

闵敏, 王普才, 宗雪梅. 2011. 中国地区卷云分布特征的星载激光雷达遥感 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 301–309. Min Min, Wang Pucui, Zong Xuemei. 2011. Cirrus cloud distribution over China from spaceborne lidar observations [J]. Climatic and Environmental Research, 16 (3): 301–309.

中国地区卷云分布特征的星载激光雷达遥感

闵敏^{1, 2, 3} 王普才¹ 宗雪梅¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要 利用 2006 年 6 月至 2008 年 5 月 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 水平分辨率 25 km 云层产品来研究中国地区的卷云分布特征。所采用的 3 条基于卷云气候态的质量控制标准能够有效的剔除 CALIOP 云种分类产品中判别误差。通过卷云水平分布的研究发现, 区域性强烈的辐合上升气流和丰富的水汽导致中国南部靠近热带辐合带 (ITCZ) 的热带地区卷云具有约 60% 左右的最大发生频率。沿青藏高原抬升的暖湿空气能够产生很多地形型卷云, 从而导致干旱的青藏高原东北坡出现了相对较大约 30%~40% 的卷云覆盖。ITCZ 和季风的时空迁移主导了卷云在纬度上的季节性分布特征, 同时也导致青藏高原东北坡的相对高值主要出现在春冬季节。沿纬度的卷云垂直分布的变化揭示出低纬度卷云的云顶高度更多的集中在 16 km 附近, 这主要是因为对流层顶限制了卷云的发展。通过对多层卷云系统的研究揭示出伴随不同云种的系统的水平分布特征与各种云种的随纬度的分布密切联系。除伴随卷云发生的多层卷云系统以外, 青藏高原东北部的相对高值主要是伴随海拔较高的高积云的系统的发生导致的。

关键词 卷云 星载激光雷达 青藏高原

文章编号 1006-9585 (2011) 03-0301-09 **中图分类号** P407.5 **文献标识码** A

Cirrus Cloud Distribution over China from Spaceborne Lidar Observations

MIN Min^{1, 2, 3}, WANG Pucui¹, and ZONG Xuemei¹

1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The distribution of cirrus clouds over China is presented using the Earth-orbiting Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) Level 25 km (horizontal resolution) cloud layer product from June 2006 to May 2008. The three quality control standards based on cirrus climatologies can be effectively used to eliminate the cirrus false identifications in this product. From the analysis of cirrus cloud horizontal distribution, the authors attribute the highest occurrence frequency of cirrus clouds of about 60% in the south of China near Intertropical Convergence Zone (ITCZ) to the strongly rising air and rich water vapor. The terrain-induced cirrus clouds pro-

收稿日期 2009-09-19 收到, 2011-03-30 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875084, 国家自然科学基金青年科学基金项目 40705012

作者简介 闵敏, 男, 博士, 主要从事云和气溶胶卫星遥感和辐射定标研究。E-mail: minmin@cma.gov.cn

duced by uplifted relatively warm and moist air on the Qinghai-Xizang Plateau cause the relatively high occurrence frequency of about 30%–40% on the northeast slope of Qinghai-Xizang Plateau. The migrations of ITCZ and monsoon induce the seasonal latitudinal movement of cirrus over China, and the relatively high cirrus on the northeast slope of Qinghai-Xizang Plateau relatively which occurs in winter and spring as well. The latitudinal variation of vertical distribution of cirrus displays that the cirrus clouds at low-latitude center around 16 km due to the limit of tropopause. The analysis shows that the horizontal distribution of multilayered cirrus cloud systems with different kinds of cloud is closely associated with the latitudinal distribution of different kinds of cloud. In addition to the multilayered cirrus cloud systems occurring with cirrus, the relatively high value on the northeast of Qinghai-Xizang Plateau is mainly contributed to the occurrence of systems with high altocumulus.

Key words cirrus, spaceborne-lidar, Qinghai-Xizang Plateau

1 引言

对流层上层的卷云在地球系统的辐射能量收支和水循环过程中扮演着重要的角色 (Liou, 1986)。卷云薄而纤细, 云底高度大约在 6 km 以上, 并且主要由非球形的冰晶粒子所组成 (Lynch et al., 2002)。卷云在全球尺度的分布是不均匀的, 大概覆盖 20%~35% 的地球表面 (Liou, 1986), 而现代卫星观测表明其瞬时覆盖率在 40% 左右 (Wylie et al., 1994)。卷云的形成和运动主要是由大尺度的大气环流和天气系统所推动的 (Sassen and Campbell, 2001)。基于热力学理论, 卷云的特殊组成和所处的海拔高度使得其对大气的红外加热效应要大于对太阳辐射的反射减温效应, 所以产生正的温度反馈效应 (Platt, 1973; Liou, 1986)。不过这种类似温室气体的加热作用都是通过基于很多物理假设的数值模式模拟出来的 (Sassen and Campbell, 2001)。而通过观测揭示出的热带卷云的辐射效应的正负性, 如今还是一个有争议的问题 (Chou et al., 2002; Lin et al., 2002)。除此之外, 卷云产生机制的复杂性和次气候模式网格的特点, 使得对卷云的准确预报和模拟也存在一定的困难 (Lynch et al., 2002)。

由于卷云具有高而薄的性质并经常出现在多层云系统中, 所以一直以来对卷云的卫星和地基观测都是一个难题 (Lynch et al., 2002)。尽管如此, 一些外场观测还是能够提供有价值的卷云的性质和气候特征, 其中就包括国际卫星云气候计划 (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) (Rossow and Schiffer, 1999)、大气辐射观测计划 (Atmospheric Radiation Mea-

surement, ARM) (Platt et al., 1998) 等。ISC-CP 的云产品能够展现出 20 多年连续的卷云光学和微物理性质, 但是不能提供垂直方向和多层云系统的信息。ARM 计划中的多传感器联合观测能够有效评估卷云的各种性质和提供多层云的信息, 但是这些宝贵的资料仅限于有限的站点。新型的星载云和气溶胶激光雷达和红外探险者卫星 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, CALIPSO) (Winker et al., 2003) 于 2006 年 4 月发射升空。它是美国国家航空航天局 (NASA) 午后列车 (Afternoon-Train) 计划的中的第三颗卫星 (Stephens et al., 2002), 主要搭载了一台主动式的双波段的云—气溶胶正交偏振激光雷达 (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP) (用于提供气溶胶和云的垂直后向散射系数和退偏比廓线)、一台被动式的三通道红外辐射计和一台宽视野照相机 (Winker et al., 2004)。主动式的探测方式让 CALIOP 能够穿透云层, 尤其是光学厚度较薄的卷云。所以相比于被动遥感, 新型的 CALIOP 能够更好的探测出卷云的垂直结构和反演云顶、云底高度。除此之外, 这种主动式的遥感方式借助退偏比和颜色比信息能更好检测出卷云所在的位置。所以 CALIPSO 的成功发射为我们进一步研究全球范围的卷云提供大好契机。

前人的研究已经指出卫星遥感是能够在全球范围观测卷云的唯一手段。Wylie et al. (1994) 利用 CO₂ 切片技术的高分辨率红外辐射垂直探测仪 (HIRS) 卫星的数据研究了卷云的发生频率、高度、季节和地理上的分布特征。Eguchi et al. (2007) 采用主动式探测手段的地球科学激光高度计系统 (Geoscience Laser Altimeter System,

GLAS) 研究了全球的卷云分布, 并揭示了主动遥感探测卷云的优势。最近 Nazaryan et al. (2008)、Sassen et al (2008) 等利用最初的 1 年 CALIPSO 和 CloudSat (星载云雷达) 数据统计研究了全球卷云分布特征以及日夜分布的变化特征。

Wylie et al. (2005) 研究指出热带和北半球的高云明显增加, 但是这只是水平分布的结果。只有结合垂直方向上云的信息才能更加准确地评估云的气候效应。在垂直方向上的卷云经常伴随着其他的云种一起出现 (Mace et al., 2006), 所以研究卷云和其他云种之间的关系是十分重要的。中国地区覆盖面积大, 而且下垫面的类型多样, 所以卷云在水平和垂直方向上的分布具有十分明显的地域性特征。只有进一步研究其特殊的性质才能为气候模式提供可靠的气候态资料作为依据, 从而减小气候模拟的不确定性。Chen and Liu (2005) 已经通过利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 4 年的 $1.375\ \mu\text{m}$ 通道的卷云反射率数据分析了东亚地区卷云的时空变化特征。但是被动遥感的局限性可能会增加该地区卷云特征评估的误差, 尤其是会低估顶层卷云以下的云 (Chang and Li, 2005)。所以我们利用 CALIOP 的数据来研究中国地区 ($17^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$) 卷云的分布特征, 从而有助于更加准确真实地揭示出该地区卷云的气候态特征。

2 数据和处理方法

我们采用的是连续 2 年 (2006 年 6 月至 2008 年 5 月) 的 CALIOP 水平分辨率 25 km 的云层数据。McGill et al. (2007) 利用安装在 NASA ER-2 飞机上的云物理激光雷达验证了 CALIOP 的数据, 他们的研究表明 CALIOP 的云层产品是十分可靠的。我们利用该产品中高质量 (质量评估 QA=3) 的特征分类标志 (Feature Classification Flags) (Liu et al., 2005; Vaughan et al., 2005) 来确定云层的性质。本文使用的其他 CALIOP 产品中的数据都是由 NASA 的 GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) 提供的, 例如大气温度廓线、对流层顶高度等 (Winker et al., 2003)。

新型的 CALIOP 主要利用激光雷达回波信号

强度等参数来首先区分云和气溶胶层 (Liu et al., 2005), 然后利用提供云的退偏比和颜色比这样的参数来进行云种的判别。其中退偏比与散射粒子的性质和外在形态密切相关, 冰晶粒子的退偏比明显大于水滴。所以 CALIPSO 算法利用一系列的相关阈值来准确鉴别云种, 并提供 10 种云的相关信息 (Vaughan et al., 2005)。虽然云种鉴别算法非常成熟可靠, 但是上传的气溶胶层 (尤其是沙尘气溶胶)、白天太阳光产生的信号噪音和卷云中存在的过冷水都有可能影响 CALIPSO 算法的反演效果 (Vaughan et al., 2005)。因此我们基于卷云气候态的特征 (Dowling and Radke, 1990; Sassen and Campbell, 2001), 采用 3 条额外的质量控制标准来确保我们选取的卷云是纯冰云。前两条分别是卷云的最大可见光学厚度要小于 3 和云顶温度要低于 $-40\ ^{\circ}\text{C}$ (Sassen and Campbell, 2001; Sassen and Wang, 2008)。最后一条标准是卷云的云底高度要保证大于 5 km (Dowling and Radke, 1990)。表 1 对比了采用与没有采用质量控制标准的总的卷云 (顶层) 发生频率 [具体计算方法见式 (1)]。可以看出在采用上述的 3 条额外标准之后, 卷云的总的发生频率减少了 8% 左右。说明这 3 条依据卷云气候态性质的控制标准能够很好的补充 CALIPSO 云检测算法来剔除不合理的判别结果。

表 1 采用和没有采用质量控制的中国地区 2006 年 6 月至 2008 年 5 月总的卷云 (顶层) 发生频率

Table 1 Total cirrus cloud (top layer) occurrence frequency over China between the cases with and without quality control from Jun 2006 to May 2008

	总的发生频率
没有采用质量控制标准	38.53%
采用质量控制标准	30.74%

3 结果和讨论

3.1 水平分布

云的水平分布对地气系统的辐射场具有明显影响, 所以也深刻的影响着天气和气候过程。相比于 Nazarya et al. (2008) 和 Sassen et al. (2008) 对全球卷云分布的研究, 我们研究区域性

特征时计算的是较高分辨率的 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬度格点的水平分布。图 1 给出的中国地区顶层卷云发生频率的水平分布图 (2006 年 6 月至 2008 年 5 月)。我们利用以下公式计算卷云的发生频率 (h):

$$h = \frac{N_c}{N_T} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, N_c 代表确定的顶层卷云的数量; N_T 是 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬度格点 CALIOP 观测廓线的总数量。约 60% 的最大发生频率出现在中国南部靠近热带辐合带 (ITCZ) 的地区, 由于日照直射引起的区域性强辐合和垂直对流运动是导致卷云频发的主要原因。相比于中国北方大部分地区来说, 西北地区, 尤其是青藏高原东北坡的卷云发生频率在 30%~40% 左右, 明显偏高。以前的研究指出卷云容易出现在具有丰富水汽的风暴带和旺盛对流的地区, 而在沙漠地区以及类似沙漠的干旱地区都是缺少卷云的 (Wylie et al., 1994; Sassen et al., 2008)。但是从更细网格的 CALIOP 数据的统计结果看出, 在干旱的中国西北地区卷云的出现相对频繁, 这种现象是由青藏高原特殊地形引起的。Chen and Liu (2005) 通过对位势高度的分析发现相对较暖而潮湿的空气随着季节性的季风和 ITCZ 运动, 遇到青藏高原而抬升, 从而形成了青藏高原上空的卷云的频发区。但是基于主动遥感方式的 CALIOP 数据结果显示青藏高原并不是卷云覆盖的高值区 (见图 1), 这主要是因为该地区缺少充足的水汽和处在 Hadley 环流下沉气流区 (30°N) 附近。不过由于暖湿空气抬升形成的地形型卷云 (Lynch et al., 2002) 是导致青藏高原东北坡的高值区的主要原因。

图 2 给出了 1~12 月的中国地区各月卷云发生频率的水平分布。2 年的观测数据保证了平均每个格点上有大约 400 个数据点和 6000 [400 (数据点) $\times$ 15 (单位廓线数)] 条雷达廓线。从图 2 可以看出由于 ITCZ 和亚洲季风活动所引起的季节性卷云的时空变化特征。卷云覆盖的相对高值区从 10 月时的中国北部向次年 9 月的南部区域移动。其中 12 月到次年 4 月由于季风变化导致北风盛行, 使得青藏高原东北坡形成了卷云覆盖的高值区。这也证明图 1 中的青藏高原东北部卷云覆盖高值区域主要在春冬季节频发。

3.2 垂直分布

云的垂直分布对气候的反馈十分重要, 但是由于观测手段的限制使得其在气候模式中的描述并不是十分的完美。所以我们利用 CALIOP 在垂直方向上的穿透能力来揭示卷云的垂直分布特征。图 3 给出了中国地区每月垂直方向上的卷云云顶高度的发生频率分布, 其中垂直方向上的分布间隔是 0.5 km。与水平分布概率不一样的是我们采用以下方法计算每月的卷云垂直方向上的发生频率:

$$h = \frac{N_{mc(H)}}{N_{mc}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中, N_{mc} 是每月总的顶层卷云的数量, $N_{mc(H)}$ 是每月云顶高度在 H 处的顶层卷云数量。图 3 显示出卷云云顶高度的垂直分布随对流层顶的升降而呈现季节性的变化。但是云顶高度分布的高值中心与对流层顶平均高度的位置并不一致, 不过图 2 显示的卷云覆盖的季节性南北移动可以解释这种垂直方向上的差异。ITCZ 和季风的季节性移动导致中国地区卷云频繁产生的地理区域有明显的变化。所以这种地域上的变化所引起的卷云产生机制和性质的明显差异 (主要是高度上的变化) 是导致图 3 中高度差异的主要原因。

为了进一步的研究垂直分布特征, 图 4 给出了中国地区卷云云顶高度发生频率随纬度变化的垂直分布。为了能够更好的说明随纬度的变化, 我们采用不同于图 3 中的方法求取垂直发生频率:

$$h = \frac{N_{lc(H)}}{N_{lc}} \times 100\%, \quad (3)$$

其中, N_{lc} 和 $N_{lc(H)}$ 分别代表 2° 纬度中总的观测数量和卷云云顶高度在 H 处的数量。从图 4 可以看出在 30°N 附近卷云的发生频率明显偏低与其他地区, 从而产生出一个明显的突变趋势。这种 30°N 附近的异常低值主要是由于 Hadley 环流和 Ferrel 环流在该地区下沉气流所导致的 (Sassen et al., 2008)。除此之外, 还可以看出靠近热带地区的卷云云顶高度更加集中的分布在 16 km 处附近。这主要是因为该地区强烈的辐合上升运动产生的卷云的发展受到对流层顶的限制, 从而导致卷云频繁的集中在此高度。

3.3 多层卷云系统

卷云经常会伴随其他的云种或低层卷云同时

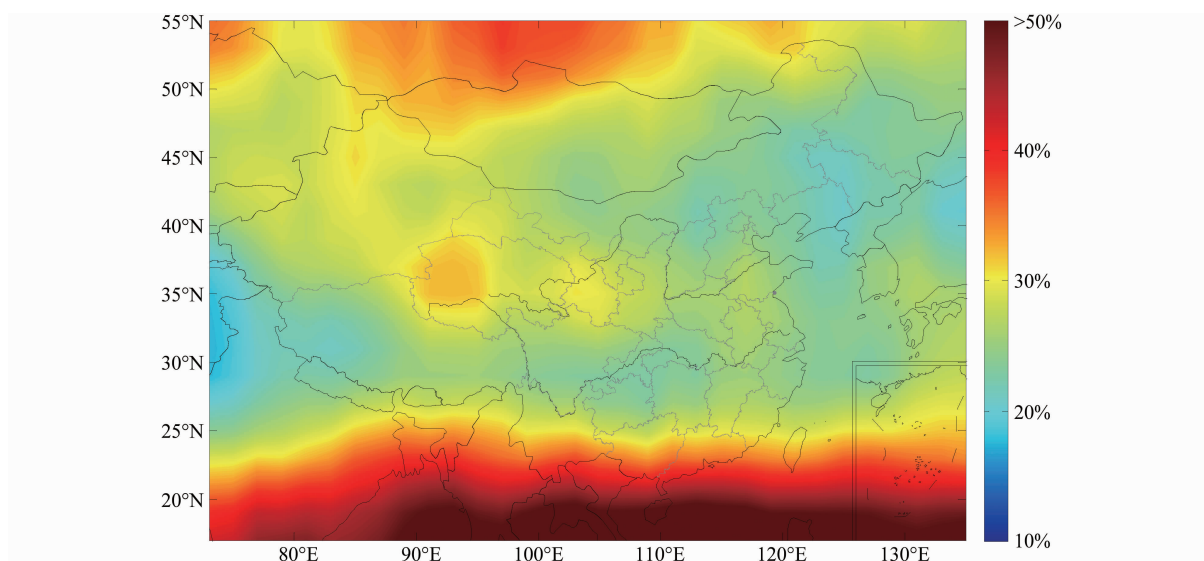


图 1 2006 年 6 月至 2008 年 5 月中国地区 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 经纬度格点分辨率的卷云发生频率的水平分布

Fig. 1 Horizontal distribution of cirrus cloud occurrence frequency over China within $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ latitude - longitude grid boxes from Jun 2006 to May 2008

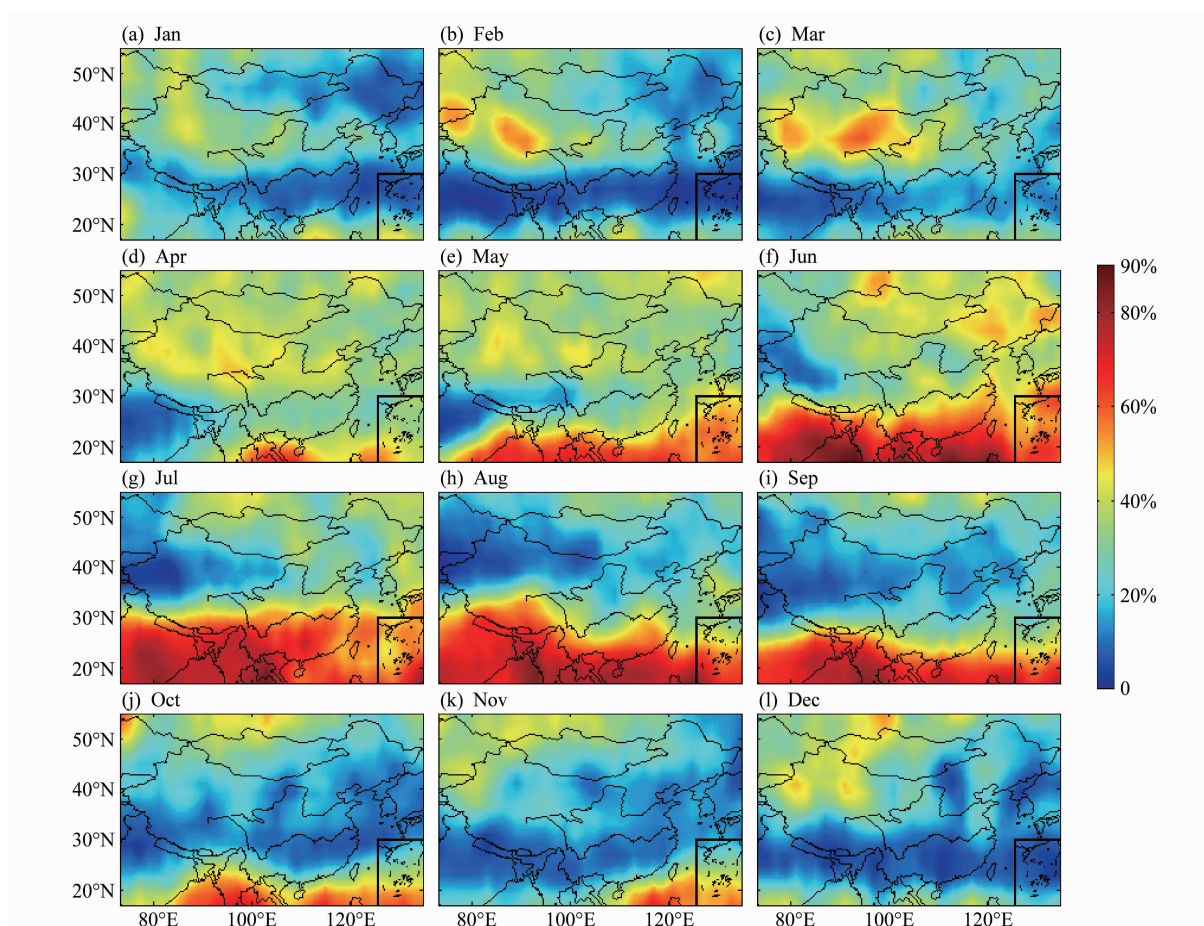


图 2 1~12 月中国地区 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 经纬度格点的各月卷云发生频率的水平分布

Fig. 2 Monthly horizontal distributions of cirrus cloud occurrence frequency over China within $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ latitude - longitude grid boxes from Jan to Dec

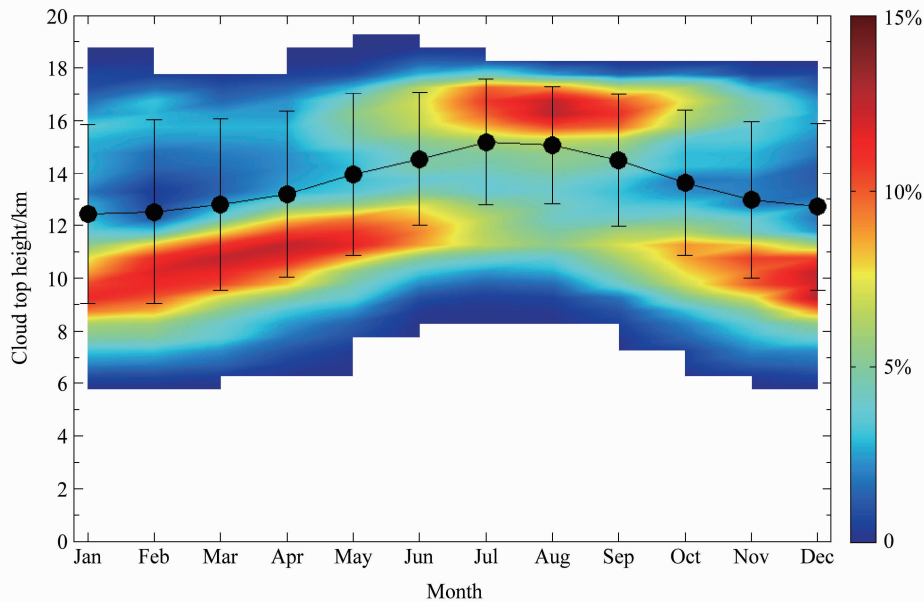


图3 中国地区 ($17^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E} \sim 135^{\circ}\text{E}$) 每月垂直方向上的卷云云顶高度的发生频率分布, 垂直方向上的分布间隔是 0.5 km。黑色的实心圆和误差棒分别代表对应月份的平均对流层顶高度和标准偏差

Fig. 3 Monthly vertical distribution of occurrence frequency of cirrus cloud top height over China ($17^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E} \sim 135^{\circ}\text{E}$) in 0.5-km intervals. The black solid circles and bars represent the monthly regional mean tropopause heights and standard deviations, respectively

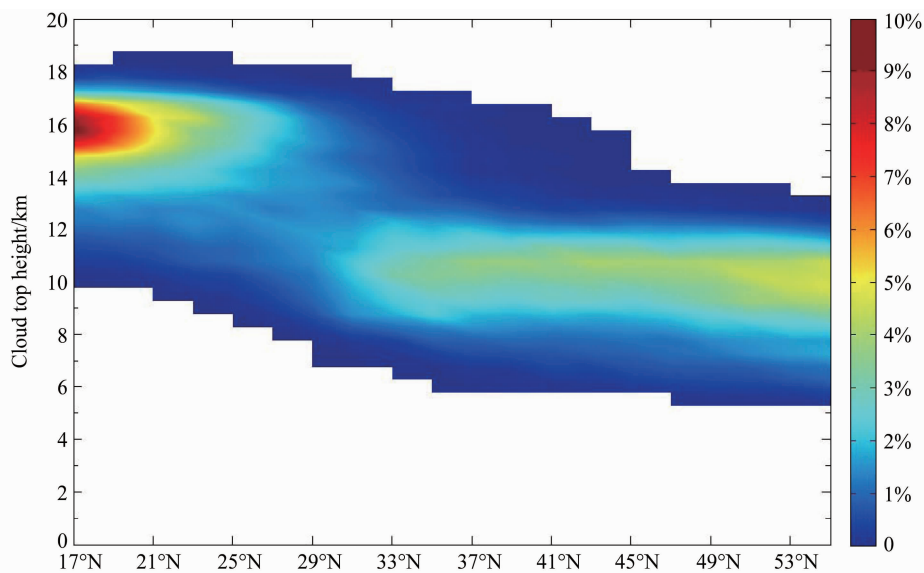


图4 中国地区卷云云顶高度发生频率随纬度变化的垂直分布, 垂直高度上和纬度的间隔分别是 0.5 km 和 2°

Fig. 4 Latitudinal-vertical distribution of the occurrence frequency of cirrus cloud top height over China for 0.5-km height and 2° latitude grid intervals

出现, 而卷云与不同性质的云种在垂直方向上的叠放会产生不同的气候效应。由于这种云的层叠结构的可靠信息很难获得, 所以这个问题也一直是气候研究的难点和热点。在这里我们要研究的多层卷云系统 (简称 MCS) 是指顶层卷云伴随其

他云种或低层卷云同时出现的情况。图 5 给出 2006 年 6 月至 2008 年 5 月总的中国地区 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 经纬度格点分辨率的 MCS 的发生频率的水平分布。可以看出与图 1 的相对覆盖趋势很相似, 由此证明 MCS 的发生也主要依赖于大气环流和天气系统

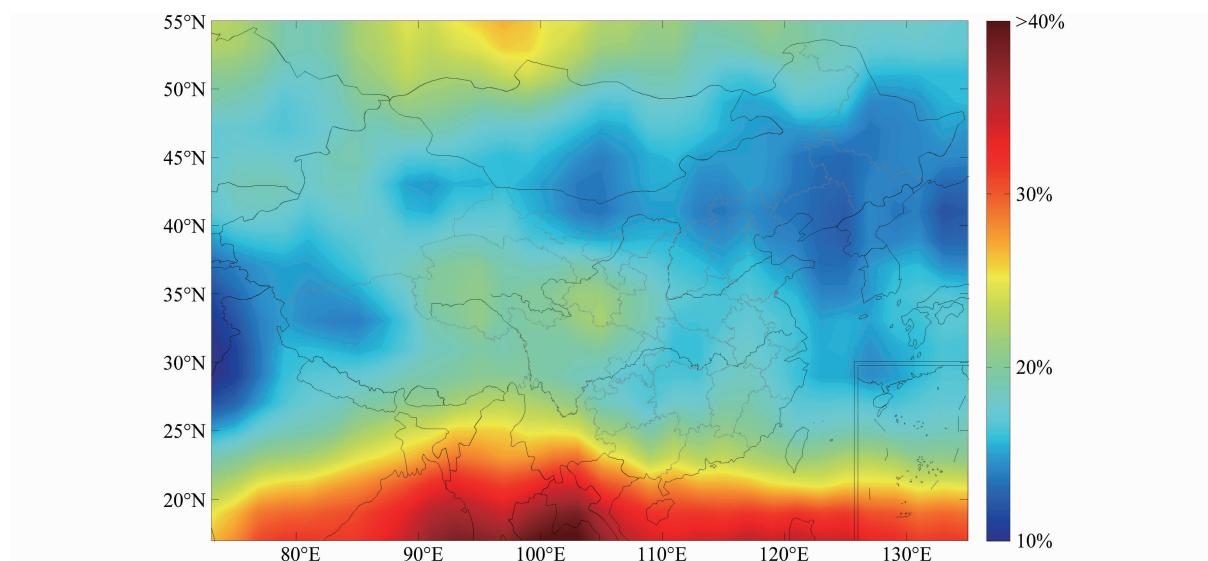


图 5 2006 年 6 月至 2008 年 5 月中国地区 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬度格点分辨率的多层卷云系统的发生频率的水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of multilayered cirrus cloud system occurrence frequency over China within $2^\circ \times 2^\circ$ latitude – longitude grid boxes from Jun 2006 to May 2008

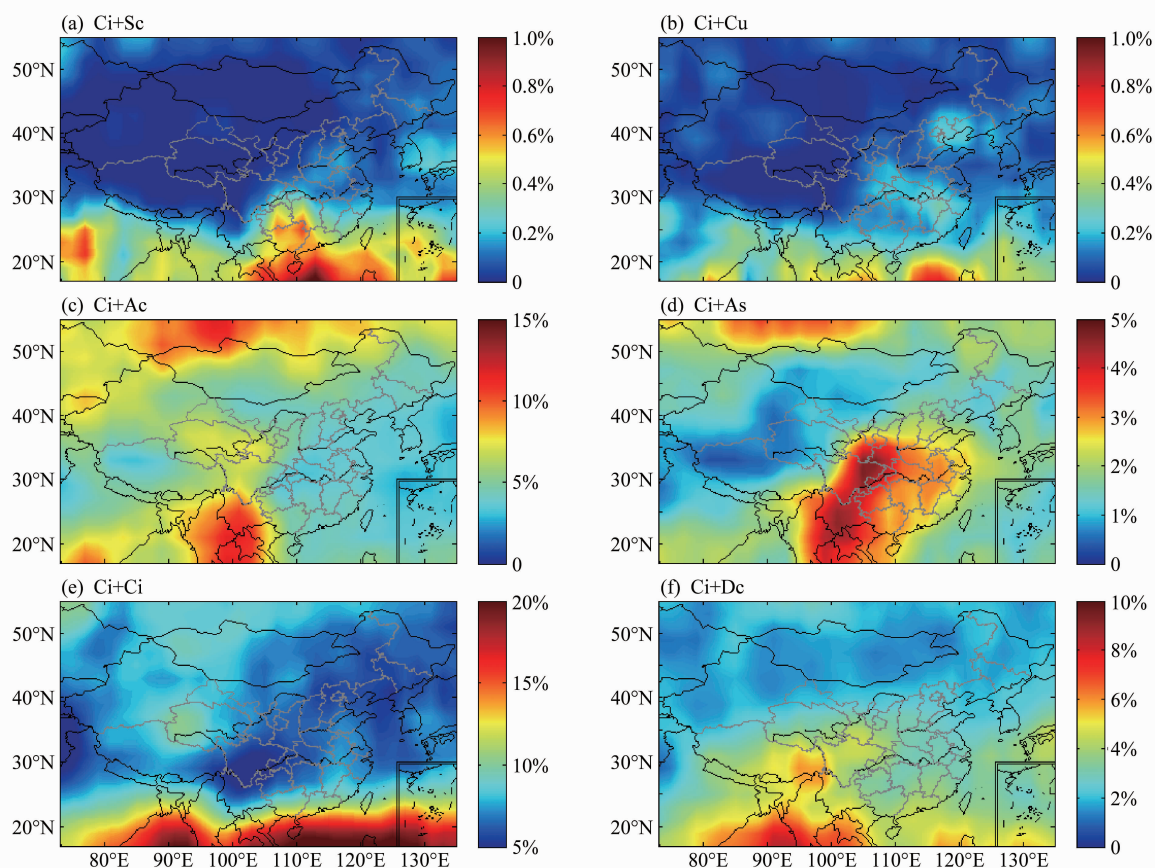


图 6 2006 年 6 月至 2008 年 5 月中国地区 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬度格点分辨率的多层卷云系统伴随 6 种不同云种 (a) Sc、(b) Cu、(c) Ac、(d) As、(e) Ci 和 (f) Dc 的发生频率的水平分布

Fig. 6 Horizontal distribution of occurrence frequency of multilayered cirrus cloud system with the six different kinds of cloud (a) Sc, (b) Cu, (c) Ac, (d) As, (e) Ci, and (f) Dc over China within $2^\circ \times 2^\circ$ latitude – longitude grid boxes from Jun 2006 to May 2008

的作用。

基于主动式遥感 CALIOP 所设计的云种分类算法能够鉴别出层积云 (Sc)、积云 (Cu)、高积云 (Ac)、高层云 (As)、卷云 (Ci) 和深对流云 (Dc) (Liu et al., 2005)。表 2 给出了中国地区伴随上述 6 种云的 MCS 的总发生频率。从表 2 看出除卷云以外, MCS 更多的伴随着高积云 (Ac) 和深对流云 (Dc) 同时发生。为了更好的说明 MCS 伴随其他云种发生的情况, 图 6 给出了 2006 年 6 月至 2008 年 5 月中国地区 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 经纬度格点分辨率的 MCS 伴随 6 种不同云种 (Sc、Cu、Ac、As、Ci 和 Dc) 发生频率的水平分布。从图 6 可以看出卷云伴随 Sc、Cu、Ci 和 Dc 的发生基本都集中在南面 ITCZ 附近。而伴随 Ac 和 As 发生的 MCS 除中国地区南部和中部以外, 还在最北部的 $80^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$ 的地方存在覆盖的高值区。除此之外这两种 MCS 大部分发生在海拔较低的大陆区域, 这说明这两类 MCS 的发生很依赖下垫面的特征。CloudSat 卫星 1 年的数据的统计结果证明了 Sc、Cu、Ci 和 Dc 主要集中的 ITCZ 附近, 而 Ac 和 As 却在中纬度和极地分布较多 (Sassen and Wang, 2008)。所以这种分布特征主要是由于各种云种随纬度的分布的差异性所引起的。从图 6c 和 6e 看出青藏高原东北坡的 MCS 的覆盖高值的出现, 除伴随卷云以外主要就是 Ac。相比于高层云 As, 由于 Ac 所处的海拔更高, 在暖湿空气爬坡的过程中更加容易促使 Ac 顶层部分发展演变成为卷云。

表 2 中国地区多层卷云系统伴随 6 种不同云种的总发生频率

Table 2 Total occurrence frequency of multilayered cirrus cloud system with the six different kinds of cloud over China

云种	发生频率
Sc	0.17%
Cu	0.14%
Ac	5.89%
As	1.87%
Ci	8.86%
Dc	3.02%

4 总结

使用 2006 年 6 月至 2008 年 5 月 CALIOP 水

平分分辨率 5 km 的云层产品来分析中国地区的卷云分布特征。使用的 3 条基于卷云气候态的质量控制标准能够很好的补充 CALIPSO 云检测算法剔除 8% 左右的不合理的卷云判别结果。

通过研究卷云的水平分布, 发现卷云的最大发生频率 (约 60%) 出现在中国南部靠近 ITCZ 的热带地区。该区域强烈的辐合上升气流和丰富的水汽是导致卷云频发的主要原因。由于青藏高原的特殊地形, 沿该地区抬升的暖湿空气会产生很多地形型卷云, 从而导致干旱的青藏高原东北坡也出现相对较多的卷云。卷云在纬度上的季节性分布特征也揭示出 ITCZ 和季风的季节性时空迁移主导作用, 同时也发现青藏高原东北坡的相对高值主要出现在春冬季节。

卷云在垂直方向上的分布也呈现明显的季节性特征, 并随着对流层顶的变化而变化。沿纬度的垂直分布揭示出低纬度的卷云更多的集中在 16 km 左右, 这主要是对流层顶限制了卷云的发展而导致的。除此之外, Hadley 环流和 Ferrel 环流在 30°N 处的下沉气流直接导致卷云在该区域发生概率降低和垂直分布不连续。

MCS 的水平分布与各云种的随纬度分布密切联系。伴随 Ac 和 As 发生的 MCS 主要发生在海拔较低的大陆区域。除伴随卷云发生以外, 青藏高原东北部 MCS 的高值主要是伴随海拔较高的 Ac 而发生的结果。

尽管基于主动式遥感方式的 CALIOP 能够更好的判别卷云, 但是相比于被动遥感, 由于 CALIOP 覆盖地表面积的限制导致了对卷云性质探测认识的局限性。我们将在以后的工作中联合主被动式遥感来进一步认识卷云的各种性质。

致谢 感谢 NASA ASDC (Langley Research Center Atmospheric Science Data Center) 和 CALIPSO 科学小组提供的高质量的 CALIPSO 数据。

参考文献 (References)

- Chang F L, Li Z. 2005. A near-global climatology of single-layer and overlapped clouds and their optical properties retrieved from Terra/MODIS data using a new algorithm [J]. J. Climate, 18: 4752–4771.
- Chen B, Liu X. 2005. Seasonal migration of cirrus clouds over the

- Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau measured from MODIS/Terra [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (1): 1–4.
- Chou M D, Lindzen R S, Hou A Y. 2002. Comments on “The iris hypothesis: A negative or positive cloud feedback?” [J]. *J. Climate*, 15 (18): 2713–2715.
- Dowling D R, Radke L F. 1990. A summary of the physical properties of cirrus clouds [J]. *J. Appl. Meteor.*, 29: 970–978.
- Eguchi N, Yokota T, Inoue G. 2007. Characteristics of cirrus clouds from ICESat/GLAS observations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (9): 1–6.
- Lin B, Wielicki B A, Chambers L H, et al. 2002. The iris hypothesis: A negative or positive cloud feedback? [J]. *J. Climate*, 15 (1): 3–7.
- Liou K N. 1986. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114: 1167–1199.
- Liu Z, Omar A H, Hu Y, et al. 2005. CALIOP algorithm theoretical basis document part 3: Scene classification algorithms [R]. NASA CALIPSO Algorithm Theoretical Basis Documents.
- Lynch D K, Sassen K, Starr D O C, et al. 2002. Cirrus [M]. New York: Oxford University Press, 480pp.
- Mace G G, Benson S, Vernon E. 2006. Cirrus clouds and the large-scale atmospheric state: Relationships revealed by six years of ground-based data [J]. *J. Climate*, 19 (13): 3257–3278.
- McGill M J, Vaughan M A, Trepte C R, et al. 2007. Airborne validation of spatial properties measured by the CALIPSO lidar [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D20201, doi: 10.1029/2007JD008768.
- Nazaryan H, McCormick M P, Menzel W P. 2008. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D16): 1–11.
- Platt C M R. 1973. Lidar and radiometric observations of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30: 1191–1204.
- Platt C M R, Young S A, Manson P J, et al. 1998. The optical properties of equatorial cirrus from observations in the ARM Pilot radiation observation experiment [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 1977–1996.
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80: 2261–2286.
- Sassen K, Campbell J R. 2001. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part I: Macrophysical and synoptic properties [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 481–496.
- Sassen K, Wang Z. 2008. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (4): 1–5.
- Sassen K, Wang Z, Liu D. 2008. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D00A12, doi: 10.1029/2008JD009972.
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (12): 1771–1790.
- Vaughan M A, Winker D M, Powell K A. 2005. CALIOP algorithm theoretical basis document part 2: Feature detection and layer properties algorithms [R]. NASA CALIPSO Algorithm Theoretical Basis Documents.
- Winker D M, Pelon J, McCormick M P. 2003. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds [J]. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 4893: 1–11.
- Winker D M, Hunt W H, Hostetler C A. 2004. Status and performance of the CALIOP lidar [J]. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 5575: 8–15.
- Wylie D P, Menzel W P, Woolf H M, et al. 1994. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS [J]. *J. Climate*, 7 (12): 1972–1986.
- Wylie D P, Jackson D L, Menzel W P, et al. 2005. Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations [J]. *J. Climate*, 18 (15): 3021–3031.