

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2013.01.007

利用星载激光雷达研究云层垂直结构及其分布

魏书晓, 吴东

(中国海洋大学信息科学与工程学院海洋技术系, 山东 青岛 266100)

摘 要: 云的垂直结构 (CVS) 是云的重要特征量, 在大气模式研究中有着十分重要的影响。利用 CALIPSO 星载激光雷达 2007~2010 年间 Level 2 Version3 的云数据对中国海域及其周边海域云的垂直结构及其分布随年度和区域的变化进行了统计分析。结果表明: 层数不同的云在研究区域内发生的概率 (COF) 差别较大, 云顶海拔高度 (LTA) 不同的云沿纬度方向的分布差异明显, LTA 在 10~20 km 的云出现的概率较高而且大多出现于靠近赤道区域。由于有些云 CALIPSO 信号不能穿透, 可能使云层数以及云顶高度的统计结果偏小。

关键词: 遥感; 星载激光雷达; 云垂直结构

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2013)01-0036-06

Cloud vertical structure statistics from CALIPSO lidar observations

WEI Shu-xiao, WU Dong

(Department of Marine Technology, College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The cloud vertical structure (CVS) acts an important aspect of cloud characteristics and atmospheric model. The vertical distribution statistics of clouds over China Sea and adjacent sea area were derived from the Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) level 2 version 3 lidar cloud layer data from 2007 to 2010. The results show that the cloud occurrence frequencies (COF) of single and multi-layer clouds over the mentioned area are different, and the layer-top-altitude (LTA) occurrence frequencies have obvious difference with latitude. High clouds (10 ~ 20 km) have high occurrence frequency near equator. Because there are some opacity clouds, the result of layer-number and LTA may be smaller than the real situation.

Key words: remote sensing; cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations lidar; cloud vertical structure

1 引 言

云分布是影响地球对太阳辐射能量的吸收和地球自身光谱向外辐射的重要方面, 对地球辐射收支有着重要的影响^[1]。云的垂直结构 (Cloud vertical structures, 简称 CVS) 是影响到大气环流的一个重要的方面。

基金项目: 国家自然科学基金 (41076116, 40876017) 资助项目

作者简介: 魏书晓 (1987 -), 山东临沂人, 研究生, 主要从事海洋光学与激光遥感方面的研究。

E-mail: weishuxiao1987@163.com

导师简介: 吴东 (1964 -), 山东青岛人, 博士, 教授, 主要从事海洋光学与激光遥感方面的研究。

收稿日期: 2012-10-09

Wang 等通过试验总结出最上层的云顶高度, 云的层数以及多层云中 2 层之间晴空的厚度是云垂直结构的三个重要参数^[2]。传统地基探测手段虽然有了较好的改进^[3], 例如地面雷达可以得到当地的 CVS 分布, 但是微波雷达波长长, 对稀薄云层的敏感性差, 而且观测站点覆盖率小不能实现全球的覆盖, 尤其是在海洋以及一些无人区域不能够进行全面观测^[4]; 当前研究者可以利用热带测雨卫星微波成像仪 (TRMM/TMI) 数据和国际卫星云气候计划 (ISCCP) 数据来分析全球范围内的 CVS, 但是当有中层云和高层云覆盖时, ISCCP 将不能获取到底层云信息^[5~7], 而且 TRMM/TMI 工作于微波波段, 对较薄的云层不敏感。

激光雷达工作波长短, 对大气当中的薄云以及气溶胶粒子敏感度高, 目前已有国外研究人员利用地球科学激光测高仪系统 (GLAS) 上搭载的激光雷达对云分布进行过研究^[8~9]。为了更准确地获取云和气溶胶在地球辐射收支中的作用, 及其对全球气候变化中的潜在影响, 美国国家航空航天局 (NASA) 与法国空间局 (CNES) 合作, 于 2006 年 4 月 28 号发射了装载有激光雷达 (CALIOP) 的卫星 CALIPSO (Cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations)。CALIOP 使用波长为 532 nm 和 1064 nm 的激光对大气层中的云和气溶胶进行探测, 因为探测波长较短, 所以能够探测大气当中的稀薄云层, 并且能够探测到大气的垂直结构, 目前利用 CALIPSO 探测云垂直结构的研究在国内外已经展开^[10~12]。

本文利用 2007 年 1 月到 2010 年 12 月 CALIPSO 的 Level 2 Version 3 激光雷达 5 km 水平分辨率云数数据产品 (CAL_LID_L2_05 kmCLay-Prov-V3-01) 对中国海域及其周边海域 (0°N~55°N, 100°E~155°E) 上空云的分布进行统计分析。

2 数据统计分析

2.1 云层数的统计分析

CAL_LID_L2_05kmCLay-Prov-V3-01 数据当中, 云层数分为 0~10 层。由于出现大于等于 4 层云的概率较小, 因此在做云层数分布统计时将大于等于 4 层云的数据合并。2007~2010 年 4 年在所选定海域上空的数据量分别为 111 万、110 万、89 万、117 万个, 各年不同层数的云所占百分比的统计结果如表 1 所示。从表 1 可以看出 2007~2010 年间中国海域及其周边海域不同层数的云层发生的概率随年度变化趋势大致相同, 但 2007 年大于等于 4 层云的出现概率偏大。

Table 1 COFs from 2007 to 2010

	2007	2008	2009	2010
Samples($\times 10^6$)	1.11	1.10	0.89	1.17
Cloudless (%)	28.0	24.9	27.0	30.0
1-layered (%)	41.8	43.4	42.2	41.0
2-layered (%)	17.6	19.1	18.8	17.8
3-layered (%)	7.7	8.0	7.8	7.0
4 and more (%)	4.9	4.6	4.2	4.2

云层数是 CVS 的重要参数, 云层数的多少表明了 CVS 的复杂性^[12]。从图 1 可以看出 2009 年在研究区域出现 1 层云的概率远高于其它层数的云, 在日本东北部的海域出现概率甚至大于 65%。随着层数的增多出现的概率也逐渐降低, 同时根据图 1 可以看出大于 2 层的云在靠近赤道的低纬度地区出现的概率要高于其它区域。通过对 2007, 2008, 2010 年的数据统计分析发现在这 3 年不同层数的云的分布同 2009 年相似。

2.2 不同高度云层的统计分布

云顶高度是云的重要参量, 可以利用 MODIS 数据通过 CO₂ 薄片法计算获得^[13], 或者通过比较云顶

温度和大气温度轮廓线获得^[14],但是这两种方法计算得到的误差较大,而且当有多层云时只能对顶层云的云顶进行观测。CALIPSO 作为主动传感器,能够对多层云进行探测,并能够准确获得云顶高度。由于有时会出现 CALIPSO 激光不能穿透的云,这会引入误差,2011 年吴东等对此给出了统计分析^[15]。

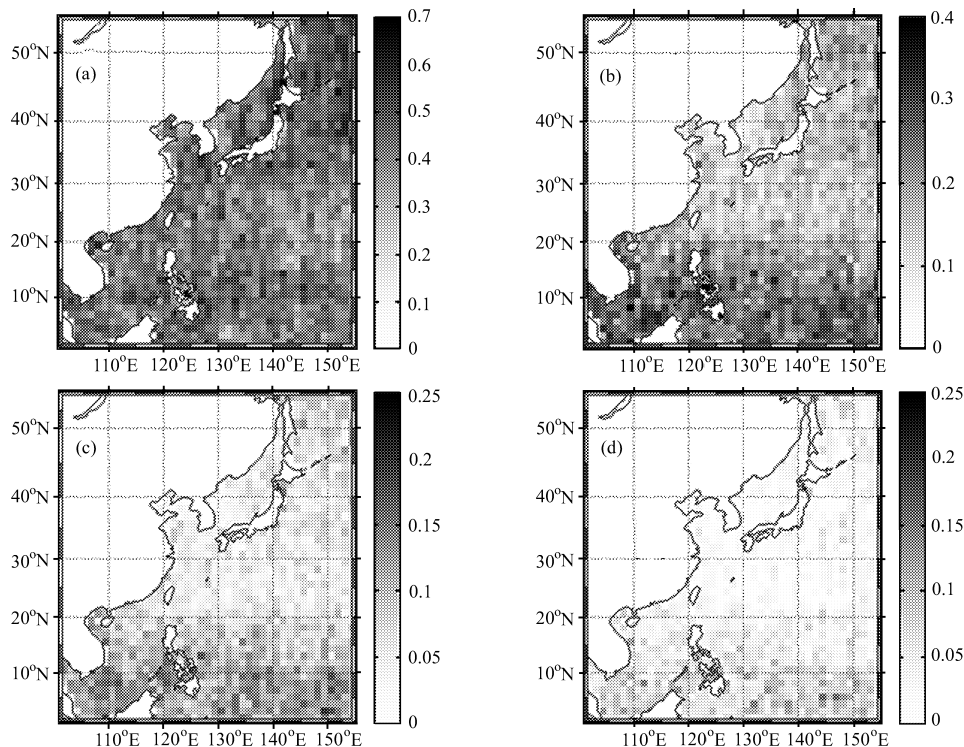


Fig.1 Cloud-layer occurrence frequency distributions((a), (b), (c), (d) are the occurrence frequencies of 1-layered cloud, 2-layered cloud, 3-layered cloud and 4-and-more-layered clouds)

CAL_LID_L2_05kmCLay-Prov-V3-01 数据中提供了云层的云顶海拔高度 (LTA), 可利用其直接进行统计分析。图 2 给出 2007~2010 年间不同海拔高度云出现的概率统计结果。图 2 表明在 2007~2010 年间 LTA 分布相近。从图 2(a₁)、(b₁)、(c₁) 和 (d₁) 可以发现对于 LTA 在 0~4 km 之间的云主要集中在日本东部的西北太平洋海域 (出现概率约为 60%), 而且越靠近低纬度地区出现的概率越小 (在 0°N~20°N 之间出现概率在 10% 左右), 但是在靠近台湾岛的海域以及靠近中国大陆的海域出现的概率较大 (约在 40%); 从图 2(a₂)、(b₂)、(c₂) 和 (d₂) 可见在 15°N~25°N 之间出现 LTA 在 4~10 km 之间的概率较低 (约在 10%), 然而在靠近赤道的区域以及高于 25°N 的海域出现的概率相比稍大 (约在 40%), 这同 LTA 低于 4 km 的云的分布不同; 从图 2(a₃)、(b₃)、(c₃) 和 (d₃) 可见绝大多数 LTA 在 10~20 km 的云集中在赤道附近 (0°~15°N) 的海域, 在该海域出现的概率接近 90%, 在 2008 年有些区域已经接近于 100%, 随着纬度升高出现概率逐渐降低, 当纬度大于 20°N 的时候出现的概率降至 40% 左右, 当纬度在 50°N 附近时出现的概率降到接近于 10%。通过对比可以发现不同年份不同高度的云出现的概率分布大致相同, 但是 2008 年 LTA 在 10~20 km 的云的出现概率明显高于其它年份, 而在 2010 年 LTA 在 10~20 km 的云出现的概率明显小于其它年份。

图 3 给出 2007~2010 年间不同海拔高度的云的出现概率随纬度的分布。从图 3 中可以发现在 0°~15°N, LTA 在 14~18 km 之间的云的发生概率最高, 在 40°N~55°N, 高度在 1~3 km 的云的出现概率稍大, 这与图 2 相吻合。图 4 为各年份不同层数云的 LTA 分布统计, 曲线表明 1 层云, 2 层云, 3 层云, 大于等于 4 层云的 LTA 都在 14~18 km 之间达到峰值, 但是 1 层云的高度在 2 km 左右的时候也会出现较高值。同时

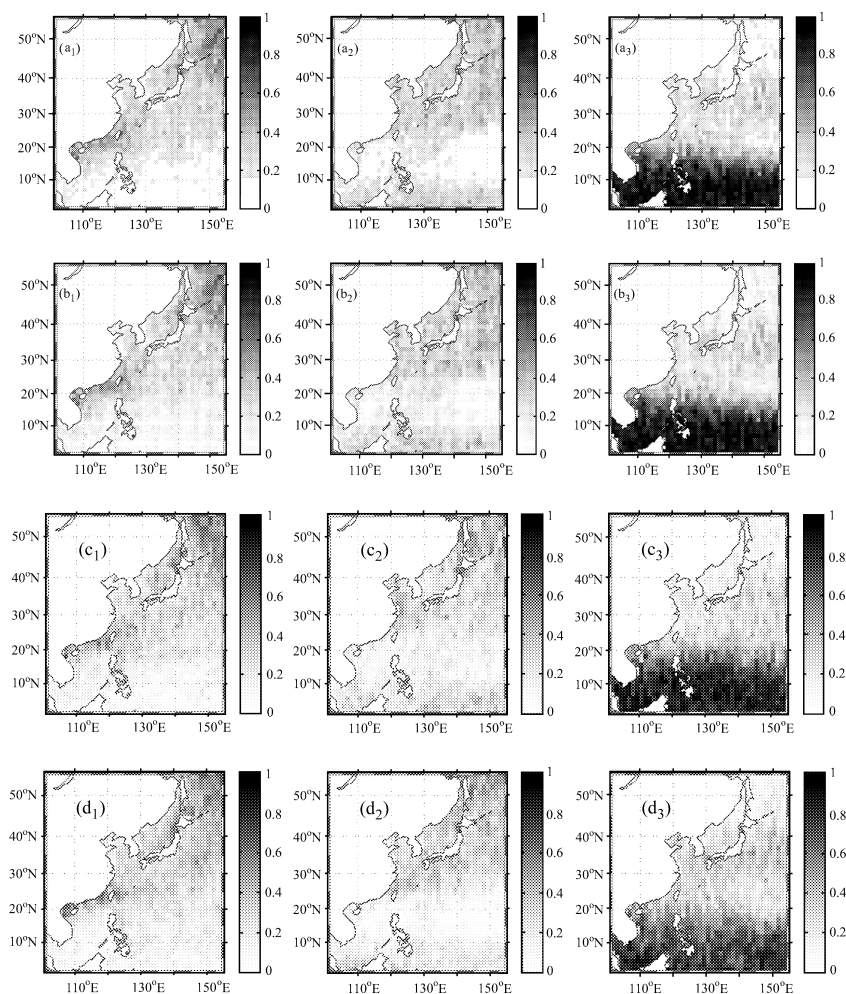


Fig.2 The horizontal distributions of LTA ((a) to (d) are for the COFs from 2007 to 2010; From the left to the right are for the COFs in the range of 0 ~ 4 km, 4 ~ 10 km, 10 ~ 20 km)

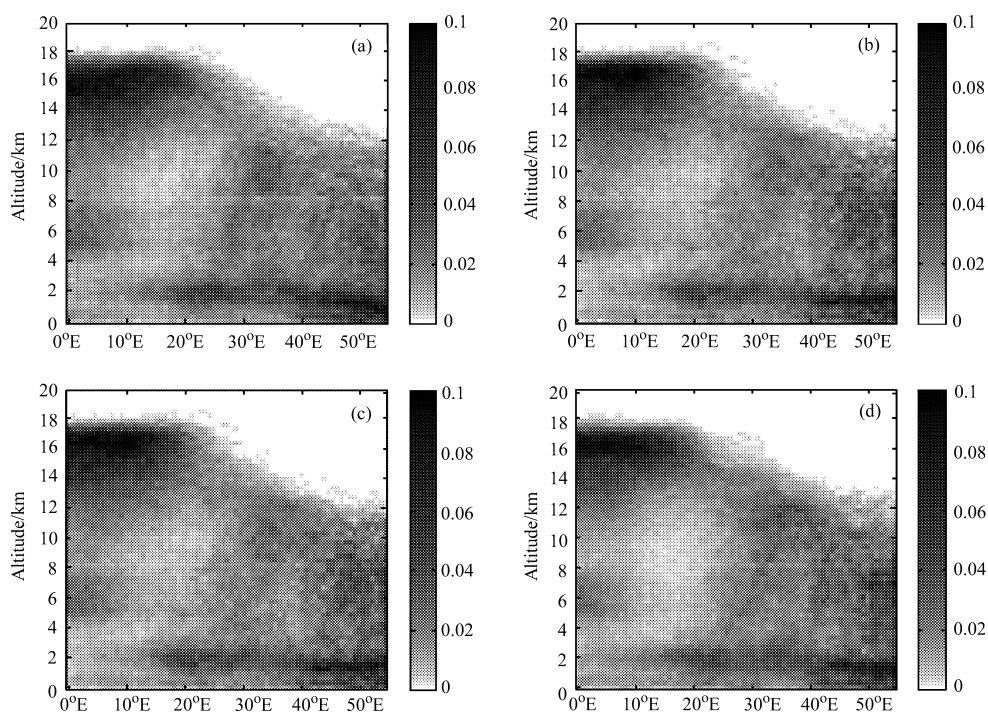


Fig.3 Latitudinal vertical-distributions of COFs ((a) to (d) are for the COFs from 2007 to 2010)

从图 4 中也可以看出只有 1 层云的 LTA 在 2~3 km 和 16~18 km 处出现的概率较高, 然而大于 2 层的云层 LTA 在 16~18 km 处出现的概率较高。

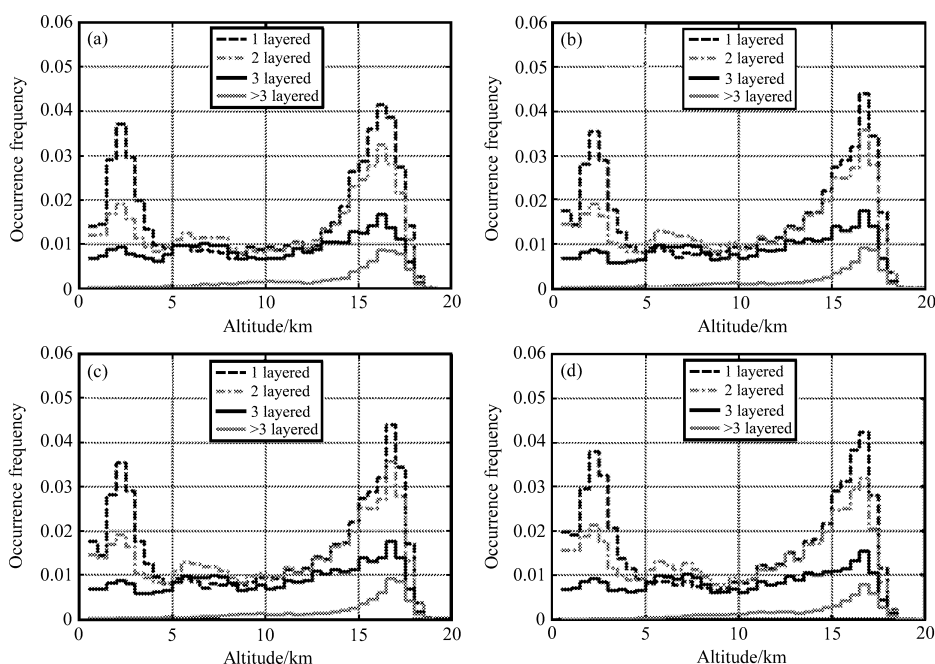


Fig.4 LTA distributions of different cloud-layer ((a) to (d) are for the distributions from 2007 to 2010)

3 结 论

本文通过利用 CALIPSO 激光雷达 Level 2 Version 3 的云层数据, 对 2007~2010 年间中国海域及其周边海域的云的垂直分布做了统计分析, 得出了以下结论:

(1) 2007~2010 年间, 有云出现概率差别不大, 而且层数不同的云出现的概率分布相近, 同一年当中层数不同的云按纬度的分布趋势各不相同, 而且概率差别较大, 从出现 1 层云到 10 层云的概率依次递减。
 (2) 在研究区域上空, 靠近赤道的海域有云出现的概率较大, 主要为 LTA 高于 10 km 的高层云, 出现的概率接近 90%。
 (3) LTA 在 0~4 km 之间的云主要集中在日本东部的西北太平洋海域, 而且越靠近低纬度地区出现的概率越小, 但是在靠近台湾岛的海域以及靠近中国大陆的海域出现的概率较大; 在 15°N~25°N 之间出现高度在 4~10 km 之间的概率较低, 然而在靠近赤道的区域以及高于 25°N 的海域出现的概率相比稍大, 这同 LTA 低于 4 km 的云的分布不同; LTA 在 10~20 km 之间的云沿经向均匀集中在靠近赤道的海域 (0°N~20°N), 在其它区域出现的概率远低于该区域; 1 层云, 2 层云, 3 层云, 大于等于 4 层云的 LTA 在 14~18 km 出现概率最大, 但是 1 层云的 LTA 在 2 km 左右时的概率也较高。

本文虽然对云层的云顶高度、云层数做了分析, 但是并没有对云层的实际厚度及云层的间隙作出分析, 这也是研究云的垂直结构的重要参量, 所以在下一步的研究中将对这两个方面作出分析。

致谢: 感谢美国国家航空航天局兰利研究中心科学数据中心 (ASDC) 提供的 CALIPSO 激光雷达观测数据。

参考文献:

- [1] Warren S G, Hahn C J, London J. Simultaneous occurrence of different cloud types [J]. *Clim. Appl. Meteorol.*, 1985, 24: 658-667.

- [2] Wang J H, Rossow W B. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *J. Climate*, 1998, 11: 3010-3029.
- [3] Qie Xiushu, Lü Renda, Chen Hongbin, *et al.* Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (大气科学), 2008, 32(4): 867-881 (in Chinese).
- [4] Zhou Y Q, OU J J. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research [J]. *Meteor. Mon.* (气象), 2010, 36(11): 50-58 (in Chinese).
- [5] Liu Q, Fu Y F, Feng S. Geographical patterns of the cloud amount derived from the ISCCP and their correlation with the NCEP reanalysis datasets [J]. *Acta Meteor Sinica* (气象学报), 2010, 68(5): 689-704 (in Chinese).
- [6] Han M, Braun S, Olson W S, *et al.* Application of TRMM PR and TMI measurements to assess cloud micro-physical schemes in the MM5 model for a winter storm [J]. *Appl. Meteor. Climatol.*, 2010, 49: 1129-1148.
- [7] Li Y, Yu R, Xu Y, *et al.* Spatial distribution and seasonal variation of cloud over china based on ISCCP data and surface observations [J]. *Meteor. Soc. Japan*, 2004, 82(2): 761-773.
- [8] Berthier S, Chazette P, Pelon J, *et al.* Comparison of cloud statistics from spaceborne lidar systems [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, 8: 6965-6977.
- [9] Breon F M, Brien D M, Spinhirne J D. Scattering layer statistics from space borne GLAS observations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32: L22802.
- [10] Wu D, Hu Y, McCormick M P, *et al.* Global cloud layer distribution statistics from one year's CALIPSO lidar observations [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2011, 32(05): 1269-1288.
- [11] Stubenrauch C J, Cros S, Lamquin N, *et al.* Cloud properties from AIRS and evaluation with CALIPSO [J]. *Geophys. Res.*, 2008, 113: D00A10.
- [12] Li J, Huang J, Yi Y, *et al.* Analysis of vertical distribution of cloud in east Asia by space-based lidar data [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.*(大气科学), 2009, 33(4): 1-10 (in Chinese).
- [13] Lin L, Huang S X, Du H D. Retrieval of cloudtop properties from MODIS data [J]. *Journal of Geo-Information Science* (地球信息科学), 2006, 8(2): 106-109 (in Chinese).
- [14] 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*, 2008, 113: D00A19.
- [15] Wu D, Jia J. Global penetrability statistics of CALIPSO over ocean laser samples [J]. *J. Atmos. Environ. Opt.* (大气与环境光学学报), 2011, 6(4): 252-259 (in Chinese).