

蔡云萍,罗昌荣,陈赛,等,2023. 激光云高仪探测中国东南沿海云分布特征[J]. 气象,49(2):170-177. Cai Y P, Luo C R, Chen S, et al, 2023. Observation of cloud characteristics with ceilometer in the southeast coast of China[J]. Meteor Mon, 49(2):170-177(in Chinese).

激光云高仪探测中国东南沿海云分布特征^{*}

蔡云萍¹ 罗昌荣² 陈 赛¹ 王证帅¹ 吕巧谊³ 黄 澎¹

1 厦门市气象灾害防御技术中心, 厦门 361012

2 厦门市气象局, 厦门 361012

3 厦门市海峡气象开发重点实验室, 厦门 361012

提 要: 利用 Vaisala CL51 激光云高仪对厦门地区 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日 5 年的云探测数据, 采用时间占比算法计算出云分数, 并对云层、云高以及云分数分布规律进行统计分析。结果表明: 中国东南沿海云层结构以单层云为主(占比 43.59%), 双层云为辅(占比 16.42%), 三层以上云出现的概率相对较低(占比 5.25%)。观测期间以中低云为主, 与其他季节相比, 夏季的云分布密度的集中度较小, 存在较大云底间距。高云更可能出现在 18 时至次日 06 时的时段内, 夏季尤为显著, 表现出明显的日变化特征。

关键词: 中国东南沿海, 激光云高仪, 云底高度, 云分数, 统计分析

中图分类号: P412, P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.080301

Observation of Cloud Characteristics with Ceilometer in the Southeast Coast of China

CAI Yunping¹ LUO Changrong² CHEN Sai¹ WANG Zhengshuai¹ LYU Qiaoyi³ HUANG Peng¹

1 Xiamen Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Xiamen 361012

2 Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

3 Xiamen Strait Meteorological Development Key Laboratory, Xiamen 361012

Abstract: In order to study the cloud characteristics of the southeast coast of China, a laser ceilometer CL5 by Vaisala was used to detect cloud characteristics in Xiamen from 1 January 2016 to 31 December 2020. By using the time proportion algorithm to calculate the cloud fraction, this paper analyzes the distributions of cloud layers, cloud-base height and cloud fraction via data analysis method. The results show that the cloud structure in the southeast coast of China is dominated by single-layer clouds (43.59%), supplemented by double-layer clouds (16.42%), and the probability of occurrence of clouds with more than three layers is rare (5.25%). During the observation period, there were mainly low- and mid-level clouds. Compared with that in other seasons, the concentration of cloud distribution density in summer is smaller, and the cloud-base height difference between the lowest layer cloud and the highest layer cloud is larger. High clouds are more likely to occur between 18:00 BT and 06:00 BT, especially in summer, showing the characteristics of obvious diurnal variation.

Key words: southeast coast of China, ceilometer, cloud-base height, cloud fraction, statistic analysis

^{*} 国家自然科学基金青年基金项目(41805028)和厦门市青年创新基金项目(3502Z20206078)共同资助

2021 年 11 月 1 日收稿; 2022 年 6 月 6 日收修定稿

第一作者: 蔡云萍, 主要从事气象数据保障与应用工作. E-mail: 451274495@qq.com

引 言

根据国际卫星云气候学计划(ISCCP)的卫星观测资料以及地面观测资料显示,全球平均超过 60% 的区域被云覆盖(Rossow and Schiffer, 1999)。云的观测是地面气象观测中基本的项目,云可以通过多种物理、化学和热力动力学作用,调节地球大气系统内部的辐射能量平衡,并影响全球气候变化(陈桂英和李小泉, 1991; 刘柏鑫和李栋梁, 2018; 桂海林等, 2019; 吕巧谊等, 2020; 许健民, 2021)。除了影响地球热量的收支平衡外,云对水循环起到重要的作用,是当前气候变化研究中最大的不确定因子之一(汪宏七和赵高祥, 1994; Choi et al, 2014; 卢乃锰等, 2017, 靳雨晨等, 2021)。有相关研究表明,云的垂直结构特征对大气环流存在影响,且认为云层数及多层云中云层的间距等云宏观特性参数,在气候研究中具有重要价值(Wang and Rossow, 1998)。云底高度在决定了云类型的同时,也影响了降水的概率(Prein et al, 2015),在保障飞机安全飞行、导弹顺利发射等方面,云底高度等云宏观特征参数具有重要参考价值,甚至对于宇宙射线的探测,云的高度也是影响探测准确性的关键因素(Welliver, 2009; 赵静等, 2017; 胡树贞等, 2020)。同时,云的状态也是影响人工消减雨作业的重要气象要素,了解云的宏观结构及其演变规律,对识别作业条件,科学实施人工播云尤为重要(Dong et al, 2005; 白婷等, 2020; 史月琴等, 2021)。因此,云的宏观特征分析在天气预报、气候研究及人工影响天气等领域均有着重要意义。

近年来,国内外学者对云宏观分布特征的研究越来越深入,特别是对中国北方、青藏高原、中部地区云分析较丰富。孙丽等(2019)对辽宁省不同天气系统影响下云系垂直结构特征进行研究,发现在不同天气系统影响下,云层均以单层云为主。Zhou et al(2019)采用 CL51 激光云高仪及毫米波云雷达数据研究了北京上空的云结构及其特征。霍娟等(2020)对北京地区的云宏观分布特征进行研究,发现出现率日变化有季节差异,春、夏两季呈现中午开始逐步升高至下午逐步下降的特点,冬、秋两季日变化特征不显著。张倩等(2016)采用 CL3 激光云高仪数据探究青藏高原云底高度特征,发现青藏高原地区以单层云为主且有明显的日变化。薛小宁等

(2018)发现青藏高原地区卷云云顶高度的概率分布在 6 月和 10 月发生显著变化。游婷等(2020)对中国中东部云特征进行探究,得出夏季白天中国中东部总云量及其光学厚度整体呈由南向北逐渐减小的分布特征,且中高云量占主导地位。

中国东南沿海的云特征研究相对较少,厦门地处台湾海峡南部西侧、福建南部的九龙江入海处,位于中国东南沿海,是我国海湾型城市之一,盛行风向为偏东风,属南亚热带海洋性季风气候(鹿世瑾和王岩, 2012)。本文采用 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日期间激光云高仪的探测数据,对厦门地区云时空分布特征进行了研究。

1 CL51 激光云高仪

随着激光和光电子技术的发展,测云激光雷达(通常称激光云高仪)技术也得到了很大的提高。激光云高仪向上空发射激光,大气中的空气分子、气溶胶粒子以及云粒子对入射激光产生后向散射,形成云高仪接收的回波信号,粒子越大、越密集,则回波信号越强,因此,云层的回波信号可能强于气溶胶的回波信号,两者都显著强于气体分子的回波信号,通过分析和比较,得到云底的高度。如果云层较薄或云粒子较小,则云层对激光能量的衰减减小,云高仪发射的激光能穿透最低的云层(李肖霞等, 2016; 蔡嘉仪等, 2020),可以继续探测上层云的回波,甚至更多层云的回波信号,而得到多个云层的高度。厦门气象局的 CL51 型激光云高仪(表 1)曾得到了五层云的数据(从低到高分为第一到第五层云,数据是各层云云底高度),并且对降水期间的垂直能见度和云检测也表现出良好的探测性能。如果下层云太厚或因

表 1 CL51 激光云高仪主要参数指标

Table 1 Cardinal parameters and specifications of the CL51 ceilometer	
主要参数	规格
激光发射重复频率	6.5 kHz
激光器功率	20 mW
激光波长	910 nm
可探测云层数	最多五层
接收器视场角	0.56 mrad
测量距离	15 km
分辨率	10 m
报告间隔	60 s
工作温度	-45~50℃
时钟精度	自动时钟同步

有雨滴而对激光产生很强的衰减,则不能探测上层云。因此,激光云高仪给出的云层数量,可能与实际云层数量有偏离。本文中未加区分,认为云高仪探测的云层数据是可靠的,并在此基础上进行统计和分析。

2 数据处理与分析

2.1 数据获取率

在厦门沿海地区观测的云高数据采用北京时记录,观测间隔为60 s。本文利用整时观测数据进行统计分析,在2016年1月1日至2020年12月31日的5年时间内,共获取43318组有效整点数据,数据获取率为98.79%。

2.2 云层数量概率统计

统计分析2016—2020年的整时数据,厦门地区有云的概率为65.25%。观测期间晴空、单层、双层、三层、四层和五层云的存在概率分别为34.74%、43.59%、16.42%、4.32%、0.80%和0.13%(图1),其中单层云出现概率最大,双层云次之,三层、四层和五层云出现的概率仅占5.25%。观测表明:厦门地区云层结构以单层云为主,双层云为辅,三层及以上云出现的概率相对较低。

在统计有云时段内,月平均和小时平均云层数如图2所示。6—8月处于夏季,空气对流旺盛,平均云层数高于其他月份。小时平均云层数均少于两层,00—07时云层数变化较为平缓,09时起云层数逐步降低至13时,傍晚时分(17时起)日照即将结束,气温降低,水汽凝聚,云层数值升高。

2.3 云高分析

2.3.1 第一层云的云底高度分布特征

Vaisala CL51激光云高仪产品的最大高度为15 km,最大云底高度为13 km,实际探测高度受大气条件影响,可能低于或者高于这一探测高度。对观测期间的第一层云高进行小时及月份平均值的统计,一天内的逐时变化曲线接近V形,在20时达到最高值,逐步下降至次日13时达到最低值,14时起逐步提升,呈现明显日变化(图3b)。一年内逐月变化曲线为双峰型,在春季(4—5月)、夏季(6—8月)范围内云底高度均值较其他时间高,在7月达到最高值(图3a)。

为了进一步探究不同季节各时段的云底高度分

布特性,将观测期间按季节(春、夏、秋、冬)分别处理、计算出各时段第一层云底高度的频次分布,如图4a~4d所示。在图4中用颜色差异表示第一层云底高度的频次高低。根据图4a显示的统计结果可以看出,春季云底高度集中在3 km以下,高云(热带地区云底高度6 km以上)更多出现在凌晨和夜间。图4b显示,夏季云在18时至次日06时,高云数量明显多于其他季节对应时段的情况。较于其他三季,夏季云高具有较大变化范围,日变化特征显著,可能与短波辐射和大气对流等因素有关,短波辐射使云顶产生暖而干的对流层层边界层顶,这种云顶抑制了低层湍流发展,阻挡了低层水汽输送,导致夜间较白天发展旺盛,夏季白天日照、短波辐射更强,日变化特征更为显著(Wood, 2012);而且,厦门处于沿海地区,由于陆地地表热容较海洋面小,受太阳辐射加热升温较洋面剧烈,近地表空气升温幅度更大,夏季日照辐射加强,大气对流发展更加旺盛,促使产生更大的变化范围(Doulas, 1934; Houze, 2014)。图4c和4d反映出秋、冬季的云底高度主要在6 km以下,高云分布较其他季节稀少。各季均有一定的云底高度日变化特征,夏季尤为显著。

2.3.2 各云层的云底高度

激光云高仪可以处理多层云的回波信号,而得到多个云层的高度,本文通过对各云层高度的统计数据,绘制了云底高度盒须图5a~5e,分别为单层云至五层云的云底高度。图5a表明单层云的云底高度一般出现在1~3 km,低云出现的机会相对多,午后的云较高。由图5b可看出,双层云的云底高度集中在0.5~2 km的范围内。图5c说明了三层云的云底高度主要在0.5~1.5 km,高云主要发生在晚间及凌晨。图5d为四层云的云底高度情况,06—16时的云层高度较其他时段的略低;图5e反映了发生五层云的次数较少,云底高度也低。通过图5,可以看出,随着云层数的增加,云底高度降低。

2.3.3 云底间距分布特征

针对两层及更多云层的情况,按月份和时刻维度,分别计算出最高层与最低层云底高度的平均高度及间距。图6a为月份维度云底间距分析结果。在6—8月(夏季),云底间距达到最大值,中国东南沿海地区夏季受亚热带海洋性季风影响,空气对流明显加强,夏季云呈现高度高、云层数量多及云底间距大的特征。图6b为时刻维度云底间距分析结果,中午(12时)平均云底高度最低,云底间距达最低值。夜间(20时至次日08时)云底间距比白天大,最高层及最低层的平均云高也均较高。

2.4 云分数特征

2.4.1 云分数特征

本文采用时间占比算法计算出云分数,即通过过去 30 min 内,云高仪上空有云的分钟数比例,计算出相应时刻的云分数。例如,当云分数为 0% 时,表示云高仪 30 min 内均无观测到云数据;当云分数为 100% 时,表示云高仪 30 min 内持续监测到云数据。得到各时刻的云分数后,为了进一步了解云分数的分布密度,传统分布计算大多采用频次图展示,但因每月的天数并非完全一致,单纯采用频次计算会存在较大误差,故本次采用每月各云分数区间的频次(F)、当月全部数据(即当月总频次, F_A)计算

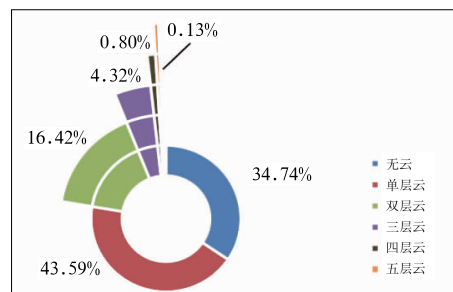


图1 2016年1月1日至2020年12月31日无云及单层、双层、三层、四层、五层云的概率分布

Fig. 1 The percentage of 0-layer (without cloud) to 5-layer cloud distributions vertically from 1 January 2016 to 31 December 2020

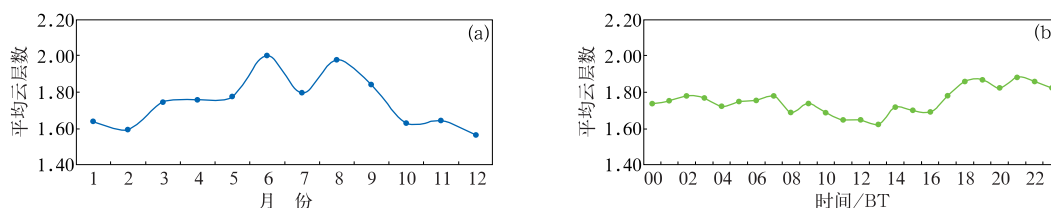


图2 2016年1月1日至2020年12月31日(a)月份和(b)小时的平均云层数变化

Fig. 2 Variation of (a) monthly and (b) hourly averaged numbers of cloud layers from 1 January 2016 to 31 December 2020

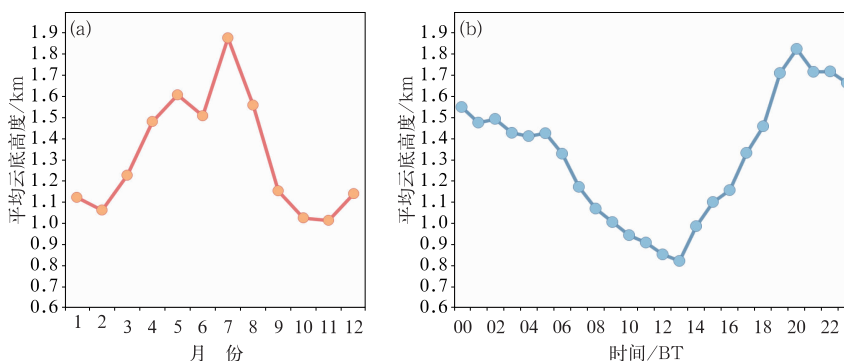


图3 2016年1月1日至2020年12月31日(a)月份和(b)小时的平均云底高度变化

Fig. 3 Variation of (a) monthly and (b) hourly averaged cloud-base heights from 1 January 2016 to 31 December 2020

出概率分布值 ρ , 公式如下:

$$\rho = \ln(F/F_A) \quad (1)$$

图7为观测期间云分数分布特征,每月的不同云分数区间由概率分布值大小用不同的颜色表示,云分数90%以上的云在各月均占较大比重,每月云分数90%以上及晴空出现的日均概率值均较大。

2.4.2 不同云层数量情况下的云分数

对观测期间不同层数类型云的第一层云分数进行分析可得,单层云平均云分数为94.83%,双层云平均云分数为99.43%,三层云平均云分数为99.81%,四层云平均云分数为99.95%,五层云平均云分数为99.99%。图8为观测期间各层月均云

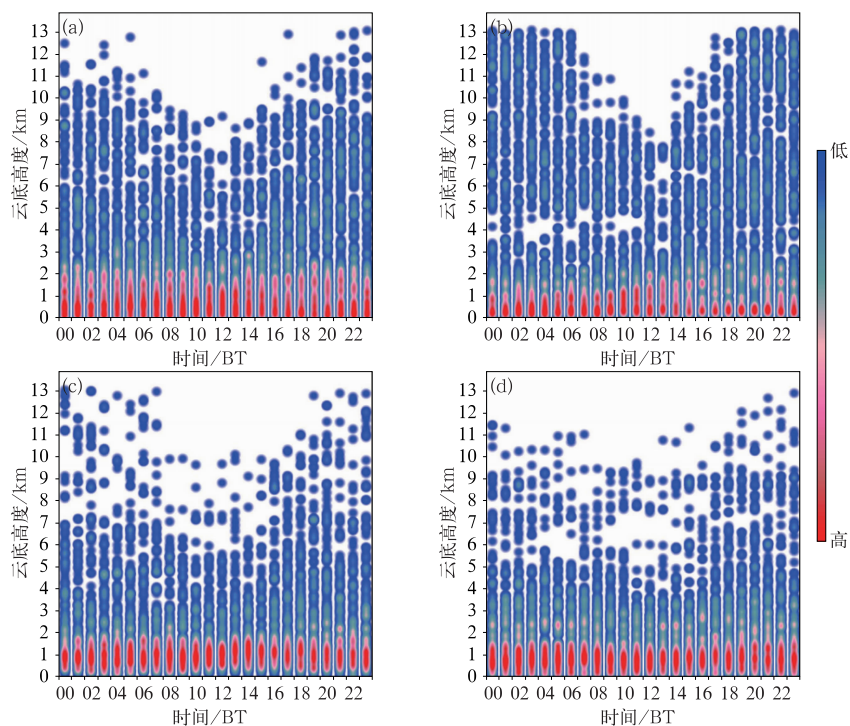


图 4 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日 (a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季各时段的云底高度频次分布

Fig. 4 The frequency distribution of cloud-base height (CBH) in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter from 1 January 2016 to 31 December 2020

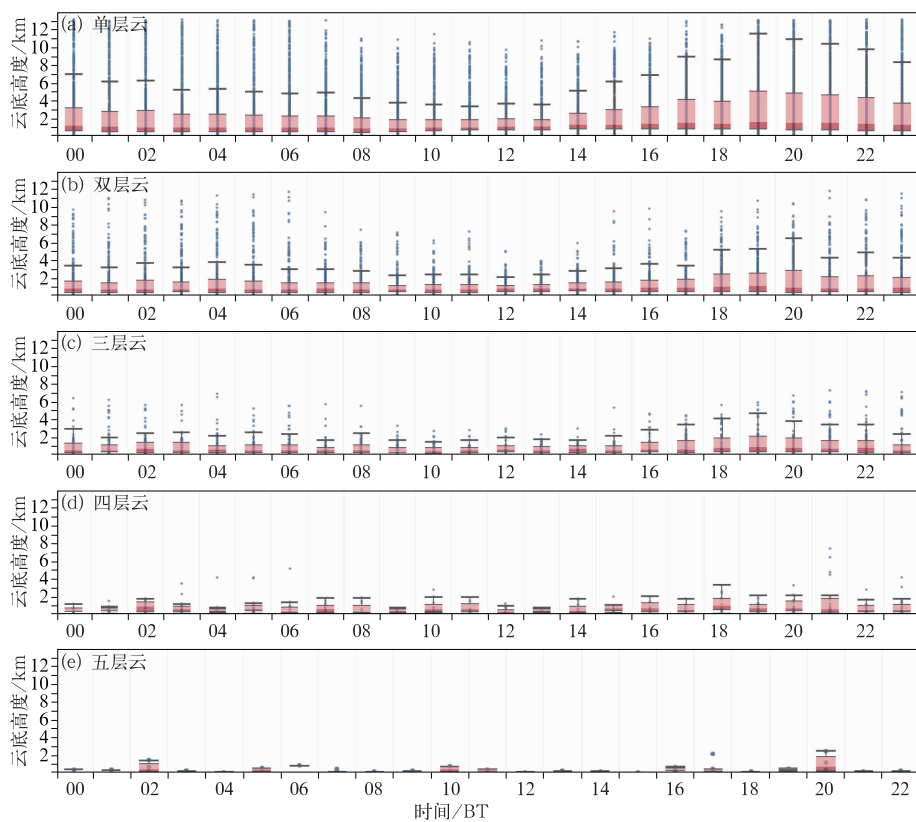


图 5 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日单层至五层云的云底高度盒须图

Fig. 5 The box whisker plots of cloud-base heights of 1-layer cloud to 5-layer cloud from 1 January 2016 to 31 December 2020

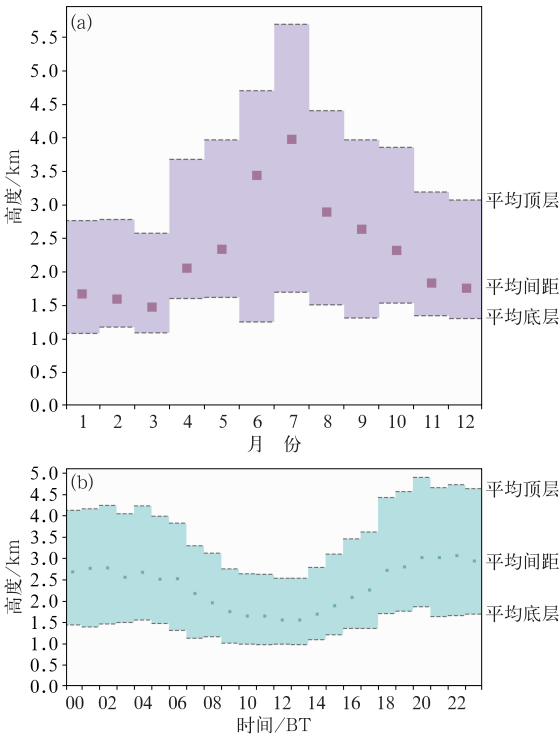


图 6 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日
(a)月份和(b)小时的多层云云底间距
Fig. 6 (a) Monthly and (b) hourly cloud-base height difference between the lowest layer cloud and the highest layer cloud in the case of multi-layer cloud from 1 January 2016 to 31 December 2020

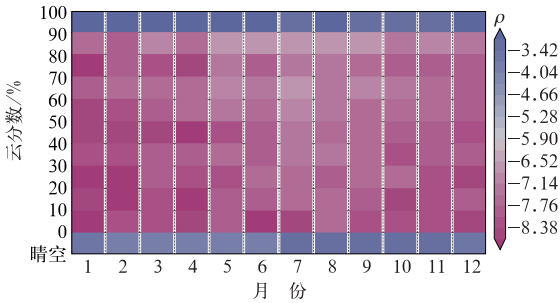


图 7 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日
观测期间每月不同云分数分布特征
Fig. 7 Different distribution characteristics of cloud fraction each month during the observation period from 1 January 2016 to 31 December 2020

分数变化曲线,单层云的第一层云月均云分数最低,月均云分数随云层数的增加而升高。

2.5 综合分析

按四季:春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—2 月)进行数据汇总分析(表 2)。

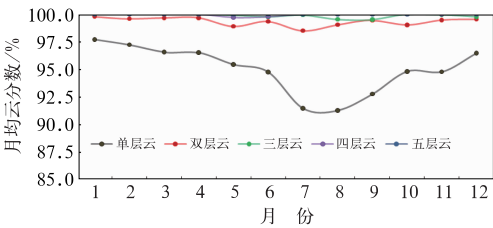


图 8 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日
不同云层月均云分数变化
Fig. 8 Variation of monthly average cloud fraction in each layer from 1 January 2016 to 31 December 2020

表 2 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日
云季节分析统计

项目	春季	夏季	秋季	冬季
有云天气占比/%	75.25	62.38	55.45	68.41
平均云分数/%	73.21	59.42	53.14	66.95
平均云层数	1.431	1.546	1.401	1.336
平均云底高度(第一层)/km	1.904	2.638	1.917	1.621

2016—2020 年春、冬两季平均云分数均高于 65%,较其他季节突出,同时在图 9 中,春、冬两季节对应云天气占比也较高,表明厦门地区春、冬两季呈现云多且云分数高的特征。夏季云层数多,平均云底高度也明显高于其他季节,结合图 4 云底高度分布频次(夏季)集中度较小的特点,进一步说明厦门地区夏季云垂直变化大,云层数量多。

将各层数据整合统计,高度步进值为 1 km,统计高度区间为 0~14 km,计算出各月每千米高度范围内平均云云分数,分析平均云分数随月份的分布(图 10),可以直观得出 2016—2020 年每个月不同高度范围内的平均云分数变化,绿色表示云分数低值,图中云分数低值区域主要存在于各月高云部分,表明低云分数与云高存在较强关联性。

同样将各层数据整合统计,高度步进值为 1 km,统计区间为 0~14 km,计算出各时段每千米范围内平均云分数,并按平均云分数绘制图 11 的 2016—2020 年各时段云分数时空分布。由图 11 可以直观得出各时段不同高度的平均云分数变化,红色区域表示低云分数区域,主要存在于图形外圈,说明观测期间,各时段高云范围均存在较低的平均云分数,进一步表明低云分数与高云存在较强的关联性。10—16 时时段内,5 km 以上每千米范围内的平均云分数也均较低。结合本文图 4 中 10—16 时

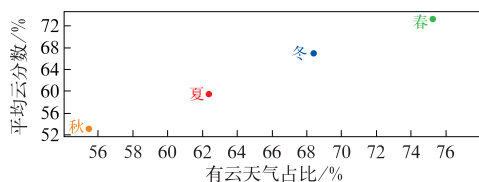


图 9 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日
各季节有云天气占比及平均云分数

Fig. 9 Proportion of cloudy weather and averaged
cloud fraction in each season
from 1 January 2016 to 31 December 2020

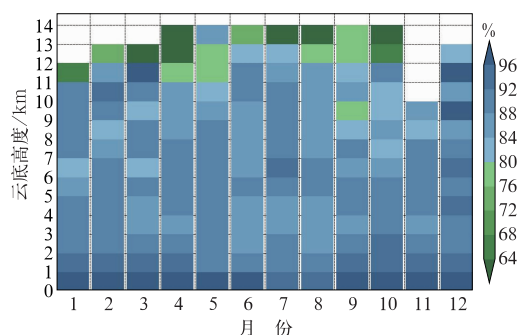


图 10 2016—2020 年各月云分数时空分布

Fig. 10 The monthly distribution of cloud
fraction during 2016—2020

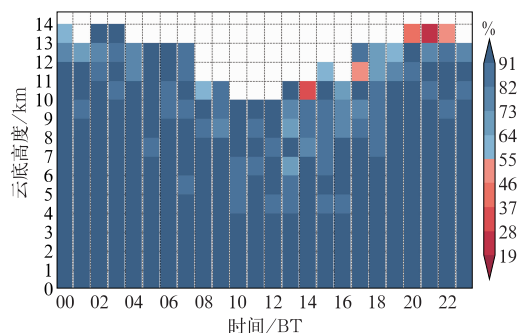


图 11 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日
云分数时空分布(时段)

Fig. 11 Hourly distribution of cloud fraction
from 1 January 2016 to 31 December 2020

时段内的云底高度频次分布特点,可得该时段的高云不仅出现次数少,且每千米范围内的平均云分数也处于较低水平。

3 结 论

2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日期间,在中国东南沿海厦门地区采用 VAISALA CL51 激光

云高仪进行气象探测,并对观测数据进行统计分析,得到以下主要结论:

(1)2016—2020 年中国东南沿海云层结构以单层云为主,双层云为辅,出现三层云及更多层云的概率相对较低。云高越高,单层云出现的概率也越大,出现高云时,单层云和双层云的概率很大。夏季中低云里,两层及多层云的概率高于其他季节。

(2)观测期间主要以中低云为主,中国东南沿海地区夏季云分布频次的集中度小,存在较大云底间距。高云更多出现在 18 时至次日 06 时的时段内,对应云底间距也大,夏季尤为显著,表现为明显的日变化特征。

(3)按月份及时刻分析,低云分数和高云均有很强相关性。从时刻维度分析,10—16 时时段内,5 km 以上每千米范围内的平均云分数也均较低。10—16 时时段内高云不仅出现次数少,且每千米范围内的平均云分数也处于较低水平。

参考文献

- 白婷,黄毅梅,樊奇,2020. 河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析[J]. 气象,46(12):1633-1640. Bai T, Huang Y M, Fan Q, 2020. Comprehensive analysis on the conditions of artificial precipitation enhancement during a precipitation weather process in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(12):1633-1640 (in Chinese).
- 蔡嘉仪,苗世光,李炬,等,2020. 基于激光云高仪反演全天边界层高度的两步曲线拟合法[J]. 气象学报,78(5):864-876. Cai J Y, Miao S G, Li J, et al, 2020. A two-step ideal curve fitting method for retrieving full-day planetary boundary layer height based on ceilometer data[J]. Acta Meteor Sin, 78(5):864-876 (in Chinese).
- 陈桂英,李小泉,1991. 北半球云量的空间分布和季节变化特征[J]. 气象,17(2):3-9. Chen G Y, Li X Q, 1991. Some features of spatial distribution and seasonal variation of cloudiness over Northern Hemisphere[J]. Meteor Mon, 17(2):3-9 (in Chinese).
- 桂海林,诸葛小勇,韦晓澄,等,2019. 基于 Himawari-8 卫星的云参数和降水关系研究[J]. 气象,45(11):1579-1588. Gui H L, Zhuge X Y, Wei X C, et al, 2019. Study on the relationship between Himawari-8-based cloud parameters and precipitation[J]. Meteor Mon, 45(11):1579-1588 (in Chinese).
- 胡树贞,曹晓钟,陶法,等,2020. 船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J]. 气象,46(6):745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6):745-752 (in Chinese).
- 霍娟,吕达仁,段树,等,2020. 基于 2014—2017 年 Ka 毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征[J]. 气候与环境研究,25(1):

- 45-54. Huo J, Lv D R, Duan S, et al, 2020. Cloud macro-physical characteristics in Beijing based on Ka radar data during 2014—2017[J]. *Climatic Environ Res*, 25(1): 45-54(in Chinese).
- 靳雨晨, 牛生杰, 吕晶晶, 等, 2021. 江西地区层状暖云微物理结构特征及云雨自动转化阈值函数的研究[J]. *大气科学*, 45(5): 981-993. Jin Y C, Niu S J, Lü J J, et al, 2021. Study of the micro-physical structural characteristics and cloud-rain autoconversion threshold function of stratiform warm clouds in Jiangxi[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(5): 981-993(in Chinese).
- 李肖霞, 王柏林, 郭伟, 等, 2016. 激光云高仪试验数据对比分析[J]. *气象*, 42(6): 764-769. Li X X, Wang B L, Guo W, et al, 2016. Comparative analysis of cloud ceilometer observational experiment[J]. *Meteor Mon*, 42(6): 764-769(in Chinese).
- 刘柏鑫, 李栋梁, 2018. 我国云量时空变化特征及其与副热带夏季风北边缘带关系研究[J]. *气象*, 44(3): 382-395. Liu B X, Li D L, 2018. Spatio-temporal variation features of cloud cover in China and its correlation to north boundary belt of subtropical summer monsoon[J]. *Meteor Mon*, 44(3): 382-395(in Chinese).
- 卢乃锰, 方翔, 刘健, 等, 2017. 气象卫星的云观测[J]. *气象*, 43(3): 257-267. Lu N M, Fang X, Liu J, et al, 2017. Understanding clouds by meteorological satellite[J]. *Meteor Mon*, 43(3): 257-267(in Chinese).
- 鹿世瑾, 王岩, 2012. 福建气候: 第2版[M]. 北京: 气象出版社. Lu S J, Wang Y, 2012. The Climate of Fujian[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 吕巧谊, 张玉轩, 李积明, 等, 2020. 单层不同类型云系统的特性及高云重叠的影响[J]. *大气科学*, 44(1): 183-196. Lü Q Y, Zhang Y X, Li J M, et al, 2020. Characteristics of various types of cloud systems in single layers and the associated impacts of the overlapping high clouds[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(1): 183-196(in Chinese).
- 史月琴, 刘卫国, 王飞, 等, 2021. 一次对流云人工消减雨作业云条件预报和作业预案合理性分析[J]. *气象*, 47(2): 192-204. Shi Y Q, Liu W G, Wang F, et al, 2021. Forecast on convective cloud condition and analysis on seeding plan of an artificial rainfall mitigation case[J]. *Meteor Mon*, 47(2): 192-204(in Chinese).
- 孙丽, 马嘉理, 赵姝慧, 等, 2019. 基于 CloudSat 卫星观测资料的辽宁省不同天气系统影响下云系垂直结构特征[J]. *气象*, 45(7): 958-967. Sun L, Ma J L, Zhao S H, et al, 2019. Characteristics of cloud vertical structure under different synoptic systems in Liaoning Province based on CloudSat observation[J]. *Meteor Mon*, 45(7): 958-967(in Chinese).
- 汪宏七, 赵高祥, 1994. 云和辐射—I(云气候学和云的辐射作用[J]. *大气科学*, 18(S1): 910-921. Wang H Q, Zhao G X, 1994. Cloud and radiation I: cloud climatology and radiative effects of clouds[J]. *Sci Atmos Sin*, 18(S1): 910-921(in Chinese).
- 许健民, 2021. 用对流-辐射平衡理论理解对流的云的外观表现[J]. *气象*, 47(1): 1-10. Xu J M, 2021. Appearance of convective clouds explained by radiative-convective equilibrium[J]. *Meteor Mon*, 47(1): 1-10(in Chinese).
- 薛小宁, 邓小波, 刘贵华, 2018. 基于卫星资料的青藏高原卷云特性研究[J]. *高原气象*, 37(2): 505-513. Xue X N, Deng X B, Liu G H, 2018. Study on characteristics of Qinghai-Tibetan Plateau cirrus based on satellite data[J]. *Plateau Meteor*, 37(2): 505-513(in Chinese).
- 游婷, 张华, 王海波, 等, 2020. 夏季白天中国中东部不同类型云分布特征及其对近地表气温的影响[J]. *大气科学*, 44(4): 835-850. You T, Zhang H, Wang H B, et al, 2020. Distribution of different cloud types and their effects on near-surface air temperature during summer daytime in central eastern China[J]. *Chin J Atmos Sin*, 44(4): 835-850(in Chinese).
- 张倩, 宋小全, 刘金涛, 等, 2016. 激光云高仪探测青藏高原夏季云底高度的研究[J]. *光电子·激光*, 27(4): 406-412. Zhang Q, Song X Q, Liu J T, et al, 2016. Observation of cloud base height with ceilometer in Tibetan Plateau during summer[J]. *J Optoelectron Laser*, 27(4): 406-412(in Chinese).
- 赵静, 曹晓钟, 代桃高, 等, 2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. *气象*, 43(1): 101-107. Zhao J, Cao X Z, Dai T G, et al, 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding[J]. *Meteor Mon*, 43(1): 101-107(in Chinese).
- Choi Y S, Ho C H, Park C E, et al, 2014. Influence of cloud phase composition on climate feedbacks[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 119(7): 3687-3700.
- Dong X Q, Minnis P, Xi B K, 2005. A climatology of midlatitude continental clouds from the ARM SGP central facility. Part I: low-level cloud macrophysical, microphysical, and radiative properties[J]. *J Climate*, 18(9): 1391-1410.
- Douglas C K M, 1934. The physical processes of cloud formation[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 60(256): 333-344.
- Houze R A Jr, 2014. Cloud Dynamics[M]. 2nd ed. Cambridge: Academic Press.
- Prein A F, Langhans W, Fosser G, et al, 2015. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges[J]. *Rev Geophys*, 53(2): 323-361.
- Rossow W B, Schiffer R A, 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(11): 2261-2287.
- 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.
- Welliver E A, 2009. Remote detection of cloud base heights using CloudSat and CALIPSO[R]. Monterey, Naval Postgraduate School.
- Wood R, 2012. Stratocumulus clouds[J]. *Mon Wea Rev*, 140(8): 2373-2423.
- Zhou Q, Zhang Y, Li B, et al, 2019. Cloud-base and cloud-top heights determined from a ground-based cloud radar in Beijing, China[J]. *Atmos Environ*, 201: 381-390.

(本文责编:俞卫平)