三种卫星云量数据在青藏高原地区的比对分析

刘健

国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要:青藏高原是卫星反演云参数的热点和难点区域。选取 1982年—2015年 0.1°空间分辨率的 Patmos-x、0.25°空间分辨率的 CLARA-A2 的 NOAA/AVHRR下午星数据和 2003年—2015年 0.05°空间分辨率的 Aqua/MODIS C6等3种云量数据,针对青藏高原区域,从数据的反演算法和数据的空间属性出发,进行比对分析。Patmos-x和 CLARA-A2 具有相同的数据源和相近的云检测算法。与地面观测云量相比,Patmos-x云量与地面观测云量间的相关性大于 0.8,MODIS 次之,CLARA-A2 云量与地面观测云量的相关性很弱。3种数据均表现出高原东部云量多于西部云量,北部云量多于南部的云量空间分布特征和白天云量大于夜间云量的时间分布特征。量值上CLARA-A2 云量大于 Patmos-x。2003年—2015年夜间 Aqua/MODIS 年均云量比 CLARA-A2 高 8.82%。34年间Patmos-x和 CLARA-A2 年均云量以减少为主,夜间云量的变化趋势比白天云量变化趋势明显,CLARA-A2 云量的变化趋势较 Patmos-x明显。2000年是高原区域云量由偏多到偏少变化的拐点。1、4、10月多年云量以减少为主要变化趋势,7月云量以弱增多为主要变化特征。

关键词:云量,卫星,气候数据,青藏高原,Patmos-x,CLARA-A2,MODIS

引用格式:刘健,2021.三种卫星云量数据在青藏高原地区的比对分析,遥感学报,25(7):1445-1459

Liu J. 2021. Performance of cloud fraction of three satellite cloud climate date records over the Tibetan Plateau. National Remote Sensing Bulletin, 25(7):1445-1459[DOI:10.11834/jrs.20219262]

1 引 言

青藏高原被称为世界的第三极。青藏高原不仅影响着区域的季风环流和亚洲的能量和水循环(Wu和 Zhang, 1998; Zhao和 Chen, 2001a; Wu等, 2007; Xu等, 2008; Zhou等, 2009), 而且对北半球大尺度的大气环流和北太平洋赤道到中纬度的海一气相互作用具有重要的调节作用(Zhao和Chen, 2001b; Liu等, 2007; Zhao等, 2007, 2009; Nan等, 2009; Zhou等, 2009; Duan等, 2012)。云通过辐射及降水影响大气中的能量和水循环方式,并进一步影响天气和气候系统。高原云在很多方面均具有高原天气气候的特征,因此高原云的研究对高原天气气候研究具有重要的意义。

青藏高原下垫面复杂,气象台站十分稀少, 地面观测数据非常有限,其时空分辨率远不能满 足高原天气预报、气候预测和科学研究的需要,

更不能实现对青藏高原自然灾害和生态环境的全 面动态监测。气象卫星携带仪器从太空对地球及 其大气层进行气象观测, 其观测范围广, 观测次 数多,观测时效快,观测数据质量高,不受自然 条件和地域条件限制。因此气象卫星资料在青藏 高原云研究中具有重要作用。魏丽和钟强(1997) 利用国际卫星云气候计划 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 资料和 Hahn 等 分析整理的全球地面观测云气候资料, 综合分析 了青藏高原地区云水平和垂直分布的气候特征, 得到青藏高原冬季和夏季总云量分布明显不同的 结论。Gao等(2003)利用 MODIS 的水汽及卷云 资料,研究了2002年青藏高原上空水汽及卷云的 季节变化,发现了青藏高原上空的高层云在4月份 表现最为活跃并且水汽含量较低,而在11月份卷 云出现的几率最小的现象。Yu等(2004)基于 ISSCP的资料,发现在60°S-60°N区域内,云光学 厚度年平均最大值位于青藏高原的背风坡即四川

收稿日期: 2019-07-30; 预印本: 2020-05-15

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2018YFC1407200,2018YFC1407204); 国家自然科学基金(编号:61531019)

第一作者简介:刘健,1969年生,研究员,研究方向为大气参数反演算法、卫星遥感数据在天气气候分析中的应用。 E-mail: liujian@cma.gov.cn

盆地附近,青藏高原的摩擦和阻挡效应使得这些深厚层云得以形成与维持。Chen和Liu(2005)使用 2000-04—2004-02 MODIS/Terra 卫星观测的卷云反射率研究了卷云在青藏高原和亚洲季风区季节性进退的特征。Naud等(2015)使用 MODIS和 CERES(2000年—2012年)数据,以及11个地面观测台站数据,分析了高原白天短波辐射和长波辐射与云量和云光学厚度的关系。

从已有的研究可知,在青藏高原云研究中使 用的卫星数据以2010年以前的ISCCP和MODIS数 据为主,近来也发表了利用 MODIS 数据的新研究 成果(Bao等, 2019)。近年来,卫星云气候数据 集有较快的发展,形成众多云气候数据集 (Stubenrauch等, 2013),卫星气候数据集质量的 高低会受到载荷观测能力、载荷间相对定标稳定 性及反演算法等多种因子的影响。Stubenrauch等 (2013) 指出,全球总云量从0.56 (POLDER) 到 0.74 (HIRS-NOAA) 变化的主要原因是由不同遥 感仪器对不同云类的敏感性及其不同的反演算法 产生的。新版云气候数据集无论在反演算法还是 数据时空属性等方面较之前研究所用数据有较大 的不同,不仅在数据的时间跨度和空间分辨率上 有所提升, 更重要的是改进了数据定标精度和反 演算法。这些新的云气候数据在青藏高原区域的 表现如何是本文阐述的重点。本文首先介绍研究 中使用的数据和方法,讨论3种卫星遥感云量数据 与地面观测云量间的比对分析结果,再从时间和 空间分布特征角度比对分析3种云量数据,最后给 出结论。

2 数据和处理方法

2.1 卫星数据

2.1.1 Patmos-x

Patmos-x 是美国主导研发的长时间序列卫星气候数据集,数据取自极轨卫星全球 AVHRR/GAC 再定标数据,以NOAA 卫星为主,还包含 Metop 卫星。在定标再处理数据的基础上,云检测算法采用 Navie Bayesian 方法,选择深海、浅水、陆地、积雪、南极、北极和沙漠等7种下垫面类型,使用6个来自 CALIPSO 的 Bayesian 分类器进行云检测。全球 GAC 数据经过重采样后,形成全球 0.1×0.1经

纬度空间分辨率的产品 (level-2b),包含云量、云顶高度/温度、云光学厚度等云参数 (Heidinger等,2012,2014,2016)。自2013年,数据实现了每日更新,使得Patmos-x数据从1979年起延续至今。

云一气溶胶激光雷达和红外探路者卫星观测 (CALIPSO) 卫星于2006-04发射, 其主要任务是 提供全球的云和气溶胶观测数据,用于研究云和 气溶胶对气候的影响。CALIPSO上搭载具有正交 偏振的云一气溶胶激光雷达(CALIOP),可测量 532 和 1064 nm 处的反向散射,提供可用以区分云 天和晴空,以及云三维垂直分布的准确信息,在 业界常用来作为被动遥感云检测的精度验证标准 数据。Heidinger等(2016)利用CALIPSO数据对 Patmos-x 云量数据进行了精度分析。比对结果表 明, 在没有做任何空间滤除处理的条件下, Patmos-x与CALIPSO相关性为0.9,运用空间滤除 处理技术后,相关系数达到0.95。Heidinger等 (2016) 同时指出, 2003年—2014年的Patmos-x和 MYD35两种数据在云量的平均值、季节变化和线 性趋势等方面在除冰雪覆盖的大部分地区具有高 度一致性。

2.1.2 CLARA-A2

EUMETSAT在2012年发布了第一版的云气候 数据(CLARA-A1)(Karlsson等, 2013)。数据的 空间分辨率0.25°×0.25°,时间分辨率包含有轨道、 日平均和月平均3种,数据时间跨度1982年一 2009年。2017年发布的第二版数据(CLARA-A2, https://wui.cmsaf.eu[2019-07-30], 下文简称A2) 在第一版数据的基础上,在处理时对 NOAA/ AVHRR 可见光通道的定标做均一化处理, 改进 NOAA/AVHRR 红外通道定标精度;对 AVHRR 3.7μm 通道做中值滤波处理。A2数据将A1数据的 截止时间从2009年延长至2015年。在云参数处理 方法上,相比A1数据,A2数据主要的改进体现 在:利用CALIPSO/CALIOP数据对云的光学厚度进 行归类,将云检测阈值细化为区分厚云和半透明 云两类云;引入最暖像元的SST检验,改进了针对 洋面上薄云和部分覆盖云情况下的云检测方法; 新增基于亮温差的动态阈值云检测方法。云检测 算法改进后,A2云检测偏差从A1的14.4%下降到 13.2%, 云检测精度从A1的75.8%提高到79.7% (Karlsson等, 2017)。

2.1.3 Aqua/MODIS (MYD06)

MODIS 是搭载在美国 NASA Terra 和 Aqua 卫星 上的扫描辐射计,拥有36个探测通道。Aqua于 2002-05 发射, 升轨道的观测地方时约13:30, 降 轨道观测地方时约在01:30。MODIS二级云产品 (https://ladsweb.nascom.nasa.gov[2019-07-30]) 为 5分钟段轨道数据,针对Terra和Aqua分别命名为 MOD06 和 MYD06,包含云量、云顶高度、云相 态、云光学厚度、云粒子有效半径、云水路径等 多种云宏观微观参数,其中云量根据5×5像元的云 检测结果计算得到(King等, 2013)。云检测算法 采用22个探测通道数据,区分白天和夜间,针对 海洋、陆表、冰雪、沙漠、海岸带和极地等不同 下垫面和区域类型设置云检测方案(Ackerman等, 2010)。对云检测精度的评估显示,与激光雷达主 动观测相比,两者间的一致性大约为85% (Ackerman等, 2008)。随着 MODIS 一级数据定标 以及二级产品反演算法的不断更新,MODIS产品的版本不断更新。本研究中采用第6版(C6)数据(Baum等,2012,Platnick等,2017),利用MODIS-MRTS软件将5分钟MYD06云量轨道数据投影为0.05°×0.05°空间分辨率的等经纬度网格数据,对多个5分钟轨道数据进行拼接处理。

曹芸等(2012)基于 Terra MODIS C5 数据的研究表明,在月平均尺度上,中国区域 MODIS 云量产品与气象站云量观测资料的相关性超过80%,两者间的偏差随纬度和季节变化,在冬季最大,中纬度地区偏差大于40%;夏季最小,一般可在10%左右。

2.2 地面观测数据

图1是研究区的地理高程,其上的标注点是地面气象观测站点,多集中在高原的北侧和东侧,在高原腹地和西侧较少。研究中使用1982年—2015年期间的气象观测站点定时观测数据,所用地面观测数据来自国家气象信息中心。

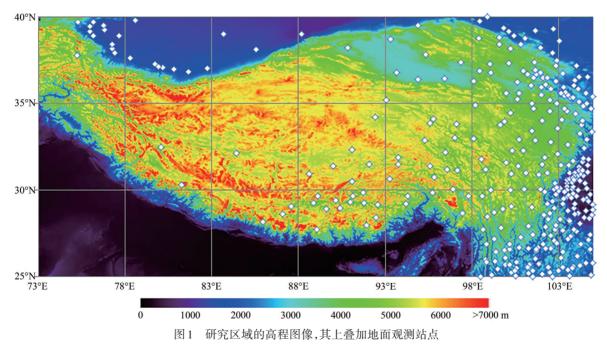


Fig. 1 Digital elevation image of research area and surface observation sites overlay the image

2.3 数据处理方法

考虑到长时间序列数据的完整性和稳定性,减少不同卫星数据间的相互订正(Foster 和Heidinger, 2013),本研究选用Patmos-x和CLARA-A2中NOAA下午轨道系列卫星数据。1982年—2015年下午星系列卫星数据包括NOAA-

07、NOAA-09、NOAA-11、NOAA-14、NOAA-16、NOAA-18和NOAA-19。考虑每颗卫星轨道漂移对观测时间的影响(图 2),选择 7:00-9:00(UTC)升轨道数据及 19:00-22:00(UTC)降轨道数据,因此如 NOAA-11 升轨道数据在 1992-10—1994-08期间,NOAA-14在 1999-07—2001-02期间,数据

因观测时间不符合上述数据选择标准,在分析时 数据被移除。当同时有多颗卫星观测数据时,取 观测时间偏差小的卫星观测数据。

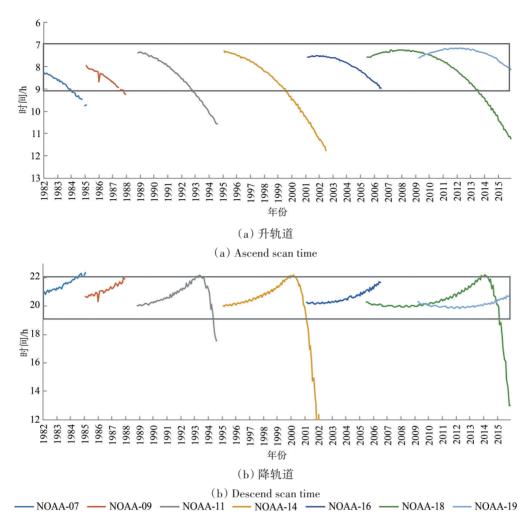


图 2 1982年—2015年 NOAA 下午星系列卫星在青藏高原地区的平均观测时间 (选择的数据观测时间以灰色框图表示) Fig. 2 The mean observation time over the research area of NOAA series satellites during 1982—2015 (Grey frame represents selected data observation time)

根据上述数据选取原则,Patmos-x和A2的NOAA系列卫星观测时间,对应最近的地面观测时次分别为08:00、14:00和17:00(北京时)。MYD06在青藏高原地区的数据时间分别在北京时的04:00和16:00左右,对应最近的地面观测时次为08:00和17:00,由于早上两种观测数据的观测时间间隔较长,因此只选择17:00时的地面观测云量与MODIS数据进行比对。

地面站点观测是"点"观测,卫星观测是"面"观测。根据以往研究结果(Karlsson等,2005; Kotarba,2009; Fontana等,2013; Ma等,2014),两种观测数据在空间上的匹配采用以地面观测站点为中心的30km范围内作为卫星和地面观测的匹

配空间。对于MTYD06,采用5×5像元有效云量平均值,对于Patmos-x采用3×3像元有效云量平均值,对于A2则采用距离最近原则进行地面观测与卫星数据的空间匹配。在卫星观测与地面观测比对分析时,两种观测数据在时间尺度上均采用瞬时观测数据,不做任何时间尺度上的平均处理。利用卫星数据计算研究区中像元空间和时间平均值时,去除地理高程小于1500m像元的观测值。在本文中定义3、4、5月为春季,以MAM表示;6、7、8月为夏季,以JJA表示;9、10、11月为秋季,以SON表示;12月到次年2月为冬季,以DJ表示。

3 结 果

3.1 与地面观测的比较

表 1 是 2006 年—2014 年以 NOAA-18 为数据源 的Patmos-x、A2和MYD06云量与地面观测云量的 统计一览表。从表1中可见,多年空间平均条件 下,3种卫星云量数据的统计年平均值差异较小, 但 A2 与其他云量数据相比,在夏季云量明显偏 低,冬季明显偏高。有可能是由于A2空间分辨率 较低, 易造成夏季低估小尺度的积云, 而冬季高 估了较为稳定的层状云所致。由不同季节计算的 卫星观测与地面观测相关性的多年结果(表2)可 知: Patmos-x 云量与地面站点观测云量的相关性 在各季节中均保持最高,基本在0.9以上,MODIS 云量次之, A2云量与地面观测云量间的相关性最 小。尽管 MODIS、Patmos-X和A2与地面观测站点 匹配时,会因卫星数据本身的有效性不同而出现 匹配样本点不同的情况,云量与地面观测云量的 散点图(图3)同样显示出Patmos-x云量与地面观 测云量的线性关系最好, A2 云量与地面观测间的 线性关系较差。

MODIS拥有36个探测通道,对云的探测能力 高于NOAA/AVHRR, 并且MODIS云量的空间分辨 率最高,与地面观测站点的空间匹配性应最好, 但与地面观测的相关性不如 Patmos-x。不考虑 MODIS与NOAA/AVHRR云观测能力的差异和云检 测算法的不同,卫星观测与地面观测的时间差有 可能会降低观测目标间的一致性, 使得观测时间 相差近1小时的MYD06与地面观测云量间的相关 性降低。A2云量和Patmos-x均来自NOAA/AVHRR 数据,云检测算法相似,但A2与地面观测云量间 的相关性比Patmos-x数据低,可能原因来自数据 的空间均一性。青藏高原下垫面特性复杂, 地理 高程起伏较大,云具有较强的局地性特征。0.25° 空间分辨率的 A2 云量数据与地面观测站点进行空 间匹配时,一方面采用距离最近原则,云的非均 匀性有可能使得地面观测与卫星观测间不完全匹 配,另一方面低空间分辨率数据也带来了云部分 覆盖引起的低估(如夏季)或高估(如冬季)问 题,从而对相关性结果产生影响。

表 1 2006年—2014年 Patmos-x/NOAA-18, A2/NOAA-18, MODIS 云量与地面观测云量 Table 1 Cloud fraction of Patmos-x/NOAA-18,

A2/NOAA-18, MODIS satellite and surface observation during 2006-2014

/%

	年均值	MAM	JJA	SON	DJF
地面观测站	62.24	64.41	72.62	60.83	48.27
PATMOS-x/NOAA-18	62.44	60.58	74.46	59.34	48.36
A2/NOAA-18	63.88	63.75	62.79	63.66	64.73
MYD06	62.54	65.32	74.04	56.30	53.63

注: MAM、JJA、SON、DJF分别表示春季(March、April、May)、夏季 (June、July、August)、秋季(September、October、November)和冬季 (December January February)

表 2 2006年—2014年 Patmos-x、A2 和 MYD06 日云量与地面观测云量相关性的季节分布

Table 2 The correlation between Patmos-x, A2, MYD06 and surface observation cloud fraction in different season during 2006-2014

年份	MYD06& SYNOP				Patmos-x& SYNOP			A2& SYNOP				
	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF
2006	0.58	0.65	0.53	0.68	0.96	0.97	0.97	0.93	0.26	-0.27	-0.1	-0.30
2007	0.76	0.50	0.75	0.63	0.94	0.96	0.98	0.84	-0.07	-0.11	0.39	0.02
2008	0.58	0.54	0.82	0.82	0.96	0.84	0.98	0.98	0.15	-0.21	-0.06	-0.11
2009	0.49	0.67	0.71	0.73	0.97	0.98	0.99	0.97	-0.26	0.04	0.26	-0.18
2010	0.73	0.65	0.69	0.72	0.96	0.83	0.98	0.95	-0.07	0.12	-0.31	-0.19
2011	0.64	0.70	0.78	0.60	0.95	0.97	0.98	0.97	-0.04	0.09	0.14	0.01
2012	0.21	0.28	0.64	0.58	0.86	0.96	0.96	0.90	-0.04	-0.08	0.05	-0.24
2013	0.63	0.79	0.85	0.71	0.94	0.84	0.98	0.94	-0.10	0.10	0.03	-0.04
2014	0.56	0.63	0.79	0.77	0.86	0.67	0.93	0.89	-0.03	-0.04	0.09	0.20

3.2 年、季云量

2003年—2015年MYD06、Patmos-x和A2共同 有数据的13年间、MYD06、Patmos-x和A2年平均 白天云量分别为59.94%,62.82%和68.18%,年平 均夜间云量分别为58.88%,49.26%和50.61%。 3种卫星云量数据均反映出研究区平均云量白天多 于夜间, 年平均白天云量中A2最大, MYD06最 小。夜间 MYD06 云量明显高于 A2 和 Patmos-x 云量,

尤其是冬(12—2月)、春季(3—5月)。白天与夜间的云量存在明显差异,幅度超过7%,Patmos-x与A2均表现为8月最小(1982年—2015年A2白天夜间云量差异7.19%,2003年—2015年A2白天夜间云量差异7.45%,1982年—2015年Patmos-x白天夜间云量差异8.42%,2003年—2015年,Patmos-x白天夜间云量差异8.1%)。3—4月最大(A2大于22%,Patmos-x大于17%)。MODIS云量白天与夜间的云量差幅度小于Patmos-x和A2,小于7%,白

天和夜间差异最大出现在10月(-6.8%),最小值出现在11月(-0.01%),次小值出现在8月(0.38%)。除了云量本身的日夜变化外,日/夜云检测算法差异也可导致日/夜云产品的差异。白天云检测算法中可以联合使用可见光通道和红外通道,使得云检测的精度较高。夜间只有红外通道,相比白天,云检测的精度有所降低,尤其是冷地表条件下,会出现云漏检情况,易导致云量反演值偏小。

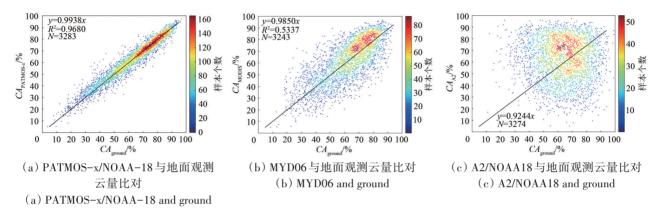


图 3 2006年—2014年 Patmos-x/NOAA-18, MYD06 和 A2/NOAA18 云量与地面观测云量的比对(横坐标是地面观测云量, 纵坐标是卫星反演云量, 线性拟合叠加在散点图上)

Fig. 3 The cloud amount scatter diagram between satellite and surface observation from 2006 to 2014 based on daily instantaneous observation data. Linear trend is overlaid (X-axis is ground observation, Y-axis is satellite retrieval)

在云量的季节分布上,3种云量数据时间变化 趋势表现一致:白天云量(图4(a))在春季(3— 5月)出现高值,在4月出现最高值。在秋季(9— 11月)出现平均云量的低值,在11月出现全年云 量的最低值;夜间云量(图4(b))在夏季出现云量的最高值,在秋季出现云量的最低值,这与地面云量观测相一致(唐小萍等,2009)。

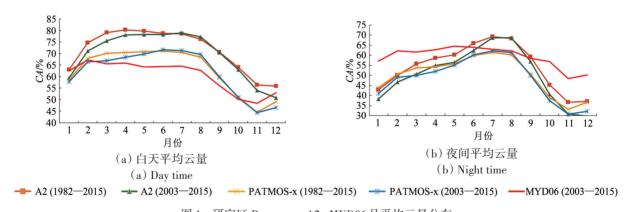


图 4 研究区 Patmos-x, A2, MYD06月平均云量分布

Fig.4 Monthly mean cloud fraction of Patmos-x, A2 and MYD06 in research area

2003年—2015年,无论白天和夜间,MYD06 云量的标准差最小(白天1.55,夜间1.39),A2云 量的标准差最大(白天3.05,夜间2.35)。MYD06 标准差比以NOAA/AVHRR为数据源的Patmos-x和 A2小,一部分原因出自多年 Aqua/MODIS 轨道飘移较小,观测时间较为稳定。NOAA/AVHRR下午星系列在 2003 年—2015 期间涉及 NOAA-16、NOAA-18和 NOAA-19等3颗卫星,卫星的更替和

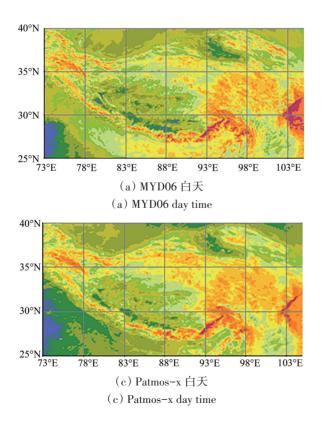
40°N

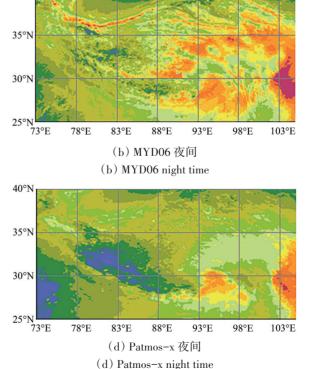
每颗卫星在运行周期内轨道的漂移,造成观测时间有所变更,加上不同卫星上观测仪器间的定标差异,有可能使长期观测数据的稳定性和均一性出现波动。

MODIS云量与Patmos-x和A2相比,白天各季 节的变化趋势相当, 夜间 MODIS 各月变化平稳, 与 Patmos-x 和 A2 有明显的季节变化不同。从 MODIS 云检测算法可知,在夜间的陆地和冰雪下 垫面条件下, 采用 13.9 μm, 6.7 μm 通道亮温, 3.9 μm 与 12 μm 通道亮温差、11 μm 与 12 μm 通道 亮温差、11 μm与3.9 μm通道亮温差、7.3 μm与 11 μm通道亮温差以及地表温度等7个判识条件进 行云检测。Patmos-x的数据源NOAA/AVHRR夜间 有 3.7 μm, 11 μm 和 12 μm 共 3 个 通 道, 在 冷 地 表 条件下, 云检测易出现偏差 (Heidinger等, 2016)。Heidinger等(2016)同时指出,在统计意 义上, Patmos-x与MOD35的云检测差异在3%左 右,最大的差异在冰雪下垫面,MOD35比Patmosx 高 6%。 夜间, Patmos-x 比 MYD35 低 10% 左右。 从(图4(b))看出,除夏季外,夜间MODIS云量 高于Patmos-x和A2,尤其是冬季差异较为明显。

其中原因可能就是来自 Heidinger 等(2012)分析 指出的不同卫星探测能力和数据空间尺度的影响。

2003年-2015年平均云量空间分布(图5) 上可知, 白天3种云量数据的空间分布相似, 在高 原的腹地出现年平均云量的低值,在高原的北部、 东部出现年平均云量的高值。MYD06与Patmos-x 云量在空间分布模态上相接近, A2多年平均白天 云量在高原的北部出现高值分布区,3种数据均在 如沿喜马拉雅山脉、喀喇昆仑山脉、横断山脉和 念青唐古拉山脉等与地形高度吻合区域出现云量 高值区,这些云量高值区部分原因是由云雪识别 偏差所导致。Ma等(2014)的研究也表明 Aqua C6的云检测产品在白天积雪下垫面上会出现将雪 误判为云的偏差。夜间, Patmos-x与A2云量的空 间分布形态更为接近,云量呈现西南一东北向递 增趋势,在高原腹地出现云量的低值区。MYD06 夜间云量明显高于Patmos-x和A2,在喜马拉雅山 山脉北麓88°E以东, 高原的北部与沙漠的边界处 出现云量的高值分布,整体呈现东部云量多于西 部云量的空间分布形式。





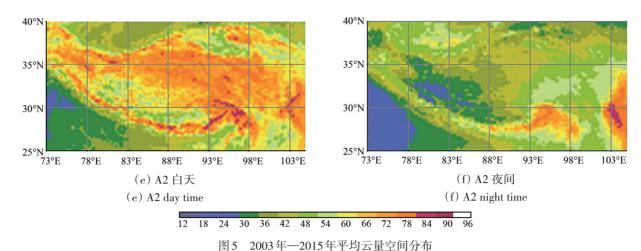


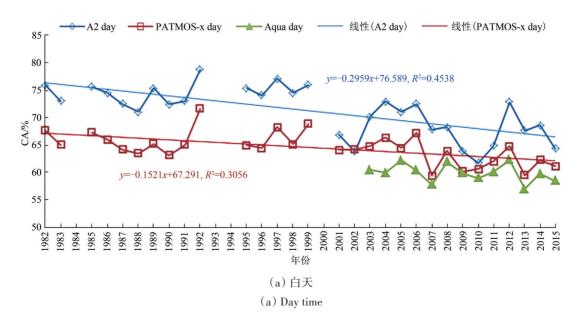
Fig. 5 The annual mean cloud fraction over analysis area during 2003—2015

3.3 云量变化趋势

图 6是 Patmos-x、A2 和 MYD06 多年平均云量分布曲线,其上叠加 Patmos-x和 A2 的线性趋势线。白天云量缺1984年、1993年、1994年和2000年是因为卫星观测时间不符合数据选择条件。可以看到无论白天还是夜间,Patmos-x和 A2 云量均显示出不同程度的减少趋势,其中 Patmos-x 白天云量减少趋势较弱,夜间云量的减少趋势比白天的明显。A2 云量的减少趋势比 Patmos-x明显。MYD06 白天和夜间年均云量 2003年—2015年的变化呈现微弱的减少趋势(白天,y=0.1396x+61.379,R²=0.1143;夜间 y=0.1416x+60.33,R²=0.1584),白天 MYD06 与 Patmos-x 变化趋势相当。这与王旻燕

和王伯民(2009)及 Duan 和 Wu(2006)利用地面观测云量数据得到的研究结论相同。

从1982年—2015年研究区云量累计偏差的时间序列看(图7): Patmos-x和A2云量的多年变化趋势相同,2000年之前以云量偏多,2000年以后以云量偏少为主要分布态势。白天云量偏高的最大值在1992年: A2白天年均云量的最高值78.67%,较常年平均值偏高7.48%; Patmos-x白天年均云量最高值为71.62%,较常年平均值偏高7.1%。Patmos-x白天云量偏低的最小值是2007年,年均云量59.41%,较常年平均值偏低5.11%; A2白天云量偏低最小值出现在2015年,年均云量64.39%,较常年平均值偏低7.06%。



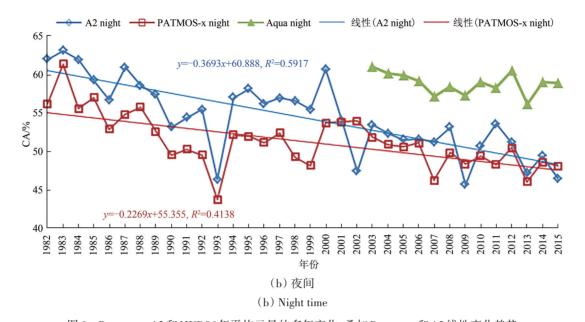


图 6 Patmos-x, A2和MYD06年平均云量的多年变化,叠加Patmos-x和A2线性变化趋势 Fig. 6 Patmos-x, A2 and MYD06 multiyear annual mean cloud fraction. Patmos-x and A2 trend line are overlaid

A2夜间云量在2000年为拐点,2000年之前,云量偏高,2000年以后云量一致偏低。Patmos-x同样以2000年为拐点,2000年之前,以云量偏高为主,2000年以后以云量偏低为主。年均夜间云量的最高值出现在1983年,Patmos-x1983年夜间年均云量61.39%,较常年平均值偏高10.01%;1983年A2年均夜间云量63.14%,较常年平均值偏高8.72%。2000年之后,Patmos-x夜间云量的最小值出现在2007年(45.76%),较常年平均值偏低4.26%。A2夜间云量的最小值出现在2015年。2003年—2015年MYD06云量的偏差分布同Patmos-x,白天2012年年均云量最大,较常年平均值偏高超过2.37%,2007年云量最小,较常年平均值偏低

分别出现较常年平均值偏高和偏低的极值。

以1、4、7和10月为代表月份,3种云量数据的多年季节性变化模态比对分析显示(图略),Patmos-x、A2和MYD06云量多年不同季节的变化趋势总体相同。无论白天还是夜间云量在2017-01明显偏低,2018-01明显偏高,幅度均超过了10%。2000年以后4月云量以偏低为主,白天云量在2005年和2006年连续两年出现偏高,夜间4月Patmos-x和MYD06云量在2003年出现正偏差。7月云量在2006年出现一个偏低的极值后,连续偏高,并在2021-07出现偏高的极值。10月云量在2000年以后以偏少为主要,尤其是夜间云量较常年持续偏低。

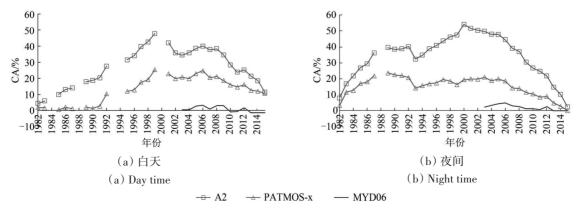


图7 Patmos-x, A2和MYD06等3种云量数据的年均云量偏差累计的时序变化

Fig.7 The time series variation of accumulate bias of annual mean cloud fraction for Patmos-x, A2 and MYD06

1982年—2015年34年的云量平均值与2001年—2015年15年云量平均值的差值分布上(图8)也可看到,白天云量除了6—9月,夜间云量除了6—8月,Patmos-x和A2均表现为2000年以后云量

减少。冬季(12、1、2月)和春季(3—5月)云量减少幅度较为明显。8月两种云量显示2000年以后云量有所增加。白天6、7、9等3个月,夜间6—7两个月两种云量的变化趋势不同。

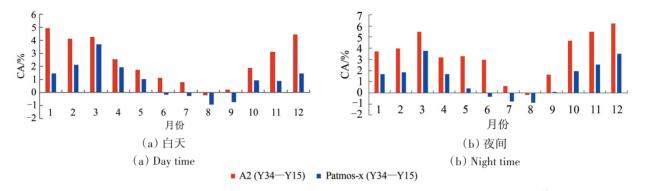


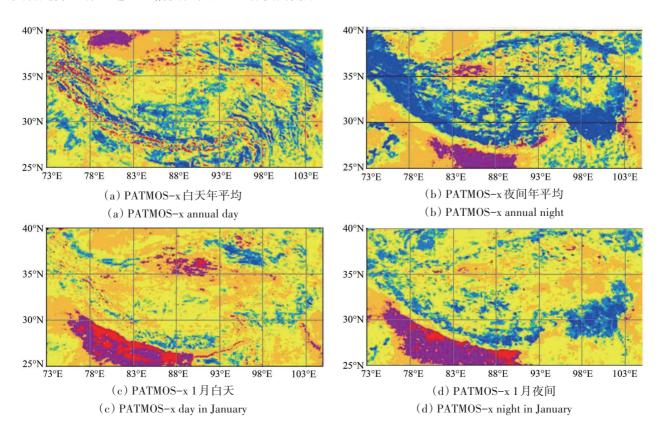
图 8 Patmos-x 和 A2 1982年—2015年月平均云量与2001年—2015年月平均云量的差值 erence cloud fraction between two periods for each month for Patmos-x and A2. The first one is from 1982 to 2

Fig. 8 The difference cloud fraction between two periods for each month for Patmos-x and A2. The first one is from 1982 to 2015.

The second period is from 2001 to 2015

Patmos-x 1、4、7和10月份月平均云量的多年变化趋势空间分布可见(图9)。全年白天云量在高原的中部、东部有超过0.05置信度水平的减少趋势(图9(a)),夜间云量减少的趋势(图9(b))高于白天,在高原的大部区域呈现置信度超过0.05的减少趋势,超过0.01信度水平的区域面积多于白天。1月份白天,高原除北部有部分区域云量增多,东北部有部分区域云量减少外,高原整体的变化趋势没有通过0.05信度检验。1月份夜间高原

东部云量减少趋势明显。4月(图9(f))和10月夜间云量(图9(j))在高原的中部出现了较明显的减少趋势,4月份白天云量减少较为明显的区域分布在高原的西北和东北部。10月白天云量减少趋势较为明显的区域在高原的东北部。云量增多趋势的主要体现在7月(图9(g),图9(h))在高原中部;白天在高原的东部也呈现出超过0.05信度水平的云量增多区(图9(g))。



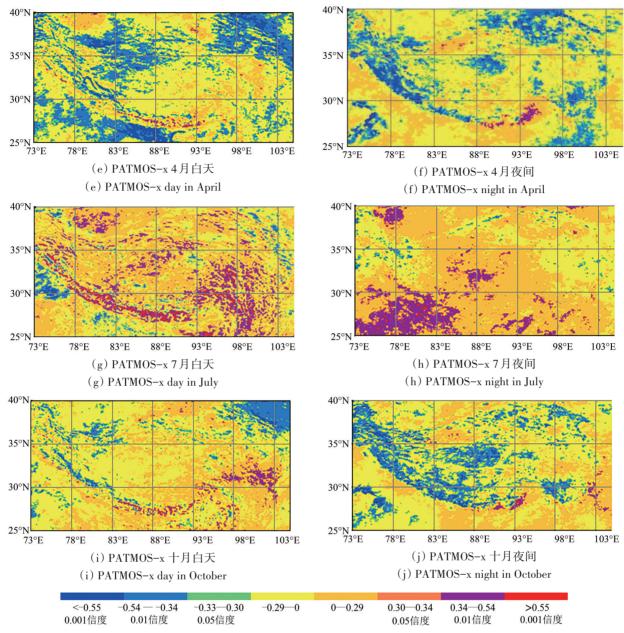
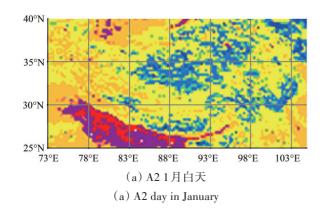
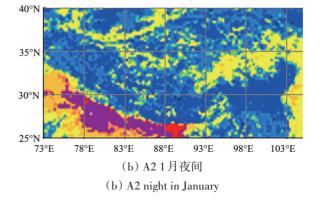


图 9 Patmos-x 1、4、7、10各月 1982年—2015年月平均云量的多年变化趋势空间分布 Fig. 9 The trend spatial distribution of Patmos-x cloud fraction from 1982—2015

与Patmos-x相比, A2云量在1、4、10各月的减少趋势更为明显, 减少趋势通过0.01信度检验的区域更大(图10(b)、10(d)、10(e))。7月,

高原中部表现出增多态势(图10(e),10(f)), 且通过0.01信度检验,高原7月A2云量总体增多的区域小于Patmos-x。





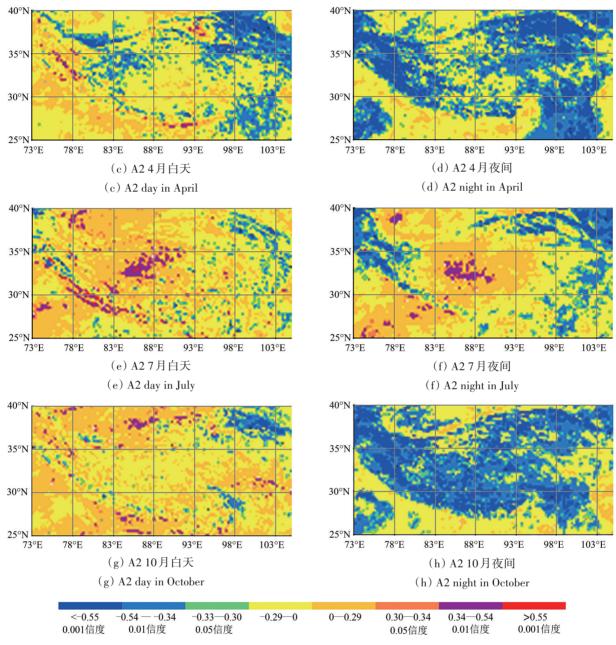


图 10 A2 1、4、7、10各月 1982年—2015年月平均云量的多年变化趋势空间分布 Fig.10 The trend spatial distribution of CLARA-A2 cloud fraction from 1982—2015

4 结 论

针对具有复杂下垫面类型和地理高程的青藏高原区域,从数据反演方法和数据空间属性的角度对Patmos-x、CLARA-A2和Aqua/MODIS 3种云量数据进行比对分析。Patmos-x和CLARA-A2云量数据来自相同卫星、相同AVHRR载荷数据源,采用相似云检测算法,具有不同的空间分辨率。MODIS的探测能力和所采用云检测算法不同于AVHRR。与AVHRR相比,MODIS具有更多的观测通道,尤其具有AVHRR所没有的近红外通道,

增强了白天卷云的探测能力,夜间多个红外通道 增强了对高云的探测能力。MODIS具有比AVHRR 更高的空间分辨率也有利对小尺度云的探测。

3种云量数据的时空分布特征相近,多年变化 趋势相似,说明3种卫星云量数据整体具有较好的 可比性。3种云量数据均出现了不同程度的云雪识 别误差。

基于 2006年—2014年以 NOAA-18/AVHRR 为数据源的 Patmos-x和 A2 云量及 Aqua/MODIS 云量,与地面观测云量进行比对分析,3种卫星云量数据

与地面观测数据均具有一定的相关性,其中空间分辨率 0.1°的 Patmos-x 与地面观测云量间的相关性最好, 0.25 空间分辨率的 A2 云量与地面观测云量间的相关性最低。 0.05°空间分辨率的 MODIS 云量与地面观测云量间存在 1 小时以上的观测时间差,两者相关性在云量较少的秋季较好,在积云多发的春夏较差。反映出利用地面观测数据评估卫星反演产品时,地面与卫星观测两种瞬时观测的时空匹配性对评估结果有直接的影响。

在高原复杂下垫面条件下,不同空间分辨率数据间时空分布特征的差异,反映出对非均匀性云探测能力的差异。MODIS稳定的仪器轨道和定标反映在长时间序列云量数据具有较好的均一性,从一个角度说明了卫星轨道和仪器定标的稳定性是长序列气候数据质量的保证。

志 谢 本研究所用 PATMOS-x 数据来自https://www.ncdc.noaa.gov/cdr/atmospheric/avhrr-cloud-properties-patmos-x[2020-05-11]。Aqua/MO-DIS MYD06 数据来自"Level 1 and Atmospherichttps://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov)[2020-05-11]。CLARA-A2 数据来自https://wui.cmsaf.eu[2020-05-11],在此表示感谢。

参考文献(References)

- Ackerman S, Frey R, Strabala K, Liu Y H, Gumley L, Baum B and Menzel P. 2010. Discriminating clear-sky from cloud with MO-DIS algorithm theoretical basis document (MOD35). https://atmosphere-imager. gsfc. nasa. gov/sites/default/files/ModAtmo/MOD35_ATBD_Collection6_0.pdf [2019-07-30]
- Ackerman S A, Holz R E, Frey R, Eloranta E W, Maddux B C and Mc-Gill M. 2008. Cloud detection with MODIS. Part II: validation.

 Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 25(7): 1073-1086 [DOI: 10.1175/2007JTECHA1053.1]
- Bao S H, Letu H, Zhao J, Shang H Z, Lei Y H, Duan A M, Chen B, Bao Y H, He J, Wang T X, Ji D B, Tana G and Shi J C. 2019. Spatiotemporal distributions of cloud parameters and their response to meteorological factors over the Tibetan Plateau during 2003-2015 based on MODIS data. International Journal of Climatology, 39(1): 532-543 [DOI: 10.1002/joc.5826]
- Baum B A, Menzel W P, Frey R A, Tobin D C, Holz R E, Ackerman S A, Heidinger A K and Yang P. 2012. MODIS cloud-top property refinements for collection 6. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51(6): 1145-1163 [DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0203.1]

- Cao Y, He Y J, Qiu X F, Zeng Y, Luo Q Z and Gao T. 2012. Correction methods of MODIS cloud product based on ground observation data. Journal of Remote Sensing, 16(2): 325-342 (曹芸, 何永健, 邱新法, 曾燕, 罗庆洲, 高婷. 2012. 基于地面观测资料的 MODIS 云量产品订正. 遥感学报, 16(2): 325-342) [DOI: 10.11834/jrs.20102368]
- Chen B D and Liu X D. 2005. Seasonal migration of cirrus clouds over the Asian monsoon Regions and the Tibetan Plateau measured from MODIS/Terra. Geophysical Research Letters, 32(1): L01804 [DOI: 10.1029/2004GL020868]
- Duan A M and Wu G X. 2006. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau. Geophysical Research Letters, 33(22): L22704 [DOI: 10.1029/2006GL027946]
- Duan A M, Wu G X, Liu Y M, Ma Y M and Zhao P. 2012. Weather and climate effects of the Tibetan Plateau. Advances in Atmospheric Sciences, 29(5): 978-992 [DOI: 10.1007/s00376-012-1220-y]
- Fontana F, Lugrin D, Seiz G, Meier M and Foppa N. 2013. Intercomparison of satellite- and ground-based cloud fraction over Switzerland (2000-2012). Atmospheric Research, 128: 1-12 [DOI: 10. 1016/j.atmosres.2013.01.013]
- Foster M J and Heidinger A. 2013. PATMOS-x: results from a diurnally corrected 30-yr satellite cloud climatology. Journal of Climate, 26(2): 414-425 [DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00666.1]
- Gao B C, Yang P, Guo G, Park S K, Wiscombe W J and Chen B D. 2003. Measurements of water vapor and high clouds over the Tibetan Plateau with the Terra MODIS instrument. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(4): 895-900 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.810704]
- Heidinger A, Foster M, Botambekov D, Hiley M, Walther A and Li Y. 2016. Using the NASA EOS A-train to probe the performance of the NOAA PATMOS-x cloud fraction CDR. Remote Sensing, 8 (6): 511 [DOI: 10.3390/rs8060511]
- Heidinger A K, Evan A T, Foster M J and Walther A. 2012. A naive Bayesian cloud-detection scheme derived from *CALIPSO* and applied within PATMOS-x. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51(6): 1129-1144 [DOI: 10.1175/JAMC-D-11-02.1]
- Heidinger A K, Foster M J, Walther A and Zhao X P. 2014. The path-finder atmospheres-extended AVHRR climate dataset. Bulletin of the American Meteorological Society, 95(6): 909-922 [DOI: 10. 1175/BAMS-D-12-00246.1]
- Karlsson K G, Anttila K, Trentmann J, Stengel M, Meirink J F, Devasthale A, Hanschmann T, Kothe S, Jääskeläinen E, Sedlar J, Benas N, van Zadelhoff G J, Schlundt C, Stein D, Finkensieper S, Håkansson N and Hollmann R. 2017. CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data. Atmospheric Chemistry and Physics, 17 (9): 5809-5828 [DOI: 10.5194/acp-17-5809-2017]
- Karlsson K G, Riihelä A, Müller R, Meirink J F, Sedlar J, Stengel M, Lockhoff M, Trentmann J, Kaspar F, Hollmann R and Wolters E. 2013. CLARA-A1: a cloud, albedo, and radiation dataset from 28

- yr of global AVHRR data. Atmospheric Chemistry and Physics, 13 (10): 5351-5367 [DOI: 10.5194/acp-13-5351-2013]
- King M D, Platnick S, Menzel W P, Ackerman S A and Hubanks P A. 2013. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(7): 3826-3852 [DOI: 10. 1109/TGRS.2012.2227333]
- Kotarba A Z. 2009. A comparison of MODIS-derived cloud amount with visual surface observations. Atmospheric Research, 92(4): 522-530 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.02.001]
- Liu Y M, Hoskins B and Blackburn M. 2007. Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia. Journal of the Meteorological Society of Japan, 85B: 1-19 [DOI: 10.2151/jmsj. 85B.1]
- Ma J J, Wu H, Wang C, Zhang X, Li Z Q and Wang X H. 2014. Multiyear satellite and surface observations of cloud fraction over China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(12): 7655-7666 [DOI: 10.1002/2013JD021413]
- Nan S L, Zhao P, Yang S and Chen J M. 2009. Springtime tropospheric temperature over the Tibetan Plateau and evolutions of the tropical Pacific SST. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114(D10): D10104 [DOI: 10.1029/2008JD011559]
- Naud C M, Rangwala I, Xu M and Miller J R. 2015. A satellite view of the radiative impact of clouds on surface downward fluxes in the Tibetan Plateau. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(2): 479-493 [DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0183.1]
- Platnick S, Meyer K G, King M D, Wind G, Amarasinghe N, Marchant B, Arnold G T, Zhang Z B, Hubanks P A, Holz R E, Yang P, Ridgway W L and Riedi J. 2017. The MODIS cloud optical and microphysical products: collection 6 updates and examples from terra and aqua. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(1): 502-525 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2610522]
- Stubenrauch C J, Rossow W B, Kinne S, Ackerman S, Cesana G, Chepfer H, Di Girolamo L, Getzewich B, Guignard A, Heidinger A, Maddux B C, Menzel W P, Minnis P, Pearl C, Platnick S, Poulsen C, Riedi J, Sun-Mack S, Walther A, Winker D, Zeng S and Zhao G. 2013. Assessment of global cloud datasets from satellites: project and database initiated by the GEWEX radiation panel. Bulletin of the American Meteorological Society, 94(7): 1031-1049 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00117.1]
- Tang X P, Zhang H Z, Lu H Y and Ma P F. 2009. Characteristics of total cloud amount over Tibet in 1971-2008. Advances in Climate Change Research, 5(6): 343-347 (唐小萍, 张核真, 路红亚, 马鹏飞. 2009. 西藏地区 1971—2008 年台站观测总云量的变化特征. 气候变化研究进展, 5(6): 343-347) [DOI: 10.3969/j. issn. 1673-1719.2009.06.005]

- Wang M Y and Wang B M. 2009. Total cloud amount difference between ISCCP product and ground observation over China. Journal of Applied Meteorological Science, 20(4): 411-418 (王旻燕, 王伯民. 2009. ISCCP产品和我国地面观测总云量差异. 应用气象学报, 20(4): 411-418) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2009.04.004]
- Wei L and Zhong Q. 1997. Characteristics of cloud climatology over Qinghai-Xizang Plateau. Plateau Meteorology, 16(1): 10-16 (魏丽, 钟强. 1997. 青藏高原云的气候学特征. 高原气象, 16(1): 10-16)
- Wu G X, Liu Y M, Zhang Q, Duan A M, Wang T M, Wan R J, Liu X, Li W P, Wang Z Z and Liang X Y. 2007. The Influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. Journal of Hydrometeorology, 8(4): 770-789 [DOI: 10.1175/ JHM609.1]
- Wu G X and Zhang Y S. 1998. Tibetan plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea.

 Monthly Weather Review, 126(4): 913-927 [DOI: 10.1175/1520-0493(1998)126<0913:TPFATT>2.0.CO;2]
- Xu X D, Lu C G, Shi X H and Gao S T. 2008. World water tower: an atmospheric perspective. Geophysical Research Letters, 35(20): L20815 [DOI: 10.1029/2008GL035867]
- Yu R C, Wang B and Zhou T J. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 17(13): 2702-2713 [DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<2702:CEOTDC>2.0.CO;2]
- Zhao P and Chen L X. 2001a. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China. Science in China Series D: Earth Sciences, 44(9): 858-864 [DOI: 10.1007/BF02907098]
- Zhao P and Chen L X. 2001b. Interannual variability of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its relation to circulation. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (1): 106-116 [DOI: 10.1007/s00376-001-0007-3]
- Zhao P, Zhang X D, Li Y F and Chen J M. 2009. Remotely modulated tropical North Pacific ocean atmosphere interactions by the South Asian high. Atmospheric Research, 94(1): 45-60 [DOI: 10. 1016/j.atmosres.2009.01.018]
- Zhao P, Zhou Z J and Liu J P. 2007. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: an observational investigation. Journal of Climate, 20(15): 3942-3955 [DOI: 10.1175/ JCLI4205.1]
- Zhou X J, Zhao P, Chen J M, Chen L X and Li W L. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(11): 1679-1693 [DOI: 10.1007/s11430-009-0194-9]

Performance of cloud fraction of three satellite cloud climate date records over the Tibetan Plateau

LIU Jian

National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: Tibetan Plateau (TP) plays an important role in adjusting the large-scale atmospheric circulation in the northern hemisphere and the atmosphere – sea interaction from the equator to the middle latitude in the North Pacific. Obtaining complete observation data based on ground observations over TP is difficult. Satellite provides good observational data over the Tibetan Plateau. Considering the complex underlying surface types and geographical elevations in the Tibetan Plateau region, three kinds of long-term cloud fraction data that came from PATMOS-x/AVHRR, CLARA-A2/AVHRR, and MODIS / Aqua were analyzed from the perspective of data retrieval methods and data spatial attributes.

The relationship among the three kinds of satellite cloud fraction and the ground observation cloud fraction was analyzed at first. Correlation analysis, linear trend, and accumulate bias were used to analyze the data. The analysis data were selected from instantaneous orbital observations and monthly and annual mean value.

The annual mean cloud fraction of the three kinds of data are similar, but seasonal cloud fraction is different. CLARA-A2 has the smallest cloud fraction in summer and the highest cloud fraction in winter. Patmos-x agreed well with the ground observation. The correlation relationship between CLARA-A2 and ground was weak. Aqua/MODIS had good relationship in autumn and less correlation in spring and summer.

The three kinds of long-term cloud fraction data showed similar spatial and temporal distribution. During daytime, CLARA-A2 has larger cloud fraction than MODIS and PATMOS-x. At nighttime, MODIS has the maximum cloud fraction value, and PATMOS-x and CLARA-A2 have similar values. All three kinds of cloud data committed a mistake with snow along the ridge of a mountain. The linear regression and accumulate bias analysis showed that the annual mean cloud fraction of PATMOS-x and CLARA-A2 displayed a decreasing trend from 1982 to 2015. The trend of the night time cloud fraction was more obvious than that of daytime. CLARA-A2 displayed more obvious trend than PATMOS-x, especially at night. The year of 2000 is a turning point for the change in cloud cover over the plateau area from high to low. In January, April, and October, the decrease in cloud amount is the main change trend. Meanwhile, in July, the weak increase is the main change characteristic.

Three kinds of satellite cloud data have good comparability. Three kinds of data obtained different correlations when compared with the ground observation. The reasons may come from matched data with different spatial and temporal characteristics, different payloads with various observation abilities and different data set with different cloud detection algorithms.

The stability of satellite orbit and high quality of instrument calibration are the baselines of long-term climate data. MODIS has stable instrument orbit and calibration. Thus, its long term cloud data have good homogeneity.

Key words: cloud fraction, satellite, climate data records, Tibetan Plateau, Patmos-x, CLARA-A2, MODIS

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC1407200, 2018YFC1407204); Chinese Natural Science Foundation (No.61531019)