

基于 CloudSat 资料的洋面非降水暖云空间分布 及云内液相水含量垂直结构

尉钧博, 丁于皓, 劳坪, 刘奇

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 利用 CloudSat 卫星搭载的云廓线雷达(cloud profiling radar, CPR)2007~2009年三年的观测资料, 针对洋面非降水暖云有效廓线样本, 分别对积云(Cu)、层云(St)、层积云(Sc)和高积云(Ac)等四类云型, 分析了其在全球尺度的水平分布特征, 并在此基础上特别考察了非降水暖云液相水含量(liquid water content, LWC)的垂直变化特性. 研究发现, 洋面非降水暖云中四类云型的样本占比从高至低依次为层积云 76.46%、层云 12.48%、积云 7.45%、高积云 3.61%, 层积云在非降水暖云的总覆盖面积中占据主导作用. 在样本量全球标准化后, 四类云型的空间分布形式存在较大差异, 层积云与层云主要集中于北美和南美大陆西侧近岸海域, 积云与高积云则广泛分布于太平洋、大西洋和印度洋的洋面上, 且高值位于大洋中部. 尽管四类云型的生消机制和宏观形态存在很大差异, 但不同云型 LWC 呈现出较为相似的垂直结构. 对经几何厚度标准化后的 LWC 廓线进行比较, 发现在四类典型非降水暖云中, 由云底到云顶 LWC 一致呈现为先增后减的规律. 云体中下部向上近似线性递增的结构基本反映了 LWC 的准绝热增长特性, 而云体上部及云顶附近的向上递减结构明确反映了云顶普遍受到上空干空气侵入混合的强烈影响, 由此导致了自云顶向下逐层衰减的云水蒸发. 以云高和云厚两个参数分类的廓线统计结果还显示, LWC 垂直结构受到云顶高度和云层几何厚度的影响. 云层几何厚度增大时, LWC 由云底到云中的递增结构会变厚, 由云中到云顶的递减结构会变薄. 几何厚度相同但云顶高度不同的云层, 其 LWC 含量也有所不同, 这表明对于特定云型, 在生成及发展过程中, 不同阶段所对应的 LWC 廓线结构也存在差异.

关键词: 非降水暖云; 暖云类型; 全球分布; 液相云水含量; 垂直结构

中图分类号: P407 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.05.002

引用格式: 尉钧博, 丁于皓, 劳坪, 等. 基于 CloudSat 资料的洋面非降水暖云空间分布及云内液相水含量垂直结构[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(5): 559-569.

WEI Junbo, DING Yuhao, LAO Ping, et al. Spatial distributions of oceanic non-precipitating warm clouds and in-cloud vertical structures of liquid water content as revealed by CloudSat measurements [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(5): 559-569.

Spatial distributions of oceanic non-precipitating warm clouds and in-cloud vertical structures of liquid water content as revealed by CloudSat measurements

WEI Junbo, DING Yuhao, LAO Ping, LIU Qi

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-05-10

作者简介: 尉钧博, 男, 1994年生, 硕士生. 研究方向: 洋面暖云的分布与云微物理参数的垂直结构. E-mail: xihupu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘奇, 博士/副教授. E-mail: qliu7@ustc.edu.cn

Abstract: Using cloud profile radar (CPR/CloudSat) data from 2007 to 2009, the horizontal distributions of non-precipitating warm clouds over global oceans were examined and the vertical variation characteristics of LWC (liquid water content) were analyzed for four major warm cloud types, i. e., cumulus (Cu), stratus (St), stratocumulus (Sc) and altocumulus (Ac). It was found that among all oceanic non-precipitating warm clouds, the proportion of each type is stratocumulus (76.46%), stratus (12.48%), cumulus (7.45%) and altocumulus (3.61%). Stratocumulus plays a dominant role in the total coverage area of non-precipitating warm clouds over oceans. After the global normalization of the sample volume, there are also large differences in the spatial distribution patterns among the four types. Stratocumulus and stratus are mainly concentrated in coastal waters near the west of North and South American continents, while cumulus and altocumulus clouds are widely distributed on the Pacific Ocean, Atlantic Ocean and Indian Ocean, and high occurrences generally appear in the central part of each ocean. In spite of distinct formation regimes and morphologies, the vertical structures of LWC show similar patterns among the four types. From the cloud bottom up to cloud top, LWC was found to increase first and then decrease. The approximately linearly increasing structure in the lower and middle part of the cloud column reflects the quasi-adiabatic growth characteristics of LWC. The upward decreasing structure near the upper part and near cloud top clearly reflects that cloud top is generally strongly affected by the intrusion of overhead dry air. The resulting evaporation of cloud water attenuates heavily downward from the cloud top. The LWC vertical structure was found to be affected by cloud top height and cloud thickness. As cloud thickness increases, the upward increasing part becomes thicker, while the upward decreasing part becomes thinner. Clouds with the same thickness but different cloud top heights also have different LWC structures. This indicates that for a particular type of the clouds, there are differences in the LWC structures corresponding to different periods during the cloud's generation and development process.

Key words: non-precipitating warm cloud; warm cloud type; global distribution; liquid water content; vertical structure

0 引言

云作为气候系统中重要的组成部分,在地气水循环中起着重要的作用^[1].同时,云通过吸收和反射太阳短波辐射、发射长波辐射以及吸收地表大气长波辐射,在地气辐射平衡中扮演着重要的角色^[2].云微物理过程的变化可以改变云的形态结构、生命周期以及更大尺度上的空间分布,进而影响云的辐射效应^[3].在全球范围内对云的宏观分布和微物理性质的持续观测,对于改进气候模式和理解云辐射强迫作用具有重要的意义.

描述云的微物理参数主要包括云滴粒径谱 (cloud droplet size distribution, DSD)、云滴有效半径 (droplet effective radius, DER)、云滴数密度 (droplet number concentration, N_c)、液相云水含量 (liquid water content, LWC)、固相云水含量 (ice water content, IWC) 以及云水路径 (cloud water path, CWP) 等.目前针对上述云微物理参数的探测

方法主要包括探空及飞行采样探测、被动式辐射计 (如 MODIS、POLDER、AMSRE 等) 和主动式雷达 (如 CALIOP、CPR 等) 卫星遥感探测.

周毓荃等^[4]利用探空数据和相对湿度阈值法,对不同云的垂直结构特征进行了统计分析. Zhang 等^[5]利用探空资料和卫星遥感数据分析了典型陆地区域的云层垂直分布特征,并以此评估了模式模拟的云层分布. Zeng 等^[6]利用 MODIS、CALIOP 与 POLDER 三种仪器的 DER 数据,比较了代入 CALIOP 算法后三种仪器 N_c 的反演差异,发现 POLDER 反演的 N_c 明显偏大,表明其 DER 反演受云顶气流混合的影响更大. Hu 等^[7]通过将 MODIS 反演所得的 DER 作为 CALIPSO 算法的输入,计算所得 LWC 数值与地基探测结果基本吻合. 周天等^[8]利用两年的地基双波段偏振激光雷达观测资料,统计分析了云体厚度、云底高度和云顶高度等云宏观参数的分布,同时对单层云和多层云在季节变动情况下的垂直分布进行了讨论. 段皓等^[9]利用国

际卫星云气候计划 (ISCCP) 云型资料分析了不同种类云体的云量在不同地区的分布特点与变化特征. Nakajima 等^[10]通过模式假设,模拟了 MODIS 三个探测通道 $1.6\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\ \mu\text{m}$ 、 $3.7\ \mu\text{m}$ 对云层的光学穿透程度,发现 $3.7\ \mu\text{m}$ 的穿透程度最浅, $2.1\ \mu\text{m}$ 波段可穿透的光学厚度为 16, $1.6\ \mu\text{m}$ 可穿透的光学厚度为 28,指示了三通道云参数反演结果对云层垂直变化的近似反映. 谢磊等^[11]利用 MODIS 反演资料,对比了降水暖云和非降水暖云中 DER 在云顶附近浅层的垂直变化规律. Costantino 等^[12]通过 CALIOP 和 MODIS 数据研究了气溶胶对云微物理性质的影响,发现云内气溶胶的增多会有效减小 DER 和 LWP. 综上所述,尽管探空资料较为准确,但其空间覆盖极其有限,无法用于全球尺度云参数分析. 星载被动式辐射计与主动式激光雷达对云层由上及下的穿透深度有限,只能获得云顶附近的微物理参数信息,无法完整准确地获取云层整体的微物理参数信息.

相比于被动式辐射计与主动式激光雷达,以星载云雷达 (CPR/CloudSat) 为代表的主动式卫星探测方式为研究全球范围云层结构提供了全新的视角. 美国宇航局 (NASA) 于 2006 年发射了 CloudSat 卫星,所携带的云廓线雷达 (cloud profiling radar, CPR) 工作在毫米波段 ($3.2\ \text{mm}$). 相对于厘米波与分米波雷达,这种雷达对 $100\ \mu\text{m}$ 以下的云滴更加敏感,可以获得更准确的云检测和云参数特征^[13-16]. 国内外许多学者利用 CPR 数据,对于云的宏观分布和微物理特征开展了大量研究. Nakajima 等^[17]利用 CPR 雷达反射率和 DER 数据,研究了云内云滴凝结和碰并增长过程直至由降水所致消亡的完整液态水云生命史. Massie 等^[18]利用 CPR 数据分析了气溶胶对 IWC 垂直结构的影响,同时发现一氧化碳型吸收性气溶胶增多会导致 IWC 减少. 赵姝慧等^[19]利用 CPR 数据对沈阳地区夏季云体垂直结构及其气候特征进行了研究. 安洁^[20]利用 CPR 数据统计分析了东海洋面及其周边地区的云层频率、云层厚度、云层间隙等相关垂直参数的时空分布特征. 柴乾明等^[21]利用 CPR 数据和 TRMM 数据分析了 2013 年五个热带气旋的风眼及其螺旋云臂的云微物理特征,发现成熟气旋中冰相云主要分布在 $5\ \text{km}$ 以上,而且随海拔升高,DER 减小而 Nc 增加, IWC 呈现先增后减的垂直结构. 尚博等^[22]利用 CPR 数据统计分析了江淮地区和华北地区降水云

与非降水云的垂直结构特征.

目前关于 LWC 垂直结构的研究多采用绝对高度视角,考察 LWC 在一系列海拔高度上的数值特征,相应地,其区域或全球尺度统计结果可反映对流层三维空间中的 LWC 分布情况. 然而该分析方案所获得的实际上是云团内部 LWC 垂直结构及云团在不同高度上出现频率的综合结果,无法确定云体内部 LWC 由云底至云顶的垂直变化规律. 本文的研究将以逐个独立云团为对象,以云层厚度对其进行标准化,实现不同厚度云体的统一比较,以此方式考察 LWC 在云体内部的垂直分布情况.

本文的研究对象限定为洋面暖云,暖云是指处于冻结层 (也即零度层) 之下,完全由液态水滴组成的云团. 相比于陆地,暖云广泛分布于洋面. 洋面暖云的辐射效应在热带和副热带的气候系统中发挥着重要作用,其微物理结构反映了微米级云滴到毫米级雨滴的粒子生长过程及其变化,这些过程与变化和地气辐射收支平衡系统以及气候变化有很深的物理联系^[23]. 所以对于洋面暖云的研究,不仅要关注其宏观分布、几何厚度,还要特别关注云内微物理参数的垂直结构. 另外,由于暖云中发生降水时会导致 Nc 减小,造成 LWC 数值及其垂直结构的大幅变化^[24],并且降水会造成 CPR 雷达信号的强烈衰减以及大尺寸雨滴主导反射率信号,降低了由小尺寸云滴所贡献的 LWC 的反演质量^[25],因此本文的研究对象将集中在洋面非降水暖云,以下将简称为洋面暖云.

1 资料与方法

1.1 CPR 数据简介

云廓线雷达是一部星载云雷达,它搭载在 CloudSat 卫星上于 2006 年升空,专门用于云参数的探测. CPR 的探测波长为 $3.2\ \text{mm}$ (探测频率为 $94\ \text{GHz}$),探测周期 $0.16\ \text{s}$,以非扫描的固定方式进行星下点观测. CPR 最小可探测信号为 $-30\ \text{dBZ}$,水平分辨率为 $1.7\ \text{km} \times 1.4\ \text{km}$. 在垂直高度上, CPR 的每条廓线数据覆盖由地表到 $30\ \text{km}$ 高度范围的低层大气,垂直分辨率 $240\ \text{m}$,共 125 层. 为表述方便,本文中单条廓线中的每一个 $240\ \text{m}$ 层称为一个 bin,它是 CPR 探测数据的基本单元.

鉴于 Cloudsat 卫星在 2009 年之后由于仪器故障和性能参数调整所导致的数据质量波动,为避免数据质量波动造成统计分析中的不确定性,本研究

目前使用了 2007~2009 年三年(产品数据编号一致为 E02)的 CPR/2B-GEOPROF、CPR/2C-PRECIP-COLUMN、CPR/2B-CWC-RVOD 和 CPR/2B-CLDCLASS-LIDAR 等类型的 CloudSat 产品资料. 2B-GEOPROF 资料主要提供云检测 (Imask)、洋面识别 (Sfid) 和冻结层高度 (Fzlev) 参数, 其中 Imask 参数有效数值范围为 0~40, 该参数判定每个 bin 是否有云, 数值越高表示该 bin 中存在云的概率越高. 在 Imask 高于 30 时, 云的误判率低至 0.043^[26], 因此将 Imask 大于等于 30 的 bin 视为有云; Sfid 参数判断廓线是否处于洋面上, 当 Sfid 为 2 时表示该廓线处于洋面; Fzlev 参数源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的再分析资料, 用于配合 CPR 廓线数据进行暖云判别. CPR/2B-CWC-RVOD 资料是基于 CPR/2B-CWC-RO 产品配合 MODIS 光学厚度数据, 通过最优化选择反演所得每个 bin 内的云微物理参数^[27]. CPR/2C-PRECIP-COLUMN 资料主要提供降水标识参数 (Preflag), 当 Preflag 为 0 时, 表示该廓线中不存在降水; CPR/2B-CLDCLASS-LIDAR 资料进一步识别出具有确定云类型的云单体, 在最多十层云单体假定下, 给出每个云单体的云类型判别 (Ctype)、云类型判别质量 (Ctypequality)、云顶高度 (Ctop) 和云底高度 (Cbase) 等参数. 其中云类型总共为八类, 包括卷云、高层云、高积云、层云、层积云、积云、雨层云、深厚对流云. 云类型判别质量因子来自于其模糊逻辑判别算法中的多参数匹配程度, 数值范围从 0 至 1; 数值越大指示越可靠的判别结果, 实际数据中该质量因子基本都在 0.5 以上. 由于云顶高度和云底高度的精度与 CPR 数据的垂直分辨率相关, 因此 CPR 廓线数据 240 m 的垂直分辨率, 云顶高度和云底高度数据相应的精度为正负 120 m.

1.2 暖云单体识别方案

暖云单体的筛选流程如图 1 所示. 筛选流程大致可分为两个步骤, 第一步筛选出孤立暖云廓线 (pure warm cloud profile), 第二步从孤立暖云廓线中识别出暖云单体 (pure warm cloud sample).

第一步: 如图 1 上半部所示, 首先选择在洋面上的非降水廓线, 其次通过廓线中 Imask 值与 Fzlev 的高度判定廓线类型, 每条廓线中只要有一个 bin 的 Imask 大于 30, 该廓线就判定为有云廓线, 廓线中连续有云的 bin 看作是一个云单体. 整条廓线中没有 Imask 大于 30 的 bin, 该廓线被判定为晴空廓

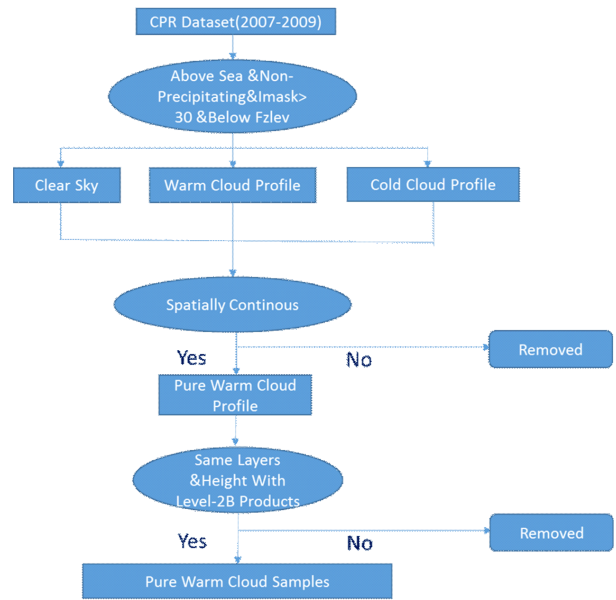


图 1 暖云单体的筛选流程

Fig. 1 The screening process of pure warm cloud samples

线 (clear sky); 廓线中 Imask > 30 的 bin 仅分布在 Fzlev 之上, 该廓线被判定为冷云廓线 (cold cloud profile); 廓线中有 Imask > 30 的 bin 分布在 Fzlev 之下, 该廓线被判定为暖云廓线. 接下来根据空间连续性条件 (spatially continuous), 也即暖云廓线只与晴空或与暖云廓线相邻, 排除了与冷云廓线相邻的假暖云廓线, 由此得到孤立暖云廓线.

第二步: 如图 1 下半部所示, 通过第一步利用 Imask 廓线所识别出的暖云单体, 再通过 LWC 廓线与 Fzlev 高度进行二次识别, 识别条件是每个云单体中 LWC 廓线内所有的有效探测值全部处于 Fzlev 之下, 并取云单体中有效 LWC 探测值最高处 bin 所在的高度, 以及最低处 bin 所在的高度作为云单体的云顶和云底高度. 将云单体数目、云顶高度和云底高度与 CPR/2B-CLDCLASS-LIDAR 所识别出每条廓线里的云单体数目、云顶高度和云底高度进行匹配, 取云单体数目相同, 且云顶高差、云底高差同时在 1km 以内的云单体作为样本. 最终云类型匹配的云单体作为有效暖云单体计入样本统计.

1.3 暖云样本统计

通过上述方案所识别出的洋面非降水暖云总样本共计 8258177 个, 其中单层云 8100279 个, 双层云的单体样本 157998 个. 为了进一步了解洋面暖云的类型分布, 首先对全球洋面的类型进行统计, 结果如表 1 所示. 暖云样本主要集中在四类云型中, 分别是

高级云(Ac)、层云(St)、层积云(Sc)和积云(Cu)四类,且四类云型的样本以单层云为主,这四类云型将作为本研究的样本.由于雨层云(Ns)和高层云(As)数量非常少,无法获得有效统计结果,因而不计入样

本.另外,如表 1 所示,存在极少量的明显云型判别误差,如被判别为卷云型(Ci)或深厚对流云型(Dc)的暖云,这可能与所采用的暖云识别方案有关.

表 1 暖云样本量统计(卷云 Ci、高层云 As、高积云 Ac、层云 St、层积云 Sc、积云 Cu、雨层云 Ns 和深厚对流云 Dc)

Tab. 1 The sample volume of all warm clouds

Cloud Type	Ci	As	Ac	St	Sc	Cu	Ns	Dc
Single layer	0	89	244203	1024391	6249439	575187	6960	10
Upper layer (Double)	0	4	48376	1489	22388	6488	205	1
Down layer (Double)	1	1	5488	3872	36597	32828	160	0
Sum	1	94	298067	1029752	6308424	614503	7325	11

2 结果

2.1 四种暖云的空间分布和几何厚度特征

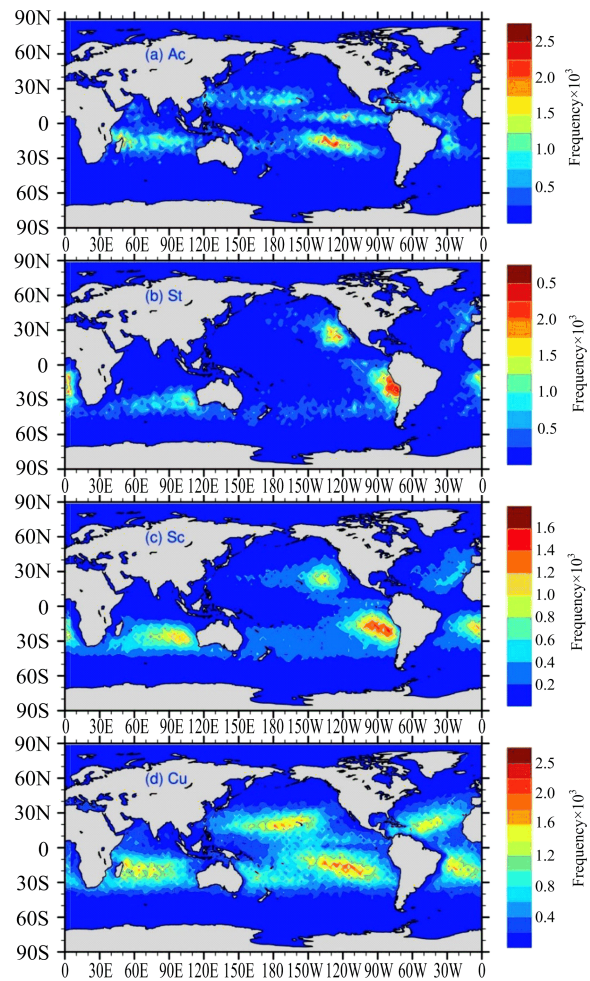
四种类型暖云的样本量及各自的样本占比情况如表 2 所示.

表 2 四类暖云(高积云、层云、层积云和积云)样本量统计

Tab. 2 The sample volume of four major types of warm clouds (Ac, St, Sc, Cu)

Cloud Type	Ac	St	Sc	Cu
Sample Volume	298067 (3.61%)	1029752 (12.48%)	6308424 (76.46%)	614503 (7.45%)

统计结果显示,层积云以 76.46% 的比例占据了大部分暖云样本,而高积云、层云和积云的样本较少,所占比例分别为 3.61%、12.48% 和 7.45%. 四类暖云的标准化全球分布频率如图 2 所示,所采用的空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 填色数值为每类云型在该格点中的样本数量对该类云型全球总样本量比率的 1000 倍. 高积云和积云的密集分布区比较接近,高积云分布较为密集,呈带状分布于 $30^{\circ}E$ 至 $110^{\circ}E$ 的印度洋南部海域、 $90^{\circ}W$ 至 $150^{\circ}W$ 的太平洋海域和 $30^{\circ}W$ 至 $60^{\circ}W$ 的南美洲东侧海域;积云分布较为均一,呈块状均匀地分布于南北纬 30° 以内的热带及副热带洋面上,包括印度洋、太平洋和大西洋的低纬海域. 层云和层积云的密集分布区也比较接近,层积云呈块状分布于 $60^{\circ}E$ 至 $120^{\circ}E$ 的印度洋南部海域、 $120^{\circ}W$ 至 $150^{\circ}W$ 的北美洲近岸海域、 $70^{\circ}W$ 至 $120^{\circ}W$ 的南美洲近岸海域和 0° 至 $30^{\circ}W$ 的非洲西北侧与西南侧近岸海域;层云分布与层积云类似,但分布更加密集也更贴近陆地,也有少量层云稀疏地分布在 $90^{\circ}W$ 至 $170^{\circ}W$ 的太平洋南部海域.



填色数值表示 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点发生频率的 1000 倍

图 2 四类暖云发生频率的全球分布

Fig. 2 Global distribution of the four types of warm clouds

四类暖云的几何厚度按照表 3 的标准进行划分,依据厚度分为八类.厚度分别为 1-bin、2-bin、3-

bin 和 4-bin 的四类薄云因为 bin 数较少,其逐层 LWC 反映出的结构相对特殊,不可互相合并,因此单独划分为四类.而厚度较大的云因为 bin 数较多,其逐层 LWC 反映出的结构类似,同时厚云样本量少,因此每四个 bin 的厚度合并划分为一类,也即厚度为 5~8-bin、9~12-bin、13~16-bin 和大于 16-bin 的暖云另外划分为四类.

按照每类云型划分,每种云厚类别的频率分布如图 3 所示,图中每个格点的数值代表了该类云在该格点的发生频数除以该类云总发生频数(在图中计数方便,再乘以 1000).由频率分布图可以发现,四类暖云的厚度都主要集中在 0.25 km 到 2 km

之间.层积云与层云的厚度相对较小,其中层云中 99.96% 的样本处于 0.25 km 到 2 km 之间,且样本多集中于 0.25 km 到 0.75 km 之间(样本占比 85.79%),层积云中 99.20% 的样本厚度相对均匀地分布在 0.25 km 到 2 km 的区间之内.因此对于层云和层积云的进一步研究,其厚度的范围将限制在 0.25 km 到 2 km 之间.高积云与积云的厚度相对较大,其中高积云有 11.98% 的样本厚度达到 2.25 km 到 4 km 之间,积云也有 4.92% 的样本厚度达到 2.25 km 到 4 km 之间.因此对于层云和层积云的进一步研究,其厚度的范围将限制在 0.25 km 到 4 km 之间.

表 3 四类暖云的几何厚度统计

Tab. 3 The sample volume of four types of warm clouds in terms of geometric thickness

Category	Bin	Thickness /km	Ac	St	Sc	Cu
I	1-bin	0.25	43960	326792	1090402	200257
II	2-bin	0.5	43743	339703	1415161	110230
III	3-bin	0.75	51741	216886	1420660	93016
IV	4-bin	1	42413	97860	1101769	67769
V	5~8-bin	1.25~2	80501	48110	1229987	112967
VI	9~12-bin	2.25~3	30291	399	49775	26037
VII	13~16-bin	3.25~4	5380	2	667	4187
VIII	>16-bin	>4	38	0	3	40

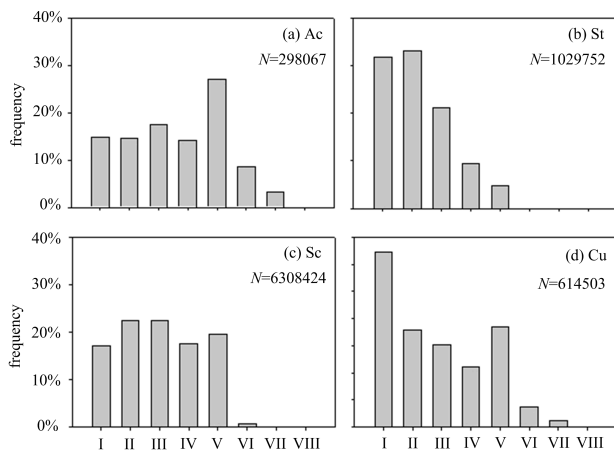


图 3 四类暖云依据几何厚度分类的样本频率分布

Fig. 3 The frequency of four types of warm clouds in terms of geometric thickness

2.2 云高和云厚对 LWC 垂直结构的影响

通过云厚分类明确了四类暖云的几何厚度之后,本研究将进一步探讨 LWC 垂直结构随暖云云顶高度的变化情况.云顶高度的分类情况如图 4 所

示.对于 LWC 廓线的研究,I 型(也即 1-bin 云厚)云由于不具有垂直变化,因而不计入计算.由频率图可知,层云、层积云和积云的云顶其延展高度相对较低,分布在 1 km 到 4 km 之间,高积云与积云的云顶高度相对较高,部分高积云和积云的云顶高度在 4 km 之上.另外,只对薄云(II 型到 V 型)进行云顶高度分类,是因为厚云(VI 型到 VIII 型)云厚较大,在 0~4 km 的高度内可变动的范围较小.

图 5 展示了依据云层厚度标准化的高积云 LWC 垂直结构.图中纵坐标 0 代表云底,1 代表云顶,每个数据点的横坐标代表了该位置的 LWC 均值,沿横坐标正、负两个方向线段的宽度代表了该位置 LWC 数据的标准差.整条廓线由下向上展示了从云底到云中到云顶的云体内部 LWC 结构.其中红色虚线、蓝色虚线、黄色虚线分别代表不同云厚条件下,云顶高度位于 2~3 km、3~4 km 以及高于 4 km 的廓线结构,黑色实线代表不对云顶高度进行划分的总平均廓线.另外,对每个云型不同厚度的整条 LWC 廓线取均值,如表 4 所示,以此表征不同云

型每个云厚条件下廓线中 LWC 的含量。

LWC 廓线整体呈现由云底到云顶先增后减的结构,云体中下部向上近似线性递增的结构基本反映了 LWC 的准绝热增长特性,而云体上部及云顶

附近的向上递减结构明确反映了云顶普遍受到上空干空气侵入混合的强烈影响,由此导致了自云顶向下逐层衰减的云水蒸发。

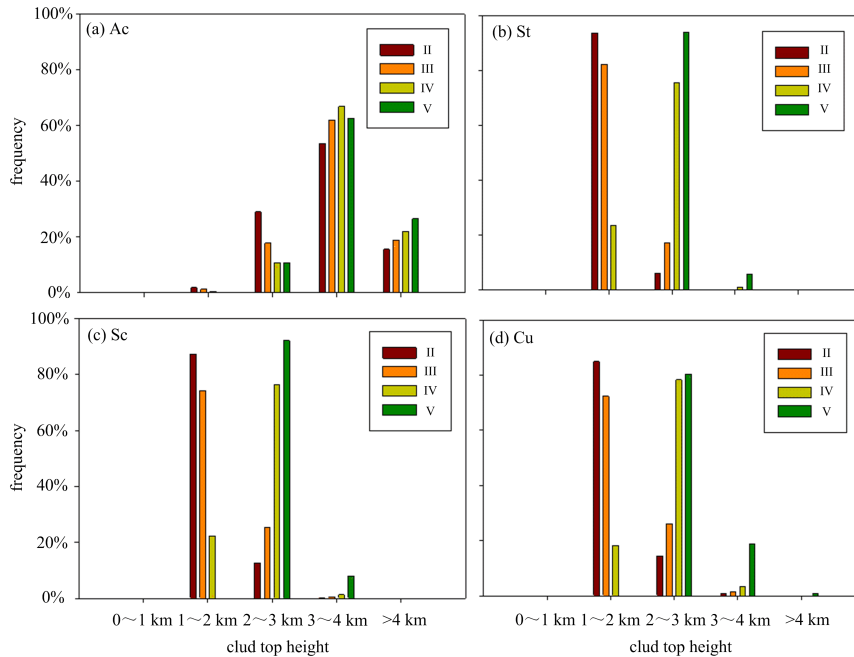


图 4 四类暖云依据云顶高度分类的样本频率分布

Fig. 4 The frequency of four types of warm clouds in terms of cloud top height

表 4 四类暖云不同类别廓线 LWC 均值(单位:mg/m³)

Tab. 4 The columnar mean of LWC for each type of warm cloud profile

Category	Cloud Type					
	II	III	IV	V	VI	VII
Ac	139.47	178.77	221.89	296.41	337.08	354.83
St	173.45	196.03	237.04	303.46		
Sc	169.01	209.08	256.51	333.32		
Cu	161.73	199.80	225.57	284.93	354.93	389.58

云厚影响高积云 LWC 垂直结构. 如表 4 所示, 总体来看,云体厚度变大时,高积云内廓线 LWC 均值增加. 但云内不同位置 LWC 的变化情况不同. 如图 5 所示,云体厚度变大时,云底部 LWC 减少,由 137 mg/m³ 减少为 102 mg/m³,云顶部 LWC 基本维持在约 200 mg/m³. 云内其余位置 LWC 明显增加,以云内 LWC 最大值的增多尤为明显,由 147 mg/m³ 增加为 623 mg/m³. 另外,表 5 展示了高积云不同云厚条件下 LWC 递增结构、递减结构的厚度以及增减结构中 LWC 相对标准厚度变化率的绝

对值. 如表 5 所示,除 4-bin 厚度云体外,云体厚度变大时,云内 LWC 递增结构的厚度整体增大,递减结构的厚度相应减小,这在一定程度上说明云体发展变厚时,云顶受到上空干空气侵入混合的影响程度会变小. 另外,LWC 在增减结构中的递增速率和递减速率随着云厚的变大而同时增加,这说明了随着云体发展,云内中下部云水增长的速率变快,同时云内中上部受干空气气流混合所导致云水减少的速率也会变快.

云顶高度同样影响高积云 LWC 垂直结构. 如

图 5(c)、(d) 所示,红色虚线所代表的相同厚度的云,在云顶高度处于 2 km 到 3 km 时,云内 LWC 的增减结构厚度不变,但云中部 LWC 减小,也即 LWC 增减结构中的递增速率与递减速率同时减小.而图 5(a)、(b) 中云顶高度对 LWC 结构的影响不明显.由此说明厚度较大(4-bin 与 5~8-bin 云厚)的高积云,其 LWC 结构易受云顶延展高度的影响.云顶高度较低时,云内 LWC 增减结构中递增和递减的速率较小.

表 5 高积云 LWC 增减结构的厚度和平均增减速率

Tab. 5 The thickness and changing rate of increasing and decreasing structure of LWC in Ac

Ac	Increasing thickness	Increasing rate / (mg/m ³)	Decreasing thickness	Decreasing rate / (mg/m ³)
II	1.00	4.77	0.00	
III	0.50	115.46	0.50	84.36
IV	0.67	189.72	0.33	286.66
V	0.57	427.99	0.43	429.43
VI	0.73	500.24	0.27	1023.85
VII	0.80	650.65	0.20	2094.65

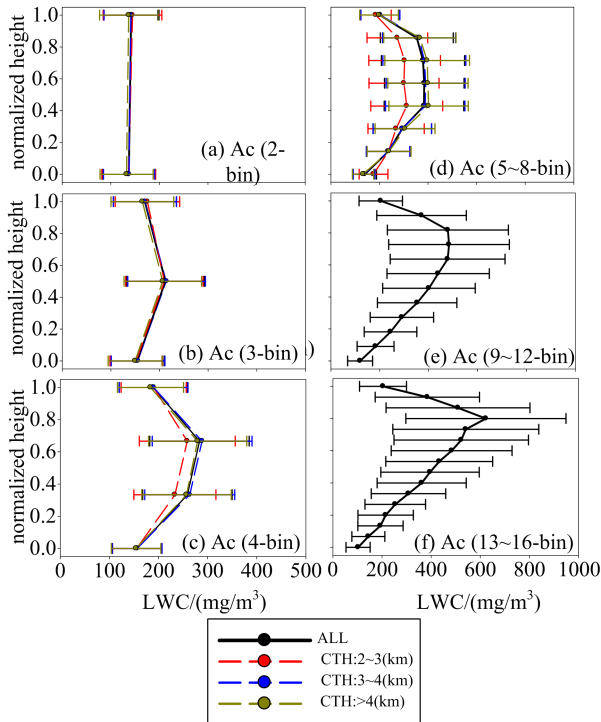


图 5 云厚标准化的高积云 LWC 垂直结构

Fig. 5 The cloud thickness-normalized LWC vertical structure of Ac

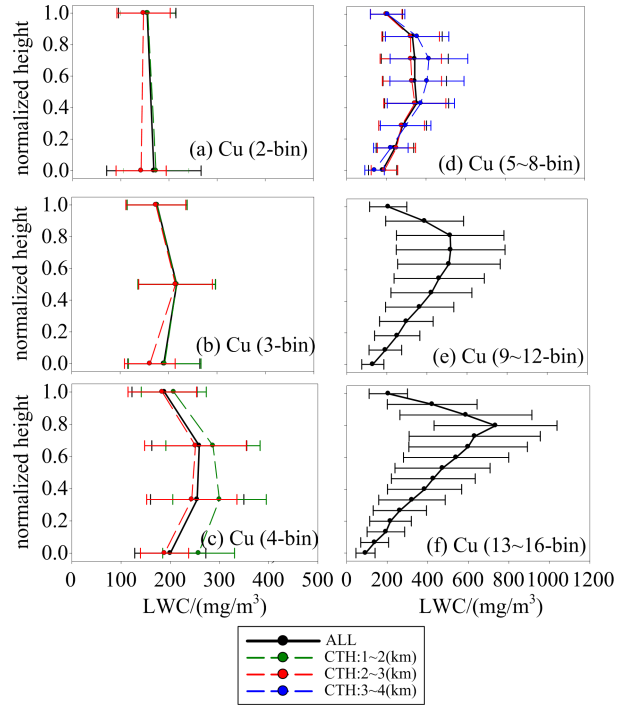


图 6 云厚标准化的积云 LWC 垂直结构

Fig. 6 The cloud thickness-normalized LWC vertical structure of Cu

图 6 给出了依据云层厚度标准化的积云 LWC 垂直结构,其中绿色虚线代表不同云厚条件下,云顶高度位于 1~2 km 的廓线结构.由表 4 可见,除 5~8-bin 厚度的云体外,积云 LWC 廓线均值较高,一定程度上说明积云 LWC 的整体含量高于高积云.比较图 6 和图 5 可以发现,2-bin 云厚的积云,其 LWC 呈现由云底到云顶递减的结构,这在一定程度上说明 2-bin 云厚的积云,其云顶受到上空干空气侵入混合的作用强于云内 LWC 的准绝热增长作用.除 2-bin 云厚外,其余云厚高积云与积云的 LWC 廓线结构基本类似.

云厚同样影响积云 LWC 垂直结构.如表 4 所示,总体来看,云体厚度变大时,积云内廓线平均 LWC 增加,云内不同位置 LWC 的变化情况与高积云相同.如表 6 与表 5 所示,不同云厚的积云与高积云,其云内 LWC 的增减厚度相同,但对于 3-bin 至 8-bin 云厚的云体,积云内 LWC 增减结构中递增速率和递减速率更小;对于 9-bin 至 16-bin 云厚的云体,积云云内 LWC 增减结构中递增速率和递减速率更大.这在一定程度上说明,相同厚度的不同类型云体,云内 LWC 增减结构相似,但云内中下部云水

增长的速率和云上部受干空气气流混合所导致云水减少的速率不同。

表 6 积云 LWC 增减结构的厚度和平均增减速率
Tab. 6 The thickness and changing rate of increasing and decreasing structure of LWC in Cu

Cu	Increasing thickness	Increasing rate /(mg/m^3)	Decreasing thickness	Decreasing rate /(mg/m^3)
II	0.00		1.00	13.86
III	0.50	40.58	0.50	89.50
IV	0.67	87.95	0.33	214.21
V	0.57	283.55	0.43	332.27
VI	0.73	534.14	0.27	1142.17
VII	0.80	802.12	0.20	2645.84

同样地,云顶高度也影响积云 LWC 垂直结构。如图 6(a)所示,2-bin 云厚的积云在云顶高度不同时,LWC 廓线的增减性不同。其中云顶高度位于 1~2 km 的 LWC 廓线由云底到云顶呈现递减的结构,而云顶高度位于 2~3 km 的 LWC 廓线由云底到云顶呈现递增的结构,一定程度上说明对于 2-bin 厚度的积云,其所处的高度增高时,LWC 的准绝热增长过程将占据主导。另外图 6(c)中云顶高度更高的红色虚线 LWC 廓线增长结构的厚度为 0.66,而云顶更低的绿色虚线 LWC 廓线增长结构的厚度为 0.33。同样地,图 6(d)中蓝色虚线 LWC 廓线增长结构的厚度大约为 0.7,而云顶更低的红色虚线 LWC 增长结构的厚度大约为 0.5。图 5(c)、(d)反映了同样的规律。这在一定程度上说明了 4-bin 至 8-bin 云厚的高积云与积云云顶增高时,云内 LWC 结构受准绝热增长的影响更大。

图 7 和图 8 分别展示了依据云层厚度标准化的层云和层积云的 LWC 垂直结构。如表 4 所示,层云和层积云的廓线 LWC 均值高于积云,一定程度上反映层云和层积云 LWC 的整体含量高于积云和高积云。层云与层积云廓线所展示的基本规律与积云相同,LWC 廓线整体呈现由云底到云顶先增后减的规律。如图 6(a)、图 7(a)与图 8(a)所示,三类云在大部分 2-bin 云厚的结构中统一显示了由云底到云顶递减的结构,这与图 5(a)中高积云 2-bin 云厚的递增结构差异明显。这在一定程度上显示出,当 2-bin 云厚的云体在云顶高处于 1~2 km 时,云顶受到上空干空气侵入混合的作用强于 LWC 准绝热增长作用,当云顶高度升高时,LWC 的准绝热增长过程占据主

导,LWC 廓线结构变为由云底到云顶的递增结构。

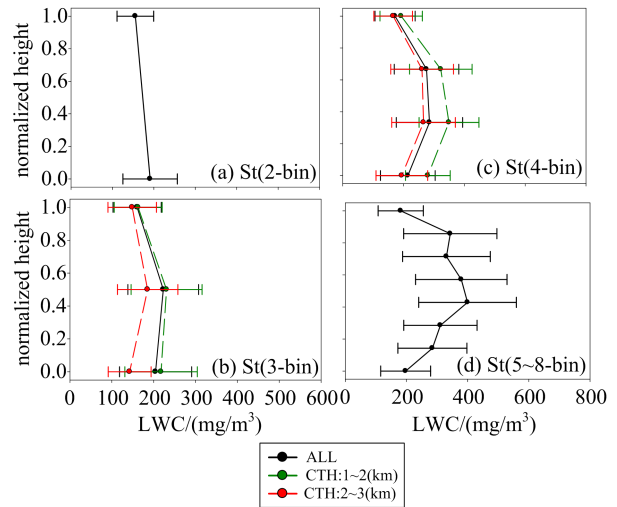


图 7 云厚标准化的层云 LWC 垂直结构
Fig. 7 The cloud thickness-normalized LWC vertical structure of St

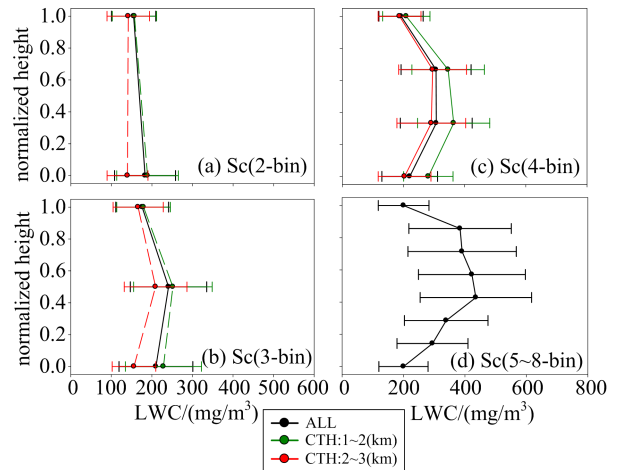


图 8 云厚标准化的层积云 LWC 垂直结构
Fig. 8 The cloud thickness-normalized LWC vertical structure of Sc

表 7 层云 LWC 增减结构的厚度和平均增减速率
Tab. 7 The thickness and changing rate of increasing and decreasing structure of LWC in St

St	Increasing thickness	Increasing rate /(mg/m^3)	Decreasing thickness	Decreasing rate /(mg/m^3)
II	0.00		1.00	35.83
III	0.50	36.74	0.50	124.89
IV	0.33	215.56	0.67	168.69
V	0.43	469.86	0.57	382.83

表 8 层积云 LWC 增减结构的厚度和平均增减速率

Tab. 8 The thickness and changing rate of increasing and decreasing structure of LWC in Sc

Sc	Increasing thickness	Increasing rate / (mg/m ³)	Decreasing thickness	Decreasing rate / (mg/m ³)
II	0.00		1.00	28.05
III	0.50	40.58	0.50	129.77
IV	0.33	262.81	0.67	171.85
V	0.43	548.38	0.57	412.86

云厚同样影响层云和层积云的 LWC 垂直结构. 当云厚变大时, 如图 7 和图 8 所示, 尽管层云与层积云中部 LWC 同样明显增加, 但云底 LWC 基本不变, 基本维持在约 200 mg/m³, 而云顶部 LWC 增加, 由 154 mg/m³ 增加为 200 mg/m³. 如表 7 和表 8 所示, 当云厚变大时, 云内 LWC 增减结构中, LWC 递增速率与递减速率一致增大, 但层云与层积云 LWC 递增的厚度略微减小, 而递减的厚度略微增大, 这说明了尽管云厚变大, 但层云与层积云云顶受干空气气流混合的影响依旧很大.

云顶高度同样影响层云和层积云的 LWC 垂直结构. 如图 5(c)、图 6(c)、图 7(c) 和图 8(c) 所示, 对于 5~8-bin 云厚的四类云, 云顶更高的云体, 其 LWC 廓线增长结构的厚度更大. 而如图 7(a) 所示, 2-bin 厚度层积云的 LWC 的增减性随云顶高度的变化情况与积云类似.

3 结论

CPR/CloudSat 作为首部星载测云雷达, 其主动式探测方式所获取的资料在研究全球云分布和微物理参数垂直结构等方面具有明显的优势. 本文利用 2007~2009 年三年的 CPR 资料, 研究了四类主要的洋面暖云类型, 即高积云、层云、层积云和积云在全球的分布情况. 以云厚标准化的方法, 考察了云内 LWC 的垂直结构特征, 及其受到云层厚度和云顶高度的影响程度, 得到以下主要结论:

(I) 四种类型暖云的样本占比由高至低依次为: 层积云 76.46%、层云 12.48%、积云 7.45%、高积云 3.61%. 四类暖云的全球分布存在较大差异, 但相比而言, 积云和高积云的分布形式较为接近, 层云和层积云的分布形式较为接近. 高积云呈带状分布于印度洋南部海域、太平洋近赤道海域和南美洲

东侧与北侧的大西洋海域. 积云呈块状均匀地分布于南北纬 30° 以内的热带及副热带洋面上, 包括印度洋、太平洋和大西洋的低纬海域. 层积云呈块状分布于印度洋南部海域、北美洲和南美洲的西侧近岸海域与非洲西侧近岸海域, 层云的分布则更加密集也更贴近陆地.

(II) 层积云与层云的几何厚度相对较薄, 云顶高度较低, 85.79% 的层云厚度小于 0.75 km, 99.20% 的层积云厚度小于 2 km, 大部分层云与层积云的云顶高度低于 3 km. 高积云与积云的几何厚度相对较大, 11.98% 的高积云厚度达到 2.25~4 km 之间, 4.92% 的积云厚度也达到了 2.25~4 km 之间, 仅有少部分高积云与积云的云顶达到 4 km 之上.

(III) 四类暖云的 LWC 廓线总体上呈现由云底到云顶先增后减的结构, 云体中下部向上近似线性递增的结构基本反映了 LWC 的准绝热增长特性, 而云体上部及云顶附近的向上递减结构则明确反映了云顶普遍受到上空干空气侵入混合的强烈影响. 尽管结构类似, 但层云和层积云的云内 LWC 整体偏高, 高积云和积云的云内 LWC 整体偏低.

(IV) 不同云型在由云厚所示的不同发展阶段, 其 LWC 垂直廓线也呈现出不一样的结构变化. 当云厚增大时, 高积云与积云由云底到云中的递增结构会变厚, 由云中到云顶的递减结构会相应变薄. 层云与层积云由云底到云中的递增结构会变薄, 由云中到云顶的递减结构会相应变厚. 四类暖云增减结构中的递增速率和递减速率, 会随着云厚增大而同时增加. 云体中部 LWC 在四类云型中都表现为随厚度增大而增加, 差别在于层云和层积云的顶部 LWC 增加, 底部 LWC 基本维持不变, 而积云和高积云的底部 LWC 减少, 顶部 LWC 基本维持不变.

(V) 给定云层厚度, 即云的发展程度接近, 云顶高度也对云内 LWC 的增减结构产生一定的影响. 云顶高度越高, 云体内 LWC 结构受准绝热增长的影响越大. 其中 0.5 km 云厚的积云和层积云, 云顶高度升高时, LWC 由云底到云顶的递减结构会变为递增结构. 而 1.25 km~2 km 云厚的四类暖云, 云顶高度升高时, LWC 由云底到云中的递增结构会变厚, 由云中到云顶的递减结构会相应变薄.

本研究仅关注了 LWC 这一有代表性的云微物理参量, 对于四类典型暖云, 云滴有效半径和云滴数密度等其他微物理参数是否与 LWC 垂直结构特征

类似,光学维度的暖云微物理参数垂直结构如何,云水垂直结构对其垂直积分总量的依赖关系如何等这些问题还值得进一步探究.

参考文献(References)

- [1] HUANG L, JIANG J H, WANG Z, et al. Climatology of cloud water content associated with different cloud types observed by A-Train satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(9): 4196-4212.
- [2] LIU D, LIU Q, QI L, et al. Oceanic single-layer warm clouds missed by the Cloud Profiling Radar as inferred from MODIS and CALIOP measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(21): 12947-12965.
- [3] BAKER M B. Cloud microphysics and climate [J]. *Science*, 276(5315): 1072-1078.
- [4] 周毓荃, 欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. *气象*, 2010, 35(11): 50-58.
- [5] ZHANG J, LI Z, CHEN H, et al. Cloud vertical distribution from radiosonde, remote sensing, and model simulations[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43: 1129-1140.
- [6] ZENG S, RIEDI J, TREPTE C R, et al. Study of global cloud droplet number concentration with A-Train satellites [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(14): 7125-7134.
- [7] HU Y, VAUGHAN M, MCCLAIN C, et al. Global statistics of liquid water content and effective number concentration of water clouds over ocean derived from combined CALIPSO and MODIS measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(12): 3353-3359.
- [8] 周天, 黄忠伟, 黄建平, 等. 黄土高原地区云垂直结构的激光雷达遥感研究[J]. *干旱气象*, 2013, 31(2): 246-253.
- [9] 段皓, 刘煜. 近20年中国地区云量变化趋势[J]. *气象科技*, 2011, 39(3): 280-288.
- [10] NAKAJIMA T Y, SUZUKI K, STEPHENS G L. Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part I: Sensitivity analysis of the MODIS-derived cloud droplet sizes [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(6): 1884-1896.
- [11] 谢磊, 刘奇. 基于卫星遥感的全球洋面降水暖云与非降水暖云的云参数差异[J]. *中国科学技术大学学报*, 2017, 47(12): 1006-1014.
- [12] COSTANTINO L, BRÉON F M. Aerosol indirect effect on warm clouds over South-East Atlantic, from co-located MODIS and CALIPSO observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(1): 69-88.
- [13] WEISZ E, LI J, MENZEL W P, et al. Comparison of AIRS, MODIS, CloudSat and CALIPSO cloud top height retrievals [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L17811.
- [14] IM E, WU C, DURDEN S L. Cloud profiling radar for the CloudSat mission [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2005, 20(10): 15-18.
- [15] KATO S, ROSE F G, SUN-MACK S, et al. Improvements of top-of-atmosphere and surface irradiance computations with CALIPSO-, CloudSat-, and MODIS-derived cloud and aerosol properties [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116: D19209.
- [16] CHAN M A, COMISO J C. Arctic cloud characteristics as derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(10): 3285-3306.
- [17] NAKAJIMA T Y, SUZUKI K, STEPHENS G L. Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part II: A multisensor view [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(6): 1897-1907.
- [18] MASSIE S T, DELANOË J, BARDEEN C G, et al. Changes in the shape of cloud ice water content vertical structure due to aerosol variations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(10): 6091-6105.
- [19] 赵姝慧, 班显秀, 袁健, 等. 8,9月沈阳地区卫星观测云垂直结构的气候特征分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(6): 1640-1647.
- [20] 安洁. 基于 CloudSat 资料的东海及周边云层垂直分布特征[J]. *海洋预报*, 2018, 35(5): 60-73.
- [21] CHAI Q M, WANG W C, HUANG Z W. Analyzing the cloud micro- and macro-physical properties of the cyclone eye wall and its surrounding spiral cloud bands based on CloudSat and TRMM data [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 24(2): 253-262.
- [22] 尚博, 周毓荃, 刘建朝, 等. 基于 Cloudsat 的降水云和非降水云垂直特征[J]. *应用气象学报*, 2012, 23(1): 1-9.
- [23] SUZUKI K, STEPHENS G L. Global identification of warm cloud microphysical processes with combined use of A-Train observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8): L08805.
- [24] DE SZOEKE S P, VERLINDEN K L, COVERT D. Cloud-scale droplet number sensitivity to liquid water path in marine stratocumulus [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(10): 5320-5334.
- [25] STEPHENS G L, VANE D G, BOAIN R J, et al. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(12): 1771-1790.
- [26] MARCHAND R, MACE G G, ACKERMAN T, et al. Hydrometeor detection using Cloudsat-An earthorbiting 94-GHz cloud radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25: 519-533.
- [27] WOOD N. Level 2B radar-visible optical depth cloud water content (2B-CWC-RVOD) process description document [J]. Version, 2008, 5: 1-26.