方乐锌, 李昀英, 孙国荣, 等. 2016. 基于 CloudSat-CALIPSO 资料的全球不同类型云的水平和垂直分布特征 [J]. 气候与环境研究, 21 (5): 547-556. Fang Lexin, Li Yunying, Sun Guorong, et al. 2016. Horizontal and vertical distributions of clouds of different types based on CloudSat-CALIPSO data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (5): 547-556, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15240.

基于 CloudSat-CALIPSO 资料的全球不同类型 云的水平和垂直分布特征

方乐锌^{1,2} 李昀英¹ 孙国荣¹ 高翠翠¹ 卢志贤¹

1 解放军理工大学气象海洋学院,南京 211101 2 中国人民解放军 96211 部队 84 分队,云南建水 654300

摘 要 基于 CloudSat-CALIPSO (CloudSat-Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星 观测资料,分析了全球总云量和 8 类云的云量、云底高、云顶高、云厚度的水平和垂直分布。分析结果表明,全 球平均总云量为 66.7%,其中卷云 (Ci)和层积云 (Sc)云量之和与其他 6 类云量总和相当,是全球云量最多的 两类云。积状云云量呈现从赤道向极地递减的特征,层状云则相反,反映了二者不同的生成环境,同时下垫面地 形和天气系统也严重影响云的分布。8 类云的高度及厚度特征有显著差异。Ci 的云底高度和云顶高度都较高,厚 度则较薄;高层云 (As)和高积云 (Ac)的云底高度和云顶高度都位于大气中层,但 As 比 Ac 出现的高度高且厚 度大;层云 (St)、层积云和积云 (Cu)的云底高度和云顶高度都很低,属于薄的低云;雨层云 (Ns)和深对流 云 (DC)云底较低但云顶伸展很高,归属于厚云类。总体而言,海洋上云底高度较陆地低;赤道等大气不稳定地 区,云底较高,云厚度较大;高原地区则表现出"高云不高,低云不低,云厚较薄"的特征。

关键词 CloudSat-CALIPSO 资料 云类 分布特征

文章编号1006-9585 (2016) 05-0547-10中图分类号P426文献标识码Adoi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15240

Horizontal and Vertical Distributions of Clouds of Different Types Based on CloudSat-CALIPSO Data

FANG Lexin^{1, 2}, LI Yunying¹, SUN Guorong¹, GAO Cuicui¹, and LU Zhixian¹

1 School of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 2 84 Team of PLA 96211 Unit, Jianshui, Yunnan 654300

Abstract Global mean total amount of clouds is 66.7%. The total cloud fraction of Cirrus (Ci) and Stratocumulus (Sc) clouds is comparable to the sum of clouds of other six types, indicating that Ci and Sc clouds are two most frequently occurring cloud types over the globe. The amount of cumuliform clouds decreases from tropical to subtropical, while the amount of stratiform clouds changes in the opposite direction, indicating different environments for the formation of cumuliform and stratiform clouds. The topography and synoptic systems can affect cloud occurrence too. The cloud height and thickness of eight types of clouds are significantly different in different regions. Ci clouds, with higher cloud base and top, are very thin. Altostratus (As) clouds and Altocumulus (Ac) clouds are mid-level clouds, but As clouds are

收稿日期 2015-10-27; 网络预出版日期 2016-04-20

作者简介 方乐锌, 男, 1982年出生, 硕士, 工程师, 主要从事气候学研究。E-mail: fanglexin1982@163.com

通讯作者 李昀英,女,1970年出生,博士,教授,主要从事气候学研究。E-mail: liyunying2005@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41475069、41075034,财政部/科技部公益类行业专项 201306068

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475069 and 41075034), China R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Grant 201306068)

thicker and located at higher levels than Ac clouds. Stratus (St), Sc, and Cumulus (Cu) clouds are thin clouds occurring in the lower atmosphere. Nimbostratus (Ns) and deep convective (DC) clouds are thick clouds with lower cloud base and higher cloud top. Overall, the height of the cloud base over the ocean is lower than that over the land. The cloud base is higher and the cloud depth is thicker in relatively unstable atmosphere such as over the equator than in stable atmosphere. Clouds over the Plateau are characterized by the features that high-clouds are not high and low-clouds are not low while the cloud depth is usually thin.

Keywords CloudSat-CALIPSO data, Cloud type, Characteristics of distribution

1 引言

不同类型的云具有各自的宏观和微物理特征。 了解不同类型云的云量、云出现的高度,对开发利 用空中水资源如人工增雨等具有重要意义(代娟 等,2009)。云的类型和云底高度对飞机起降也有 较大影响,积雨云、雨层云等还可能严重威胁飞行 安全。多年来,虽然地面观测和卫星观测积累了大 量的云类资料,但由于地面和卫星观测方式各自的 局限性,在出现多层云的情况下,二者都无法准确 给出云的垂直结构信息(李昀英等, 2014),因此 以往学者对云的研究多限于对总云量或云发生频 率水平分布的研究(Li et al., 2004; 王帅辉等, 2010; 高翠翠等, 2015), 对不同类型云垂直分布的研究 较少(Luo et al., 2009; 尚博等, 2012; 彭杰等, 2013; 张华等, 2015)。2006 年 4 月 CloudSat 和 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星发射升空, 其 搭载的云雷达与激光雷达具有较高的分辨率且可 穿透上层云识别下层云,为反演云的类型和云的垂 直结构提供了便利。CloudSat 基于国际地面观测云 分类标准,并借鉴 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) (Rossow and Schiffer, 1999)等应用广泛的云分类研究经验,将云分为高、 中、低、厚4族8类,在此基础上, Sassen and Wang (2008)利用一年的 CloudSat CPR (Cloud Profiling Radar)探测资料对全球总云量和各类云分云量的水 平分布进行了分析研究,并通过与 ISCCP 和地面观 测云量水平分布的对比发现, CloudSat 探测的总云 和各类云在分布上与后两种云资料具有较好的一 致性,但在量级上存在明显差异。Luo et al. (2009) 利用两种 CloudSat 标准数据产品(2B-GEOPROF 和 2B-GEOPROF-lidar) 对中国东部和印度季风区 上空云的发生频率、垂直分布高度和雷达反射率因 子的季节变化进行了对比分析,发现研究结论与基

于 ISCCP 资料分析的结论(Yu et al., 2001)一致, 表明 CloudSat 和 ISCCP 资料在反映云的空间与季 节分布上具有较好的一致性,但也发现由于 CloudSat 能够识别多层云中的较低云层导致 CloudSat 表示的积云、层云等云的发生频率比 ISCCP 略高 10%。利用 CloudSat CPR 优秀的穿透 云层能力,不少学者对云的垂直分布做了研究,如 Posselt et al. (2008)利用 CloudSat CPR 回波强度资 料(2B-GEOPROF)和 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 辅助资料 (ECMW-AUX),并结合 ECMWF 全球再分析资 料,对数个冷暖锋面两侧的云、温度和降水分布进 行了分析研究,指出 CloudSat 卫星可作为模式评估 的有力工具用来评估锋面云系和降水的分布,此 后, Naud et al. (2012) 利用 CloudSat/CALIPSO 观 测资料和 MERRA (Modern Era Retrospectiveanalysis for Research and Applications) 再分析资料, 对南北半球温带气旋暖锋附近的云系、可降水量和 温压风等气象要素进行了三维立体的分析研究,其 研究结论有利于加深对南北半球温带气旋结构的 理解,促进了大气环流模式对中气旋动力学、大气 水汽含量和锋面云量之间相互作用的表述方法的 改进。此外, Luo et al. (2009) 在对比分析中国东 部和印度季风区上空云系差异的同时还研究了单 层云、多层云的出现频率,这是以往卫星云观测资 料难以实现的。但是,由于 CloudSat CPR 对浅薄的 低云和高积云及光学厚度小的卷云探测能力偏弱、 水平探测范围偏大以及近地面 1 km 以下受地物杂 波影响偏大等局限性, 部分低云和卷云探测数据可 信度低、层云和层积云难以区分,而 CALIPSO 星 载云—气溶胶激光雷达(Cloud-Aerosol lidar)对光 学厚度小的卷云和物理厚度薄的高积云的高探测 能力以及更为精细的探测范围(Wang, 2013),刚 好弥补了 CPR 的不足。因此, Sassen and Wang (2008) 对结合 CloudSat 和 CALIPSO 探测资料进 行云的特征反演与研究提出了展望。

其次,不同类型的云产生的辐射效应不同,云 底高度、云顶高度和云的厚度,也对地球辐射收支 平衡有很大影响。在数值模式中,云的类型(层状 云或对流云)或云高度的模拟误差,都可能通过辐 射效应造成天气和气候的模拟偏差(汪方和丁一 汇,2005)。由于高分辨率云资料的缺乏,能用于 评估模式中云的类型和云垂直结构的观测资料非 常有限。CloudSat 和 CALIPSO 的二级云产品提供 了不同类型云的垂直分布信息,为评估模式提供了 观测数据。

本文利用 CloudSat 和 CALIPSO 结合的云资料, 分析全球不同类型云的水平分布和垂直分布,重点 分析云底高度、云顶高度和云的厚度分布特征,希 望能为气候模式中云的评估提供参考,也能为空中 水资源利用提供有用信息。

2 资料及处理方法

分析所使用的资料是 2006 年 6 月至 2010 年 12 月的 CloudSat 和 CALIPSO 卫星资料合成的二级云 产品 2B-CLDCLASS-LIDAR (Wang, 2013)。该产 品为卫星轨道资料,每条轨道由大约 37080 条廓线 构成。CloudSat 卫星上搭载的云雷达 CPR 的采样分 辨率(即每条廓线)是沿轨 1.1 km×横轨 1.3 km, 垂直方向上包含 125 层,每层 240 m。每条廓线内 都提供了云的类型、不同类型云的云底高度和云顶 高度,最多可提供 10 层云的信息。CALIPSO 卫星 上搭载的激光雷达 lidar 具有比 CPR 更精细的分辨 率,但产品合成时降维至与 CPR 相同的分辨率。

CloudSat-CALIPSO 卫星观测为全球扫描,约 16 d 才会重复扫描某个固定区域一次。为提高资料 的空间和时间分辨率,增加分析样本,本文将逐轨 资料处理成 1°(纬度)×1°(经度)的月平均格点 资料,即在水平分辨率 1°(纬度)×1°(经度)格 点内,一个月内所有落入该格点的廓线资料全部融 合,垂直分辨率保持不变,形成月平均三维云资料 集。据统计,CloudSat 卫星每月经过每个低纬 1°(纬 度)×1°(经度)格点 2~3 次,采集 250~300 条 廓线数。格点总云量定义为格点内有云的廓线数除 以总廓线数,各垂直层云量定义为各层有云的廓线 数除以总廓线数。利用廓线资料和该方法统计的云 量与云频率具有同等概念,下文将不再区分对待。 格点资料集包含各垂直层云的类型和云量,从云在 垂直层上的连续分布状况可获得该类云的云顶高 度和云底高度信息,同一类云在垂直方向上可出现 多层。

2B-CLDCLASS-LIDAR 产品将云区分为4族8 类,高云族仅包含卷云(Ci),中云族包括高层云 (As)和高积云(Ac),低云族包括层积云(Sc)、 积云(Cu)和层云(St),厚云族包括雨层云(Ns) 和深对流云(DC)。云的分类是按照云体的水平和 垂直尺度、是否伴有降水、云的相态、云顶温度、 云水路径等特征区分的(Subrahmanyam and Kumar, 2013),与地面观测云的分类基本一致且各 类云的物理含义也有相似之处。

CPR 能穿透光学厚度较厚的云层,对低云及厚 云的观测具有优势,但对小尺度的薄云不敏感。lidar 能探测到光学厚度较薄的水凝物层和薄冰云层顶, 但穿透上层厚云探测低层云的能力较弱,且近地面 1 km 以下的低云回波容易被降水和地表回波污染。 鉴于 CPR 和 lidar 各自的特点,结合 CPR 和 lidar 的优势分析云的类型和云的高度最合理。但在 2006 年 6 月至 2010 年 12 月的资料中,2006 年全年缺乏 lidar 资料,2007~2010 年也有 19.7%的情况缺乏 lidar 资料,此种情况下我们用单独的 CPR 资料 2B-CLDCLASS 产品(Wang and Sassen, 2007)做 补充。

Kahn et al. (2008)详细分析了 CloudSat-CLAIPSO 资料的误差, Sassen and Wang (2008)全 面对比了该资料获得的总云量,发现与 ISCCP 资料 基本一致。Wang et al. (2014)对比了中国地区 FY-2E、CloudSat 和地面观测云资料,发现总云量 的分布也基本一致。该资料是目前为止最能细致反 映不同类型云的垂直结构的资料,具有广泛的应用 前景。

3 全球平均云量及云高统计

基于 CloudSat-CALIPSO 廓线资料统计得到的 全球平均总云量为 66.7%,与基于 ISCCP 资料统计 的全球平均总云量 67.5%(Li et al., 2004)非常 接近。其中 Ci 云量 24.1%(表 1),Sc 云量 25.1%, 这两类云量之和与其他 6 类云量总和相当,是全 球云量最多的两类云。浅对流云 Cu 和深对流云 DC 多孤立出现,云量均小于 10%,但 Cu 的云量 比 DC 大近 4 倍。值得注意的是,层状云虽然在 出现时覆盖面积很大,但全球平均 St 和 Ns 云量均不超过 6%,说明这两类云在全球大部分地区很少出现。

表1 全球平均云量、云底高度、云顶高度和厚度

Table 1Global mean cloud fraction, cloud base height,cloud top height, and cloud thickness

	云量	云顶高度/km	云底高度/km	云的厚度/km
卷云 (Ci)	24.1%	11.4	10.0	1.4
高层云(As)	11.4%	8.9	5.0	3.9
高积云 (Ac)	10.5%	4.4	3.4	1.0
层云 (St)	3.0%	1.7	1.0	0.7
层积云 (Sc)	25.1%	1.6	0.9	0.7
积云 (Cu)	7.8%	1.5	0.8	0.7
雨层云(Ns)	5.4%	8.0	0.9	7.1
深对流云 (DC)	1.6%	10.3	0.8	9.5

各类云的高度特征差异非常显著。St、Sc、Cu、 Ns 和 DC 等五类云的云底高度均不超过 1 km,但 其中 Ns 和 DC 的云顶高度超过 8 km,导致其云厚 在 7 km 以上,因此这两类云又被归属于厚云族。 虽然 Ns 和 DC 发展高度都非常高,但 Ns 属于典型 的层状云, DC 属于典型的对流云, 两类云最易出 现的高度有较大差异。Ns 常出现在空中 1~6 km (图1),出现峰值发生在3 km 左右,但 DC 垂直 发展旺盛,各高度出现的频率几乎无差异。As 和 Ac 虽都属于中云,但无论是云顶高度还是云底高 度,As都比Ac高,As的厚度也比Ac显著偏大。 As 和 Ac 的垂直分布曲线类似,但 As 的最大出现 频率在7 km 左右, Ac 的却在3 km 左右。卷云属 于高云族,云底和云顶都很高,其厚度仅有1.4 km, 几何厚度和光学厚度都较小,因此卷云又常被称为 薄卷云。

从各类云对总云量的贡献看(图1),低云族中的 Sc、中云族中的 As 和 Ci 贡献最大。由于 Sc 云量最多,所有低云也极易在1 km 处成云,因此总云量在1 km 处出现极大值,云出现频率向上逐渐减小,18 km 以上几乎无云出现。

4 云分布的区域差异

4.1 云量分布的区域差异

虽然全球 60%以上的地区被云覆盖,但不同类型云出现的区域差异很大。从总云量(图 2a)的分布看,大值区主要位于赤道辐合带、南半球 60°S附近西风带和北太平洋风暴路径带,总云量可达

80%以上,北非沙漠地区、澳洲、赤道冷舌等地区 总云量则不足 25%。赤道地区的大值云量主要来自 于 Ci (图 2b)、As (图 2c)、Ac (图 2d)、Cu (图 2g)和 DC (图 2i)的贡献,赤道地区低层云出现 频率较小。北太平洋风暴路径地带则所有类型的云 均可出现且云出现频率差异较小,反映了风暴路径 地带和赤道地区不同的云生成机制。

从全球各类云的水平分布(图 2b-2i)可知, Ci、As、Ac、Cu、DC 等5 类云的水平分布特征基 本一致, 与总云量的分布型也类似, 大值区都主要 分布在赤道地区,这反映了高温高湿的不稳定大气 层结显著影响云量的多寡。值得注意的是,年平均 Cu和DC的分布呈现弱的赤道双辐合带现象,这种 现象在春季最为显著(图略)。St(图 2e)和Sc(图 2f)的分布特征具有一致性,大值区都主要出现在 加利福尼亚和秘鲁西海岸,是典型的边界层低云 (Wood, 2012)。Ns(图 2h)则主要分布于高纬地 区,发生在层结稳定大气中。图 2h 显示 Ns 在青藏 高原地区亦有约20%的云量,云伸展至高原下游的 中国东部地区。Yu et al. (2001, 2004)、Li et al. (2005)、Li and Gu (2006) 曾有系列文章指出青 藏高原地表摩擦造成的辐散和高原下游中层逆温 环境为该地区 Ns 的形成提供了便利条件。但地面 观测和 ISCCP 在青藏高原地区几乎没有观测到降 水性雨层云 Ns(魏丽和钟强, 1997; Li et al., 2004), 这主要是高原地区地面观测站点稀少和青藏高原 上 Ns 的云顶高度基本上超过了 ISCCP 定义的 Ns 云顶气压高度(Rossow and Schiffer, 1999)导致。 图 2h 显示青藏高原东侧 Ns 云量约为 10%, 而青藏 高原东侧 ISCCP 的 Ns 云量约为 20% (Li et al., 2004),表明CloudSat-CALIPSO的Ns定义与ISCCP 的 Ns 定义略有不同。

4.2 云底高度分布的区域差异

lidar 反演的 Ci (图 3a)和 As (图 3b)云底高 度在热带和副热带交界处出现不连续,显示出明显 的误差。在热带外地区,高云 Ci 和中云 As、Ac (图 3c)的云底高度分布均从低纬向高纬递减,且在青 藏高原、安第斯山脉等高大地形上云底高度略低于 同纬度的其他地区,体现了地面观测中已发现的高 原地区"高云不高"的特点(李国平,2007)。Ci 的平均云底高度约 10.0 km,在热带地区可达 12 km,中纬度地区约为 9 km,高纬度地区降至 7 km 以下。As 平均云底高约为 5 km,其中低纬地区约 6 km, 中纬度地区在 4~5 km, 高纬地区降至 3.5 km 左右。Ac 云底高也具有低纬向高纬递减的特征(图 3c), 且云底高在赤道暖池地区比赤道冷舌地区显 著偏高。

低云 St (图 3d)、Sc (图 3e)、Cu (图 3f)的



图 1 总云量 (TC) 和 8 类分云量随高度的分布 Fig. 1 Vertical distributions of total cloud amount (TC) and cloud

fractions of eight types of cloud

平均云底高相近,都在1 km 左右,云底高度的区 域差异主要体现为海陆差别,陆地云底高度高于海 洋云底高度。在陆地上,青藏高原南部陡坡处云底 高度最低。在高原主体位置上云底高度则相对较 高,体现了地面观测已经发现的高原地区"低云不 低"的特征(李国平,2007)。在海洋上,加利福 尼亚州和秘鲁西海岸云底高度最低。厚云 Ns(图 3g)和DC(图 3h)在各区域云底高度差异不大。

4.3 云顶高度分布的区域差异

所有云类中, Ci、As、Ns 和 DC 的平均云顶高 度超过 8 km, 云顶高度由赤道向极地递减。高云 Ci (图 4a)的平均云顶高度约 11.4 km,在热带地 区可达 15 km,高纬度地区 7 km 左右,云顶高度差 异较大。As (图 4b)、Ns (图 4g)和 DC (图 4h) 的云顶高度分布颇为类似,但高度略不同。As 云的 平均云顶高度 8.9 km, Ns 为 8 km, DC 为 10.3 km。 它们在赤道辐合带云顶高度比赤道冷舌和其他地 区显著偏高。青藏高原地区云顶高度比陆地其他地 区偏低,高原的轮廓在云高度图上非常明显。这也 许反映了高原特殊大气环境对云高度的影响(李国 平, 2007)。

其他云类如 Ac、St、Sc 和 Cu (图 4c-4f)的云



图 2 总云量及 8 类分云量的水平分布

Fig. 2 Spatial distributions of total cloud amount and cloud fractions of eight types of clouds



图 3 8 类云云底高度的水平分布 (灰色区域代表缺测)

Fig. 3 Spatial distributions of cloud base heights of eight types of cloud (grey shadings indicate missing data)



图 4 8 类云云顶高度的水平分布 (灰色区域代表缺测)

Fig. 4 Spatial distributions of cloud top heights of eight types of cloud (grey shadings indicate missing data)

顶高度明显低于其他类型的云,云底高度分布与云 顶高度的分布类似,全球差异也较小。在加利福尼 亚州和秘鲁西海岸,Sc、St、Cu的云顶高度显著低 于海洋其他地区,强的海表蒸发造成的高湿,冷海 流和低空高压共同形成的逆温是云很难发展到更 高层的主要原因(Wood, 2012)。

4.4 云厚度分布的区域差异

CloudSat-CALIPSO 资料较地面观测资料的优势在于能反映云顶高度,较常规卫星观测资料的优势在于能反映云底高度,因此可以较准确地体现云的厚度特征。Ns 和 DC 云的厚度均大于 7 km,属于厚云,As 云的平均厚度为 3.9 km,属中等厚度的云,其他云类的厚度都在 1 km 左右,属于薄云。云厚度的分布(图 5)都是从赤道向两极递减,但也有几个地区云的厚度特征值得关注:(1)西北太平洋、西大西洋及南美洲等地区,云量及其云的厚度仅次于赤道辐合带;(2)在青藏高原地区,大部分云类的厚度都比陆地其他地区小,但 Cu 云的厚度比其周围地区略偏大;(3)冷海温控制的赤道冷舌区,云的厚度比暖池地区显著偏小;(4)加利福尼亚和秘鲁西海岸区云的厚度显著偏小。

总之,8 类云的云量、云底高度、云顶高度和 厚度等特征受纬度、下垫面地形和天气系统的共同 影响。云的量值、高度等都从低纬向高纬递减。高 地形处的云表现出"高云不高,低云不低,云厚较 薄"的特征。与低压控制区相比,高压区云量偏小, 云顶偏低,云厚偏薄。

4.5 云的经向一垂直分布

为了进一步展现各类云随纬度、高度的变化特征,图6给出了全球经向平均的不同类型云的纬度 —高度分布。Ci(图6a)、Ac(图6c)、Cu(图6f) 和DC(图6h)呈现出热带云量大于副热带云量的 特征,体现了积状云容易生成于不稳定大气中。部 分Ci是DC的云砧,因此在这个意义上Ci可归类 为积状云。As(图6b)、St(图6d)、Sc(图6e)、 Ns(图6g)等层状云则表现出副热带云量大于热带 云量的特征,体现了层状云容易生成于相对稳定的 大气环境中。卫星很少经过极地地区,因此极地云 量不便于做比较。

从同类型云出现高度的区域差异看,热带地区 的云高及云厚都显著大于副热带地区,说明高温高 湿代表的大气不稳定度决定了云的发展高度和厚 度。

5 结论与讨论

5.1 结论

利用 2006 年 6 月至 2010 年 12 月的 CloudSat-CALIPSO 资料统计分析了全球 8 类云的云量、云底 高度、云顶高度和云厚度的水平和垂直分布,结果 表明:

全球平均总云量为 66.7%, 其中 Ci 云量 24.1%, Sc 云量 25.1%,两类云量之和与其他 6 类云量总和 相当,是全球云量最多的两类云。积状云 Ci、Ac、 Cu、DC 呈现热带云量大于副热带云量的特征, 层 状云 As、S、Sc、Ns 则表现出副热带云量大于热带 云量的特征。积状云和层状云的分布特点反映了二 者不同的生成环境,积状云容易形成于不稳定大气 中,层状云易生成于相对稳定的大气环境中。同时, 纬度、下垫面地形和天气系统也严重影响云的分 布。对流云 Cu 和 DC 主要分布于赤道地区;边界 层低云 St 和 Sc 的大值中心位于加利福尼亚和秘鲁 西海岸; Ns 主要分布于高纬, 在青藏高原及其下游 地区也有约20%的云量,高原的动力和热力作用为 云的形成提供了有利条件。对比单独使用 CloudSat CPR 探测资料 (Sassen and Wang, 2008) 的分析结 果, Ci 云量是前者的 2.5 倍, 与地面观测云量相一 致; As 云量略有减少, 但 Ac 云量明显增多; Sc 和 St 的云量之和及浅低云(Sc、St、Cu)云量之和均 有增加; Cu 云量明显增加、Ns 云量有所减小等, 表明 CloudSat-CALIPSO 资料对光学厚度薄的卷云 和高积云、物理厚度薄的浅低云的识别有明显改 善,且利用 lidar 精细的空间分辨率已能较好观测到 水平尺度小的积状云(Ac、Sc、Cu)和从密实的雨 层云中识别出对流云。

以前的研究很少定量地给出各类云的高度和 厚度特征,而本文发现8类云的高度及厚度特征有 显著差异。高云 Ci 的云底高度和云顶高度都高于 10 km,平均厚度则只有1.4 km,属于薄卷云。中 云 As 和 Ac 的云底高度和云底高度都位于大气中 层,但 As 最常出现高度比 Ac 高,云的厚度也比 Ac 厚。St、Sc、Cu 的云底高度和云顶高度都很低, 平均云厚均为0.7 km 左右,属于薄的低云。Ns 和 DC 平均云底高度不超过1 km,但云顶伸展超过8 km,属于厚云类。总体而言,海洋上云底高度较陆 地低;赤道等大气不稳定地区,云底较高,云厚度



Fig. 5 Spatial distributions of cloud thickness of eight types of cloud (grey shadings indicate missing data)



图 6 8 类云云量的经向一垂直分布 Fig. 6 Meridional-vertical distributions of cloud fractions of eight types of clouds 较大; 高原地区则表现出"高云不高, 低云不低, 云厚较薄"的特征。

5.2 讨论

基于 CloudSat-CALIPSO 资料分析得到的全球 8 类云的垂直分布信息是传统观测手段难以获取 的,该资料对进一步认识云的垂直结构,对评估和 改善数值模式中云的模拟都具有重要价值。但是, 资料的不确定性也是值得关注的,在使用资料时需 正确认识。

(1) Ci 和 As 的云底高度在热带与副热带交界 区存在显著不连续,但在单独的 CPR 资料中不存在 此问题。Sassen and Wang (2012) 指出 CPR 难以识 别薄卷云,lidar 则不能正确识别 As 云的下边界。 在云类模糊聚类过程中,热带、中纬度和极地采用 了不同的模糊函数,可能导致了热带和副热带之间 的不连续,目前这个问题尚未有效解决。

(2) CPR 不能识别 St,因此在未融合 lidar 资料的 2B-CLDCLASS 云产品中,St 在全球几乎没有分布。融合 lidar 资料后,全球的 St 云量分布显著增加,但是否能反映真实的云量,还需进一步检验。

(3) CloudSat-CALIPSO 云分类与 ISCCP、 MODIS 等都不同(李昀英等, 2014)。其采用了云 的水平和垂直尺度、云微物理参数、云相态及是否 伴随降水等特征,结合阈值法和模糊聚类法对云进 行归类。它与地面观测对应的云类的名称相同,物 理意义也近似,但含义不完全相同。因此基于 CloudSat-CALIPSO 资料的云类与其他资料云类的 比较都只能在定性意义上进行。

参考文献(References)

- 代娟, 黄建华, 王华荣, 等. 2009. 襄樊市空中云水资源分布及人工增雨 潜力研究 [J]. 暴雨灾害, 28 (1): 79–83. Dai Juan, Huang Jianhua, Wang Huarong, et al. 2009. The study on cloud-water resource distribution and artificial precipitation potential over Xiangfan city [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 28 (1): 79–83, doi: 10.3969/j.issn.1004-9045. 2009.01.013.
- 高翠翠,方乐锌,李昀英,等. 2015. 1985~2011 年中国不同类型云发生 频率、持续时数及伴随降水概率 [J]. 暴雨灾害, 34 (3): 206–214. Gao Cuicui, Fang Lexin, Li Yunying, et al. 2015. Cloud occurrence frequency, duration and accompanying rainfall probability in China during 1985–2011 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34 (3): 206–214, doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2015.03.002.
- Kahn B H, Chahine M T, Stephens G L, et al. 2008. Cloud type comparisons of AIRS, CloudSat, and CALIPSO cloud height and amount [J].

Atmospheric Chemistry and Physics, 8 (5): 1231–1248, doi: 10.5194/acp-8-1231-2008.

- 李国平. 2007. 青藏高原动力气象学 [M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 271pp. Li Guoping. 2007. Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 271pp.
- Li J, Yu R C, Zhou T J, et al. 2005. Why is there an early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau [J]. J. Climate, 18 (22): 4660–4668, doi: 10.1175/JCL13568.1.
- 李昀英, 方乐锌, 寇雄伟. 2014. 卫星一地基一模式统一的自动观测云 分类原则和标准的研究 [J]. 地球物理学报, 57 (8): 2433–2441. Li Yunying, Fang Lexin, Kou Xiongwei. 2014. Principle and standard of auto-observation cloud classification for satellite, ground measurements and model [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 57 (8): 2433–2441, doi: 10.6038/cjg20140805.
- Li Y Y, Yu R C, Xu Y P, et al. 2004. Spatial distribution and seasonal variation of cloud over China based on ISCCP data and surface observations [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (2): 761–773, doi: 10.2151/jmsj.2004.761.
- 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.
- Luo Y L, Zhang R H, Wang H. 2009. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat/CALIPSO data [J]. J. Climate, 22 (4): 1052–1064, doi: 10.1175/2008JCLI2606.1.
- Naud C M, Posselt D J, Heever S C. 2012. Observational analysis of cloud and precipitation in midlatitude cyclones: Northern versus Southern Hemisphere warm fronts [J]. J. Climate, 25 (14): 5135–5151, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00569.1.
- 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. 11188. 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.
- Posselt D J, Stephens G L, Miller M. 2008. CloudSat: Adding a new dimension to a classical view of extratropical cyclones [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89 (5): 599–609, doi: 10.1175/BAMS-89-5-599.
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (11): 2261–2287, doi: 10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2.
- Sassen K, Wang Z E. 2008. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results [J]. Geophys. Res. Lett., 35 (4): L04805, doi: 10.1029/2007GL032591.
- Sassen K, Wang Z E. 2012. The Clouds of the middle troposphere: Composition, radiative impact, and global distribution [J]. Surveys in Geophysics, 33 (3–4): 677–691, doi: 10.1007/s10712-011-9163-x.
- 尚博,周毓荃,刘建朝,等. 2012. 基于 CloudSat 的降水云和非降水云垂 直特征 [J]. 应用气象学报, 23 (1): 1–9. Shang Bo, Zhou Yuquan, Liu Jianzhao, et al. 2012. Comparing vertical structure of precipitation cloud and non-precipitation cloud using CloudSat [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23 (1): 1–9.

Subrahmanyam K V, Kumar K K. 2013. CloudSat observations of

cloud-type distribution over the Indian summer monsoon region [J]. Annales Geophysicae, 31 (7): 1155–1162, doi: 10.5194/angeo-31-1155-2013.

- 汪方, 丁一汇. 2005. 气候模式中云辐射反馈过程机理的评述 [J]. 地球 科学进展, 20 (2): 207–215. Wang Fang, Ding Yihui. 2005. An evaluation of cloud radiative feedback mechanisms in climate models [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 20 (2): 207–215.
- Wang M Y, Gu J X, Yang R Z, et al. 2014. Comparison of cloud type and frequency over China from surface, FY-2E, and CloudSat observations [C]//Proceedings of SPIE 9259, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V. Beijing, China: SPIE, doi: 10.1117/12. 2069110.
- 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚. 2010. 基于 CloudSat 和 ISCCP 资料的中国及 周边地区云量分布的对比分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 767–779. Wang Shuaihui, Han Zhigang, Yao Zhigang. 2010. Comparison of cloud amounts from ISCCP and CloudSat over China and its neighborhood [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 767–779, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.09.
- Wang Z E. 2013. Level 2 Combined radar and lidar Cloud scenario classification product process description and interface control document, Version 1.0 [Z]. 61pp, http://www.cloudsat.cira.colostate.edu.

Wang Z E, Sassen K. 2007. Level 2 Cloud scenario classification product

process description and interface control document, Version 5.0 [Z]. 50pp, http://www.cloudsat.cira.colostate.edu.

- 魏丽, 钟强. 1997. 青藏高原云的气候学特征 [J]. 高原气象, 16 (1): 10–15. Wei Li, Zhong Qiang. 1997. Characteristics of cloud climatology over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (1): 10–15.
- Wood R. 2012. Stratocumulus clouds [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (8): 2373–2423, doi: 10.1175/MWR-D-11-00121.1.
- Yu R C, Yu Y Q, Zhang M H. 2001. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (6): 1090–1102, doi: 10.1007/s00376-001-0025-1.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by Tibetan Plateau[J]. J. Climate, 17 (13): 2702–2713, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<2702:CEOTDC>2.0.CO; 2.
- 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, 3 9(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.