

李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征 [J]. 大气科学, 33 (4): . Li Jiming, Huang Jianping, Yi Yuhong, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4):

利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征

李积明^{1, 2} 黄建平¹ 衣育红³ 吕达仁²

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 Science Systems and Applications Incorporated, Hampton, Virginia, USA

摘 要 已有研究表明: 云的垂直结构 (简称 CVS) 是一个在卫星资料反演和气候模式预测中很重要的云特征。本文通过利用美国 2006 年刚发射的卫星 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 所负载的激光雷达 Level 2_05km 的云数据, 研究了东亚地区 (18°N~53°N, 74°E~144°E) 云的垂直分布特征。结果表明: 东亚地区多层云云量在夏季、秋季、冬季、春季分别为 43.6%、29.6%、21.1%、33.3%, 而多层云分布中双层云比例最大。云顶和云底高度除了随季节变化显著外, 还有明显的区域特征。单层云、双层云以及三层云的云顶和云底高度的数据显示, 三层云中最上层的云顶和云底最高, 并始终高于两层云中最上层云的云顶和云底高度。平均云层厚度季节变化不明显, 其值普遍在 0.9~2 km 范围之间。而云层间距同样没有明显的季节和区域变化, 其出现的概率随距离的增大而减小。其中, 间距在 0.35 km 的概率最大, 占到将近 50%。而间距在 1.45 km 附近的概率大约为 15%, 高一点的可达到 20%。

关键词 Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations 云量 云的垂直结构

文章编号 1006-9895 (2009) 04- **中图分类号** P426 **文献标识码** A

Analysis of Vertical Distribution of Cloud in East Asia by Space-Based Lidar Data

LI Jiming^{1, 2}, HUANG Jianping¹, YI Yuhong³, and Lü Daren²

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Science Systems and Applications Incorporated, Hampton, Virginia, USA

Abstract Previous studies show that the cloud vertical structure is an important factor for satellite retrieval and climate simulation. Based on the Level 2_05km cloud data of lidar that is fixed on Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) that was launched by USA in 2006, the authors study the cloud vertical distribution over East Asia (18°N-53°N, 74°E-144°E). The results show that the multilayer cloud fractions in East Asia are 43.6%, 29.6%, 21.1% and 33.3% for summer, autumn, winter and spring, respectively. Two-layer clouds account for the largest proportion in multilayer cloud systems. The altitude of cloud layer also varies with

收稿日期 2008-03-03, 2008-07-24 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575036、40633017

作者简介 李积明, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事星载激光雷达的资料分析研究。E-mail: jiming_li1984@126.com

territories apparently, besides obvious season variation. Analysis of the altitudes of cloud top and cloud base for single-layer clouds, two-layer clouds, three-layer clouds shows that the top layer of three-layer cloud is the highest layer, the second is the top layer of two-layer cloud. Mean thickness of cloud layer and the distance between two consecutive layers in a multilayer cloud system have not remarkable seasonal and regional variations. The average thickness of cloud layer ranges between 0.9 km and 2 km. But the occurrence probability decreases with the increasing of distance between two consecutive layers. The probability that the distance between two consecutive layers is 0.35 km is almost 50%, the probability for the distance about 1.45 km is 15%.

Key words Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, cloud fraction, cloud vertical structure (CVS)

1 引言

国内外对云在地球辐射收支方面的作用及对气候的影响已经研究了多年 (Arking et al., 1991; 汪宏七等, 1994; 赵高祥等, 1994; Wielicki et al., 1995; 刘玉芝等, 2007)。但用大气环流模式以及气候模式进行气候预测时仍然存在很大的不确定性, 其中一个主要原因是对云的描述不够准确。而在描述云的宏观和微观物理特性的众多云参数中, 云的垂直结构 (cloud vertical structures, 简称 CVS) 是能够影响到大气环流, 但又很难确定的一个重要的云宏观特征 (Slingo et al., 1988; Randall et al., 1989; Wang et al., 1998)。研究表明, 云的垂直结构 (CVS) 中云重叠的存在导致 IWP (Ice Water Path) 的分布很难确定 (Huang et al., 2005), 因为, 目前卫星对云的反演都是建立在均一单层云假定基础上的, 然而云的重叠普遍存在于大气中, 它的变化极大地影响着大气加热/冷却率, 并与地面一对流系统辐射平衡有密切的关系。因此云重叠的存在, 对反演云的微物理特性 (如: 云高、光学厚度、云相和粒子半径) 会产生很大的误差 (Tian et al., 1989; Stephens et al., 2004; Huang et al., 2006)。但是, 迄今为止还没有普遍适用的理论来描述不同高度的云之间是如何重叠的, 因此在多层云辐射效应处理上采用了一些云重叠的假定, 如最大重叠、随机重叠以及最大/随机重叠和指数衰减重叠。然而, 数值试验表明大尺度模式对云的垂直分布处理很敏感, 不同的云重叠假定, 对天气气候模式会产生不同程度的影响, 从而使结果产生很大的误差 (Liang et al., 1997; Barker et al., 1999)。例如, Morcrette et al. (2000) 的研究就表明: 不同重叠假定导致的平均出射长波辐射通量的最终差别高达 40 W/m^2 。可见, 云的垂直分布在大尺度模式

中的表达非常困难, 因此要想得到比较准确的云的重叠情况, 解决它们的辐射传输问题, 就必须发展好的探测手段来获得重要的 CVS 参数, 这包括云的层数以及高度分布、云层间距的变化等等。

目前, 虽然探测手段有了较好的改进 (鄧秀书等, 2008), 地面雷达可以得到当地的 CVS 分布, 然而雷达波长大多偏长, 对小云粒子和冰粒子的敏感性较差。此外, 雷达观测站在全球的分布是不均匀的, 尤其是在海洋以及一些无人区域, 这就使得我们不能从常规的地面雷达观测系统中获得全球性的云信息, 而卫星虽然可以给出全球性的资料, 但很难对云层和气溶胶层的垂直结构做全球性的探测, 因而存在着一定的局限性。

为了了解云和气溶胶在气候系统中所扮演的角色, 改进它们在天气气候模式中的作用等, 美国宇航局 (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的卫星 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)。作为地球观测系统 (EOS) 的 A-Train 卫星集群之一, CALIPSO 在 3 年的探测期间, 其数据结果就可以与其他卫星 (如 Cloudsat、Auqa 等) 的探测资料相互补充, 使我们可以更加充分地了解云以及气溶胶的时空分布情况, 精确地量化云和气溶胶的辐射效应。与前几代空基遥感仪器不同的是, 卫星上的激光雷达 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 在不少情况下能够透过薄卷云观测到其下面的云和气溶胶, 因此可以为我们提供气溶胶层和云层的垂直分布, 这也正是卫星 CALIPSO 的优势所在。

本文将采用 NASA 提供的 CALIOP 激光雷达 Level 2_05km 云数据产品对东亚地区 ($18^\circ\text{N} \sim 53^\circ\text{N}$, $74^\circ\text{E} \sim 144^\circ\text{E}$) 云的垂直分布随季节的变化

以及 CVS 参量随高度的变化进行统计分析, 以获得对该地区云的垂直分布的认识, 为改进东亚地区气候模式中云分布与辐射效应估计和提高卫星资料的反演应用提供科学依据。

2 资料说明

CALIPSO 卫星载荷中最关键的仪器是一个双波段 (532 nm 和 1064 nm) 具有正交偏振探测能力的云-气溶胶激光雷达 CALIOP。这个激光雷达不但可以为我们提供 532 nm 和 1064 nm 两个波段在运行轨道上对地方向的总的后向散射垂直廓线, 还可以提供 532 nm 波段的线性退偏垂直廓线, 其中气溶胶层和云层的层顶和层底高度是 CALIOP 提供的最基本的参数。通过对总的后向散射的测量, 我们可以较准确地反演出云和气溶胶的高度以及消光系数廓线。而对退偏振的测量, 有助于区分冰云和水云, 以及鉴别非球形气溶胶粒子。该卫星的另外两个负载 IIR (Imaging Infrared Radiometer) 和 WFC (Wide Field Camera) 的数据, 主要用来反演云的发射率以及有效粒子半径。该卫星轨道周期为 16 天。

CALIPSO 的数据产品根据 EOS 的定义分不同的级别: Level 0~Level 4。现阶段, 可利用的是 Level 1 和 Level 2 的数据。不同仪器的数据为我们提供不同的云参数, Level 1 数据产品中, IIR 提供红外辐射参数, WFC 提供辐射和反射比参数, 而 CALIOP 提供激光雷达消光后向散射参数。Level 2 激光雷达的数据中包括云和气溶胶两种产品。Level 2 云产品有三种水平分辨率: 333 m、1000 m、5000 m, 并提供积分消光后向散射、柱反射比、激光雷达退偏比、云顶和云底高度以及云中高层温度等参数。而 Level 2 气溶胶产品只有一种水平分辨率为 5000 m, 其提供的参数有积分消光后向散射、柱反射比、激光雷达退偏比以及气溶胶的光学厚度等。根据这些参数, 我们可以比较容易确定云层和气溶胶层的高度, 并对它们的光学特性和辐射特性作进一步的研究。本文选用激光雷达水平分辨率为 5 km 的 Level 2 云产品数据, 数据时间范围是: 2006 年 7 月到 2007 年 6 月。各级别的数据参数说明可参阅 CALIPSO 相关数据文件 (<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>)。在这篇文章中我们所用到的参数是: 单个激光廓线上发现的云层数、各云

层云顶和云底高度以及对流层顶高度, 还有一些辅助参数, 譬如经纬度, 表征云层能否透过的标记参数 “opacity flag” (该参数以后均以字母 S 代替) 等。其中参数 S 的值 “0” 表示可以完全透过, “1” 表示不能透过。应该注意的是, 激光观测的一个问题是难以穿透比较厚的云, 因此当遇到比较厚的云 ($S=1$), 譬如深对流云或是具有降水条件的云时, CALIPSO 激光雷达就无法透过这样的云层来对其下方的大气进行观测, 从而会遗漏掉部分的云层和气溶胶层的信息, 因此, CALIPSO 激光雷达能提供 S 等于 0 的云层的云顶和云底的准确高度, 而对于 $S=1$ 的云层只能提供其云顶高度, 而云底高度以及在其下方被遗漏的云层或是气溶胶的信息, 则需要通过地面雷达观测或是其他卫星 (譬如: Cloudsat) 的资料来验证和补充。然而在我们的数据分析中, 发现在东亚地区 $S=1$ 的层出现的频率在整个季节时间范围内并不高, 因此可以肯定的说, 本文的统计结论还是能够比较精确地反映东亚地区云的垂直分布特征的, 不过对于高、中云的统计比低云更有可信度。

3 东亚地区云的垂直分布特征

3.1 不同子区域云量的垂直分布及季节变化

云按照高度可分为高云、中云、低云三种类型。国际云气候计划 (ISCCP) 根据云顶气压和云的光学厚度对云有如下的分类 (李昫英等, 2006), 低云云顶气压 >680 hPa (2 km), 440 hPa $<$ 中云云顶气压 <680 hPa, 高云云顶气压 <440 hPa (6 km)。赵柏林等 (1994) 的研究表明: 不同高度的云有着不同的辐射效应, 高云系统以温室增温效应为主, 而低云系统反射率效应 (即冷却效应) 占主导地位。由于 CALIPSO 可以比较准确的确定它所能探测到的各层云的云顶以及云底高度和云的层数, 因此可以用来计算东亚地区不同季节的云量随高度的变化, 这样我们就可以确定该地区高云和低云所占的比例, 从而有利于定性分析它们对东亚地区地表温度季节变化的影响。

考虑到东亚地区不同的地表 (地形、植被、水体) 所导致热量、水分分布的不均匀性 (陈起英等, 1996), 为了更详细地讨论东亚地区云量随高度的分布, 我们按照《中国自然地理图集》的自然地理区划方法 (《中国自然地理》编写组, 1984) 也把东亚

陆地部分分成了 8 个子区域。它们分别为：东北地区、华北地区、青藏地区、西北地区、内蒙古地区、华中地区、西南地区和华南地区。由于东亚地区也包括了较大面积的海域，因此我们另外多加了一个区域，即东部海域。这样以来，东亚地区就被分成 9 个区域来加以讨论。在设定范围时，西北地区和内蒙古地区还包含了部分的蒙古国区域。

3.1.1 东亚地区不同子区域云量随高度分布的季节变化

本文中 0~20 km 的高度范围平均分为 80 个层，每层厚度为 250 m。对于单个激光雷达廓线，采样激光点数就为 1。如果在雷达廓线的某一个高度层上出现云，则将该楼层有云激光点数加 1，否则为 0。然后对一个季度所有天（包括云天和晴天）在该地区的激光雷达廓线进行累加，就得到该地区不同高度层上总的有云激光点数和总的抽样点数。因此本文的云量指的是在不同的高度层上，该层总的有云激光点数与采样激光点数的比值，是该层在一个季节内所有天的平均云量。

如图 1 给出的就是各子区域云量随高度[为平均海平面之上的高度(下同)]分布的季节变化趋势。如果我们把图 1 中云量随高度变化的曲线与高度坐标轴(纵轴)之间的面积定义为积分云量。则按照 ISCCP 中对云的分类，2 km 以下曲线与纵轴所围成的面积就为积分低云云量，6 km 以上围成的面积为积分高云云量，2~6 km 之间的部分为积分中云云量。按照上面的划分，从图 1 可知，就整个东亚地区而言，积分云量以夏季最高，春秋两季次之，冬季最低。然而图 1 中积分云量虽然随季节变化有所不同，但是除了冬季的个别区域如东北、华中、西南以及华南地区，其积分中云云量大于积分高云云量外，其余基本都是积分高云云量最大，积分中云云量居中，积分低云云量最小。

3.1.2 积分云量的区域变化

夏季，我国华南地区的积分云量最大；华中、西南、青藏以及东部海域地区积分云量次之，其余地区相对较少，其中西北地区的积分云量最少，是华南地区积分云量的 2/5 左右。秋季，我国西南地区的积分云量最大；华南、华中以及东部海域积分云量居中，其余地区偏少，东北以及内蒙古地区的积分云量最小，仅为西南地区的 1/2。冬季，除了西北地区积分云量体现高值外，其他区域都较小，

其中西南、华中、东部海域以及华北地区云量值相对要大。但总体来说，在冬季，这些地区的差异没有夏秋季节那么明显。春季，我国西南、华中、华南地区积分云量最高；东部海域，华北以及东北地区云量次之；西北和蒙古地区积分云量最小。

3.1.3 积分云量的季节变化

从图 1 中可以看出，除了西北地区以外，其他地区的积分云量，都是夏季最高，春季次之，然后是秋季和冬季最小。而西北地区的特别之处表现在，其春季的积分云量是一年四个季节中最大的，冬季高于夏季，秋季最小，这与其他地区的季节变化不同。

比较积分高云云量，积分中云云量以及积分低云云量，可以看出它们也同样存在着明显的区域和季节变化。统计表明，尽管在我国部分地区（譬如：东北、华中、华南以及西南地区）的冬季会出现积分高云云量小于积分中云云量的情况，然而在其他季节，这九个区域的积分高云云量有相同的趋势，基本上都占据了对应地区积分云量的 60% 以上，有的甚至达到了 90%。因此在夏季、秋季以及春季这三个季节，凡积分云量较高的地区，其积分高云云量也很高。而积分低云云量，在夏季和秋季以华中地区最高，华南、东部海域以及东北地区相对小些，青藏高原地区积分低云云量最小，在冬季和春季以华南和东部海域地区最高，而青藏高原、西北以及内蒙古地区积分低云云量最小。

3.1.4 云量随高度变化趋势的南北差异

从图 1 中云量随高度变化的趋势以及各地区对流层顶的高度可以看出：在不同的季节，各子区域高层的云量趋于 0 的高度有明显的分区现象，并且也很容易看出各个地区在不同季节超过对流层的云量情况。譬如夏季的西北、内蒙古以及东北地区在 15 km 高度云量基本为 0，而其他地区在 18 km 附近云量才趋于 0。秋季与夏季类似，只不过秋季的西北、内蒙古以及东北地区在 13 km 附近云量就已趋于 0，而其他地区云量趋于 0 的高度仍然在 18 km 左右。冬季和春季的分区也很类似，只是高度有所不同。冬季，华南、东部沿海、华中以及西南地区云量趋于 0 的高度在 16 km 以上，春季在 17 km 左右。而西北、内蒙古、华北、青藏高原以及东北地区在冬季趋于 0 的高度在 12 km 上下，春季在 13 km。可见，这样的分区具有明显的南北差异，总

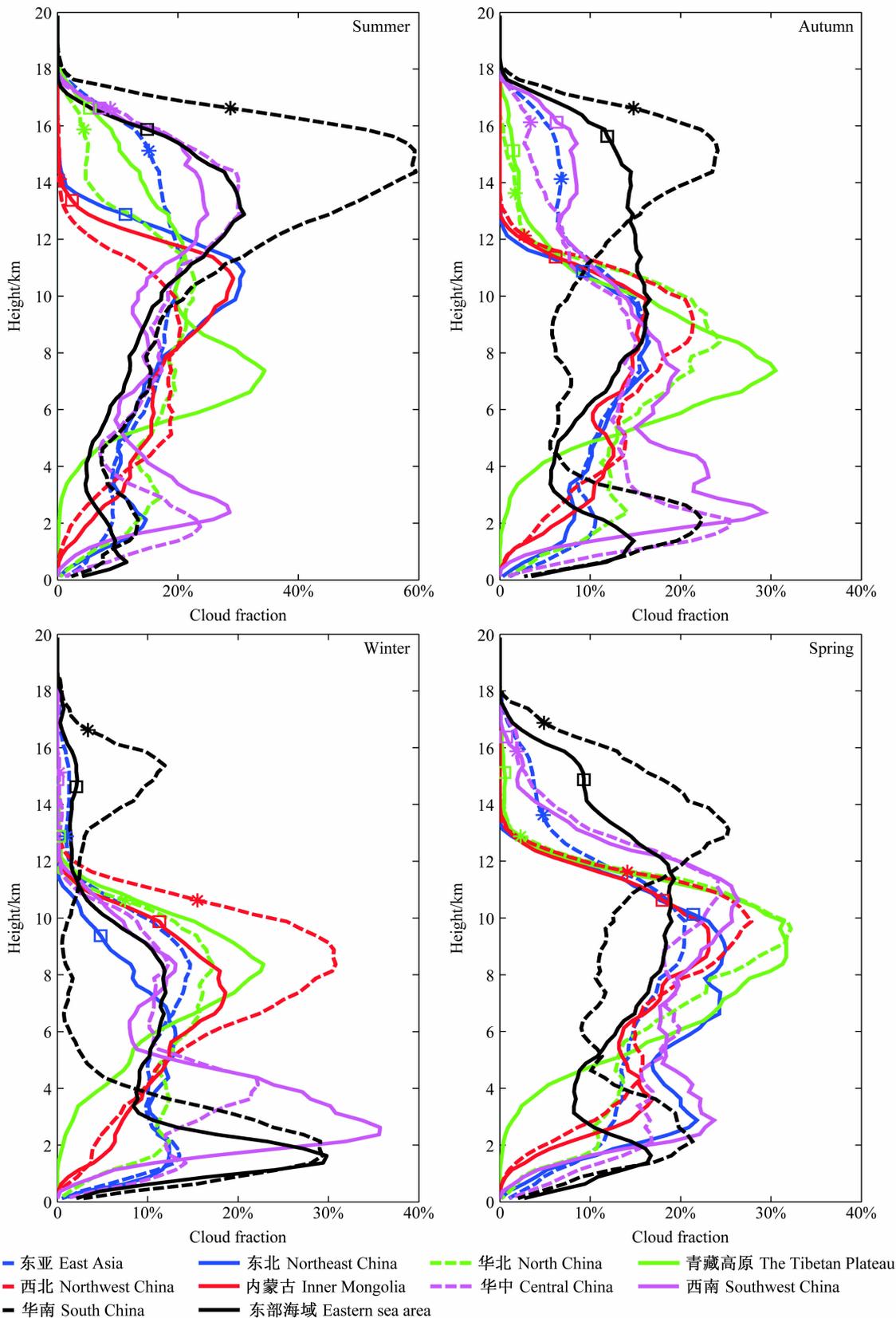


图 1 东亚地区不同子区域云量随高度分布的季节变化。“*”、“□”表示不同地区对流层顶高度
Fig. 1 The seasonal variation of cloud fraction at different heights in different subareas of East Asia. “*” and “□” represent the tropopause heights in different subareas

的来说我国北方的云量和其所达到的高度一般都要比南方低。各区域随高度变化的云量基本都有 2~3 个峰值高度, 低层峰值高度在 2~4 km 之间, 中层峰值高度在 8~10 km 之间, 而高层峰值高度基本在 14~15 km 上下。而且在四个季节中, 东亚各子区域在超过对流层顶的平流层中仍然都有相当大比例的卷云存在, 这是我们以前不容易探测到的情况。

综上所述, 由于积分高云云量占有较大的比重, 所以它的季节变化也最明显, 积分中云云量其次, 而积分低云云量的季节变化最小。比较积分高、中、低云云量。我们总可以看到, 在这四个季节中, 除了冬季的个别地区外, 其他情况均是积分高云云量最大, 积分中云云量居中, 积分低云云量最小, 而且基本都是春, 夏季节较高; 秋、冬季节小些。其中, 我国西藏、西北以及内蒙古地区的积分低云云量在四个季节中都表现出最小值。而在各

个季节中, 平流层中均有一定比例的卷云存在。

3.2 各子区域 CVS 参数的统计

Wang et al. (1998) 通过在 GISS GCM 模式中的 13 个试验 (即改变云的层数和云顶高度等), 总结出了三个重要的 CVS 参数: (1) 最上层云顶位置高度, (2) 有无多层云 (即云是否重叠), (3) 在多层云系统中云层之间的距离。我们利用 CALIPSO 负载的激光雷达 Level 2_05km 的云数据, 对上述三个参数分别做了区域季节统计。

3.2.1 各子区域云层数的季节变化

我们统计了各子区域不同云层数 (以字母 N 表征) 出现的频率, 如图 2 所示。数据表明, 多层云 ($N>1$) 在东亚地区的平均云量具有明显的季节变化, 其中夏季、秋季、冬季、春季分别为 43.6%、29.6%、21.1%、33.3%。夏季, 东亚地区出现晴空 ($N=0$) 的概率较小, 各地区均以云天为主, 其中华中、西南、华南地区的云天多层云概率比较

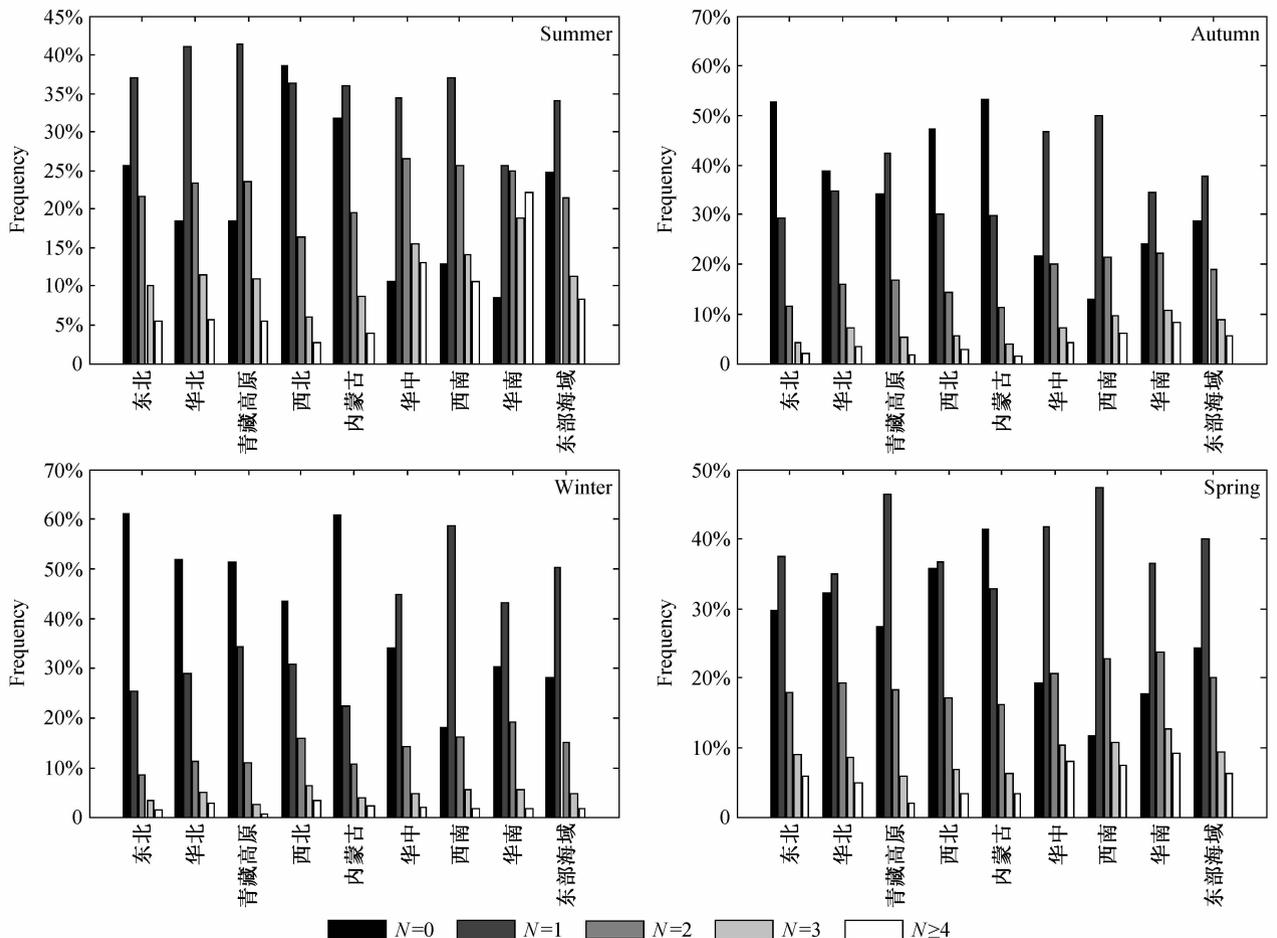


图 2 东亚地区九个子区域在不同季节云层的出现频率

Fig. 2 Cloud layer occurrence frequency in different seasons in nine subareas of East Asia

大,而西北和内蒙古地区则以单层云($N=1$)为主,其他地区单层云和多层云发生的几率相差不大。秋季,除了东北、内蒙古地区晴天比例较大外,其他区域仍然以云天为主,而且单层云的概率很大,仅仅在华南地区出现了多层云概率大于单层云的情况。冬季,东北、华北、青藏高原以及内蒙古地区出现晴空的比例高于云天,而其他地区云天占优,并且均以单层云为主,多层云系统发生的概率不高。春季,东亚各地区出现晴天的概率远小于云天,而且除了华南地区外,其他地区单层云概率仍然大于多层云。因此综合上述情况可知,东亚各地区全年云天概率大于晴空,多层云发生的概率小于单层云,而且多层云系统中主要是双层云($N=$

2),云层发生的概率随着其层数的增加而减少。但是从图2中可以看出,虽然多层云发生的概率小于单层云,然而其发生的频率仍然占有相当大的比例,因此是我们在计算辐射传输中不可忽略的重要因子。

3.2.2 各地区云层高度的季节变化以及云层间距的统计

同样,我们也计算了东亚各地区不同季节单层云、双层云、三层云($N=3$)各云层的云顶、云底的高度和云层的平均厚度。图3是东亚各地区不同层数云层的云顶和云底高度的季节变化图。我们可以从图3清楚地看出东亚各地区云层高度季节变化的情况。数据表明:东亚各子区域不论在哪个季

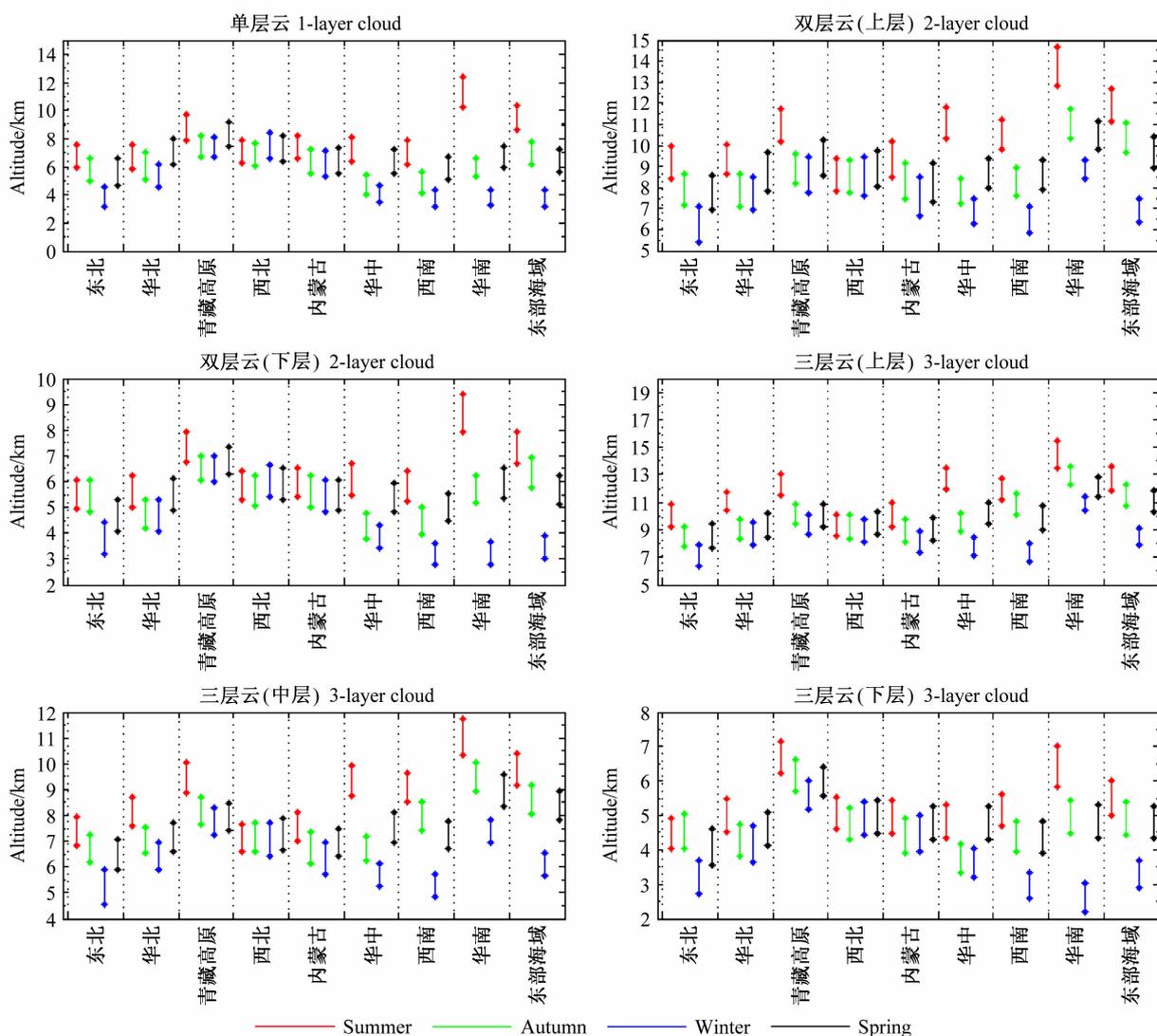


图3 东亚地区九个子区域在不同季节的云层高度

Fig. 3 Altitudes of cloud top and cloud base in different seasons in the nine subareas of East Asia

节,各云层云底平均高度从大到小排列都有如下的规律:(1)三层云上层云云底,(2)双层云上层云云底,(3)三层云中层云云底,(4)单层云云底,(5)双层云下层云云底,(6)三层云最下层云云底。而比较各层云的云顶高度,发现除了华北、西北和青藏地区的春季,西北、内蒙古地区的冬季,以及内蒙古、西北和华南地区的夏季,三层云中云云顶高度略小于单层云云顶高度以外,其他时节云顶高度的大小排列和云底的排列是一致的。从图3中,我们可以看到,虽然在部分地区,有些云层的云顶高度会出现冬季大于夏季的现象,譬如西北地区单层云以及双层云顶,就是冬季高度大于夏季。然而就整个东亚地区的平均情况来看,各云层的云顶和云底高度的季节变化基本上都是夏季最高,冬季最低。

比较单层云的高度:夏季,华南地区最高,平均云顶、云底为12.38 km、10.19 km。华北最低,云顶为7.52 km,云底为5.85 km。其他地区单层云的高度介于这些值之间。冬季,华南地区最低,平均云顶高度为4.3 km,云底为3.3 km。青藏地区云底最高为6.68 km,而平均云顶是8 km。西北地区的单层云云顶高度则是东亚地区最高的,达到8.4 km。

对于在多层云系统中占比重最大的双层云来说,其上层云的高度:夏季,同样是华南地区最高,平均云顶、云底为14.7 km、12.8 km。西北地区最低,为9.35 km、7.85 km。其他地区介于两者之间,云顶基本都在10 km以上,云底都高于8.5 km。冬季,以西南地区最低,平均云顶为7.07 km,云底为5.82 km。华南、西北以及青藏高原地区较高,它们的云顶和云底高度分别都在9.3 km、7.6 km以上,其中以华南地区的云底最高为8.39 km,西北地区的平均云顶最高为9.47 km。而三层云系统中最上层云作为所有云层中最高的云层,夏季,其云顶高度在各地区都高于10 km,云底都高于8.5 km。其中,华南地区最高,云顶15.44 km,云底13.5 km。西北地区最低,仅为10.1 km和8.6 km。而在冬季,还是华南地区最高,东北地区最低,其他地区云顶普遍在8~9.5 km之间。

数据表明:夏季,三层云最下层云的云顶高度基本都在5.5 km上下,云底在4.5 km左右。青藏

地区最高,云顶、云底分别为7.17 km、6.21 km。东北最低,分别为4.92 km、4 km。冬季,华南最低,云顶为3 km,云底为2.2 km。青藏地区最高,云顶为6 km,云底为5.2 km。

综上所述,可以看出东亚地区云层高度的季节变化和区域变化还是很明显的,这体现出东亚各地区对流状况的季节变化和区域变化。就整个东亚地区来看,云层厚度的大小普遍在0.9~2 km范围之内,仅仅在华南地区夏季的单层云厚度超过了2.1 km。其中单层云、双层云上层云以及三层上层云的云厚比较大,明显高于其他云层的厚度。在云厚的季节变化方面,一般都是春夏季云层较厚,秋冬季节薄一些,但在我国西北和内蒙古地区,冬季的云层会更厚一些。不过整体而言,云厚的季节差异不大,而且变化也没有明显的规律性。

云层之间的距离也是我们统计的目标之一。统计结果表明:云层间距的季节变化不显著,各子区域之间的差异也不明显。一年四个季节中,云层间距以0.35 km上下(范围在0~0.4 km之间)的概率最大,基本都在45%以上,部分地区甚至可达到60%。间距在1.45 km附近(范围在1.42~1.47 km之间)的概率大约为15%,高一点的可达到20%。云层间距在2.45 km附近的概率也比较大,除个别地区外,概率基本都在10%左右。可见大部分情况下,云层间距发生的频率都是随间距的增大而减小。然而,在我国华中、西南、华南以及东部海域地区的云层间距达到10 km以上的概率会比9 km的大,华南地区冬季云层间距在10 km以上的概率尤其明显,其概率可达36%,秋季概率为12%。

4 结论

通过用CALIPSO卫星负载的激光雷达Level 2₀₅ km的云数据,我们分析了东亚地区云层的垂直分布情况,重点讨论了CVS参数在各子区域的季节变化趋势,并得到以下的结论:

整个东亚地区平均多层云云量具有明显的季节变化。其值在夏季、秋季、冬季、春季分别为43.6%、29.6%、21.1%、33.3%。可以说东亚绝大部分地区全年云天概率大于晴空,单层云大于多层云,但多层云也有相当大的出现概率,因此它的作用是不可忽视的。并且多层云发生的概率随着层数的增加而减小,其中主要以双层云为主。

从积分云量来看,除了我国西北地区冬季积分云量大于夏季以外,东亚其他的子区域基本都有相同的变化趋势,即积分云量以夏季最高,春秋两季次之,冬季最低。其中积分高云云量在各个季节和区域占的比重总是最大的,而积分低云云量比重始终最小。而在各个季节中,平流层中均有一定比例的卷云存在。

在云层高度方面,东亚各子区域不论在哪个季节,各云层云底平均高度从大到小排列都有如下的规律:(1)三层云最上层云云底,(2)双层云上层云云底,(3)三层云中层云云底,(4)单层云云底,(5)双层云下层云云底,(6)三层云最下层云云底。而云顶高度,除了个别地区有些季节会出现三层云的中层云云顶高度略低于单层云云顶高度以外,其他季节云顶高度的大小排列和云底的排列是一致的。云层厚度的季节变化不显著,其值普遍在 0.9~2 km 范围内,并且单层云的厚度一般都是最大的,而在多层云系统中,上层云的厚度也明显大于下层云。

云层间距的季节变化也不明显,各子区域的差异也不大。总体来说,云层间距发生的频率基本是随间距的增大而减小,只有部分地区的个别季节 10 km 以上间距发生概率会稍微变大。其中以华南地区冬季云层间距在 10 km 以上的概率尤其明显,其概率可达 36%,夏季概率为 12%。其他地区云层间距在 0.35 km 上下的概率最大,基本都在 45% 以上。间距在 1.45 km 附近的概率大约为 15%,高一点的可达到 20%。

本文所得到的结果是 CALIPSO 激光雷达 1 年的统计分析结果。由于在此之前没有任何手段能获得如此完整的信息,因此这个结果对于了解云层分布的统计特征是非常有意义的。它对于理解云在气候中的辐射作用提供了定量可用的垂直分布信息。对于评估云在大气环流中的作用与验证模式结果均十分有价值。当然也要注意由于激光雷达光束透过厚云层的能力十分有限,本文的结论对于高中云应该比对低云更有可信度,至于低云,特别是低云底部高度的统计显然还需要验证。

参考文献 (References)

Arking A. 1991. The radiative effects of clouds and their impact on

- climate [J]. *Bull. Amer. Meteor. Sci.*, 72: 795–813.
- Barker H W, Stephens G L, Fu Q. 1999. The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125: 2127–2152.
- 陈起英, 俞永强, 郭裕福. 1996. 温室效应引起的东亚区域气候变化 [J]. *气候与环境研究*, 1 (2): 113–123. Chen Qiyang, Yu Yongqiang, Guo Yufu. 1996. Climatic change in East Asia induced by greenhouse effect [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1 (2): 113–123.
- Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. 2005. Advanced retrievals of multilayered cloud properties using multispectral measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D15S18, doi: 10.1029/2004JD005101.
- Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. 2006. Determination of ice water path in ice-over-water cloud systems using combined MODIS and AMSR-E measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2006GL027038.
- 李响英, 宇如聪. 2006. AREM 模拟云参数与卫星观测的比较研究 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1198–1206. Li Yunying, Yu Rucong. 2006. Comparison of cloud parameters between AREM simulation and satellite retrieval [J]. *Chinese Journals of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1198–1206.
- 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 2007. 一维辐射-对流模式对云辐射强迫的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 31 (3): 486–494. Liu Yuzhi, Shi Guangyu, Zhao Jianqi. 2007. A study of the radiative forcing of clouds by using a one-dimensional radiative convective model [J]. *Chinese Journals of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (3): 486–494.
- Liang X Z, Wang W C. 1997. Cloud overlap effects on general circulation model climate simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D): 11039–11047.
- Morcrette J J, Christian Jakob. 2000. The response of the ECMWF model to changes in the cloud overlap assumption [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 1707–1732.
- 鄒秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2008. 大气探测高技术及应用研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 867–881. Qie Xiushu, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2008. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches [J]. *Chinese Journals of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 867–881.
- Randall D A, Harshvardhan, Dazlich D A. 1989. Interactions among radiation, convection, and large-scale dynamics in a general circulation model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46: 1943–1970.
- Slingo A, Slingo J M. 1988. The response of a general circulation model to cloud longwave radiative forcing. Part I: Introduction and initial experiments [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114: 1027–1062.
- Stephens G L, Wood N B, Gabriel P M. 2004. An assessment of the parameterization of subgrid-scale cloud effects on radiative transfer. Part I: Vertical overlap [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61: 715–732.

- Tian L, Curry J A. 1989. Cloud overlap statistics [J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 9925–9935.
- 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 (增刊): 910–932. Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. 1994. Cloud and radiation I: Cloud climatology and radiative effects of clouds [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 18 (Suppl.): 910–932.
- Wang Junhong, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *J. Climate*, 11: 3010–3029.
- Wielicki B A, Cess R D, King M D. 1995. Mission to planet Earth: Role of clouds and radiation in climate [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76: 2125–2153.
- 赵柏林, 彭欣荣, 朱元竟. 1994. 卫星遥感东亚地区云辐射与气候 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 30 (3): 361–374. Zhao Bolin, Peng Xinrong, Zhu Yuanjing. 1994. Satellite observation of cloud radiation on climate in East Asia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 30 (3): 361–374.
- 赵高祥, 汪宏七. 1994. 云和辐射 (II) 环流模式中的云和云辐射参数化 [J]. *大气科学*, 18 (增刊): 933–958. Zhao Gaoxiang, Wang Hongqi. 1994. Cloud and radiation, II: Cloud and cloud radiation parameterizations in general circulation models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 18 (Suppl.): 933–958.
- 《中国自然地理》编写组. 1984. 中国自然地理 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 148–149. Chinese Nature and Geography Compiled Group. 1984. *Chinese Nature Geography* (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 148–149.