

张晓, 段克勤, 石培宏, 等. 2015. 基于 CloudSat 卫星资料分析青藏高原东部夏季云的垂直结构 [J]. 大气科学, 39 (6): 1073–1080. Zhang Xiao, Duan Keqin, Shi Peihong, et al. 2015. Cloud vertical profiles from CloudSat data over the eastern Tibetan Plateau during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1073–1080, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14196.

基于 CloudSat 卫星资料分析青藏高原东部 夏季云的垂直结构

张晓^{1,2} 段克勤³ 石培宏^{1,2}

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710119

摘 要 本文利用 CloudSat 卫星资料, 对青藏高原东部 2006~2010 年 6~8 月云垂直结构的空分布进行分析, 结果表明: (1) 夏季青藏高原东部云发展可达到平流层, 且高原东部云在 5 km 以下以水云存在, 5~10 km 以液相和固相共存的混态存在, 在垂直高度 10 km 以上以冰云存在。由于 CloudSat 卫星资料云相的反演问题, 可能会造成水云和混态云的发展上限偏低, 冰云的发展下限抬升。(2) 研究区整层水汽输送和云水平路径空间分布存在一定的差异性, 云水含量纬向分布表现为在 26.5°~30.5°N 附近存在一个明显的峰值区, 经向分布表现为 95°E 以西云水含量低于以东。(3) 研究区以单云层为主, 尤其在青藏高原主体。单云层平均云层厚度 4182 m, 云顶高度、云厚限于水汽的输送, 表现为由南向北波动下降。多层云发生频率在 27°N 以北明显减少, 说明强烈的对流运动更容易激发多层云的产生。

关键词 云垂直结构 CloudSat 卫星资料 云水含量 云层

文章编号 1006-9895(2015)06-1073-08

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14196

Cloud Vertical Profiles from CloudSat Data over the Eastern Tibetan Plateau during Summer

ZHANG Xiao^{1,2}, DUAN Keqin³, and SHI Peihong^{1,2}

1 State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190

2 College of Tourism and Environmental, Shanxi Normal University, Xi'an 710119

Abstract The spatial distribution of the vertical variation in cloud over the eastern Tibetan Plateau during summer (June to August) of 2006–2010 was studied using CloudSat data. The results showed that: (1) The cloud over the eastern Tibetan Plateau could develop in the stratosphere in summer, and existed as water cloud below 5 km, mixed with liquid and ice crystals from 5 to 10 km, and was ice cloud above 10 km. However, due to the problem of the inversion algorithm of the cloud phase from CloudSat data, the cloud top of the water cloud and mixed cloud may have been lower, and the cloud base of the ice clouds higher, than was actually the case. (2) There were some spatial differences between the spatial distribution of the summer mean water vapor flux and the cloud water path. The latitudinal distribution of cloud water

收稿日期 2014-06-06; **网络预出版日期** 2015-02-11

资助项目 国家自然科学基金项目 40971290、40771209, 中国科学院海外科教基地建设计划 SAJC201303

作者简介 张晓, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为降水。E-mail: zhangxiao@lzb.ac.cn

indicated that the cloud water was sufficient from 26.5°N to 30.5°N. The longitudinal distribution of cloud water showed that the cloud water to the east of 95°E was more abundant than to the west. (3) The cloud in the study area was mainly single-layer, especially over the eastern Tibet Plateau. The average thickness of the single-layer cloud was 4182 m, and the cloud top and cloud thickness descended in a fluctuating fashion from south to north, limited by the water vapor amount. The occurrence frequency of multilayer cloud was reduced obviously to the north of 27°N, which illustrated that powerful convection was more conducive to the development of multilayer cloud.

Keywords Cloud vertical structure, CloudSat data, Cloud water content, Cloud layer

1 引言

云作为调节地球辐射平衡和全球水汽与水分循环的重要因子,在地气系统中扮演着重要角色(Houghton et al., 2001)。云的垂直结构反映了云体内部动力、热力及云—降水微物理过程,其分布可通过辐射和潜热加热影响大气环流(Wang and Zhao, 1994; Ding et al., 2005)。在气候模式中,云的精确描述可很大程度提高气候模拟能力,最大程度减少云辐射反馈造成的不确定性(Cess et al., 1989)。但目前云的描述和模拟是气候模式和气候变化研究中的薄弱环节(Houghton et al., 2001),而云的垂直结构产生的不确定性是研究云对气候影响的最大障碍之一(Wang and Rossow, 1998)。因此,加深云垂直结构的认识对进一步研究气候变化有着重要意义。

青藏高原面积约 $2.4 \times 10^6 \text{ km}^2$, 平均海拔超过 4 km, 高大的地形对亚洲季风和全球气候产生重要影响(丁一汇等, 2013)。高原远离大陆腹地, 大气污染物相对较少, 为研究云的形成和发展提供了平台。研究发现青藏高原的摩擦和阻挡效应促进了深厚层云的形成和维持, 在冬、春季节高原上深厚层云的出现导致其光学厚度明显高于其他地区(Yu et al., 2004)。高原总云量东部多于西部, 南部多于北部, 充分反映了高原中、北部干旱少雨, 藏南湿润多雨的特点(陈葆德等, 2008)。夏季高原热力作用显著, 易激发对流性云的产生, 云的垂直重叠程度低于其他季节(Zhang et al., 2013)。高原云系夏季主要以单层云为主(彭杰等, 2013), 且单层云的云量对总云量贡献很大, 占 77.1%(汪会等, 2011)。不同垂直重叠的云对大气加热率影响不同, 而单层云主要表现为云顶对大气的冷却效应, 云层内为加热效应(马越界等, 2011)。以上研究在一定程度上认识了云的特征, 但缺乏对高原云垂直结构在空间上的变化分析。

本文利用 CloudSat 卫星 2006~2010 年夏季观测资料, 对青藏高原东部云内水凝物垂直结构和云

层发生频率的空间分布特征进行分析, 以弥补前人研究的不足, 为认识高原天气系统、改进云物理参数化以及云—辐射之间的物理关系提供观测基础。

2 数据和方法

ERA-Interim 再分析月平均资料, 空间分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 。本研究整层大气水汽通量用到其逐月比湿、纬向风速、经向风速和地面气压资料, 水汽输送通量的计算公式参见周长艳等(2005)。CloudSat 卫星搭载的毫米波云廓线雷达(CPR)水平分辨率约为 2.5 km (沿轨) $\times 1.4 \text{ km}$ (跨轨), 垂直方向有 125 个距离库, 代表垂直分辨率约 240 m。CPR 可以穿透光学厚度较厚的云, 但无法观测光学厚度较薄的冰云, CALIPSO 卫星搭载的云—气溶胶正交偏振激光雷达(CALIOP)可弥补 CPR 的不足, 观测较薄的云层。目前 CloudSat 卫星和 CALIPSO 卫星已联合观测且提供了多个标准产品, 如 2B-CLDCLASS、2B-GEOPROF 和 2B-GEOPROF-LIDAR 等。本研究利用的标准数据产品有: 2B-CWC-RVOD、2B-GEOPROF 和 2B-GEOPROF-LIDAR, 其数据由 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 提供(http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/data_dist/OrderData.php [2015-06-10]), 产品描述见表 1。本研究分析的时间段是 2006~2010 年夏季 6~8 月, 研究范围是青藏高原东部 ($25^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $90^\circ \sim 100^\circ \text{E}$)。

表 1 过境数据集主要描述

Table 1 Description of the crossing dataset over the Tibetan Plateau

数据类型	产品描述
2B-CWC-RVOD	液(冰)水含量、液(冰)水路径、有效粒子半径、云滴数浓度等
2B-GEOPROF	雷达反射率因子、云判别参数、大气衰减等
2B-GEOPROF-LIDAR	云层、云边界高度和云量等

CloudSat 数据集提供了各个探测廓线的经度、纬度、高度和海拔, 对于 CloudSat 云水和雷达反射

率标准产品, 则组成一个 $N_{\text{rays}} \times 125$ 的二维数组, 其中, N_{rays} 是一轨数据的廓线数目, 每条廓线包括 125 个采样距离库, 而一轨数据由 36383 条扫描廓线组成。对于 2B-CWC-RVOD 数据产品, 主要使用该数据集中的经、纬度、高度、海拔、液态水含量、冰水含量、液态水路径、冰水路径、液态水有效半径和冰水有效半径; 对于 2B-GEOPROF 数据产品, 主要用其经度、纬度、高度和 CPR_Cloud_Mask 参量, 其中 CPR_Cloud_Mask 的数据说明见表 2; 对于 2B-GEOPROF-LIDAR 数据产品, 主要用其经、纬度、海拔、水凝物层数、云底高度和云顶高度。对于 2B-CWC-RVOD 产品, 选择其对应 2B-GEOPROF 数据 CPR_Cloud_Mask ≥ 20 的资料, 处理流程见图 1, 本研究选择 2090091 个采样数据进行分析。

表 2 CPR_Cloud_Mask 数据值说明

Table 2 Values assigned to the CPR_Cloud_Mask field of the 2B-GEOPROF dataset

数据值	含义
0	没有探测到云
1	数据损坏
5	地面噪音
5~10	弱探测信号
20~40	探测有云, 值越大, 探测越准

数据的统计处理采用归一化等频率高度图的思想进行统计分析 (Luo et al., 2009), 该方法避免了早期提出的等频率高度图 (Yuter and Houze, 1995) 的不足。其中对于液态水或冰水平均含量—高度发生频率, 垂直坐标为高度, 间隔为 240 m, 横坐标为液态水或冰水平均含量, 其间隔为 0.1 g m^{-3} 。对于平均粒子有效半径—高度发生频率, 垂直坐标为高度, 间隔为 240 m, 横坐标为平均粒子有效半径, 间隔为 $10 \mu\text{m}$ 。对于云层纬度—高度发生频率,

垂直坐标为高度, 间隔为 1000 m, 横坐标为纬度, 间隔为 0.1° 。

3 分析和讨论

3.1 青藏高原东部云水的垂直结构

CloudSat 资料将云分为液相和固相两种, 其中液态水平均含量 0.2 g m^{-3} , 冰水平均含量 0.09 g m^{-3} 。结合云水平均含量—高度发生频率 (图 2a、2b) 发现, 液态水和冰水平均含量均主要分布在 $0 \sim 1 \text{ g m}^{-3}$; 云的存在形式在垂直高度 5 km 以下, 以水云存在, 垂直高度 5~10 km, 以混态云存在的云型比例升高, 垂直高度 10 km 以上, 以冰云存在; 由于液态水的供给, 冰水含量在垂直高度 5~10 km 呈增加趋势; 液态水粒子发展上限可达对流层上层, 冰水上限可达平流层中下层, 云水发展上限明显高于我国其他地区 (杨大生和王普才, 2012)。

对液态水粒子有效半径统计发现, 液态水粒子平均有效半径 $6.9 \mu\text{m}$, 其中小于 $10 \mu\text{m}$ 的占总样本的 32.18%, 大于 $20 \mu\text{m}$ 的占总样本的 2.22%。从液态水粒子平均有效半径—高度发生频率可知 (图 2c), 液态水粒子在垂直高度 6~8 km 比较聚集, 有效半径主要集中在 $12 \mu\text{m}$ 左右, 这与云滴的微物理平衡和对流强度有关。在垂直高度 5 km 以下的水云中, 云粒子平均有效半径呈增加趋势, 这可能是由于下层强烈的对流上升以及上层云滴的下落碰并所致。在垂直高度 5~10 km 的混态云中, 平均云滴有效半径出现了多峰, 这可能是由于云中相态的转变、云粒子的沉降以及 CloudSat 数据质量引起的。冰水粒子平均有效半径 $59 \mu\text{m}$, 在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 存在两个高值区 (图 2d), 分别位于垂直高度 7 km 和 12 km 左右。在 10 km 以下水汽的补给在一定程度促进了冰晶的形成, 但由于云中混合水汽比和对流强度随高度升高减小, 因此冰水粒子平均有效半径随高度升高整体呈减小趋势。

CloudSat 根据 ECMWF-AUX 产品中插值的零度层位置反演冰/液相态, 对廓线进行人为纯冰/纯水的假设反演, 而后线性组合, 其中 CloudSat 假设温度低于 -20°C 为纯冰, 大于 0°C 为纯水, $0 \sim -20^\circ\text{C}$ 为冰和水的混态 (Austin et al., 2009)。但过冷却水滴在低于 -20°C 的环境仍可以大量存在 (杨军等, 2011), 因此本文的结果可能会造成水云和混态云的发展上限偏低, 冰云的发展下限抬升, 但由于云的微物理特征受下垫面、天气特征等多尺度气象条

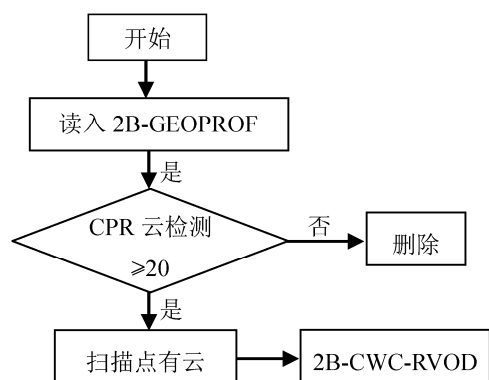


图 1 数据统计流程

Fig. 1 Flowchart illustrating the CloudSat data processing

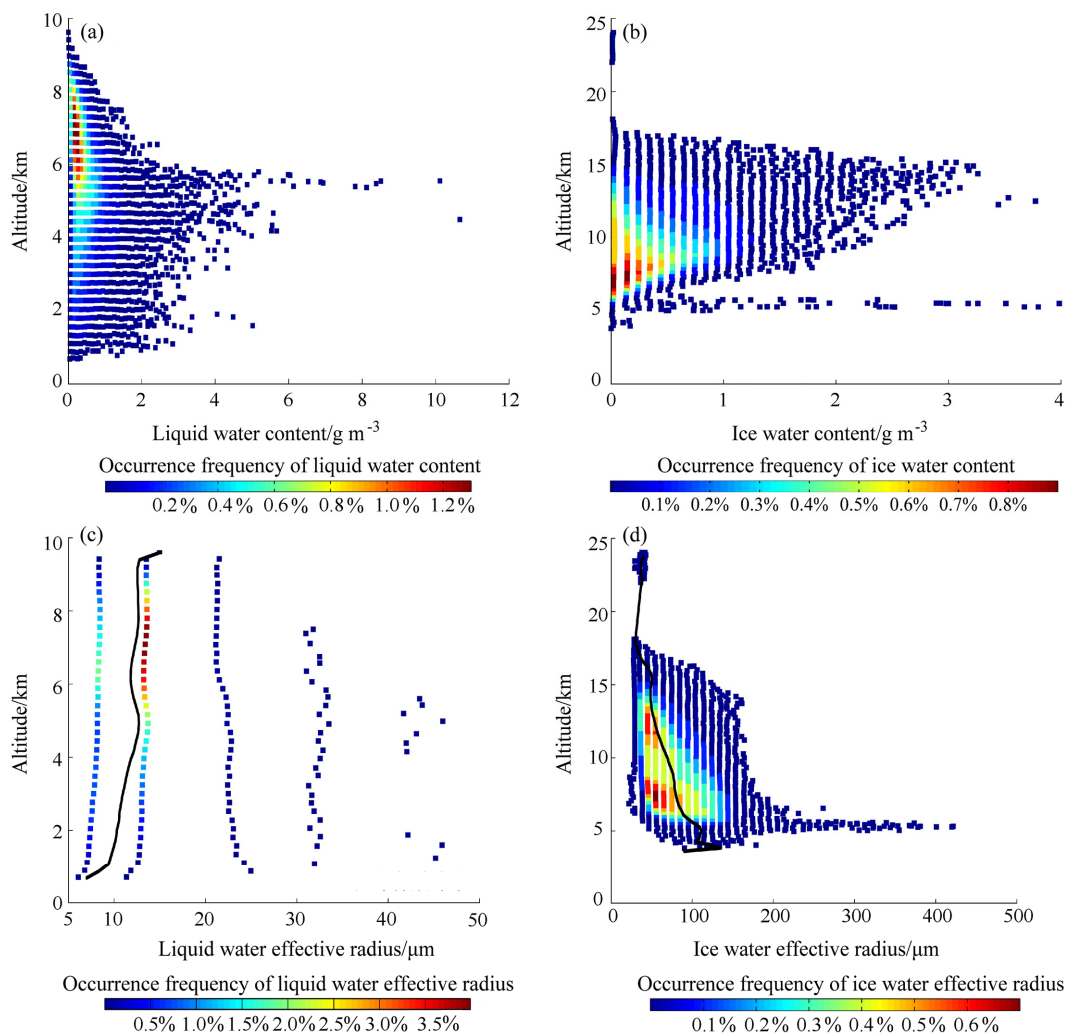


图2 云水平均含量—高度发生频率:(a) 液态水;(b) 冰水。云水平均有效半径—高度发生频率:(c) 液态水;(d) 冰水, 黑实线为液态水和冰水平均有效半径垂直廓线

Fig. 2 Distributions of the average cloud water–altitude including (a) liquid water content and (b) ice water content, and the cloud drop effective radius–altitude occurrence frequencies including (c) liquid water effective radius and (d) ice water effective radius. The dark solid lines in (c) and (d) represent the vertical profiles of the average liquid water and ice water radiuses, respectively

件影响, 因此 CloudSat 观测资料对粒子水汽含量和有效半径的影响目前还不清楚。

3.2 青藏高原东部云水分布

图 3a 为研究区 2006~2010 年夏季平均整层大气水汽通量, 从中可知夏季青藏高原东部水汽由南向北递减, 水汽高值区主要集中在青藏高原南坡。为对比云水和大气水汽的空间分布, 本研究对云水路径进行 $1^\circ \times 1^\circ$ 均值采样。研究区平均云水路径空间分布 (图 3b) 与整层大气水汽含量分布存在一定的差异性, 尤其在察隅以南, 反映了云的形成不仅需要水汽还需要有利的地形。

从云水含量纬向—高度剖面发现 (图 4a), 高

原南坡随海拔的剧烈抬升, 云水含量存在一显著的高值区, 经统计在 $26.5^\circ 30' \sim 30.5^\circ \text{N}$, 其云水含量占研究区云水总含量的 53.72%, 但在 30.5°N 以北研究区云水含量纬向和垂直变化不明显。对高原及邻近地区的研究指出, 来自海洋的水汽最远可输送 30°N 左右 (周长艳等, 2005)。结合大气水汽通量和云水平均路径空间分布 (图 3) 发现, 水汽输送量在雅鲁藏布江以南明显高于以北, 云水平均路径在 30°N 以南明显高于以北, 这也在一定程度说明来自海洋的水汽在翻越念青唐古拉山脉一带时已消耗。

从云水含量经向—高度剖面 (图 4b) 发现, 云

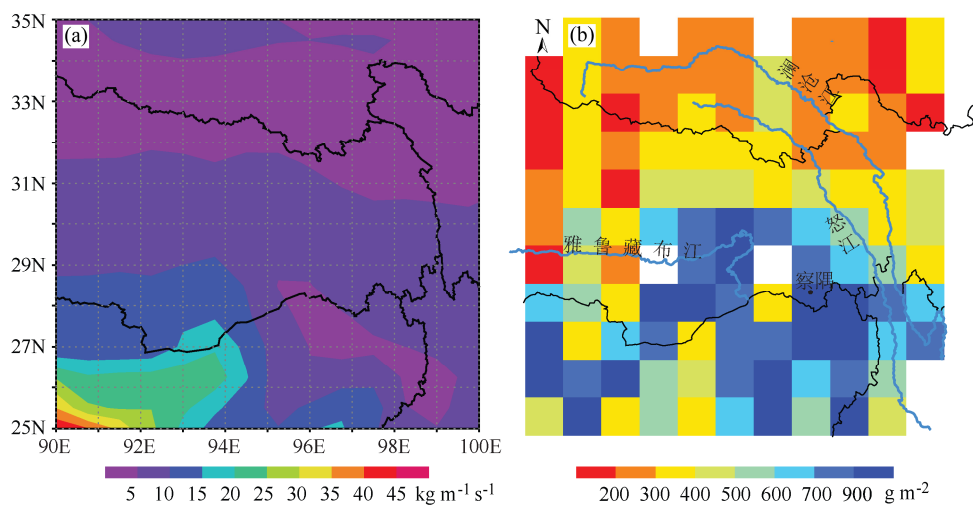


图3 青藏高原东部夏季整层 (a) 大气水汽通量均值和 (b) 平均云水路径

Fig. 3 The distribution of the summer mean (a) integrated water vapor flux and (b) cloud water path in the eastern Tibetan Plateau

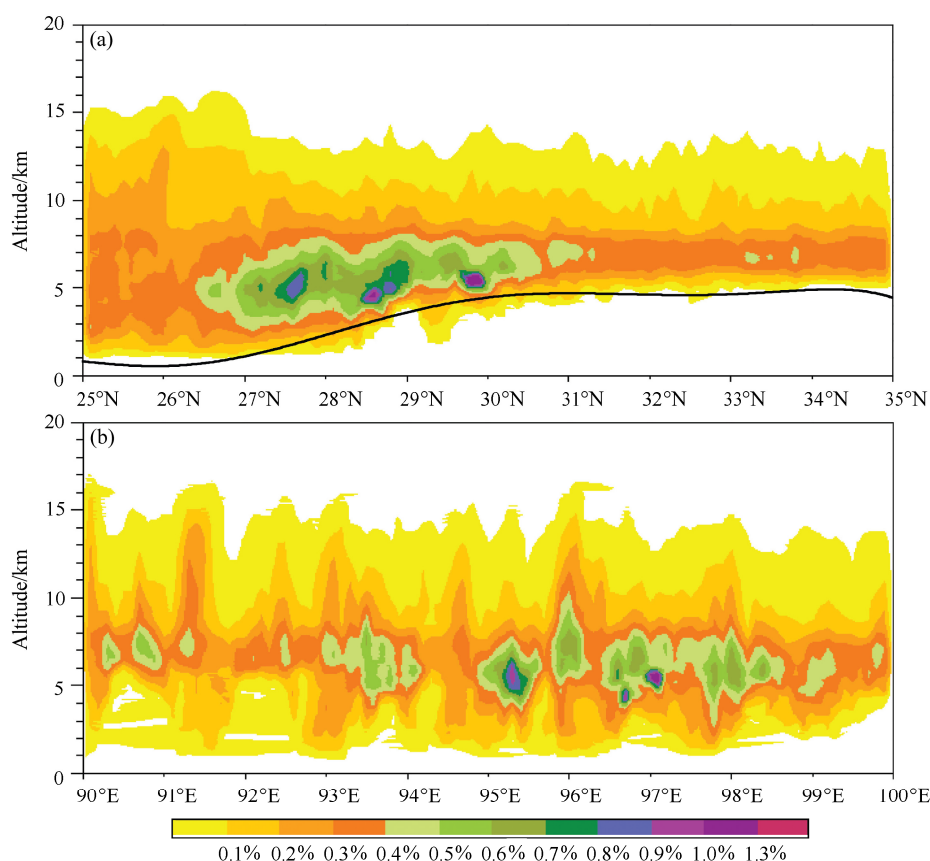


图4 (a) 90°~100°E 平均的云水含量纬度—高度分布, 黑实线为纬向平均海拔高度; (b) 25°~35°N 平均的云水含量经度—高度分布

Fig. 4 (a) Latitude–altitude cross section (90°–100°E average) of cloud water content percent in the total content, the dark solid line represents the zonal mean altitude; (b) Longitude–altitude cross section (25°–35°N average) of cloud water content percent in the total content

底下限和云顶上限沿经向变化不明显, 在 95°E 以西由于喜马拉雅山脉的阻挡云水含量低于以东。研究区云水含量在 95°~96°E、96°30'~97°30'E 之间

存在两个明显的高值区, 这表明来自海洋的水汽主要通过该范围的山谷河道进入青藏高原东部。研究发现来自海洋的水汽主要通过雅鲁藏布江大峡谷

进入高原东部, 该区水汽输送量与夏季自长江流域以南向长江以北的水汽输送量相近 (杨逸畴等, 1987), 研究区水汽输送量以雅鲁藏布江为界 (图 3a), 云水平路径在雅鲁藏布江大拐弯处含量丰富 (图 3b), 云水含量在 95°E 附近存在一高值区, 反映了水汽沿布拉马普特拉河—雅鲁藏布大峡谷方向的大量输送, 本文的研究结果与前人的一致。

3.3 青藏高原东部云层垂直结构

云层在垂直方向往往是重叠的, 多层云的重叠问题不仅对大气和地表的辐射收支平衡产生重要影响, 也是导致气候模式模拟不确定性要素之一。Wang and Rossow (1998) 对大气环流研究发现, 在 $720\sim 550\text{ hPa}$ 高度层之间的单层云会增加 Hadley 环流的强度, 低于或者高于该高度层的单层云都将使 Hadley 环流的强度和垂直范围减弱, 而多层云由于云层垂直结构的不确定, 导致其对大气环流模式的影响存在一定的不确定性, 因此对云层垂直结构的研究显得十分有意义。云层的垂直结构主要包括云层数、云底高、云顶高和云厚度等。对研究区内 297183 条云层廓线统计发现, 高原东部单云层发生

频率 52.88%, 2 云层发生频率 35.43%, 3 云层发生频率 9.95%, 4 云层发生频率 1.60%, 5 云层发生频率 0.14%, 其结果与彭杰等 (2013) 的研究结论相符。

天气特征和浅对流会造成一定的云分层, 因此本研究只对单层云的垂直结构进行了统计。单云层统计发现, 其平均云底高度 5767 m , 云顶平均高度 9950 m , 与汪会等 (2011) 统计相符。青藏高原主体单层云发生频率远大于高原南坡, 云层平均云厚在 4182 m (图 5a)。夏季青藏高原主体以热力作用为主, 高原本身的热力作用和边界层高度的升高可导致很强的区域性垂直上升运动 (卓嘎等, 2002), 因此青藏高原云层偏厚可能与高原的热力作用有关。

单云层云底平均高度由南向北随海拔升高呈上升趋势 (图 5b), 在 $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 主要分布在 $4\sim 6\text{ km}$, 在 $27^{\circ}\sim 29^{\circ}30'\text{N}$ 受地势影响云底高度分布最为分散, 分布高度跨越将近 10 km , 在 $29^{\circ}30'\sim 35^{\circ}\text{N}$ 由于地势相对平坦, 云底最为集中, 主要在 $6\sim 7\text{ km}$ 。云顶高度由南向北整体呈下降趋势 (图 5c), 在 $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 云顶高度可达万米, 结合云水含量纬

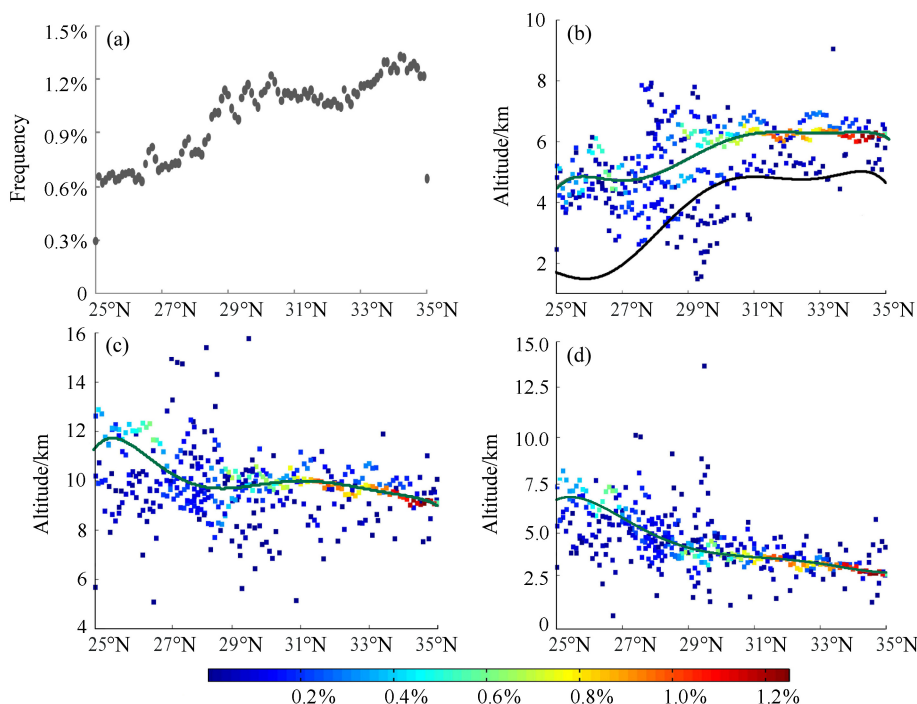


图 5 (a) $90^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 平均的单层云纬度分布发生频率。 $90^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 平均的单云层纬度—高度发生频率: (b) 云底, 绿实线为纬向平均云底高度, 黑实线为纬向平均海拔; (c) 云顶, 绿实线为纬向平均云顶高度; (d) 云厚, 绿实线为纬向平均云厚高度

Fig. 5 (a) The latitude distribution ($90^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ average) of single-layer cloud occurrence frequencies. Latitude–height distribution ($90^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ average) of single-layer cloud occurrence frequencies: (b) Cloud base (green solid line is the zonal mean cloud base; dark solid line is the zonal mean altitude); (c) cloud top (green solid line is the zonal mean cloud top); (d) cloud thickness (green solid line is the zonal mean cloud thickness)

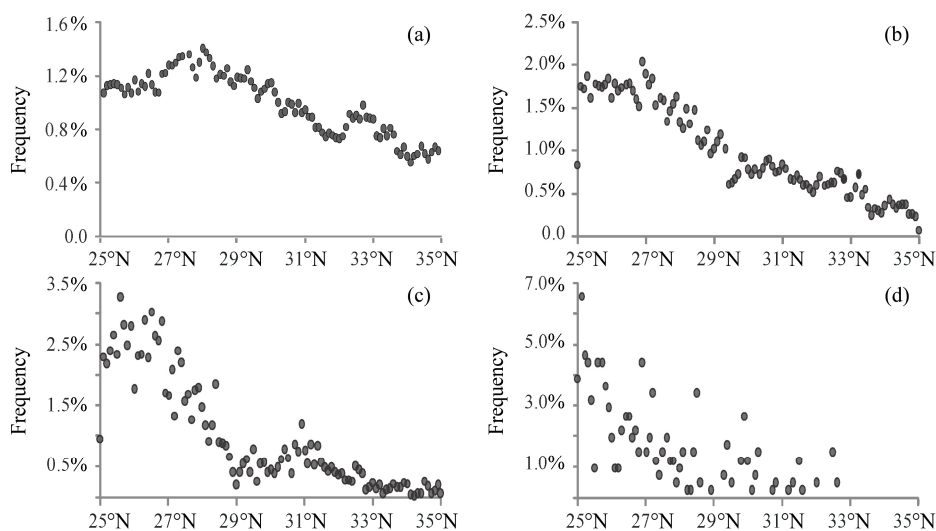


图 6 90°~100°E 平均的多云层纬度发生频率: (a) 2 云层; (b) 3 云层; (c) 4 云层; (d) 5 云层

Fig. 6 Latitude distribution (90°–100°E average) of the occurrence frequencies of (a) 2-layer, (b) 3-layer, (c) 4-layer, and (d) 5-layer cloud

向高度剖面(图 4a)可知,该范围云水含量在 10 km 以上高度明显高于其它同高度区域,这说明该区域多发生对流运动,强烈的对流可将水汽输送至平流层。云层的物理厚度(图 5d)主要表现为由南向北减薄,说明云内对流由南向北减弱。夏季高原东部水汽主要来自南亚季风的输送,上文分析发现来自海洋的水汽很难跨越念青唐古拉山一带,尽管高原夏季盛行上升运动,但受水汽限制,高原云顶发展高度和云厚均表现为由南向北递减。

对多云层分布样本的空间统计发现(图 6),多云层发生频率自南向北整体呈波动下降,另外,多云层发生频率在 27°N 以北呈明显减少趋势。Luo et al. (2011) 研究发现高原南麓对流强度相对高原主体旺盛,多层云发生频率在高原主体的减少说明强烈的对流运动可能更容易激发多层云的产生。

4 结论

本文利用 2006~2010 年夏季 CloudSat 资料分析了高原东部云水含量垂直结构的分布特征。通过以上研究,结论如下:

(1) 夏季青藏高原东部液相粒子发展上限在 10 km 左右,固相粒子发展上限在 20 km 以上。高原东部云相在 5 km 以下以液相存在,在该高度范围其有效粒子半径随高度呈增加趋势。5~10 km 以液相和冰晶共存的混态存在,可能由于云中相态的转变、云粒子的沉降以及 CloudSat 的数据质量,其有效粒子半径呈多峰分布;在垂直高度 10 km 以上

以固相存在,但由于云中混合水汽比和对流强度随高度升高减小,导致其粒子平均有效半径随高度升高整体呈减小趋势。另外,CloudSat 云相的反演原理可能会造成水云和混态云的发展上限偏低,冰云的发展下限抬升,因此本文的结论可能与实际情况有一定差异,亟待继续深入分析。

(2) 研究区整层水汽通量和云水平均路径分布存在一定的差异性,说明云的形成不仅需要水汽还需要有利的地形。高原云水含量纬向分布在 26.5°~30.5°N 附近存在一个明显的高值区,在 30.5°N 以北云水含量低且纬向和垂直分布变化小。云水含量经向分布主要表现为在 95°E 以西由于喜马拉雅山脉的阻挡造成其云水含量低于以东。水汽输送通量、云水平均路径和云水含量的分布均在一定程度说明水汽在翻越念青唐古拉山一带时已消耗。

(3) 高原东部单云层发生频率 52.88%, 2 云层 35.43%, 3 云层 9.95%, 4 云层 1.60%, 5 云层 0.14%。青藏高原主体单层云发生频率很高,平均物理厚度 4182 m,这可能是高原热力作用的结果。受水汽限制,高原云顶发展高度和云厚均表现为由南向北递减,此外强烈的对流运动可能更易激发多层云的产生。

参考文献 (References)

- Austin R T, Heymsfield A J, Stephens G. 2009. Retrieval of ice cloud microphysical parameters using the CloudSat millimeter-wave radar and

- temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D8), doi:10.1029/2008jd010049.
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models [J]. *Science*, 245 (4917): 513–516.
- 陈葆德, 梁萍, 李跃清. 2008. 青藏高原云的研究进展 [J]. *高原山地气象研究*, 28 (1): 66–71. Chen Baode, Liang Ping, Li Yueqing. 2008. An overview of research on clouds over the Tibetan Plateau [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 28 (1): 66–71.
- Ding S G, Zhao C S, Shi G Y, et al. 2005. Analysis of global total cloud amount variation over the past 20 years [J]. *J. Appl. Meteor.*, 16 (5): 670–676.
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测 [J]. *大气科学*, 37 (2): 253–280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 253–280.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1–421.
- 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.
- Luo Y L, Zhang R H, Qian W M, et al. 2011. Intercomparison of deep convection over the Tibetan Plateau–Asian monsoon region and subtropical North America in boreal summer using CloudSat/CALIPSO data [J]. *J. Climate*, 24 (8): 2164–2177.
- 马越界, 黄建平, 刘玉芝. 2011. 利用星载云雷达资料分析夏季青藏高原的云辐射强迫 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 47 (5): 48–54. Ma Yuejie, Huang Jianping, Liu Yuzhi. 2011. Impact of clouds on radiative fluxes in summer over the Tibetan Plateau from CloudSat data [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (in Chinese), 47 (5): 48–54.
- 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.
- 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.
- Wang H Q, Zhao G X. 1994. Cloud and radiation—I: Cloud climatology and radiative effects of clouds [J]. *Chinese Sci. Atmos. Sinica*, 18 (Suppl): 910–932.
- Wang J H, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *J. Climate*, 11 (11): 3010–3029.
- 杨大生, 王普才. 2012. 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. 2012. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 89–101.
- 杨军, 陈宝君, 银燕, 等. 2011. 云降水物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 86–97. Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan, et al. 2011. *Physics of Clouds and Precipitation* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 86–97.
- 杨逸畴, 高登义, 李渤生. 1987. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 17(8): 893–902. Yang Yichou, Gao Dengyi, Li Bosheng. 1987. The preliminary study on the water vapor passage of the lower reaches of Yarlung Zangbo River [J]. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 17 (8): 893–902.
- 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.
- Yuter S E, Houze R A. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (7): 1941–1963.
- Zhang H, Peng J, Jing X W, et al. 2013. The features of cloud overlapping in eastern Asia and their effect on cloud radiative forcing [J]. *Science China Earth Sciences*, 56 (5): 737–747.
- 周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 2005. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征 [J]. *高原气象*, 24 (6): 880–888. Zhou Changyan, Li Yueqing, Li Wei, et al. 2005. Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (6): 880–888.
- 卓嘎, 徐祥德, 陈联寿. 2002. 青藏高原边界层高度特征对大气环流动力学效应的数值试验 [J]. *应用气象学报*, 13 (2): 163–169. Zhuo Ga, Xu Xiangde, Chen Lianshou. 2002. Dynamical effect of boundary layer characteristics of Tibetan Plateau on general circulation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 13 (2): 163–169.