

# 西北典型地域云对地气系统的辐射强迫研究

陈勇航<sup>1</sup>, 白鸿涛<sup>1</sup>, 黄建平<sup>2\*</sup>, 邱学兴<sup>3</sup>, 亢燕铭<sup>1</sup>, 管晓丹<sup>2</sup>, 毛晓琴<sup>1</sup> (1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230061)

**摘要:** 采用 NASA 地球观测系统(EOS)“云与地球辐射能量系统(CERES)”的云和辐射资料, 研究了我国西北地区 4 个典型地域 2002 年 7 月至 2004 年 6 月云对地气系统辐射强迫的季节及年变化特征, 探讨了云特性参量对云辐射强迫的影响, 结果表明, 云的辐射强迫具有显著的季节变化和地域变化, 一般夏季云净辐射强迫最大, 冬季最小, 而塔克拉玛干沙漠最小值出现在秋季, 夏季的季风影响区和塔克拉玛干沙漠区的云净辐射强迫相差达  $129 \text{ W/m}^2$ , 云的短波辐射、长波辐射和净辐射年平均效应均在季风区最强, 分别达  $-171.2, 48.9, -122.3 \text{ W/m}^2$ ; 在塔克拉玛干沙漠地区最弱, 分别为  $-54.7, 37.3, -17.4 \text{ W/m}^2$ 。

**关键词:** 云辐射强迫; 季节变化; 年变化; 季风影响区; 天山山区; 祁连山区; 塔克拉玛干沙漠

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2008)02-0097-05

**Comparison of cloud radiative forcing on the atmosphere-earth system over northwestern China with respect to typical geo-topographic regions.** CHEN Yong-hang<sup>1</sup>, BAI Hong-tao<sup>1</sup>, HUANG Jian-ping<sup>2\*</sup>, QIU Xue-xing<sup>3</sup>, KANG Yan-ming<sup>1</sup>, GUAN Xiao-dan<sup>2</sup>, MAO Xiao-qin<sup>1</sup> (1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Anhui Weather Station, Hefei 230061, China). *China Environmental Science*, 2008, 28(2): 97~101

**Abstract:** The seasonal and annual variability of cloud radiative forcing over northwestern China from July 2002 to June 2004 was examined with respect to four geo-topographic regions using SSF Aqua MODIS Edition 1B data of Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) of NASA's EOS. The influences of cloud properties on the radiative forcing were also discussed. The regional variation in cloud radiative forcing was significant as well as seasonal variation. In general, the measurements of cloud radiative forcing were the highest in summer and lowest in winter, however, the Taklimakan Desert had the lowest measurement in autumn. The difference of net radiative forcing between the monsoon influence region and Taklimakan Desert was  $129 \text{ W/m}^2$  occurring in summer. The highest measurements of yearly mean of shortwave, long wave and net cloud radiative forcing were all observed over the monsoon influence region, which were  $-171.2, 48.9, -122.3 \text{ W/m}^2$ . The lowest measurements of that were over the Taklimakan Desert which were  $-54.7, 37.3, -17.4 \text{ W/m}^2$ .

**Key words:** cloud radiative forcing; seasonal variation; annual variation; the monsoon influence region; Tianshan Mountains; Qilian Mountains; Taklimakan Desert

地气系统辐射收支的变化对地球环境和人类活动有着至关重要的影响, 其中对区域性水循环的影响制约水资源可利用量及其变化, 并对生态环境的演变产生作用。在具有干旱和半干旱气候特点、生态环境脆弱的西北地区, 这种制约尤其突出<sup>[1]</sup>。地气系统获得的净辐射及由辐射引起的不同加热分布都强烈地受云的影响<sup>[2]</sup>。由于主要的温室气体  $\text{CO}_2$  加倍所造成的辐射效应是  $4 \text{ W/m}^2$ , 而云净辐射强迫值约是  $\text{CO}_2$  加倍造成辐

射效应的 4 倍, 短波和长波的强迫值大约是其 10 倍, 因此, 云辐射强迫值的一个小的变化都会在气候反馈机制中起重要的作用<sup>[3]</sup>。

国内外对云辐射强迫的研究<sup>[3-9]</sup>结果表明, 虽然对于全球范围年平均来讲, 云对地气系统的辐

收稿日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40633017, 40575036); 国家“973”项目(2006CB403700)。

\* 责任作者, 教授, hjp@lzu.edu.cn

射收支具有净的冷却效应,但就区域和季节来看,云的净辐射效应却是多变化的,而且云特性及其辐射效应之间的关系决定于所处的地域和季节。地域辽阔的中国西北地区分布着高山、沙漠、绿洲等复杂地形,其上的云对气候环境的反馈作用(即云辐射强迫)的模式模拟存在很大的不确定性,因此本研究针对4个典型地域,考察云辐射强迫的季节变化和年变化特征,探讨云特性参数对云辐射强迫的影响,以期减少气候环境模式试验中的不确定性、改进气候环境变化预测的准确性提供依据。

## 1 资料与方法

采用2002年7月~2004年6月美国极轨环境遥感卫星 Aqua(EOS-PM1)获取的 CERES SSF Aqua MODIS Edition 1B 资料,它提供了地球表面和大气层顶的辐亮度、地表反射率和辐射通量的瞬时观测值,以及卫星扫描范围内的晴空和云参量观测值。空间分辨率取决于视场,其在天顶时的地面视场为  $16 \times 32 \text{ km}$  的椭圆,其空间分辨率为  $20 \text{ km}$ 。“云与地球辐射能量系统(CERES)”的观测仪器能测量可见光直到远红外光谱区的辐射,其中短波探测器测量地球反射和发射的太阳辐射,窗区探测器测量在水汽窗区地球放射的长波辐射,总探测器测量总的地球反射和放射的辐射。

为了更好地估计云的辐射效应,CERES 采用宽带测量仪获得大气层顶的辐射通量资料。同时,CERES 还引进了新的角分布模式,在复杂的观测域内,利用高光谱分辨率和高空间分辨率处理云的图像资料以确定云和地面特征<sup>[10]</sup>。这些优势使 CERES 对云的辐射通量的观测达到前所未有的精确度<sup>[11]</sup>。

根据前人的定义<sup>[3-8]</sup>,云的短波(SW)辐射强迫  $C_{\text{sw}}$  是晴空反射回的太阳通量与有云时反射回的太阳通量之差,这个量给出了云对太阳辐射影响的一个定量估计,可表示为:

$$C_{\text{sw}} = F'_{\text{clr}} - F' \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{sw}}$  为云的短波辐射强迫,  $\text{W/m}^2$ ;  $F'_{\text{clr}}$  为晴空反射回的太阳辐射通量;  $F'$  为有云时反射回的太阳通量。

与晴空相比,有云区域发射的热红外通量小,云的长波(LW)辐射强迫  $C_{\text{LW}}$  是晴空发射的红外通量与有云天空发射的红外通量之差,它是云对热红外辐射影响的一个度量,可表示为:

$$C_{\text{LW}} = F_{\text{clr}} - F \quad (2)$$

式中:  $C_{\text{LW}}$  为云的长波辐射强迫,  $\text{W/m}^2$ ;  $F_{\text{clr}}$  为晴空发射的红外通量;  $F$  为有云天空发射的红外通量。

在式(1),式(2)中,对同一地区,采用有云日和无云日辐射通量之差来得到辐射强迫值。这里晴天的选取标准为像素点晴空覆盖率在 85%以上,云天的选取标准为像素点云覆盖率在 85%以上。

云的净辐射强迫为:

$$C_{\text{net}} = C_{\text{sw}} + C_{\text{LW}} \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{net}}$  为云的净辐射强迫;  $C_{\text{sw}}$  为云的短波辐射强迫;  $C_{\text{LW}}$  为云的长波辐射强迫。

上述3个辐射强迫参数是考查云对地气系统辐射收支影响的重要指标。

计算中对  $1^\circ \times 1^\circ$  网格点内的所有像素点求平均,结果分析是根据格点值进行的。对每3个月(如冬季为12,1,2月)进行平均得出了云辐射强迫效应的季节平均值,通过对4个季节的结果求平均得到年平均值。另外,对同月的两年资料进行平均得到年变化曲线。

## 2 结果与讨论

塔克拉玛干沙漠是世界第二大流动性沙漠,其气候和生态环境与其他地区显著不同,为沙漠下垫面干旱区的代表。天山和祁连山是西北内陆区河流的主要发源地和径流形成区,也是高寒山区的代表。亚洲季风影响区及其边缘地区代表了半干旱区,是人口和工业密集区,也是研究人类活动对气候环境影响的重要地区。故本文选择这4个具有不同气候和环境背景的典型地域作为研究区域,选取亚洲季风影响区及其边缘地区为A区(32个格点,以下简称为“季风区”),天山山区为B区(15个格点);祁连山区为C区(15个格点),塔克拉玛干沙漠地区为D区(33个格点)。

云的辐射强迫理论提供了一种定量描述云对地球辐射收支影响的手段。长波部分计算了由于云的存在所导致热辐射发射的减少量,短波部分确定

了对太阳辐射反射的增加量。二者在总能量平衡中的相互作用决定了云的净辐射效应的正负符号和大小。除了地面被冰雪覆盖之外,云与地面相比敏感性更强。因此,当有云存在的情况下,与晴空相比,云将大部分的太阳辐射反射到宇宙中(为负辐射强迫),而有云大气也将向宇宙辐射更少的热量(为正辐射强迫)。发生在大气层顶的正的云辐射强迫效应说明云对大气系统起到了加热的作用,相反,负的云的辐射强迫效应将对大气具有冷却作用。

表 1 为 4 个典型地域在 Aqua 卫星观测时刻的云辐射强迫的年平均和季节平均值,可以看出,云对中国西北地区的辐射收支影响很大。从年平均看,云在 4 个地区的所有季节都产生净的冷却效应。云的短波辐射、长波辐射和净辐射效应均在季风区最强,分别达  $-171.2, 48.9, -122.3 \text{ W/m}^2$ ; 在塔克拉玛干沙漠地区最弱,分别为  $-54.7, 37.3, -17.4 \text{ W/m}^2$ 。山区介于其间,在祁连山区云的短波辐射、长波辐射和净辐射效应分别为  $-104.9, 47.3, -57.6 \text{ W/m}^2$ ; 在天山山区分别为  $-94.9, 40.7, -55.0 \text{ W/m}^2$ 。将 2 个山区进行比较发现,祁连山区的云辐射效应比天山山区的要强。

表 1 中国西北地区云辐射强迫和季节平均值( $\text{W/m}^2$ )

Table 1 Seasonal and yearly mean of cloud radiative forcing over the four regions in northwestern China( $\text{W/m}^2$ )

辐射类型	季节	季风区	祁连山	天山	沙漠
短波辐射强迫	冬	-105.0	-44.8	-22.2	-36.4
	春	-197.8	-95.1	-101.8	-76.6
	夏	-221.0	-186.7	-175.9	-75.3
	秋	-161.0	-92.8	-79.8	-30.3
	年平均	-171.2	-104.9	-94.9	-54.7
长波辐射强迫	冬	29.8	25.3	19.4	24.5
	春	63.2	59.3	49.6	55.8
	夏	62.8	66.0	60.7	44
	秋	39.9	38.5	33.0	22.5
	年平均	48.9	47.3	40.7	37.3
净辐射强迫	冬	-75.2	-19.5	-2.7	-11.9
	春	-134.6	-35.8	-52.2	-20.9
	夏	-158.2	-120.7	-115.2	-29.0
	秋	-121.0	-54.2	-46.9	-7.8
	年平均	-122.3	-57.6	-55.0	-17.4

由表 1 还可以看出,云的短波辐射强迫具有显著的季节变化,在数值上远远大于长波辐射强迫,主导着云的净辐射强迫效应。从季节变化上看,除了塔克拉玛干沙漠地区以外,其它 3 个地区云的短波辐射强迫在夏季最大,冬季最小。在季风区,夏季短波辐射强迫最大,可达  $-221.0 \text{ W/m}^2$ ,春季次之,为  $-197.8 \text{ W/m}^2$ ,与夏季相差不大。春季长波辐射强迫最强,达  $63.2 \text{ W/m}^2$ ,夏季次之,为  $62.8 \text{ W/m}^2$ ,与春季相差不大。究其原因,夏季和春季云量和光学厚度比较大<sup>[12]</sup>,这些因素增强了短波和长波辐射强迫。相反,在冬季,短波和长波辐射强迫最小,分别为  $-105.0, 29.8 \text{ W/m}^2$ ,原因是这一季节季风区云量和光学厚度较小,从而削弱了短波和长波辐射强迫。季风区短波辐射强迫季平均最大值与最小值之间相差  $116 \text{ W/m}^2$ ,而长波辐射强迫季平均最大值与最小值之间相差  $33 \text{ W/m}^2$ ,这表明云辐射强迫的季节性变化幅度在该区相当大。在两个山区,短波和长波辐射强迫均在夏季最大,冬季最小,这种季节变化规律与云量、云光学厚度季节变化规律是相对应的<sup>[12]</sup>。两个山区的平均短波和长波辐射强迫的变化幅度比季风区更大,分别达  $150, 41 \text{ W/m}^2$ 。相对而言,塔克拉玛干沙漠地区云辐射强迫的季节变化幅度较小,变化规律和其他地区有所不同:由于该地春季的云量和夏季的云光学厚度最大<sup>[12]</sup>,所以春季云的短波和长波辐射效应最强,分别为  $-76.6, 55.8 \text{ W/m}^2$ ,而夏季次之(短波辐射强迫比春季减少甚微而长波辐射强迫减少较多)。与云特性参量的季节变化规律相对应,沙漠地区云的短波和长波辐射强迫秋季最小,分别为  $-30.3, 22.5 \text{ W/m}^2$ ,冬季较秋季稍大。

由于短波辐射强迫在数值上明显大于长波辐射,且两者具有相似的季节变化特征,因此净辐射强迫的季节变化特点与短波辐射强迫相似。季风区净辐射强迫在夏季最大,可达  $-158.2 \text{ W/m}^2$ ,冬季最小,为  $-75.2 \text{ W/m}^2$ ;祁连山区和天山山区净辐射强迫也在夏季最大,分别可达  $-120.7, -115.2 \text{ W/m}^2$ ,冬季最小,分别为  $-19.5, -2.7 \text{ W/m}^2$ ;塔克拉玛干沙漠地区净辐射强迫的季节变化与其他 3 个地域有所不同,其最大值出现在夏季

( $-29.0\text{W/m}^2$ ),最小值出现在秋季( $-7.8\text{W/m}^2$ .)

另外,辐射效应随地域的不同,变化相当大.云净辐射强迫在同一季节的不同地域相差最大时可达  $129\text{W/m}^2$ ,出现在夏季的季风区和塔克拉玛干沙漠地区.从年平均可以看出,云的短波辐射、长波辐射和净辐射效应均在季风区最强,在塔克拉玛干沙漠地区最弱,山区介于其间.夏季辐射强迫的地域变化相对最小.将两个山区进行比较发现,祁连山区的云辐射效应比天山山区强,这主要是由于其地理位置使其更易于得到水汽,云量更多.

图 1 反映了云辐射强迫各分量的年变化情况,图 1(a)和(c)中,4 个区域的短波年变化曲线与净辐射强迫年变化曲线非常相似,季风区短波辐射强迫和净辐射强迫的最大值分别出现在 8 月和 5 月,其他 3 个区域的峰值出现在 7 月;除了沙漠地区以外年变化的最低值都出现在 1 月或 12 月,沙漠地区出现于 10 月.图 1(b)显示长波辐射强迫的年变化.除了沙漠地区,其他地区的最大值都出现在 6 月,最小值出现在 1 月或 12 月;塔克拉玛干沙漠地区与其他地区的年变化规律相比存在较大不同:最大值出现在 5 月,而最小值出现在 10 月.从冬季的 1 月到春季的 4 月云短波辐射强迫值和净辐射强迫值在塔克拉玛干沙漠地区与 2 个山区很接近.

人们对地球辐射收支实验(ERBE)中获得的云的辐射强迫的全球分布进行了估算,全球年平均的云的太阳辐射强迫和红外辐射强迫值分别为  $-48.31\text{W/m}^2$ ,造成  $-17\text{W/m}^2$  的净的云辐射强迫,即对于全球年平均而言,云强迫是负值,云对于天气系统起着冷却作用<sup>[3]</sup>.Ramanathan 等<sup>[9]</sup>利用 1985 年 4 月的 ERBE 资料分析了全球的短波辐射、长波辐射云强迫,得到的值分别为  $-44.5, 31.3\text{W/m}^2$ ,净辐射强迫值是  $-13.2\text{W/m}^2$ ; Harrison 等<sup>[7]</sup>利用 1985 年 4 月~1986 年 1 月的 ERBE 资料,进行了类似的分析,得到净辐射云强迫为  $-14.21\text{W/m}^2$ .马晓燕等<sup>[3]</sup>的研究表明,从云强迫的净辐射效应看,在我国西北干旱地区的冬季、初春和深秋会出现一定的正值,其他季节均为负值.本研究表明,在 Aqua 卫星下午观测时刻,在西北 4

个典型地域的所有季节云的净辐射强迫均为较大的负值,产生较强的冷却效应.与上述基于 ERBE 资料的研究结果进行比较时要注意的,本文采用的资料是 Aqua 卫星下午观测的瞬时资料,而 ERBE 是在不同地方时观测的月平均资料.最近, Huang 等<sup>[8]</sup>利用与本文相同的 2002 年 7 月~2004 年 6 月 CERES 资料进行东亚中纬度地区沙尘云研究发现,在沙尘污染区云区的短波辐射强迫为  $-275.7\text{W/m}^2$ ,长波辐射强迫为  $128.5\text{W/m}^2$ ,净辐射强迫为  $-147.2\text{W/m}^2$ .无沙尘污染的云区短波辐射强迫为  $-311.0\text{W/m}^2$ ,长波辐射强迫为  $102.8\text{W/m}^2$ ,净辐射强迫为  $-208.2\text{W/m}^2$ .这些结果与本文的结果相对比较接近,但因选取的地域和时间不同,数值上还是有较大的差异.

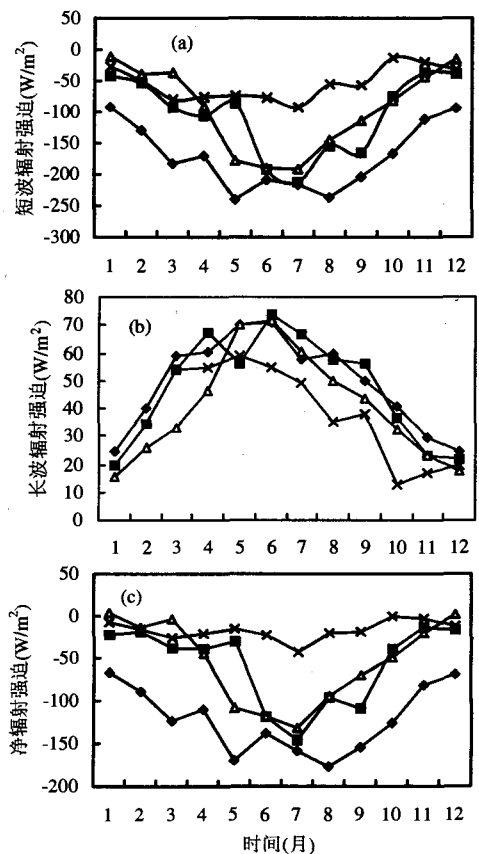


图 1 4 个区域云辐射强迫的年变化  
Fig.1 Annual variation in cloud radiative forcing over the four regions

◆ 亚洲季风影响区及其边缘区域, ■ 祁连山区,  
▲ 天山山区, × 塔克拉玛干沙漠地区

另外,值得一提的是,在计算云的辐射强迫时,按规定都是选择有云天和无云天对所观测的大气顶反射辐射和出射长波辐射资料进行统计,这实际上更多地反映了该地下垫面和云特性对地气系统辐射平衡的影响,但并不是该地辐射平衡情况的全部.因为真正决定该地气候最终的辐射平衡情况,还和有云天的时段长短有关.比如,计算得到某地某观测时刻云的短波辐射强迫的负值很大,但一年中有云的时候很少,它的降温作用也就不显著了.

### 3 结论

**3.1 云辐射强迫具有很强的季节变化.**祁连山区、天山山区和季风影响及其边缘区域云对地气系统辐射收支的影响很大,特别是夏季云的净辐射效应出现最大的负值.

**3.2 云辐射强迫具有显著的地域性变化.**在相同季节里,净辐射效应随地域的不同,变化相当大.夏季辐射强迫的地域变化相对最小.

**3.3 4 个典型地域云的短波辐射强迫和净辐射强迫的最大值分别出现在 5~8 月.**除了塔克拉玛干沙漠以外,年变化的最低值都出现在 1 月或 12 月,沙漠地区出现于 10 月.

#### 参考文献:

- [1] 林奇胜,刘洪萍,张安录.论我国西北干旱地区水资源持续利用[J].地理与地理信息科学,2003,19(3):54-58.
- [2] 汪宏七,赵高祥.云和辐射[J].大气科学,1994,18(sup):910-932.
- [3] 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):150-158.
- [4] 王可丽,吴国雄,江 灏,等.青藏高原云-辐射-加热效应和南亚夏季风[J].气象学报,2002,60(2):173-180.
- [5] 刘 艳,翁笃鸣.中国地区云对地-气系统辐射强迫温度效应的气候研究[J].气象学报,2002,60(6):766-773.
- [6] William Rossow B, Lacis Andrew A. Global, seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part II. Cloud properties and radiative effects [J]. J. Climate, 1990,1.3(11):1204-1253.
- [7] Harrison E F, Minnis P, Barkstrom B R, et al. Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the earth radiation budget experiment [J]. J. Geophys. Res., 1990,95:18687-18703.

- [8] Huang J P, 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.
- [9] Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. Cloud-radiative forcing and climate: results from the earth radiation budget experiment [J]. Science, 1989,243:57-63.
- [10] Minnis P, Young D F, Sun-Mack S, et al. CERES cloud property retrievals from imagers on TRMM, terra, and aqua [A]. Proceedings of SPIE 10<sup>th</sup> Intl. symp remote sens. cloud and atmos.[C]. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2003:37-48.
- [11] 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.
- [12] 陈勇航,黄建平,陈长和,等.中国西北地区云水资源的时空分布特征 [J]. 高原气象,2005,24(6):905-912.

**作者简介:** 陈勇航(1965-),女,湖南衡阳人,副教授,博士,主要从事大气环境与遥感研究.发表论文 30 余篇.

**致谢:** 本文资料来自美国 NASA Langley Distributed Active Archive Center,工作中得到衣育红博士的帮助,在此一并表示感谢.

### 环保信息

国务院召开第一次全国污染源普查电视电话会议,曾培炎出席并强调科学普查依法普查,为建设环境友好型社会提供全面准确的环境信息 1月4日,国务院召开第一次全国污染源普查电视电话会议.国务院副总理曾培炎出席并讲话,强调要以党的十七大精神为指导,深入贯彻落实科学发展观,坚持全面调查,科学普查,依法普查,保证质量,把普查污染源与健全环境统计体系、监测体系、评价体系结合起来,把普查数据汇总与成果开发利用结合起来,为促进经济社会又好又快发展提供科学、翔实、全面的环境信息.

摘自《中国环境报》

2008-01-08