

张丁玲, 黄建平, 刘玉芝, 等. 利用 CERES(SYN) 资料分析青藏高原云辐射强迫的时空变化[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1192-1202.

利用 CERES(SYN) 资料分析青藏高原云辐射强迫的时空变化

张丁玲¹, 黄建平¹, 刘玉芝¹, 陈斌¹, 张磊²

(1. 兰州大学 大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国人民解放军 92543 部队, 河南 济源 454650)

摘要: 利用 2001 年 11 月—2005 年 10 月“云与地球辐射能量系统(CERES)”辐射和云资料 SYN(Synoptic Radiation Fluxes and Clouds), 分析了青藏高原(下称高原)地区不同高度云辐射强迫的时空变化特征。结果表明:(1)高原整体为云强迫正、负值的过渡区域, 这种过渡性有显著的季节差异和区域划分。高原东南部表现出较强的冷却效应, 其西部和东北部干旱区在冬、春季表现为较弱的加热效应。(2)高云、高的中云和低的中云对云短波辐射强迫的季节变化都有贡献, 其中中云是导致区域差异的主要因素; 云长波辐射强迫的区域差异不明显, 但季节差异显著, 这主要是由高的中云和高云的变化引起的, 且云量是主要的影响因子, 高云云量虽小但其影响不可忽视。(3)高云在高原地区产生净加热效应, 高的中云既产生加热作用也产生冷却作用, 低的中云产生净冷却效应。(4)云短波辐射强迫在云辐射强迫的日变化中仍然占主导地位, 日变化的区域差异主要是由云量引起的。白天, 在云短波辐射强迫的日变化中, 低的中云贡献更大。高云对云长波辐射强迫的日变化贡献主要在晚上, 低的中云在夜间对云长波辐射强迫有抑制作用。

关键词: 青藏高原; CERES(SYN); 云辐射强迫; 时空变化

文章编号: 1000-0534(2012)05-1192-11 **中图分类号:** P426.5 **文献标志码:** A

1 引言

近年来, 气候变化已日益成为各国科学家研究的重点和热点。大气顶处于辐射平衡表征了气候系统的基本态^[1], 为了达到气候平衡, 由地—气系统吸收的入射太阳辐射能量必须与发射的热红外辐射能量相当。任何能扰动这种平衡, 并因此可能改变气候的因子都称为辐射强迫因子, 所产生的对气候系统的强迫则称为辐射强迫, 影响气候系统的主要辐射强迫因子包括温室气体、冰雪和云等。其中, 云是影响气候变化的重要因子之一, 全球的平均云量为 65% 左右, 它能调节地—气系统的辐射能量和水分循环的平衡, 在天气、气候以及全球变化中都起着十分重要的作用。

青藏高原(下称高原)云系是联系各种局地天气乃至全球气候各子系统的纽带, 国内外的许多研究

表明^[2-3], 高原的动力、热力作用对全球气候、东亚大气环流、亚洲季风和我国灾害性天气以及气候异常都有十分重要和显著的影响。受地形阻挡, 来自热带的水汽很少能输送到高原, 并且高原的大气污染物也相对较少。因此, 高原为研究云辐射反馈作用提供了一个独特的天然试验平台^[4]。但由于高原地广站稀, 尤其在高原西部广大无台站和无资料地区, 使得依靠台站观测资料的分析方法受到很大限制, 直到气象卫星时代, 才使得这方面的研究有了进一步的发展。

王可丽等^[5]利用 1985—1988 年地球辐射收支实验 ERBE 和国际卫星云气候计划 ISCCP 资料, 分析了高原的云辐射强迫, 得到年平均云净辐射强迫值为 $-41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 马晓燕等^[6]利用 1985—1988 年 ERBE 资料分析了中国地区云辐射强迫的时空变化指出, 就全国范围而言, 川黔地区是最大的云

收稿日期: 2011-09-19; 定稿日期: 2012-03-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB955301)资助

作者简介: 张丁玲(1985—), 女, 甘肃白银人, 博士生, 主要从事大气辐射和大气遥感研究。E-mail: zhangdl04@126.com

强迫负值区; 其次是长江中下游地区和华北地区, 高原为正、负强迫值的过渡区, 高原北侧的西北干旱区冬季出现较弱的云强迫正值。虽然科学家们对此已经进行了不少研究, 但由于受观测资料的限制, 多集中在对云整体辐射强迫效应的研究, 缺乏对不同高度云辐射强迫特性的研究。另一方面, 随着工业化快速发展, 人类活动排放的大气温室气体 (GHGs) 和气溶胶等越来越多, 间接地影响了大气中的云物理和微物理特性, 进一步改变了云辐射效应, 使得云辐射强迫的研究更为复杂。随着航天和计算机技术的迅速发展, 卫星资料在分辨率、观测精度及观测项目上已取得了重大突破。因此, 有必要重新利用较高分辨率、新时间序列及更多观测内容的卫星资料对云辐射强迫状况进行新的认识和更深入的探讨。本文利用高时空分辨率的云与地球辐射能量系统 CERES(Synoptic Radiative Fluxes and Clouds, SYN) 资料, 对全球变化具有敏感响应和强烈影响的高原地区不同高度云辐射强迫的时空变化特征进行分析。

2 资料选取

采用 2001 年 11 月—2005 年 10 月美国环境卫星 Terra 获取的 CERES_SYN_MODIS_Edition2C 资料, 资料更新至 2005 年 10 月 31 日。选取的资料范围是 $25^{\circ}-40^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}-105^{\circ}\text{E}$ 。该资料为月资料, 包括每天 02:00, 05:00, 08:00, …… , 23:00 (北京时, 下同) 全天空和晴空条件下, 地球表面和大气层顶处的大气长波、短波辐射通量和窗区的辐射通量, 以及 4 种不同高度上的云分数、云光学厚度和云水含量等云参数。附录 1 是从观测数据得到 CERES(SYN) 的数据流程图, 从该流程图中可看到, SYN 数据集^[7-8]是把 CERES 中辐射通量和云的单卫星格点化资料 (FSW) 作为绝对参考, 进一步结合同步地球静止卫星资料 (GGEO) 和大气结构数据 (ASTR) 订正, 并通过时间插值得到, 具体的插值方法见文献^[7]。

与以往的卫星资料相比, 该资料具有以下优点:

(1) CERES(SYN) 为用户提供了时空分布均匀的格点数据, 空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 每天提供以世界时为标准每 3 h 一次的数据。高时空分辨率更有利于研究云辐射强迫的区域变化、日变化以及云系统的生命周期等特征。为了更好地估计云辐射效应, CERES 采用宽带测量仪获得大气层顶的辐射

通量资料, 把云参数的反演与相同时刻大气层顶的宽带辐射通量计算匹配起来, 从而改进云辐射强迫计算的准确性。

(2) 通过引进新的 CERES 角分布模式, 改善了扫描图像的分辨率和卫星测量的辐射资料, 得到更精确的大气层顶辐射通量。为了确定云和地面特征, 在复杂的 CERES 观测域内, 利用高光谱分辨率和高空间分辨率处理云图像资料, 这是 CERES 相对 ERBE 辐射收支分析的一个重要改进。CERES 云特征精确度的不断改进以及新的角分布模式的采用将会使这些误差减小 3 倍~4 倍。此外, 每一个 CERES 扫描区域的云特征和辐射通量也是为大气层内辐射通量提供更精确估计的关键。

总之, 以上这些技术手段使得该数据集对云辐射通量的观测精度已成为目前所有卫星资料中最高的^[9-10]。

3 方法介绍

就云辐射效应而言, 一方面云吸收和散射入射太阳辐射, 它对太阳辐射较高的反照率起冷却地—气系统的作用, 这是云的反照率效应; 另一方面, 云又捕获地表和对流层低层发射的热红外辐射, 以它自身较低的温度和发射率向外发射热辐射, 进而加热地—气系统, 这是云的温室效应^[11]。这两种相反作用的综合效应将对地—气系统辐射收支、大气环流和气候产生显著的影响。

3.1 云辐射强迫的定义

根据 Ramanathan 的定义^[12], 云辐射强迫为有云天与晴天辐射通量的差值, 因此, 对于短波而言:

$$F_S = F_{\text{SW}}^{\text{clr}} - F_{\text{SW}} = I_0(\alpha - \alpha^{\text{clr}}), \quad (1)$$

其中: F_S 为云短波辐射强迫; $F_{\text{SW}}^{\text{clr}}$ 为晴天短波辐射通量; F_{SW} 为云天短波辐射通量; I_0 为天文太阳辐射; α 为云天行星反照率; α^{clr} 为晴天行星反照率。

对于长波而言:

$$F_L = F_{\text{LW}}^{\text{clr}} - F_{\text{LW}}, \quad (2)$$

其中: F_L 为云长波辐射强迫; $F_{\text{LW}}^{\text{clr}}$ 为晴天长波辐射通量; F_{LW} 为云天长波辐射通量。

于是, 得到净的云辐射强迫 F_N 为

$$F_N = F_S + F_L, \quad (3)$$

其中: F_S 为短波辐射强迫; F_L 为长波辐射强迫。式(3)中的辐射强迫是考察云对地—气系统辐射收支影响的重要指标。由于 CERES(SYN) 资料提供

每个格点上不同高度云的云分数,所以可以用这个量挑出云天个例,把云分数 > 98% 的格点定为云天,进而对不同高度云辐射强迫特征进行分析。

3.2 影响云辐射强迫的因子

根据式(1)可知,影响云短波辐射强迫 F_s 的主要因子为天文太阳辐射和行星反照率。因此,所有影响天文太阳辐射和行星反照率的因素均对短波云辐射强迫产生作用,其中主要有纬度、季节、大气和云状况以及地表特征等。单位面积的大气柱上界接收到的太阳辐射能日总量为

$$Q_d = \frac{T}{\pi} d_m^2 \bar{S}_0 (\omega_0 \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_0), \quad (4)$$

其中: T 为一昼夜的时间; d_m 为日地距离订正因子; \bar{S}_0 为太阳常数; ω_0 为日出的太阳时角,随纬度 (φ) 和季节 (δ) 而不同。行星反照率表示射入地球的太阳辐射被大气、云及地面反射回宇宙空间的总百分数^[13]。因此,纬度和季节对短波云辐射强迫的影响主要是通过影响天文太阳辐射来体现的,云和地表及大气反射特性的影响则由行星反照率的变化显示^[14]。

根据刘艳等^[15]的研究结果,可将式(2)进一步写成:

$$F_L = F_{LW}^{cl} \left[1 - \frac{\epsilon_N}{\epsilon_0} \left(\frac{T_N}{T_0} \right)^4 \right] A_c, \quad (5)$$

其中: ϵ 为比辐射率; T 为地—气系统大气柱的等效温度; A_c 为云量,取值域为 $[0, 1]$; 下标 0 和 N 分别表示晴天和全天云状况。式(5)表明影响长波云强迫的因子较多,主要有云量、云以及大气和地表温度等。如果说晴天云长波辐射强迫主要由下垫面和大气层的温度条件决定,而有云时由于云辐射特性以及云顶温度较同高度自由大气温度偏低,则可导致长波云强迫减少。若云辐射特性一定,大气和地表状况又比较一致,云量便是影响云强迫的主要因素^[16]。

3.3 高原区域划分

图1是根据高原的定义,在 $25^\circ-40^\circ\text{N}$ 、 $70^\circ-105^\circ\text{E}$ 区域中选取海拔 > 3 000 m 的高原区域。我们知道在云辐射强迫→地表热力强迫→气候变化→云辐射强迫这一反馈过程中,地表热力过程是一个重要环节。高原地表热状况集中体现了高原热力作用的基本状态,因而也与热力强迫作用下的气候变化如降水、季风等密切相关。由于地表温度与气候变化关系密切,气候变化的区域特征也应该在地表温度场上有所表现,或者说在某种程度上可以反映

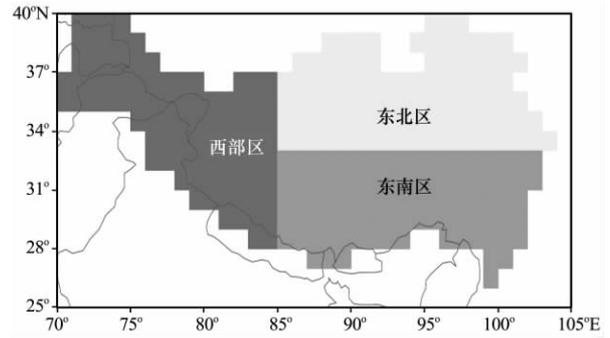


图1 高原的3个区域划分

Fig. 1 Division of three regions in the Qinghai-Xizang Plateau(QXP)

地表温度变化的分布特征。江灏等^[17]通过对 ISCCP C2 卫星观测地表温度资料,按照气候区划特征将高原划分为西部区 ($25^\circ-40^\circ\text{N}$, $70^\circ-85^\circ\text{E}$)、东北区 ($33^\circ-40^\circ\text{N}$, $85^\circ-105^\circ\text{E}$) 及东南区 ($25^\circ-33^\circ\text{N}$, $85^\circ-105^\circ\text{E}$) 3 个区域(见图1),其东西分界在 85°E ,南北分界在 33°N ^[17]。本文针对高原的这3个区域分析近些年来高原不同高度云强迫特征以及不同的影响因子对于不同高度上云辐射强迫的贡献,得到不同高度的云在高原地区的净辐射效应。

4 结果分析

目前,云的观测资料主要来自地面台站、卫星以及资料同化数据。王可丽等^[18]对比分析了这3种云量资料,发现资料同化数据在高原地区存在固有的缺陷。由于地面台站资料在高原空间覆盖率太小不具有代表性,故选取相对较好的卫星资料进行研究。CERES(SYN)中根据云顶压强将云划分为4种不同高度的云:低云(>700 hPa)、低的中云(700~500 hPa)、高的中云(500~300 hPa)和高云(<300 hPa)^[19]。又考虑到高原平均海拔为 3 000 m,而卫星数据中的云是根据云顶压强来分类的,由于低云的卫星数据在高原不适用,所以本文只对高云、高的中云和低的中云的辐射强迫效应进行研究。

4.1 云辐射强迫特性

表1为高原西部区、东北区及东南区3个区域云辐射强迫的年平均和季节平均值。虽然3个区域的大小不一样,每个区域所挑选的云天个例数也存在差异,但是本文所选的个例覆盖了高原95%以上的区域,且个例数较为稳定,故所得结果具有较好的代表性。

表 1 高原地区所有云总辐射强迫的季和年平均
Table 1 Seasonal and annual means of total cloud radiation forcing over QXP

类型	季节	西部区	东北区	东南区
短波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	-50.6	-50.8	-85.1
	夏季	-94.9	-135.6	-142.7
	秋季	-89.7	-108.6	-120.5
	冬季	-41.4	-26.7	-58.5
	年平均	-69.2	-80.4	-101.7
长波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	71.8	76.5	74.5
	夏季	70.3	64.4	64.2
	秋季	66.7	57.5	58.9
	冬季	57.6	56.7	55.1
	年平均	66.6	63.8	63.2
净辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	21.2	25.7	-10.6
	夏季	-24.6	-71.2	-78.5
	秋季	-23.0	-51.2	-61.6
	冬季	16.2	30.0	-3.4
	年平均	-2.6	-16.7	-38.5
个例数	春季	48650	53244	52059
	夏季	35379	82847	100748
	秋季	27441	58868	85728
	冬季	30937	22997	18110
	总数	142407	217956	256645

从年平均来看,云在高原的3个区域都产生净冷却效应,并且从西部区到东南区依次增强,分别为 -2.6 , -16.7 和 $-38.5 W \cdot m^{-2}$ 。从季节平均来看,冬、春季高原是云强迫正负值的过渡区,从西部区到东南区由加热效应转变为冷却效应,夏、秋季均为冷却效应,也有明显的区域变化;云短波辐射强迫具有明显的区域差异,从西部区到东南区呈依次增强趋势,分别为 -69.2 , -80.4 和 $-101.7 W \cdot m^{-2}$ 。此外,云短波辐射强迫还有明显的季节变化,夏、秋季的云短波辐射强迫明显大于冬、春季。云长波辐射强迫区域差异不明显,但季节差异显著,从春季到冬季云长波辐射强迫的加热作用呈减小趋势。

由此可见,高原地区冬、春季辐射加热效应和辐射冷却效应共存,以长波辐射加热为主,而夏、秋季则是云短波辐射的冷却效应占主导地位。

下面对出现以上现象的原因进行分析。由于辐射强迫是晴空和云空射出辐射的差,所以先分析晴

空短波和长波射出辐射的特征。从表2中可看出,晴空长波射出辐射没有明显的区域差异,但有小的季节性差异,冬、春季较小,夏、秋季较大,晴天长波射出辐射主要由下垫面和大气层的温度条件所决定,而有云时由于云辐射特性以及云顶温度较同高度自由大气温度偏低,导致长波云强迫减少。图2是3种不同高度云的云分数在夏季和冬季平均的区域分布。从图2中可看出,高云和低的中云区域变化明显,而高的中云区域分布较均匀。从表3中也可看出,高的中云在总云量中占绝大多数,而且无论是哪个区域,高的中云从春季到冬季都是依次增加的,这就导致有云时候长波射出辐射区域差异小且从春季到冬季逐渐减小。此外,高云云量在3个区域从春季到冬季是逐渐减小的,而高云产生的辐射加热作用也是导致长波辐射强迫季节变化的原因之一。

表 2 高原晴空射出辐射的季节和年平均均值

Table 2 Seasonal and annual means of shortwave and longwave up radiation fluxes over QXP

辐射类型	季节	西部区	东北区	东南区
晴空短波射出 辐射 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	138.7	74.1	101.6
	夏季	105.8	93.8	76.9
	秋季	66.7	79.2	72.7
	冬季	75.6	43.8	58.5
	年平均	96.7	72.7	77.4
晴空长波射出 辐射 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	231.2	239.7	247.7
	夏季	264.9	257.1	254.3
	秋季	261.4	255.4	251.7
	冬季	217.0	220.5	231.0
	年平均	243.6	243.2	246.2

由此可见,区域长波辐射强迫的较小差异和季节变化主要是由高的中云变化引起的,高云云量虽小但对长波云辐射强迫的影响也不可忽视。

此外,对比表1和以往的研究^[6, 15, 21-23]发现,就全国范围而言,云短波辐射、长波辐射和净辐射强迫的冬、夏季特征显著,且夏季云强迫比冬季大很多,春、秋季则处于冬、夏季的过渡阶段。从云强迫的净辐射效应来看,川黔地区是最大的云强迫负值区,而高原东南区则是另一个负高值中心,其次是长江中下游地区和华北地区;而塔里木盆地、以吐哈盆地为中心的西北干旱区(包括高原主体西部)则为小的正值区。总的来说,高原整体为云强

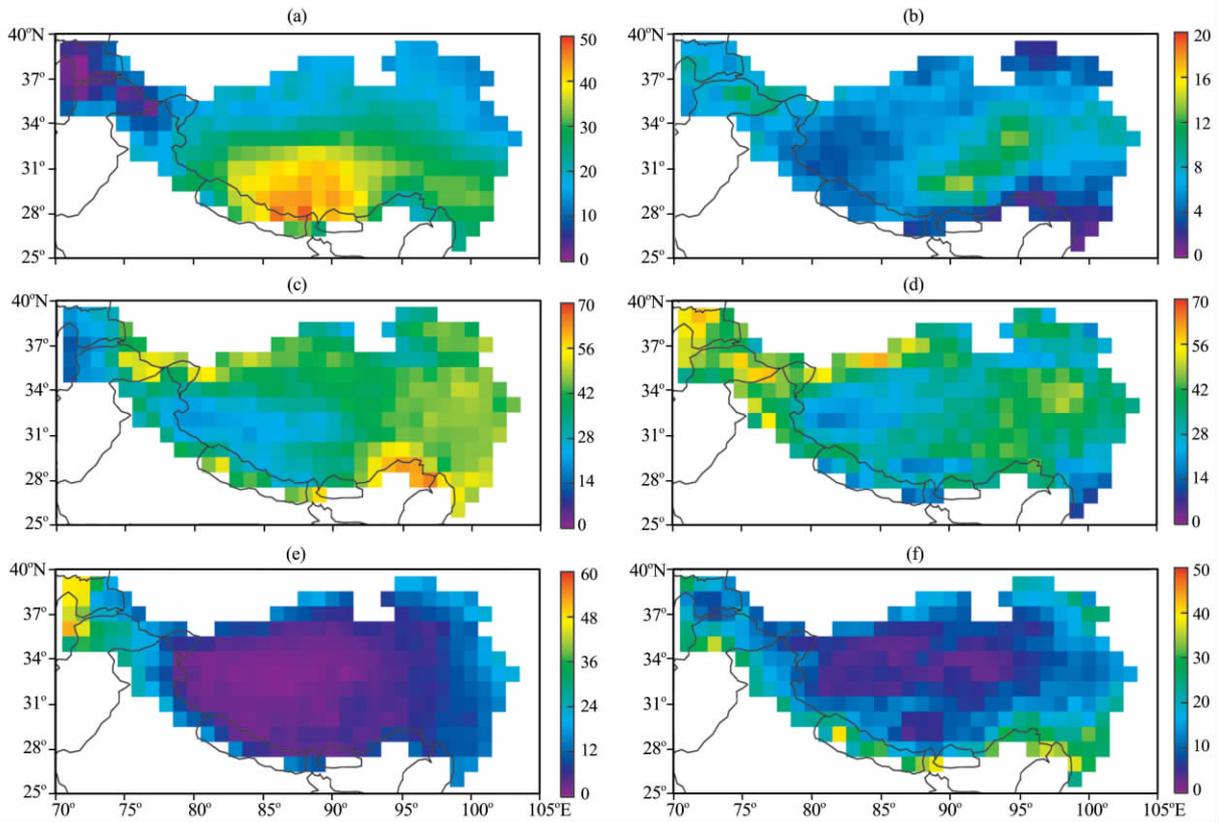


图 2 夏季(左)和冬季(右)高原云分数分布

(a)、(b) 高云, (c)、(d) 高的中云, (e)、(f) 低的中云

Fig. 2 Distribution of cloud area fraction over QXP in summer(left) and winter(right).

(a), (b) high cloud, (c), (d) upper-middle cloud, (e), (f) lower-middle cloud

表 3 高原不同区域、不同种类云量的季和年平均

Table 3 Seasonal and annual means of different types of cloud fraction in the different regions over QXP

季节	西部区				东北区				东南区			
	总云量	高云	高中云	低中云	总云量	高云	高中云	低中云	总云量	高云	高中云	低中云
春季	98.7	28.7	63.5	6.4	98.8	39.2	54.8	4.7	98.6	33.3	57.8	7.6
夏季	98.4	27.6	63.3	7.5	99.0	31.7	63.8	3.5	99.0	43.1	52.0	3.8
秋季	98.4	29.3	64.3	4.8	98.9	27.5	63.2	8.2	99.0	38.9	51.7	8.4
冬季	98.6	19.2	74.0	5.4	98.5	23.4	68.9	6.3	98.2	21.0	66.7	10.5
年平均	98.5	26.2	66.3	6.1	98.8	30.4	62.6	5.7	98.7	34.1	57.1	7.6

迫正负值的过渡区域, 这种过渡性有显著的季节差异和区域划分, 高原东南区表现出较强的冷却效应, 高原西部区和东北区干旱区在冬、春季表现为较弱的加热效应。

由于研究区域只是一个很小的区域, 故纬度对短波辐射的影响可以忽略。就短波辐射而言, 除了有、无积雪外, 晴空射出辐射变化较小, 这从表 2 中也可以看出, 多雪覆盖的高原西部区短波射出辐射明显大于其他两个区域, 因此, 短波辐射强迫会

更多地依赖于云量的变化。云量是影响辐射强迫的重要因子, 但是从表 3 中可看到, 从高原西部区、东北区到东南区, 高云云量依次减小, 高的中云云量分布较均匀, 低的中云在东南区最大、东北区最小, 这与前面得出的云短波辐射强迫从高原西部区到东南区依次增强不一致。所以很有必要对不同云的辐射强迫效应进行更细致的分类研究。

4.2 不同种类云的辐射强迫

从高云、高的中云和低的中云云辐射强迫的季

表 4 高原地区高云辐射强迫季节和年平均

Table 4 Seasonal and annual means of high cloud radiation forcing over QXP

类型	季节	西部区	东北区	东南区	类型	季节	西部区	东北区	东南区
短波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	-31.6	-27.5	-31.4	净辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	61.9	69.8	69.5
	夏季	-57.54	-79.8	-66.6		夏季	34.6	16.6	31.8
	秋季	-46.8	-50.8	-38.3		秋季	50.2	47.0	60.3
	冬季	-34.0	-4.9	-21.7		冬季	40.6	71.1	59.3
	年平均	-42.5	-40.8	-39.5		年平均	46.8	51.1	55.2
长波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	93.5	97.2	100.9	个例数/个	春季	4534	8308	5265
	夏季	92.2	96.4	98.4		夏季	2815	8416	18658
	秋季	97.0	97.8	98.6		秋季	3748	5588	14748
	冬季	74.6	76.0	81.0		冬季	1992	1468	1165
	年平均	89.3	91.9	94.7		总数	13089	23780	39836

表 5 高原地区高的中云辐射强迫季节和年平均

Table 5 Seasonal and annual means of upper-middle cloud radiation forcing over QXP

类型	季节	西部区	东北区	东南区	类型	季节	西部区	东北区	东南区
短波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	-36.5	-43.3	-72.9	净辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	26.5	21.3	-8.6
	夏季	-62.0	-140.2	-147.5		夏季	4.2	-86.8	-101.4
	秋季	-64.9	-113.4	-130.3		秋季	-4.4	-62.9	-85.4
	冬季	-30.2	-22.9	-52.0		冬季	24.3	28.5	-1.4
	年平均	-48.4	-80.0	-100.7		年平均	12.7	-25.0	-49.2
长波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	63.1	64.6	64.3	个例数/个	春季	11693	8936	8074
	夏季	66.2	53.4	46.1		夏季	8650	23574	20187
	秋季	60.5	50.5	44.9		秋季	8205	15916	14972
	冬季	54.5	51.4	50.6		冬季	11470	6182	3879
	年平均	61.1	55.0	51.5		总数	40018	54608	47112

表 6 高原地区低的中云的辐射强迫季节和年平均

Table 6 Seasonal and annual means of lower-middle cloud radiation forcing over QXP

类型	季节	西部区	东北区	东南区	类型	季节	西部区	东北区	东南区
短波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	9.7	-50.7	-176.2	净辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	1.9	-29.9	-165.1
	夏季	-25.2	-86.7	-243.1		夏季	-28.0	-73.0	-234.6
	秋季	-102.8	-81.0	-137.2		秋季	-93.9	-86.3	-148.1
	冬季	-27.2	-35.8	-142.8		冬季	-29.1	-34.2	-131.5
	年平均	-36.4	-63.6	-174.8		年平均	-37.3	-55.9	-169.8
长波辐射强迫 $/(W \cdot m^{-2})$	春季	-7.8	20.8	11.1	个例数/个	春季	302	77	169
	夏季	-2.8	13.7	8.5		夏季	97	119	44
	秋季	8.9	-5.3	-10.9		秋季	28	645	469
	冬季	-1.9	1.6	11.3		冬季	77	114	152
	年平均	-0.9	7.7	5		总数	504	955	834

节平均和年平均(表 4~6)可看出,高云在高原地区产生净的加热效应,并且从高原西部区、东北区和东南区加热效应依次增加,这与表 2 中高云云量在这 3 个区域的依次增加是一致的。高的中云在高原东北区和东南区产生冷却效应,东南区的冷却效应明显大于东北区,而西部区高的中云则呈现出加热效应。低的中云在高原区域均产生冷却效应,并且从西部区、东北区及东南区依次增强。

对于云短波辐射强迫,不论是高云、高的中云和低的中云都是夏、秋季大,冬、春季小,说明这 3 种云对云短波辐射的季节变化都有贡献。但就区域变化而言,高的中云和低的中云都从西部区到东南区依次增大,而高云却恰恰相反,说明中云是云短波辐射强迫区域变化的主导因素。

就云长波辐射而言,高云从高原西部区到东南区依次增强,高的中云恰好相反,但前面提到云的长波辐射强迫区域变化不明显,可以看出这里面高云和高的中云都有贡献。就季节变化而言,高云辐射强迫在高原东南区和东北区从春季到冬季逐渐减

弱,而且这两个区域的高云云量较西部区的大,高的中云辐射强迫在高原西部区逐渐减弱。可见,该区域高的中云云量最大。因此,云量是影响云长波辐射强迫季节变化的主要因子。

综上所述,高云在高原地区产生净加热效应,高的中云既有加热作用也有冷却作用,低的中云产生净冷却效应。这 3 种云对云短波辐射的季节变化都有贡献,中云是导致云短波辐射强迫区域差异的主要因素。云量是影响云长波辐射强迫季节变化的主要因子,而云长波辐射强迫则没有明显的区域差异,高云和高的中云都有贡献。

4.3 3 h 平均云辐射强迫的日变化

本文所采用的 CERES(SYN)资料与以往其他的卫星资料相比,其最大的优势在于 SYN 每天有 8 个值,每 3 h 间隔就有 1 个平均值,资料密度比较大,而且相比地面资料 SYN 的空间覆盖率大且比较均匀,因此,可以用它来分析 3 h 平均云辐射强迫的日变化。

图 3 给出了高原西部区、东南区和东北区 3 个

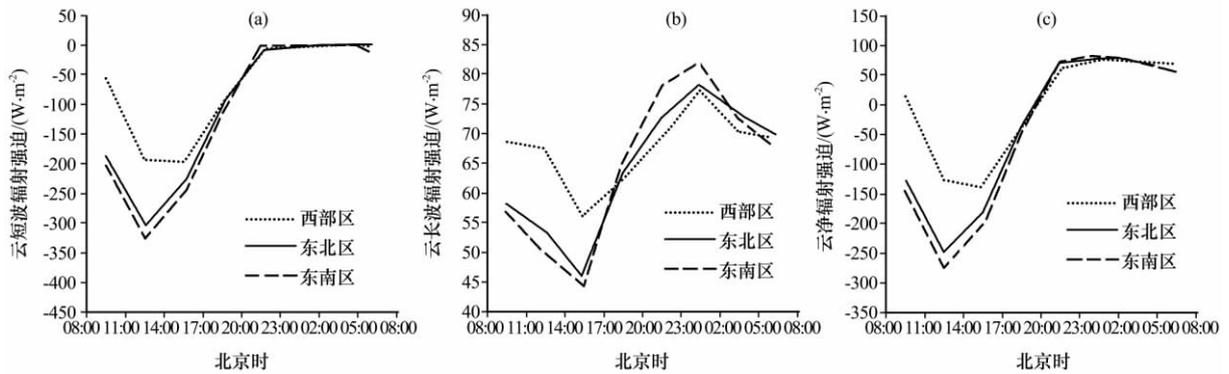


图 3 青藏高原不同区域云短波(a)、长波(b)及净辐射强迫(c)的日变化

Fig. 3 The diurnal variations of shortwave(a), long wave(b) and net cloud radiative(c) forcings over QXP

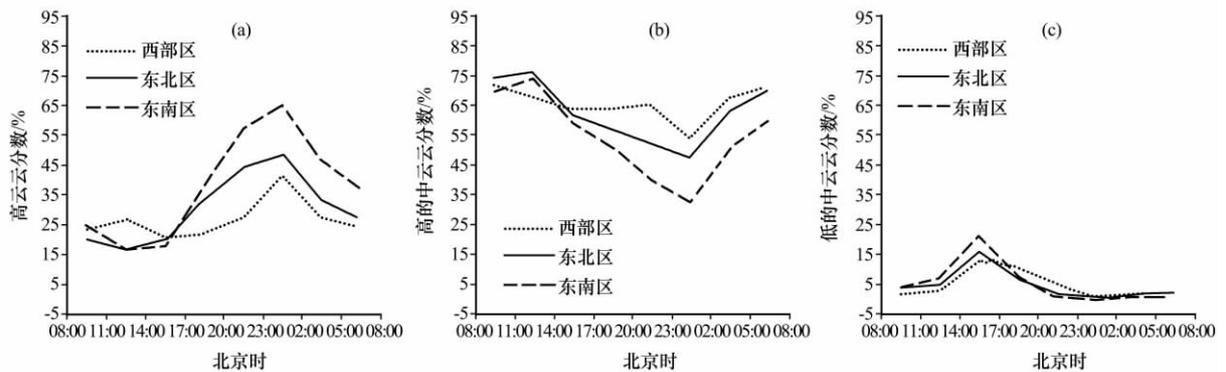


图 4 青藏高原不同区域高云(a)、高的中云(b)和低的中云(c)云分数的日变化

Fig. 4 The diurnal variations of high cloud (a), upper-middle cloud (b) and lower-middle cloud (c) over QXP

区域云的短波、长波和净辐射强迫的日变化。从图 3 中可看出，云短波辐射强迫日变化和云净辐射强迫日变化的趋势非常相似，这与前面得出的就全年而言云短波辐射强迫占主导地位结论相一致。云短波辐射强迫和长波辐射强迫在白天均呈先增大后减小的趋势，短波辐射强迫在 11:00—14:00 达到最大，长波辐射强迫在 14:00—17:00 达到最大；夜间，云短波辐射强迫为零，云长波辐射强迫呈先增大后减小的趋势，在 02:00 达到最大值。不论是云短波、长波，还是净辐射强迫都呈现出高原西部区日变化幅度较缓，高原东北区和东南区的变化相对剧烈，而且东南区的剧烈程度稍大于东北区。

已有的研究^[20-23]表明，在诸多影响云辐射强迫的因子中，云量是主要的影响因子。图 4 为高原不同区域高云、高的中云和低的中云云分数的日变化。从图 4 中可看出，不同区域 3 种云云分数的日变化幅度都是从东南区到西部区依次减弱，这与云辐射强迫的变化趋势一致。可见，云辐射强迫日变化的区域差异主要是由云量引起的。从图 4 中还可看出，白天，高的中云最多且呈逐渐减小的趋势；高云次之，呈逐渐增多的趋势；低的中云最少，呈先增多后减小的趋势，在 14:00—17:00 达到最大。从前面的分析可知，低的中云和高的中云对云短波辐射强迫均有贡献，对比图 4b、c 和图 3a 不难看出，在云短波辐射强迫的日变化中，低的中云的贡献更大。白天，高的中云和高云对云长波辐射强迫的作用在日变化中表现不明显。夜间，高云和云长波辐射强迫的变化趋势一致，高的中云则相反，低的中云基本没有变化，所以高云对云长波辐射强迫的日变化贡献主要在晚上，低的中云在夜间对云长波辐射强迫起到抑制作用。

5 结论

利用 2001 年 11 月—2005 年 10 月美国环境卫星 Terra 获取的 CERES_SYN—MODIS_Edition2c 资料，分别从高原不同区域云辐射强迫的季节变化、日变化及年平均几个方面对高原云辐射强迫进行了分析，并着重分析了不同种类云辐射强迫的影响，得到如下主要结论：

(1) 高原整体为云辐射强迫正负值的过渡区域，这种过渡性有显著的季节差异和区域划分。高原东南区表现出较强的冷却效应，西部区和东北区干旱区在冬、春季表现为较弱的加热效应。云短波辐射强迫有明显的区域差异和季节变化，从西部区

到东南区为依次增强，分别为 -2.6 ， -16.7 和 $-38.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，夏、秋季的云短波辐射强迫明显大于冬、春季。云长波辐射强迫区域差异不明显，但季节差异显著，从春季到冬季云长波辐射强迫的加热作用呈减小趋势。

(2) 高云、高的中云和低的中云对云短波辐射的季节变化都有贡献，但中云是云短波辐射强迫区域变化的主要因素。云长波辐射强迫小的区域差异和季节变化高云和高的中云都有贡献，这主要是由高的中云变化引起的，而且云量是主要的影响因子，高云云量虽小但它对长波云辐射强迫的影响也不可忽视。

(3) 高云在高原地区是净加热效应，高的中云既有加热作用也有冷却作用，低的中云是净冷却效应。高的中云在高原东北区和东南区为冷却效应，东南区的冷却效应明显大于东北区；而高原西部区高的中云则呈现出加热效应。低的中云在高原区域均为冷却效应，并且从西部区、东北区及东南区依次增强。

(4) 不论是云短波、长波，还是净辐射强迫，都呈现出高原西部区日变化幅度较缓，高原东北区和东南区的变化相对剧烈，而且东南区的剧烈程度还稍大于东北区，这种日变化的区域差异主要是由云量引起的。

(5) 在云短波辐射强迫的日变化中，低的中云的贡献更大。白天，高的中云和高云对云长波辐射强迫的作用在日变化中表现的不明显。高云对云长波辐射强迫的日变化贡献主要在晚上，低的中云在夜间对云长波辐射强迫起抑制作用。

需要指出的是，近期的研究表明^[24]，春天和夏天有大量沙尘气溶胶从高原北侧的塔克拉玛干传至高原，这些沙尘不仅能产生直接辐射强迫^[25]，还可以形成沙尘云^[26]，造成间接辐射强迫^[27-29]。因此，沙尘气溶胶对高原上空大气层顶的云辐射强迫区域和季节变化会产生一定的影响，但影响的强度如何还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Liou K N. 大气辐射导论(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 454.
- [2] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-278.
- [3] 汤懋苍, 程国栋, 林振耀. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998: 1-339.
- [4] 陈葆德, 梁萍, 李跃清. 青藏高原云的研究进展[J]. 高原山

- 地气象研究, 2008, 28(1): 66—67.
- [5] 王可丽, 钟强. 青藏高原地区云辐射强迫的气候学特征[J]. 高原气象, 1997, 16(1): 16—22.
- [6] 马晓燕, 季国良. 利用 ERBE 资料分析中国地区云辐射强迫的时空变化[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 151—158.
- [7] David F Y, Takmeng W, Wielicki B A, et al. Time Interpolation and Synoptic Flux Computation for Single and Multiple Satellites(Subsystem 7.0), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document [Z]. http://ceres.larc.nasa.gov/documents/ATBD/pdf/r2_2/ceres-atbd2.2-s7.0.pdf, 1997: 3—25.
- [8] Wong Takmeng, Young D F, Minnis P, et al. Time Interpolation and Synoptic Flux Computation for Single and Multiple Satellites(Subsystem 7.0), Clouds and the earth's radiant energy system (CERES) validation plan[Z]. http://ceres.larc.nasa.gov/documents/validation/pdf/cesval_r4.0_ss7.pdf, 2000: 2—4.
- [9] Minnis P, Young D F, Sun-Mack S, et al. CERES cloud property retrievals from imagers on TRMM, terra, and aqua. Proceedings of SPIE 10th Intl. symp remote sensing cloud and atmosphere[C]. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2003: 37—48.
- [10] Lin H Chambers, Lin Bing, Young David F. Examination of new CERES data for evidence of tropical iris feedback[J]. J Climate, 2002, 15: 3719—3726.
- [11] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射(D)云气候学和云的辐射作用[J]. 大气科学, 1994, 18(增刊): 910—931.
- [12] Ramanathan V. The role of earth radiation budget studies in climate and general circulation research[J]. J Geophys Res, 1987, 92: 4075—4095.
- [13] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 87—90.
- [14] 翁笃鸣. 中国辐射气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 307—309.
- [15] 刘艳, 翁笃鸣. 中国地区云对地气系统长波射(OLR)出辐射强迫的气候研究[J]. 气象科学, 2001, 21(3): 1—2.
- [16] 王可丽, 钟强. 青藏高原地区云对 OLR 的强迫作用[J]. 高原气象, 1992, 11(3): 259—265.
- [17] 江灏, 王可丽. 青藏高原地表热状况的卫星资料分析[J]. 高原气象, 2000, 19(3): 323—330.
- [18] 王可丽, 江灏, 陈世强. 青藏高原地区的总云量—地面观测、卫星反演和同化资料的对比分析[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 252—257.
- [19] Thomas E, Caldwell Lisa, Coleman H, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Data Management System Data Products Catalog, 2.10 Synoptic Radiative Fluxes and Clouds (SYN) [Z]. http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/ceres/DPC/DPC_SYN_R5V1.pdf, 2009.
- [20] 赵柏林, 张晓黎, 朱元竟. 中国地区云与辐射对气候的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1992, 28(3): 371—383.
- [21] 刘艳, 高歌, 成天涛, 等. 中国地区云对地气系统太阳短波吸收辐射强迫的气候研究[J]. 气象科学, 2000, 20(3): 260—269.
- [22] 刘艳, 翁笃鸣. 中国地区云对地气系统净辐射强迫的气候研究[J]. 气象科学, 2002, 22(4): 416—424.
- [23] 高庆先, 任阵海, 姜振远. 云的辐射强迫效应研究[J]. 环境科学研究, 1998, 11(1): 2—4.
- [24] Huang J, Minnis P, Yi Y, et al. C. Trepte, and D. Winker, Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. Geophys Res Lett, 2007, 34: L18805, doi:10.1029/2007GL029938.
- [25] Huang J, Fu Q, Su J, et al. Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints[J]. Atmos Chem Phys, 2009, 9: 4011—4021.
- [26] Wang W, Huang J, Minnis P, et al. Dusty cloud properties and radiative forcing over dust source and downwind regions derived from A—Train data during the Pacific Dust Experiment [J]. J Geophys Res, 2010, 115D00H35, doi: 10.1029/2010JD 014109.
- [27] Huang J, Lin B, Minnis P, et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia[J]. Geophys Res Lett, 2006, 33: L19802, doi: 10.1029/2006GL026561.
- [28] Huang J, Minnis P, Lin B, et al. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES[J]. Geophys Res Lett, 2006, 33: L06824, doi: 10.1029/2005GL024724.
- [29] Huang J, Wang Y, Wang T, et al. Dusty cloud radiative forcing derived from satellite data for middle latitude regions of East Asia[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(10): 1084—1089.

Analysis on Temporal and Spatial Variations for Cloud Radiation Forcing over Qinghai-Xizang Plateau Using CERES(SYN) Data

ZHANG Ding-ling¹, HUANG Jian-ping¹, LIU Yu-zhi¹, CHEN Bin¹, ZHANG Lei²

(1. *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

2. *Unit of 92543 of People's Liberation Army, Jiyuan 454650, China*)

Abstract: The cloud and radiation data, archived in CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) SYN (Synoptic Radiation Fluxes and Clouds) product, are applied to gain a better understanding of the temporal and spatial variations of cloud radiation forcing over the Qinghai-Xizang Plateau (QXP) from November 2001 to October 2005. The results indicate four important points: Firstly, the whole QXP is the transition area of cloud radiation forcing, and this transition has significant seasonal and regional variations. The southeast of QXP makes a cooling effect, the western and northeastern QXP regions, an arid area, showed a weaker warming effect. Secondly, high cloud, upper-middle cloud and lower-middle clouds all contribute to the seasonal and regional differences of cloud shortwave radiation forcing, and the middle cloud is the main factor of regional differences; regional differences of longwave radiation forcing is not so obvious, but it has significant seasonal difference, which is mainly caused by the high cloud and upper-middle clouds, and cloud amount is a main factor of influence. Although the cloud amount of high cloud is small, but its impact is unnegligible. Thirdly, over QXP, high cloud causes a net heating effect, upper-middle clouds have both heating effect and cooling effect, and low cloud cause a net cooling effect. Fourthly, for the diurnal variation of cloud radiation forcing, the shortwave plays a dominating role. The significant regional differences of diurnal variation are mainly caused by the cloud amount. During the daytime, the lower-middle clouds have the greatest contribution on the diurnal variation of shortwave radiation. At night, the high cloud plays an important role of diurnal variation of shortwave radiation, while the lower-middle clouds inhibit the for longwave radiation forcing.

Key words: Qinghai-Xizang Plateau; CERES (SYN); Cloud radiation forcing; Temporal and spatial variations

附录：CERES(SYN)顶层数据流程图

