

陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 2009. 西北典型地域条件下云量的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 77-84. Chen Yonghang, Mao Xiaoqin, Huang Jianping, et al. 2009. Comparison of cloud coverage over Northwestern China with respect to typical regions [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 77-84.

西北典型地域条件下云量的对比分析

陈勇航¹ 毛晓琴¹ 黄建平² 亢燕铭¹ 郑志海² 叶强¹

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, 兰州 730000

摘要 采用 NASA 地球观测系统 (EOS) “云与地球辐射能量系统 (CERES)” 2002 年 7 月至 2004 年 6 月 CERES SSF Aqua MODIS Edition 1B 云资料, 选取我国西北地区不同气候环境条件下的 4 个典型地域, 研究了总云量、低层云和高层云云量的空间分布特征以及季节和年变化特征。结果表明, 低层云量的高值区不仅分布在山脉地区, 而且也分布在非山脉地区。但高层云的云量高值区只分布在山脉地区; 总体来说, 云量大小随地域的不同相差相当大, 高层云云量年平均值的最大差异发生在祁连山区和塔克拉玛干沙漠之间, 两者相差 16.4%。而总云量和低层云量年平均值的最大差异发生在季风区和塔克拉玛干沙漠地区相差最大, 分别可达 27.6% 和 19.5%。季风区和祁连山区云量最大值一般都出现在夏季, 天山和塔克拉玛干沙漠地区云量最大值一般都出现在春季, 最小值则均出现在秋冬季。总的来说, 3 个云量参数值在 3~9 月较高, 最低值出现在 10~12 月。

关键词 云量 空间分布 季节变化 年变化

文章编号 1006-9585 (2009) 01-0077-08 中图分类号 P407 文献标识码 A

Comparison of Cloud Coverage over Northwestern China with Respect to Typical Regions

CHEN Yonghang¹, MAO Xiaoqin¹, HUANG Jianping², KANG Yanming¹, ZHENG Zhihai², and YE Qiang¹

1 College of Environmental Sciences and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Using CERES SSF Aqua MODIS Edition 1B data from July 2002 to June 2004 from Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) of NASA's EOS, the authors analyzed the spatial distribution, seasonal and annual variability of the coverage of total cloud, lower layer cloud and upper layer cloud over northwestern China with respect to four typical regions with different climatic and environmental conditions. The results show that the high measurements of lower layer cloud coverage not only occurred over mountains but also over non-mountainous regions, but the high measurements of upper layer cloud coverage only occurred over mountains. Generally, the cloud coverage measurements varied significantly over the four regions. The largest difference of yearly means of upper layer cloud coverage was between the Qilian Mountains and the Taklimakan Desert which was 16.4%, and those

收稿日期 2007-06-11 收到, 2008-11-02 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575036、ZX200506000333 和国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403700 及上海市重点学校建设项目 B604

作者简介 陈勇航, 女, 1965 年出生, 博士, 副教授, 从事大气环境、大气辐射与遥感等研究。E-mail: yonghangchen@dhu.edu.cn

of total cloud coverage and lower layer cloud coverage were both between the Asia monsoon influence region and the Taklimakan Desert which were 27.6% and 19.5%, respectively. The highest measurements of cloud coverage parameters over the monsoon influence region and Qilian Mountains generally occurred in summer while those over the Tianshan Mountains and the Taklimakan Desert occurred in spring. The measurements of the three cloud coverage parameters were relatively high from March to September and their lowest measurements occurred from October to December.

Key words cloud coverage, spatial distribution, seasonal variation, annual variation

1 引言

云的存在改变了大气中辐射的分布与大小(李冰等, 1999), 还对大气中物种的垂直再分布、化学转化、物种迁移起着重要作用(林朝晖等, 1998), 因而云在地球气候系统中担任着主要调制者的重要角色。更准确地了解云的分布及其变化是目前减少气候环境研究中云的不确定性, 从而更好地理解和预测未来气候环境变化趋势所迫切需要的, 而且也将有助于准确评估空中云水资源的利用潜力, 为优化设计土地利用和生态系统的空间格局提供有益的参考依据。

中国西北地区面积约 $429 \times 10^4 \text{ km}^2$, 如此广大的地域内分布着高山、沙漠、绿洲等复杂地形, 气候差异甚大。由于地域辽阔而站点稀少, 以往地面观测的总云量和低云量资料十分有限, 因而限制了该地区云的研究。随着国际卫星技术以及云反演技术的提高, 利用卫星资料对该地区云特性进行较为细致深入的研究已成为可能。我国利用卫星资料在云的研究方面已做的工作, 主要集中在利用国际卫星云气候计划 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 发布的月平均资料研究云量方面。如丁守国等(2004)对全球云量变化进行了研究, 刘洪利等(2003)、宜树华等(2003)、魏丽等(1997)、王可丽等(2001)、刘瑞霞等(2004)利用 ISCCP C2 或 D2 资料对中国地区(包括西北地区和青藏高原)云的时空分布特征进行了分析, 陈勇航等(2005a, 2005b)利用 ISCCP D2 数据集, 针对西北 3 个不同气候区研究了云量的时空分布特征。

从以往研究结果来看, 西北地区云的形成在很大程度上受复杂地形的影响, 即使在同一气候区云量也会有很大差异, 而 ISCCP C2 和 D2 资料

的空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Rossow 等, 1999), 要进一步研究西北地区云量的地域性变化特征, 这样的空间分辨率就无法满足要求。因此, 本文将采用更高空间分辨率的美国航空航天署 NASA “云与地球辐射能量系统 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)” 的云资料, 选取西北 4 个典型地域, 针对云量的空间分布、季节变化与年变化特征进行对比分析, 以期能对西北地区云的地域性变化特征有更为深入细致的了解。

2 资料和研究方法简介

本文采用的资料是 2002 年 7 月至 2004 年 6 月美国航空航天署 NASA 发布的 CERES SSF Aqua MODIS Edition 1B 云资料。

云与地球辐射能量系统 (CERES) 是地球观测系统 EOS (Earth Observing System) 的首要组成部分之一, 其观测数据的分析处理方法是在以往的科学实验如国际卫星云气候计划 (ISCCP) 和地球辐射收支实验 Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) 奠定的基础之上经过改进而来的, 因此, 其准确性更高。实施 CERES 的目的是为了推进对云和能量循环在全球气候环境变化过程中所起作用的研究 (Wielicki et al., 1996; Geier et al., 2003)。本文用来分析云量的资料是由搭载在 Aqua 卫星上的中分辨率成像仪 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 获取的辐射观测数据经过反演得来的。

SSF (Single Scanner Footprint) 的空间分辨率取决于其视场 FOV (即 Field of View, 与 Footprint 同义), 其 FOV 的视角沿卫星飞行轨道为 1.3° , 正交于轨道 2.6° , 卫星高度 705 km, 因此它在天顶时地面的视场为 $16 \text{ km} \times 32 \text{ km}$ 的椭

圆, 其空间分辨率为 20 km (如图 1)。为了改善扫描图象的分辨率, SSF 引进了新的角分布模式, 使得在复杂的 CERES 观测域内, 可利用高光谱分辨率和高空间分辨率处理云的图像资料来确定云和地表特征, 从而使 CERES 云资料具有更高的精确度 (Geier et al., 2003; Minnis et al., 2003)。在 CERES 中, 单个像素内的辐射被用来分析反演影响辐射场云的特性。对每个像素点, 用最先进的方法来探测云特性参量。在白天, 使用 3 种不同的方法以减少任何一个单独方法产生的偏差。每个 SSF 区组包含 1 h 资料, 接近一条轨道的 2/3。它由确定云性质、大气顶和地面辐射通量的子集构成, 并将云分为单层云和双层云两类共 10 种, 单层云 4 种: 1) 低云 (等效气压 > 700 hPa); 2) 低中云 (700 hPa ≥ 等效气压 > 500 hPa); 3) 高中云 (500 hPa ≥ 等效气压 > 300 hPa); 4) 高云 (等效气压 ≤ 300 hPa)。双层云 6 种是上述 4 种云的组合 (Geier et al., 2003)。CERES SSF Aqua MODIS Edition 1B 资料将云量参数分为两种: 低层云 (Lower layer cloud) 和高层云 (Upper layer cloud), 统计时将低云和低中云合并, 称其为

低层云; 将高中云和高云合并为高层云 (如图 1 所示), 从而可以分别得到低层云和高层云的云量。

Minnis et al. (2008) 对资料的准确性进行过研究, 把 CERES MODIS 云量资料与冰云和陆地抬升卫星 (Ice Cloud and Land Elevation Satellite, ICESat) 上的地球科学激光测高系统 (Geoscience Laser Altimeter System, GLAS) 的云量资料进行对比, 得出的结论是: CERES MODIS 云量资料在极地以外地区对于光学厚度大于 0.3 的云是相当准确的。2003 年 9 月 25 日 ~ 11 月 18 日, 就全球平均而言, CERES 云量比 GLAS 少 0.078 (GLAS 全球平均云量为 0.689)。CERES Aqua MODIS 在陆地上的误差小于热带海洋上的误差, 无冰水面上两者的最大差值在热带海洋上, 约为 0.12。两者间的差值还归因于观测时间, 在 0° ~ 70°N, 平均相差 ±0.04, 但夜晚平均相差约为 0.18。白天在 30° ~ 60°N 观测样本次数为 15 ~ 30 次, 夜晚约 50 次。

本文计算过程中, 首先对 1° × 1° 网格点内的所有像素点 (Pixel) 求平均, 然后再插值到每个格点上, 结果分析将根据格点值进行。对每 3 个月 (如冬季的 12 月、1 月和 2 月) 进行平均得出季节平均值, 通过对 4 个季节的结果求平均得到年平均值。另外, 通过对同月两年资料进行平均得到年变化曲线。

3 空间分布特征

CERES SSF 资料分别给出了晴空、低层云和高层云占全天空的百分比。为了了解总云量的分布情况, 由 100% 减去晴空占全天空的百分比求得总云量。从两年平均来看, 西北地区总云量的低值区在塔里木盆地—内蒙古西部戈壁沙漠—黄土高原西北部一带, 总云量在 28% ~ 42% 之间, 总云量的低值中心在塔克拉玛干、古尔班通古特、巴丹吉林和腾格尔沙漠上空, 北疆北部是次低值中心; 高值区在阿尔泰山、天山、帕米尔高原、昆仑山、祁连山以及受亚洲季风影响的甘肃南部、宁夏南部和陕西南部, 总云量在 52% ~ 76% 之间。总云量的这种空间分布特征与利用 ISCCP D2 月平均云资料得到的多年平均结果一致, 只是在数

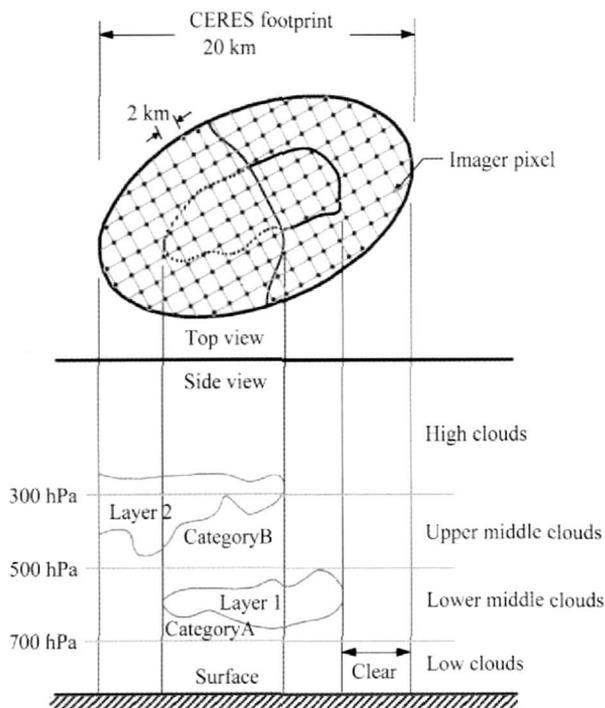


图 1 CERES 的空间分辨率和云的几何图形 (Geier et al., 2003)
Fig 1 CERES spatial resolution and cloud geometry (Geier et al., 2003)

值上不同, ISCCP D2 多年平均结果的高值区总云量约为 50%~66%, 在沙漠地区约为 46%~48% (陈勇航等, 2005a)。造成这种量值差异的原因是 ISCCP D2 的月平均资料是由每日多时次资料平均而来, 反映的是日平均总云量的多年平均情况, 而本文用的是 EOS 的 Aqua 卫星观测的单时次资料, 反映的是两年平均的 Aqua 卫星下午观测时的总云量空间分布情况。

低层云云量的分布与总云量的分布特征较为相似 (图 2), 低层云量最低值出现在塔克拉玛干

沙漠和巴丹吉林沙漠, 约为 14%~21%。低层云量的最高值出现在亚洲季风影响区, 约为 50%。在天山山脉、帕米尔高原、昆仑山脉、祁连山山脉及其他非山脉地区低层云量相对较高, 达到 26%~40%。

高层云量的分布与总云量和低层云量有较大的不同之处 (图 3), 最明显的差异就是亚洲季风影响区并不是高值区, 而且该区高层云量非常少。高层云量的高值区仍具有与高大山脉分布一致的特点, 天山、帕米尔高原、昆仑山、祁连山是高

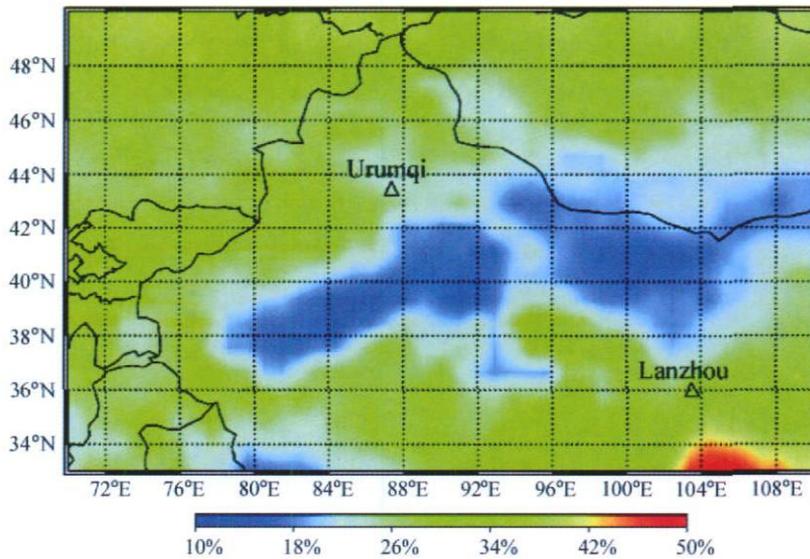


图 2 低层云量两年平均空间分布

Fig. 2 The two year average distribution of lower layer cloud coverage

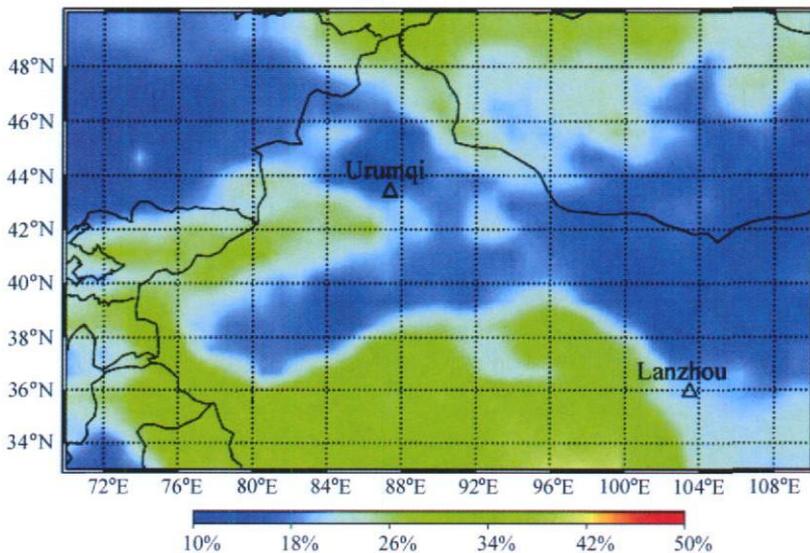


图 3 同图 2, 但为高层云量

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for upper layer cloud coverage

层云量的高值区, 云量可达 22%~32%。值得一提的是, 在 (33~35°N, 95~102°E) 区域高层云量的值很大, 最大可达到 45%。结合地形分析原因, 我们认为这是由于这一区域位于青藏高原东端, 印度季风带来的水汽沿着南北向分布的山谷可以到达该区, 加上地形抬升作用, 使得这一地区容易形成高层云。在塔克拉玛干、古尔班通古特、巴丹吉林和腾格尔沙漠上空是西北地区高层云量的最低值区, 云量约为 13%~19%。

综观上述 3 个云量参数的空间分布特征可以发现, 低层云量的高值区不仅分布在山脉地区, 而且也分布在非山脉地区。但高层云的云量则不同, 其高值区只分布在山脉地区。同时, 低层云量的低值区只分布在戈壁沙漠地区, 但高层云量的低值区不仅分布在戈壁沙漠地区, 而且还分布在非戈壁沙漠地区, 比如亚洲季风影响区。而总云量的分布特征即是低层和高层云量二者综合的结果。

4 云量的季节变化和年变化特征

4.1 典型地域的选取

从上述的空间分布特征可知, 我国西北地区的云量分布具有明显的地域性特点。以下将通过对比分析典型地域上云量的季节变化和年变化特征来对这一特点做更深入细致的了解。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, 是沙漠下垫面干旱区的典型代表。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, 由于低温高寒, 降水的一部分以冰和雪的形式被储存在这里, 使这两大高山成为西北地区天然的固体水库。其山前平原是由众多的大小河流出山谷后堆积的扇形地连接而形成的绿洲, 也是工农业生产较发达且人口密集的地区, 云水资源对这些地区的经济结构、生产力布局和规模起着决定性作用。在这两大山区实施人工增水作业将会产生极大的社会、经济效益。而亚洲季风影响气候区及其边缘地区是西北地区人口和工业最密集的地区, 也是研究西北地区人类活动对气候影响的重要地区。考虑到上述原因, 结合云量空间分布特征的研究结果, 本文选择了以下 4 个具有不同气候环

境背景的典型地域作为研究对象, 来对比分析西北地区云量季节变化和年变化的地域性特点 (图 4): 选取西北地区东部 (陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部), 即亚洲季风影响区及其边缘区域为 A 区 (32 个格点, 以下简称为“季风区”), 祁连山区为 B 区 (15 个格点); 天山山区为 C 区 (15 个格点), 塔克拉玛干沙漠地区为 D 区 (33 个格点)。

4.2 结果分析

表 1 给出了总云量、低层云量和高层云量 3 个云量参数的年平均平均值。从表中可以看出, 总云量和低层云量在季风区最大, 年平均总云量为 61.1%, 低层云量为 36.8%; 祁连山区的总云量大小与季风区很接近, 为 60.0%; 天山山区则为 56.6%; 在塔克拉玛干沙漠地区总云量最小, 仅为 33.0%。塔克拉玛干沙漠与季风区两地的总云量和低层云量年平均平均值相差最大, 总云量最高与最低值之间相差达 28.1%, 低云量最高与最低值之间相差达 19.5%。高层云云量年平均平均值在祁连山区最大, 达 33.2%, 最小值在塔克拉玛干沙漠地区, 为 16.8%, 两者之间差值达 16.4%。这是由于塔克拉玛干沙漠远离海洋, 且三面环山, 水汽供给条件差, 加上地势相对平坦, 缺乏形成上升气流的条件等, 往往难以形成云, 因而是云量的最低值区; 而亚洲季风影响区由于可以得到来自其以东和以南地区海洋方向传来的水汽, 具有较易形成云的条件, 因而一年四季, 季风区总云量和低层云的云量值均比其他地区大; 另外, 云量

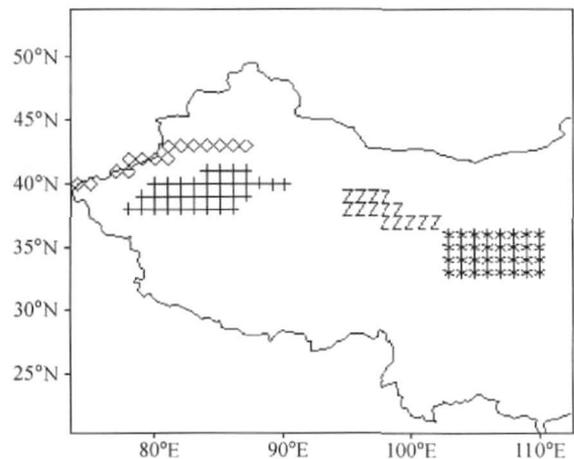


图 4 西北 4 个典型地域示意图

Fig 4 The definition of the four regions in northwestern China

表 1 云量的年平均均值

参量	季风区	祁连山区	天山山区	塔克拉玛干沙漠
总云量	61.1	60.0	56.6	33.0
低层云量	36.8	26.9	28.6	17.3
高层云量	25.0	33.2	27.9	16.8

高值区具有沿山脉分布的特征,特别是高层云的云量值在山区要比其他地区大。究其原因,这与在山脉的迎风坡由于气流抬升作用而容易形成高层云有关。不过,不同的山区由于所处的地理位置和不同的地形地貌以及其他方面的原因,其云量时空分布特征会存在差异。天山山区的总云量比祁连山区的要少,主要是因为天山山区更加远离海洋,处在湿度小的西风带气候区;而祁连山区距离印度洋相对较近,同时受到来自中国东部的暖湿气流的影响,成云的机会也就比天山更多一些。在祁连山区以南和以东地区,云量、云光学厚度、云水含量值非常高也为此提供了佐证,而且这个现象也存在于从 ISCCP D2 数据得到的研究结果中。

表 2 给出了总云量、低层云量和高层云量 3 个云量参数的季节平均值。从中可看出,即使对于同一季节而言,4 个不同地域云量大小也是有差别的。秋季,在季风区和塔克拉玛干沙漠之间,低层云量的季节平均值相差可达 27.8%,是 4 个地区间低层云量季节差异最大的。夏季,祁连山区和塔克拉玛干沙漠高层云量的季节平均值差异最大,两者之间相差达 18.5%。

表 2 云量的季节平均值

参量	季节	季风区	祁连山区	天山山区	塔克拉玛干沙漠
总云量	冬季	49.3	49.2	48.1	30.3
	春季	68.9	67.8	66.4	50.0
	夏季	71.0	69.8	65.7	45.3
	秋季	58.4	52.2	49.4	21.8
低层云量	冬季	30.5	26.1	25.0	15.5
	春季	41.2	32.3	36.7	27.2
	夏季	43.0	32.0	31.7	23.4
	秋季	37.9	23.9	23.9	10.1
高层云量	冬季	18.9	22.9	23.1	13.9
	春季	27.8	35.4	29.5	23.0
	夏季	28.0	37.8	33.1	22.0
	秋季	20.5	27.3	25.6	11.8

从季节变化特征来看(表 2),在季风区,总云量、低层云量和高层云量随季节的变化均按夏、春、秋、冬的顺序减少,总云量由夏季的 71.0% 减少到冬季的 49.3%,低层云量由夏季的 43.0% 减少到冬季的 30.5%,高层云量由夏季的 28.0% 减少到冬季的 18.9%;而在祁连山区和天山山区,总云量在夏季或春季最大,冬季最小。由于祁连山区更接近季风区,水汽条件好于天山山区,因而总云量在各个季节都比天山山区多。这两个山区的低层云在春季最大,其次是夏季,秋季最小。高层云量在夏季最大,其次是春季,冬季最小;而在塔克拉玛干沙漠这 3 个云参量均在春季最大,其次是夏季,秋季最小,特别是总云量可以由春季的 50.0% 减少到秋季的 21.8%,低层云量由春季的 27.2% 减少到秋季的 10.1%,高层云量由春季的 23.0% 减少到秋季的 11.8%,季节变化幅度是相当大的。

从年变化特征来看,季风区和祁连山区总云量最大值出现在 6 月,天山山区总云量最大值出现在 5 月,塔克拉玛干沙漠地区总云量最大值则出现在 7 月。两大山区总云量在 1~7 月逐渐增多,虽然这期间祁连山区总云量大于天山山区,但两者总云量值相当接近。而 8 月和 9 月总云量开始减少,且祁连山区总云量变得明显大于天山山区。云量的这种变化与降水的年变化特征也相吻合,反映出天山系西风带气候在春夏季多云多雨,而祁连山区处于季风区的西北边缘,因而不但是在春夏季,在秋季也相对多云多雨。10 月祁连山区和天山山区总云量几乎相等,但 11 月和 12 月天山山区总云量变得明显大于祁连山区,这是因为冬季来自中亚的水汽到达天山的机会多于祁连山区。从年变化曲线还可以看出,由于受季风影响,季风区 3~9 月总云量和低层云量保持明显的高值,而高层云在 2~9 月云量相对较多。1 月,该区 3 个云量参数都减少到最小值。在祁连山区,总云量和低层云量在 5~7 月维持明显的高值,分别大于 74% 和 35%,最小值分别出现在 11 月和 10 月。该区高层云量出现高值的时间为 3~9 月,云量一直大于 34%,最小值出现在 12 月。在天山山区,春季和夏季的 3 个云量参数值在 5~7 月与祁连山地区的较为相近,是一个明显的高值期。3 个云量参数一年中的最小值出现在 10 月或

冬季的 3 个月中。塔克拉玛干沙漠总云量各月均比上述 3 个地区小得多, 1~7 月也是总云量逐渐增多的过程, 之后开始减少, 10 月达到最低, 约为 10%。云量的 3 个参数均在春季最大, 从夏季到冬季均不断减小, 一年中 3~9 月云量相对较多, 最低值均出现在 10 月。

从季节变化和年变化特征来看, 4 个地域的云量大小虽然存在较大差异, 但云量的变化特征在季风区和祁连山区相对比较接近, 在天山山区和塔克拉玛干沙漠也相对较为接近。这主要是因为季风区与祁连山区在地理位置上比较接近, 而天山山区和塔克拉玛干沙漠不仅在地理位置上接近, 而且还处于同一气候区内。

5 结语

以往的研究结果 (宜树华等, 2003; 陈勇航等, 2005a, 2005b) 表明, 云量大小具有明显的随地形变化的特点, 而且还受到地理位置的影响。为了进一步了解云量变化的地域性特征, 本文给出了 Aqua 卫星下午观测时刻西北地区总云量、低层云和高层云云量的两年平均空间分布特征。结果表明, 这一分布特征与从 ISCCP D2 资料得到的多年平均分布特征很相似, 即高值区位于天山—昆仑山—祁连山一带以及陕南和陇南地区, 低值区在塔里木盆地—内蒙古西部戈壁沙漠—黄土高原西北部一带, 但数值上是不同的。考虑到总云量的这种分布特征是低层云量和高层云量综合的结果, 进一步研究发现, 低层云量的高值区不仅分布在山脉地区, 而且也分布在非山脉地区。但高层云的云量则不同, 其高值区只分布在山脉地区; 同时, 低层云量的低值区只分布在戈壁沙漠地区; 但高层云量的低值区不仅分布在戈壁沙漠地区, 而且还分布在非戈壁沙漠地区, 比如亚洲季风影响区。

年平均总云量以西北地区东南部的季风区为最多, 约为 61%, 其次是祁连山和天山山区分别约为 60%和 57%, 塔克拉玛干沙漠最少, 仅约为 33%。总的来说, 云量大小随地域的不同相差很大, 高层云云量年平均值的最大差异发生在祁连山区和塔克拉玛干沙漠之间, 两者相差 16.4%。而总云量和低层云量年平均值在季风区和塔克拉

玛干沙漠地区相差最大, 分别可达 27.6%和 19.5%。

对云量的季节变化和年变化特征进行的分析表明, 季风区和祁连山区云量最大值一般都出现在夏季, 天山和塔克拉玛干沙漠地区云量最大值一般都出现在春季, 最小值则均出现在秋冬季。从年变化来说, 季风区和祁连山区总云量最大值出现在 6 月, 天山山区总云量最大值出现在 5 月, 塔克拉玛干沙漠地区总云量最大值则出现在 7 月。总的来说, 3 个云量参数值在 3~9 月较高, 最低值出现在 10~12 月。

由于本文资料是由卫星从高空向下观测的结果, 这与常规地面观测不同, 另外反演出的结果在时间和空间上的分辨率还不能令人十分满意, 特别是本文采用的资料只把云量分为总云量、低层云和高层云也显得不够细致。因此, 今后还需要结合其他云量资料来进一步分析西北地区云的特征及变化情况。

致谢 本文资料来自美国 NASA 的 Langley Distributed Active Archive Center, 在使用过程中得到衣育红博士的帮助, 在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 2005a. 中国西北地区云水资源的时空分布特征 [J]. 高原气象, 24 (6): 905-912. Chen Yonghang, Huang Jianping, Chen Changhe, et al. 2005a. Temporal and spatial distribution of cloud water resources over northwestern China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (6): 905-912.
- 陈勇航, 黄建平, 王天河, 等. 2005b. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系 [J]. 应用气象学报, 16 (6): 717-727. Chen Yonghang, Huang Jianping, Wang Tianhe, et al. 2005b. Temporal and spatial distribution of the different clouds over northwestern China with the relation to precipitation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (6): 717-727.
- 丁守国, 石广玉, 赵春生. 2004. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候的可能影响 [J]. 科学通报, 18 (11): 1105-1111. Ding Shouguo, Shi Guangyu, Zhao Chunsheng. 2004. Variability of amounts of different type clouds over the global and their possible influences on the climate in recent 20 years based on ISCCP D2 Data [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 18 (11): 1105-1111.
- Geier E B, Green R N, Kratz D P, et al. 2003. Cloud and the Earth's Radiant Energy System (CERES) data management sys-

- tem SSF collection document [C]. Release 2, Version 1, 243pp.
- 李冰, 刘小红, 洪钟祥, 等. 1999. 深对流云输送对于对流层 O_3 、 NO_x 再分布的作用 [J]. 气候与环境研究, 4 (3): 291-296. Li Bing, Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang, et al. 1999. The role of deep-convective cloud transport in the redistribution of tropospheric chemical species [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (3): 291-296.
- 林朝晖, 曾庆存. 1998. 气候系统及模式中反馈机制研究 I 概念和方法 [J]. 气候与环境研究, 3 (1): 1-14. Lin Zhaohui, Zeng Qingcun. 1998. Analysis of feedback mechanisms in climate model and climate system. Part I. Basic concepts and methodology [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (1): 1-14.
- 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 2003. 中国地区云的气候特征分析 [J]. 气象学报, 61 (4): 466-473. Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, et al. 2003. Climatic analysis of the cloud over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (4): 466-473.
- 刘瑞霞, 刘玉洁, 杜秉玉. 2004. 中国云气候特征的分析 [J]. 应用气象学报, 15 (4): 468-475. Liu Ruixia, Liu Yujie, Du Bingyu. 2004. Cloud climatic characteristics of China from ISCCP data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 15 (4): 468-475.
- 魏丽, 钟强. 1997. 青藏高原云的气候学特征 [J]. 高原气象, 16 (1): 10-15. Wei Li, Zhong Qiang. 1997. Characteristics of cloud climatology over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (1): 10-15.
- Minnis P, Young D F, Sun-Mack S, et al. 2003. CERES cloud property retrievals from imagers on TRMM, Terra, and Aqua. SPIE 10th Intl. Symp Remote Sens. Cloud and Atmos [C]. Barcelona, Spain, September 8-12: 37-48.
- Minnis P, Sun-Mack S, Chen Yan, et al. 2008. Comparison of CERES-MODIS and IceSat GLAS Cloud Amounts.
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (11): 2261-2287.
- 王可丽, 江灏, 陈世强. 2001. 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, 20 (3): 252-257. Wang Keli, Jiang Hao, Chen Shiqiang. 2001. Cloud cover over Qinghai-Xizang Plateau: Comparison among meteorological station observations, ISCCP-C2, and NECP reanalysis data [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (3): 252-257.
- Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, et al. 1996. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 853-868.
- 宜树华, 刘洪利. 2003. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析 [J]. 气象, 29 (1): 7-11. Yi Shuhua, Liu Hongli. 2003. Spatial and temporal distributions of cloud over northwest of China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (1): 7-11.