

文章编号: 0455-2059(2011)05-0048-07

利用星载云雷达资料分析夏季青藏高原的云辐射强迫

马越界¹, 黄建平², 刘玉芝²

1. 鄂尔多斯市气象局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000
2. 兰州大学 大气科学学院, 兰州 730000

摘要: 利用最新的星载云雷达提供的青藏高原(25°~45° N, 75°~105° E)夏季(JJA)2006年至2009年的辐射资料, 以及云和地球辐射能量系统(CERES)提供的云量资料, 分析了2006-2007年青藏高原夏季云量空间分布, 以及青藏高原周边的山脉地区和中心地方云的辐射强迫和云对大气垂直加热率的影响. 结果表明夏季青藏高原大气层顶(TOA)处云对长短波辐射的影响以及大气层底(BOA)处云对长短波辐射的影响远大于同纬度的其他地区. 从大气加热率的垂直分布来看, 有云存在时, 对于短波来说, 在云层中有明显的加热效应; 而对于长波, 在云顶有明显的冷却效应, 在云底有较弱的加热效应. 当存在多层云时, 在高云与低云之间, 云对大气的影响表现为冷却效应, 其最高值接近于云顶对大气的冷却率; 当存在多种类型的云时, 大气净加热率可以看作是各种单层云在垂直分布上的叠加.

关键词: 星载云雷达; 青藏高原夏季; 云的辐射强迫; 垂直加热率

中图分类号: P422.4

文献标识码: A

Impact of clouds on radiative fluxes in summer over the Tibetan plateau from Cloudsat data

MA Yue-jie¹, HUANG Jian-ping², LIU Yu-zhi²

1. Erdos City Bureau of Meteorology, Erdos 017000, Inner Mongolian Autonomous Region, China
2. School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Cloudsat summer flux products from 2006 to 2009, cloud amount summer(JJA) data of the clouds and the Earth's Radiant Energy System(CERES) from 2006 to 2007 over the Tibetan plateau(25°~45° N, 75°~105° E) were used to estimate the impact of clouds on the radiative fluxes and atmospheric radiative heating rates of the Tibetan plateau. The results show that the cloud impact on longwave(LW) and shortwave(SW) fluxes at the top and bottom of the atmosphere over the Tibetan plateau are much bigger than the average of the same latitude. The clouds heat the atmosphere via the absorption of SW radiation inside the clouds and the clouds cool the atmosphere by the emission of LW radiation near the top of cloud layers and heat the atmosphere due to the 'green house' effect. Muti-layer clouds have an obviously cooling effect on the net heating rate and the maximum is close to cooling rate near the top of clouds. The heating rate of different kinds of clouds can be treated as the sum of these single-layer clouds in a vertical distribution.

Key words: Cloudsat; summer Tibetan plateau; clouds radiative forcing; vertical distribution of heating rate

云是影响气候系统的一个重要因子^[1], 它可以通过降水影响地面的水文分布, 通过平流过程将感热、潜热、动量重新分配, 影响大气动力过程和

水文过程的耦合; 通过吸收、反射太阳辐射和云自身发射的长波辐射, 影响太阳辐射与大气动力过程和水文过程的耦合; 通过改变大气辐射和行

收稿日期: 2011-02-18

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(40725015)

作者简介: 黄建平(1962-), 男, 青海西宁人, 教授, 博士, e-mail: hjp@lzu.edu.cn, 研究方向为大气辐射、遥感、云\气溶胶\辐射\气候之间的相互作用, 通信联系人.

星边界层物理特性,影响大气和下垫面之间的耦合^[1-3]。同时,云对大气加热率的高度分布具有重要的影响,单层或多层云效果不同,不同垂直重叠的云对太阳辐射的吸收和反射有差异,同时对长波的加热效应也有较大的差别,研究表明^[4]云不同的高度分布最终导致的平均长波辐射通量差别高达 40 W/m^2 。

青藏高原位于中国西南部,南北约 1000 km ,东西约 2500 km ,平均海拔 4000 m 以上。国内外研究表明,青藏高原在中国和亚洲天气气候中起着重要的作用^[5]。吴国雄等^[6]利用NCEP/NCAR再分析资料,从大气中的热力适应、局地尺度加热和大陆尺度加热的综合效应、高原地表的摩擦作用以及波动能源等不同角度表明:青藏高原是夏季大气运动的重要负涡度源,其加热所激发的水平环流和垂直运动与大陆尺度加热所激发的水平环流和垂直运动同相叠加,增强东亚夏季风和中亚的沙漠化和干旱化。青藏高原夏季的抬升加热和所增强的东亚季风潜热释放,形成了东亚定长波的非绝热加热波源,是东亚夏季定长波的最主要波源,显著影响东亚的气候格局^[7],而青藏高原的云系则成为连接各种局地气候乃至全球气候之间重要的纽带。刘瑞霞等^[8]利用ISCCP(国际卫星气候计划)资料,分析了青藏高原总云量年际、月、日变化特征以及空间分布特征,并从高原水汽条件、地形动力影响以及环流特征给予解释。张雪芹等^[9]利用青藏高原及其周边地区75个地面气象台站的云量日均值资料,研究了高原地区1971-2004年间总云量的时空变化特征,给出了青藏高原总云量的分布特征,并指出青藏高原总云量存在减少趋势。Yu等^[10]利用地面台站资料,NCEP/NCAR再分析资料以及ISCCP资料,分析了厚层云与地面温度之间的正反馈效应。刘艳等^[11]利用ERBE(地球辐射平衡试验)和ISCCP资料统计了青藏高原地气系统OLR(长波射出辐射)以及云量,结果表明青藏高原OLR云强迫于总云量,高云量都有较好的相关性,其中高云贡献大,低云贡献小,且在青藏高原的东南部,云的温室效应表现明显。

简而言之,以往对青藏高原云的研究,主要侧重于云的时空特征,云强迫的OLR以及云对地气系统总体的辐射效应,但对于云辐射强迫及云对大气加热率的影响没有细致的分析。本文在分析高原总云量的时空分布基础上,着重分析了青藏高原夏季不同区域云的类型及辐射强迫,以及不同高度、不同类型的云对大气加热率的影响,为研

究青藏高原云对气候的影响提供了重要依据。

1 资料与分析方法

本文使用的云量资料由Aqua卫星(与Cloudsat同属于A-Train卫星群)搭载的CERES(clouds and the earth's radiant energy system,云和地球辐射能量系统)提供,数据集为:SSF(大气层顶、地表辐射和云的单轨迹扫描, single scanner footprint TOA/surface fluxes and clouds)。由于Cloudsat上搭载的CPR属于毫米波段雷达,能够较好地反应云在垂直方向的分布,但雷达水平分辨率较小,不利于对云量进行统计。CERES采用角分布辐射传输模式算法,在天底,它的空间分辨率为 20 km ,能够提供较为宽广范围内云的信息。利用CERES-SSF提供的云量的资料,可以较清晰地看到夏季青藏高原的云量分布,根据云量的空间分布以及青藏高原的地形,本文选出青藏高原的四个区域着重进行分析。

本文使用的辐射和云类型资料为Cloudsat卫星提供的2B-FLXHR、2B-CLDCLASS资料(2006-2009年夏季)。Cloudsat卫星发射于2006年4月18日,参与美国“地球系统探路者计划”。Cloudsat上搭载的CPR(cloud profiling radar,云廓线雷达)所发射的 94 GHz 的高频微波,垂直分辨率最大为 240 m ,共125层。卫星绕轨道1周约需99分钟,每条轨道上可以产生37088个云剖面,每天14条轨道在探测云层时几乎没有削弱,能够探测90%的冰云和80%的水云^[12-13],因而能很好地给出云的垂直结构和时空分布,云系中液水和冰水的含量。

在Cloudsat的CLDCLASS资料中定义了一种新的云类型区分方法,结合CPR和CALIPSO的雷达以及MODIS的主动遥感资料,利用垂直和水平云的特征、是否会有降雨出现、云体温度以及MODIS的辐射资料来确定云的信息,将云区分为:高云、高层云、高积云、层云、雨积云、积云、雨层云以及深对流云。利用CLDCLASS,对上述四个区域125层中有云的情况进行分析,统计各个区域125层中各种云类型所占的比例。

2B-FLXHR产品利用云中液相和冰相含水量、ECWMF再分析资料的大气状态变量值以及地面反射率数据,反演每个雷达剖面上的大气辐射通量和加热率。2B-FLXHR的反演模式的核心是用宽波段、双向、呈水平面的双倍递增辐射传输模式,在12个长波通道中使用常半球方程,而在6个短波通道中使用 δ -埃丁顿方程。利用大气状态

变量和获取的云中液态水含量及冰相水含量来逐个计算每个谱带分辨率下、每个垂直剖面的光学特性^[12]。这些光学特性可以描述每个平面的反射率(R)、透过率(T)以及源函数(Σ)等特征。用相互作用原理,系统的结合多层之间的反射率(R)、传输率(T)、源函数(Σ),就可以算出各个平面的波段辐射通量,进而可以算出每个平面的辐射加热率。利用 Cloudsat 的 2B-FLXHR 提供的 125 层辐射加热率资料,本文细致分析了上述四个区域有云情况下大气垂直辐射加热率,判断云在不同高度上对大气辐射加热率的影响。

2 结果和讨论

2.1 青藏高原总云量的空间分布

夏季(JJA)青藏高原地区盛行印度季风,在青藏高原的东南形成多云区,而且在念青唐古拉山脉以南以及相连的云贵高原一带,850~500 hPa 上空存在一个稳定的高温区,在季风影响下,这个高温区不断向高原南部输送水汽,加上暖空气的爬坡作用,也产生大量高原云。相对其他季节,夏季青藏高原云比较稳定,且多于其他季节,为研究云的辐射效应提供了独特的天然试验平台^[8]。

根据 CERES 提供的 2006–2007 年夏季云量资料,将数据细分到 0.5×0.5 格点中平均,得到两年夏季平均的总云量,如图 1 所示。

为了对比不同地区云对辐射强迫的影响,在青藏高原周边及中心地区选出四个具有代表性的区,并对各区的云类进行统计,所用的资料为 2006–2009 年夏季 Cloudsat 提供的 2B-CLDCLASS 数据集,其中 A 区($30^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $84^\circ \sim 89^\circ \text{E}$)为青藏高原的腹地,地势较为平缓。2006 年到 2007 年夏季 A 区的总云量平均约为 47%,云的类型主要为雨层云和高层云。B 区($35^\circ \sim 40^\circ \text{N}$, $97^\circ \sim 102^\circ \text{E}$)处于青藏高原东北部,多为山地,由于山脉的阻隔,水汽较少,2006 年到 2007 年夏季 B 区的总云量平均约为 35%,云的主要类型为雨层云和高层云。C 区($27^\circ \sim 32^\circ \text{N}$, $79^\circ \sim 84^\circ \text{E}$)位于青藏高原西南部,处于青藏高原边缘山地区,2006 年到 2007 年夏季 C 区的总云量平均约为 65%,云的主要类型为深厚的对流云和高层云。D 区($26^\circ \sim 31^\circ \text{N}$, $96^\circ \sim 101^\circ \text{E}$)位于青藏高原东南,处于念青唐古拉山脉地区,集中了青藏高原的大部分水汽。2006 年到 2007 年夏季 D 区的总云量平均约为 80%,云的类型以低云为主,主要为深厚的对流云及雨层云。从图 1 中可以看出,夏季青藏高原云量整体分布呈现自东南向西北减

少的趋势,这是由于夏季青藏高原受季风影响,在念青唐古拉山脉以南及其相连的云贵高原向青藏高原南部输送水分,气流爬坡降温,地形与天气系统相互作用造成了高原南部的多云区。

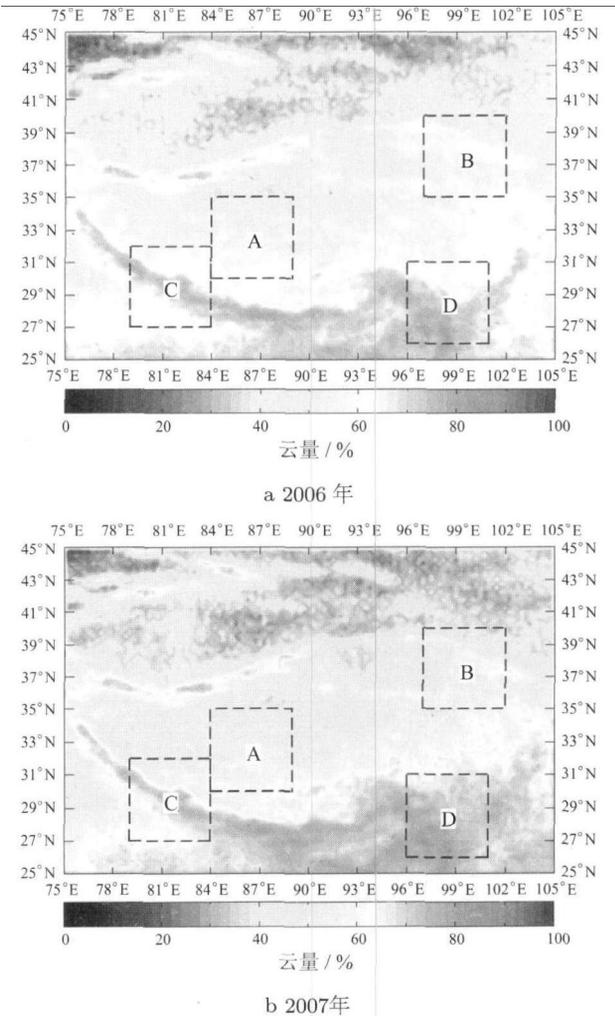


图 1 2006–2007 年夏季平均总云量的分布图

Figure 1 Cloud amount of 2006–2007 over Tibetan plateau for June through August

2.2 青藏高原的云辐射强迫

Cloudsat 所提供的 TOA (大气层顶), BOA (大气层底) 处云辐射强迫计算公式为

$$\Delta F = F_{\text{clear}} - F_{\text{allsky}}$$

其中: F_{clear} 为晴空时 TOA\BOA 处的长短波辐射强迫; F_{allsky} 为全天空有云时 TOA\BOA 处的长短波辐射强迫。

分析 A, B, C, D 四个区(参见图 1) 2006–2009 年间夏季云辐射强迫进行统计,可得这四年夏季 TOA, BOA 处云长短波辐射强迫影响,如表 1。

受地形影响,处于青藏高原北部的 B 区云量最少,在 TOA 处,云的短波辐射强迫为 -118.0 W/m^2 ,云的长波辐射强迫为 39.3 W/m^2 ,为四个区中绝对

值最小的. 受地形抬升和热力作用, 在水汽大量聚集的D区, 云量高于其他区域, 云的短波辐射强迫为 -247.0 W/m^2 , 云的长波辐射强迫为 53.0 W/m^2 , 云的长短波辐射强迫都高于其他区域. 云量对于这四个区的短波辐射影响较为明显(表2).

表1 2006—2009年夏季月平均TOA处云辐射强迫

Table 1 Monthly averaged cloud impacts on outgoing TOA radiative fluxes over Tibetan plateau for June through August, from 2006 to 2009 W/m^2

区域	SW	LW	Net
A	-130.9	45.2	-85.7
B	-118.0	39.3	-78.7
C	-151.7	41.7	-90.0
D	-247.0	53.0	-194.0

表2 2006—2009年夏季月平均BOA处云辐射强迫

Table 2 Monthly averaged cloud impacts on outgoing BOA radiative fluxes over Tibetan plateau for June through August, from 2006 to 2009 W/m^2

区域	SW	LW	Net
A	-155.5	53.9	-101.6
B	-139.1	42.7	-96.4
C	-173.7	36.7	-137.0
D	-282.6	53.0	-229.6

同样, 在云量最大的D区, BOA处的云短波辐射强迫绝对值也最大, 为 -282.6 W/m^2 , 而在云量最小的B区, 相应的云短波辐射强迫值也最小, 为 -139.1 W/m^2 . 云的长波辐射强迫对云量的依赖较小. 无论在TOA处还是BOA处, 云的短波辐射强迫都大于云长波辐射强迫, 且随着云量的增加, TOA, BOA处云短波辐射强迫越大. L'Ecuyer等^[14]的研究表明, 在 $25^\circ \sim 45^\circ \text{ N}$ 范围, TOA处云短波辐射强迫约为 -55 W/m^2 , 向上的云长波辐射强迫约为 25 W/m^2 ; 而在BOA处, 云短波辐射强迫约为 -60 W/m^2 , 云长波辐射强迫约为 20 W/m^2 , 该结果远小于本文所选的这四个代表区域的云辐射强迫值.

2.3 夏季青藏高原不同类型云加热率垂直分布

Smith等^[15]用INSAR和ECMWF资料分析青藏高原的能量收支, 结果表明: 在青藏高原, 云层内, 长波冷却率为 2 K/d , 短波加热率为 0.5 K/d . 在云层下, 由温室效应引起的长波加热率为 0.5 K/d , 但未描述其垂直分布特征. 本文利用Cloudsat所提供的大气加热率资料, 挑选2006年到2009年夏季卫星经过青藏高原的例子, 分析研究不同类型云对长短波加热率的影响. Cloudsat将一个剖面数据按高度分为125层, 分别计算各层的平均加热率, 如图2.

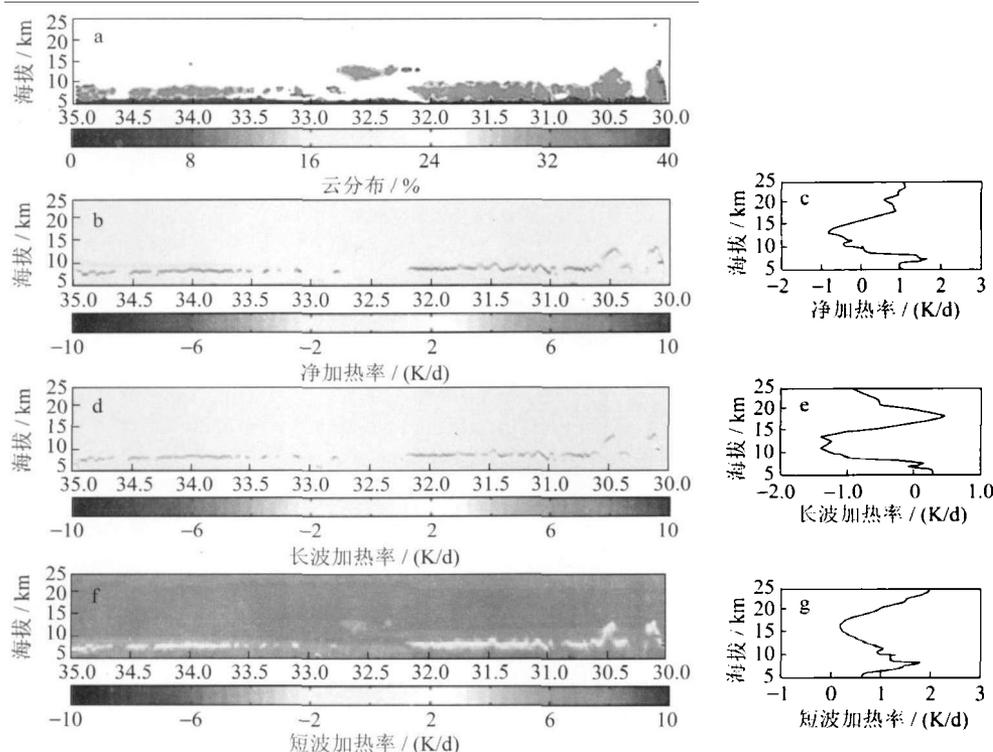


图2 单层云对大气加热率的影响

Figure 2 Single-layer clouds impact on atmosphere radiative heating rate

图2中的云为单层的雨层云,从图2a中可以看出,云层主要集中于5~10 km,云对短波辐射有显著的影响;从图2g中可以看出,云层中短波加热率最高值达1.8 K/d. 云的长波冷却率在不同高度差异较为明显,从图2e可以看出,在10~15 km的云层顶,长波冷却率接近1.5 K/d;由于云的“温室效应”^[15-16];在5 km以下的云层底,云的长波冷却效应较弱,甚至呈现出较小的加热效应,加热率接近0.3 K/d. 在20~25 km,短波加热率明显的增加,而在15~20 km,长波也有较弱的加热效应. 由于Cloudsat 垂直方向上能穿透较厚的低云,但对于高、薄的卷云容易被忽略,因此推测在20~25 km处,有比较薄的卷云的存在,使得在15~20 km高度上有类型于低层的大气加热效应. 这一推测有待于证实. 总体而言,在5~15 km,对于单层云,在云顶,云对大气为冷却效应,净冷却率最高值约为1 K/d;在云层内,云对大气表现为加热效应,大气

净加热率最高值约为1.7 K/d.

图3为多层的雨层云对大气加热率的影响,从图3a中可以看出,上下两层云之间的间隔高度大约为7~9 km. 云对短波辐射的影响表现为加热效应,在5~7 km和8~10 km上下两层云的内部,短波加热率最高达2 K/d;而在7~8 km的高、低云层之间,短波加热率很快趋于零. 在10~15 km高云的云顶、7~9 km云层间,云对长波辐射的影响表现为冷却效应. 在高云云顶长波辐射冷却率最大值接近2 K/d,在云层之间的长波辐射冷却率约为1.3 K/d. 而在5 km处的云底,长波加热率约为0.3 K/d. 总的来说,在5~15 km,对于多层云,在高云的云顶,云对大气表现为冷却效应,净冷却率最高约为0.9 K/d;在高云与低云的云层内部,云对大气表现为加热效应,净加热率最高约为1.3 K/d;在高云与低云之间,云对大气的影晌表现为冷却效应,净冷却率最高约为1 K/d.

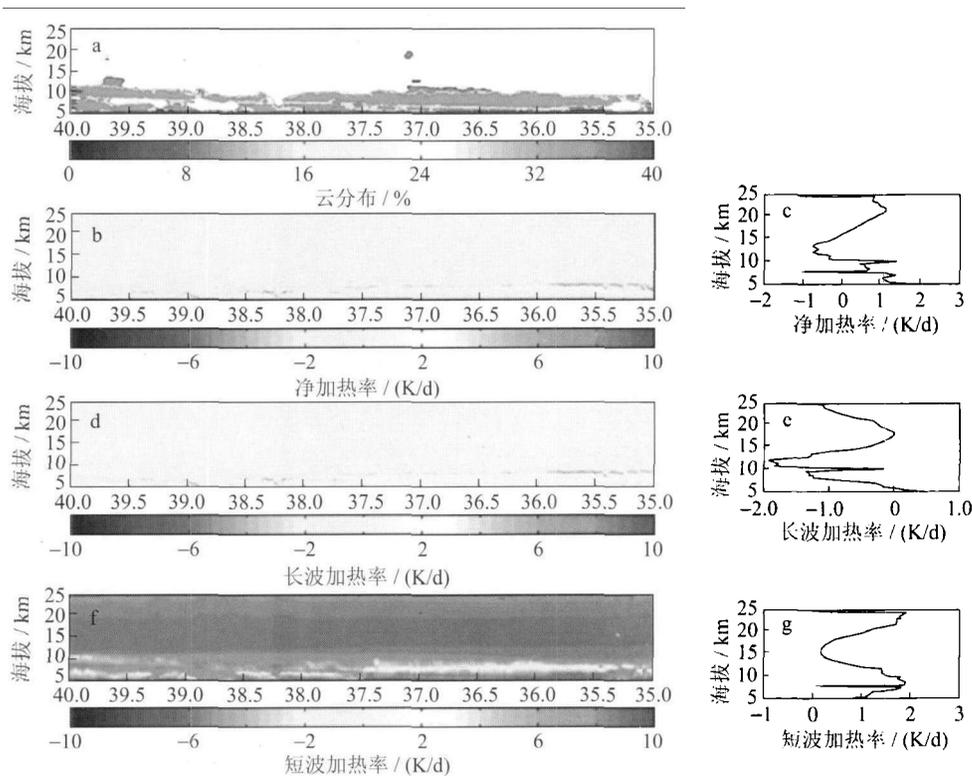


图3 多层云对大气加热率的影响

Figure 3 Multi-layer clouds impact on atmosphere radiative heating rate

图4中的云主要为深厚的对流云和雨层云. 在5~15 km的对流云和雨层云的云层里,云对短波辐射的影响为加热效应,短波辐射加热率最大值出现在对流云中,峰值接近于1.8 K/d. 云的长波辐射冷却率主要出现在13~17 km的对流云层顶附近及7~10 km的雨层云云顶附近,对流云云顶

的长波冷却率最大值为1.7 K/d,雨层云顶长波的冷却率为1.3 K/d. 从图4c可以看出,在对流云及雨层云里,云对大气具有加热效应,净加热率最大值约为1.3 K/d;对于高度较高的对流云顶,云对大气表现为冷却效应,净冷却率最大值约为1 K/d;而对于高度较低雨层云顶,由于对流云里的短

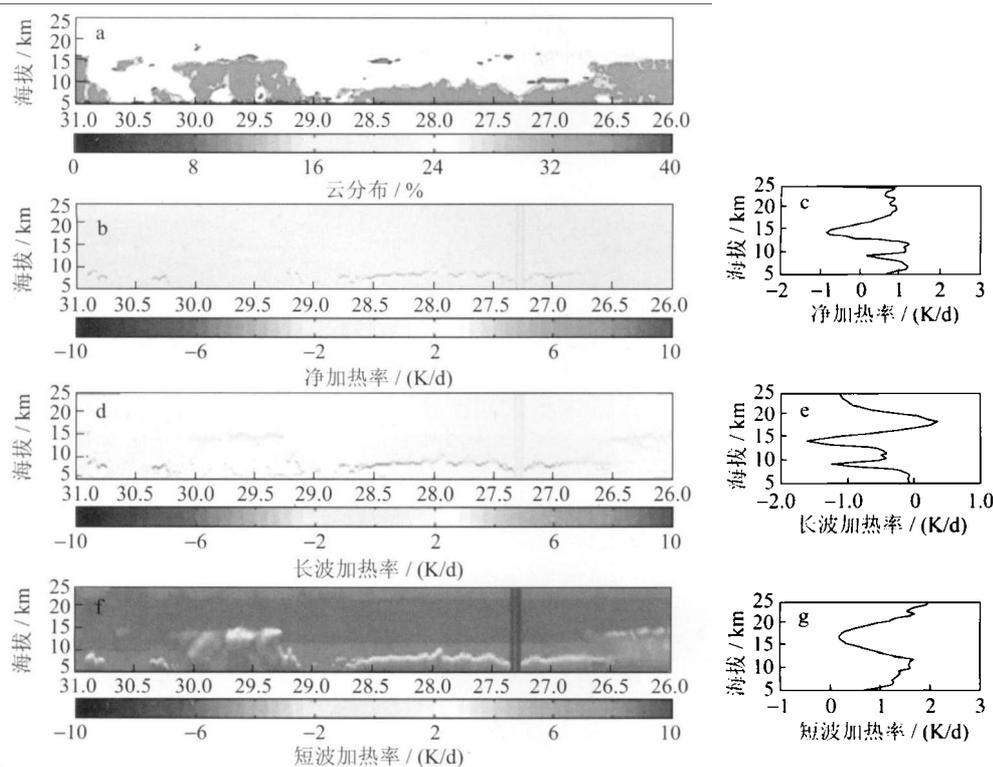


图4 不同类型云对垂直加热的影响

Figure 4 Different kinds of clouds impact on atmosphere radiative heating rate

波加热效应和云顶的长波冷却效应相互抵消, 在这一高度上, 云对大气表现为较弱的加热效应, 净加热率最大值约为 0.3 K/d.

3 结论

利用 CERES 云量资料以及 Cloudsat 辐射、云类资料, 本文分析了青藏高原夏季云量的空间分布以及不同地区云对长短波辐射的影响, 得出以下结论:

夏季青藏高原地区云量分布受地形影响明显, 主要集中于南部的山脉地区, 且以雨层云、深对流云、高层云为主. 在云量最多的东南部, 平均总云量达 80%.

受云量的影响, TOA 处和 BOA 处长短波辐射强迫都远远高于纬度平均值, 特别是在云量最多的青藏高原东南部, TOA 处云的短波辐射强迫为 -247.0 W/m^2 , BOA 处云的短波辐射强迫为 -282.6 W/m^2 .

从大气加热率的垂直分布来看, 有云存在时, 对于短波来说, 在云层中有明显的加热效应; 而对于长波, 在云顶有明显的冷却效应, 而在云底, 有较弱的加热效应. 当存在单层云时, 在云顶, 云对大气为冷却效应, 净冷却率最高值约为 1 K/d; 在云层内, 云对大气表现为加热效应, 大气净加热率

最高值约为 1.7 K/d. 当存在多层云时, 在高云与低云之间, 由于长波的冷却效应显著, 云对大气的表现表现为冷却效应, 其最高值接近于云顶对大气的冷却率; 在高云与低云的云层内部, 云对大气表现为加热效应, 净加热率最高约为 1.3 K/d. 当存在多种类型的云时, 大气净加热率可以看作是各种单层云在垂直分布上的叠加. 对于高度较低的云层顶, 由于高云内部的短波加热效应和低云云顶的长波冷却效应相互抵消, 在这一高度上, 云对大气表现为较弱的加热效应.

本文利用 Cloudsat 的云廓线雷达资料, 较清晰地分析了青藏高原夏季云的辐射强迫以及长短波加热率的空间分布, 为细致分析云在影响青藏高原气候的变化方面提供了有意义的参考. 由于 Cloudsat 在探测时会将 15 个探测点平均到 5 km 的范围内, 导致丢失一些比较薄的高卷云, 因此本文结论对于低云有更高的可信度, 而高卷云的辐射特性, 有待进一步验证.

参考文献

- [1] 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 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, 2007, 31(3): 486-494.

- [2] ARAKAWA A. The cumulus parameterization problem: past, present, and future[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(13): 2493–2525.
- [3] ARAKAWA A, SCHUBERT W H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I [J]. *J Atmos Sci*, 1974, 31(3): 674–701.
- [4] MORCRETTE J J, CHRISTIAN Jakob. The response of the ECMW model to changes in the cloud overlap assumption[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(6): 1707–1732.
- [5] LIU Yi-min, BAO Qing, DUAN An-min, et al. Recent progress in the impact of the Tibetan plateau on climate in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24(6): 1060–1076.
- [6] 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局[J]. *大气科学*, 2005, 29(1): 47–56.
- [7] HE Jin-hai, JU Jian-hua, WEN Zhi-ping, et al. A review of recent advances in research on Asian Monsoon in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24(6): 972–992.
- [8] 刘瑞霞, 刘玉洁, 杜秉玉. 利用 ISCCP 资料分析青藏高原云气候特征[J]. *南京气象学院学报*, 2002, 25(2): 226–234.
- [9] 张雪芹, 彭莉莉, 郑度, 等. 1971–2004 年青藏高原总云量时空变化及其影响因子[J]. *地理学报*, 2007, 62(9): 959–969.
- [10] YU Ru-cong, WANG Bin, ZHOU Tian-jun. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by Tibetan plateau[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(13): 2702–2713.
- [11] 刘艳, 翁笃鸣. 青藏高原云对地气系统长波射出辐射(OLR)强迫的气候研究[J]. *南京气象学院学报*, 2000, 23(2): 270–276.
- [12] 张华, 石广玉, 刘毅. 两种逐线积分辐射模式大气吸收的比较研究[J]. *大气科学*, 2005, 29(4): 581–593.
- [13] STEPHENS G L, VANE D G, BOAIN R J, et al. The Cloudsat mission and the A-Train: a new dimension of space-based observations of clouds and precipitation[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83(12): 1771–1790.
- [14] L'ECUYER T S, NORMAN B W, HALADAY T, et al. Impact of clouds on atmosphere heating based on the R04 Cloudsat fluxes and heating rates data set[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(15): JD009951.1–JD009951.5.
- [15] SMITH E A, SHI L. Reducing discrepancies in atmospheric heat budget of Tibetan plateau by satellite-based estimates of radiative cooling and cloud-radiation feedback[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 1995, 56(3): 229–260.
- [16] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 826–840.

(责任编辑: 张勇)