, 云通过调节辐射与潜热之间的平衡, 对地气系统中水循环过程产生显著影响^[5]. 此外, 云中释放的潜热能量是大气中从单块积云到中尺度系统乃至全球大气环流的主要能量来源^[6,7]. 云对气候系统变化还具有重要的反馈作用^[8]. 然而在气候模式中, 由于云

过程很难被准确表示^[9-14], 对气候变化的响应及反馈表征也存在一定问题, 使得云成为气候模拟和预测中最不确定的因素之一. 云的辐射气候效应强烈依赖于云的宏微观物理性质, 所以对于云宏微观物理特性的观测、反演和研究, 对改进模式中云的参数化过程, 深入了解云在气候变化中的反馈作用有着非常重要的意义^[15,16].

目前对云的宏微观物理特性主要通过地基、飞机和卫星进行观测研究. 卫星观测可以得到云在大区域和全球尺度上的特性分布, 但时空分辨率较低, 其产品精度和可靠性需要地基观测的验证^[17,18]. 地基探测具有较高的时间分辨率和反演精度, 可以对一地区进行长时间连续观测, 地基探测手段主要有毫

引用格式: 朱泽恩, 郑创, 葛颢铭, 等. 利用 KAZR 云雷达对 SACOL 站云宏观特性的研究. 科学通报, 2017, 62: 824-835

Zhu Z E, Zheng C, Ge J M, et al. Cloud macrophysical properties from KAZR at the SACOL (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 824-835, doi: 10.1360/N972016-00857

米波云雷达、激光雷达和微波辐射计。激光雷达因其对大粒子不敏感的特性可以探测到精确的云底高度,但是当云层较厚或有多层云存在时,激光束会衰减,无法得到高层云或厚云信息。云雷达发射的波长属于毫米波段,具有很强的穿透性,可以穿过低层水云观测到高层卷云,探测到多层云的垂直结构,云雷达还可通过反射率因子、多普勒速度及退偏比廓线等产品得到云的宏微观垂直结构及云相态信息,进而可反演云微物理性质,因而云雷达被认为是研究云宏微观性质的有力工具^[19,20]。

国外从20世纪60年代已经开始应用云雷达对云宏微观性质进行观测研究。20世纪60年代末,美国空军使用毫米波雷达对云的结构进行探测^[21]。随着毫米波雷达技术的发展,云雷达性能不断改进^[22~24],20世纪80年代末,美国能源部开展了大气辐射测量项目(Atmospheric Radiation Measurement, ARM),该计划用多部毫米波雷达对云天里影响辐射传输的云特征开展长期连续观测,Clothetaux等人^[25,26]针对云雷达工作特性,开发了一套区分信号与噪声,准确识别有效回波的方法,为应用云雷达对云宏微观性质的研究奠定了基础,Mace等人^[27]利用确定的云反射率因子与多普勒速度,对云中云水含量分布进行深入研究。Sassen和Liao^[28]分析给出了雷达反射率因子与水云和冰云中液态水和冰水含量的经验公式。针对云雷达产品特性,多套反演云微物理性质的算法被开发^[29~32],Kalesse等人^[33]利用云滴下降末速度随高度的变化对云的微物理过程进行了研究,这些研究充分凸显了利用云雷达对云宏微观性质研究的优势。

与发达国家相比,国内应用云雷达对云的研究起步较晚,魏重等人^[34]在1980年起利用云雷达对云和降水做了系统的观测,并对毫米波雷达的测云能力作了理论估计,这是中国较早利用毫米波雷达进行气象观测的试验。随着云在气候系统中的重要性被认识以及应用云雷达探测云的优势越来越凸显,近几年国内应用云雷达对云的研究有所增加,2008~2009年,中国科学院使用自己研究开发的8.6 mm雷达,进行了多次外场实验^[35],并于2010年8~9月,在吉林开展了飞机和地基毫米波雷达的云联合对比观测^[36]。彭亮等人^[37]利用2008年在安徽寿县进行的中美联合大气辐射综合观测试验获得的数据,分析讨论了W波段云雷达观测的层状云反射率因子、多普勒速度和谱宽的分布特征及原因。章文星和吕

达仁^[38]利用寿县试验数据,对比云雷达和其他地基仪器的观测结果,研究了云的宏微观特性。黄兴友等人^[39]利用云雷达等仪器开展了针对云底高度的比对试验,使用云雷达、激光云高仪和红外测云仪开展了云底高度观测的比对试验,段艺萍等人^[40]验证了毫米波雷达在反演空气的垂直运动及层状云微物理参数的准确性。仲凌志等人^[41]概述了国内外云雷达的发展现状以及在云物理研究方面的情况,并指出国内在云雷达的研制和应用方面和发达国家还有一定的差距。此外,汪会等人^[42]、张华等人^[43]还利用星载雷达CloudSat对亚洲地区云特性分布特征和季节变化进行了分析。

兰州大学半干旱气候与环境监测站(Semi-Arid Climate & Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL)位于干旱半干旱区,干旱半干旱区对全球气候变化响应显著,在这一地区开展云特性的长期连续性研究,对改进云的参数化方案及深入认识云对这一区域气候变化的影响和反馈尤为重要。KAZR(Ka-Band Zenith Radar)是第一台在半干旱区进行固定观测的云雷达系统,本文针对云雷达工作特性,从雷达原始数据出发,介绍了一套目前国际上广泛应用的云检测方法。在此基础上对2014年KAZR的观测数据进行了信号识别,并统计分析了SACOL站云宏观特性分布变化。此外,还利用KAZR选取了CloudSat和CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)卫星过境个例,对比验证了两颗卫星探测云层的能力。

1 仪器与数据

1.1 观测仪器

放置于兰州大学半干旱气候与环境监测站(35.946°N, 104.137°E, 海拔高度1.97 km)的KAZR云雷达,是双极化(水平极化发射,水平和垂直极化接受)Ka波段多普勒雷达,其工作频率为35 GHz(波长8.6 mm),峰值功率可达2.2 kW,天线直径1.82 m,波束宽度0.33°,在天顶方向观测大气水凝悬浮粒子的回波信号。KAZR有“chirp”和“burst”两个通道,“chirp”通道采用脉冲压缩技术,通过对载频做线性调频,将持续时间为几微秒的宽信号压缩为300 ns的脉冲信号,可以有效提高脉冲功率,同时保持了较小的脉冲宽度(即较好的距离分辨率)。由于发射机在压缩宽脉

冲时, 雷达接收机不能接受信号, 因此会产生0.87 km的近地面盲区. 该距离盲区问题可用“burst”通道观测进行弥补, “burst”通道发射短脉冲信号, 可探测到距地面0.15 km以上的云层. 两个通道的具体运行参数见表1.

为了说明KAZR探测敏感性, 选取了晴空条件下1 h雷达观测的垂直廓线数据, 计算每一个雷达波门(雷达回波信号采样时间的长度在空间上对应一段距离, 每一段空间距称为一个距离波门)反射率因子(dBZ)的平均值与标准差, 认为雷达可以探测到的最弱信号强度比背景噪声平均值大一个标准差, 因此两者相加可得到雷达在不同高度的最小可探测能力, 如图1所示.

表1 KAZR运行参数

Table 1 Operational parameters for KAZR

通道	Chirp	Burst
工作频率(GHz)	35.89	35.83
波门数	559	577
距离库长(m)	30	30
脉冲宽度(ns)	233	300
脉冲重复频率(kHz)	5	5
最小探测距离(m)	869	150
最大探测距离(m)	17639	17460
距离分辨率(m)	35	45
最大不模糊速度(m s ⁻¹)	10.28	10.30
速度分辨率(m s ⁻¹)	0.04	0.04
时间分辨率(s)	4.27	4.27
最小探测信号(5 km, dBZ)	-68	-64

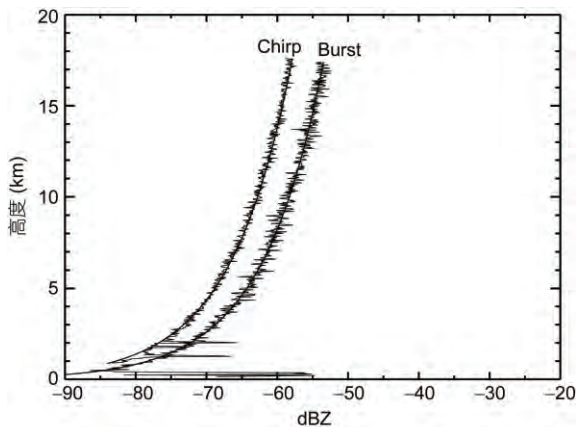


图1 KAZR两个通道最小探测信号

Figure 1 Minimum detectable reflectivities for the two modes of KAZR

根据雷达气象方程^[44]:

$$\text{dBZ} = 10\log(P_r) + 10\log(C) + 20\log(R), \quad (1)$$

式中, C 为与雷达的硬件参数有关的标准常数,

$$C = \frac{512\ln(2)\lambda^4}{10^{-18} \Delta R \pi^3 |K|^2 \theta^2 P_r G_c G^2 G_{rx} L_{rx} L_{tx} L_{MF}}, \quad (2)$$

式中, P_r 为峰值功率, λ 为发射波长, ΔR 为距离分辨率, K 为液态水复折射指数, θ 为波束宽度, G_c 为脉冲压缩比, G 为天线增益, G_{rx} 为接收机增益, L_{tx} 为发射机损耗, L_{rx} 为接收器损耗, L_{MF} 为滤波器损耗. R 为每个脉冲距地面的距离, P_r 为回波功率.

求出式(1)中晴空条件下dBZ对应的 P_r 值, 即为雷达的最小探测功率 P_{\min} . 对于“chirp”与“burst”通道, C 的数值分别取0.0024和0.0199, 可以得到KAZR在各个高度的最小探测信号. 图1中光滑曲线是利用式(1)计算得到的KAZR敏感性随高度变化分布, 可以看到晴空大气的实际观测与理论计算值非常一致. 雷达探测的最小dBZ随高度增加而降低, 在2 km高度以上, 实际观测曲线的波动由雷达接收机产生的噪声造成, 在2 km高度以下观测值的波动主要由昆虫等产生的一些杂波造成. “Chirp”和“burst”通道在5 km高度的最小探测反射率因子分别为-68和-64 dBZ, 这一数值显著小于ARM云雷达5 km处-49 dBZ^[44]的最小探测值, 主要是因为KAZR采用了峰值功率高达2.2 kW的EIKA(Extended Interaction Klystron Amplifier)放大器, 远大于ARM云雷达100 W的峰值功率^[44]. 因此, KAZR云雷达对于低层云的穿透能力和对高层云的敏感性比ARM云雷达都有显著改进.

1.2 雷达数据

对KAZR观测的原始多普勒频谱分别求零阶矩、一阶矩和二阶矩, 得到雷达观测提供的反射率因子(dBZ)、多普勒速度(\bar{v})和速度谱宽(σ_v^2). 线性退偏比(linear depolarization ratio, LDR)为后向散射功率的垂直、水平极化分量之比. 信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)通过雷达每条廓线上的信号值与该条廓线噪声功率比值计算. 反射率因子反映了不同粒径云滴粒子分布情况下散射能力的大小; 多普勒速度 \bar{v} 表示了粒子径向速度的大小, 它是有效照射体内粒子平均下落末速度与大气垂直速度叠加的结果; 速度谱宽 σ_v^2 为雷达有效照射体内粒子多普勒速度分布偏离平均值的程度, 反映了云中湍流活动的强弱; 线性退

偏比与目标粒子的形状、相态和空间分布取向有关.

1.3 卫星数据

卫星资料主要使用了CloudSat与CALIPSO卫星上的云产品资料. CloudSat与CALIPSO是A-Train中两颗能对云进行主动观测的卫星, 对于研究全球或区域云特性垂直分布有重要意义. CloudSat卫星搭载的94 GHz毫米波云雷达(Cloud Profiling Radar, CPR)在每条轨道上进行约37081次扫描(约2 h), 沿轨道飞行方向分辨率为1.1 km, 跨轨道分辨率为1.4 km, 垂直分辨率为0.24 km^[45,46], 可以提供云类型、光学厚度、液态或冰水含量、反射率因子等反演产品, 本文主要使用2B-GROPROF产品中云检测产品、雷达反射率因子等参数. CALIPSO卫星搭载一个双波段(532和1064 nm)具有正交偏振探测能力的云-气溶胶激光雷达(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP), 提供两个波段的后向散射垂直廓线, 以及532 nm波段的线性退偏比垂直廓线, 可得到云和气溶胶的分布高度、消光系数等产品信息^[47]. 本文应用CALIPSO Level 2产品中分辨率为1 km的云产品和垂直特征层分布产品(vertical feature mask, VFM), 包括廓线云层数、云底云顶高度以及其他一些辅助参数.

2 云检测算法

雷达接收机在接受有效回波信号的同时也接受噪声. 噪声主要来源于内部和外部两方面: 内部噪声由接收机中的馈线、电路中的电阻器件、放大器、混频器产生; 外部噪声包括由天线引入热噪声及各种人为干扰. 为了能从原始观测中提取云的有效信息, 首先需对数据进行噪声和云识别分析. Clothiaux等人^[25]开发的云检测(cloud mask)方法被ARM采用作为云雷达信号识别的业务算法. 本文利用该方法的基本原理, 首先实现了对KAZR数据的信号识别工作. KAZR云检测算法主要分为两步:

第一步先利用式(1)对反射率因子进行距离订正, 得到回波功率 P_r . 通常认为雷达噪声符合正态分布(图2), 选取每条廓线最大高度处的30个波门(对应海拔高度范围为18.7~19.6 km, 大于SACOL站对流层顶高度, 我们通常认为此高度不存在云分布^[25])接收的回波功率作为背景噪声, 用以计算噪声平均值 m 和标准差 σ . 进一步将廓线上每一波门的 P_r 值与cloud mask中被设置为1的概率为0.16, 被设置为0的概率

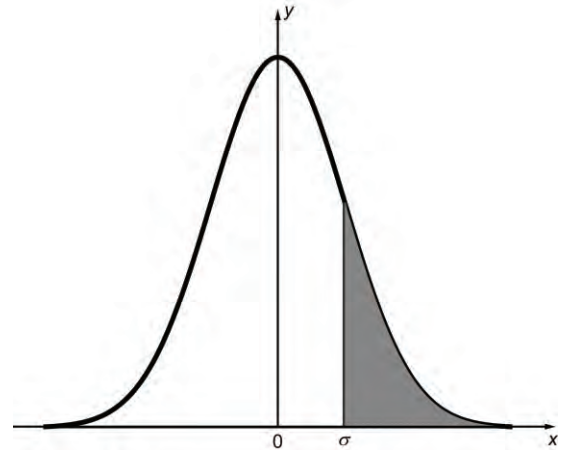


图2 正态分布图像
Figure 2 The normal distribution diagram

背景噪声的平均值加一个标准差数值($m+\sigma$)进行对比: 若某一波门的 P_r 值大于 $m+\sigma$, 则认为此波门可能包含有效信号回波, 并将该波门的cloud mask值设为1, 反之认为是雷达噪声设为0. 对于符合正态分布的噪声, 近16%数量的波门会在第一步中被错误判定为云信号, 实际中由于云在时间和空间上存在持续关联性分布(若某个波门为云的有效回波信号, 则该波门附近的其他波门中也可能存在一定数量的云信号). 因此, 考虑一个空间-时间滤波器进行低通滤波, 可以有效地将误判噪声信号滤除. 如图3所示, 对于任意一波门, 选取该点及其周围的24个点构成一 5×5 的滤波器, 对于该滤波器所覆盖的25个点中, 噪声在cloud mask中被设置为1的概率为0.16, 被设置为0的

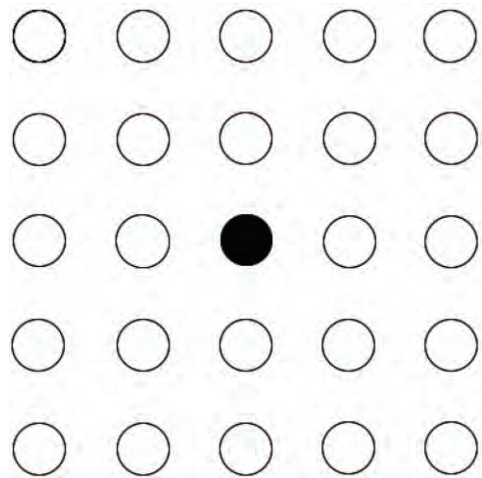


图3 由值0和1组成的 5×5 矩阵
Figure 3 The 5×5 box composed of 0 and 1

概率为0.84. 构建一概率计算公式:

$$P = (0.84)^{n_0} (0.16)^{n_1}, \quad (3)$$

利用25个点的观测值来调整确定中心波门是否为有效信号回波, 其中 n_0 为cloud mask为0的个数, n_1 为1的个数. 由式(3)可以看出 P 值越小, 值为0的点越少, 中心点是有效雷达回波信号的可能性越大. Clothiaux 等人^[25]在多次试验的基础上, 得出阈值 $P_{\text{thresh}}=5 \times 10^{-12}$ 时, 误报率可降低到0.15%, 漏报率达到14%. 图4是选取的2014年1月26日个例经过上述云检测方法处理后得到的结果. 如图4(a)所示, 经过第一步选取大于 $m+\sigma$ 的波门信号后, 图像中仍存在大量噪声. 进一步利用第二步滤波, 对所有波门重复5次滤波后得到图4(b), 可以看到噪音得到了很好地剔除, 实现了云信号的有效识别.

3 结果

3.1 云宏观特性统计

基于上述云检测方法, 对2014全年的KAZR数据进行了处理. 近地面上空通常存在昆虫, 特别是夏秋季节活动最为明显, 导致3 km范围内存在大量非云回波信号. 考虑昆虫不规则外形产生的LDR值一般大于低层水云的LDR值, 利用雷达退偏比数据, 将近地面3 km范围内LDR大于-15的波门认为是昆虫产生的回波, 从而对此类杂波进行了初步去除, 得到最终的云检测产品, 并进一步根据云边界识别方法^[25], 判定了云底、云顶高度. 在此基础上, 按照云底高度及云层厚度做以下分类^[48]: 云底低于2 km且厚度小于6 km的云定义为低云, 云底低于2 km厚度高于6 km的云定义为直展云; 云底处于2~5 km范围内和云

底高于5 km的云分别定义为中云和高云. 在实际分析中, 由于直展云发生频率很低, 仅为1.2%. 因此着重分析低云、中云和高云的分布特征.

图5是2014年云底、云顶和云厚随高度的分布及其年变化特征. 总体上, 云底、云顶发生频率有两个峰值, 云底发生最大频率在距地面1.5和5.5 km处, 云顶在距地面2.5和8.5 km处, 峰值频率分别为4.8%和8.9%. 云层厚度分布频率随厚度增加而降低, 近67.1%的云厚分布在2 km范围内. 月平均云底高度在3.9~5.0 km变化, 平均云顶高度维持在5.4~6.8 km. 云底、云顶高度在冬春季节高于夏秋季节, 说明在冷季持续时间较长的中高云出现频率高于暖季, 夏秋季节SACOL站上空的低云和持续时间较短的对流云发生频率较高, 造成了云高度特征的明显波动. 云层厚度分布在1.2~1.9 km, 年变化特征与云底云顶类似.

图6为云底、云顶和云厚0.5 h平均值在不同季节的日变化特征. 四季中云底、云顶高度都存在一定的日变化特征, 春季云顶高度从当地日出到午后缓慢降低, 日落后逐渐升高, 云底高度在日落后有较为明显的下降, 造成云厚在傍晚到午夜有显著增加; 夏季云顶高度随日出而增加, 日落后降低, 云底日变化平缓, 云体厚度白天大于夜间; 秋季云顶和云底高度变化趋势一致, 在日出后先降低, 从午后开始持续增加, 云体厚度夜间大于白天; 冬季云顶高度在日出至正午略有降低, 云底高度缓慢上升, 造成云层厚度显著下降, 正午至日落云体厚度维持在1.8 km. 云底云顶高度在不同季节的日变化特征反映了不同季节云的类型、天气系统及受太阳辐射影响变化: 冬春季节的云层多由锋面天气造成, 厚度较大, 持续时间长且云层较为平整, 太阳辐射在这一季节较弱, 主要对云

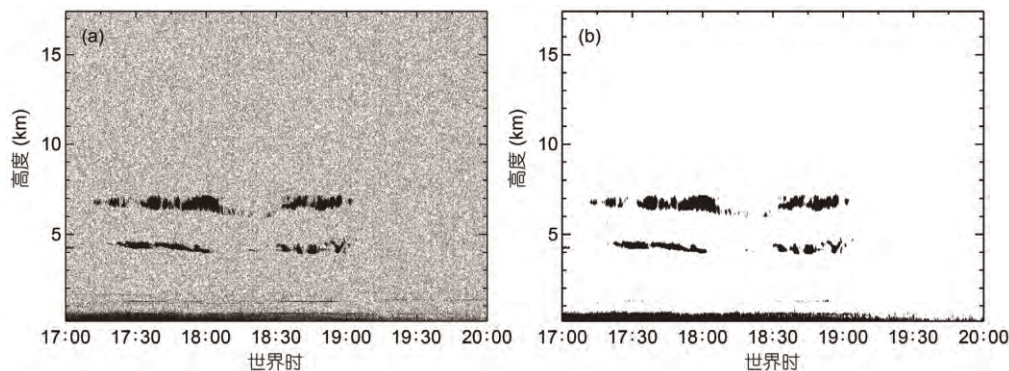


图4 2014年1月26日二值图像. (a) 噪声过滤算法处理前的图像; (b) 经过噪声滤波后的图像

Figure 4 The binary mask image on 26 January 2014. (a) The image of the original cloud mask; (b) the mask image after applying the filter

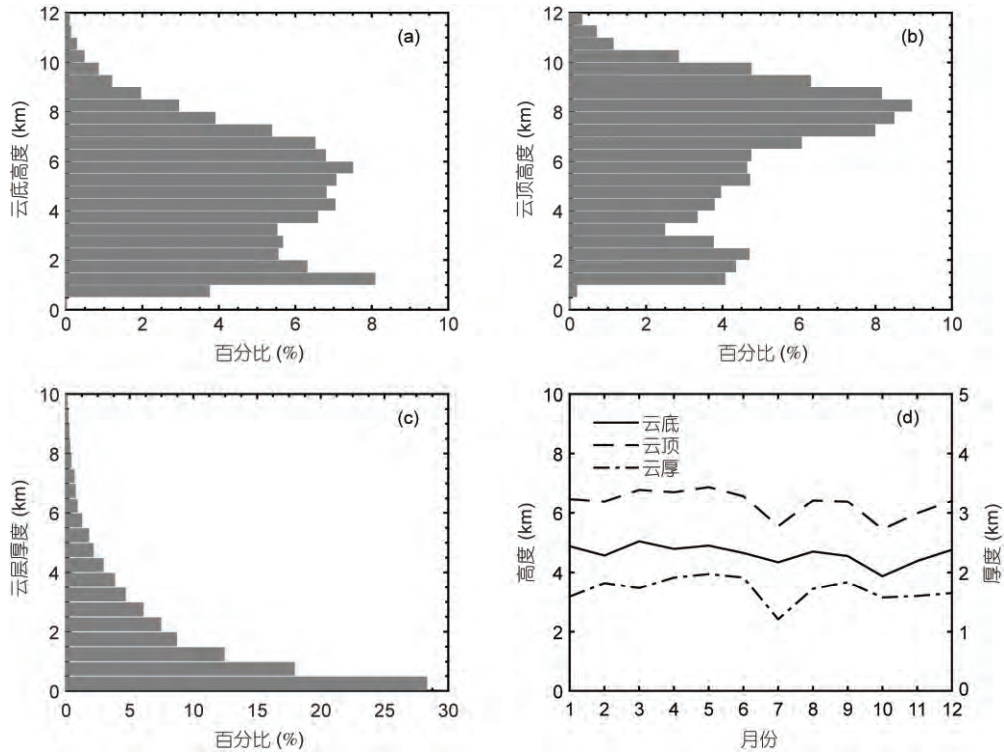


图5 云底(a)、云顶(b)高度和云层厚度(c)的分布及其年变化特征(d)
 Figure 5 The distribution of cloud top (a), cloud base (b), cloud thickness (c) and annual variations (d)

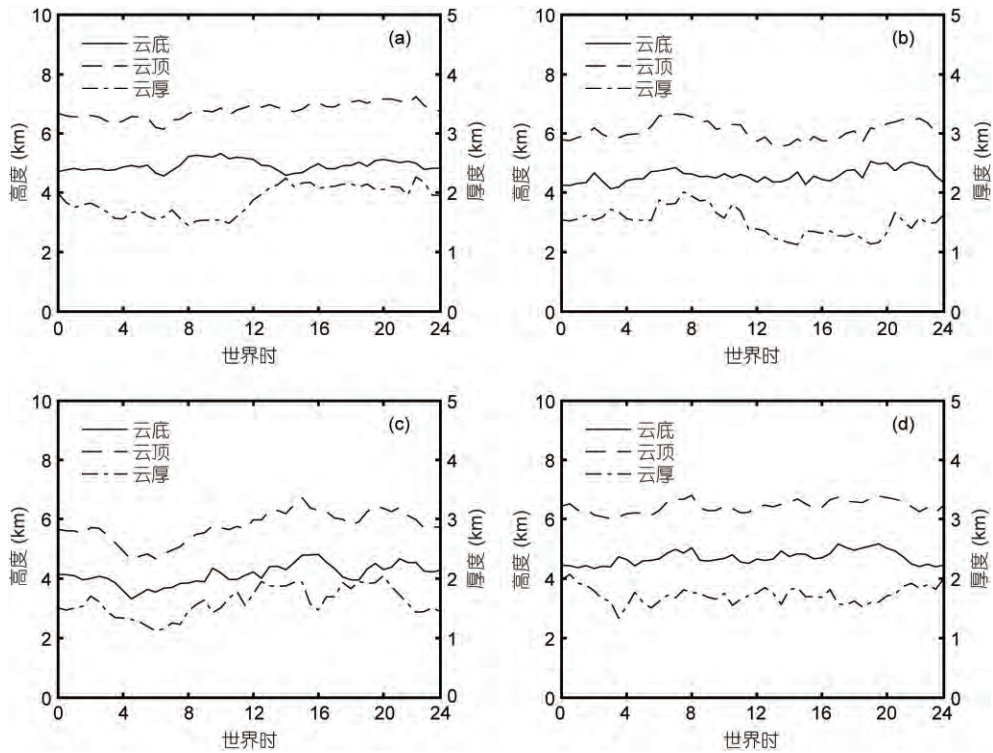


图6 云底云顶高度和云层厚度在春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)的日变化特征
 Figure 6 The diurnal cycle of cloud top, cloud base and cloud thickness for spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d)

顶变化有一定的影响. 夏秋季节辐射加热作用较强, 对流产生的云层增多, 云层分布复杂且时空变化明显, 白天地面加热增加大气不稳定性, 云层抬升, 日落后大气冷却抑制了垂直运动致使云层高度降低.

图7给出了低云、中云、高云的平均厚度及其发生频率的年变化特征. 低云平均厚度最低为1.0 km, 中云与高云的平均厚度分别为2.2与1.4 km. 从年变化特征来看, 月平均总云量发生频率介于44.4%~75.9%, 夏秋季节的发生频率高于冬春季节. 高云发生频率为22.2%~47.9%, 中云为22.3%~43.6%, 除春季高云发生频率大于中云外, 其他季节两者发生频率相当. 低云发生频率在3.0%~21.9%, 低于高、中云的发生频率, 在秋季低云发生频率增加. 图7(c)统计了云层的出现频率, 随着云层数增加, 发生频率降低, 单层云、双层云和三层云占到云总数的98%. 其中单层云出现频率最多, 如图7(d)所示占到52.4%~75.3%, 对总云量的相对贡献在夏秋季节小, 冬春季节较多, 多层云相反, 说明在夏秋季节对流活动相对旺盛, 更容易出现复杂的云层垂直分布.

3.2 KAZR与卫星观测结果对比

本文利用KAZR对CloudSat与CALIPSO卫星探测云层的能力进行了对比验证. 选取2014年3月29日、5月16日和12月10日3次卫星过境个例, 以SACOL站为中心, 挑选35.7°~36.2°纬度范围的数据, 对应提取卫星过境时刻KAZR与CloudSat的反射率以及CALIPSO的观测数据进行了对比, 在表2中给出了三者观测的云底、云顶高度值.

如图8(a)所示, 2014年3月29日KAZR探测到厚度约为1.2 km的层云, 云底高度为4.8 km, CloudSat与CALIPSO测得云底高度与KAZR探测结果非常一致, 差别小于0.12 km, 云顶高度KAZR与CloudSat较为一致, 与CALIPSO相差约为0.5 km(表2). 此外地面观测到SACOL站上空9 km处存在弱云, 信号强度介于-50~-30 dBZ, CALIPSO在相应高度也探测到了云信号, 但这一薄云没有被CloudSat探测到, 这是由于CloudSat最小探测敏感性约为-30 dBZ^[49], 无法识别回波信号较弱的云层. 由图8(d)可知2014年5月16日KAZR探测到两层云, 高层云云底为6.4 km, 云顶为

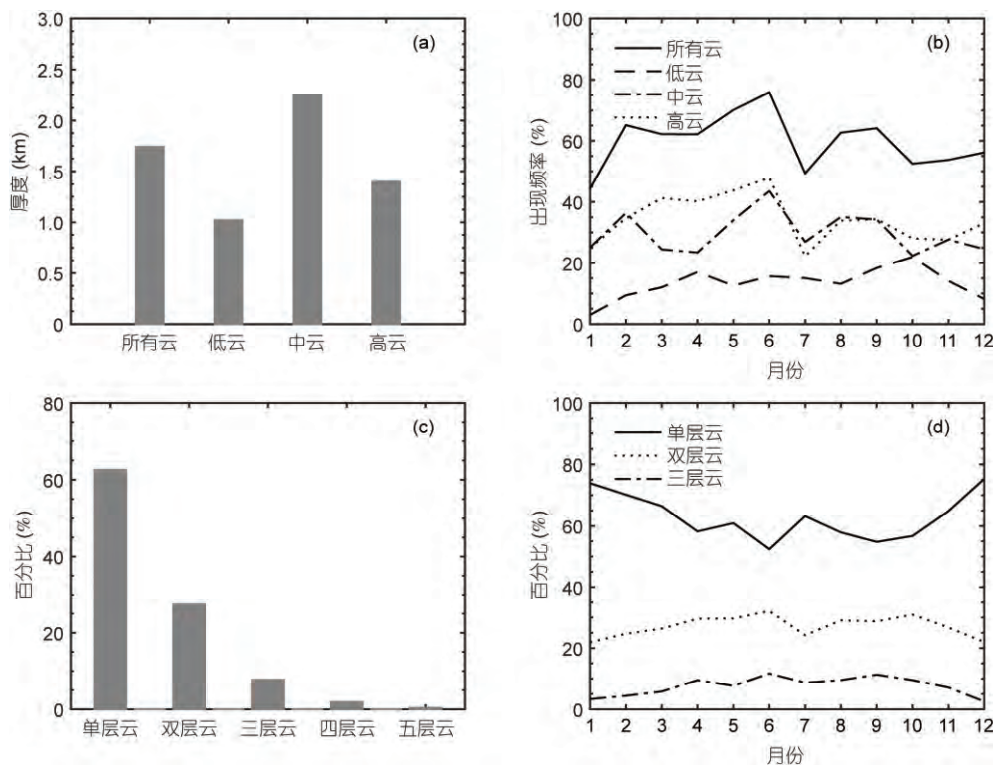


图7 所有云、低云、中云、高云的厚度分布(a)及年变化特征(b)和不同层数云的频率分布(c)及发生频率的年变化特征(d)
 Figure 7 The mean thickness (a) and annual variation (b) of all cloud, low cloud, middle cloud and high cloud; the frequency of occurrence (c) and annual variation (d) of different cloud layers

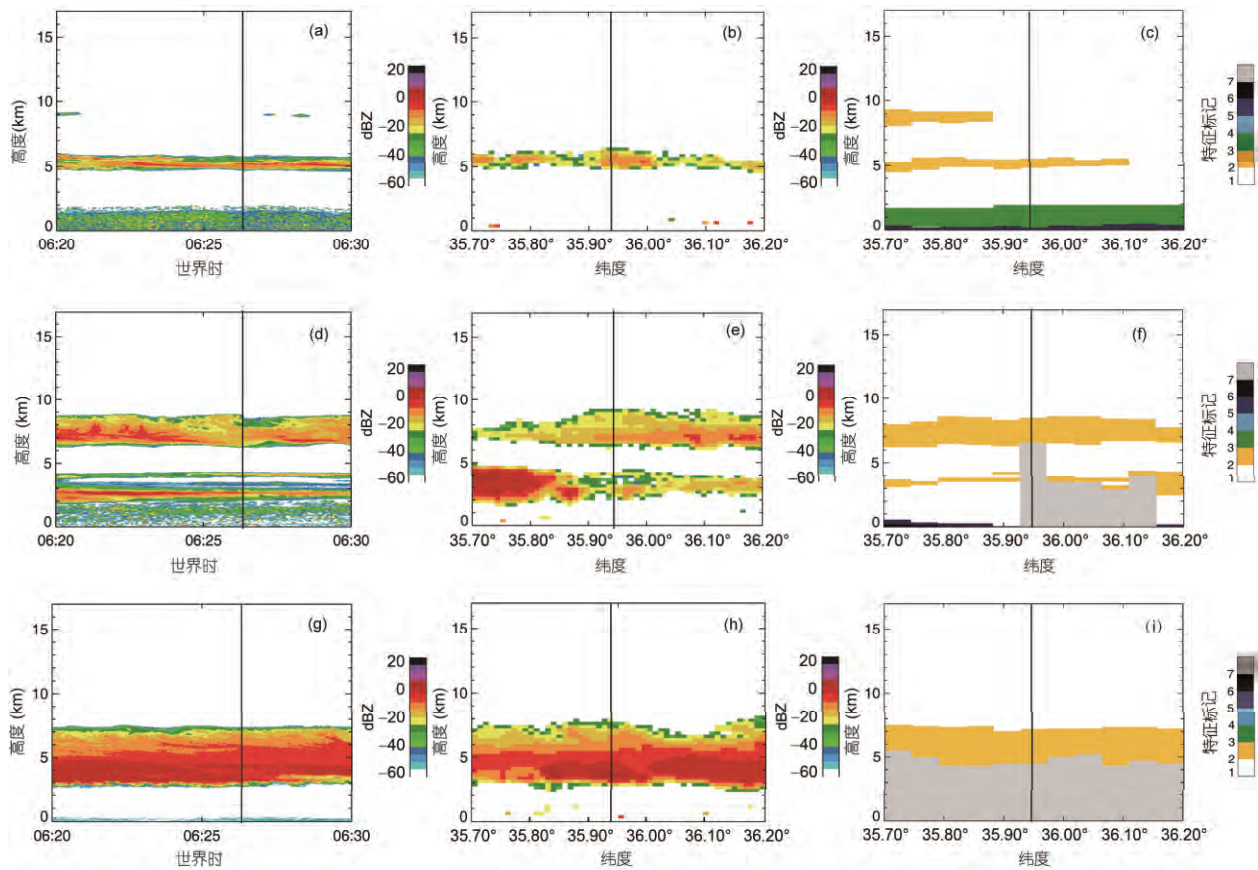


图8 KAZR((a), (d), (g)), CloudSat((b), (e), (h))探测的雷达反射率因子与CALIPSO((c), (f), (i))的VFM产品. VFM产品中黄色(值为2)表示云层, 绿色(值为3)表示气溶胶, 灰色(值为7)表示信号衰减, 黑色(值为6)表示地表下部. 由上到下对应的日期为3月29日((a), (b), (c)), 5月16日((d), (e), (f))和12月10日((g), (h), (i)). (a), (d), (g)中黑色实线表示卫星过境时刻; (b), (c), (e), (f), (h), (i)中黑色实线表示SACOL站纬度值

Figure 8 Radar reflectivities observed by KAZR ((a), (d), (g)) and CloudSat ((b), (e), (h)), and CALIPSO VFM product ((c), (f), (i)). (c), (f) and (i), yellow represents cloud, green represents aerosol, gray region is for the attenuated signal and black represents subsurface. The figures from the upper to the lower panels are for the case of 29 March 2014 ((a), (b), (c)), 16 May 2014 ((d), (e), (f)), and 10 December 2014 ((g), (h), (i)) respectively; the black lines in (a), (d), (g) indicate the time when satellite passing by; the black lines in (b), (c), (e), (f), (h), (i) are the latitude of SACOL

8.8 km, CloudSat对云底云顶的探测结果与KAZR探测结果差别小于0.12 km, 符合CloudSat垂直分辨率为0.24 km的观测误差范围, CALIPSO仅探测到高层云, 云底高度为6.7 km, 比KAZR和CloudSat的探测结果高约0.4 km. 由图8(g)可知, 2014年12月10日距地面2.7 km有一厚度为4.7 km的云层, 云层平整. CloudSat探测到的云底云顶高度与反射率因子随高度减小的分布特征与KAZR观测一致, 二者探测的云底、云顶高度也在观测误差范围内. CALIPSO信号由于无法穿透深厚云体, 探测到的云底高度为4.5 km, 比KAZR探测结果高1.8 km, 导致仅仅识别了2.7 km的云层厚度. 由以上对比可以看到, CloudSat对于厚云的穿透性较好, CALIPSO对薄的弱云最为敏感, 但信号衰减较快无法探测深厚的云层, KAZR具有较好

的垂直探测敏感性和穿透能力.

4 讨论与结论

本文利用SACOL站KAZR云雷达观测数据, 完成了云检测噪声消除算法, 准确识别了云雷达有效信号回波, 得到了一套高质量的云观测数据, 根据该观测数据对2014年SACOL站上空云层的宏观特性做统计分析, 并结合CloudSat和CALIPSO卫星观测进行了个例对比分析. 主要得到以下结论.

(1) SACOL站云底出现频率在距地面1.5和5.5 km处达到峰值, 云顶在距地面2.5和8.5 km处达到峰值, 近67.1%的云厚分布在2 km范围内. 云底云顶高度在冬春季节高于夏秋季节, 表明夏秋季节SACOL站上空存在更多的低云.

表2 KAZR与CloudSat, CALIPSO探测的云顶高度和云底高度

Table 2 The height of cloud top and cloud base detected by KAZR, CloudSat and CALIPSO

日期	云层数	云底/云顶	高度 (km)		
			KAZR	CloudSat	CALIPSO
03-29	1	云顶	6.12	6.17	5.57
		云底	4.86	4.73	4.85
05-16	1	云顶	8.81	8.93	8.67
		云底	6.38	6.29	6.69
	2	云顶	4.32	4.37	无
		云底	1.98	2.21	无
12-10	1	云顶	7.46	7.35	7.29
		云底	2.73	2.79	4.52

(2) 云底云顶高度在一年中均有一定的日变化特征,以夏秋季节最为明显.夏季日出后至正午云底云顶高度升高,中午至日落两者高度降低,在秋季呈现相反的变化.这种变化反映了不同季节的成云机制及受太阳辐射强弱变化的影响.

(3) 根据云层分类,月平均总云量的发生频率为44.4%~75.9%,低云、中云和高云的发生频率分别为13.4%,29.5%和34.2%.随着云层数增加,发生频率降低,单层云、双层云和三层云占到云总数的97.6%,夏秋季节多层云发生频率升高,说明夏秋季节对流旺盛,容易出现复杂的云层垂直分布.

(4) CloudSat探测到的云底云顶高度与KAZR探测结果差别在0.12 km以内,符合CloudSat垂直分辨

率为0.24 km的观测误差范围,CloudSat探测到云层反射率因子的垂直分布同KAZR结果一致,但Cloudsat对于弱云信号(反射率因子低于-30 dBZ)不敏感无法探测.CALIPSO可以探测到CloudSat无法探测到的弱云信号,但信号受云滴粒子衰减较快,导致其探测的云底高度偏高.

KAZR的时间分辨率高,敏感性好,能较为准确地观测SACOL站云层特征,今后将利用KAZR观测数据,进一步对SACOL站上空的云层进行长时间的统计分析,对云层的微物理性质进行反演,研究不同种类云的日变化特征及其与辐射环流之间的关系,进一步研究云对气候的辐射强迫影响,深入开展干旱半干旱地区云物理气候特性的研究.

参考文献

- Ding S G, Shi G Y, Zhao C S, et al. Analysis of variation and effect on the climate of cloud amount in China over past 20 years using ISCCP D2 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 1105-1111 [丁守国, 石广玉, 赵春生, 等. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响. *科学通报*, 2004, 49: 1105-1111]
- Liu Q, Fu Y F, Feng S. Geographical patterns of the cloud amount derived from the ISCCP and their correlation with the NECP reanalysis datasets (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2010, 68: 689-704 [刘奇, 傅云飞, 冯沙. 基于 ISCCP 观测的云量全球分布及其在 NCEP 再分析场中的指示. *气象学报*, 2010, 68: 689-704]
- Weng D M, Zhou Z J. A climatological study on atmospheric effective radiation on China (in Chinese). *Sci Meteorol Sin*, 1995, 15: 1-9 [翁笃鸣, 周自江. 大气有效辐射的气候学研究. *气象科学*, 1995, 15: 1-9]
- Zhao C S, Tie X, Brasseur G, et al. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, doi: 10.1029/2006GL026653
- Shi G Y. Atmospheric Radiation (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007 [石广玉. 大气辐射学. 北京: 科学出版社, 2007]
- Stephens G L. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review. *J Clim*, 2005, 18: 237-273
- Lei H C, Hong Y C, Zhao Z. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2008, 32: 967-974 [雷恒池, 洪延超, 赵震. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. *大气科学*, 2008, 32: 967-974]
- Wang H Q, Zhao G X. Cloud and Radiation—I: Cloud climatology and radiative effects of clouds (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 1994, 18: 910-932 [汪宏七, 赵高祥. 云和辐射(I)——云气候学和云的辐射作用. *大气科学*, 1994, 18: 910-932]

- 9 IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. In: Randall D A, Wood R A, Bony S, et al., eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 589–662
- 10 Arakawa A. Modeling clouds and cloud processes for use in climate models. In: The Physical Basis of Climate and Climate Modelling. ICSU/WMO, GARP Publications Series N16, Geneva, 1975. 181–197
- 11 Arakawa A. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. *J Clim*, 2004, 17: 2493–2525
- 12 Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. Interpretation of cloud-climate feedbacks as produced by atmospheric general circulation models. *Science*, 1989, 245: 513–516
- 13 Randall D, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. Breaking the cloud parameterization deadlock. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2003, 84: 1547–1564
- 14 Bony S, Robert C, Vladimir M K, et al. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes. *J Clim*, 2006, 19: 3445–3482
- 15 Stephens G L, Tsay S C, Stackhouse P W, et al. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback. *J Atmos Sci*, 1990, 47: 1742–1754
- 16 Ackerman T, Stokes G. The Atmospheric Radiation Measurement Program. *Phys Today*, 2003, 56: 38–45
- 17 Dong X, Minnis P, Xi B. A climatology of midlatitude continental clouds from ARM SGP site: Part I. Low-level cloud macrophysical, microphysical and radiative properties. *J Clim*, 2005, 18: 1391–1410
- 18 Xi B, Dong X, Minnis P, et al. A 10-yr climatology of cloud cover and vertical distribution from both surface and GOES observations over DOE ARM SGP site. *J Geophys Res*, 2009, 115, doi: 10.1029/2009JD012800
- 19 Yan W, Han D, Lu W, et al. Research of cloud-base height retrieval based on COSMIC occultation sounding data (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 1–15 [严卫, 韩丁, 陆文, 等. 基于 COSMIC 掩星探测资料的云底高反演研究. *地球物理学报*, 2012, 55: 1–15]
- 20 Kollias P, Clothiaux E E, Miller M M, et al. Millimeter-wavelength radars: New frontier in atmospheric cloud and precipitation research. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2007, 88: 1608–1624
- 21 Paulsen W H, Petrocchi P J, McLean G. Operational utilization of the AN/TPQ-11 cloud detection radar. *Instrumentation Papers*. Mass: Air Force Cambridge Research Labs, 1970. 166
- 22 Pasqualucci F, Bartram B W, Kropfli R A, et al. A millimeter-wavelength dual polarization Doppler radar for cloud and precipitation studies. *J Clim Appl Meteorol*, 1983, 22: 758–765
- 23 Hobbs P V, Funk N T, Weiss R R, et al. Evaluation of a 35 GHz radar for cloud physics research. *J Atmos Ocean Technol*, 1985, 2: 35–48
- 24 Lhermitte R M. Probing air motion by Doppler analysis of radar clear air returns. *J Atmos Sci*, 1966, 23: 575–591
- 25 Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A, et al. An Evaluation of a 94-GHz radar for remote sensing of cloud properties. *J Atmos Oceanic Technol*, 1995, 12: 201–229
- 26 Clothiaux E E, Ackerman T P, Mace G G, et al. Objective determination of cloud heights and radar reflectivity's using combination of active remote sensors at the ARM CART sites. *J Appl Meteorol*, 2000, 39: 645–665
- 27 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 Geophys Res*, 2002, 107, doi: 10.1029/2001JD001308
- 28 Sassen K, Liao L. Estimation of cloud content by W-band radar. *J Appl Meteorol*, 1996, 35: 932–938
- 29 Matrosov S Y, Korolev A V, Heymsfield A J. Profiling cloud ice mass and particle characteristic size from Doppler radar measurements. *J Atmos Ocean Technol*, 2002, 19: 1003–1018
- 30 Delanoë J, Protat A, Bouniol D. The characterization of ice cloud properties from Doppler radar measurements. *J Appl Meteorol Clim*, 2007, 46: 1682–1698
- 31 Deng M, Mace G G. Cirrus microphysical properties and air motion statistics using cloud radar Doppler moments. Part I: Algorithm description. *J Appl Meteorol Clim*, 2006, 45: 1690–1709
- 32 Szyrmer W, Tatarevic A, Kollias P. Ice clouds microphysical retrieval using 94-GHz Doppler radar observations: Basic relations within the retrieval framework. *J Geophys Res*, 2012, 117, doi: 10.1029/2011JD016675
- 33 Kalesse H, Kollias P, Szyrmer W. On using the relationship between Doppler velocity and radar reflectivity to identify microphysical processes in midlatitudinal ice clouds. *J Geophys Res-Atmos*, 2013, 118, doi: 10.1002/2013JD020386
- 34 Wei Z, Lin H, Xin M X. The ability of detect cloud of millimeter wave radar (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1985, 43: 378–383 [魏重, 林海, 忻妙新. 毫米波气象雷达的测云能力. *气象学报*, 1985, 43: 378–383]
- 35 Liu L P, Zhong L Z, Jiang Y, et al. Cloud radar and its field experiments in China (in Chinese). *Meteorol Sci Technol*, 2009, 37: 567–571 [刘黎平, 仲凌志, 江源, 等. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析. *气象科技*, 2009, 37: 567–571]
- 36 Liu L P, Zong R, Qi Y B, et al. Microphysical parameters retrieval by cloud radar and comparing with aircraft observation in stratiform

- cloud (in Chinese). Eng Sci, 2012, 14: 64–71 [刘黎平, 宗蓉, 齐彦斌, 等. 云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比. 中国工程科学, 2012, 14: 64–71]
- 37 Peng L, Chen H B, Li B. A case study of deriving vertical air velocity from 3-mm Cloud Radar (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2012, 36: 1–10 [彭亮, 陈洪滨, 李柏. 3 mm 多普勒云雷达测量反演云内空气垂直速度的研究. 大气科学, 2012, 36: 1–10]
- 38 Zhang W X, Lü D R. Comparison of cloud base heights by ground based sky IR brightness temperature measurements with cloud radar and ceilometer in Shouxian (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2012, 36: 657–672 [章文星, 吕达仁. 地基热红外云高观测与云雷达及激光云高仪的相互对比. 大气科学, 2012, 36: 657–672]
- 39 Huang X Y, Xia J R, Bu L B, et al. Comparison and analysis of cloud base height measured by ceilometer, infrared cloud measuring system and cloud radar (in Chinese). Chin J Quantum Electron, 2013, 30: 73–78 [黄兴友, 夏俊荣, 卜令兵, 等. 云底高度的激光云高仪、红外测云仪以及云雷达观测比对分析. 量子电子学报, 2013, 30: 73–78]
- 40 Duan Y P, Liu S D, Liu L P, et al. A case test of retrieving stratus vertical velocity & microphysical parameters from millimeter-wave cloud radar (in Chinese). Sci Technol Eng, 2013, 27: 7933–7940 [段艺萍, 刘寿东, 刘黎平, 等. 利用云雷达反演层状云空气垂直速度及微物理参数的个例研究. 科学技术与工程, 2013, 27: 7933–7940]
- 41 Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, et al. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad (in Chinese). Adv Earth Sci, 2009, 24: 383–391 [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. 地球科学进展, 2009, 24: 383–391]
- 42 Wang H, Luo Y L, Zhang R H. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2011, 35: 1117–1131 [汪会, 罗亚丽, 张人禾. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征. 大气科学, 2011, 35: 1117–1131]
- 43 Zhang H, Yang B Y, Peng J, et al. The characteristics of cloud microphysical properties in east Asia with the CloudSat dataset (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2015, 39: 235–248 [张华, 杨冰韵, 彭杰, 等. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究. 大气科学, 2012, 39: 235–248]
- 44 Clothiaux E E, Moran K P, Martner B E, et al. The Atmospheric Radiation Measurement program cloud radars: Operational modes. J Atmos Oceanic Technol, 1999, 16: 819–827
- 45 Peng J, Zhang H, Shen X Y. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2013, 37: 91–100 [彭杰, 张华, 沈新勇. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究. 大气科学, 2013, 37: 91–100]
- 46 Yan W, Han D, Zhou X K, et al. Analysing the structure characteristics of tropical cyclones based on CloudSat satellite data (in Chinese). Chin J Geophys, 2013, 56: 1809–1824 [严卫, 韩丁, 周小珂, 等. 利用 CloudSat 卫星资料分析热带气旋的结构特征. 地球物理学报, 2013, 56: 1809–1824]
- 47 Li J M, Huang J P, Yi Y H, et al. Analysis of vertical distribution of cloud in east Asia by space-based lidar data (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2009, 33: 698–707 [李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征. 大气科学, 2009, 33: 698–707]
- 48 Zhang J Q, Chen H B, Li Z Q, et al. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar. J Geophys Res, 2010, 115: 6696–6705
- 49 Tanelli S, Durden S L. CloudSat's cloud profiling radar after two years in orbit: Performance, calibration, and processing. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46: 3560–3573

Summary for “利用 KAZR 云雷达对 SACOL 站云宏观特性的研究”

Cloud macrophysical properties from KAZR at the SACOL

ZHU ZeEn, ZHENG Chuang, GE JinMing^{*}, HUANG JianPing & FU Qiang

Key Laboratory of Semi-Arid Climate Changes with the Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

^{*} Corresponding author, E-mail: gejm@lzu.edu.cn

Clouds are one of the most important components in the climate system through their profound effects on the radiative energy budget. However, due to the lack of accurate representation of clouds in global climate models, they are the major source of uncertainties for the future climate projections. Millimeter wavelength Cloud Radars (MMCRs) are powerful instruments that can resolve vertical structure as well as microphysical properties of clouds. The wavelength of MMCRs, which is shorter than those of weather radars, allows an excellent sensitivity to cloud droplets and ice crystals while being much longer than lidar wavelengths enables MMCRs to penetrate multiple cloud layers. Ka-Band Zenith Radar (KAZR), which has been deployed at the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) since July 2013, has been continuously operated for three years. By applying a cloud mask algorithm that is operationally employed in the Atmospheric Radiation Measurement Program to distinguish radar echoes from noise, we analyze the macrophysical properties of clouds above the SACOL site by using the KAZR observations through 2014. It is shown that the occurrence of cloud base peaks at both 1.5 and 5.5 km while the cloud top peaks at 2.5 and 8.5 km. About 67% of the cloud thickness is within 2 km. The heights of cloud base and top in spring and summer are higher than autumn and winter. The diurnal cycles of cloud top and base are significant in summer and autumn but not in spring and winter. In summer, both the cloud base and top heights increase after sunrise and then decrease from mid-afternoon to midnight, while the cloud base and cloud top heights increase from noon to midnight in autumn. These seasonal features of diurnal changes may be closely related to the cloud formation mechanism and seasonal variations of solar radiation. Clouds over the SACOL can be classified as low, middle and high clouds based on the cloud height and thickness. The monthly mean occurrence of all clouds varies between 44% and 76%. The occurrence of low, middle and high clouds is 13%, 30%, 34%, respectively. The occurrence of middle and high clouds does not show a significant difference except for spring when the high clouds occur more often than middle clouds. Low clouds, however, occur less frequently throughout the year than the other two cloud types. Clouds can also be classified based on the number of cloud layers. Clouds with layers less than three contribute to ~98% of the total clouds and multi-layer clouds occur frequently in summer and autumn. This may be a result of the convection that is more likely to happen in summer and autumn and will induce a vertical distribution of clouds. The cloud base and top heights detected by KAZR, CloudSat and CALIPSO are also compared in this study. We find that the differences in cloud base and top heights between CloudSat and KAZR are less than 0.12 km. The reflectivities detected by CloudSat are comparable with those from KAZR. CloudSat cannot detect clouds with weak signal less than -30 dBZ due to the limitation of its sensitivity. This part of missing clouds can be captured by CALIPSO but CALIPSO lidar signals can be attenuated in thick clouds leading to an overestimation of cloud base.

Ka-Band Zenith Radar (KAZR), signal recognition, cloud macro-physical properties, CloudSat, Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO)

doi: 10.1360/N972016-00857