

贾海灵, 马晓燕, 熊飞麟. 2018. 中国东部大陆和邻近海域暖云特性时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 气候与环境研究, 23 (6): 737–748. Jia Hailing, Ma Xiaoyan, Xiong Feilin. 2018. Spatial and temporal distributions of warm cloud properties in eastern China and its adjacent ocean and their relationships with meteorological conditions [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (6): 737–748, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17134.

中国东部大陆和邻近海域暖云特性时空分布 及其与气象条件的关系

贾海灵 马晓燕 熊飞麟

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

摘 要 基于 2003~2016 年 MODIS/Aqua (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 云产品资料 (MYD08_D3), 分析了中国东部大陆及其邻近海域云量 (CF)、云滴有效半径 (CER)、和液水路径 (LWP) 的空间分布以及季节变化, 并结合同期 ERA-Interim 再分析资料的 850 hPa 垂直速度 (ω_{850hPa})、低对流层稳定度 (LTS)、以及 MODIS/Aqua 水汽产品中的大气可降水量 (PWV) 资料, 分析了云宏微观物理量与动力、热力及水汽条件之间的关系。从空间分布来看, 夏季由日本海至中南半岛存在一个东北西南走向的云量高值区, 覆盖我国东部地区, 冬季云量高值区位于我国南方地区和东部海域上空; 云滴有效半径冬、夏分布类似, 均为由东南洋面至西北内陆递减; 夏季液水路径分布较为均一, 冬季空间差异很大, 30°N 是明显的高低值分界线, 这与冬季水汽的分布密切相关。陆地和海洋上云量均呈冬高夏低的变化趋势, 陆地大于海洋, 而云滴有效半径和液水路径则为夏高冬低, 海洋大于陆地。总体来说, 云量与 PWV 和 LTS 均表现为正相关、与 ω_{850hPa} 呈负相关, 表明低层的上升运动有利于水汽向上输送、凝结形成云, 但稳定的大气层结又会阻碍云进一步向上发展, 使其被限制在底层空间, 由于本文的研究对象为暖云, 多为中低云, 因而云量较高; 云滴有效半径和液水路径均与 LTS、 ω_{850hPa} 表现为负相关, 但是对 PWV 的变化不是很敏感, 表明水汽并不是影响云滴尺度和液水路径的主导因素, 其主要受动力、热力抬升作用的影响; 以上关系在不同区域、不同季节的表现存在一定差异。

关键词 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 云量 云滴有效半径 液水路径 气象条件

文章编号 1006-9585 (2018) 06-0737-12

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17134

Spatial and Temporal Distributions of Warm Cloud Properties in Eastern China and Its Adjacent Ocean and Their Relationships with Meteorological Conditions

JIA Hailing, MA Xiaoyan, and XIONG Feilin

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Key Laboratory for Aerosol-

收稿日期 2017-09-10; 网络预出版日期 2018-03-06

作者简介 贾海灵, 女, 1993 年出生, 博士研究生, 研究方向为气溶胶-云相互作用及其气候效应。E-mail: jiahl@nuist.edu.cn

通讯作者 马晓燕, E-mail: xma@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41475005, 江苏省六大人才高峰计划 2014JY019, 南京信息工程大学人才启动费, 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 KYCX18_1005

Funded by National Natural Science Foundation of China Grants (Grant 41475005), Summit of the Six Top Talents Program of Jiangsu Province (Grant 2014JY019), Startup Foundation for Introducing Talent of Nanjing University of Information Science and Technology, Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (Grant KYCX18_1005)

Cloud–Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Spatial distribution and seasonal variation of cloud properties in eastern China and its adjacent ocean are analyzed based on MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) level three daily cloud products from 2003 to 2016. The relationships of cloud properties with dynamic and thermodynamic conditions and water vapor condition are investigated by combining MODIS and ERA-Interim reanalysis data over the same period. The high cloud fraction (CF) area is found over eastern China in the summer and over southern China and eastern ocean in the winter. The cloud droplet effective radius (CER) decreases from eastern ocean to inland region in both the summer and winter. Compared to that in the summer, the spatial distribution pattern of liquid water path (LWP) in the winter is greatly inhomogeneous with a dividing line between high and low values located near 30°N, which corresponds to the distribution of water vapor. It is found that CF exhibits the same seasonal variation over the land and ocean, i.e., low in summer and high in winter, but the magnitude is larger in eastern China land area than in the adjacent ocean. On the contrary, the CER and LWP are greater over the land than over its adjacent ocean with lower values in the winter and higher values in the summer. In general, CF has an obvious positive correlation with precipitable water vapor (PWV) and low troposphere stability (LTS) and a negative correlation with 850-hPa vertical velocity (w_{850hPa}), which indicates that abundant moisture and ascending motion in lower levels are favorable for the formation of clouds while the stable atmospheric stratification suppresses the growth of clouds. This explains why cloud fraction in the middle and lower levels is high. Both the CER and LWP show negative correlations with LTS and w_{850hPa} . However, they display low sensitivity to variations of PWV, which suggests that the CER and LWP are mainly affected by dynamic and thermodynamic lifting instead of the atmospheric moisture condition.

Keywords MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), Cloud fraction, Cloud droplet effective radius, Liquid water path, Meteorological conditions

1 引言

云在全球能量平衡和水循环中起着重要的作用，是地气系统辐射收支极为重要的调节因子 (Liou, 2004)。云对辐射以及气候的影响和反馈主要依赖于云的高度、形状、云量、云滴尺度、云水含量等，其宏观、微观及光学特性是模式中评估云对辐射影响的最大不确定因素 (IPCC, 2001)。因此，深入研究云特性的气候态分布特征及其与动力、热力和水汽条件等的关系，有助于提高对云—辐射—气候相互作用的认识以及改进对天气和气候的数值模拟能力。

目前，国内外对云的观测手段主要包括地面观测、飞机观测、卫星观测以及轮船观测等 (彭杰等, 2010)，由于卫星资料时空分辨率高、覆盖范围广、时间连续性强、以及探测可信度的逐渐提高等诸多优点，现已成为研究云的重要手段。关于利用卫星资料对云的研究，目前有相当一部分工作集中在分析云特性 (包括云量、云滴尺度、云水路径和云光学厚度等) 的水平分布特征及时间演化方面 (陈勇航等, 2005, 2007; 段皎和刘煜, 2011a, 2011b; 宋松涛等, 2013; 周喜讯等, 2016)。其中，吴润和刘佳 (2011) 利用 ISCCP (International Satellite

Cloud Climatology Project) D2 数据集分析了东亚地区 1984~2006 年不同种类云量的变化趋势，发现东亚总云量和高、低云量呈现减少趋势，中云量呈增加趋势。李兴宇等 (2008) 利用 ISCCP D2 资料研究了中国地区云水的分布特征及变化趋势，发现云水路径的分布与大气环流、地形特征、大气湿度分布及水汽传输密切相关。此外，还有一些研究集中在云的垂直结构特征。例如，彭杰等 (2013) 利用 CloudSat/CALIPSO (CloudSat-Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星资料研究了东亚地区云垂直分布的统计特征，发现云量峰值出现的高度具有明显的季节变化，且云出现概率的季节变化主要由多层云出现概率决定。杨大生和王普才 (2012a, 2012b) 利用 CloudSat 卫星资料分析了中国地区夏季云水含量和云滴有效半径的垂直及区域变化特征，发现青藏高原地形和东亚夏季风对云水含量及云滴尺度分布影响明显。然而，关于云特性与大尺度气象条件相互联系的研究相对较少，且大多是针对云量进行探讨。Klein and Hartmann (1993) 首次使用 700 hPa 与海平面的位温差来表征低对流层稳定度 (LTS)，并指出海洋上低云量与 LTS 之间有着密切的联系，此后 LTS 被广泛用于气候模式中的层积云参数化方案 (Collins et al., 2004)。另外一些针对海洋低云的

研究 (Wood and Hartmann, 2006; Wood and Bretherton, 2006; Koshiro and Shiotani, 2014) 均指出云量与低层大气稳定度之间存在正相关。汪会等 (2011) 利用 CloudSat/CALIPSO 资料分析了亚洲季风区和青藏高原地区低云量的分布及其与对流层低层稳定性的相关, 也得出了类似结论。Li and Gu (2006) 结合 ISCCP D2 数据集和 ERA-40 再分析资料研究了我国东部地区中层云和大尺度环流的联系, 发现中低层散度差是影响中层云量的主导因素, 相对湿度和大气稳定度的影响相对较弱。

尽管目前对中国地区云特性空间分布和时间变化的研究已有很多, 但鲜有研究从统计的角度给出云宏观、微观物理量与气象条件的关系, 而这对提高对云宏微观特征的认识和改进数值模式中云的模拟非常关键。本文利用 2003~2016 年 MODIS/Aqua 资料分析了中国东部及其邻近海域云特性的空间分布及季节变化, 并结合同期的 ERA-Interim 再分析资料探讨了云特性与动力、热力及水汽条件之间的关系。鉴于目前对于冷云特性的卫星反演仍存在较大的不确定性, 因此本文的研究仅限于暖云。

2 资料和方法

本文研究区域为中国东部大陆及其邻近海域 (图 1), 其经纬度范围分别为 ($25^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 和 ($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E}\sim 137^{\circ}\text{E}$)。所用数据时间范围为 2003~2016 年, 为更好地讨论云的季节差异, 将公历时间以每 3 个月为一季做划分, 其中 6 月、7 月、8 月为夏季, 11 月、12 月、1 月为冬季。

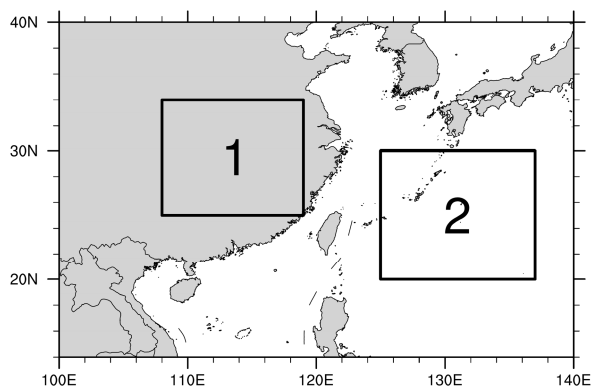


图 1 研究区域划分示意图, 其中方框 1 代表中国东部大陆, 方框 2 代表邻近海域

Fig. 1 The schematic diagram of regional divisions. Rectangles 1 and 2 represent eastern China and its adjacent ocean, respectively

2.1 MODIS 资料

中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 是美国宇航局 (NASA) EOS 观测计划中 Terra 和 Aqua 卫星携带的重要传感器。Terra 和 Aqua 卫星分别于 1999 年、2002 年发射, 其飞行轨道高度为 705 km, 分别在地方时间 10:30 和 13:30 过境, 两颗星相互配合, 每 2 天可重复观测整个地球表面。MODIS 共有 36 个光谱波段, 分布在 $0.415\sim 14.235\ \mu\text{m}$, 星下点空间分辨率分别为 250 m、500 m 和 1000 m (King et al., 2003)。对 MODIS 产品验证表明, 云和水汽产品有着不错的精度 (Kotarba, 2009; Liu et al., 2015; Noble and Hudson, 2015)。其中, Liu et al. (2015) 利用无线电探空数据评估了中国地区 MODIS 水汽产品的适用性, 发现 MODIS 产品高估了大气可降水量 (PWV) 约 5%, 二者相关系数高达 0.95。与地面观测相比, MODIS 反演的云量在冬季高估 7.28%, 夏季高估 4.38% (Kotarba, 2009), 就全年来看高估 6.72% (曹芸等, 2012), 且二者相关系数大于 0.8。由于 MODIS 具有多光谱、高分辨率等优点, 已被广泛用于云的研究 (Wood and Hartmann, 2006; Wood and Bretherton, 2006; Zhang et al., 2010; King et al., 2013; Saponaro et al., 2017)。

本文采用 MODIS/Aqua Collection 006 的大气 3 级日标准数据产品 (MYD08_D3), 空间分辨率为 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度), 分析的数据包括云量、云滴有效半径、液水路径和大气可降水量。由于冰云及云重叠存在极大的不确定性, 本研究限于液态单层云, 对于云参量进行以下筛选: (1) 选择液相的云参量; (2) 选择单层云的云参量; (3) 选择云顶温度大于 273 K 的暖云; (4) 为了避免异常值, 将反演标准差大于平均值的像素点去除; (5) 为减小反演的不确定性, 去除较薄的云像素点 (云光学厚度小于 5) (Zhang et al., 2012; Saponaro et al., 2017)。表 1 给出了中国东部及其邻近海域经筛选后实际用于统计的有效样本个数。

2.2 再分析资料

采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 第 3 代全球再分析资料 ERA-Interim, 作为 ERA-40 再分析资的后继者, ERA-Interim 采用更高分辨率的 ECMWF 综合预报系统 (Integrated Forecast System, IFS Cy31r2) 及 4D-Var (four-dimensional variational analysis) 变分同化系统, 并结合改进的

湿度分析、卫星数据误差校正等技术，其资料质量得到了很好的提升。ERA-Interim 再分析资料提供 0.125°至 2.5°等多种分辨率数据，每日生成 4 次同化分析场数据（协调世界时 00:00、06:00、12:00、18:00）提供全球三维的大气参数（Dee et al., 2011）。

表 1 中国东部及其邻近海域用于统计分析的有效样本数
Table 1 The number of calculated pixels in eastern China and its adjacent ocean

	夏季有效样本数				冬季有效样本数				总计有效样本数
	6 月	7 月	8 月	合计	12 月	1 月	2 月	合计	
陆地	10416	14077	20676	45169	8318	8834	13165	30317	75486
海洋	4899	5310	6369	16578	35755	36056	28698	100509	117087

Aqua 卫星于每日地方时间 13:30 过境，为保证云、水汽、动力、热力参量观测的时空匹配性，我们选取每日协调世界时 06:00（北京时间 14:00）的 1°（纬度）×1°（经度）的分析场数据，包括 850 hPa 高度处的垂直速度场（ $\omega_{850\text{hPa}}$ ）、700 hPa 和 1000 hPa 温度场。本文研究对象是暖云，多为中低云，因此我们用 $\omega_{850\text{hPa}}$ （正值表示下沉，负值表示上升）表征云下的动力条件，用低对流层稳定度（LTS）来表征热力条件。其中 LTS 是 700 hPa 高度处与海平面的位温差（ $\Delta\theta$ ）（Klein and Hartmann, 1993），LTS 越小表示大气越不稳定，计算方法如下：

$$\Delta\theta = \theta_{700\text{hPa}} - \theta_{1000\text{hPa}}, \quad (1)$$

$$\theta = T \left(\frac{p_{00}}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \quad (2)$$

其中， θ 是相应高度上的位温， $\theta_{700\text{hPa}}$ 、 $\theta_{1000\text{hPa}}$ 分别表示 700 hPa、1000 hPa 高度上的位温， p_{00} 是标准大气压，通常取 1000 hPa， p 是相应高度上的气压值；比气体常数 $R=287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，定压比热容 $c_p=1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。

3 结果与分析

3.1 云特性空间分布

由图 2a、2b 可知，中国东部及邻近海域云量分布存在显著的季节差异。夏季云量高值分布范围较小且主要集中于陆地，由日本海至中南半岛存在一个东北西南走向的高值区，覆盖我国东部地区，平均云量大于 0.7，这与我国夏季风和水汽的输送基本一致（段皎和刘煜，2011a），夏季大量暖湿气流从孟加拉湾向东向北影响我国，在西太平洋副高北边缘带的共同影响下形成了该种分布（周喜讯

等，2016）。云量自这一高值区分别向西北、东南方向递减，在东部海域出现低值区，其云量小于 0.6。这与段皎和刘煜（2011a）和周喜讯等（2016）利用 ISCCP 资料得出的结论一致。从图 2b 可以看到，受气温和水汽条件影响，冬季暖云分布范围比夏季小，西北地区均无有效值，但是云量高值分布范围较广，高值区位于我国南方地区以及东部海域上空，最大值在 0.9 以上，云量的海陆差异没有夏季明显。

从图 2c、2d 可以看出，云滴有效半径夏冬季分布均为由东南洋面至西北内陆递减，且夏季云滴有效半径明显大于冬季。夏季高值区位于东南海域，最大值达 22 μm 以上，低值区位于 35°N 以北，最小值在 12 μm 以下。此外，在我国西南地区与中南半岛交界处，云滴有效半径也存在一个高值区，最大值达到 18 μm 以上，这是由印度季风爆发所带来的云和降水增多引起的（杨大生和王普才，2012a）。冬季高值区位置与夏季相同，最高值超过 18 μm ，低值中心位于我国西南地区，最小值在 10 μm 以下。

结合图 2e、2f 可知，液水路径的空间分布存在显著季节差异。夏季空间分布较为均一，在日本海以及渤海、台湾海峡等近海海域存在低值区，普遍低于 105 g m^{-2} ；大陆及东南方向的洋面上液水路径较高，在中南半岛与我国西南地区交界处存在一个大于 150 g m^{-2} 的高值中心，这与印度季风密切相关。冬季液水路径的空间差异很大，30°N 以北液水路径很低，普遍小于 90 g m^{-2} ，这可能与冬季北方地区多为下沉运动控制且水汽匮乏有关，30°N 以南液水路径普遍大于 105 g m^{-2} ，华南地区及东部海域均存在高值中心，最大值在 180 g m^{-2} 以上。总体来说，冬季东部海域高值区范围更大、强度更高，这是由于冬季洋面较暖、蒸发量较大，这与张华等（2015）利用 Cloudsat 资料得出的结论基本吻合。

3.2 云特性季节变化

中国东部地区地理位置特殊，受到青藏高原大地形及季风影响，云及其辐射强迫呈现显著的季节和区域差异（Wang et al., 2004），以下我们以中国东部大陆和邻近海域两个区域来分别讨论不同下垫面情况下云特性的季节变化趋势。

图 3a、3b 给出了中国东部大陆及邻近海域逐月平均云量及其概率分布，其中某一区间的发生概率是指该区间样本数与总样本数之比。由图 3a 可

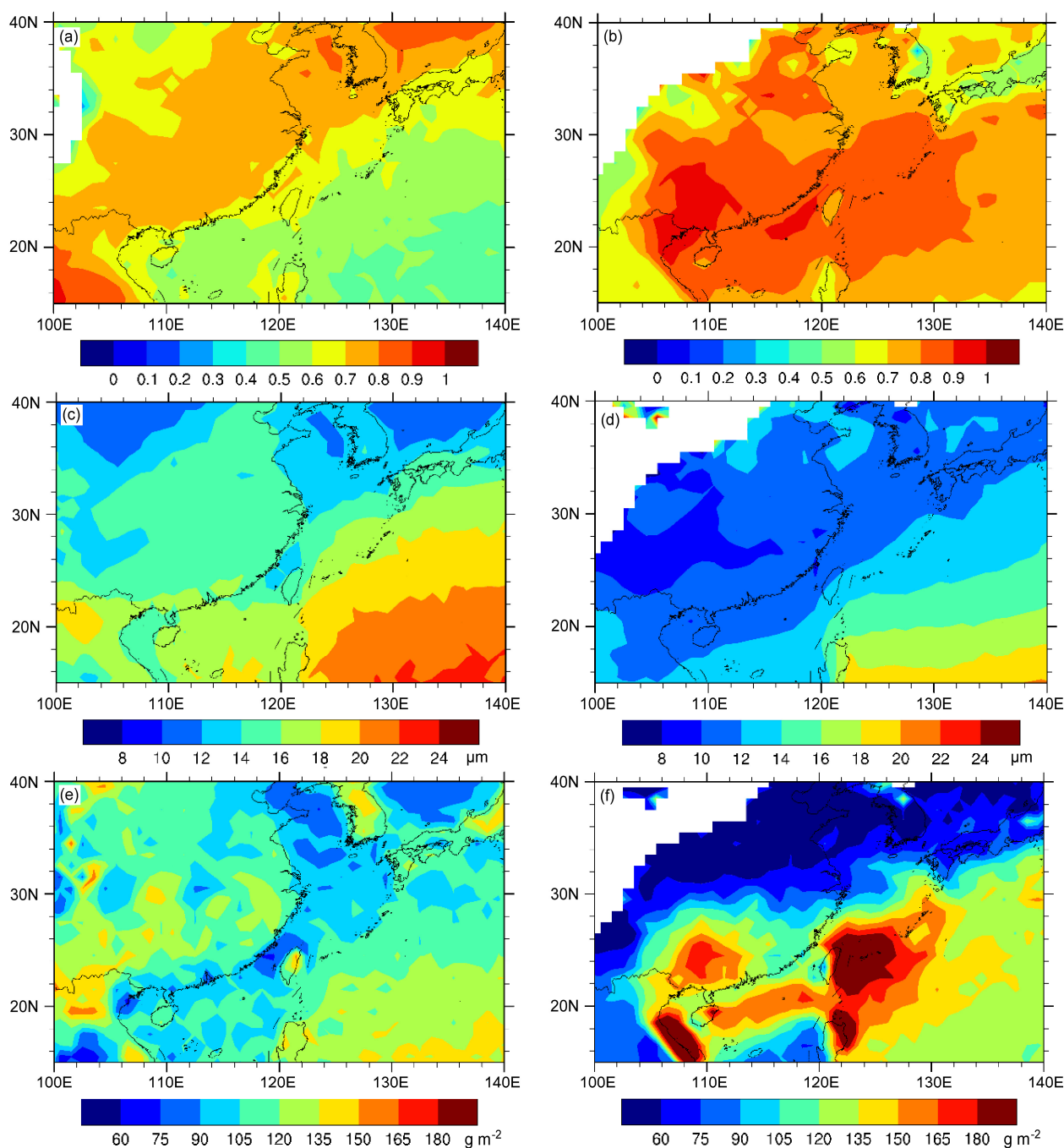


图2 2003~2016年夏季平均(左列)、冬季平均(右列)(a、b)云量、(c、d)云滴有效半径和(e、f)液水路径的空间分布
Fig. 2 Spatial distributions of (a, b) CF (Cloud Fraction), (c, d) CER (Cloud droplet Effective Radius), and (e, f) LWP (Liquid Water Path) averages for the summer (left column) and winter (right column) during 2003–2016

知,陆地云量的最高值为0.89,出现在3月;最低值为0.71,发生在7月。各月份最大分布概率的区间均集中在云量的大值端,随着云量减小,分布概率也逐渐减小,云量在小值区间的分布概率夏季大于冬季。由图3b可以看到,海洋上云量在12月最高,为0.81,7月最低,为0.51,季节变化较陆地

更为显著。各月份最大分布概率的区间从1月的0.925~0.95减小至7月的0.40~0.425,后又增加至12月的0.925~0.95,与月平均值的变化相一致。总体而言,陆地和海洋全年云量均在0.20~1的范围之间,且呈现出相似的季节变化,即冬季高于夏季。这可能是由于本文研究对象为暖云,多为中低

云, 冬季稳定的大气层结可将云的发展限制在底层空间, 因而云量较高, 而夏季亚洲季风区白天对流活动频繁, 以多层云和高云居多(汪会等, 2011)。此外, 吴润和刘佳(2011)在东亚地区的研究也发现中低云云量冬季高夏季低, 而高云却相反; Yu et al. (2004)对中国东部的研究同样发现了类似现象, 并指出青藏高原和西风气流的共同作用是造成云量在早春和冬季增加的主要原因, 冬春两季西风气流显著影响东亚地区, 在对流层低层产生以高原为中心的绕流, 且在高原东侧形成辐合, 而在对流层中层西风气流受到高原表面摩擦产生辐散, 低层辐合气流与中层辐散气流的共同作用在高原东侧产生大尺度抬升, 有利于层状云的形成。

由图 3c、3d 可知, 陆地和海洋全年云滴有效半径均在 $5\sim 30\ \mu\text{m}$ 的范围, 这与 Han et al. (1994) 利用 NOAA-AVHRR 观测资料反演得到的全球平均水云云滴尺度范围相一致。陆地云滴有效半径的最大值为 $15.14\ \mu\text{m}$, 出现在 8 月, 最低值为 $10.27\ \mu\text{m}$, 发生在 1 月; 海洋上云滴尺度整体大于陆地, 最大值为 $19.14\ \mu\text{m}$, 出现在 8 月, 最低值为 $12.89\ \mu\text{m}$, 发生在 3 月。陆地和海洋最大分布概率的区间与月平均值吻合, 且呈现出相似的季节变化, 即夏季高、冬季低, 其原因可归结为两点: (1) 气象条件的作用: 夏季大气中水汽含量充足, 且大气层结较不稳定、上升运动剧烈, 云滴易凝结增长至较大尺度, 当云滴尺度增至 $15\ \mu\text{m}$ 以上则碰并过程启动, 凝结和碰并的共同作用使得云滴有效半径进一步增大, 甚至产生降水; (2) 云凝结核 (CCN) 的作用: 由于夏季降水频繁, 大气中的颗粒污染物受到持续冲刷, 湿沉降较强, CCN 的减少将导致云滴尺度增大(杨大生和王普才, 2012a)。

液水路径范围在 $10\sim 1000\ \text{g m}^{-2}$ (由于 $600\ \text{g m}^{-2}$ 以上分布概率较小, 故图中未显示)。由图 3e、3f 可知, 不论陆地或海洋, 液水路径分布范围均表现为冬季分散、夏季集中, 在高值区 (大于 $250\ \text{g m}^{-2}$) 的分布概率冬季大于夏季。陆地上月均值没有明显变化, 但是最大分布概率区间呈夏季高冬季低的变化趋势, 1 月和 12 月最小, 仅为 $30\sim 45\ \text{g m}^{-2}$, 7 月和 8 月最大, 达到 $60\sim 75\ \text{g m}^{-2}$, 这与水汽和大气稳定性的季节变化相一致。海洋上月均值的变化呈双峰型, 两个峰值分别发生在 6 月 ($119.94\ \text{g m}^{-2}$) 和 12 月 ($166.45\ \text{g m}^{-2}$); 最大分布概率区间整体高于陆地, 且呈现出夏季高冬季低的变化趋势, 6、7

月最大, 为 $90\sim 105\ \text{g m}^{-2}$, 1 月和 12 月最小, 为 $45\sim 60\ \text{g m}^{-2}$ 。

3.3 云特性与气象条件的关系

为了理解动力、热力及水汽条件对云特性分布和变化的影响, 本文给出了不同 PWV 下云量随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 的变化情况 (图 4), 其中 $\omega_{850\text{hPa}}$ 是 850 hPa 高度处的垂直速度, 表征低层的上升运动强度; PWV 为大气可降水量, 是指单位面积空气柱中所有水汽都凝结成液态水时所具有的厚度, 表示水汽丰富程度。整体看来云量均随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 增大 (上升运动减弱) 而减小、随 PWV 增加而增大, 但不同区域、不同季节之间存在差异。在夏季, 陆地上 PWV 分布范围较广, 在 $1.5\sim 7.5\ \text{cm}$, 而海洋则集中在 $3.0\sim 7.5\ \text{cm}$ 的高值区。陆地上云量对 PWV 的响应较海洋上更明显, 且陆地上 PWV 越大, 随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 减小云量增加地越剧烈, 表明大气中水汽较多时, 受上升气流影响更易形成云。在冬季, 陆地和海洋的 PWV 均明显低于夏季, 范围分别为 $0\sim 4.5\ \text{cm}$ 和 $0\sim 6.0\ \text{cm}$, 且陆地云量随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 减小地更明显。

图 5 给出了不同 PWV 下云量随 LTS 的变化。整体看来云量均随 LTS 增大而增大、随 PWV 增加而增大, 但不同区域、不同季节之间表现不同。夏季云量对 LTS 的响应表现为海洋强于与陆地, 但冬季这种响应关系在陆地和海洋上均不如夏季明显, 这可能是由于冬季云的形成主要由大气环流造成的大尺度抬升主导, 热力因素的影响相对较弱。对比图 4 可以发现, 海洋上云量随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 的变化并没有随 LTS 明显, Wood and Hartmann (2006) 对于东太平洋低云的研究也发现了类似的现象。

结合以上分析, 由于低层的上升运动有利于水汽向上输送、凝结形成云, 因此云量与 $\omega_{850\text{hPa}}$ 存在负的相关关系; 但稳定的大气层结又会阻碍云进一步向上发展, 会使得云被限制在底层空间, 本文的研究对象为暖云, 多为中低云, 即表现为云量随 LTS 增大而增大 (Klein and Hartmann, 1993; Wood and Hartmann, 2006; Zhang et al., 2010)。

图 6 分析了不同 PWV 下云滴有效半径随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 的变化情况。可以看出, 在夏季, 陆地云滴有效半径随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 减小; 海洋上在 $\omega_{850\text{hPa}}$ 大于 0 时, 即大气表现为下沉运动时, 云滴有效半径随垂直速度迅速减小; 不论陆地或海洋, 夏季 PWV 对云滴有效半径的影响并不明显, 即云滴尺度对水汽条件并不敏感, 这是由于夏季下垫面接收到的太阳辐射

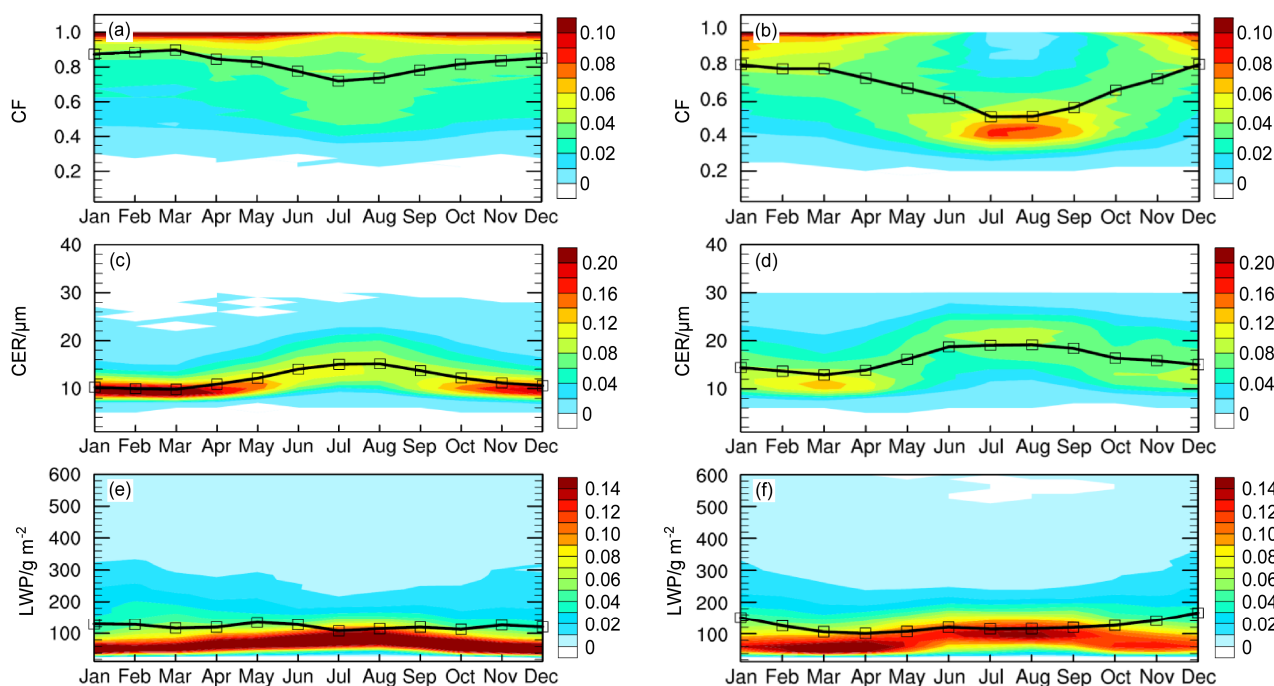


图3 中国东部大陆(左列)及邻近海域(右列)1~12月逐月平均的(a、b)云量(折线)、(c、d)云滴有效半径(折线)和(e、f)液水路径(折线)及其概率分布函数PDF(填色)

Fig. 3 Seasonal cycles of (a, b) CF (fold lines), (c, d) CER (fold lines), and (e, f) LWP (fold lines) and their the probability distribution functions (PDF, colored) for eastern China (left column) and adjacent ocean (right column), respectively

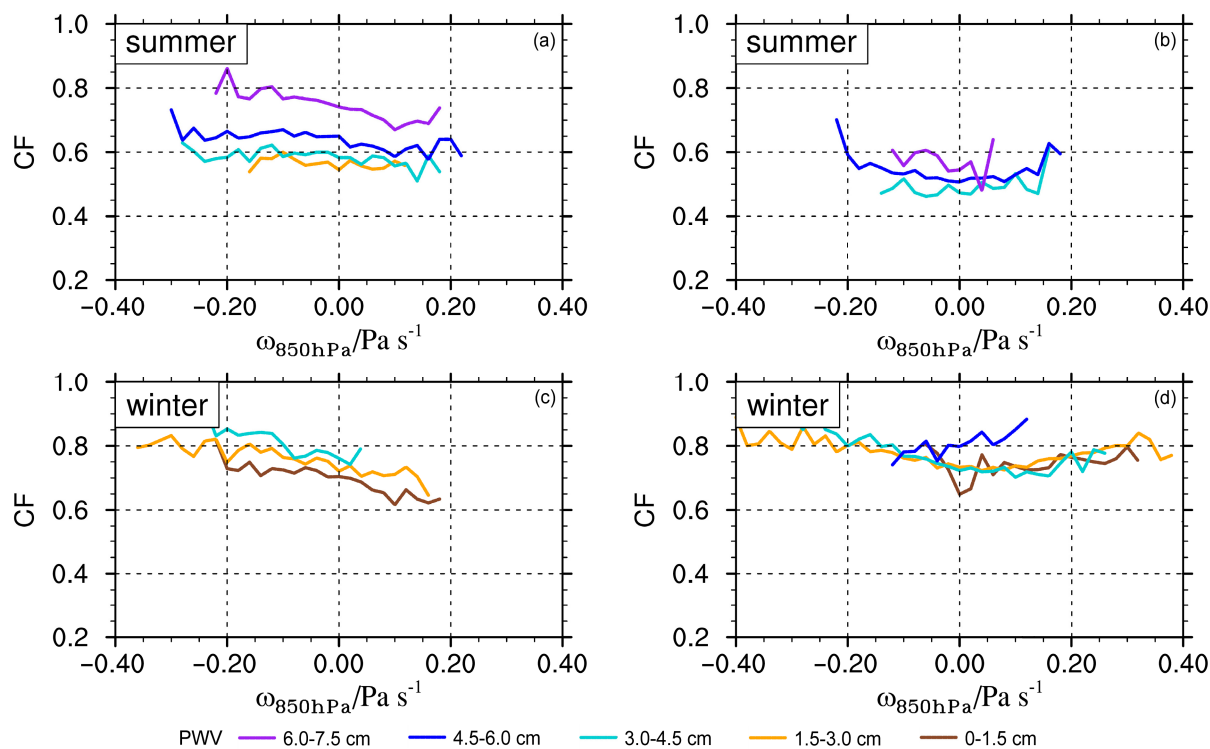


图4 中国东部大陆(左列)及邻近海域(右列)不同PWV(单位: cm)情况下云量随 ω_{850hPa} (单位: Pa/s)的变化情况:(a、b)夏季;(c、d)冬季

Fig. 4 CF as a function of ω_{850hPa} under different ranges of PWV for eastern China (left column) and adjacent ocean (right column): (a, b) Summer; (c, d) winter

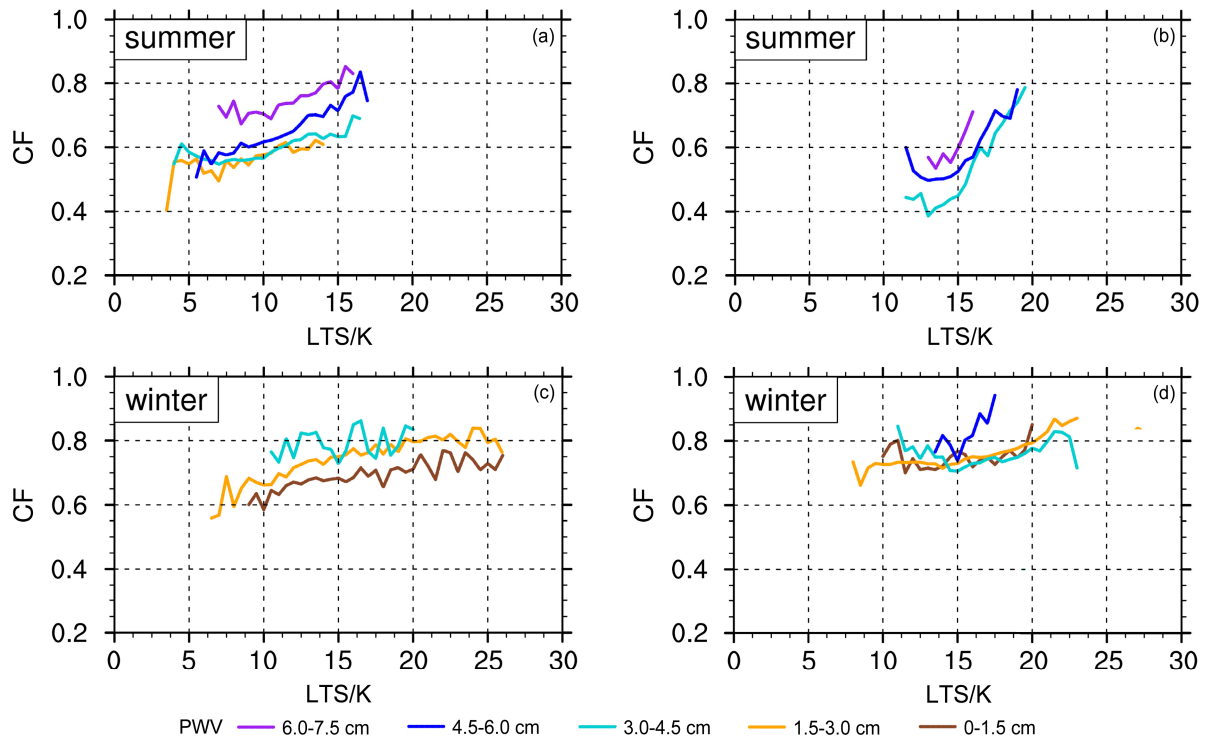


图5 中国东部大陆（左列）及邻近海域（右列）不同PWV（单位：cm）情况下云量随LTS（单位：K）的变化情况：（a、b）夏季；（c、d）冬季
Fig. 5 CF as function of LTS (Low Troposphere Stability), under different ranges of of PWV for eastern China (left column) and adjacent ocean (right column): (a, b) Summer; (c, d) winter

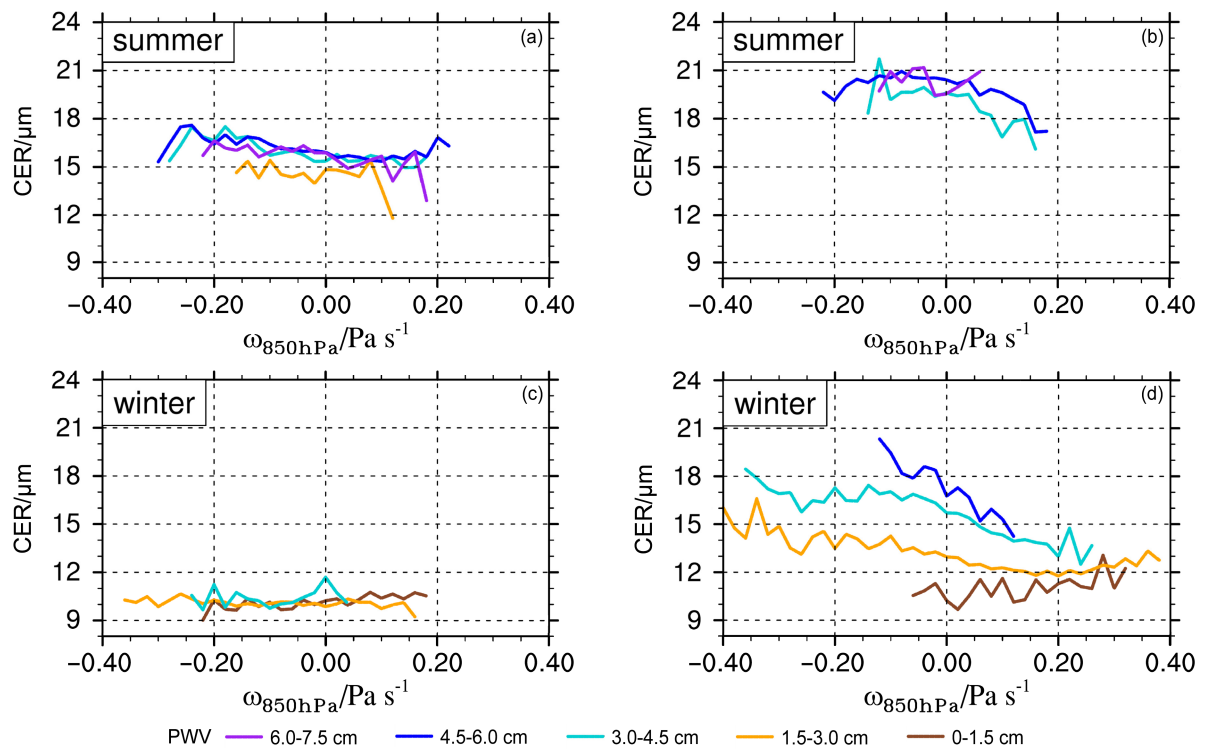


图6 中国东部大陆（左列）及邻近海域（右列）不同PWV（单位：cm）情况下云滴有效半径随 ω_{850hPa} （单位：Pa/s）的变化情况：（a、b）夏季；（c、d）冬季

Fig. 6 CER as a function of ω_{850hPa} under different ranges of PWV for eastern China (left column) and adjacent ocean (right column): (a, b) Summer; (c, d) winter

多, 地表蒸发量大, 水汽充足, 此时水汽并不是影响云滴尺度的主导因素, 其主要受动力、热力抬升作用及 CCN 浓度等的影响。在冬季, 由于陆地上水汽匮乏且大气层结相对稳定, 因此云滴有效半径很小, 均在 $12\ \mu\text{m}$ 以下, 其与 $\omega_{850\text{hPa}}$ 的关系并不显著。海洋上云滴有效半径随 PWV 增加明显增大, 且 PWV 越大, 云滴尺度随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 减小得越快, 表明在水汽充足的条件下, 上升运动稍有加强就会使得云滴尺度显著增大。

图 7 分析了不同 PWV 下云滴有效半径随 LTS 的变化。可以看到, 夏季陆地上 LTS < 10 K, 即大气层结不稳定时, 云滴有效半径维持在较高水平 (大于 $15\ \mu\text{m}$), 且对 LTS 和 PWV 均不敏感; 当 LTS > 10 K 时, 云滴尺度随 LTS 迅速减小, 表明稳定的大气层结限制了云的垂直发展, 阻碍了云滴凝结增长过程。结合图 6 可知, 夏季海洋上云滴有效半径对 LTS 的敏感度远强于对 PWV 和 $\omega_{850\text{hPa}}$, 表现为随 LTS 增大急剧减小, 这表明夏季海洋上云滴尺度主要由热力抬升作用主导。与夏季类似, 冬季陆地和海洋上云滴有效半径均随 LTS 增大而减小, 海洋上这一现象更为明显。

为了详细研究液水路径与水汽及动力条件的关系, 本文给出了不同 PWV 下液水路径随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 的变化情况 (图 8)。总体看来液水路径与 PWV 并无明显关系, 但随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 增加而减小, 即强的上升运动促进了水汽转化为云水的过程, 这与 Wood and Hartmann (2006) 的研究结论一致。在夏季, 陆地上液水路径与 $\omega_{850\text{hPa}}$ 始终呈负相关, 但在海洋上, $\omega_{850\text{hPa}}$ 为负值 (表现为上升运动) 时, 液水路径随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 无明显变化, 为正值时, 液水路径随之减小。在冬季, 陆地和海洋的液水路径均随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 减小, 但在海洋 PWV 小于 $1.5\ \text{cm}$ 时, 液水路径随 $\omega_{850\text{hPa}}$ 无明显变化, 此时液水路径很小, 介于 $50\sim 80\ \text{g m}^{-2}$ 。

此外, 热力条件与液水路径也有一定关系, 图 9 给出了不同 PWV 下液水路径随 LTS 的变化情况。可以看到, 无论冬季还是夏季, 陆地上液水路径与 LTS 及 PWV 均无明显关系。夏季海洋上液水路径对 PWV 不敏感、随 LTS 减小明显, 冬季 PWV 越大对应液水路径越大, 且在 PWV 小于 $3\ \text{cm}$ 时液水路径与 LTS 呈负相关, 大于 $3\ \text{cm}$ 时负相关不明显, 在 PWV 大于 $4.5\ \text{cm}$ 时甚至表现为正相关。

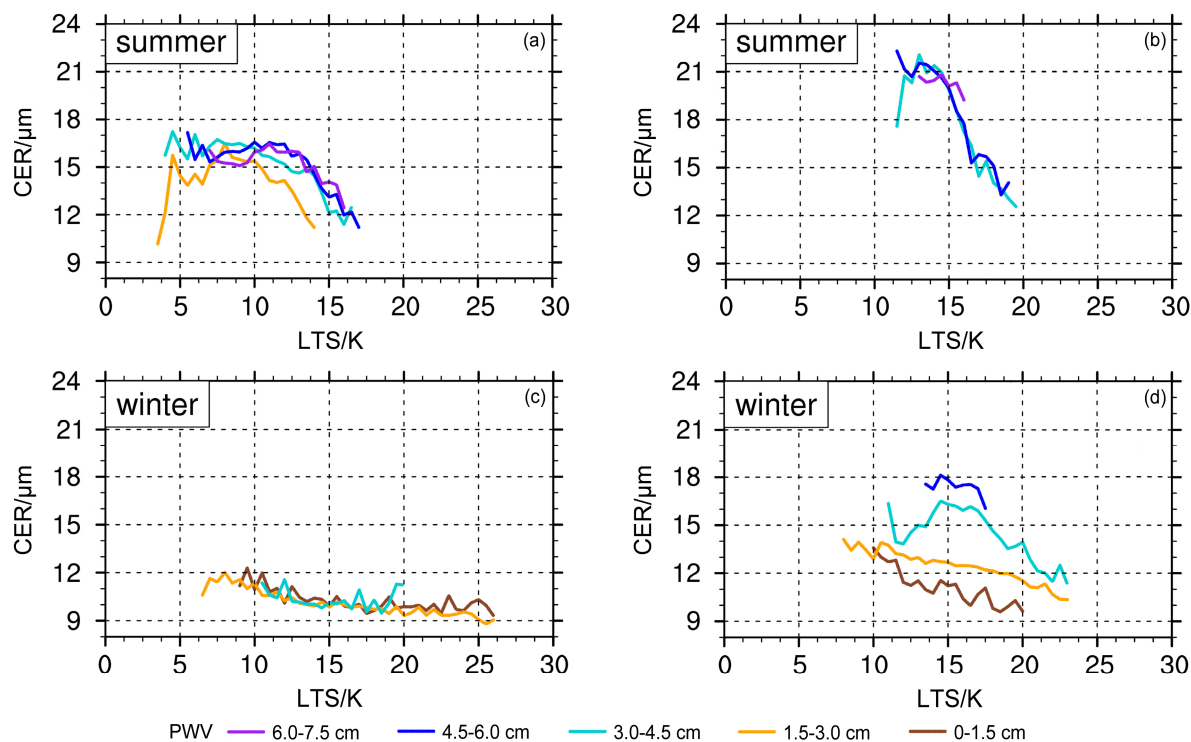


图 7 中国东部大陆 (左列) 及邻近海域 (右列) 不同 PWV (单位: cm) 情况下云滴有效半径随 LTS (单位: K) 的变化情况: (a、b) 夏季; (c、d) 冬季

Fig. 7 CER as a function of LTS under different ranges of PWV for eastern China (left column) and adjacent ocean (right column): (a, b) Summer; (c, d) winter

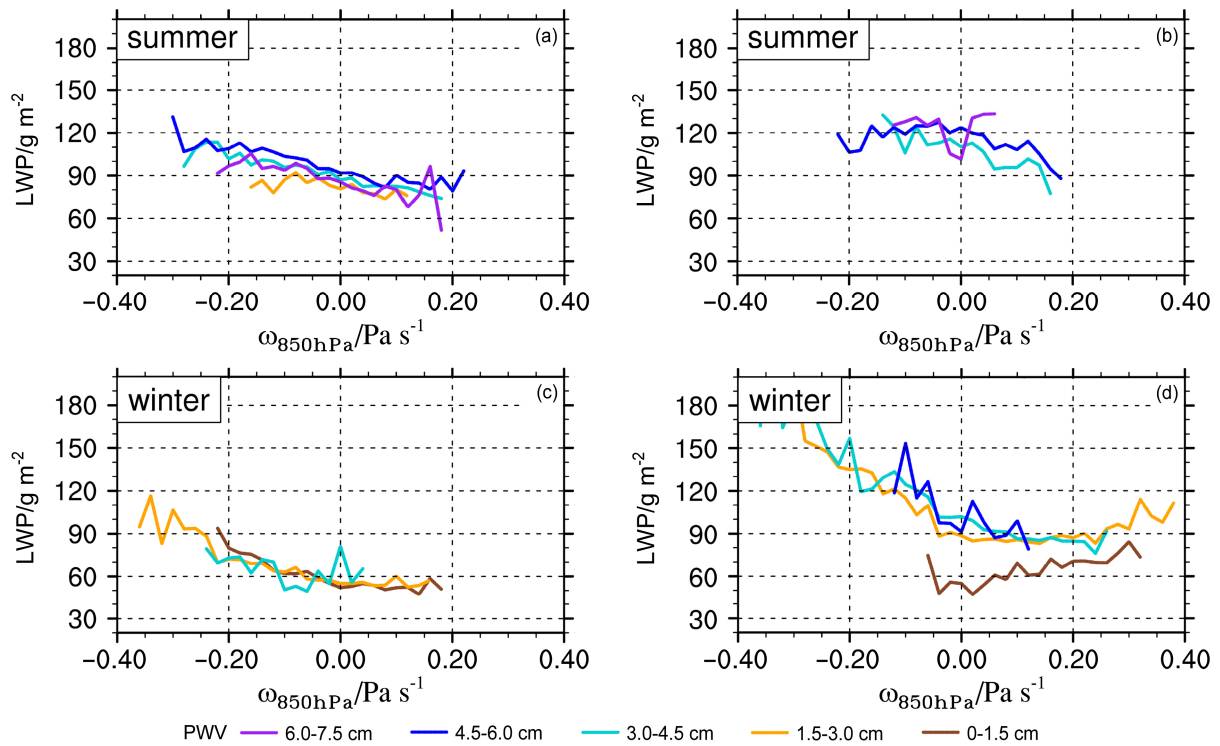


图 8 中国东部大陆 (左列) 及邻近海域 (右列) 不同 PWV (单位: cm) 情况下液水路径随 $\omega_{850\text{hPa}}$ (单位: Pa/s) 的变化情况: (a, b) 夏季; (c, d) 冬季

Fig. 8 LWP as a function of $\omega_{850\text{hPa}}$ under different ranges of PWV for eastern China (left column) and adjacent ocean (right column): (a, b) Summer; (c, d) winter

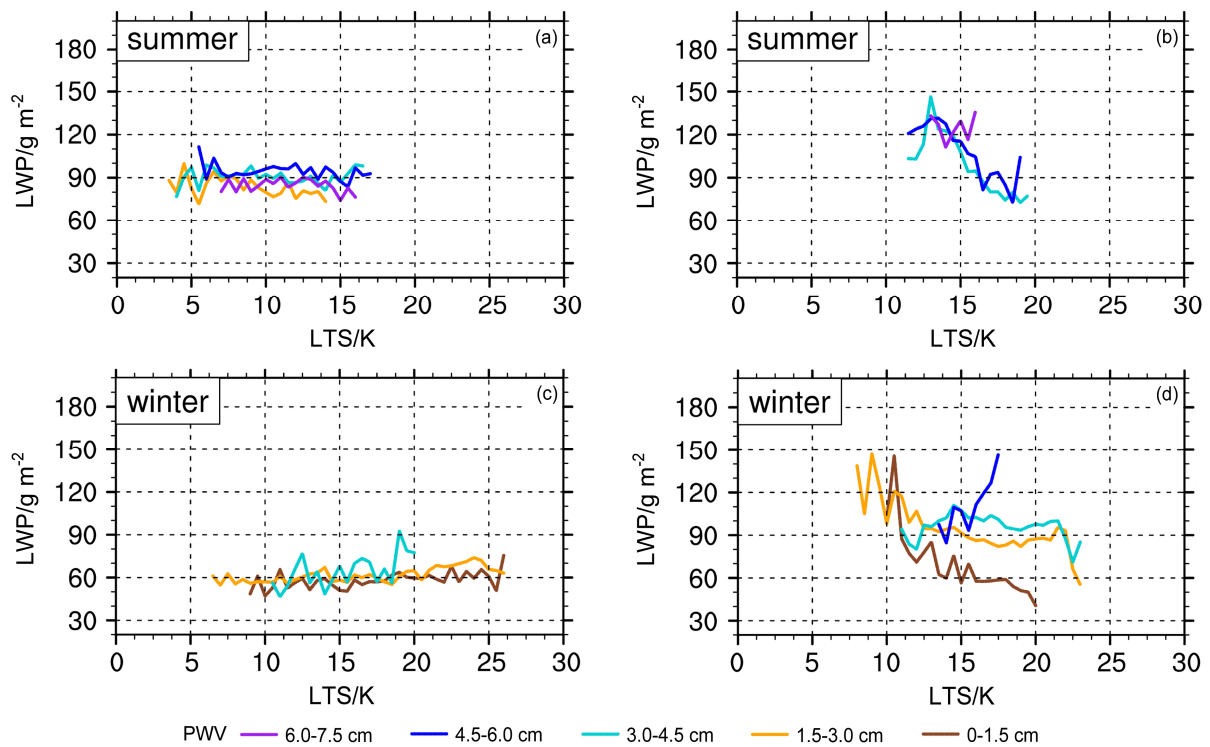


图 9 中国东部大陆 (左列) 及邻近海域 (右列) 不同 PWV (单位: cm) 情况下液水路径随 LTS (单位: K) 的变化情况: (a, b) 夏季; (c, d) 冬季

Fig. 9 LWP as a function of LTS under different ranges of PWV for eastern China (left column) and adjacent ocean (right column): (a, b) Summer; (c, d) winter

4 结论

本文利用长期(2003~2016年)的MODIS/Aqua云资料, 分析了中国东部大陆及其邻近海域暖云宏观物理特性(包括云量、云滴有效半径和液水路径等)的空间分布及季节变化, 并结合同期的ERA-Interim再分析资料进一步探讨了不同下垫面下暖云特性与动力、热力及水汽条件之间的关系, 得到以下结论:

(1) 夏季由日本海至中南半岛存在一个东北西南走向的云量高值区, 覆盖我国东部地区, 平均云量大于 0.7, 夏季大量暖湿气流从孟加拉湾向东向北影响我国, 在西太平洋副热带高压北边缘带的共同影响下形成了这种分布。冬季云量高值区位于我国南方地区以及东部海域上空, 最大值在 0.9 以上。夏季的云滴有效半径明显大于冬季, 但分布态势较为一致, 均为由东南洋面至西北内陆递减。夏季液水路径空间分布较为均一, 冬季液水路径的空间差异很大, 30°N 是明显的高低值分界线, 以北液水路径很低, 普遍小于 90 g m^{-2} , 这可能与冬季北方地区多为下沉运动控制且水汽匮乏有关。

(2) 陆地云量大于海洋, 且均呈冬高夏低的变化趋势, 这是由于本文研究对象为暖云, 多为中低云, 冬季稳定的大气层结可将云的发展限制在底层空间, 因而云量较高, 而夏季对流活动较频繁, 多层云和高云较为常见。云滴有效半径和液水路径则为夏高冬低, 海洋整体大于陆地, 这与水汽、动力、热力条件及 CCN 均有一定联系。

(3) 总体来说, 云量与 PWV 和 LTS 均表现为正相关、与 $\omega_{850\text{hPa}}$ 呈负相关, 表明水汽充足时更易形成云, 低层的上升运动有利于水汽向上输送、凝结形成云, 但稳定的大气层结又会阻碍云进一步向上发展, 使得云被限制在较低高度, 而本文的研究对象为暖云, 多为中低云, 因而造成云量较高; 云滴有效半径和液水路径均与 LTS、 $\omega_{850\text{hPa}}$ 表现为负相关, 但是对 PWV 的变化不是很敏感, 这表明水汽并不是影响云滴尺度和液水路径的主导因素, 其主要受动力、热力抬升作用的影响; 以上关系在不同区域、不同季节的表现存在一定差异。

鉴于目前对于冷云的卫星反演不确定性很大, 因此本文主要侧重于分析暖云的宏观特性、及其与气象条件的关系。随着今后对于冷云卫星反演能

力的不断改进和提高, 对于不同类别云的特性分析, 之后仍需做进一步研究。

参考文献 (References)

- 曹芸, 何永健, 邱新法, 等. 2012. 基于地面观测资料的 MODIS 云量产品订正 [J]. 遥感学报, 16 (2): 325–342. Cao Yun, He Yongjian, Qiu Xinfu, et al. 2012. Correction methods of MODIS cloud product based on ground observation data[J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 16 (2): 325–342, doi:10.11834/jrs.20102368.
- 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 2005. 西北地区空中云水资源的时空分布特征 [J]. 高原气象, 24 (6): 905–912. Chen Yonghang, Huang Jianping, Chen Changhe, et al. 2005. Temporal and spatial distributions of cloud water resources over northwestern China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (6): 905–912, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.06.009.
- 陈勇航, 陈艳, 黄建平, 等. 2007. 中国西北地区云的分布及其变化趋势[J]. 高原气象, 26 (4): 741–748. Chen Yonghang, Chen Yan, Huang Jianping, et al. 2007. Distribution and variation trend of cloud over northwestern China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (4): 741–748.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0) [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-464+STR, 226 pp, doi:10.5065/D63N21CH.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137 (656): 553–597, doi:10.1002/qj.828.
- 段皎, 刘煜. 2011a. 近 20 年中国地区云量变化趋势 [J]. 气象科技, 39 (3): 280–288. Duan Jiao, Liu Yu. 2011a. Variation and trends of cloud amount in China over past 20 years [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39 (3): 280–288, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.03.004.
- 段皎, 刘煜. 2011b. 中国地区云光学厚度和云滴有效半径变化趋势 [J]. 气象科技, 39 (4): 408–416. Duan Jiao, Liu Yu. 2011b. Trends of cloud optical thickness and cloud effective radius variation in China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39 (4): 408–416, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.04.004.
- Han Q Y, Rossow W B, Lacis A A. 1994. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data [J]. J. Climate, 7 (4): 465–497, doi:10.1175/1520-0442(1994)007<0465:NGSOED>2.0.CO;2.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 881.
- King M D, Menzel W P, Kaufman Y J, et al. 2003. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 41 (2): 442–458, doi:10.1109/TGRS.2002.808226.
- King M D, Platnick S, Menzel W P, et al. 2013. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 51 (7): 3826–3852, doi:10.1109/TGRS.2012.2227333.
- Klein S A, Hartmann D L. 1993. The seasonal cycle of low stratiform clouds [J]. J. Climate, 6 (8): 1587–1606, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1587:

- TSCOLS>2.0.CO₂.
- Koshiro T, Shiotani M. 2014. Relationship between low stratiform cloud amount and estimated inversion strength in the lower troposphere over the global ocean in terms of cloud types [J]. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, 92 (1): 107–120, doi:10.2151/jmsj.2014-107.
- Kotarba A Z. 2009. A comparison of MODIS-derived cloud amount with visual surface observations [J]. *Atmospheric Research*, 92 (4): 522–530, doi:10.1016/j.atmosres.2009.02.001.
- 李兴宇, 郭学良, 朱江. 2008. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1094–1106. Li Xingyu, Guo Xueliang, Zhu Jiang. 2008. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1094–1106, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.09.
- Li Y Y, Gu H. 2006. Relationship between middle stratiform clouds and large scale circulation over eastern China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (9): L09706, doi:10.1029/2005GL025615.
- Liou K N. 2004. 大气辐射导论 [M]. 郭彩丽, 周诗健, 译. 北京: 气象出版社, 416pp. Liou K N. 2004. An Introduction to Atmospheric Radiation (in Chinese) [M]. Guo Caili, Zhou Shijian, trans. Beijing: China Meteorological Press, 416pp.
- Liu H B, Tang S H, Zhang S L, et al. 2015. Evaluation of MODIS water vapour products over China using radiosonde data [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 36 (2): 680–690, doi:10.1080/01431161.2014.999884.
- Noble S R, Hudson J G. 2015. MODIS comparisons with northeastern Pacific in situ stratocumulus microphysics [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (16): 8332–8344, doi:10.1002/2014JD022785.
- 彭杰, 沈新勇, 王志立, 等. 2010. 中国地区云的观测研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 38 (24): 13070–13073. Peng Jie, Shen Xinyong, Wang Zhili, et al. 2010. Overview of observational researches on clouds over China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese)*, 38 (24): 13070–13073, doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2010.24.056.
- 彭杰, 张华, 沈新勇. 2013. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. *大气科学*, 37 (1): 91–100. Peng Jie, Zhang Hua, Shen Xinyong. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (1): 91–100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188.
- Saponaro G, Kolmonen P, Sogacheva L, et al. 2017. Estimates of the aerosol indirect effect over the Baltic Sea region derived from 12 years of MODIS observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (4): 3133–3143, doi:10.5194/acp-17-3133-2017.
- 宋松涛, 张武, 陈艳, 等. 2013. 中国西北地区近 20 年云水路径时空分布特征 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 49 (6): 787–793, 798. Song Songtao, Zhang Wu, Chen Yan, et al. 2013. Temporal and spatial distributions of cloud water path over northwestern China in the recent 20 years [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 49 (6): 787–793, 798, doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2013.06.022.
- 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1117–1131. Wang Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 1117–1131, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.11.
- Wang W C, Gong W, Kau W S, et al. 2004. Characteristics of cloud radiation forcing over East China [J]. *J. Climate*, 17 (4): 845–853, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0845:COCRFO>2.0.CO;2.
- Wood R, Hartmann D L. 2006. Spatial variability of liquid water path in marine low cloud: The importance of mesoscale cellular convection [J]. *Journal of Climate*, 19 (9): 1748–1764, doi:10.1175/JCLI3702.1.
- Wood R, Bretherton C S. 2006. On the relationship between stratiform low cloud cover and lower-tropospheric stability [J]. *J. Climate*, 19 (24): 6425–6432, doi:10.1175/JCLI3988.1.
- 吴润, 刘佳. 2011. 近二十年全球变暖背景下东亚地区云量变化特征分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (4): 551–559. Wu Jian, Liu Jia. 2011. Trend of cloud amount in East Asia under the backdrop of global warming in the past 20 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27 (4): 551–559, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.012.
- 杨大生, 王普才. 2012a. 中国地区夏季云粒子尺寸的时空分布特征 [J]. *气候与环境研究*, 17 (4): 433–443. Yang Dasheng, Wang Pucai. 2012a. Tempo-spatial distribution characteristics of cloud particle size over China during summer [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (4): 433–443, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10066.
- 杨大生, 王普才. 2012b. 中国地区夏季 6~8 月云水含量的垂直分布特征 [J]. *大气科学*, 36 (1): 89–101. Yang Dasheng, Wang Pucai. 2012b. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 89–101, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.08.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau [J]. *J. Climate*, 17 (13): 2702–2713.
- Zhang G J, Vogelmann A M, Jensen M P, et al. 2010. Relating satellite-observed cloud properties from MODIS to meteorological conditions for marine boundary layer clouds [J]. *J. Climate*, 23 (6): 1374–1391, doi:10.1175/2009JCLI2897.1.
- 张华, 杨冰韵, 彭杰, 等. 2015. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. *大气科学*, 39 (2): 235–248. Zhang Hua, Yang Bingyun, Peng Jie, et al. 2015. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the CloudSat dataset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (2): 235–248, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13313.
- Zhang Z B, Ackerman A S, Feingold G, et al. 2012. Effects of cloud horizontal inhomogeneity and drizzle on remote sensing of cloud droplet effective radius: Case studies based on large-eddy simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D19), doi:10.1029/2012JD017655.
- 周喜讯, 张华, 荆现文. 2016. 中国地区云量和云光学厚度的分布与变化趋势 [J]. *大气与环境光学学报*, 11 (1): 1–13. Zhou Xixun, Zhang Hua, Jing Xianwen. 2016. Distribution and variation trends of cloud amount and optical thickness over China [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics (in Chinese)*, 11 (1): 1–13, doi:10.3969/j.issn.1673-6141.2016.01.001.