SACOL站冰云微物理特性的反演

辛悦, 苏婧*, 李旭岗, 胡晓宇, 葛艷铭, 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: jsu@lzu.edu.cn

2019-02-11 收稿, 2019-07-26 修回, 2019-07-29 接受, 2019-09-06 网络版发表

国家自然科学基金(41430425, 41922032, 41875028)和中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2017-72)资助

摘要 冰云是全球分布范围最广的云类型之一, 对地气系统的辐射收支有重要作用. 本文利用兰州大学半干旱气候与环境监测站Ka波段毫米波云雷达2013年8月至2014年7月的观测数据, 结合微脉冲激光雷达观测数据, 分别使用传统经验算法、考虑温度订正的反演算法和KAZR-MPL联合反演算法, 反演了冰云的冰水含量和有效粒径两个微物理量, 形成了云微物理量的反演数据产品. 在此基础上对SACOL站上空云微观特性进行了统计分析, 并结合Fu-Liou辐射传输模式, 模拟了冰云在大气层顶处对长短波辐射通量的影响, 与CERES卫星观测的辐射通量值进行比较, 用以评估不同冰云微物理量的差异对辐射所造成的影响. 结果发现: SACOL站冰云主要出现在2~14 km的范围内, 在7 km处出现频率最高, 达到13.02%; 3种云微物理方法反演的冰水含量相差不大, 均呈现单峰型分布, 概率密度最大处的冰水含量集中在 10^{-3} g/m^3 左右, 而有效粒径的谱分布呈现出较大差异, KAZR-MPL反演算法模拟的冰晶粒径普遍偏大, 也正是由于这种差异, 造成了对大气层顶的短波辐射通量模拟的偏差. 而各种算法对于大气层顶出射的长波辐射模拟效果远好于对短波的模拟, 平均误差为5.04%, 相关系数均大于0.6, 而模拟效果较差的部分, 主要存在于光学厚度较薄的个例当中.

关键词 冰云, KAZR云雷达, 冰水含量, 云滴粒子有效粒径

云是大气层中由水滴或冰晶组成的结合体, 是大气中水循环的核心组成部分, 对地球大气的热量、水分和动量平衡起到关键作用, 它不仅会影响局地短期天气过程, 同时对全球尺度的大气环流和气候变化也有重要影响^[1~3]. 20世纪90年代初第一次IPCC报告^[4]中就提出了云辐射及其反馈效应对气候变化影响的重要性. 研究表明, 云的气候辐射强迫作用要显著大于人为温室气体及气溶胶的强迫效应, 即使云发生很小的变化, 都会对气候系统产生非常显著的影响. 然而, 由于云剧烈的时空变化, 其和辐射、环流也存在复杂的相互作用, 使得云及其反馈效应在气候模拟和预测中一直是一个突出的问题^[5~7].

云微物理特性直接影响了云降水、辐射过程, 对

进行气候研究、选取数值模式中的参数化方案和大气遥感中确定云辐射特征有十分重要的作用. 云微物理特征包括云相态、粒子浓度、粒子谱分布、云水含量、消光系数、有效粒径等. 云微物理量大小及其垂直分布的微小改变, 都可以对云的辐射效应造成显著影响. Slingo^[8]指出云滴有效粒径变化 $2 \mu\text{m}$ 对辐射收支所造成的影响, 与 CO_2 加倍造成的影响几乎相同. 不同组成的云, 由于其粒子相态、形状及含水量等参数的不同, 对地气系统产生的影响也不同. 其中, 冰云是对气候变化和反馈作用有重要影响的一类云, 一般出现在4~15 km的对流层上层和平流层底层之间, 云底温度通常低于 -20°C , 主要由各种不规则的冰晶粒子组成, 在中纬度地区有较为广泛的分布. 冰云一方面可以散

引用格式: 辛悦, 苏婧, 李旭岗, 等. SACOL站冰云微物理特性的反演. 科学通报, 2019, 64

Xin Y, Su J, Li X G, et al. Retrieval of ice cloud microphysical properties at the SACOL (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64, doi: [10.1360/N972019-00104](https://doi.org/10.1360/N972019-00104)

射部分来自太阳的短波辐射,对地气系统起到冷却作用,另一方面能有效地阻挡和吸收温度较高的地表和云下大气所发射的长波辐射,而以自身较低的温度向外发射长波辐射,从而对地气系统起到保温作用^[9~11].冰云中由于冰晶粒子的形状大小、粒子数浓度及含水量的不同,其辐射特征也不同,从而导致了不同地区冰云气候辐射效应的差异.因此,开展云微观物理特性的分析研究,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.

利用地基主动探测仪器,反演云内的微物理性质,是目前云物理学的研究方向之一,并且在国内外已经有了一定的研究进展^[12~27].Atlas^[12]于1954年最先提出利用雷达探测云参数,并结合35 GHz雷达和飞机实测谱数据,得到雷达反射率因子、有效粒径和云内液态水含量三者之间的经验关系,为雷达反演云微物理方法奠定了基础.在此基础上,Liao和Sassen^[13],Liu和Illingworth^[14],Mace等人^[15]针对不同区域,利用飞机观测数据,得出了适用于不同区域的反演经验公式.Hogan等人^[16]结合飞机实测谱分布数据,并结合温度层结信息,得出云内冰水含量、雷达反射率因子和温度之间的经验关系.Wang和Sassen^[17]利用多种地基观测仪器,提出了利用云雷达和激光雷达联合反演冰云微物理特征的方法,并与飞机实测数据进行对比,验证了其准确性.Fueglistaler和Fu^[18]根据雷达反演得到的云微物理数据,计算出云体的加热率,量化了热带地区对流云的辐射效应.

与国外研究工作相比,国内应用云雷达对云的研究起步相对较晚,但随着云在气候系统中的重要性被逐渐认知,以及观测方式的不断改进,近年来陆续开展大量研究工作,取得了一定的研究成果.仲凌志等人^[19,20]概述了国内外云雷达的发展现状及其在云物理研究方面的进展,并使用中国自主研发的Ka波段测云雷达,完成了对云的系统观测.刘黎平等人^[21]利用毫米波测云雷达的探测结果,反演了吉林地区层状云降水的滴谱参数和液态水含量,并与飞机观测资料进行对比.Li等人^[22,23]发现了卷云内一层特殊的边界层,研究了其光学特性和辐射效应,并开发了一套利用云水路径、云顶高度和近地面降水率反演云水含量的算法,与卫星观测比较,分析了其可靠性.Cheng等人^[24]利用机载资料和地基观测资料,研究了积云的夹卷过程,发现了夹卷速率和云微物理量之间的相关关系.Wang等人^[25]利用多波段偏振激光雷达,反演了合肥地区上空

的卷云微物理特性.Zhao等人^[26,27]概述了国际大气辐射测量计划(简称ARM计划)数据集中,9种反演方法计算得到的冰水含量和冰晶有效粒径,并利用毫米波云雷达,讨论了青藏高原上空冰云的物理特性.目前,反演云内微物理特性的反演方法众多,对于特定区域,反演结果的不确定性仍较大^[28].Comstock等人^[28]利用ARM资料集中达尔文测站的雷达观测资料,发现当使用不同反演算法反演云内微物理量时,由于微物理量的差异,对云的短波辐射效应平均可以造成10 W/m²的误差,不同算法之间的加热率差异达到2 K/d.本文利用兰州大学8.6 mm Ka波段毫米波云雷达(Ka-Band Zenith Radar, KAZR)在2013年8月~2014年7月的观测数据,结合微脉冲激光雷达(Micropulse Lidar, MPL),分别使用传统算法,考虑温度订正算法和KAZR-MPL联合反演算法,反演了半干旱区冰云的微物理特性,对比验证了不同算法得到的冰云微物理特性差异,并将反演得到的微物理特性参数输入Fu-Liou辐射传输模式,计算了不同冰云微物理特性参数对大气层顶向上辐射通量的影响,进而与CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System)卫星观测进行了对比,评估了不同算法结果的优劣,分析了造成差异的可能原因,为SACOL站KAZR云雷达对冰云微物理特性反演算法的合理采用及其辐射效应的准确计算提供了重要依据.

1 数据与方法

1.1 地基雷达观测

本文使用的云雷达数据为兰州大学半干旱气候与环境监测站^[29](Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL)于2013年引进的8.6 mm KAZR观测数据.KAZR工作频率为35 GHz(波长8.6 mm),在水平极化方向上发射,同时在水平和垂直两个极化方向上接收回波的双偏振多普勒雷达,其天线直径为1.82 m,波束宽度0.33°,峰值功率为2.2 kW,在天顶方向观测大气水凝悬浮粒子的回波信号^[3].KAZR云雷达有两种运行模式,分别是“chirp”模式和“burst”模式.“chirp”模式采用脉冲压缩技术,对载频做线性调频,有效提高了脉冲频率,并保持了较小的脉冲宽度,即保持了较好的距离分辨率,并且它在5 km处最小可探测反射率因子为-68 dBZ.“burst”模式发射短脉冲信号,可探测到距地面0.15 km以上的云层,其在5 km处最小可探测反射率因子为-64 dBZ.KAZR的0

级矩数据包括反射率因子、多普勒速度、谱宽、线性退偏比和雷达信噪比。在0级观测基础上,利用Ge等人^[30]提出的云检测新算法,滤除杂波识别了云廓线信息,完成了对应的一级产品。在云廓线的基础上,Ge等人^[31]进一步根据有关冰云的定义标准,结合云顶温度、云底温度和云层中最大雷达回波处的温度,识别了冰云的宏观分布。在此基础上,本文利用传统的经验算法、考虑温度订正的反演算法和KAZR-MPL联合反演算法这3种反演算法,包括结合SACOL站MPL观测的云、气溶胶特征检测和后向散射系数值^[32]与KAZR联合反演得到冰云的冰水含量和有效粒径微物理特性,完成了二级数据产品。

1.2 卫星数据

为了对比验证云辐射效应,检验云微物理参数反演的合理性,本文选取了搭载于美国Aqua极轨卫星上的CERES SSF(Clouds and the Earth's Radiant Energy System, Single scanner Footprint)MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)Edition 4A数据^[33]。该卫星资料结合了CERES辐射通量观测、MODIS云微物理量参数反演结果以及辅助的气象场资料,从而集合形成了一个包含云、气溶胶物理特性反演参数及辐射通量共160个参数的数据产品,广泛应用于地-气辐射平衡和气候变化研究中^[34-36]。本研究主要使用了宽波段地表反照率、太阳天顶角、云分数等变量为Fu-Liou模式提供必要的输入参数,同时利用CERES卫星观测的大气层顶0.2~5.0, 5~100 μm 两个波段范围的辐射通量值与模式的模拟结果进行了对比。CERES在大气层顶的辐射通量是由CERES传感器直接观测得到的,而在地表和其他大气层高度上则是由模式计算得出的,地表和其他大气层高度上的数据包含由于模式的引入所带来的角分布误差、对云的垂直分层和物理特性假设所引起的误差。本文主要以CERES在大气层顶处的长短波辐射通量观测为参照,与利用反演的冰云微物理特性模拟的辐射通量值进行了对比,从而评估冰云参数反演的合理性,并未考虑地表和其他大气层高度上的辐射通量。

1.3 Fu-Liou辐射传输模式

在利用冰云反演的微物理特性计算其辐射效应时,本文使用了Fu-Liou辐射传输模式模拟了冰云对长短波辐射传输的影响^[37]。该模式由付强和廖国男于1993年

开发,可以为大气辐射通量和加热率的计算提供一个快速准确的方法,并被NASA-langley研究中心用于卫星观测大气和地表通量数据的日常业务反演中^[38,39]。Fu-Liou模式主要有3个特点:一是模式中辐射传输方案以delta四流近似为基础;二是运用了相关K-分布方法进行非灰体吸收的参数化;三是模式中云辐射特性的参数化方案,考虑了冰云中非球形冰晶粒子的形态。可以较为准确地模拟冰云对长短波辐射通量的影响。Fu-Liou模式需要输入的气压、温度、水汽和臭氧的垂直分布等大气廓线主要由对应时间段欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)开发的最新的ERA-5再分析数据提供^[40]。ERA-5是ECMWF第五代再分析数据产品,通过ECMWF综合预报系统四维变分同化产生,在垂直方向从大气层顶到地表分为137层,水平分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,时间分辨率为1 h。冰云廓线资料包括冰云的时间、位置,对应的冰水含量、有效粒径等数据,则根据地面观测由3种不同的反演算法结果作为输入。

2 云微物理量反演算法

冰水含量(ice water content, IWC)、冰水路径(ice water path, IWP)和冰云有效粒径(effective particle size, Dge)是本研究中主要反演计算的冰云微物理参量,这些微物理量不仅反映了云的内部结构特征,同时对云的辐射效应也造成了深刻的影响。因此,利用地基雷达准确反演云微物理参数的研究在理论以及实际应用中都有重要意义。

2.1 ARM业务算法

目前冰云微物理参数的反演主要借助经验关系算法来完成,即以大量的实验数据为基础,利用函数拟合的方法建立起测量变量即雷达反射率与待反演变量即冰云微物理参数之间的经验关系,通常为指数形式,即

$$\text{IWC} = aZ^b, \quad (1)$$

其中 a , b 为经验系数,此种方法为经典的Z-IWC关系,被ARM业务算法所采用,以下简称Microbase方法^[41]。不同研究者根据其大量观测数据,统计拟合得出不同的经验系数,表1给出了不同研究者总结的经验系数,本文选取的系数与ARM业务算法相同,为Liu和Illingworth^[14]提出的适用于冰云的反演系数。

已知IWC,根据Fu等人^[42]提出的关于有效粒径与

表 1 IWC与Z关系的经验系数

Table 1 Statistical empirical parameterization algorithms for ice clouds

反演方法	<i>a</i>	<i>b</i>
Liu和Illingworth ^[14]	0.097	0.59
Mace等人 ^[15]	0.104	0.516
Seo和Liu ^[43]	0.078	0.79
Atlas ^[12]	0.064	0.58
Brown ^[44]	0.153	0.74
Aydin ^[45]	0.104	0.483

冰水含量之间的关系,可以计算得到有效粒径:

$$D_{ge} = 192 \times IWC^{0.331}. \quad (2)$$

图1给出了上述6个不同系数公式的计算结果,表2计算了选取不同 a , b 参数计算冰水含量时与本文选取参数计算冰水含量的相对误差,其中第2列为全年所有个例的平均相对误差,第3列为计算的全年总冰水含量,第4列为总冰水含量的相对误差. Seo和Liu^[43]在其文章中分析了表中前3种 a , b 参数时总冰水含量的误差. 参考其方法,利用以上6种参数计算了总冰水含量,并计算了相对误差,如表2所示. SACOL站2013年8月至2014年7月计算全年总冰水含量,各种系数选择下,算得的相对误差在-35%~70%范围内变化,与Seo和Liu^[43]对ARM SGP站的反演误差(-40%~68%)范围相近. Zhao等人^[27]在其文章中分析了12种不同 a , b 参数时,对反演结果不确定的分析,发现由于参数选择带来的不确定在30%~50%,并且最终选择了Liu和Illingworth方法的参数设置. 本文选取的经验系数为Liu和Illingworth利用了全球多个野外观测数据建立的反演经验公式,在之前的研究中被大量学者引用借鉴^[14,18,26,27],认为其得到的云微物理值具有特征性并且其结果是可靠的,故本文选取Liu和Illingworth的经验系数作为传统经验算法系数. 但是,由于选取不同拟合系数,导致计算的冰水含量有一定差异,由此引起的误差在30%~70%范围内(表2).

2.2 Z-IWC-T关系

基于物理量定义与实测数据的订正,可以得出Z-IWC之间经典的指数关系. 但是,从物理意义上分析,云的微物理特性不仅取决于云的动力学特征,还取决于云的相关热力学属性. 所以考虑温度 T 对冰云核化形成的重要作用,在模式中模拟云的微物理过程时也将

图 1 经典IWC与Z关系

Figure 1 The traditional relationship between IWC and reflectivity Z

表 2 选取不同 a , b 参数计算时的冰水含量的相对误差

Table 2 Relative error of different algorithms

反演方法	平均相对误差(%)	全年总冰水含量(g/m³)	总冰水含量误差(%)
Liu和Illingworth ^[14]	—	2.37×10^5	—
Mace等人 ^[15]	42.68	2.59×10^5	9.18
Seo和Liu ^[43]	-50.15	2.14×10^5	-9.71
Atlas ^[12]	-31.66	1.56×10^5	-33.99
Brown ^[44]	6.12	3.99×10^5	68.48
Aydin ^[45]	65.19	2.64×10^5	11.36

温度作为重要参数,引入云微物理过程中. 在Met Office Model中,采用如下公式描述IWC与 Z 和 T 的关系:

$$\log_{10} IWC = 0.06Z - 0.0212T - 1.92. \quad (3)$$

Hogan等人^[16]结合飞机实测谱分布数据,利用线性回归和最小二乘法,对于不同波段雷达,给出了不同Z-IWC- T 关系式,分析了大气温度在云微物理反演中的作用,此方法也被ARM中ACRED算法^[46]所采用. 本文利用公式(3)根据Hogan等人^[16]针对35 GHz雷达的反演系数,对冰云的微物理特性进行了计算,文中将该方法称为Hogan方法. 但是由于算法的局限性,其无法反演有效粒径这一物理量.

2.3 KAZR-MPL联合反演算法

除去以上介绍的利用云雷达单独反演冰云微物理参数的方法,Delanoë和Hogan^[47], Wang等人^[17]考虑不

同仪器的优劣特点,发展了利用多仪器联合反演云内微物理参数的方法,例如利用云雷达、微脉冲激光雷达、云高仪和红外光度计等联合反演云内微物理参数.通过假定云内粒子谱分布和粒子形状,可以利用雷达反射率因子和激光雷达后向散射系数(或消光系数),反演云内冰水含量和有效粒径,以下简称为联合算法(文中将该方法称为Combine算法).

在反演过程中,最重要的是假设冰晶的形态和粒子谱分布.根据Fu^[42]提出的利用IWC和Dge参数化消光系数的方法,假设粒子的形态为随机导向的平板六边形,在冰云中,激光雷达的消光系数与冰水含量,粒子有效粒径存在以下的关系:

$$\sigma = \text{IWC} \left(a_0 + \frac{a_1}{\text{Dge}} \right). \quad (4)$$

这里 a_0 和 a_1 都是与波长有关的系数,不同波长的激光雷达,其对应的系数均有所不同.本文使用的是527 nm波长的微脉冲激光雷达,根据Fu^[42]文中的对应的激光雷达波长,本文选取的 $a_0 = -0.303108 \times 10^{-4}$, $a_1 = 2.51805$.

假设冰晶为修正的伽玛分布,并且在35 GHz雷达波长处,瑞利近似是适用的,对于非球形粒子的雷达反射率因子近似等于它的冰相的体积雷达反射率因子 Z_i ,根据Wang等人^[17]提出的方法,IWC, Dge和 Z_i 存在以下关系:

$$Z_i = C \frac{\text{IWC}}{\rho_i} \text{Dge}^b, \quad (5)$$

其中, ρ_i 为冰晶密度, C 和 b 均为拟合系数.为了得到更好的拟合效果,将有效半径分为3个区间^[14],分别求出各个区间对应的拟合系数,随着有效粒径的逐渐增大,拟合系数 C 和 b 的数值也逐渐变大.

KAZR的雷达反射率因子 Z_e 与体积等效冰相反射率因子 Z_i 存在以下关系:

$$Z_e = Z_i \left(K_i^2 / K_w^2 \right), \quad (6)$$

其中, K_i^2 和 K_w^2 分别为冰晶粒子和水滴的介电常数,对于35 GHz雷达, $K_i^2 = 0.1768$, $K_w^2 = 0.93$.联立公式(5)和(6),可以得到:

$$Z_e = C' \frac{\text{IWC}}{\rho_i} \text{Dge}^b, \quad (7)$$

其中, $C' = C \times (K_i^2 / K_w^2)$.

已知激光雷达的消光系数和雷达反射率因子, a_0 ,

a_1 , C 和 b 均为经验系数,联立公式(4)和(7),就可以反演冰水含量和有效粒径,结合云宏微观物理量信息,从而可以计算出云的辐射效应.本文利用该方法,结合KAZR和MPL资料,反演了云内微物理参数,得到了SACOL站上空冰云的垂直分布特征.

3 结果

3.1 云微物理特性对比

基于上述云微物理反演方法,对2013年8月~2014年7月1年的KAZR和MPL数据进行了处理,分别得到三套云微物理产品,包括Combine, Microbase和Hogan算法得到的冰水含量,以及Combine和Microbase算法得到的冰云有效粒径.

图2为反演得到的各微物理量的概率密度分布图,表征了各物理量整体的分布情况.表3为对应的各物理量的平均值、方差及偏度统计.总体上,3种方法反演的冰水含量平均值相差不大,PDF分布的形状均呈现单峰型分布,冰水含量主要集中在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ g/m}^3$ 之间,但是不同算法的最大概率有一定的差异.与冰水含量的反演结果相比,有效粒径的平均值差异则比较显著,Microbase方法有效粒径主要集中在 $0 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内,Combine算法反演的有效粒径则普遍大于Microbase方法,且分布范围更广,在大粒径区也存在一个峰值.

在冰水含量的反演中,3种方法在小冰水含量处出现的概率均很小,冰水含量小于 10^{-5} g/m^3 的概率小于0.02%,冰水含量在 10^{-3} g/m^3 附近出现的概率最大,但是不同算法之间仍存在一定差异,主要体现在峰值概率和冰水含量平均值上.Combine算法、Hogan算法和Microbase算法对应的最大概率依次增大,且峰值处的冰水含量更向小冰水含量区倾斜,其对应的最大概率分别为0.078%, 0.128%和0.221%,对应的峰值冰水含量分别为1, 0.451和0.341 mg/m^3 . Combine算法计算的冰水含量平均值最大,明显大于其他两种算法,并且,Combine算法的方差最小,反演的冰水含量更为集中,集中在相对较大值的区域,Hogan算法次之,Microbase算法的数据方差最大,且反演的冰水含量值更小.

与冰水含量反演的相似结果不同,不同算法对于有效粒径的反演,却体现出了很大的差异. Microbase算法得到的有效粒径主要集中在小粒径区(有效粒径小于 $100 \mu\text{m}$),在 $27 \mu\text{m}$ 处出现概率最大,达到1.89%,而得到的大粒子很少,且Microbase算法谱分布相对集中,

图 2 冰水含量(a)和冰粒子有效粒径(b)的概率分布图, 其中黑线为Combine算法, 红线为Microbase算法, 蓝线为Hogan算法
Figure 2 The probability density functions (PDFs) of IWC (a) and Dge (b) from Combine (black line), Microbase (red line) and Hogan (blue line)

表 3 各算法平均值、方差及偏度统计

Table 3 Moments of the PDFs of log(IWC) and Dge for each retrieval technique

	log(IWC)			Dge	
	Microbase	Hogan	Combine	Microbase	Combine
平均值	-2.14	-2.12	-2.03	44.27	82.36
方差	0.58	0.45	0.34	685	2712
偏度	-0.10	-0.32	-0.53	1.53	9.53

99%的数据集中在0~100 μm 的范围内. 而Combine算法得到的大粒子数远多于Microbase算法, 其不仅在较小粒径区域内存在一个峰值, 并且在100 μm 左右的大粒子区, 也存在一个相对峰值, 表现为双峰分布, 但是小粒径处的峰值概率更高. 其最大峰值处的概率为0.98%, 对应的有效粒径为38 μm , 在大粒子区域的峰值概率为0.74%, 对应的有效粒径为93 μm . Combine算法有效粒径呈现出双峰值的分布, 可能是由以下原因造成的: 当激光雷达判别的云顶低于云雷达判别的云顶高度时, Combine算法反演得到的云顶位置的有效粒径明显大于Microbase算法在该位置的有效粒径值, Combine算法遗漏了部分云顶信息, 从而使得反演的有效粒径偏大, 出现了其在93 μm 附近的第二个峰值.

图3为冰云在各高度的出现频率及各物理量与高度的联合概率分布图. 全年冰云出现在2~14 km的范围内, 在7 km处出现频率最高, 达到13.02%, 全年云高的平均值为6.88 km. 有0.7%的冰云出现在3 km以下的位置, 这些冰云主要出现在冷季, 地面气温较低, 配合适当的大气环境场, 在较低的高度, 也能形成冰云. 从联

合概率分布图中, 可以更直观地看出各种算法的差异.

与前文结果相似, 有效粒径的谱分布呈现出较大差异, Combine算法分布范围更广, 而Microbase算法数据更集中在小粒子半径区域, 且其出现频率更高. Combine算法反演得到的有效粒径范围从10~160 μm , 最大频率出现在22 μm , 高度为8.5 km处, 其频率达到0.3%. 而Microbase算法在22.5 km处, 达到最大频率0.56%, 在小粒子处, 数据更集中, 且出现的最大频率更大. 3种方法反演的冰水含量分布较为相近, 只是最大频率稍有差异, 并且Microbase算法模拟出了12 km以上冰云的低冰水含量区, 而Hogan算法因为考虑了温度的影响, 对低层低冰水含量区的反演概率偏大. 3种方法反演的冰水含量最大概率均出现在8 km的高度上, Combine, Microbase和Hogan算法的最大概率分别为0.0112%, 0.0343%, 0.0204%, 对应的冰水含量分别为1.35, 0.33和0.51 mg/m^3 .

3.2 云的辐射效应对比

通过微物理量的直观对比, 各种算法展现出了明

图 3 冰云在各高度(地表以上)的出现频率(a)及各物理量与高度的联合概率分布图. (b) Combine算法有效粒径; (c) Microbase算法有效粒径; (d) Combine算法冰水含量; (e) Microbase算法冰水含量; (f) Hogan算法冰水含量
Figure 3 Frequency distribution of cloud height (AGL) (a) and joint Dge-height histogram derived from Combine (b) and Microbase (c). Joint IWC-height histogram derived from Combine (d), Microbase (e) and Hogan (f)

显的差异, 虽然这种直观的对比, 能深刻地表述出各种算法的特征, 但是并不能给出一个定量的判断, 无法确定各种算法的优劣. 除了对物理量进行直接对比, 通过辐射传输模式模拟云的辐射效应, 也可以作为评估工作的一种有力工具. 大气层顶的辐射通量, 可以由卫星直接测量得到, 因此, 研究由各微物理特性所计算得到的大气层顶的辐射通量与卫星观测的辐射通量之间的差异, 则可以有效地评估算法总体的不确定度. 将反演的3套云微物理产品作为输入场, 分别输入Fu-Liou辐射传输模式, 计算由于云微物理特性不同, 所导致的云辐射效应的差异, 并与卫星观测数据对比. 由于Hogan算法无法反演有效粒径, 所以将Hogan算法的冰水含量分别与Combine算法和Microbase算法的有效粒径组合, 输入辐射传输模式, 借此研究冰水含量或粒子有效粒径对云辐射效应的影响.

在卫星与地基观测时空匹配时, 以SACOL站为中心, 选取其周围0.5°范围内卫星过境的数据与同时间地面雷达观测进行了对比. 考虑全年晴天条件, 选取共计136个个例进行模拟, 计算晴空时大气层顶的辐射通量, 并与CERES观测值进行对比, 结果如图4所示.

从图4中可以看出, 在晴空条件下模拟结果与卫星

观测二者关系相关性较好, 长、短波辐射的相关系数均大于0.85, 拟合斜率在1附近, 长波辐射的模拟效果略好于短波. 说明辐射传输模式模拟过程中所输入的大气温湿度, 地表反照率等参数是合理的, 卫星与地基数据对比时的匹配方法是可靠的. 从而也间接地说明有云条件下模拟所产生的差异, 主要是由于云参数的选取所引起的.

图5为卫星观测的大气层顶向上的长波辐射通量与模式反演的长波辐射通量散点图, 蓝线和红线分别代表10%和20%不确定性的范围. 表4为各算法计算得到的长波辐射通量与卫星观测辐射通量的各统计量. 在选取一年的卫星辐射资料时, 要求地面和卫星同时观测到云, 卫星观测的云量大于90%且高云云量大于80%, 地面观测到的为持续时间长, 与大尺度环境场有密切关系的云^[25], 排除掉由于局地天气过程所造成的持续时间短, 云内微物理特性在短时间内急剧变化的云, 尽量保持卫星观测视场内云的均匀性. 总体上看, 各种算法对于大气层顶出射的长波辐射模拟效果较好, 普遍位于20%误差范围内, 平均误差为5.04%, 相关系数均大于0.6. 卫星观测到的全年平均出射长波辐射通量为190.56 W/m², 与其最相近的为Microbase+Hogan

图4 研究期间, 晴空天气下, CERES卫星观测的大气层顶短波辐射通量(a)、长波辐射通量(b)与辐射传输模式计算的大气层顶短、长波辐射通量对比的散点图, 其中红线为拟合曲线, 蓝线为1:1等比例线

Figure 4 At clear sky condition upwards shortwave fluxes (a) and longwave fluxes (b) at the top of the atmosphere as a function of the CERES observed flux for each retrieval. The red line is the linear fitting line, and the blue line is the 1:1 line

图5 卫星观测的大气层顶长波辐射通量与模式反演的长波辐射通量散点图。(a) Combine算法; (b) Microbase算法; (c) Combine+Hogan算法; (d) Microbase+Hogan算法。蓝线和红线分别代表10%和20%不确定性, 单位: W m^{-2}

Figure 5 Upwards longwave fluxes at the top of the atmosphere as a function of the CERES observed LW flux for Combine (a), Microbase (b) IWC from Combine Dge from Hogan (c) and IWC from Microbase Dge from Hogan (d). Blue and red lines represent 10% and 20% uncertainty, respectively. All units are in W m^{-2}

算法, 其平均值为 192.77 W m^{-2} , 差异最大的算法, 其平均值误差也不超过10%。云体向外发射的长波辐射, 主要取决于云体的温度, 相比较之下, 考虑了温度影响的Hogan算法模拟效果更好, 与卫星观测值的相关系数更大, 均方根误差更小。对于误差较大, 不确定性超过20%

范围的点, 主要存在于一些光学厚度较薄的个例中, 可能是由于模拟中云覆盖与实际情况不同, 地面发射的长波辐射能穿透光学薄云, 到达大气层顶, 从而使模拟的大气层顶长波辐射偏大。

图6为卫星观测的大气层顶向上的短波辐射通量

表 4 大气层顶长波辐射通量对比

Table 4 Longwave flux comparison statistics for all observations

算法名称	平均值 (W/m ²)	相关 系数	均方根 误差	相对 误差(%)
Combine	196.64	0.65	26.62	3.44
Microbase	199.91	0.64	26.44	5.40
Combine+Hogan	203.26	0.72	26.12	6.89
Microbase+Hogan	192.77	0.68	23.47	1.44

与模式反演的短波辐射通量散点图。表5为各算法计算得到的短波辐射通量与卫星观测辐射通量的各统计量。总体来说,有云情况模拟的大气层顶向上短波辐射通量小于观测值,而晴空情况下,模拟的大气层顶向上短波辐射通量大于观测值。卫星观测到全年有云情况下大气层顶向上短波辐射通量平均值为337.48 W/m²,4种反演方法得到的结果均小于观测值,且最大误差可达24.61%,其对于短波的模拟效果不如长波。究其原因,也是由于云的微物理特性对于短波的影响更为复杂和显著。云对于短波辐射的影响,主要体现在“云的反照率效应”上,而云内的冰水含量和冰粒子有效粒径的大小,则直接影响了云的反照率,从而影响了到达大气层顶的短波辐射通量。4种方法模拟的短波辐射通量

普遍偏小,说明反演的冰水含量偏小或粒子有效粒径偏大。对比图6(a)与(c)或(b)与(d),表5第1行和第3行(或第2行和第4行),在相同有效粒径情况下,冰水含量改变所引起的短波变化较小。而当冰水含量相同的情况下,有效粒径改变(表5第3列和第4列),则会明显地改变短波辐射通量的大小。如前文所述,Combine算法反演的有效粒径普遍偏大,所以当我们选取粒子有效粒径较小的Microbase方法时,模拟得到的短波辐射通量平均值最接近观测值,并且与观测值的均方根误差最小。综合以上因素,说明粒子有效粒径反演的差异及不确定性,对模拟的短波辐射通量造成了显著的影响。

本文通过进行辐射闭合试验,从大气层顶辐射通量的对比结果来看, Microbase+Hogan算法计算得到的辐射通量与卫星观测最为相近,模拟效果最好。首先,不论长波还是短波辐射通量,其计算全年平均辐射通量与卫星观测的全年平均辐射通量误差最小。其次,在长波模拟结果中, Hogan反演算法模拟结果与卫星观测的相关系数最高, Microbase+Hogan算法与卫星观测的均方根误差明显小于其他算法;在短波模拟中,通过 Microbase算法计算有效粒径结合Hogan算法计算的冰水含量作为输入参数,模拟的结果与卫星观测的短波辐射通量平均误差最小且均方根误差也最小。

图 6 卫星观测的大气层顶短波辐射通量与模式反演的短波辐射通量散点图。(a) Combine算法; (b) Microbase算法; (c) Combine+Hogan算法; (d) Microbase+Hogan算法。蓝线和红线分别代表10%和20%不确定性,单位: W/m²

Figure 6 Upwards shortwave fluxes at the top of the atmosphere as a function of the CERES observed SW flux for Combine (a), Microbase (b) IWC from Combine Dge from Hogan (c) and IWC from Microbase Dge from Hogan (d). Blue and red lines represent 10% and 20% uncertainty, respectively. All units are in W/m²

表5 大气层顶短波辐射通量对比

Table 5 Shortwave flux comparison statistics for all observations

算法名称	平均值 (W/m ²)	相关 系数	均方根 误差	相对 误差(%)
Combine	244.91	0.68	119.67	24.61
Microbase	267.84	0.70	103.79	19.20
Combine+Hogan	247.79	0.68	117.09	24.35
Microbase+Hogan	278.42	0.62	101.62	14.37

4 结论

本文利用SACOL站KAZR云雷达和MPL激光雷达的观测数据,完成了云微物理反演算法,计算了冰水含量和有效粒径等微物理参数,得到了一套高质量的云微观参数数据。根据该数据对2013年8月至2014年7月SACOL站上空云层的微观特性做统计分析,并输入辐射传输模式计算云的辐射效应,主要得到以下结论:

(1) SACOL站冰云主要出现在2~14 km的范围内,在7 km处出现频率最高,达到13.02%,全年云高的平均值为6.88 km。有0.7%的冰云出现在3 km以下的位置,这些低层冰云主要出现在冷季。

(2) 3种云微物理方法反演的冰水含量相差不大,均呈现单峰型分布,冰水含量主要集中在集中 10^{-4} ~

10^{-1} g/m³范围内,而有效粒径的谱分布呈现出较大差异,Combine算法分布范围更广,而Microbase算法数据更集中在小粒子半径区域,且其出现频率更高。

(3) 各种算法对于大气层顶出射的长波辐射模拟效果较好,平均误差为5.04%,相关系数均大于0.6。与观测的长波辐射对比,考虑了温度影响的Hogan算法模拟效果更好,相关系数更大,均方根误差更小。对于误差较大,不确定性超过20%范围的个例,主要为一些光学薄云个例。

(4) 4种反演方法模拟得到的有云情况下大气层向上的短波辐射结果均小于观测值,最大误差可达24.61%,对短波的模拟效果不如长波。这主要是由于粒子有效粒径反演的差异及不确定性,对模拟的短波辐射通量造成了显著的影响。各类反演方法中,Microbase+Hogan算法计算得到的辐射通量与卫星观测最为相近,模拟效果最好。

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,MPL可以探测到精准的云底高度,区分云下气溶胶与云滴粒子。今后将利用KAZR和MPL观测数据,进一步对SACOL站上空云层进行长时间的统计分析,研究气溶胶对云内微物理特性的影响情况,探究云与气溶胶的相互作用,深入开展干旱半干旱地区云物理气候特征的研究。

参考文献

- Ding S G, Shi G Y, Zhao C S, et al. SEM analysis of the changes of carbon layer structure of mesocarbon microbeads heat-treated at different temperatures (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]
- 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 [朱泽恩, 郑创, 葛颀铭, 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]
- Livingston R B H. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment by J. T. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums. *Area*, 1992, 24: 323
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 Atmospheric General Circulation Models. *Science*, 1989, 245: 513–516
- 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]
- Bony S, Colman R, Kattsov V M, et al. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J Clim*, 2006, 19: 3445–3482
- Slingo A. Sensitivity of the Earth's radiation budget to changes in low clouds. *Nature*, 1990, 343: 49–51
- Hartmann D L, Ockert-Bell M E, Michelsen M L. The effect of cloud type on earth's energy balance: Global analysis. *J Clim*, 1992, 5: 1281–1304
- Bony S, Stevens B, Frierson D M W, et al. Clouds, circulation and climate sensitivity. *Nat Geosci*, 2015, 8: 261–268
- Zelinka M D, Randall D A, Webb M J, et al. Clearing clouds of uncertainty. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 674–678
- Atlas D. The estimation of cloud parameters by radar. *J Meteorol*, 1954, 11: 309–317
- Liao L, Sassen K. Investigation of relationships between Ka-band radar reflectivity and ice and liquid water contents. *Atmos Res*, 1994, 34: 231–

- 14 Liu C L, Illingworth A J. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds. *J Appl Meteorol*, 2000, 39: 1130–1146
- 15 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 Atmos*, 2002, 107: 4815
- 16 Hogan R J, Mittermaier M P, Illingworth A J. The retrieval of ice water content from radar reflectivity factor and temperature and its use in evaluating a mesoscale model. *J Appl Meteorol Climatol*, 2006, 45: 301–317
- 17 Wang Z, Sassen K. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements. Part I: Algorithm description and comparison with *in situ* data. *J Appl Meteorol*, 2002, 41: 218–229
- 18 Fueglistaler S, Fu Q. Impact of clouds on radiative heating rates in the tropical lower stratosphere. *J Geophys Res*, 2006, 111: D23202
- 19 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]
- 20 Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, et al. A study of the calibration of the new generation of millimeter-wavelength cloud radar (HMBQ) and its detection capability. *Acta Meteorol Sin*, 2011, 69: 352–362 [仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究. *气象学报*, 2011, 69: 352–362]
- 21 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]
- 22 Li R, Cai H, Fu Y, et al. The optical properties and longwave radiative forcing in the lateral boundary of cirrus cloud. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 3666–3675
- 23 Li R, Guo J, Fu Y, et al. Estimating the vertical profiles of cloud water content in warm rain clouds. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120: 10250–10266
- 24 Cheng M N, Liu C S, Liu Y G. Variation in entrainment rate and relationship with cloud microphysical properties on the scale of 5 m. *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 707–717
- 25 Wang Z, Shishko V A, Konoshonkin A V, et al. The study of cirrus clouds with the polarization lidar in the South-East China (Hefei). *Atmos Ocean Opt*, 2017, 30: 234–235
- 26 Zhao C, Xie S, Klein S A, et al. Toward understanding of differences in current cloud retrievals of ARM ground-based measurements. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117: D10206
- 27 Zhao C, Liu L, Wang Q, et al. Toward understanding the properties of high ice clouds at the Naqu site on the Tibetan Plateau using ground-based active remote sensing measurements obtained during a short period in July 2014. *J Appl Meteorol Climatol*, 2016, 55: 2439–2507
- 28 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 Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 4549–4571
- 29 Huang J, Zhang W, Zuo J, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25: 906–921
- 30 Ge J, Zhu Z, Zheng C, et al. An improved hydrometeor detection method for millimeter-wavelength cloud radar. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 9035–9047
- 31 Ge J M, Zheng C, Xie H L, et al. Midlatitude cirrus clouds at the SACOL site: Macrophysical properties and large-scale atmospheric states. *J Geophys Res: Atmos*, 2018, 123: 2256–2271
- 32 Xie H, Zhou T, Fu Q, et al. Automated detection of cloud and aerosol features with SACOL micro-pulse lidar in northwest China. *Opt Express*, 2017, 25: 30732–30753
- 33 Wang H, Su W. Evaluating and understanding top of the atmosphere cloud radiative effects in Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fifth Assessment Report (AR5) Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) models using satellite observations. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 683–699
- 34 Jian B, Li J, Wang G, et al. The impacts of atmospheric and surface parameters on long-term variations in the planetary Albedo. *J Clim*, 2018, 31: 8705–8718
- 35 Kato S, Loeb N G, Minnis P, et al. Seasonal and interannual variations of top-of-atmosphere irradiance and cloud cover over polar regions derived from the CERES data set. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L19804
- 36 Wielicki B A, Barkstrom B R, Baum B A, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): Algorithm overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 1127–1141
- 37 Fu Q, Liou K N. Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *J Atmos Sci*, 1993, 50: 2008–2025
- 38 Charlock T P, Alberta T L. The CERES/ARM/GEWEX experiment (CAGEX) for the retrieval of radiative fluxes with satellite data. *Bull Amer*

- Meteor Soc, 2010, 77: 2673–2683
- 39 Kato S, Rose F G, Charlock T P. Computation of domain-averaged irradiance using satellite-derived cloud properties. *J Atmos Ocean Technol*, 2005, 22: 146–164
- 40 Hersbach H, Dee D. ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newsletter, 2016, 147. <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>
- 41 Dunn M, Johnson K L, Jensen M P. The Microbase Value-Added Product: A Baseline Retrieval of Cloud Microphysical Properties. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2011
- 42 Fu Q. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. *J Clim*, 1996, 9: 2058–2082
- 43 Seo E K, Liu G S. Retrievals of cloud ice water path by combining ground cloud radar and satellite high-frequency microwave measurements near the ARM SGP site. *J Geophys Res-Atmos*, 2005, 110: D14203
- 44 Brown P R A, Francis P N. Improved measurements of the ice water content in cirrus using a total-water probe. *J Atmos Oceanic Technol*, 1995, 12: 410–414
- 45 Aydin K, Tang C. Millimeter wave radar scattering from model ice crystal distributions. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, 35: 140–146
- 46 Zhao C, Xie S, Klein S A, et al. ARM Cloud Retrieval Ensemble Data Set (ACRED). PNNL; Richland, WA, 2011
- 47 Delanoë J, Hogan R J. A variational scheme for retrieving ice cloud properties from combined radar, lidar, and infrared radiometer. *J Geophys Res: Atmos*, 2008, 113: D07204

Summary for “SACOL站冰云微物理特性的反演”

Retrieval of ice cloud microphysical properties at the SACOL

Yue Xin, Jing Su^{*}, Xugang Li, Xiaoyu Hu, Jinming Ge & Qiang Fu

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: jsu@lzu.edu.cn

Ice clouds are one of the most widely distributed cloud types in the world and play an important role in the radiation budget. The microphysical parameters of ice clouds, such as ice water content, effective radius and particle concentration, have a significant effect on the artificial influences on weather, the calculation of the radiation effect and climate feedback of ice clouds. Because of their unique physical and optical properties, ice clouds play an important and unique role in the radiation budget. Understanding and recognizing the microphysical properties of ice clouds are of great significance for studying the effects of ice clouds on climate change.

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 continuously operated for many years. By using the observation data from KAZR and micropulse lidar (MPL), we compare the microphysical properties of ice clouds, including ice effective particle size (Dge) and ice water content (IWC), which were derived from three algorithms: a traditional algorithm (Microbase), the Z-IWC-T relationship algorithm (Hogan) and the KAZR-MPL retrieval algorithm (Combined). Then, we compute and examine the radiative fluxes using each set of cloud properties as inputs to a radiative transfer model and compare the top-of-atmosphere (TOA) radiative fluxes to the satellite measurements to assess the impact of the differences in the microphysical quantities of different ice clouds on radiation.

Our analysis shows that ice clouds mainly appear from 2 to 14 km and peak by approximately 13.02% at 7 km. The ice water contents retrieved from the three different inversion methods show a unimodal distribution. The ice water content is mainly concentrated in the range of 0.01–10 mg/m³, and the corresponding maximum probability of ice water content is concentrated in the vicinity of 0.1 mg/m³. However, there are some differences between the degrees of data concentration and the peak probabilities of the different algorithms. The effective particle size distributions obtained by the three methods are quite different. The effective particle size of the ice crystal inversion by the Microbase algorithm is unimodal, and the data are mainly concentrated in the small particle radius region of 0–100 μm. The KAZR-MPL algorithm has a wider range of particle distributions, with two peaks at 40 and 96 μm. However, the distribution of the ice effective particle radius shows significant discrepancies, which sometimes translate into large differences in the cloud shortwave radiative effect. Using the results of three different microphysical properties, the longwave and shortwave radiation fluxes at the top of the atmosphere are calculated through the Fu-Liou radiation transfer model. The results show that the longwave radiation fluxes calculated by using different cloud microphysical characteristics are in good agreement with the satellite observation data. The average error is 5.04%, and the correlation coefficients are all greater than 0.6. Compared with the observed longwave radiation, the Hogan algorithm that considers the temperature effect has a better simulation effect, the correlation coefficient is larger, and the root mean square error is smaller. The shortwave radiation is smaller than the observed values in the case of clouds, and the maximum error reaches 24.61%. The shortwave radiation flux simulated by the traditional empirical algorithm is closest to the satellite observations, and its root mean square error is significantly reduced compared with that of the other methods.

ice cloud, Ka-band zenith radar (KAZR), ice water content (IWC), ice effective particle size (Dge)

doi: [10.1360/N972019-00104](https://doi.org/10.1360/N972019-00104)