

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188.
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.

东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究

彭杰^{1,2} 张华³ 沈新勇¹

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 本文利用卫星 CloudSat 同时结合了与其同轨道的卫星 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 2007 至 2009 年 3 年的观测资料, 将东亚地区划分为六个研究区域, 着重研究了东亚地区云垂直分布的统计特征。结果表明: 东亚地区不同高度的云量之和具有明显的季节变化趋势, 夏季最大, 春秋次之, 冬季最小。海洋上空的单层云量最大值出现在冬季, 而在陆地上空则出现在夏季。从云出现概率来看, 东亚地区单层云出现的概率在春、夏、秋、冬季节依次为 52.2%, 48.1%, 49.2% 和 51.9%, 而多层 (2 层和 2 层以上) 云出现的概率在春、夏、秋、冬季节分别为 24.2%, 31.0%, 19.7%, 15.8%。云出现的总概率和多层云出现的概率, 在六个区域都呈现出夏季最大, 冬季最小; 对 4 个季节都呈现出东亚南部比东亚北部大, 海洋上空比陆地上空大的特点, 表明云出现的总概率的季节变化主要由多层云出现的概率的变化决定。东亚地区云系统中最高层云顶的高度, 在夏季最高, 为 15.9 km, 在冬季最低, 为 8.2 km; 在东亚南部和海洋上空较高, 平均为 15.1 km; 在东亚北部较低, 平均为 12.1 km, 且呈现东亚南北部之间差异较大的特点。东亚地区云系统的云层厚度基本位于 1 km 到 3 km 之间, 且夏季大, 冬季小; 对同一季节, 不同区域的云层厚度差别较小; 当多层云系统中的云层数目增加时, 云层的平均厚度减少, 且较高层的云层平均厚度大于较低层的。云层间距的概率分布基本呈单峰分布, 出现峰值范围的云层间距在 1 到 3 km 之间, 各区域之间没有明显差别, 季节变化也不大。本文的研究为在气候模式中精确描述云的垂直结构提供了有用的参数化依据。

关键词 云垂直结构 云量 CloudSat 云观测卫星

文章编号 1006-9895(2013)01-0091-10

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188

Analysis of Vertical Structure of Clouds in East Asia with CloudSat Data

PENG Jie^{1,2}, ZHANG Hua³, and SHEN Xinyong¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Statistical characteristics of the vertical structure of clouds over East Asia are obtained by dividing the area into six regions and analyzing the 2007, 2008, and 2009 datasets from the cloud observing satellite CloudSat and Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO). Results indicate that the total cloud

收稿日期 2011-10-13, 2012-06-29 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究计划项目 2011CB403405, 国家自然科学基金项目 41075056 和科技部公益性行业(气象)科研专项项目 GYHY201106022

作者简介 彭杰, 男, 博士研究生, 主要从事卫星遥感资料分析、云-辐射相互作用研究。E-mail: pjay163@163.com

通讯作者 张华, E-mail: huazhang@cma.gov.cn

amount exhibits a distinct tendency of seasonal change at various altitudes, reaching a maximum in summer and minimum in winter. The maximum value of single-layer cloud amount appears in winter above the ocean and in summer above land. The frequency of occurrence of single-layer clouds in East Asia is 52.2%, 48.1%, 49.2%, and 51.9% for spring, summer, autumn, and winter, respectively; that for multilayer clouds is 24.2%, 31.0%, 19.7%, and 15.8%, respectively. For all six regions, the frequency of occurrence for both types of clouds is highest in summer and lowest in winter. In all four seasons, cloud frequency in the southern region of East Asia is higher than that in the northern region and is greater above the ocean than that above land. These results indicate that variance in the frequency of occurrence for total clouds is decided by that of multilayer clouds. Cloud top height of the highest cloud layer in East Asia reaches a maximum in summer and minimum in winter at 15.1 km and 8.2 km, respectively. The difference in levels is higher in the southern region above the ocean than in the northern region above land at 15.1 km and 12.1 km, respectively. In addition, the thickness of the cloud layer ranges from 1 km–3 km and is largest in summer and smallest in winter; little difference appears among the regions. Moreover, when the number of cloud layers in the multilayer cloud system increases, the mean cloud thickness decreases, and the mean thickness of the higher cloud layer is larger than that of the lower. The intervals among cloud layers show single peak distribution with the peak value appearing between 1 km and 3 km; differences among regions and seasons are minimal. This work supplies useful information for accurate parameterization of vertical cloud structures.

Keywords Cloud vertical structure, Cloud amount, CloudSat, Cloud observing satellite

1 引言

到目前为止,云仍然是气候模拟和气候变化研究中最大的不确定因子之一。首先,云本身在地气系统辐射平衡中扮演着双重角色,一方面,云将到达大气层顶的太阳短波辐射反射回太空,对地气系统起冷却作用,另外一方面,地表受到太阳辐射加热后放射出的长波辐射又被大气中的云截获,对地气系统起加热作用;其次云和气溶胶之间的相互作用导致的直接和间接辐射强迫的气候效应十分明显,但目前对于此作用的科学理解水平还很低(Forster et al., 2007)。因此,准确模拟云在气候变化中的作用是目前大尺度天气气候模式中的难点和热点问题,而这其中的重点之一是如何准确模拟云在辐射收支方面的作用及其对气候的影响。对于云对气候的反馈作用模拟的差异,主要取决于对云辐射强迫模拟的差异,是导致不同的大气环流模式之间模拟结果差异的重要原因之一(Cess et al., 1989, 1990)。云的辐射强迫为某一给定大气的净太阳辐射通量(向下通量减去向上通量)与假定云不存在时同一大气的净太阳辐射通量之差(石广玉, 2007),其值表征云对于地球气候系统能量收支平衡的影响,提高对云辐射过程和云的辐射强迫模拟的准确度成为提高气候模式模拟精度的关键。国内外在该领域已经开展了多年的研究(Arking, 1991; 赵高祥和汪宏七, 1994; Wielicki et al., 1995; 刘玉芝等, 2007)。由于对于云结构的精确描述目

前仍然是大尺度气候模式中的难点,因此在气候模式描述云辐射过程中,云的垂直分布的不确定性是研究云对气候影响的最大障碍之一(Barker et al., 1999)。地表观测表明,云层常常是重叠的(Wang et al., 2000)。多层云的重叠问题对大气和地表的辐射加热(或冷却)率有很大影响。而云的加热率不仅影响云的发展,也对大气和地表的辐射收支平衡产生重要影响(荆现文等, 2009; 张华和荆现文, 2010)。例如,到达地面的辐射通量在晴空大气环流模式(General circulation model)之间的差别仅为几 W m^{-2} ,而有云大气在大气环流模式之间的差别却高达 100 W m^{-2} (Barker et al., 1999)。

在气候模式中,处理云在垂直方向上的重叠时采取了不同的假设,如最大重叠,随机重叠以及最大/随机重叠和指数衰减重叠。而 Liang and Wang (1997) 提出了一个处理多层云重叠的“马赛克”(MOOSAIC)方法,在大气环流模式辐射参数化中显式地考虑云的垂直相关,结果表明,大气环流模式对云的垂直重叠的处理非常敏感,与假定随机云重叠的结果相比,显式处理云相关的大气环流模式结果具有非常不同的大气辐射加热率分布,所导致的气候影响非常大:热带和副热带对流层的中高层大气在全年变暖超过 3°C ,两极夜间北半球平流层变得更暖,最大超过 15°C 。

为了在大气环流模式中给出准确描述云的重叠的参数化方案,就需要用观测资料提供云的空间分布特征作为基础和验证。研究表明:云的垂直结

构 (Cloud Vertical Structures) 是非常重要的云宏观特征 (Slingo and Slingo, 1988; Randall et al., 1989; Wang and Rossow, 1998), 这一结构主要包含云层数目和间距, 以及它们的高度分布等。以往的卫星和地面观测提供的云量垂直分布的信息非常有限 (Wang et al., 2000), 而在 2006 年 4 月美国航天航空局 (NASA) 成功发射了太阳极轨云观测卫星 CloudSat, 其上所搭载的 94 GHz 毫米波云观测雷达垂直分辨率非常高, 为我们研究云的垂直结构提供了丰富的观测资料。

CloudSat 资料已经被用于研究东亚地区的云垂直结构。比如: Luo et al. (2009) 采用 14 个月的 CloudSat 观测资料对比分析了东亚地区和印度季风区的云量和云垂直结构及其季节变化; 汪会等 (2011) 采用 3 年 (2006 年 9 月至 2009 年 8 月) 的 CloudSat 资料进一步对比分析了东亚季风区、印度季风区、西北太平洋季风区和青藏高原地区的云量和云垂直结构及其季节变化特征, 还进一步分析了亚洲季风区低云量的分布及其与对流层低层稳定性的相关。

本文运用统计的方法, 对 CloudSat 卫星观测资料加以分析和研究, 不仅将东亚地区作为一个整体进行研究, 而且将东亚地区分为 5 个子区域分别进行分析, 在 Luo et al. (2009) 和汪会等 (2011) 研究结果的基础上进一步细化了对东亚地区云的垂直分布特征的理解, 为今后在气候模式中精确描述该地区云的垂直结构提供一定的参考依据。

2 卫星观测数据描述与处理

本文采用了 CloudSat 所搭载的 94 GHz 毫米波云廓线雷达 (CPR) 提供的观测资料, 分析了 2007~2009 年 3 年的资料, 用 3 月、4 月和 5 月份的平均结果表征春季, 6 月、7 月和 8 月表征夏季, 9 月、10 月和 11 月表征秋季, 12 月、1 月和 2 月表征冬季。CloudSat 卫星是 2006 年 4 月 28 日 (UTC) 由美国航天航空管理局 (NASA) 成功发射入太空的太阳极轨气象观测卫星, 几周后开始获得相关数据。CloudSat 每根轨道运行时间约为 2 小时, 进行约 37081 次扫描, 扫描星下点为 1.1 km (沿轨道运行方向) $\times$ 1.3 km (垂直轨道运行方向) 的区域, 垂直方向扫描 30 km, 并分为厚度为 0.24 km 的 125 层, 扫描信息以 1.1 km $\times$ 1.3 km $\times$ 0.24 km 的扫描格点为单位储存, 目前已经反演出多种 2 级产品 (参

见 http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/cloudsat_documentation/CloudSat_Data_Users_Handbook.pdf [2012-01-09])。

本文工作主要使用了二级产品中 2B-GEOPROF 和 2B-GROPROF-Lidar (参见网站 <http://cloudsat.cira.colostate.edu/dataSpecs.php> [2012-01-04]), 前者信息来自于 CloudSat 卫星上搭载的 94 GHz 毫米波雷达, 后者信息同时整合了 CloudSat 搭载的毫米波雷达的信息和与 CloudSat 同轨道, 运行时差只有 15 秒的 CALIPSO 卫星搭载的激光雷达的信息, 结合两者可同时发挥毫米波雷达和激光雷达的优点。在判断扫描格点中是否存在云时, 我们用到了 2B-GEOPROF 产品中的 CPR_Cloud_mask 和 Radar_Reflectivity 数据以及 2B-GEOPROF-Lidar 中的 CloudFraction 数据。其中, CPR_Cloud_mask 的数据说明见表 1。而 Radar_Reflectivity 中所含的信息是雷达的反射率因子的对数表现值, 单位是 dBZ, CPR 的最小可探测信号大约为 -30 dBZ; CloudFraction 所包含的数据是经过激光雷达订正过的扫描格点中存在云的部分的百分比。Luo et al. (2009) 和 Barker (2008a) 在各自工作中对于确定扫描格点中是否存在云同样使用了上述 3 部分数据, 但是使用了不同的阈值法。前者在满足 Radar_Reflectivity ≥ -28 dBZ 的前提下, 将扫描格点的信息整合为厚度为 1 km 的垂直层, 假如组成 1 km 的雷达扫描格点中格点满足 CPR_Cloud_mask ≥ 20 , 即认为扫描格点云量为 100%, 否则扫描格点的云量等同于 CloudFraction 的值; 后者则在满足 Radar_Reflectivity ≥ -30 dBZ 的前提下, 采用只有同时满足 CPR_Cloud_mask ≥ 20 和 CloudFraction $\geq 99\%$ 时, 才认定该扫描格点云量为 100%, 否则云量为 0。两者比较, 前者的方法认为只要 CloudSat 上搭载的毫米波雷达和 CALIPSO 搭载的激光雷

表 1 CPR_Cloud_mask 数据值说明
Table 1 Values assigned to Cloud_mask Field of CloudSat data

值	含义
0	没有探测到云
1	损坏的数据
5	地面噪音
5~10	弱探测信号
20~40	探测到有云存在, 值越大, 探测越准

达二者有其一探测到存在云,就认为扫描格点存在云,而后者认为只有毫米波雷达和激光雷达同时探测到云才认为扫描格点存在云,前者会比后者高估云存在的概率,而本文在两种方法的基础上选取了折中的阈值法,即,当每个扫描格点的数据满足 $\text{Radar_Reflectivity} \geq -30 \text{ dBZ}$ 和 $\text{CPR_Cloud_ask} \geq 20$; 或者 $\text{Radar_Reflectivity} \geq -30 \text{ dBZ}$ 和 $\text{CPR_Cloud_mask} \leq 20$ 和 $\text{CloudFraction} \geq 99\%$ 时,我们认为该扫描格点有云存在,否则扫描格点无云存在。

3 研究方法

图 1 给出的是本文研究的区域的示意图。我们研究了图 1 所示的整个东亚地区(记为 Total),同时因为东亚地区属季风气候,不同区域具有不同的气候特征。为了比较细致的研究它们之间的差别,我们参照 1995 年版《中国自然地理》(赵济, 1995)中的划分方法,按照图 1 所示将东亚的主要区域划分为西北地区(以下简称 Nw)、青藏高原区(以下简称 Tibet)、北方地区(以下简称 North)、南方地区(以下简称 South)和东部海域(以下简称 E.O) 5 个部分,分别进行研究。综合一共得到 6 个区域的结果。

下面以 Tibet 和 2007 年 1 月为例说明本文的计算思路。CloudSat 的资料是以轨道为单位储存,因

此本文首先选取出 2007 年 1 月中运行的所有轨道,接着根据扫描廓线的经纬度依次提取出这些轨道经过 Tibet 的部分,并将此部分以 50 根廓线为单位划分为子区域(下文简称子域),然后判断出子域中的每个扫描格点是否存在云。接着计算出每个子域内不同高度上存在云的格点数据与这一高度扫描格点总数(50)的比值,近似的认为此值为该子域在不同高度上的云量。需要特别说明的是,这里的近似是因为气候研究中通常定义的云量是指某一时刻观测到的天空中存在云的面积与天空面积的比值,是单一时刻的观测量,而由于 CloudSat 每 0.16 秒完成一次单根廓线的扫描,因而将此处由 50 根廓线所组成的子域中存在云的扫描格点与全部扫描格点的比值近似为云量,也就是将 50 个时刻观测到的值近似为单个时刻观测到的值,但是由于完成 50 根廓线的扫描只需要 8 秒钟,因此这里的近似处理相当于将 8 秒内 50 个时刻的观测数据近似为只观测了单个时刻,而该单个观测过程需要 8 秒时间。其次,以月为单位计算出经过 Tibet 所有子域不同高度云量的算术平均值,这一平均值就代表 Tibet 区域在 2007 年 1 月不同高度上的云量平均值。然后,我们计算出 2007 年 1 月经过 Tibet 的所有廓线中单层云和多层云(2 层及 2 层以上)的数目(廓线中存在云的扫描格点在垂直方向连续的层数定义为此廓线中的云层的数目),同样以月为单

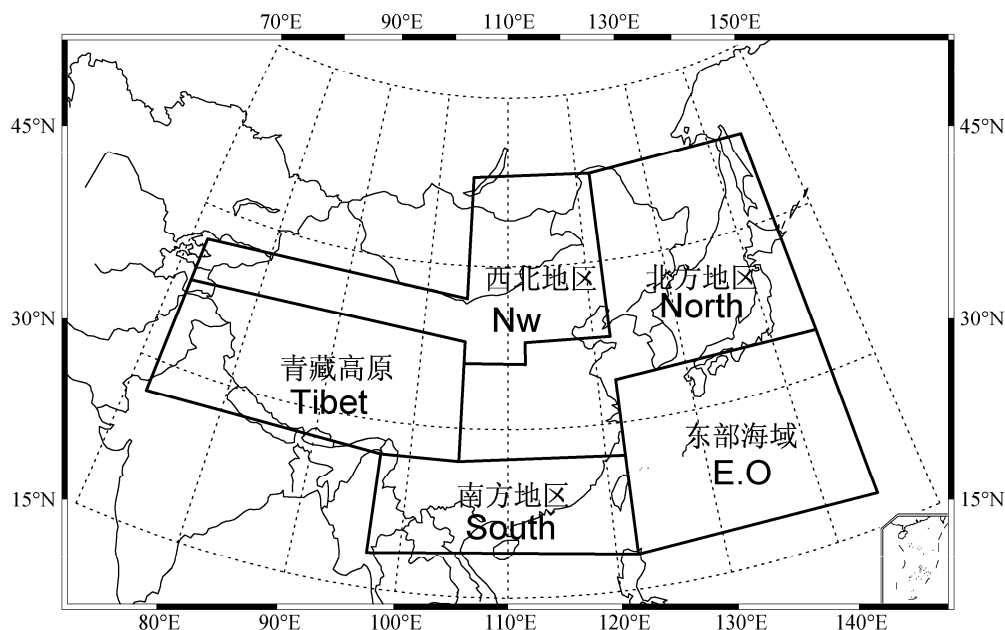


图 1 研究区域划分示意图

Fig. 1 The schematic of regional divisions in this work

位计算出这些值与扫描廓线总数的比值，这一比值在本文就代表 Tibet 区域在 2007 年 1 月中的单层云和多层云的出现概率；最后计算出每个廓线中云层的云顶/云低高度，同样以月为单位计算出这些值与扫描廓线总数的比值，这一比值在本文就代表 Tibet 区域在 2007 年 1 月中平均的云顶/底高度最后，计算出所有区域在 3 年共 36 个月中的平均值之后，再平均出春夏秋冬 4 个季节的结果，其中春季为 2007 年至 2009 年 3 月、4 月和 5 月共 9 个月的平均值，夏季为 6、7 和 8 月的平均值，秋季为 9、10 和 11 月的平均值，冬季为 12、1 和 2 月的平均值，同时计算了每 9 个月平均值组成的集合的标准差。表 2 给出了 6 个区域 4 个季节统计的扫描廓线数。

表 2 6 个区域 4 个季节统计的扫描廓线数
Table 2 The number of calculated pixels in 6 regions for four seasons

	Total	Nw	North	South	Tibet	E.O
春季	5103483	982104	713878	663855	699305	1044010
夏季	5637991	1071109	779817	714631	763817	1170591
秋季	5518669	1055143	779995	713529	744365	1159807
冬季	4888235	911190	676144	617947	650407	994643

4 结果分析与讨论

4.1 云量的垂直分布及其季节变化

图 2（见文后彩图）分别给出 6 个研究区域 4 个季节不同高度的平均云量，误差棒表示该高度上的标准差。从垂直方向上云量峰值的季节分布来看，E.O 区域与其他 5 个以陆地下垫面为主的区域有着明显的差别，E.O 垂直方向上面云量峰值的最大值出现在冬季，达到了 0.31，春秋季次之，最小值出现在夏季，为 0.21；而其他 5 个区域的云量峰值的最大值都出现在夏季，分别为 Total: 0.23; Nw: 0.23; North: 0.24; South: 0.24; Tibet: 0.35。Total 区域、North 区域和 South 区域峰值的最小值都出现在秋季，依次为 0.16、0.19 和 0.18；而 Nw 区域和 Tibet 区域的最小值都出现在冬季，依次为 0.16 和 0.19。从误差棒表示的标准差可以看出，总体而言，图中所示季节的平均值对于 3 年 9 个月的平均状态有较好的代表性，但不同区域 9 个月的变化幅度各不相同，Tibet、North 和 E.O 变化相对比较大，标准差最大值依次达到了 0.1、0.06 和 0.06，而其他 3 个区域变化较小，标准差分别为

Total: 0.03, NW: 0.05 和 South: 0.04。

4.2 东亚地区云垂直结构参数的统计

Wang and Rossow (1998) 通过在戈达德空间研究所 (Goddard Institute of Space Studies) 的大气环流模式 (GISS GCM) 中的 13 个试验，总结出了几个重要的云垂直结构参数：(1) 云是否重叠（即有无多层云）；(2) 多层云系统中云层之间的距离；(3) 最上层云顶位置高度。我们通过对 CloudSat 卫星资料的分析，统计了东亚地区的上述三个云垂直结构参数。图 3 分别给出四个季节在 6 个研究区域发生多层云的平均概率，误差棒同样表示标准差。因为在统计的过程发现云层数目超过 5 层的概率非常小，基本在 0.001 左右，因此，图中只给出了存在云的总概率和 1 至 4 层云出现的概率。整体而言，东亚地区单层云出现的概率在春夏秋冬分别为 52.2%、48.1%、49.2%和 51.9%，在冬春季最大，秋季次之，夏秋最小，而多层（2 层和 2 层以上）云出现的概率在春夏秋冬分别为 24.2%、31.0%、19.7%和 15.8%，在夏季最大，春秋季次之，冬季最小，与出现云的总概率一致，与汪会等（2011）的研究结果中对东亚季风区的研究结果相符。

从存在云的总概率来看，4 个季节的区域差异都一致地呈现出 South 区域最大，春夏秋冬依次为 84.5%、89.3%、81.6%和 78.5%，Total 和 E.O 次之，而后是 North 区域，最小的是 Nw 区域，春夏秋冬分别为 70.3%、68.6%、55.5%和 65.6%。反映出南方地区出现云的概率大，而北方地区则相对较小；海洋上空出现云的概率大，而陆地上空出现云的概率小的特点。由于 Tibet 区域的情况比较特殊，夏季作为热源，加上季风带来的充足水气，存在云的概率超过了 E.O，仅次于 South 区域，而秋冬季又小于 E.O 地区和 Total 区域，在春季与两者持平。比较不同季节之间的差异，除了 Nw 之外的 5 个区域出现云的总概率都呈现出在夏季最大，春秋季次之，冬季最小的特征。

以上结果表明，东亚地区南方的多层云比北方多，海洋上空的云层比陆地上空的多；且与之前的研究 (Luo et al., 2009; 汪会等, 2011) 结果相一致地表现出夏季多云、冬季少云，夏季多云主要是因为多层云的概率增加所致。

为了研究整个东亚地区以及 5 个子区域的云层高度和厚度，对本文得到的 CloudSat 卫星的观测数据进行统计分析，分别按照 6 个研究区域和 4 个季

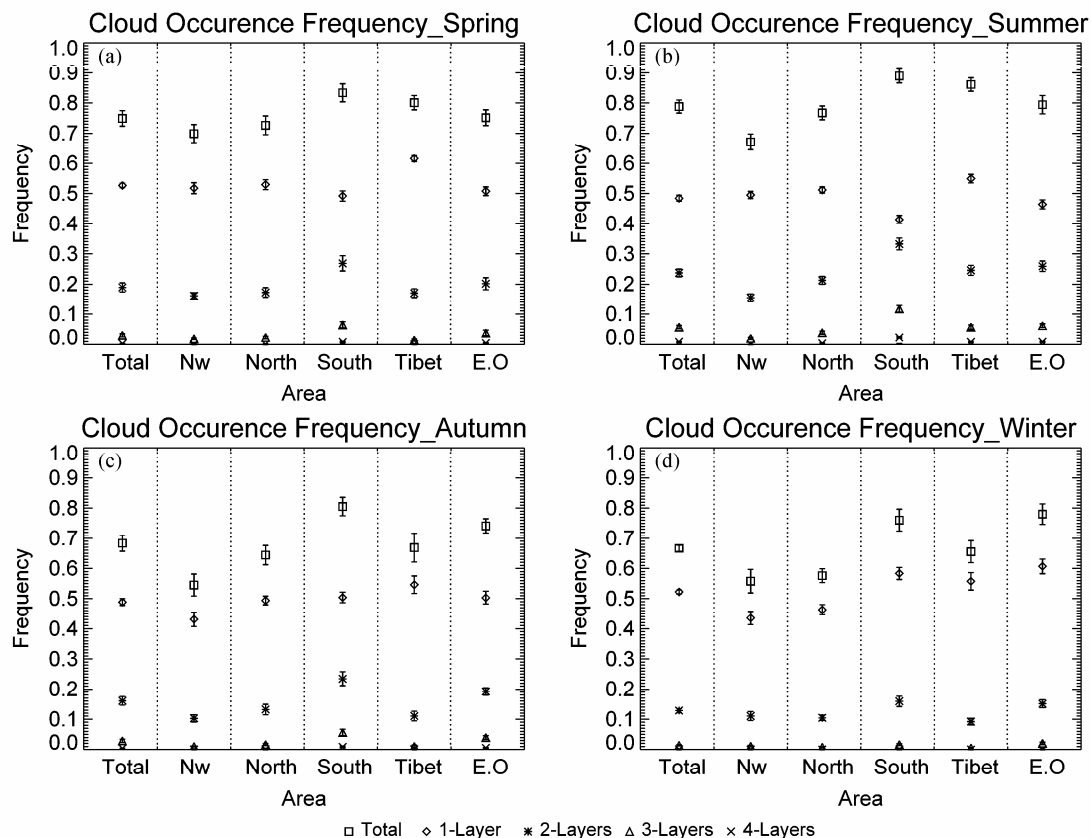


图3 6个区域发生多层云的季节平均概率: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 3 Seasonal averaged probability of multilayer cloud occurrence in six regions: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

节进行研究,同时,在多层云出现的情况下,再按照云层出现数目的不同区分,分别计算出不同区域、不同季节在不同云系统情况下的云顶高度和云底高度的平均值。图4(见文后彩图)分别给出整个东亚地区中6个研究区域,1层云、2层云、3层云和4层云系统中各层云的云顶和云底高的平均值。先看单层云系统的平均云顶高,对比4个季节,Nw平均云顶高最大值出现在春季,其他5个区域平均云顶高最大值都出现在夏季。夏季的6个区域之间比较,平均云顶最高的区域是South区域,为10.3 km,平均云顶最低的区域是North区域,为7.6 km;春秋季的平均云顶高低于夏季,春季平均云顶高位于Nw区域的8.3 km和E.O区域的8.0 km之间;秋季的平均云顶高位于South区域的5.9 km和Tibet区域的7.4 km之间,除了Nw区域和Tibet区域冬季云顶高略高于秋季外,其他区域的平均云顶高都是冬季最低;冬季,平均云顶最高的区域是Nw区域,为7.3 km,平均云顶最低的区域是E.O区域,为3.9 km。从云的平均厚度来看,4个季节对比,夏季的平均云厚度最大,6个区域平均厚度

最大的是South区域,为4.6 km,最小的是Nw区域,为3.0 km;春秋次之,平均厚度的范围分别是2.6 km到3.1 km之间和2.1 km和3.0 km之间;冬季最小,6个区域平均厚度最大是发生在Nw区域为2.3 km,平均厚度最小的是South区域,为1.7 km。对2层、3层和4层云系统,最高层云顶高的平均值除了个别地区之外,同样是夏季最高,春秋次之,冬季最小。下面分春夏秋冬四个季节给予具体描述。对春秋两季,2层、3层和4层云系统中第二,第三和第四层云的平均云顶高最大的都是发生在South区域,分别为11.0 km、12.6 km和14.3 km,和11.8 km、14.2 km和15.4 km,最小的则都是发生在North区域,分别为9.3 km、10.3 km和10.7 km,和8.8 km、9.9 km和10.7 km。夏季,2层和3层云系统中第二层和第三层云的平均云顶高最大的都是在South区域,分别为14.2 km和15.6 km,最小的都是在Nw区域,分别为10.0 km和10.8 km;而4层云系统中第四层云的平均云顶高最大的则发生在Tibet区域,为15.9 km,最小的也是在Nw区域,为11.4 km。冬季,2层、3层和4层云系统中

第二,第三和第四层云的平均云顶高最大的都是发生在 E.O 区域,分别为 9.4 km、12.2 km 和 13.4 km,最小的分别发生在 North, North 和 Tibet 区域,值分别为 8.2 km、9.0 km 和 8.3 km。不同研究区域之间的差别体现出,位于东亚南部地区和海洋下垫面上空的云层比较高,而位于东亚北部的云层比较低,且东亚南北部之间差别比较大。观察云层厚度的变化,平均云层厚度大部分位于 1 km 到 3 km 之间,且不同区域的云层厚度差别较小,随季节变化也不大。一个明显趋势是当多层云系统中的云层数目增加时,云层的平均厚度减少,验证了 Luo et al. (2009) 对于东亚和南亚地区的研究结论,此外较高层的云层平均厚度大于较低层的云层平均厚度。

许多研究表明,多层云系统中云层之间的距离也是重要的云垂直结构参数之一 (Barker, 2008a, 2008b),因此,本文对云层的间距参数也进行了分析。表 3 给出 6 个研究区域 4 个季节不同云系统下云层间距的平均值。结果表明:东亚地区云层间距的季节平均值位于 5.7 km 到 1.1 km 之间,同一区域间距的季节变化不大,秋季和夏季略为偏高,春季和冬季略为偏低。North 和 Nw 区域的云层间距最小, South 区域和 E.O 区域云层间距最大,说明海洋为主的下垫面区域的云层间距大于以陆地为主的下垫面区域的云层间距,处于较低纬的 South 区域和 E.O 区域的云层间距大于处于较高纬的

North 区域和 Nw 区域的云层间距,另一个明显的趋势是随着云系统中云层数目的增加,云层间距逐渐缩小。本文的研究结果表明,6 个区域云层间距的概率分布基本呈单峰分布,概率峰值出现在 0.08~0.3 之间,且云层数越多,概率越大。出现峰值范围的云层间距在 1~3 km 之间,各区域之间没有大的区别,季节的变化也不大,这与李积明等 (2009) 的研究结果是一致的。因此,在此只给出夏季 6 个研究区域 2 层、3 层和 4 层云系统情况下云层间距的概率分布 (见图 5)。

5 讨论和结论

本文利用 CloudSat 提供的 2007~2009 年三整年的卫星观测资料,详细分析了东亚不同区域云的分布的统计特征,得出以下结论:

(1) 东亚地区单层云出现的概率在春夏秋冬分别为 52.2%、48.1%、49.2%和 51.9%,而多层 (2 层和 2 层以上) 云出现的概率在春夏秋冬分别为 24.2%、31.0%、19.7%和 15.8%。出现单层云的概率远高于多层云出现的概率。

(2) 东亚地区不同高度的云量之和具有明显的季节变化趋势:夏季最大,春秋次之,冬季最小。海洋上空的单层云量最大值出现在冬季,而在陆地上空则出现在夏季。

(3) 从存在云的总概率的统计结果得出,东亚

表 3 6 个区域 4 个季节不同云系统下云层间距的平均值 (单位: km)

Table 3 The mean values of intervals between cloud layers in different cloud systems in six regions for four seasons (units: km)

		Nw				North				South			
		春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
2LS*	L2-L1**	3.45	3.82	3.69	3.26	3.17	3.78	3.28	2.77	4.59	5.56	5.16	2.36
3LS	L2-L1	2.45	2.67	2.74	2.60	2.37	2.47	2.36	2.30	3.02	3.61	3.46	2.75
	L3-L2	2.46	2.79	2.48	2.05	2.10	2.79	2.19	1.69	3.30	3.58	3.58	4.15
4LS	L2-L1	1.87	1.97	2.07	2.21	1.72	1.82	1.87	1.81	2.14	2.60	2.62	1.87
	L3-L2	1.97	2.10	2.16	1.80	1.91	1.94	1.52	1.51	2.75	2.78	2.79	2.69
	L4-L3	1.86	2.20	1.88	1.36	1.62	2.27	1.69	1.13	2.49	2.56	2.63	2.68
		Tibet				E.O				Total			
		春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
2LS	L2-L1	3.41	4.96	4.08	3.41	4.23	5.71	4.79	4.35	4.44	5.60	5.08	4.10
3LS	L2-L1	2.39	3.44	2.83	2.21	2.84	3.78	3.68	3.07	3.13	3.88	3.83	3.04
	L3-L2	2.65	3.53	3.17	2.73	2.90	3.44	2.86	3.48	3.12	3.40	3.31	3.41
4LS	L2-L1	1.95	2.37	2.05	1.47	2.04	2.67	2.39	2.10	2.20	2.79	2.96	2.15
	L3-L2	2.03	3.08	2.66	1.35	2.31	2.75	2.77	2.73	2.63	2.84	2.96	2.83
	L4-L3	2.17	2.52	2.30	1.69	2.35	2.55	2.09	2.50	2.39	2.57	2.56	2.50

*第一列中 2LS、3LS 和 4LS 分别表示两层云、三层云和四层云系统。

**第二列中 L2-L1、L3-L2 和 L4-L3 分别表示第 2 层云与第 1 层云的间距、第 3 层云与第 2 层云的间距和第 4 层云与第 3 层云的间距。

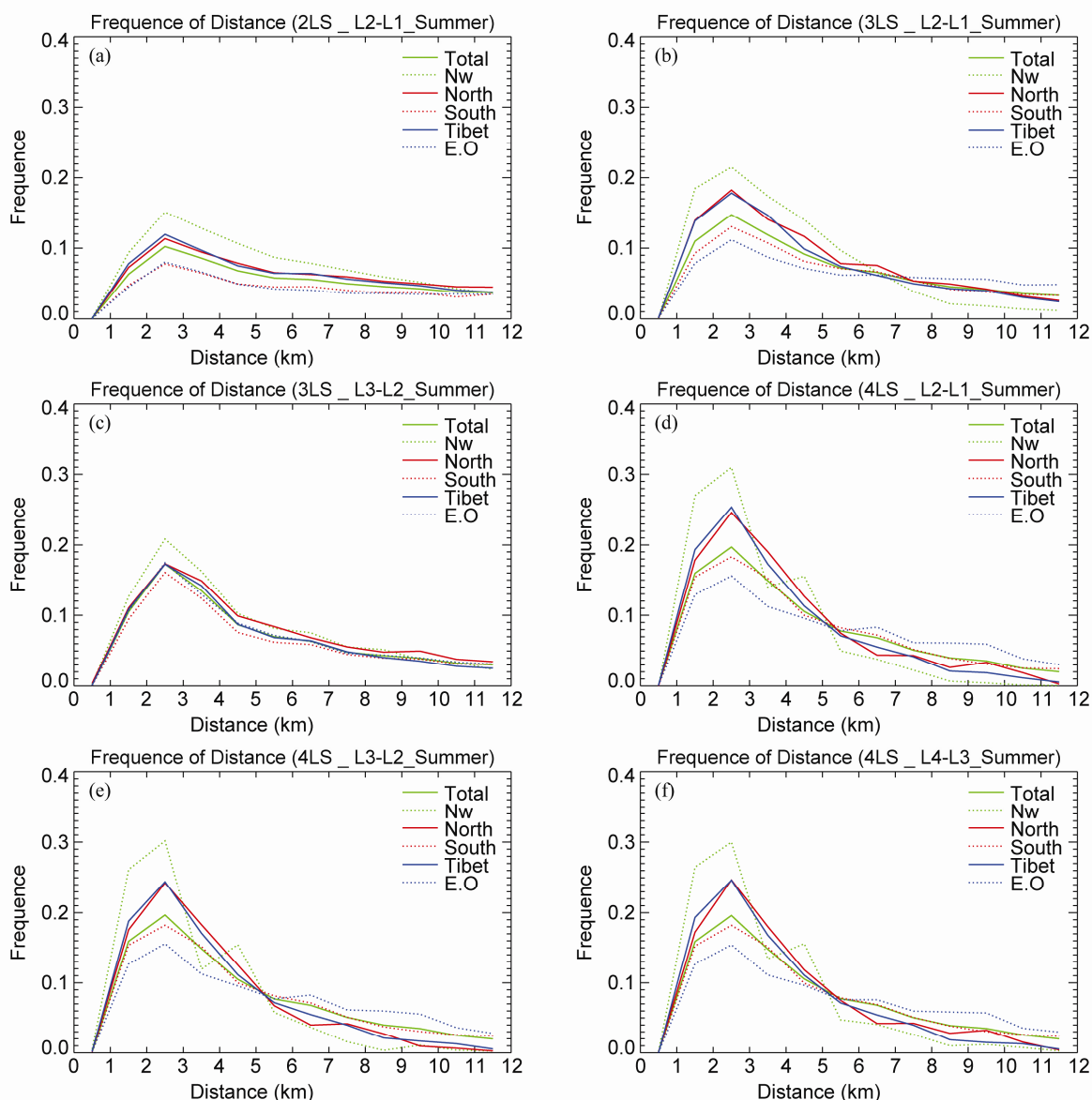


图5 6个区域夏季的云层间距的分布概率: (a) 双层云系统中第二层与第一层云的间距; (b) 三层云系统中第二层与第一层云的间距; (c) 三层云系统中第三层与第二层云的间距; (d) 四层云系统中第二层与第一层云的间距; (e) 四层云系统中第三层与第二层云的间距; (f) 四层云系统中第四层与第三层云的间距

Fig. 5 The occurrence probability distribution of intervals among cloud layers at summer in six regions: (a) For the intervals between the 1st and 2nd layers in two-layer cloud system; (b) for the intervals between the 1st and 2nd layers in three-layer cloud system; (c) for the intervals between the 2nd and 3rd layers in three-layer cloud system; (d) for the intervals between the 1st and 2nd layers in four-layer cloud system; (e) for the intervals between the 2nd and 3rd layers in four-layer cloud system; (f) for the intervals between the 4th and 3rd layers in four-layer cloud system

地区具有南方云多, 北方云少; 海洋上空云多, 陆地上空云少的特点。季节变化表明, 夏季存在云的总概率最大, 冬季最小, 而存在单层云的概率反而是夏季最小, 春冬季最大, 表明云出现的总概率的变化趋势主要由多层云出现概率的变化趋势决定。

(4) 季节平均的云层高度结果表明: 位于东亚南部地区和海洋下垫面上空的云层比较高, 而位于东亚北部的云层比较低, 且东亚南北部之间差别比

较大。观察云层厚度的变化, 平均云层厚度大部分位于 1 km 到 3 km 之间, 且不同区域的云层厚度差别较小。一个明显趋势是当多层云系统中的云层数目增加时, 云层的平均厚度减少, 且较高层的云层平均厚度大于较低层的云层平均厚度。

(5) 分析多层云系统中云层间距的概率分布表明: 出现峰值概率的云层间距在 1~3 km 之间, 各区域之间没有大的区别, 季节的变化也不大。而云

层间距出现的概率的极大值在 0.8~0.3 之间, 且云层越多, 概率越大。

以上研究结果是本文利用最新发射的云观测卫星 CloudSat 同时结合了与其同轨道的激光雷达观测卫星 CALIPSO 2007~2009 年 3 年的观测资料, 经过处理和分析得到的。目前其他的观测手段尚无法获取如此高垂直分辨率的云的结构信息。因此, 本文的结果对于理解东亚地区及其 5 个子区域云的垂直结构, 并在气候模式中精确描述该地区云的结构提供了可供参考的定量信息, 具有十分重要的意义。

致谢 本文所用的资料来自美国宇航局 (NASA) 的 CloudSat 项目, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- Arking A. 1991. The radiative effects of clouds and their impact on climate [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72: 795–813.
- Barker H W. 2008a. Overlap of fractional cloud for radiation calculations in GCMs: A global analysis using CloudSat and CALIPSO data [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D00A01, doi: 10.1029/2207JD009677.
- Barker H W. 2008b. Representing cloud overlap with an effective decorrelation length: An assessment using CloudSat and CALIPSO data [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D24205, doi: 10.1029/2008JD010391.
- 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.
- 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: 513–516.
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. 1990. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models [J]. *J. Geophys. Res.*, 95: 16601–16615.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- 石广玉. 2007. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 302–318. Shi Guangyu. 2007. *Atmospheric Radiation* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 302–318.
- 荆现文, 张华, 郭品文. 2009. 气候模式中云的次网格结构对全球辐射影响的研究 [J]. *气象学报*, 67 (6): 1058–1068. Jing Xianwen, Zhang Hua, Guo Pinwen. 2009. A study of the effect of sub-grid cloud structure on global radiation in climate models [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (6): 1058–1068.
- 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): 698–707. 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): 698–707.
- Liang X Z, Wang W C. 1997. Cloud overlap effects on general circulation model climate simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 11039–11047.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (3): 486–494.
- 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: 1052–1064.
- 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.
- 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 J H, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *J. Climate*, 11: 3010–3029.
- Wang J H, Rossow W B, Zhang Y C. 2000. Cloud vertical structure and its variations from a 20-yr global rawinsonde dataset [J]. *J. Climate*, 13: 3041–3056.
- Wielicki B A, Harrison E F, Cess R D, et al. 1995. Mission to planet Earth: Role of clouds and radiation in climate [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76: 2125–2153.
- 张华, 荆现文. 2010. 气候模式中云的垂直重叠假定对模拟的地—气辐射的影响研究 [J]. *大气科学*, 34 (3): 520–532. Zhang Hua, Jing Xianwen. 2010. Effect of cloud overlap assumptions in climate models on modeled earth-atmosphere radiative fields [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (3): 520–532.
- 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.
- 赵济. 1995. 中国自然地理 (3 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 180–187. Zhao Ji. 1995. *Chinese Nature Geography* (in Chinese) [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 180–187.

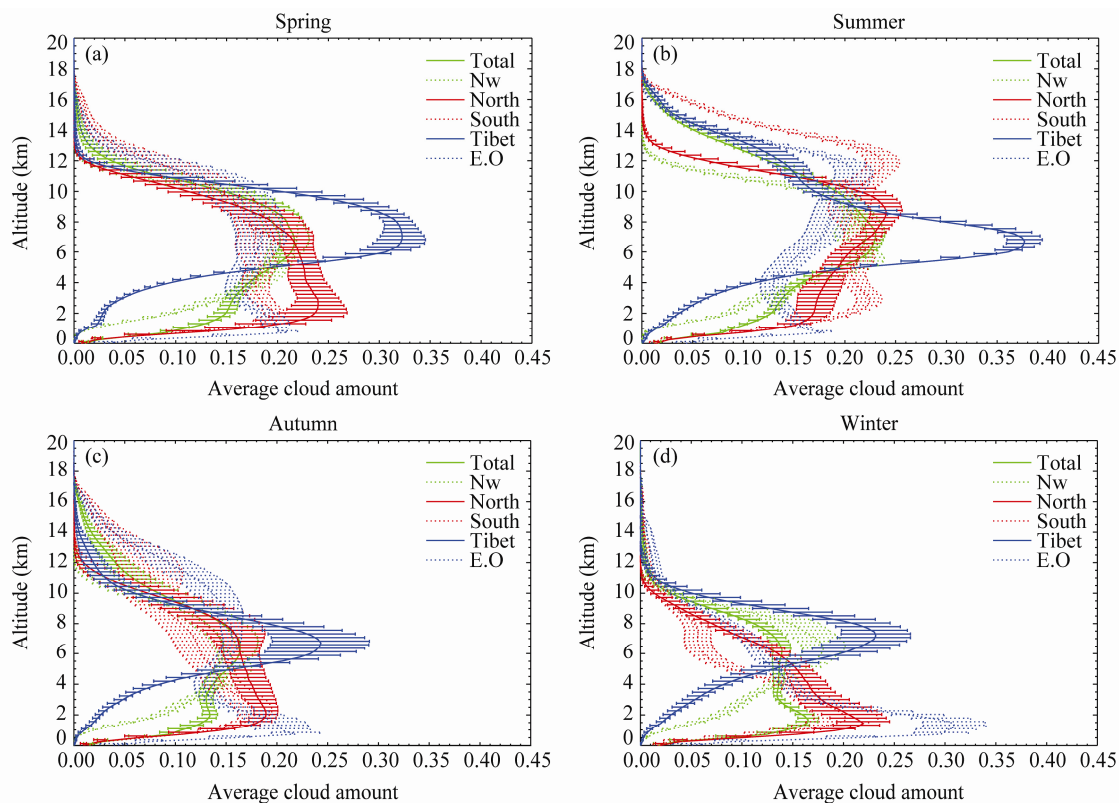


图2 6个区域季节平均的云量随高度的变化: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 2 Variation of seasonal averaged cloud amount with height in six regions: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

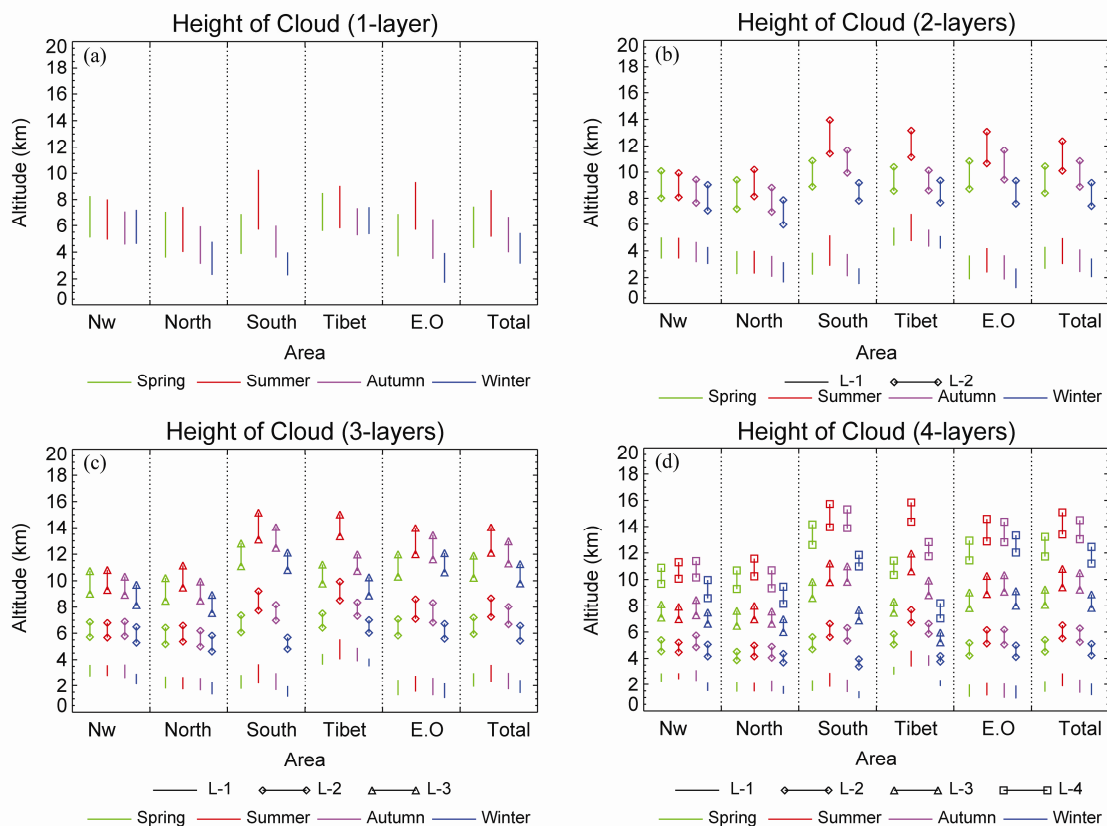


图4 4个季节6个区域平均云层高度和厚度: (a) 单层云系统; (b) 双层云系统; (c) 三层云系统; (d) 四层云系统

Fig. 4 The mean level and thickness of clouds in six regions for four seasons: (a) Single-layer cloud system; (b) two-layer cloud system; (c) three-layer cloud system; (d) four-layer cloud system