

## 洋面多层暖云的空间分布及垂直结构特征

齐麟<sup>1</sup>, 刘奇<sup>1</sup>, 尉钧博<sup>1</sup>, 丁于皓<sup>1</sup>, 邓淑梅<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026; 2. 安徽省气象科学研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 利用中分辨成像光谱仪(MODIS)和云廓线雷达(CPR)2008年全年的融合资料, 针对具有多层结构的洋面暖云系统, 研究了其全球尺度的空间分布和垂直结构特征. 通过修正传统的基于云顶温度的暖云判据, 发现洋面暖云单体大多分属于3种主导构型, 包括单层暖云、双层半暖云和双层纯暖云. 统计结果表明, 单层暖云、双层半暖云和双层纯暖云3种构型的占比分别为77.14%, 19.15%和3.71%. 在全球分布上, 3种构型暖云的差异明显, 尤其是分布密集区域迥然不同. 在云顶高度、云底高度及云层厚度等结构参数上, 双层半暖云的下层暖云单体与单层暖云单体的统计特征极为接近, 显示了两类暖云单体在几何结构上的相似性. 这表明双层半暖云中上层冷云的存在并未造成下层暖云结构上的变化, 洋面上的双层半暖云系统中的上层云和下层云可能多源于独立的成云过程. 双层纯暖云构型中上层暖云的结构特征明显异于单层暖云, 下层暖云则与单层暖云较为接近, 但其云顶高度和云层厚度相比单层暖云偏小. 另外, 该构型中的下层暖云越薄, 上层暖云越能向更高更厚发展. 一致表明双层纯暖云系统中上层暖云与下层暖云的发展有一定的制约关系, 两层云在生消变化中具有潜在的物理联系.

**关键词:** 洋面暖云; 多层云; 几何特征; 垂直结构; 全球分布

**中图分类号:** P407      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.12.005

**引用格式:** 齐麟, 刘奇, 尉钧博, 等. 洋面多层暖云的空间分布及垂直结构特征[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(12):1012-1021.

QI Lin, LIU Qi, WEI Junbo, et al. Spatial distributions and vertical structures of multilevel warm cloud systems over global oceans[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(12):1012-1021.

## Spatial distributions and vertical structures of multilevel warm cloud systems over global oceans

QI Lin<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, WEI Junbo<sup>1</sup>, DING Yuhao<sup>1</sup>, DENG Shumei<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

2. Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** The collocated data from quasi-synchronous Aqua/MODIS and CloudSat/CPR measurements during 2008 were used to investigate the spatial distributions and vertical structures of multilevel warm cloud systems over global oceans. By modifying the traditionally warm cloud determination scheme that is based singly on cloud top temperature criterion, it is found that most oceanic warm-cloud units are of three dominant structures, including single-layer warm cloud, double-layer semi-warm cloud and double-layer

**收稿日期:** 2018-01-15; **修回日期:** 2018-05-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(41575019), 安徽省自然科学基金(1708085MD95)资助.

**作者简介:** 齐麟, 男, 1992年生, 硕士生. 研究方向: 大气卫星遥感研究. E-mail: qilin70@mail.ustc.edu.cn

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

warm cloud. The statistical results show that on the global scale, single-layer warm cloud (SWC), double-layer semi-warm cloud (DSC) and double-layer warm cloud (DWC) account for 77.14%, 19.15% and 3.71%, respectively. In the global distribution, the difference between the three configurations of warm clouds is obvious, especially at the geolocation with frequent occurrences. In terms of structural parameters such as cloud top height, cloud base height and cloud thickness, the statistical characteristics of the lower warm cloud in DSC are very close to that of SWC, showing the similarity of the two kinds of warm clouds on the geometric structure. This indicates that the upper cold cloud in DSC does not cause changes in the lower warm cloud, and the upper and the lower clouds may have originated from independent cloud-formation processes. The structure of the upper warm cloud in the DWC configuration is obviously different from that in the SWC, while the lower one is close to that of SWC, but with smaller cloud top height and cloud thickness. In addition, the thinner the lower warm cloud, the stronger the upper warm cloud can develop upward. These results suggest that there is probably a relevance between the upper and lower warm clouds in DWC, and these two cloud layers are closely correlated during their evolution.

**Key words:** oceanic warm cloud; multilayer cloud; geometric features; vertical structure; global distribution

## 0 引言

云覆盖了全球约 68.6% 的地表<sup>[1]</sup>, 它通过反射和吸收太阳短波辐射、吸收地表长波辐射以及发射长波辐射影响地球的辐射平衡, 从而在天气系统的能量收支平衡中起着重要作用<sup>[2]</sup>. 影响云辐射效应的因素在微观层面主要是云滴粒径谱所决定的云微物理性质, 而在宏观层面则包括云覆盖量和垂直分布结构. 大量数值模拟实验和卫星观测资料证实, 云层垂直结构的变化对辐射过程所产生的调节对于大气环流有着非常显著的影响<sup>[3]</sup>. 因此在全球尺度明确云的垂直结构及其分布特征, 对于理解云辐射强迫气候效应具有十分重要的意义.

对于单层云系, 云的垂直结构直接表现为云内粒径谱及云水含量的垂直变化. 但对于垂直方向上互有交叠的多层云系, 除了各层云内的垂直变化, 各层云分别的云顶高度、云底高度以及云层厚度等外部特征构成了描述其垂直结构的主要参量<sup>[4]</sup>. 多层云的观测, 早期多利用探空气球等常规气象探测手段, 相关研究形成了对多层云全球分布的基本认识. 比如 Wang 等<sup>[5]</sup>利用 20 年的全球探空数据, 研究发现多层云体系中双层云占主导, 且洋面多层云的出现频率高于陆面. 在国内, 很多学者开展了陆地站点云特征的分析工作. 比如 Zhang 等<sup>[6]</sup>在 2010 年利用无线电探空仪数据对中国寿县地区的多层云的样本分布, 云高、云厚等垂直结构特征量进行了细致的

统计. 在 2016 年, Zhang 等<sup>[7]</sup>再次使用中国寿县收集的无线电探空仪测量数据, 研究了低层和中层形成的单层和双层云的动力学和热力学. 然而, 探空站点的覆盖局限性, 无法支持获取更具代表性的全球尺度观测数据. 卫星遥感是对地基探空资料的有效补充, 其中被动遥感方式, 包括短波和微波方案都已针对单层云发展形成了有效的云微物理参数反演方法. 但对于多层云, 被动遥感方式实际上无法进行有效甄别, 仅能在单层云假设下给出等效的微物理参数估计. 特别地, 由于短波辐射在云层中的向下快速衰减, 其信号仅对云顶物理参数敏感, 当多层云系统中上层云的光学厚度较大时, 下层云完全被遮蔽, 从而没有任何可观测信息<sup>[8]</sup>.

鉴于以上困难, 很多研究尝试发展了多种方法, 利用被动遥感资料并结合辅助资料进行多层云的识别. 比如 Joiner 等<sup>[9]</sup>结合可见光、近红外观测的云顶气压来识别云的垂直分层情况. Sourdeval 等<sup>[10]</sup>利用地球同步卫星的短波观测数据, 使用最优估计方法实现了双层云的识别和反演. 然而由于探测机理本身的缺陷, 以上基于被动遥感方法的多层云识别结果仍存在较高的不确定性. 相比于被动式探测方法, 以星载雷达为代表的主动式卫星探测方式在多云层探测方面具有绝对优势. 2006 年美国宇航局 (NASA) 发射的 CloudSat 卫星所携带的云廓线雷达 (cloud profiling radar, CPR), 以其较高的信号敏感度 ( $-30\text{dBZ}$ ) 和精细的空间分辨率 (水平方

向 1.5km,垂直方向 240m),为全球范围的云垂直结构研究提供了新的契机<sup>[11-13]</sup>. 基于 CloudSat/CPR 所提供的丰富观测数据,国内外学者对于云的垂直结构特征开展了大量研究. 例如,彭杰等<sup>[14]</sup>利用 CloudSat 资料分析了东亚地区云垂直结构,对东亚地区不同季节的云系的云层高度、厚度以及层数进行了统计. 尹金方等<sup>[15]</sup>对东亚地区降水云与非降水云的垂直结构特征和季节变化特征进行了对比分析. Subrahmanyam 等<sup>[16]</sup>利用 2007~2010 年 4 年的 CloudSat 观测数据,针对全球单层云以及 2~5 层的多层云,揭示了其各自季节性发生频率的全球分布特征. Gao 等 (2014)<sup>[17]</sup>利用 CloudSat 和 CALIPSO 数据对北半球洋面单、多层云进行了统计,结果表明北半球 47.1% 的洋面被单层云覆盖,22.2% 的洋面被双层云所覆盖,三层及三层以上云的分布比例达到了 8.2%. 暖云是整体结构处于零度层(冻结层)以下,完全由液态水滴构成的云团. 相比于陆面暖云,洋面暖云具有高频次的发生率和广泛的覆盖量. Hartmann 等<sup>[19]</sup>研究指出,由于暖云反照率显著高于海表反照率,在热带和副热带洋面上大量生成的暖云,对局地辐射收支以及全球气候系统都具有极为重要的影响. 为了更好地理解洋面暖云在地气系统辐射收支中的作用,除了云层整体的宏观和微观物理性质,对于暖云垂直结构的认识也同等重要.

然而,由于在暖云样本筛选方面的限制,针对暖云垂直结构的大量研究都仅仅关注洋面单层暖云. 比如, Zhou 等<sup>[20]</sup>对全球洋面 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 云水路径反演中涉及的两个 LWC 垂直假设模型(垂直均匀模型和绝热修正模型)有效性进行了验证,其结果事实上揭示了洋面上非降水单层暖云的云水垂直结构特征. 直至目前,相关研究对于洋面多层暖云这一独特的暖云存在形式还未有关注,对其全球分布情况还缺乏了解. 暖云作为低层云系,在零度层以下的空间内可以形成包含多个暖云单体的单一相态云层交叠,也可能与上空冷云(冰云或混合相态云)组合形成多相态的云层交叠. 尤其是后者,在传统的依据云顶温度的暖云样本建立方案中,一般都会被作为冷云而遗漏,从而造成洋面暖云对象本身的非完整性. 基于以上考虑,本研究将以这几类暖云存在形式为研究对象,揭示它们的发生频率及空间分布特征. 利用 CloudSat/CPR 和 Aqua/MODIS 的融合数据,依

据实际存在的暖云交叠情形,将重点关注 3 种暖云构型,分别为单层暖云、双层纯暖云及双层半暖云,后两类是洋面多层暖云的主导存在形式,其中双层纯暖云代表单一相态的双层暖云,双层半暖云代表上空冷云单体与下层暖云单体相伴的双层云系统.

## 1 资料与方法

本研究使用 2008 年全年 MODIS/MAC06 资料与 CPR/2B-GEOPROF 资料,其中 MODIS 资料提供云顶温度(CTT)、光学厚度(COT)、云水路径(CWP)等光谱技术反演的云参数信息,本研究中将主要用到其云顶温度数据. 2B-GEOPROF 资料主要提供雷达反射率廓线(Ze)、云检测廓线(cloud mask)、冻结层高度等参数.

### 1.1 MODIS 和 CPR 数据

MODIS 是搭载于 Aqua 卫星和 Terra 卫星上的摆扫型成像光谱仪,在 0.4~14.5 $\mu\text{m}$  范围内有 36 个探测波段,通过白天时段观测获取的覆盖可见光至红外波段的多光谱信息,MODIS 能够在 1km 的分辨率上获得高质量的云顶温度、云顶高度、云滴有效半径、云层光学厚度等云参数信息<sup>[21-22]</sup>.

云廓线雷达 CPR 是搭载于 CloudSat 卫星上专门用于云层探测的毫米波雷达. CPR 的工作频率位于 94GHz(探测波长 3.2mm),以非扫描的固定方式进行星下点观测,探测周期是 0.16s. CPR 的最小可探测信号为 -30dBZ,因此对尺寸较小的云滴也能有较高的敏感性. 在垂直高度上,CPR 的完整廓线数据覆盖地表以上 30km 厚度的大气,垂直分辨率为 240m,有效探测层数为 125,为表述方便,本文中每 1 层称为 1 个 bin.

本研究直接使用 2B-GEOPROF 产品中的 cloud\_mask 参数判定每个 bin 是否有云. cloud\_mask 的有效数值范围为 0~40,数值越高,表示 bin 中存在云的确信度越高. 研究表明,cloud\_mask 的数值达到 30 和 40,所对应的误判率仅分别为 0.043 和 0.006<sup>[23]</sup>,因此可将 cloud\_mask 大于等于 30 的 bin 视为有云,而对于垂直方向上连续的多个有云 bin,称之为 1 个云单体. 此外,该产品资料中还包含了非 CPR 探测的冻结层高度数据,该数据源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析资料,该数据可用于配合 CPR 廓线数据进行暖云判别.

### 1.2 MODIS 与 CPR 资料融合

在 A-Train 平台多卫星序列中,CloudSat 卫星



紧跟在 Aqua 卫星之后,两者经过同一位置仅仅相差 1min 左右,因此二者对于同一目标的探测时间基本同步<sup>[24]</sup>. MODIS 的横向扫描幅为 2330km, CPR 仅有星下方向探测,无横向扫描,其探测区域处于 MODIS 扫描区域内,由此也保证了二者在空间上的一致性.基于以上两点,MODIS 和 CPR 资料可以进行时空上的匹配融合.

在实际的资料融合处理中,为提高运算效率,本文使用了 MODIS 资料的衍生数据 MAC 资料 (MODIS/Aqua Clouds 1km and 5km 5-Min L2 Wide Swath Subset along CloudSat V2, MAC06S0),直接与 CPR 资料进行融合计算. MAC 数据是截取 MODIS 2330km 横向扫描幅中接近 CPR 星下点轨道的中心窄幅部分(10km 宽度)所形成的 MODIS 子集数据.需要注意的是,由于 CPR 星下点探测位置本身存在横向扰动,并非稳定处于星下点,其在 MODIS 横向扫描范围中(MAC 资料窄轨范围内)的相对位置也始终处于变动之中,匹配处理汇总需要在 11(3)个 1km(5km)MAC 数据中依据最小距离原则,匹配距离 CPR 像素中心最近的 MAC 像素,从而形成了同时包括 MODIS 和 CPR 两组独立探测云参数的融合数据.

1.3 多层暖云判定

利用 CPR 在 240m 垂直分辨率上的云/晴空判别,本研究对多层云进行如下定义;垂直方向上有且仅有 1 个云单体,称之为单层云;有且仅有两个云单体,称之为双层云;以此类推,有且仅有  $n$  个云单体,称之为  $n$  层云.

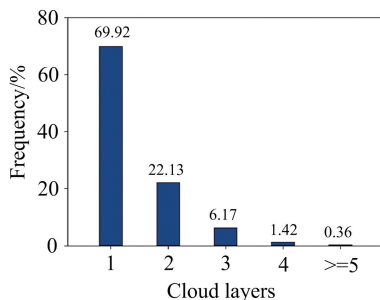


图 1 全球洋面有云样本分层数目统计  
Fig. 1 The frequency of oceanic warm clouds in terms of cloud layers

为了确定合适的研究对象,首先对全球洋面上所有云型的单、多层样本情况进行了统计,结果如图 1 所示.本研究所考察的 2008 年份,以 CPR 像素为单位,全球洋面有云样本总量为 63,720,412,其中

单层云和双层云一起占据 90% 以上的样本量,三层及三层以上云样本占比很低,因此本文将单层云和双层云作为主要研究对象,对三层及以上的云层样本不再做考虑.

对于暖云样本的筛选,以往研究所使用的方案多直接以云顶温度高于 273K 作为判定依据.如前所述,利用云顶热力学温度单一参数,尽管能明确判定纯液态水云,但这一方案将完全遗漏处于多层云系统中(上层为冷云)的下层暖云.而双层云的出现比例超过 20%,这很可能造成暖云样本的大量丢失,也对于准确认识包含暖云单体的多层云垂直结构形成了障碍.如表 1 所示,采用云顶温度判别方案,仅能获得一种包含暖云单体的双层云构型,即双层纯暖云,完全丢失了双层半暖云这类双层云样本,而这一类型的出现频次事实上高于双层纯暖云,在双层云样本中占主要地位(见表 2).

表 1 单层暖云和双层纯暖云样本量统计

Tab. 1 The sample volume of single-layer warm cloud and double-layer warm cloud

暖云构型	单层暖云	双层纯暖云
样本量(占比)	10 977 343(90.88%)	1 102 043(9.12%)

因此,本研究中同时使用 CPR 反射率廓线资料和 MODIS 云顶温度数据,进行暖云识别以及包含暖云单体的多层云判别.首先利用 MODIS 云顶温度数据,将高于 273K 阈值的像素均纳入暖云样本;然后利用 CPR 数据中的云顶高度和冻结层高度数据,进行暖云单体的再次判定,并结合 cloud mask 数据断定云层的数量.依据以上方案,如图 2 所示的 3 种暖云构型,即包含暖云单体的 3 类云层分布形式,都可以归入有效样本.3 种构型分别为:单层暖云,即垂直空间上只有一个暖云单体;双层半暖云,上层云为冷云单体,下层云为暖云单体;双层纯暖云,上下两层云均为暖云单体.

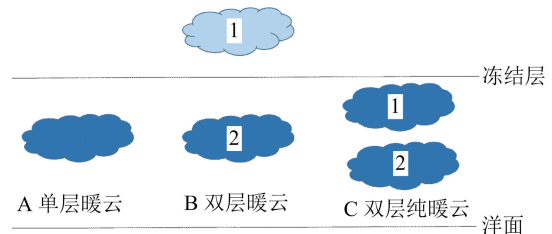


图 2 3 种构型暖云示意图

Fig. 2 Schematic plot of the structure of three typical types of warm clouds

值得指出的是,数据统计中发现,仅考虑云顶温度阈值,中纬度地区存在大量云顶高度异常偏高(超过冻结层)的暖云,这类异常暖云判定可能源于 MODIS 反演偏差,也可能与对流层低层温度局地剧烈变化所引起的冻结层偏差有关(当温度在水平方向存在剧烈变化时,空间分辨率仅为 $\sim 100\text{km}$ 的 ECMWF 冻结层高度格点数据对 CPR 像素位置的代表性显著降低).考虑到潜在的不确定性,这一类样本在本研究中直接剔除.另外,本研究由于关注多层云结构,未再引入仅对暖云单体有效地用于判定孤立暖云系统的样本筛选方案<sup>[2, 25-26]</sup>.而且,受到 CPR 本身的探测限制,地表杂波的影响导致其廓线在 $1\text{km}$ 以内失效<sup>[27]</sup>,本研究有效分析范围的垂直高度下限为 $1\text{km}$ .

利用 cloud mask 数据,240m 垂直分辨率上的云/晴空判别结果,可得到准确的云几何参量数值,包括云顶高度 CTH(cloud top height)、云底高度 CBH(cloud base height)和云层几何厚度 CT(cloud thickness).对于双层暖云,将上层云标记为 1,下层云标记为 2,相应的几何参量标记为 CTH1,CBH1,CT1 和 CTH2,CBH2,CT2.

## 2 结果

### 2.1 3 种构型暖云的全球分布特征

3 种构型暖云的样本量及各自的样本占比情况如表 2 所示.统计结果显示,单层暖云占据了超过 75% 的样本,双层暖云占比低于 25%,其中双层半暖云的发生频率更多,占比接近 20%,双层纯暖云占比相对较少,低于 5%.就双层构型来看,上层冷云与下层暖云所组成的双层构型占据主导,其比例超过 80%,其余近 20% 的双层结构则完全由暖云单体组成.

表 2 3 种构型暖云样本量统计

Tab. 2 The sample volume of three types of warm clouds

暖云构型	单层暖云	双层半暖云	双层纯暖云
样本量(占比)	8 857 296 (77.14%)	2 198 386 (19.15%)	425 915 (3.71%)

3 种构型暖云各自标准化的全球频率分布由图 3 给出,依据定义,每张分布图中全球全部格点的频率数值之和为 1.这种图形模式反映了特定构型暖云的空间分布特征,即在全球水平分布上的非均匀程度.如图 3(a)所示,单层暖云主要位于南北纬 $10^\circ\sim 30^\circ$ 附近的副热带海域,南半球分布要远高于北半

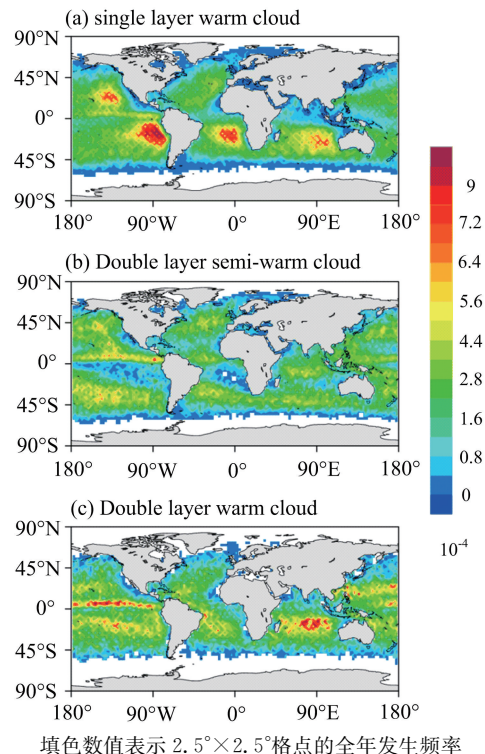


图 3 3 种构型暖云发生频率的全球分布

Fig 3 Global distribution of the three types of warm clouds. 在面积最广的太平洋上,单层暖云在太平洋东北和东南部分布明显偏多<sup>[28-29]</sup>,而在赤道西太平洋和热带复合带的深厚对流活跃区,以及北太平洋风暴轴区的分布则明显偏少.另外,大西洋东南部和印度洋东南部同样为单层暖云密集分布的区域.分布密集的 4 个红色区域,每个格点有约 0.7% 的单层暖云发生频率,是沿海蓝色低值区单层暖云发生频率(低于 0.1%)的数十倍.显然,洋面单层暖云的分布极为不均匀,地域差异较大.从图 3(b)可以看出,双层半暖云近似呈现为带状分布, $45^\circ\text{N}$ , $5^\circ\text{N}$  以及  $40^\circ\text{S}$  附近有较为密集的双层半暖云分布,但其狭长而分散的高值区与单层暖云的分布态势完全不同,并且高值区的格点频率多为 0.5%,远低于单层暖云.除东北太平洋,南半球单层暖云聚集的区域为双层半暖云的分布低值区.双层半暖云的分布较单层暖云更为均匀,南北半球差异不大.图 3(c)显示太平洋上清晰地呈现出 3 条带状高值区,分别位于赤道和南北半球副热带海域.大西洋上双层纯暖云主要呈现为由西向东的递减趋势,高值区位于南北美洲沿岸海域.双层纯暖云发生频率最高的区域则位于印度洋,在  $0^\circ\sim 40^\circ\text{S}$  之间存在最大范围的双层纯暖云高频区.

### 2.2 3 种构型暖云的几何参量特征

明确了 3 种构型暖云的全球分布形式后,本文

进一步对这 3 种构型暖云的云顶高度、云底高度和云层厚度等反映云层垂直结构的几何参量进行了统计分析. 双层半暖云的下层暖云,与单层暖云都是零度层以下的垂直范围内唯一的暖云单体,二者在几

何参量上具有可比性,这两种构型暖云各个参量的频率分布情况如图 4 所示,其中垂直间隔使用 CPR 的 240m 垂直分辨率.

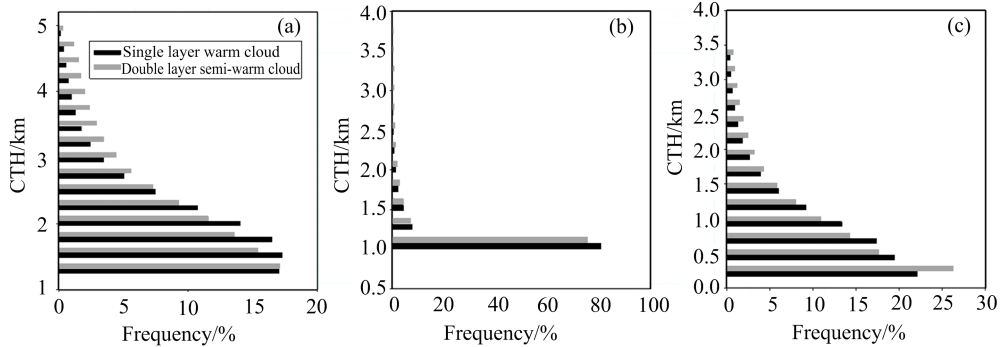


图 4 双层半暖云下层暖云与单层暖云的云顶高度(a)云底高度;(b)和云层厚度;(c)的频率分布

Fig. 4 Cloud top height (a), cloud base height (b) and cloud geometric thickness (c) of the lower warm cloud element in the double-layer semi-warm clouds and single-layer warm clouds

由图 4(a)可以看出,这两种暖云单体的云顶,在 1~5km 的垂直空间内均有分布,但多数分布在 3km 以下. 两种单体的云顶高度频率分布形式较为相似,都呈现为随云顶高度增高频率减小,特别在 2~3km 高度处频率向上快速减小. 相较于单层暖云,双层半暖云的下层暖云单体的云顶高度更容易在更高的高度上,其 3km 以上云顶高度的出现频率显著高于单层暖云. 图 4(b)显示这两种构型暖云的云底分布较为集中,约 80% 都位于 1km 附近,并且云底高度很少达到 2km 高度以上. 同云顶高度分布类似,双层半暖云构型下层暖云单体的云底出现高度较单层暖云略微偏高. 值得注意的是,本研究所采用 CPR 数据的高度下限为 1km,结合该图结果可判断这两种暖云单体的云底实际高度会更低,很可能集中于 500m~1km 高度范围. 图 4(c)中两种暖云单体云层厚度频率分布的基本形式接近,其发生频率随云层厚度从小于 500m 增大至大于 2km 而单调减小,两种单体暖云的厚度均很少超过 2.0km. 特别地,小于 500m 的相对薄云和大于 2km 的相对厚云,都呈现为半暖构型下层单体较单层云更多,而其间的中等厚度云则相反. 另外,由于实际云底高度可能更低,图 4(c) 所示云厚可能存在小于真实云厚的情况. 总体而言,双层半暖云的下层暖云单体在几何结构上同单层暖云不存在明显差异.

双层纯暖云的样本量远低于另外两种暖云构型,而且是由上下两个暖云单体组成,因此单独研究其几何参量的频率分布状况,结果如图 5 所示. 图 5

(a)~(c)给出了上层暖云几何参量的频率分布,其云顶高度绝大多数在 1.8~5km 的范围内,且随着云顶高度变大,其发生频率先增大后减小,在 2.3km 左右处样本频率达到峰值. 绝大多数上层云的云底高度位于 1.6~5km,样本频率分布随云底高度增大先增后减,在 1.8km 左右处达峰值. 上层云的云层厚度大多数在 2km 以内,云层厚度增大,其发生频率快速减小. 图 5(d)~(f)对应给出了下层暖云几何参量的频率分布. 相比于上层暖云单体,双层纯暖云构型中下层暖云单体各几何参量的频率分布与图 4 更为接近,但相较于另外两种暖云单体而言,云顶上限更低,同时云层厚度更薄. 3 种构型中暖云单体的各参量的对比结果由表 3 和表 4 给出.

表 3 单层暖云和双层半暖云下层暖云几何参量统计  
Tab. 3 The geometric parameter statistics of single-layer warm clouds and warm cloud element of double-layer semi-warm clouds

	单层暖云			双层半暖云下层暖云		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
CTH/km	5.9	1.2	2.1	5.6	1.2	2.2
CBH/km	5.2	0.96	1.2	5.2	0.96	1.3
CT/km	4.8	0.24	0.84	4.6	0.24	0.93

表 4 双层纯暖云几何参量统计  
Tab. 4 The geometric parameter statistics of double-layer warm clouds

	单层暖云			双层半暖云下层暖云		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
CTH/km	5.7	1.7	2.9	5.2	1.2	1.9
CBH/km	5.4	1.4	2.4	4.5	0.96	1.2
CT/km	3.6	0.24	0.48	4.1	0.24	0.70



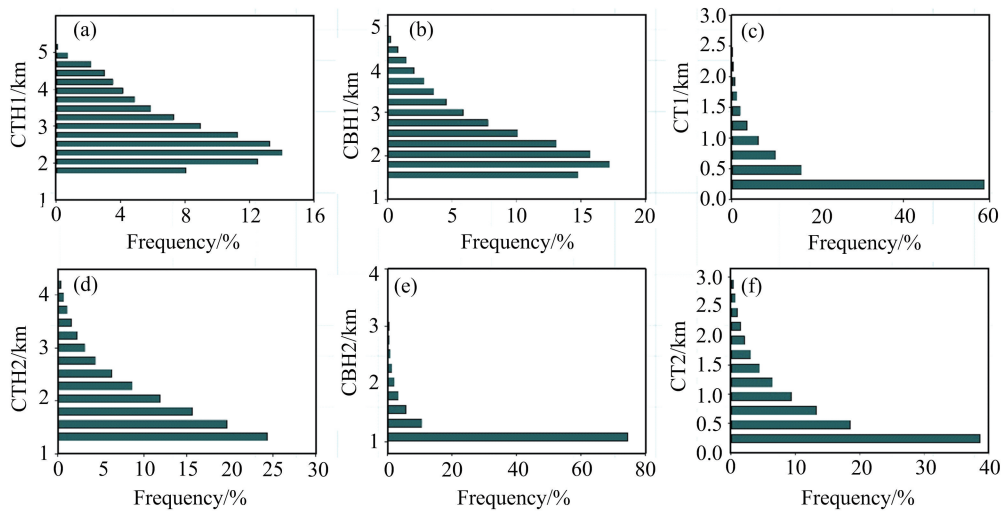


图 5 双层纯暖云上层云顶高度(a)、云底高度(b)、云层厚度(c)和下层云云顶高度(d)、云底高度(e)、云层厚度(f)的频率分布  
**Fig. 5 Cloud top height (a), base height (b), and geometric thickness (c) of the upper cloud element (upper panels), and cloud top height (d), base height (e), and geometric thickness (f) of the lower cloud element (lower panels), in the double-layer warm clouds**

表 3 给出了单层暖云和双层半暖云的云顶高度等几何参量的最大值、最小值以及平均值. 从统计结果可以看出, 两种构型暖云的云底高度的最小值以及平均值都在 1km 左右; 云顶高度均小于 6km, 平均云顶高度位于 2km 左右; 云层厚度最大不超过 5km, 平均厚度为 0.9km 左右. 总体而言, 双层半暖云的下层暖云与单层暖云 3 个几何参量的最大(小)值与平均值都极为接近. 结合图 4, 可以推断双层半暖云中上层冷云的存在并未造成下层暖云结构上的变化, 洋面上的双层半暖云系统中的上层云和下层云可能多源于独立的成云过程. 因此, 双层半暖云的下层暖云与单层暖云可能为性质相近或者相同的暖云类型. 而从表 2 的样本统计可以看到, 占比近五分之一的双层半暖云样本在以往的暖云宏观或微观物理性质研究中被遗漏, 这显然不利于完整暖云样本空间的构建, 同样会对此类研究造成一定的影响.

双层纯暖云上下层暖云几何参量的最大值、最小值以及平均值由表 4 给出. 双层半暖云与另外两种构型暖云相同, 发生于 6km 以下的空间, 下层云底集中. 然而, 双层纯暖云两个暖云单体的厚度的最大值和平均值相对要小得多, 上层云平均云厚约 0.48km, 最厚不超过 3.6km, 下层云平均云厚为 0.7km, 最大值不超过 4.2km. 尤其是下层暖云, 各统计量除了最小值均要小于另外两种构型暖云. 结合图 5, 双层纯暖云的下层暖云与另外两种构型暖云的云顶、云底高度以及云厚的频率分布规律较为接近, 但从统计结果上看 3 个几何参量均有明显差异.

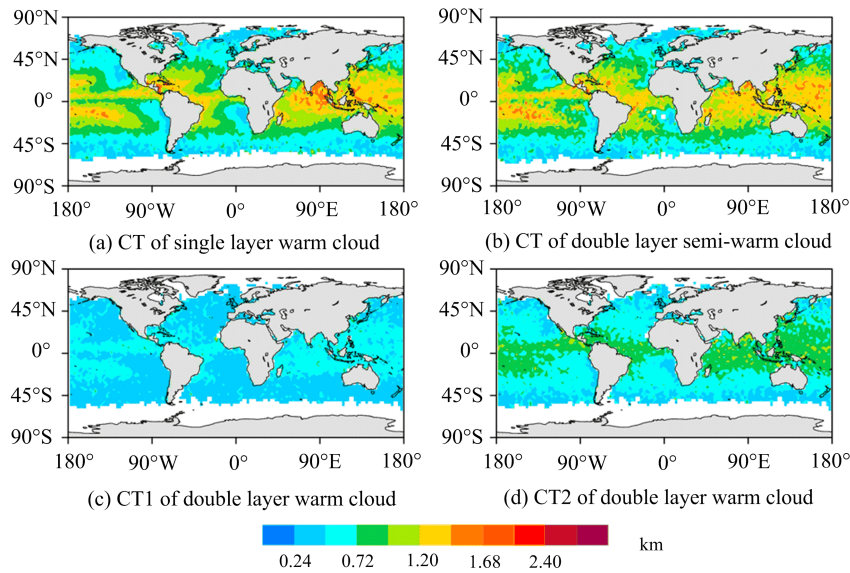
因此, 双层云体系中下层暖云的频率分布都与单层暖云一样具有相似的规律. 区别于双层半暖云, 双层纯暖云系统中上层暖云对下层暖云的发展有一定的制约, 两层云在生消变化中具有潜在的物理联系.

图 6 给出 3 种构型暖云的暖云单体云层厚度的全球分布形态. 如图所示, 各构型暖云厚度的分布与纬度有关, 纬度越高, 暖云单体越薄. 在西太平洋中心区域平均云厚最大, 越靠近陆地, 平均云厚越小. 大西洋西部海域的平均云厚最大, 向东逐渐减小. 东太平洋和印度洋的平均云厚普遍较大.

单层暖云和双层半暖云的暖云单体的平均厚度分布非常相似, 进一步说明两类暖云可能为相似或相同类型的暖云. 在赤道两侧, 暖云单体平均厚度可以达到 1.5km 左右. 双层纯暖云的两个暖云单体相比较而言, 要薄得多, 上层暖云单体基本在 0.72km 厚度以下, 下层暖云单体则基本在 0.96km 以下. 结合图 3 的 3 种构型暖云的分布情况, 单层暖云聚集的区域其平均云厚较低, 而双层半暖云聚集的区域其平均云厚较高.

### 2.3 双层云系上下层云几何参量的相关性

与单层暖云不同, 双层云体系(双层纯暖云和双层半暖云)中存在着两个独立的云单体, 在结构上二者有上下之分, 具有一定的物理联系, 本节关注两个单体的几何参量的相关性, 重点探讨双层纯暖云两个暖云单体的关联性. 双层云系中, 取上层云与下层云厚度差值( $CT1-CT2$ )的大小来判定上下层云的相对厚度情况, 再对其频率分布进行统计, 如图 7 所



填色区域表示  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  区域的格点上 3 种构型暖云平均云层厚度的全球分布

图 6 3 种构型暖云的云层厚度全球分布

Fig 6 Global distribution of cloud thickness of the three types of warm clouds

示. 对于双层纯暖云(图 7(b)), 约四分之一的样本上下层厚度相同, 近一半样本下层云厚度高于上层云厚度; 而对于双层半暖云(图 7(a)), 上层冷云的厚度在大多数情况下要高于下层暖云.

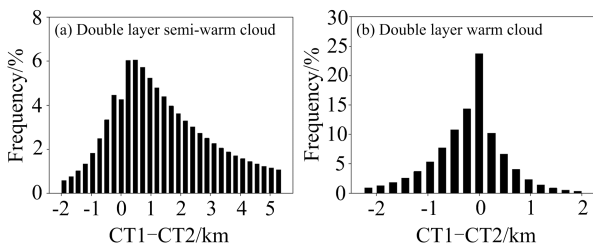


图 7 双层半暖云(a)和双层纯暖云(b)上下层云厚度差值的频率分布

Fig. 7 The frequency distribution of the difference of the upper and lower cloud thickness between double-layer semi-warm cloud (a) and double-layer warm cloud (b)

双层纯暖云上下层皆为单体暖云, 并且下层云

的云底高度稳定在 1km 左右, 与其厚度直接相关, 因此以其云层厚度来表征下层云. 图 8 给出了双层纯暖云中上层云的云顶高度、云底高度以及云层厚度与下层云厚度之间的关系, 填色区域为二维相空间中的联合频率. 从图 8(a)可以看出, 下层云越薄, 上层云的云顶高度分布范围越广, 相应上层云的云顶高度也越高. 随着下层云的厚度增加, 相应的发生频率也随之减小. 图 8(b)给出了上层云的云底高度与下层云厚度的相对变化关系, 随着下层云厚与上层云底高度增加, 会出现明显的发生频率分层, 上层云云底高度大于 2.6km 时发生频率降低了一个数量级. 图 8(c)反映了上下层云层厚度间的关系, 随着上下层云层厚度变大, 发生频率会不断地降低, 并且以不同数量级产生明显分层. 上下层云层厚度的联合频率分布具有高度对称性, 说明二者在几何厚度上相互制约、联系紧密.

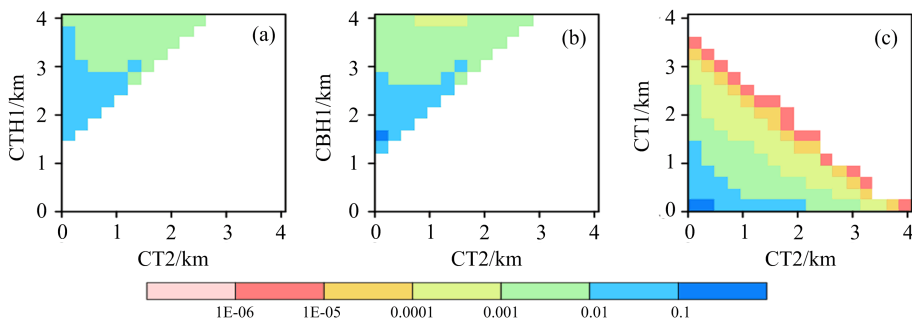


图 8 双层纯暖云上层云的云顶高度(a)、云底高度(b)及云层厚度(c)与下层云厚度的联合频率分布  
Fig. 8 The joint frequency distribution of cloud top height (a), cloud base height (b), cloud thickness (c) of the upper cloud and cloud thickness of the lower cloud of the double-layer warm cloud



### 3 结论

CPR/CloudSat 作为 A-Train 系列的重要成员,相比于探空气球与卫星被动遥感方式,其主动式探测在研究全球云层垂直结构方面具备绝对优势.特别对于处于多层结构中的暖云样本,传统的完全基于云顶温度的判据在实际中存在显著的样本漏判问题.本文利用 MODIS&CPR 融合资料,以全球洋面暖云为研究对象,对传统的云顶温度判据进行修正,结合 CPR 云识别廓线和冻结层高度信息,有效筛选出单层暖云、双层半暖云和双层纯暖云 3 种包含暖云单体的构型.在此基础上对 3 种构型暖云的空间分布及云顶高度、云底高度和云层厚度等几何参量进行了统计分析,得到如下结论:

(I) 单层暖云、双层纯暖云和双层半暖云 3 种暖云构型的样本占比分别为: 77.14%, 19.15% 和 3.71%. 在全球分布上, 3 种构型暖云的差异明显. 单层暖云主要位于南北纬 10°至 30°附近的副热带海域, 南半球洋面上单层暖云的分布远高于北半球, 在太平洋东北部和东南部、大西洋东南部以及印度洋东南部等 4 个区域分布尤为显著; 双层半暖云的分布相对较为均匀, 南北半球差异不大, 高、低频区大致呈带状间隔分布, 特别在单层暖云分布集中的 4 个区域, 双层半暖云的发生频率偏低; 双层纯暖云则在赤道及南北半球副热带海域呈现出带状分布, 并在印度洋中部存在大范围的高频区.

(II) 在云顶高度、云底高度及云层厚度等结构参数上, 双层半暖云的下层暖云单体与单层暖云单体的统计特征极为接近, 显示了两类暖云单体在几何结构上的相似性. 这表明双层半暖云中上层冷云的存在并未造成下层暖云结构上的变化, 洋面上的双层半暖云系统中的上层云和下层云可能多源于独立的成云过程.

(III) 双层纯暖云约四分之一的样本上下层厚度相同, 近一半样本的下层云厚度大于上层云. 双层纯暖云构型中的下层云越薄, 上层暖云越能向更高更厚发展. 该构型中上层暖云的结构特征明显异于单层暖云, 下层暖云则与单层暖云较为接近, 但其云顶高度和云层厚度相比单层暖云偏小. 以上结果一致表明, 双层纯暖云系统中上层暖云与下层暖云的发展有一定的制约关系, 两层云在生消变化中具有潜在的物理联系.

总体而言, 双层半暖云的下层暖云单体与单层

暖云在几何结构上具有高度相似性, 对于暖云宏观和微观物理性质的研究, 样本占比近 20% 的双层半暖云样本不可被忽略, 而双层纯暖云上下层暖云的物理联系以及它们在微物理性质上的异同, 值得进一步探究.

#### 参考文献(References)

- [1] ROSSOW W B, SCHIFFER R A. ISCCP cloud data products[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1991, 72(1): 2-20.
- [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: 12947-12965.
- [3] SLINGO A, SLINGO J M. The response of a general circulation model to cloud longwave forcing Part 1: Introduction and initial experiments [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 114: 1027-1062.
- [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, (11): 50-58.  
ZHOU Yuquan, OU Jianjun. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteorological Monthly, 2010, (11): 50-58.
- [5] WANG J, ROSSOW W B, ZHANG Y. Cloud vertical structure and its variations from a 20-yr global rawinsonde dataset[J]. Journal of Climate, 2000, 13: 3041-3056.
- [6] ZHANG J, CHEN H, LI Z, et al. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115: D00K30; doi: 10.1029/2010JD014030.
- [7] ZHANG J, ZHANG H, CHEN H, et al. Dynamic and thermodynamic features of low and middle clouds derived from Atmospheric Radiation Measurement Program mobile facility radiosonde data at Shouxian, China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(1): 21-33.
- [8] DESMONS M, FERLAY N, RIEDL J, et al. A global multilayer cloud identification with POLDER/Parasol [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56: 1121-1139.
- [9] JOINER J, VASILKOV A P, BHARTIA P K, et al. Detection of multi-layer and vertically-extended clouds using A-train sensors[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3: 233-247.

- [10] SOURDEVAL O, LABONNOTE L C, BARAN A J, et al. A methodology for simultaneous retrieval of ice and liquid water cloud properties. Part I: Information content and case study[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141: 870-882.
- [11] CHANG F L, LI Z. A new method for detection of cirrus-overlapping-water clouds and determination of their optical properties[J]. Journal of the Atmospheric Sciences 2005, 62: 3993-4009.
- [12] CHANG F L, LI Z. A near-global climatology of single-layer and overlapped clouds and their optical properties retrieved from Terra/MODIS data using a new algorithm[J]. Journal of Climate, 2005, 18: 4752-4771.
- [13] WIND G, PLATNICK S, KING M D, et al. Multilayer cloud detection with MODIS near-infrared water vapour absorption band[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49:2315-2333.
- [14] 彭杰, 张华, 沈新勇. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究[J]. 大气科学, 2013, 37 (1): 91-100.
- PENG Jie, ZHANG Hua, SHEN Xinyong. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37 (1): 91-100.
- [15] 尹金方, 王东海, 翟国庆, 等. 基于星载云雷达资料的东亚大陆云垂直结构特征分析[J]. 气象学报, 2013, 71(1):121-133.
- YIN Jinfang, WANG Donghai, ZHAI Guoqing, et al. A study of cloud vertical profiles from the Cloudsat data over the East Asian Continent [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(1):121-133.
- [16] SUBRAHMANYAM K V, KUMAR K K. CloudSat observations of multi layered clouds across the globe [J]. Climate Dynamics, 2017, 49: 327-341.
- [17] GAO W, SUI C H, HU Z. A study of macrophysical and microphysical properties of warm clouds over the Northern Hemisphere using CloudSat/CALIPSO data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119: 3268-3280.
- [18] CHARLSON R J, LOVELOCK J E, ANDREAE M O, et al. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate[J]. Nature, 1987, 326(6114): 655-661.
- [19] HARTMANN D L, SHORT D A. On the use of earth radiation budget statistics for studies of clouds and climate [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1980, 37(6): 1233-1250.
- [20] ZHOU L, LIU Q, LIU D, et al. Validation of MODIS liquid water path for oceanic nonraining warm clouds: Implications on the vertical profile of cloud water content [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121: 4855-4876.
- [21] ACKERMAN S A, HOLZ R E, FREY R, et al. Cloud detection with MODIS. Part II: Validation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25: 1073-1086.
- [22] HOLZ R E, ACKERMAN S A, NAGLE F W, et al. Global Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) cloud detection and height evaluation using CALIOP [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: D00A19; doi: 10.1029/2008JD009837.
- [23] 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.
- [24] CHAN M A, COMISO J C. Cloud features detected by MODIS but not by CloudSat and CALIOP [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(24): L24813; doi: 10.1029/2011GL050063.
- [25] SCHUMACHER C, HOUZE JR R A. The TRMM precipitation radar's view of shallow, isolated rain[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42 (10): 1519-1524.
- [26] LIU C, ZIPSER E J, CECIL D J, et al. A cloud and precipitation feature database from 9 years of TRMM observations[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(10): 2712-2728.
- [27] LIU D, LIU Q, ZHOU L. Underestimation of oceanic warm cloud occurrences by the Cloud Profiling Radar aboard CloudSat [J]. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(4): 576-593.
- [28] JENSEN M P, VOGELMANN A M, COLLINS W D, et al. Investigation of regional and seasonal variations in marine boundary layer cloud properties from MODIS observations[J]. Journal of Climate, 2008, 21(19): 4955-4973.
- [29] ZHANG G J, VOGELMANN A M, JENSEN M P, et al. Relating satellite-observed cloud properties from MODIS to meteorological conditions for marine boundary layer clouds [J]. Journal of Climate, 2010, 23(6): 1374-1391.