

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

谢磊¹, 刘奇²

(1.山东省临朐县气象局, 山东潍坊 262600; 2.中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 利用中分辨率成像光谱仪(Aqua/MODIS)和云廓线雷达(CloudSat/CPR)两部星载仪器的准同步探测资料,分析了全球洋面暖云覆盖量和暖云降水频率的空间分布特征,并就暖云占优的多个中低纬海域,对降水暖云和非降水暖云的云微物理性质进行了对比,特别分析了由MODIS云滴有效半径(R_{16} , R_{21} , R_{37})相对大小所指示的云层顶部云水垂直结构在两类云之间的差异.研究结果表明,降水暖云与非降水暖云的云顶温度、光学厚度、云滴有效半径、云水路径等参数的有效范围接近一致,但均值存在明显差异.降水暖云的云顶高度显著偏高,其光学厚度、云滴有效半径、云水路径显著大于非降水暖云.针对6种云水垂直结构模态的初步统计结果显示,对应最大降水概率的模态为 $R_{37} < R_{21} < R_{16}$.该观测事实揭示了洋面暖云发展至降水阶段时,云层上部的云滴尺寸和云水含量多呈现为向下增长,该结果也反映了多光谱云参数反演资料在暖云降水识别中的潜在价值.

关键词: 暖云;降水;非降水;云滴有效半径;云水垂直结构

中图分类号: P407 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2017.12.006

引用格式: 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.

XIE Lei, LIU Qi. Cloud property differences between precipitating and non-precipitating warm clouds over global oceans derived from satellite remote sensing [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(12):1006-1014.

Cloud property differences between precipitating and non-precipitating warm clouds over global oceans derived from satellite remote sensing

XIE Lei¹, LIU Qi²

(1. Shandong Linqu Meteorological Bureau, Weifang 262600, China;

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

Abstract: Data collected from quasi-synchronous Aqua/MODIS and CloudSat/CPR measurements were used to compare cloud parameters between precipitating and non-precipitating warm clouds over global oceans. The characteristics of cloud water vertical structure near cloud top, which were implied by the contrasts among the three cloud droplet effective radii (R_{16} , R_{21} , R_{37}) retrieved from distinct near-infrared channels of MODIS, were especially examined and their discrepancies between the two cloud categories were clarified. It is found that the global distribution of warm clouds has notable regional features. The valid range of most cloud properties are similar for precipitating and non-precipitating warm

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(41175032, 41575019)资助

作者简介: 谢磊,男,1987年生,硕士.研究方向:大气遥感探测.E-mail: leixie@mail.ustc.edu.cn

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

clouds, including cloud top temperature (CTT), optical thickness (COT), geometrical thickness, cloud droplet effective radius (Re), cloud water path (CWP). But there is still evident distinction between their averages, with the COT, Re, CWP of precipitating warm clouds significantly higher than non-precipitating ones. According to the statistics, the model of $R37 < R21 < R16$ corresponds to the maximum fraction of precipitating clouds. This suggests that cloud droplet size and cloud water mostly tend to monotonously increase downward when precipitation is generated from warm clouds. Such observational evidence reflects to some extent that multi-spectra based cloud retrievals are effective for detecting precipitation in warm clouds.

Key words: warm cloud; precipitating; non-precipitating; cloud droplet effective radius; cloud water vertical structure

0 引言

地基观测结果显示全球总云覆盖量超过 50%^[1-3], 国际卫星云气候计划 (ISCCP) 卫星资料首次定量揭示了全球云覆盖比例约为 63%^[3]. 通过对太阳短波辐射和地球长波辐射的吸收和散射作用, 云影响整个地气系统的能量平衡^[4-6]. 云在覆盖量、空间分布及微物理性质上的细小变化, 都会对地气系统的辐射能量收支产生显著影响. 气候模型数值模拟的对比结果显示, 在不涉及云辐射反馈的晴空大气条件下, 到达地面的辐射通量在模型之间的差别不超过 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而对于有云大气, 地面下行辐射通量在模式之间的差别高达 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上^[7]. 云和地球大气环流之间存在密切的反馈作用: 一方面, 大气运动产生的水汽输送和冷却作用导致了云的产生; 另一方面, 大气环流动力过程受由云引起的辐射和潜热通量的水平和垂直梯度的重要影响^[8-10].

暖云是整体结构处于零度层以下, 完全由液态水滴构成的云团. 相对于中高云系, 暖云所处的位置较低、云层厚度较小, 其生成条件更容易达到. 尤其在洋面上, 得益于充足的地表水汽供应, 积云、层积云、层云大量出现, 其中单层海洋性层云覆盖了全球近三分之一的洋面^[11]. 在热带和副热带洋面上, 暖云因其反照率显著高于海表, 由此造成的负辐射强迫十分强烈, 在云气候反馈系统中扮演极其重要的角色^[12].

卫星遥感为我们研究全球尺度暖云的分布及其物理性质提供了极好的条件. Aqua 和 CloudSat 卫星是地球观测系统 (EOS) 中 A-Train 卫星系列中的成员, CloudSat 卫星紧随 Aqua 卫星之后, 前后相差 1 min 左右对同一地区进行扫描, 两颗卫星以其天然的优势, 极其适合对云的联合观测研究. 分别搭载

在 Aqua 和 CloudSat 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和云廓线雷达 (CPR) 是目前全球云监测的主要数据来源^[13]. MODIS 可提供丰富的光谱信息, 用于反演云顶高度、云层光学厚度以及云水路径等参数. CPR 则是首部专门用于探测云微物理垂直结构的星载雷达, 工作于毫米波段 ($\sim 94 \text{ GHz}$), 对云滴非常敏感. 并且相较于工作在厘米波段的第一部星载雷达 TRMM/PR, CPR 具有更高的回波敏感性 (-30 dBZ), 对于降水率 0.5 mm/h 以下的弱降水可实现有效探测, 这为研究暖云微物理性质及其降水过程提供了可能. 对于云微物理性质和垂直结构的认知, 是理解云辐射效应的基础, 对人工影响天气业务作业也有重要的指导意义^[14-16].

由于 CPR 资料来自卫星平台主动式探测方式, 可准确反映云内垂直结构, 国内外许多学者利用 CPR 资料在云层垂直结构特征方面开展了大量研究. 周毓荃等^[17] 利用气象业务探空秒数据, 利用相对湿度阈值法分析云垂直结构, 并与 CloudSat 云雷达实测云垂直结构进行了多个例的对比分析, 展示了 CloudSat 卫星在云垂直结构探测方面的优越性. 尹金方等^[18] 研究了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. Nakajima 等^[13] 研究了云滴有效半径反演与云层垂直结构不均匀性的关联, 其结果显示降水的形成对 $2.1 \mu\text{m}$ 和 $1.6 \mu\text{m}$ 的云滴有效半径反演结果均有较大影响. 周毓荃等^[19] 还同时利用 TRMM 卫星测雨雷达和 CloudSat 卫星云雷达数据, 研究了从薄层对流云到深厚对流云的降水垂直结构特征. 针对洋面低云, Lebsock 等^[20] 发现 MODIS- $3.7 \mu\text{m}$ 通道的云滴有效半径反演结果多集中在 $30 \mu\text{m}$ 以下, 并且一般小于 $2.1 \mu\text{m}$ 通道的反演结果. 尚博等^[21] 分析了 CloudSat 卫星云雷达识别降水云的优越性, 发现降水云与非降水云的垂直结构存在明显差异.

然而,关于洋面上降水暖云与非降水暖云的整体分布及云参数差异,至今还未有专门的研究.本研究利用 CPR 数据和 Aqua/MODIS 的融合数据,利用 CPR 资料区分降水暖云与非降水暖云,建立降水暖云和非降水暖云两类像素集,分别对其全球分布进行统计,并对 MODIS 资料提供的云参数进行对比分析.另外,对于 MODIS 提供的 3 通道(1.6, 2.1, 3.7 μm)云滴有效半径反演结果(文中分别记为 R16, R21, R37),基于 3 者间的相对大小关系,共有 6 种不同的排列形式,近似对应 6 种云水垂直结构模态.本研究分析了 6 种垂直结构的出现频率及其各自的降水概率,该结果有助于认识多光谱观测信息在暖云降水识别中的价值.

1 数据和方法

本研究使用 2008 年全年的 MODIS/MAC06 资料与 CPR/2C-PRECIP-COLUMN 资料,MODIS 资料提供云顶温度(CTT)、光学厚度(COT)、云水路径(CWP)、云滴有效半径(R16, R21, R37)等云参数信息,2C-PRECIP-COLUMN 资料主要提供雷达反射率和降水率等信息.

1.1 MODIS 和 CPR 数据

MODIS 是搭载在美国 EOS 对地观测卫星系统的 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的重要传感器,其 2330 km 的扫描幅宽可保证每一至两天覆盖全球一次.MODIS 接收可见光至热红外波段共 36 个光谱通道的地表和大气的上行辐射数据,利用多通道反演算法,可反演获得云顶温度、云水路径等一系列云参数.

CloudSat 卫星上搭载的云廓线雷达(CPR)是专门用于云探测的主动式星载仪器,相比于被动类遥感方式,CPR 具有探测信号的高灵敏度和垂直方向的高分辨率的优势,可以穿透云层,采集垂直方向的信息,获得云内微物理结构数据,在研究多层云及云内垂直结构方面具有独特作用.其探测数据可以与其他卫星(CALIPSO, Aqua 等)的探测资料联合应用,用以研究云以及气溶胶的时空分布、云和气溶胶的辐射效应等^[22].CPR 凭借对云的良好穿透能力和非常高的灵敏度,能够获得垂直方向的雷达反射率廓线(radar reflectivity)和相应的云识别廓线(cloud mask),其水平分辨率约为 $1.3\text{km} \times 1.1\text{km}$,垂直分辨率约为 240m,完整廓线数据覆盖地表以上 30km 厚度的大气.

1.2 资料融合方案

实际资料处理中,我们采用了 MAC 资料(MODIS/Aqua Clouds 1km and 5km 5-Min L2 Wide Swath Subset along CloudSat V2, MAC06S0)与 CPR 资料进行融合.MAC 资料是 MODIS/Aqua 轨道级云资料产品 MYD06_L2 的子集数据,是在 MODIS 的 2330km 横向扫描刈幅中,截取的接近 CPR 星下轨道的中心窄幅($\sim 10\text{km}$)部分,包含了云检测结果、云顶温度、光学厚度、云水路径等云参数信息.由于 CPR 星下探测本身的横向扰动,CPR 的星下点并非直指 MODIS 的轨道中心,另外 CPR 和 MODIS 像素分辨率及像素空间密度也存在一定差异,需要完成对 MAC 数据和 CPR 数据的空间匹配.本研究中我们依据最近距离原则,搜索距离特定 CPR 像素中心最近的 MAC 像素,保证了 MAC 数据与 CPR 数据指向同一目标像素,以此完成两套数据的空间匹配.在 A-Train 系列中,CloudSat 卫星紧随在 Aqua 卫星之后,两者星下点经过同一地表位置的时间差仅约 60 s,这事实上保证了空间匹配的 MAC 数据与 CPR 数据在探测时间上的准同步.

1.3 暖云样本建立

在像素水平的卫星资料分析中,一般直接把云顶温度高于 273 K 的云像素定义为暖云像素^[23],其集合构成暖云样本.但是研究发现,在全球洋面上,除独立散布的真实暖云团外,大量存在暖云像素和冷云像素相邻相伴的情形,后者中的暖云像素并不是真正意义的暖云,这类像素多为深厚云系发展的中间状态,其发展历程与真实暖云完全不同^[24-25].因此若不加以区分,将具有 273 K 以上温度的所有像素均归为暖云样本,其结果会直接影响暖云发生频率的统计,也会影响云参数的统计结果.为避免上述干扰,本研究选择空间上连续且全部具有 273K 以上云顶温度的像素为暖云样本,并基于该限定确定了具有高样本量的暖云富集区域.

图 1 给出了全球洋面上的云量分布,以及暖云在其中的贡献比例.可以看出全球中低纬洋面上的大部分区域,云覆盖量超过了 60%,而在总云量相对偏低的区域,暖云有更多的贡献,局部区域暖云的贡献接近 100%.图 2 给出了全球降水频率的分布情况,分别以总降水频率和暖云降水在其中所占的比例给出.结合图 1 可以发现,暖云降水比例的高值区与暖云发生率占比的高值区基本一致,在这些区域,暖云降水在总降水频次中的占比同样接近 100%.根

据图 1 和图 2 所示的暖云发生频次及其降水发生频次的全球分布特征,我们确定了 5 个区域作为暖云样本区:南太平洋(a):[30S~0][150W~80W];北太平洋(b):[15N~35N][150W~120W];北大西洋(c):[10N~40N][60W~15W];南大西洋(d):[30S~0][33W~10E];印度洋(e):[35S~15S][60E~112E].所选 5 个区域尽管平均云量不高,但是暖云比例很高,平均在 60% 以上,局部区域可达到 80% 以上,这保证了有充分的暖云样本参与云参数分析.另外,在以上区域的暖云中,伴随降水的暖云比例也达到了 60%,这也同时保证了降水暖云与非降水暖云具有相当的样本量,有利于云参数的对比分析.

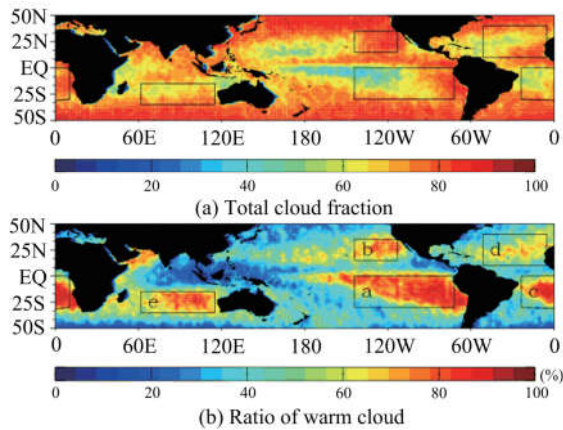


图 1 全球洋面年平均云量和暖云比例水平分布(2.5°×2.5°)

Fig.1 Distribution of total cloud fraction and the ratio of warm clouds over global oceans(2.5°×2.5°)

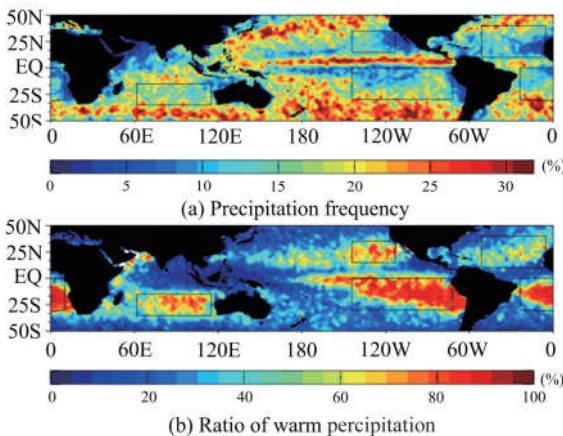


图 2 全球洋面年平均降水频率和暖云降水比例水平分布(2.5°×2.5°)

Fig.2 Distribution of precipitation frequency and the ratio of warm precipitation over global oceans(2.5°×2.5°)

另外,我们还特别统计了洋面暖云本身的降水频次和降水强度特征.图 3(a)和(b)两种全球分布所示分别为洋面降水暖云的平均降水强度以及降水暖

云在全部暖云中的占比(即暖云的降水发生概率).由该统计结果可见,全球暖云降水强度和降水概率普遍偏低,暖云降水强度的最大值不超过 1.0mm/h,总体的平均降水率仅为约 0.3mm/h.暖云的降水概率约为 17.3%,该数值高于基于 TRMM/PR 探测资料的相应统计结果^[26].

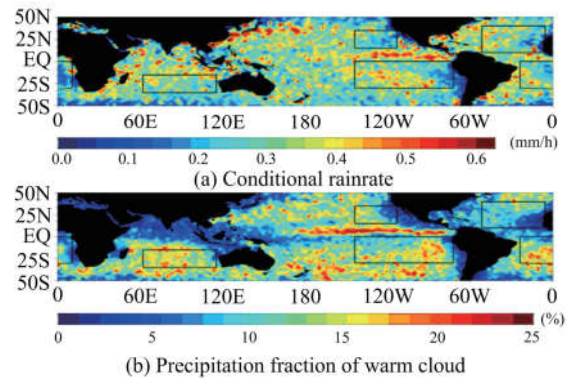


图 3 全球洋面年平均暖云降水率和暖云降水概率水平分布
Fig.3 Distribution of conditional rain rate and precipitation fraction of warm cloud over global oceans

2 降水暖云与非降水暖云的差异特征

2.1 云参数差异

表 1 给出了两类暖云云参数的统计平均值.从表中可知,降水暖云与非降水暖云的云参数存在显著差异.仅在云顶温度上差异较小,降水暖云略低于非降水暖云,约 3K 的温度差异大致对应 500m 的高度差异,表明降水暖云较非降水暖云可发展至更高,拥有略偏高的云顶.对于其余云参数,降水暖云的数值均显著大于非降水暖云.尤其是光学厚度和云水路径,降水云的数值达到了非降水云的 3 倍左右.但就反映各参量数值范围的最值数据来看,降水云与非降水云的最值并没有明显差别.由此可知,均值的差异主要源于两类云的云参数频率分布的差异.

表 1 暖云云参数统计

Tab.1 Statistics of warm cloud parameters

	非降水暖云			降水暖云		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
云顶温度/K	273.2	309.3	287.6	273.2	302.6	284.0
R21/ μm	4.0	87.3	14.4	4.9	80.9	20.0
光学厚度	0.01	100.0	6.5	0.01	100.0	15.5
云水路径 /($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.0	1942.0	65.4	1.0	1950.0	218.7
云顶高度/m	839	5132	1949.0	839	5143	2004.1
云层厚度/m	479	4557	874.1	479	4557	1328.2

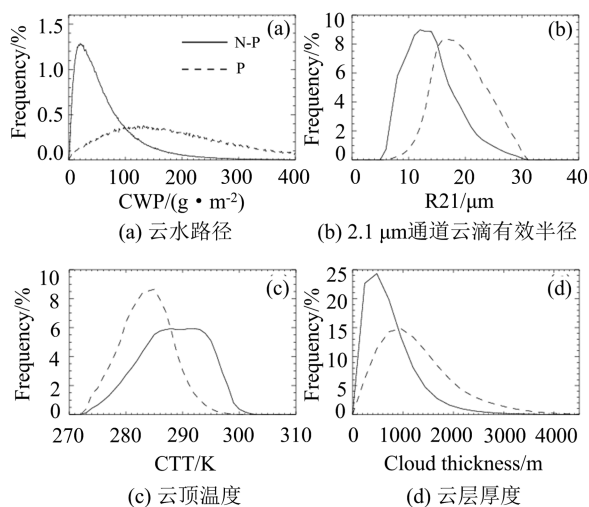


图 4 非降水暖云和降水暖云的云参数频率分布

Fig4 Frequency distribution of cloud parameters between precipitating warm clouds and non-precipitating warm clouds

为此我们进一步统计了云水路径、R21、云顶温度、云层厚度等参数在降水与非降水条件下的频率分布。由图 4 可见,各个云参数的频率分布都呈现为明确的单峰结构。云水路径的频率分布(图 4(a))显示了降水暖云和非降水暖云的云水路径的较大差异,具体表现为非降水暖云的云水路径大部分集中在 $100\text{g}/\text{m}^2$ 以下,频率峰值(1.3%)出现在 $20\sim 30\text{g}/\text{m}^2$,几乎不存在大于 $270\text{g}/\text{m}^2$ 的样本。降水暖云的云水路径分布相当离散,云水路径频率峰值(0.4%)出现在 $100\text{g}/\text{m}^2$,区别于非降水暖云在频率峰值之后的锐减趋势,其在频率峰值之后的减小趋势相对缓慢。 $2.1\ \mu\text{m}$ 通道的云滴有效半径(R21)的频率分布(图 4(b))则表明,降水暖云和非降水暖云的云滴有效半径主要范围均为 $5\sim 30\ \mu\text{m}$,对应的最大频率均为 $8\%\sim 9\%$,区别在于降水暖云中出现大云滴的概率显著增大,并且峰值频率对应的云滴有效半径在尺寸上有所差别,非降水暖云位于 $12\ \mu\text{m}$ 左右,而降水暖云位于 $16\ \mu\text{m}$ 左右。暖云的云顶温度频率分布结果(图 4(c))表明,非降水暖云云顶温度在 $273\sim 300\text{K}$ 之间,频率峰值出现在 $286\text{K}\sim 295\text{K}$ 之间的近似等频率(6%)区间,降水暖云的云顶温度主要分布在 $273\sim 298\text{K}$ 之间,频率峰值(8%)出现在 $284\sim 285\text{K}$ 的单峰区,降水暖云最高温度略小于非降水暖云,频率峰值也低于非降水暖云。由图 4(d)所示的云层厚度特征可知,非降水暖云的频率峰值(25%)出现在 600m 左右,而降水暖云的频率峰值(15%)位于 1000m 左右,明显高于非降水暖云,两类暖云在云层厚度上的差异事实上印证了云

顶高度的差异。

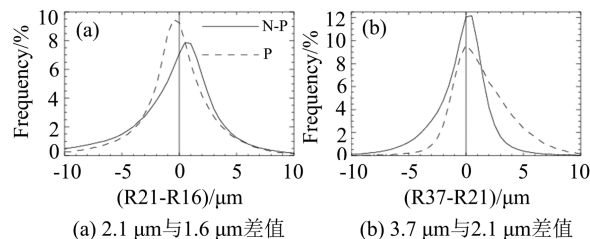


图 5 非降水暖云和降水暖云的云滴有效半径双通道差值频率分布

Fig.5 Frequency distribution of $(R21-R16)$ and $(R37-R21)$ between precipitating and non-precipitating warm clouds

作为对 R21 频率分布结果的补充,我们同样对 R16 和 R37 的频率分布进行了统计,结果如图 5 所示,以云滴有效半径差值($R21-R16$, $R37-R21$)的频率分布给出。整体来看,3 个通道云滴有效半径的数值不完全一致,最大差值可超过 $5\ \mu\text{m}$,但其差异的分布形式接近零轴对称,峰值都在零值附近,不存在特定通道云滴有效半径反演结果绝对偏高或偏低的情况。仅对于非降水暖云, $R21-R16$ 的峰值频率明显偏离零轴,表明最高频次的情形为 R21 高于 R16。从降水暖云和非降水暖云两类的对比来看,相较于非降水情形,降水条件下 R16 倾向于大于 R21,同时 R37 倾向于大于 R21。

2.2 云水垂直结构差异

在上述 3 通道云滴有效半径两两差异的分析基础上,为了更深入了解在降水暖云和非降水暖云中的云滴有效半径差异特征,以评估其对暖云降水的指示作用,根据 3 个通道云滴有效半径的相对大小关系,我们将样本分为以下 6 类,对应了云水垂直结构的 6 个模态(如图 6 所示),6 种模态一定程度上表征了云滴尺寸及云水含量的垂直结构。

A: $R37 < R21 < R16$; B: $R16 < R37 < R21$;
C: $R37 < R16 < R21$

D: $R16 < R21 < R37$; E: $R21 < R37 < R16$;
F: $R21 < R16 < R37$

图 6 为 6 个模态的样本量以及在总样本中所占的比例。可以发现 B(占 4.0%)和 C(6.8%)两个模态(云滴半径大小表现为向上先增大后减小)所占比例最小且两种模态比例比较接近;E(14.5%)和 F(15.1%)两个模态(云滴半径大小表现为向上先减小后增大)所占比例居中且接近;A(36.6%)和 D(23.1%)两个模态(云滴半径大小表现为向上单调减小或向上单调增大)所占比例最大,其中 A 模态

在全部样本中占比最高。

图 7 给出了非降水暖云和降水暖云类别中 6 个模态分别所占的比例。由图可知, A 模态、D 模态所占比例较大, 不论降水条件下还是非降水条件下都是优势模态; 与之相反, B 模态、C 模态是所占比例较小的劣势模态, 尤其在降水条件下, 所占比例总和仅为 7.6%。降水条件下, A、E 模态比例有所增加, 在

6 个模态中的占比由非降水条件下的 44.4% 增加到 61.7%, 而 B、C、D、F 模态比例均相对减小; 并且 A、E 模态产生降水的比例在 6 种模态中为最高(A 模态 44.9%, E 模态 50.9%)。该统计结果表明, 降水发生时, 云滴尺寸的垂直结构多呈现出上部减小、下部增大的趋势。

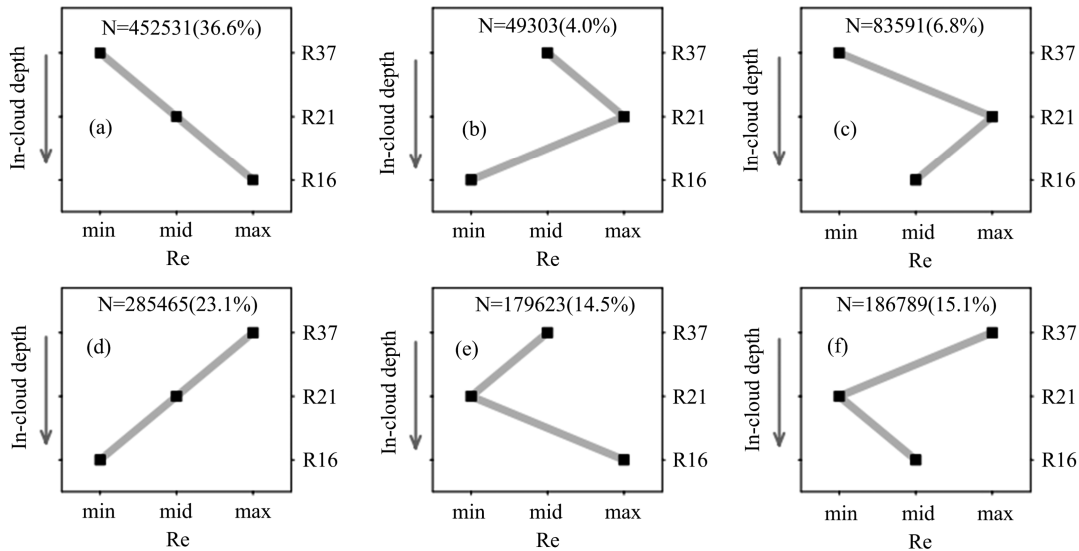


图 6 3 通道云滴有效半径相对差异的 6 模态样本量及占总样本比例示意图

Fig.6 Sample size and proportion in the total sample of the six modes of the differences among the three-channel cloud effective radius

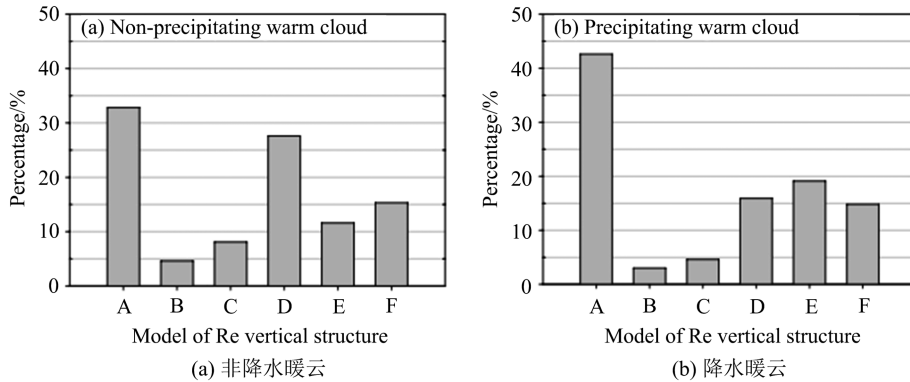


图 7 非降水暖云和降水暖云中 6 模态样本的频率分布

Fig.7 The sample frequency distribution among the six modes for precipitating and non-precipitating warm clouds respectively

图 8 为各个模态的降水与非降水样本比例, 表 2 给出了 6 种模态的降水与非降水样本的分布统计。可以看出, A 模态、E 模态、F 模态形成降水的概率较大; B 模态、C 模态、D 模态发生降水的比例偏小。A 模态是降水的优势模态, 产生降水的比例较高, 为 44.9%, 并且在形成降水的 6 个模态中, A 模态占 42.6%, 远高于其余模态。A 模态 (R37 < R21 < R16) 代表的垂直结构是云滴向下增长, 这符合云滴碰并增长机制导致的降水过程, 表明洋面暖云发展至产

生降水时, 云层中上部的云滴尺寸和云水含量多呈现为向下增长的特征, 该结果也一定程度上显示了多光谱云参数反演资料在暖云降水识别中的潜在应用价值。然而, 这里的统计结果同时也表明, A 模态仅能解释不超过 50% 的降水事件, 反映出暖云降水发展过程中, 云水垂直结构存在更复杂的形式, 对上述结果的解释以及对于降水过程中暖云垂直结构的深入分析还需要考虑更多的因素。

表 2 6 种模态的降水与非降水样本的分布统计

Tab 2 Distribution statistics of precipitation and non-precipitation samples of the six modes

	Non-Precipitation		Precipitation	
	Ratio ^a of non-precipitation/%	Percentage ^b of each modal/%	Ratio of precipitation/%	Percentage of each modal/%
R37<R21<R16(A)	55.1	32.8	44.9	42.6
R16<R37<R21(B)	70.8	4.6	29.2	3.0
R37<R16<R21(C)	73.6	8.1	26.4	4.6
R16<R21<R37(D)	73.5	27.6	26.5	15.9
R21<R37<R16(E)	49.1	11.6	50.9	19.1
R21<R16<R37(F)	62.3	15.3	37.7	14.8

【注】^a 各模态中降水与非降水的比例；^b 降水暖云或非降水暖云中各个模态的比例。

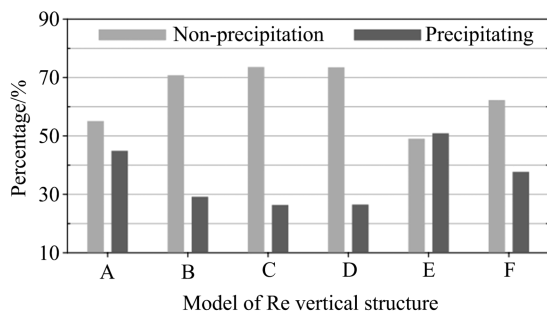


图 8 3 通道云滴有效半径相对差异(差值:单倍反演精度 0.01)的 6 种模态中降水样本与非降水样本所占的比例

Fig.8 Ratio of non-precipitation and precipitation of the total sample of six modes of the differences among the three-channel cloud effective radius

3 结论

利用 MODIS/CloudSat 融合资料,针对全球洋面暖云,在区分降水暖云与非降水暖云的基础上,对云层光学厚度、云滴有效半径、云顶温度、云水路径等参数进行了统计分析,并对源自近红外 3 个通道反演的云滴有效半径进行了对比分析,得到的主要结论如下:

(I) 洋面暖云的空间分布具有明显的区域性特征,在总云量分布相对偏低的区域暖云有更多的贡献,在中低纬局部区域其贡献接近 100%,形成了暖云富集区,在这些区域暖云降水是降水的主导形式,暖云降水在总降水频次中的占比同样接近 100%。对全球洋面暖云而言,其平均降水概率为 17.3%,平均降水强度约为 0.3mm/h。

(II) 云顶温度、云层光学厚度等参数在降水暖云和非降水暖云两类样本中的取值有效范围基本一

致,但其均值的差异较为明显,特别是云层光学厚度和云水路径,降水云的数值达到了非降水云的 3 倍左右。降水云和非降水云的各个云参数的频率分布均呈现单峰形式,但具体分布形式在两类云之间均存在显著差别,这决定了云参数均值的差异。

(III) 3 个通道云滴有效半径反演结果(R16, R21, R37)在多数情况下并非一致,两两之间的差值最大可达 5 μm ,且都有正有负,差值的频率分布几乎呈现为零轴对称形态。相较于非降水情形,降水条件下 R16 倾向于大于 R21,同时 R37 倾向于大于 R21。

(IV) 对 6 种垂直结构模态的统计分析显示, R16 大于 R21 的 3 个模态产生降水的概率较大, R16 小于 R21 的 3 个模态发生降水的比例较小。不论是样本比例(36.6%),还是降水概率(44.9%), A 模态(向下单调增长结构)均为优势模态,这反映了洋面暖云发展至产生降水时,云层中上部的云滴尺寸和云水含量向下增长的事实,也一定程度上展示了多光谱云参数反演资料在暖云降水识别中的潜在应用价值。

本文融合多源卫星资料,对洋面暖云的研究丰富了对海洋暖云微观结构的认识。洋面暖云降水与非降水的宏观与微物理参数的统计特征信息,对改进天气和气候数值模式具有重要意义。文章仅仅使用 2008 年全年的资料,由于相关参数可能的年际变化,统计结果不可避免地会有所偏差,未来我们计划将利用长时间序列的资料,对暖云云参数的年代变化进行进一步的研究,以得到更为明确的结论。

参考文献(References)

- [1] 刘奇. 基于 ISCCP 及 TRMM 观测的热带降水云与非降水云差异的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [2] 王旻燕, 王伯民. ISCCP 产品和我国地面观测总云量差异[J]. 应用气象学报, 2009, (04): 411-418.
WANG Minyan, WANG Bomin. Total Cloud Amount Difference Between ISCCP Product and Ground Observation over China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, (04): 411-418.
- [3] ROSSOW W B, SCHIFFER R A. ISCCP cloud data products[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1991, 72(1): 2-20.
- [4] MARCHAND R, MACE GG, ACKERMAN T, et al. Hydrometeor detection using CloudSat—An Earth-orbiting 94-GHz cloud radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(4): 519-533.
- [5] RAMANATHAN V, CRUTZEN PJ, KIEHL J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. Science, 2001, 294(5549): 2119-2124.
- [6] 刘奇, 傅云飞. 基于 TRMM/TMI 的亚洲夏季降水研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(1): 111-122.
- [7] BARKER H, KOROLEV A, HUDAK D, et al. A comparison between CloudSat and aircraft data for a multilayer, mixed phase cloud system during the Canadian CloudSat - CALIPSO Validation Project[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D8): D00A16; doi: 10.1029/2008JD009971.
- [8] WEBSTER P J, STEPHENS G L. Cloud-radiation interaction and the climate problem [J]. Global Climate, 1984.
- [9] 王可丽, 钟强, 侯萍. 青藏高原地区云对地面有效辐射的影响 I. 综合分析[J]. 高原气象, 1994, (01): 58-65.
WANG Keli, ZHONG Qiang, HOU Ping. Effect of cloud on the surface effective radiation over the Qinghai-Xizang Plateau I Comprehensive analysis[J]. Plateau Meteorology, 1994, (01): 58-65.
- [10] 王可丽, 钟强. 青藏高原地区云对地面有效辐射的影响 II. 强迫作用[J]. 高原气象, 1994, (02): 16-22.
WANG Keli, ZHONG Qiang. Effect of cloud on the surface effective radiation over the Qinghai-Xizang Plateau II Cloud radiative forcing[M]//The Global Climate. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1984: 63-78.
- [11] LEBSOCK M D, L'ECUYER T S, STEPHENS G L. Detecting the ratio of rain and cloud water in low-latitude shallow marine clouds[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2011, 50(2): 419-432.
- [12] KUBAR T L, HARTMANN D L, WOOD R. Understanding the importance of microphysics and macrophysics for warm rain in marine low clouds. Part I: Satellite observations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(10): 2953-2972.
- [13] 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.
- [14] 汪宏七, 赵高祥. 云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 36-44.
WANG Hongqi, ZHAO Gaoxiang. The influences of cloud microphysical parameters on cloud optical and radiative properties[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1996, 7(1): 36-44.
- [15] 胡雯, 申宜运, 曾光平. 南方夏季对流云人工增雨技术研究[J]. 应用气象学报, 2005, 16(3): 413-416.
- [16] 陈勇航, 黄建平, 王天河, 等. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 717-727.
CHEN Yonghang, HUANG Jianping, WANG Tianhe, et al. Temporal and spatial distribution of the different clouds over Northwestern China with the relation to precipitation [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2005, 16(6): 717-727.
- [17] 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, 36(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, 36(11): 50-58.
- [18] 尹金方, 王东海, 翟国庆, 王志恩. 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.
- [19] 周毓荃, 赵姝慧. CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 603-614.
ZHOU Yuquan, ZHAO Shuhui. CloudSat Satellite and Its Application in Weather and Cloud Observation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(5): 603-614.
- [20] LEBSOCK M D, L'ECUYER T S, STEPHENS G L. Detecting the ratio of rain and cloud water in low-latitude shallow marine clouds[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2011, 50(2): 419-432.
- [21] 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.
- SHANG Bo, ZHOU Yuquan, LIU Jianchao, et al. Comparing vertical structure of precipitation cloud and non-precipitation cloud using Cloudsat [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(1):1-9.
- [22] 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[J]. 大气科学, 2009, 33(4):698-707.
- LI Jiming, HUANG Jianping, YI Yuhong, et al. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based Lidar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(4):698-707.
- [23] 黄美元. 云和降水物理[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] SCHUMACHER C. The TRMM precipitation radar's view of shallow, isolated rain[J]. Journal of Applied Meteorology, 1962, 42 (10) :1519-1524.
- [25] LIU C, ZIPSER E J, CECIL D J, et al. A cloud and precipitation feature database from nine years of TRMM observations [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47 (10) : 2712-2728.
- [26] 刘鹏. 基于 TRMM 探测的热带及副热带降水及其光谱信号特征分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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 (17) :251-270.
- [30] KUBAR T L, HARTMANN D L, WOOD R. Understanding the importance of microphysics and macrophysics for warm rain in marine low clouds. Part I: Satellite observations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(10):2953-2972.
- [31] MACE G G, MARCHAND R, ZHANG Q, et al. Global hydrometeor occurrence as observed by CloudSat: Initial observations from summer 2006[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(9) :252-254.
- [32] WALISER D E, LI J L F, WOODS C P, et al. Cloud ice: A climate model challenge with signs and expectations of progress[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114 (D8) : D00A21; doi:10.1029/2008JD010015.
- [33] WANG J, ROSSOW W B. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. Journal of Climate, 1998, 11(11) :3010-3029.
- [34] ZUIDEMA P, MAPES B. Cloud vertical structure observed from space and ship over the Bay of Bengal and the eastern tropical Pacific [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2008, 86A (11) : 205-218.
- [35] 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.