

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.07.019

基于 CALIOP 资料的中国及 周边地区云出现概率时空分布特征分析^①

冯 晓, 蔡宏珂, 陈权亮,
孙 一, 武正敏, 帖 心

成都信息工程大学 大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

摘要: 云垂直结构是影响大气辐射的重要参数, 其时空分布是影响全球气候变化的关键组成部分. 本文利用星载激光雷达 CALIOP 的 1 km 云层产品, 计算了中国及周边地区(0—55°N, 70—140°E)云的出现概率, 对不同地区、不同季节、不同高度单层云的出现概率做了对比分析. 结果表明: 云的出现概率表现出明显的地区差异, 蒙古高原和印度半岛北部少云, 热带海域和中国南方多云, 多数地区夜间云出现概率略高于白天; 除蒙古高原和印度半岛北部以外, 多数地区单层云比多层云更常见; 多数地区高云占单层云的比例最大, 而中国大陆南部单层的云较常见, 西太平洋北部海域常被单层的低云覆盖; 夏秋两季云出现概率普遍大于春冬两季, 尤其印度半岛北部的云主要出现在夏季; 蒙古高原和印度半岛北部单层云少于多层云, 冬季尤其明显, 而中国西南地区东部全年单层云更常见; 夏季单层的高云占全年单层云的比例最大, 青藏高原部分地区超过 35%, 这与其地形特征和夏季对流活动旺盛有关.

关键词: CALIOP; 云垂直结构; 云的出现概率; 水平分布; 季节变化

中图分类号: P407.5; P426.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)07-0133-11

云既可以作为一个辐射源发射自身的热辐射, 同时还会吸收或散射太阳短波辐射和地面长波辐射, 调节并影响地气系统的能量分配, 对全球气候产生重要影响, 因此有云时地球的反照率是晴空时的两倍^[1-3]. 在研究云层对地球辐射平衡的影响特别是在大气中的长波通量时, 一个重要前提是需要对云垂直结构有准确认识^[4]. 云的垂直结构特征主要包括云的高度分布(云顶及云底的高度分布)、云间距以及云层数的高度分布. 长时间以来, 大尺度天气气候模式中, 由于缺乏对云垂直结构和云特性的深度了解, 在建立云对气候变化影响的模型时, 无法得到一个准确的参数化方案, 大大降低了对气候的模拟能力^[5]. 因此, 准确全面地研究云垂直结构特征的各个参数及其时空分布对进一步研究云与辐射的相互作用以及全球气候变化有重要意义.

Ding 等^[6]利用 1983 年 7 月至 2001 年 9 月 ISCCP 资料分析发现全球平均云量呈减少趋势, 同时存在区域性差异, 这与云体内部的动力作用、热力作用以及微物理过程关系密切. Wang 等^[7]在戈达德太空研究所大气环流模式(GISS GCM)中进行的 13 个实验初步分析了云垂直结构对大尺度环流的影响. 随着探测技术的发展, 对云的研究进一步深入到对云垂直结构特征的分析, 初步分析发现各区域单层云和多层云的云

^① 收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41405031, 41475037); 科技部公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201506013).

作者简介: 冯 晓(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事大气物理和大气环境研究.

高分布差异有统计学意义^[4], 青藏高原及其南部临近地区云垂直结构特征的季节变化特征尤其明显^[8]. 将 CALIOP(Cloud - AerosolLidar with Orthogonal Polarization)观测资料与区域模拟相结合, 分析欧洲上空夜间云的垂直结构, 为了解部分气候异常现象提供了基础信息^[9]. 以上研究着重于云高的分布特征, 而对云层数与云高的关系研究尚不深入, 因此本文拟对云出现概率的时空分布特征进行重点分析.

1 资料及方法

1.1 研究资料

搭载于 CALIPSO 卫星上的激光雷达 CALIOP, 是一个双波段(532 nm 和 1 064 nm)的正交偏振激光雷达, 其探测波长较短且对大气中稀薄云层的敏感度高, 探测性能良好^[10-11]. 与地面观测器和被动遥感卫星探测器相比较, CALIOP 的显著优势在于采用了主动遥感的方法, 首次实现在全球范围内对云层垂直结构的长时间数据搜集, 为云辐射对地气系统影响的探究与大尺度天气气候模式的优化提供了更全面详细的观测资料^[5, 12]. 但 CALIOP 存在难以穿透较厚云层的局限, 易导致其所提供的较厚云层的云底高度及下方云层信息不准确或丢失. 利用 CALIOP 数据对全球云层分布的统计结果以及对 CALIPSO 穿透性的统计结果共同表明, 使用 CALIOP 数据对于研究云层分布是可行的^[13-14], 所以本文的分析能够反映研究区域云层垂直结构的一般特征.

本文采用 2006 年 6 月至 2016 年 5 月期间 CALIPSO 的 Level2 Version4 激光雷达 1 km 的水平分辨率云层产品(CAL_LID_L2_01kmCLay-Standard-V4-10), 对中国及周边地区(0—55°N, 70—140°E)云出现概率、各层云底高度的水平分布和季节变化进行了统计分析.

1.2 研究方法

本文将卫星沿轨观测数据按 $1.2^{\circ} \times 1.2^{\circ}$ 的经纬度网格进行统计, 卫星观测轨道数超过 400 次、卫星观测廓线数超过 40 000 个的网格占总量的 95% 以上(图 1). 网格内的激光廓线一旦探测到云层, 就将该网格定义为云天. 由于极轨卫星对地观测的轨道因素, 高纬地区观测次数多于低纬地区(图 1a), 根据卫星观测的当地时间, 本文也对白天与夜间的观测数据做了对比分析.

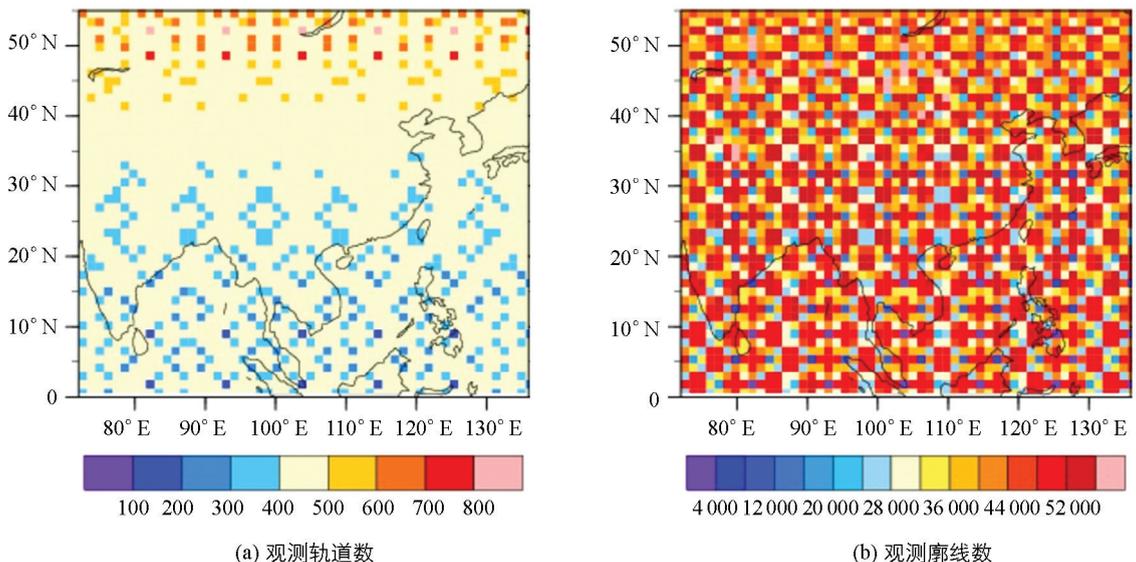


图 1 中国及周边地区 2006—2016 年观测数量及样本数量分布

不同高度的云的辐射作用不同: 通常低云的反射率效应起冷却作用, 高云的温室效应对地气系统的加热作用比较明显, 因此对不同高度云进行深入研究有助于全面认识云与辐射的相互作用^[15-16]. 本文根据 WMO 的云高分类标准, 利用云底高度 Layer_Base_Altitude(H_{Base})(为平均海平面以上的高度)将单层云分为高云、中云、低云(表 1).

表 1 单层云的云高分类

云 高 分 类	
高云	$H_{\text{Base}} > 6 \text{ km}$
中云	$2 \text{ km} \leq H_{\text{Base}} \leq 6 \text{ km}$
低云	$H_{\text{Base}} < 2 \text{ km}$

2 云出现概率及云高的水平分布

2.1 云天的出现概率

全年云天出现概率(图 2a)呈现出明显的地区差异. 以 35°N 为界, 中国南方云天的出现概率多于北方, 其中大值区为四川盆地、云贵高原东北部以及 $0-10^{\circ}\text{N}$, $90-120^{\circ}\text{E}$ 的热带地区, 蒙古高原云天的出现概率最低, 而印度半岛西北部也是少云区. 对比图 2b 和图 2c, 青藏高原西侧夜间云天出现概率比白天低 $10\% \sim 20\%$, 而在其他多数地区, 云天在夜间的出现概率略高于白天.

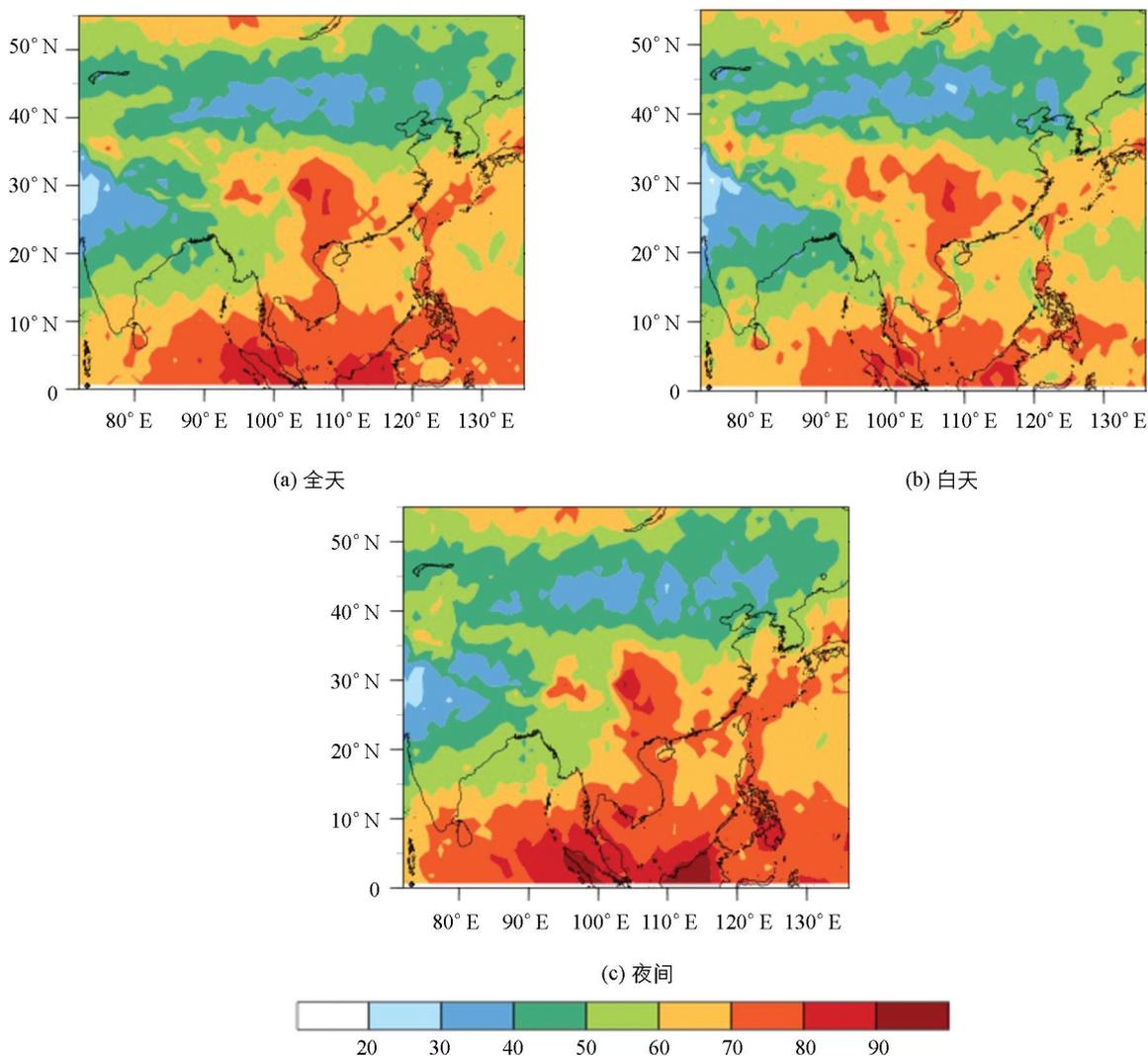


图 2 中国及周边地区云天全天、白天及夜间出现概率的水平分布

2.2 单层云出现概率的昼夜差异和高度差异

单层云的样本数量与云天的样本总量之比即为单层云出现概率, 反映出单层云对全年云出现概率的贡

献; 单层云在白天(夜间)的出现概率则用白天(夜间)单层云样本数量占白天(夜间)云天样本总量的比例来表示. 以 35°N 为界, 中国南方单层云出现概率多于北方, 蒙古高原单层云全年较少出现, 中国大陆的四川盆地、西南地区东部和中国东海东部的单层云出现概率超过 60%. 南亚地区单层云出现概率低于 40%, 尤其印度半岛西北部是低值区(图 3a). 根据图 3b 和图 3c 的对比显示, 青藏高原及四川盆地单层云出现概率白天略高于夜间, 其余地区昼夜差别不大.

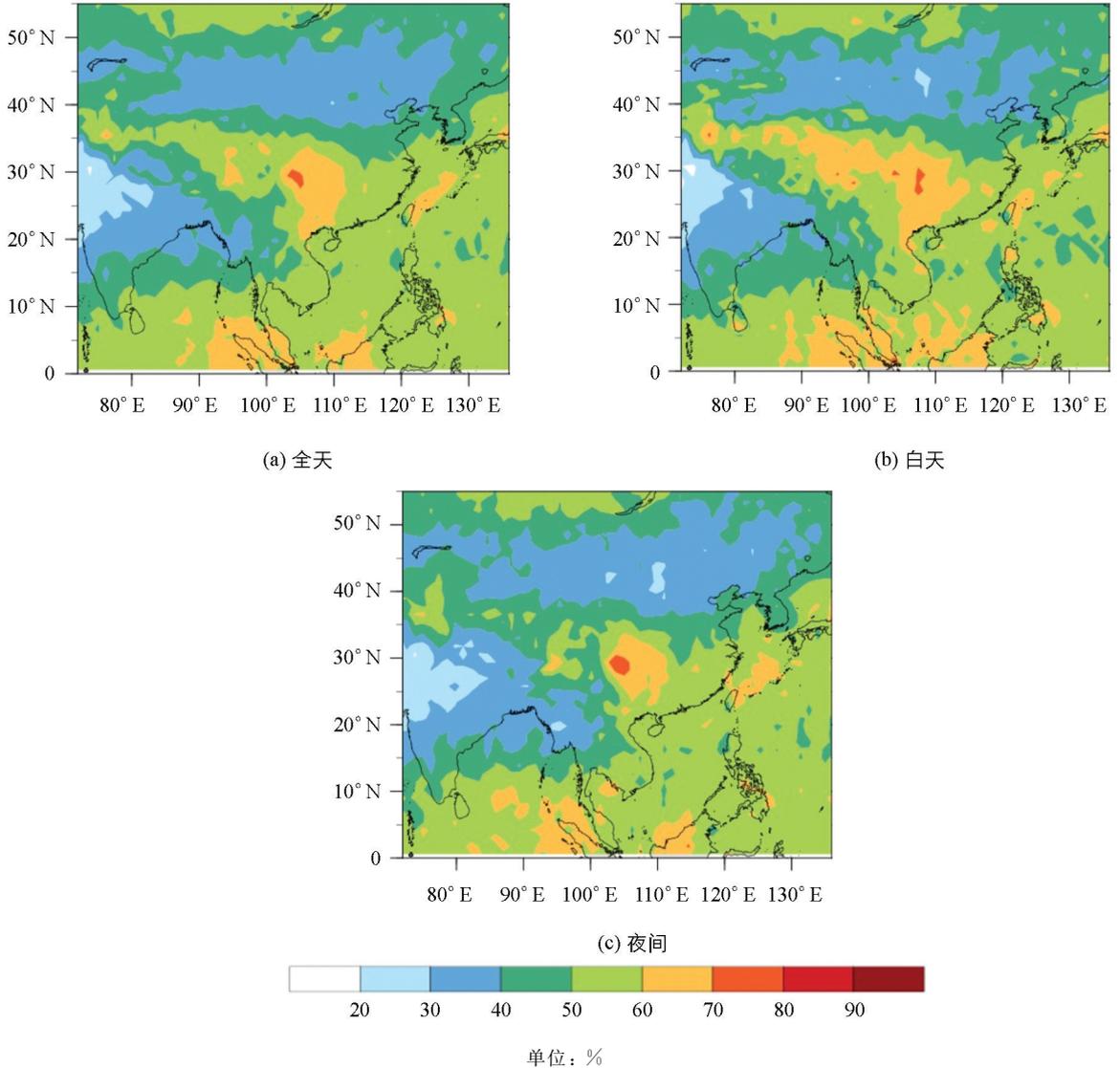


图 3 中国及周边地区单层云全天、白天及夜间出现概率的水平分布

不同高度单层云的出现概率, 即高云、中云和低云占单层云的比例(图 4). 高云出现概率最大, 中云次之, 低云最少. 青藏高原地区受地形影响, 以单层的高云为主, 高云在高原主体的出现概率超过 90%. 高原以外的大陆地区以 30°N 为界, 北方高云出现概率高于南方(图 4a). 中国大陆西南地区单层的中云出现概率超过 50%; 沿海地区高云及低云出现较多, 较少出现中云, 尤其是 20°N 以南海域, 包括孟加拉湾和中国南海, 中云出现概率低于 10%(图 4b). 西太平洋和中国沿海地区的单层的低云出现概率高于中国陆地; 东北、华北、长江中下游和东南沿海地区, 低云出现概率为 10%~30%, 其余内陆地区低于 10%; 15°N 以南海域, 包括孟加拉湾和中国南海, 低云出现概率低于 20%, 明显低于 15°N 以北的西太平洋北部海域(图 4c). 不同高度云层的出现概率没有明显的昼夜差异, 中云在白天的出现概率略高于夜间, 高云和低云的出现概率则为夜间略高于白天.

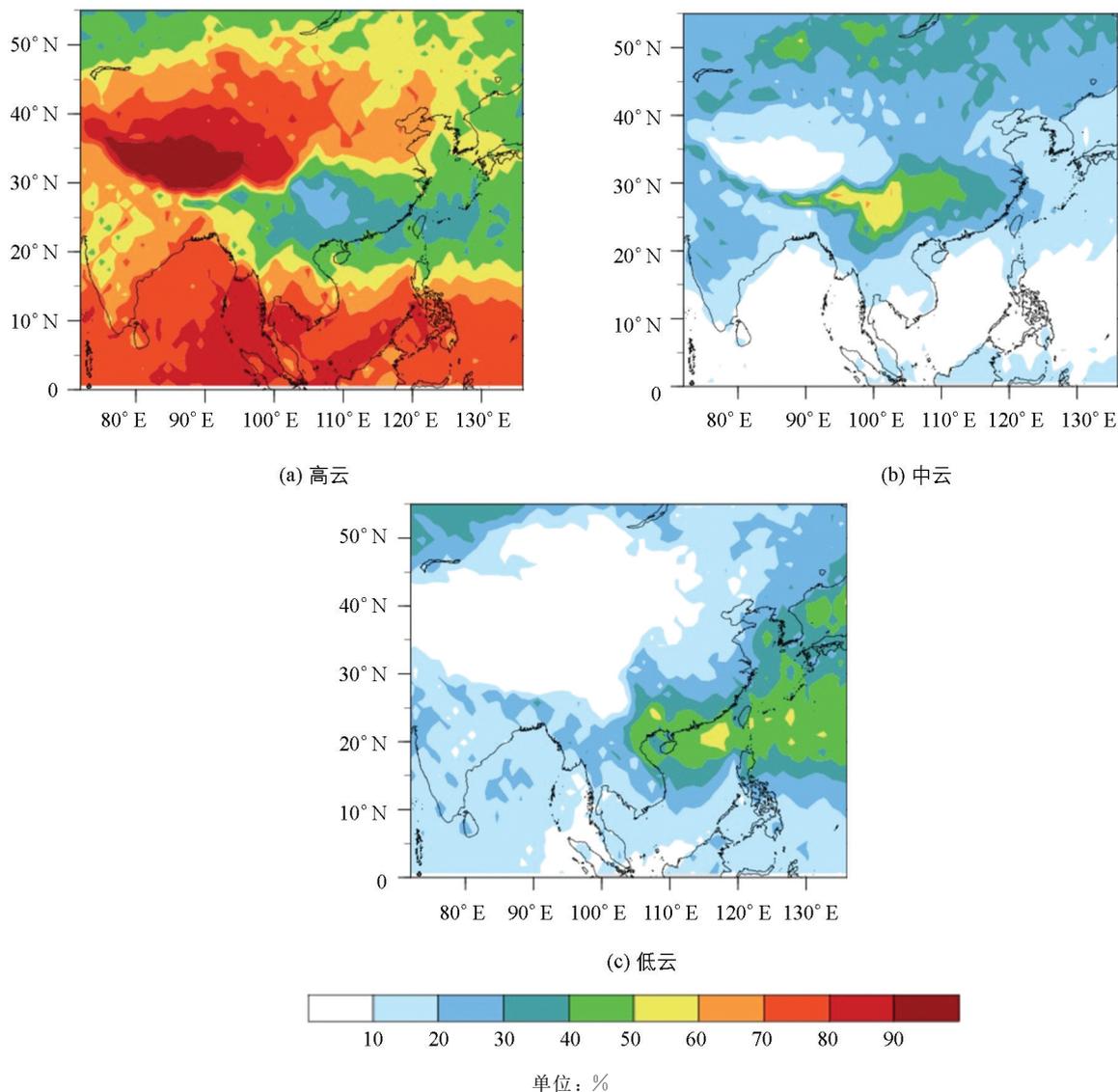


图 4 中国及周边地区不同高度单层云出现概率水平分布

3 云出现概率及云高的季节变化

云全年出现概率有明显的地区差异, 在不同天气系统和大气环流结构的作用下, 对流活动的强弱以及水汽是否充沛等因素造成云的水平分布也存在时间变化^[17-18]. 本节着重分析云天和单层云出现概率的季节差异.

3.1 云天的季节变化

各季节云天、晴空样本数量与全年样本总量之比即各季节云天、晴空的出现概率, 用以描述云的季节分布及变化特征(图 5). 中国大陆 35°N 以北地区各季节晴空出现概率高于 35°N 以南地区, 蒙古高原是典型的少云地区. 印度半岛西北部云层较集中地出现在夏季, 秋季晴天较多.

云天出现概率也有明显的季节差异. 夏秋两季对全年云出现概率的贡献最大, 中国大陆西南地区、印度半岛、中南半岛以及孟加拉湾、中国南海是夏季云出现概率的大值区, 占全年观测样本总量的 20%~25%, 秋季四川盆地、大陆西南地区东北部以及 15°N 以南的热带地区也常被云覆盖, 在冬季, 中国东北和华北地区、蒙古高原、青藏高原、印度半岛、中南半岛以及孟加拉湾北部云天出现概率对全年的贡献都很小.

3.2 单层云出现概率的季节变化

各季节单层云样本数量与全年单层云样本总量之比为单层云各季出现概率, 表示了单层云的季节变化, 如图 6 所示; 各季节单层云样本数量与各季节样本总量之比为单层云当季出现概率(图 7), 反映了单层云对该季节云出现概率的贡献.

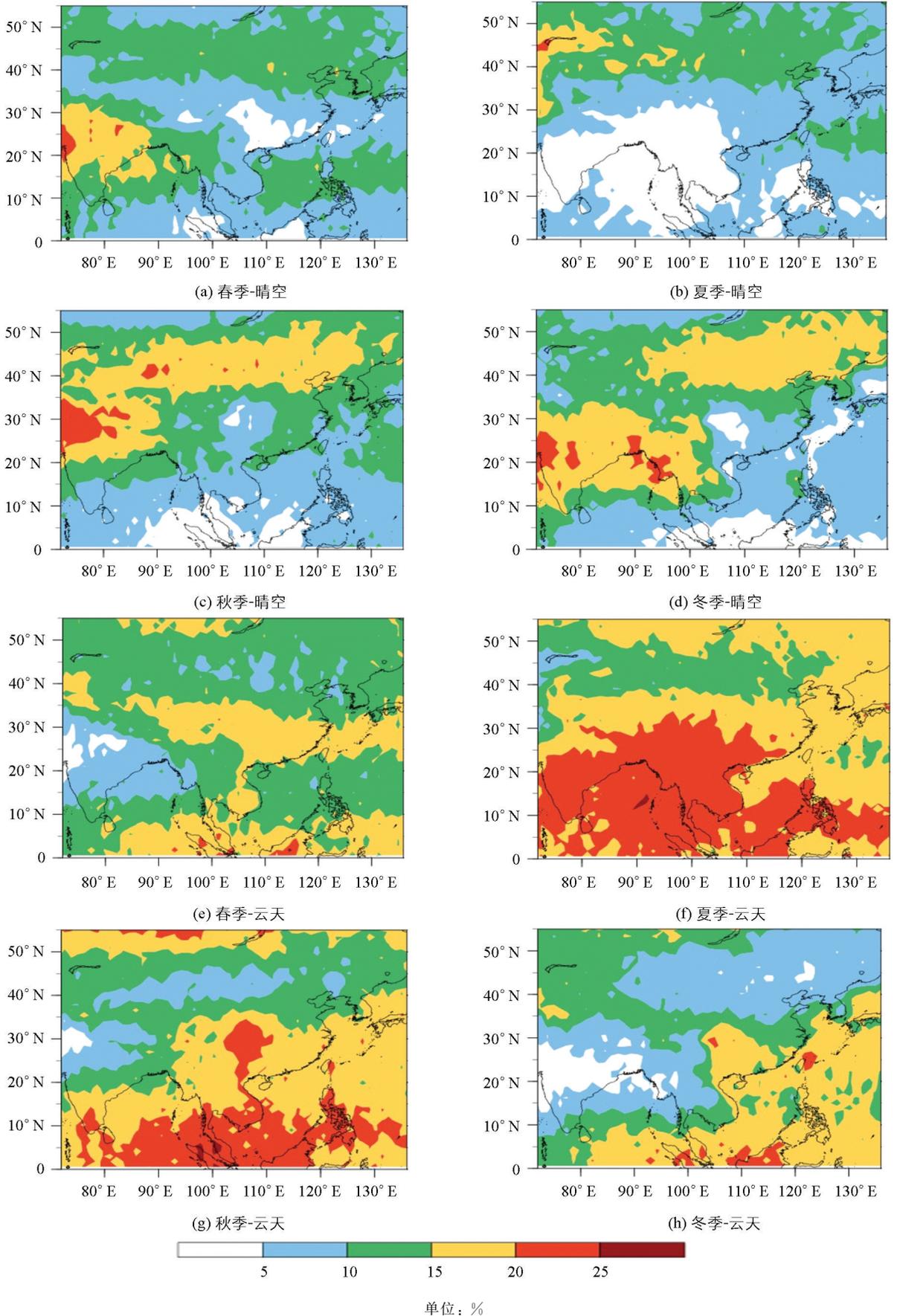


图 5 各季节云天和晴空出现概率的水平分布

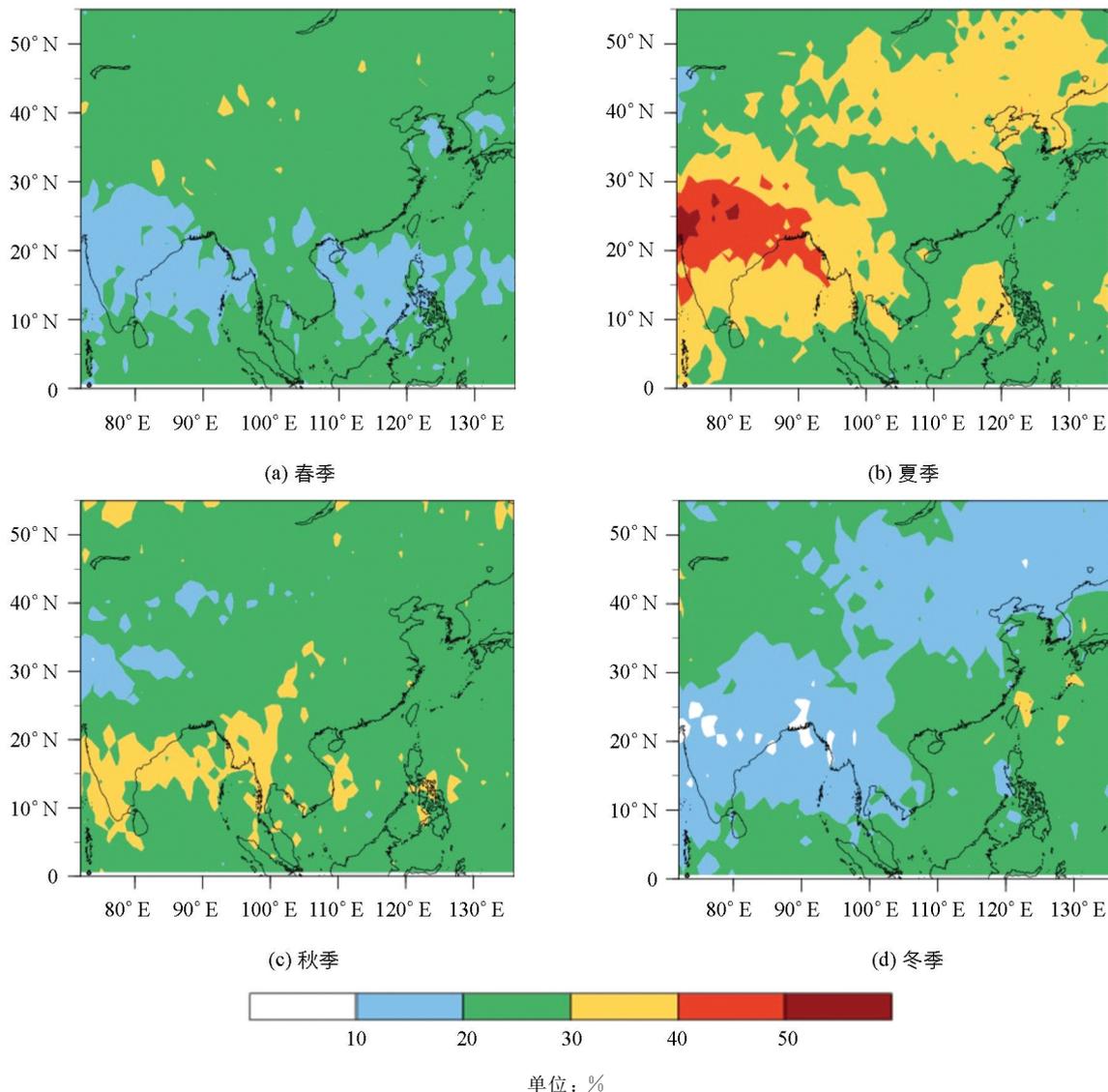


图 6 单层云各季出现概率分布

中国西北和南方地区, 单层云的季节差异并不显著, 蒙古高原、印度半岛和孟加拉湾单层云多出现在夏季, 尤其是印度半岛北部在夏季对全年单层云出现概率的贡献特别高, 单层云出现概率超过 40%, 而上述地区冬季单层云较少出现。

春夏两季, 35°N 以南中国大陆地区云层以单层云为主, 秋冬两季, 黄淮地区单层云对总云量的贡献略低于春夏两季, 而四川盆地和西南地区东部, 单层云的贡献则超过 70%。蒙古高原各季节单层云比多层云较少出现, 尤其是冬季, 单层云对总云量的贡献低于 30%, 青藏高原春夏多出现单层云, 而秋冬两季则以多层云为主。印度半岛夏季单层云略多于多层云, 而其他季节均以多层云为主, 尤其冬季, 印度半岛中部地区, 单层云对总云量的贡献低于 20%。海洋上空常年以单层云为主, 尤其春季中国南海和菲律宾以东洋面、冬季中国东海单层云占总云量的比例可超过 70%, 夏季琉球群岛以东洋面的单层云略少于多层云。

各季节不同高度单层云的出现概率即各季节高云、中云和低云占全年单层云的比例, 表明各季节不同高度云层对全年单层云的贡献, 如图 8 所示。研究区域内, 大部地区常年都有单层的高云出现, 秋季

云贵高原东北部及冬季中国南方、东北地区和邻近海域高云很少出现,夏春两季高云对青藏高原全年云量有较大贡献,部分地区甚至超过 30%,其中青藏高原高云在夏季高于其他季节的主要原因,除了青藏高原的地形因素,夏季青藏高原的辐射效应、热源作用都使得青藏高原地区对流活动旺盛,同时受亚洲夏季风的影响,青藏高原水汽较为湿润,以上几点因素的共同作用使得夏季青藏高原的高云出现概率较大^[8],中国南海东部、印度半岛和孟加拉湾全年云量有超过 1/4 由夏季高云组成,除青藏高原地形影响外,中国大陆地区常年都有单层的中云出现,中国大陆西南地区秋冬两季中云出现概率较大,20°N 以南海域各季均很少出现中云,单层的低云在海洋上空的出现概率大于陆地上空,尤其冬季,中国南海北部、中国黄海和日本海低云出现概率较大。

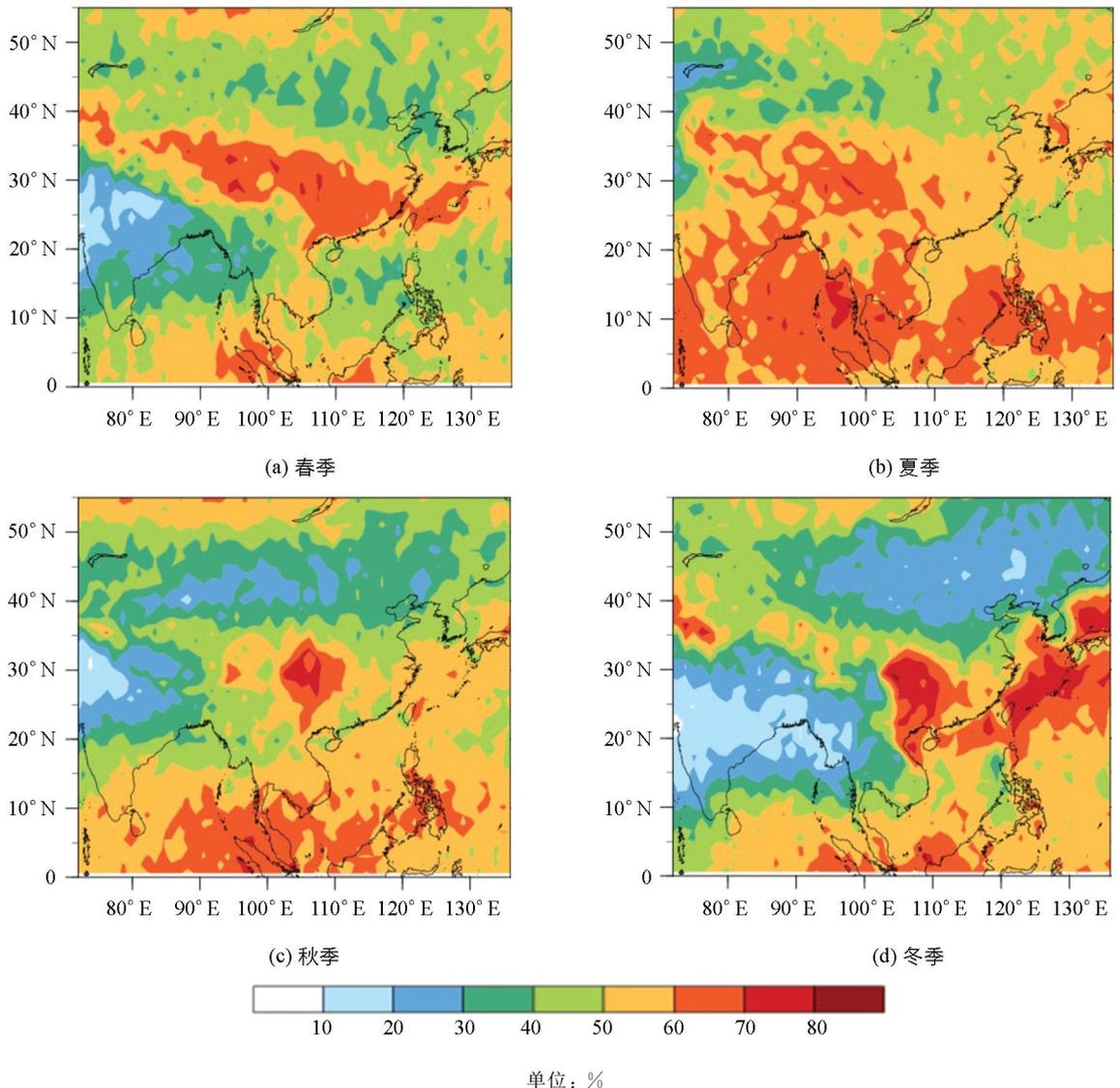


图 7 单层云当季出现概率分布

各地区各季节云层多以单层的高云最为常见,单层的低云较少见,夏季最为明显,中国大陆西南地区中云出现概率高于高云和低云,中国南海北部、中国黄海和日本海冬季则以低云较多出现,夜间云层出现概率与白天分布一致,印度半岛北部夜间高云出现概率多于白天。

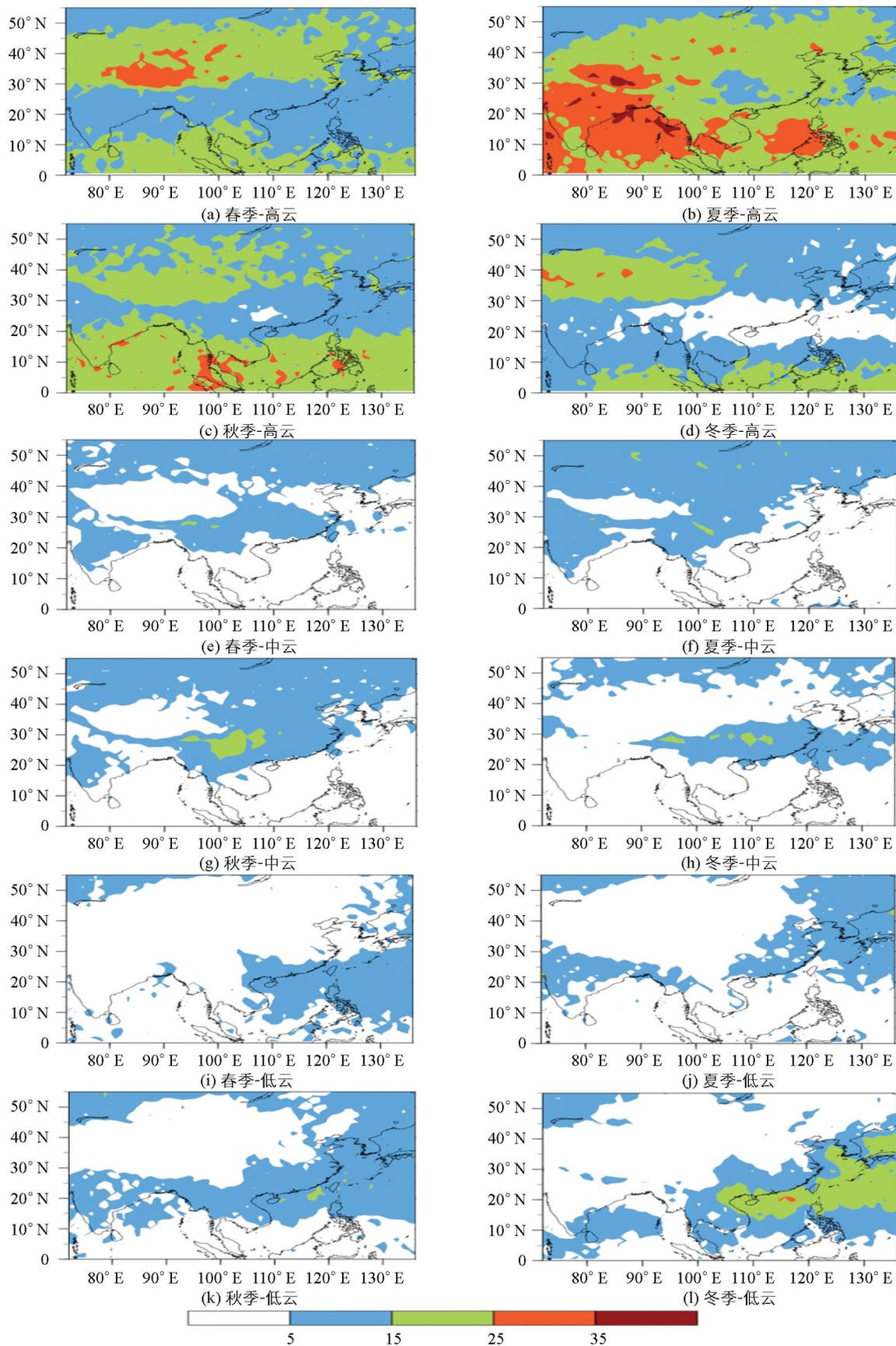


图 8 中国及周边地区不同高度单层云季节出现概率的分布

4 结 论

本文利用 2006 年 6 月至 2016 年 5 月十年内 CALIOP 激光雷达 1 km 云层数据产品, 分析了中国及周边地区云的出现概率, 对不同地区、不同季节、不同高度单层云的出现概率做了对比分析, 得出以下结论:

1) 以 35°N 为界, 云天的出现概率为中国大陆南方多于北方, 其中大值区为四川盆地、云贵高原东北部以及 $0-10^{\circ}\text{N}$, $90-120^{\circ}\text{E}$ 的热带地区, 蒙古高原常年少云; 单层云在中国大陆的四川盆地、西南地区东部和中国东海东部的出现概率超过 60%, 南亚地区全年单层云比多层云较少出现, 尤其是在印度半岛西北部, 单层云占云天的比例低于 30%; 白天青藏高原的总云量及单层云的出现概率略高于夜间, 其余地区昼夜差别不大.

2) 单层的高云出现概率最大, 中云次之, 低云最少. 受地形影响, 云底的海拔大于 6 km 的高云在青藏高原主体出现概率超过 90%. 中国大陆南部中云较常见, 其中西南地区中云出现概率超过 60%, 而西太平洋北部海域则常被低云覆盖, 单层的低云出现概率为 40%~50%. 白天单层的中云出现概率略高于夜间, 其余地区不同高度单层云出现概率均表现出夜间略高于白天的昼夜变化特征.

3) 中国大陆 35°N 以北地区各季节晴空出现概率高于 35°N 以南地区, 云在夏秋两季的出现概率普遍大于春冬两季. 蒙古高原和印度半岛北部单层云少于多层云, 冬季尤其明显; 中国大陆西南地区东部全年单层云出现概率更大; 青藏高原春夏多出现单层云, 秋冬两季则以多层云为主; 海洋上空常年以单层云为主, 尤其春季中国南海、菲律宾以东洋面和冬季中国东海单层云占总云量的比例可超过 70%.

4) 研究区域内, 大部分地区常年都有单层的高云出现. 受青藏高原特殊地形和夏季对流活动旺盛的影响, 其高云出现概率在夏季高于其他季节, 部分地区超过 35%. 除青藏高原以外, 中国大陆地区常年都有单层的中云出现, 尤其在中国西南地区的秋冬两季, 中云的出现概率较大. 单层的低云在海洋上空的出现概率大于陆地上空, 尤其在冬季的中国南海北部、中国黄海和日本海上空, 低云出现概率较大. 夜间不同高度单层云出现概率与白天分布一致, 夜间印度半岛北部的高云出现概率略高于白天.

不同高度云层的出现概率表现出明显的地区差异和季节差异, 采用辐射传输模型有助于揭示其辐射性质, 作者将采用该模型进一步研究云垂直结构对大气辐射平衡的影响.

参考文献:

- [1] RAMANATHAN V, CESS R D, HARRISON E F, et al. Cloud-Radiative Forcing and Climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment [J]. *Science*, 1989, 243(4887): 57-63.
- [2] CURRY J A, SCHRAMM J L, ROSSOW W B, et al. Overview of Arctic Cloud and Radiation Characteristics [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(8): 1731-1764.
- [3] LI R, CAI H K, FU Y F, et al. The Optical Properties and Longwave Radiative Forcing in the Lateral Boundary of Cirrus Cloud [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(10): 3666-3675.
- [4] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射(D)气候学和云的辐射作用 [J]. *大气科学*, 1994, 18(S1): 910-932.
- [5] WINKER D M, PELON J, COAKLEY J A, et al. The CALIPSO Mission: A Global 3D View of Aerosols and Clouds [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010(9): 1211-1229.
- [6] 丁守国, 赵春生, 矿 玉, 等. 近 20 年全球总云量变化趋势分析 [J]. *应用气象学报*, 2015, 16(5): 670-677.
- [7] WANG J, ROSSOW W B. Effects of Cloud Vertical Structure on Atmospheric Circulation in the GISS GCM [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(11): 3010-3029.
- [8] YAN Y, LIU Y, LU J. Cloud Vertical Structure, Precipitation, and Cloud Radiative Effects Over Tibetan Plateau and Its Neighboring Regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(10): 5864-5877.
- [9] CHAKROUN M, BASTIN S, CHIRIACO M, et al. Characterization of Vertical Cloud Variability Over Europe Using Spatial Lidar Observations and Regional Simulation [J]. *Climate Dynamics*, 2016(3): 1-23.
- [10] WINKER D M, HUNT B, MCGILL M. Initial Performance Assessment of CALIOP [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): 228-262.
- [11] CORDOBA-JABONERO C, LOPES F J S, LANDULFO E, et al. Diversity on Subtropical and Polar Cirrus Clouds Properties as Derived from Both Ground-Based Lidars and CALIPSO/CALIOP Measurements [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 183: 151-165.
- [12] BIZARD A, CAILLAULT K, LAVIGNE C, et al. Application of Cloud Occurrence Climatology from CALIOP to Eval-

- uate Performances of Airborne and Satellite Electro-Optical Sensors [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(10): 2406–2416.
- [13] WU D, HU Y, MCCORMICK M P, et al. Global Cloud-Layer Distribution Statistics from 1 Year CALIPSO Lidar Observations [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(5): 1269–1288.
- [14] 吴 东, 夏 佳. CALIPSO 星载激光在全球海洋上空的穿透性统计 [J]. *大气与环境光学学报*, 2011, 6(4): 252–259.
- [15] STEPHENS G L, TSAY S C, STACKHOUSE P W, et al. The Relevance of the Microphysical and Radiative Properties of Cirrus Clouds to Climate and Climatic Feedback [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(14): 1742–1754.
- [16] STEPHENS G L, WEBSTER P J. Clouds and Climate: Sensitivity of Simple Systems [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, 38(2): 235–247.
- [17] LIU Y J, DING Y H. Analysis of Basic Features of the Onset of the Asian Summer Monsoon [J]. *Acta Meteorol Sin*, 2007, 21(3): 257–276.
- [18] WANG Y, WANG C. Features of Clouds and Convection During the Pre- and Post-Onset Periods of the Asian Summer Monsoon [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 123(3): 551–564.

A CALIOP-Based Study of the Spatial and Temporal Features of the Frequency of Cloud Occurrence Over China and Its Surrounding Areas

FENG Xiao, CAI Hong-ke, CHEN Quan-liang,
SUN Yi, WU Zheng-min, TIE Xin

School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology/Plateau Atmospheric and Environment Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China

Abstract: This paper considers cloud vertical structure, which is an important parameter affecting atmospheric radiation, and whose spatial and temporal distribution is a key component of global climate change. The occurrence of clouds over China and its surrounding areas ($0-55^{\circ}\text{N}$, $70-140^{\circ}\text{E}$) has been calculated based on the cloud layer products from CALIOP (the cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization) at 1 km resolution. Cloud occurrence in different regions and seasons, and at different heights has been compared and analyzed. The results show significant regional differences in the frequency of cloud occurrence. Fewer clouds are found over the Mongolian Plateau and the northern Indian Peninsula, with more clouds appearing over the tropical seas and southern China. Cloud cover at night is slightly higher than during the day. Single-layer clouds are more common than multi-layer clouds in most areas, except the Mongolian Plateau and the northern Indian Peninsula. In most areas, high-level cloud accounts for the largest proportion of single-layer clouds; however, mid-level clouds are more common in southern China, and the northern parts of the western Pacific are often covered by low clouds. The occurrence of clouds in summer and autumn is generally greater than in spring and winter, especially over the northern Indian Peninsula, where clouds are most frequent in summer. Single-layer clouds over the Mongolian Plateau and the northern Indian Peninsula occur less frequently than multi-layer clouds, especially in winter. Furthermore, single-layer clouds are common over the eastern part of southwest China all year round. Over parts of the Tibetan Plateau in summer, high clouds account for the largest proportion ($>35\%$) of annual single-layer clouds, as a result of topography and enhanced summer convection.

Key words: CALIOP; cloud vertical structure; cloud occurrence frequency; horizontal distribution; seasonal variation

