

青藏高原 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率的对比分析

陈爱军^{①②*} 孟文童^{①②} 胡慎慎^③ 卞林根^④

① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室 江苏 南京 210044;

② 南京信息工程大学 大气物理学院 江苏 南京 210044;

③ 江苏省徐州市气象台 江苏 徐州 221003;

④ 中国气象科学研究院 北京 100081

* 联系人 E-mail: chenaijun@nuist.edu.cn

2017-10-30 收稿 2018-01-08 接受

国家自然科学基金资助项目(40875015)

摘要 对比分析了青藏高原 MODIS 地表反照率产品和 GLASS 地表反照率产品的空间分布连续性、高质量反演结果的比例,应用青藏高原 CAMP/Tibet 试验期间的高精度观测数据评估了两种产品的精度,通过人工目视解译 MODIS 地表反射率图像并结合 MODIS 积雪产品分析了影响两种产品精度的原因,结果表明:1) GLASS 地表反照率产品具有比 MODIS 地表反照率产品更好的空间分布连续性和更高的反演质量;2) 绝大多数时段内两种产品都能与地面观测结果保持较好的一致性,能准确地反映地表反照率的异常变化过程;3) 局地积雪是影响两种产品精度的重要因素之一;4) 积雪条件下, GLASS 地表反照率反演算法比 MODIS 地表反照率反演算法更具优势。研究结果有助于促进人们对地表反照率卫星遥感反演产品的认识,改进青藏高原地表反照率卫星遥感反演算法,提高青藏高原地表反照率卫星遥感反演结果的精度、反演质量和空间分布连续性。

关键词
地表反照率;
精度分析;
青藏高原;
MODIS;
GLASS

地表反照率定义为地表反射太阳辐射与入射太阳辐射之比,是影响地表辐射能量收支和地-气相互作用的一个重要的地表参数(Dickinson,1995)。地表反照率在很大程度上决定了太阳辐射能量在地-气系统中的分配,影响大气环流和生物物理过程,对区域以至全球气候有着重要影响(Hu and Boos,2017;Planque et al.,2017),因而是不同时空尺度的气候模式(Haywood et al.,2016;Li et al.,2016;Levine and Boos,2017)、数值天气预报模式(Vahmani and Ban-Weiss,2016)以及陆面过程模式(谢志鹏等,2017)中重要的地表参数。此外,地表反照率还可以用于监测植被动态(Lukeš et al.,2016;Wang et al.,2017)、沙漠面积变化(Liu et al.,

2017),以及研究干旱对气候的影响(Evans et al.,2017)、火灾对生态系统的影响(Lyons et al.,2008;Saha et al.,2017),反演大气气溶胶状况及区域能见度变化(林楚勇等,2015;包云轩等,2018),城市化影响(储鹏等,2016)。

青藏高原平均海拔约4500 m,被称为“世界屋脊”、“第三极”,是世界海拔最高的高原。青藏高原大范围热动力作用不仅影响全球大气环流,而且对中国及亚洲地区的灾害性天气乃至全球气候变化有着重要影响(Ye,1981;Ye and Wu,1998)。研究并获得青藏高原地表反照率,对于促进青藏高原辐射能量收支以及地-气相互作用研究具有重要的科学意义。

引用格式: 陈爱军, 孟文童, 胡慎慎, 等. 2020. 青藏高原 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率的对比分析[J]. 大气科学学报, 43(5): 932-942.

Chen A J, Meng W T, Hu S S, et al. 2020. Comparative analysis on land surface albedo from MODIS and GLASS over the Tibetan Plateau[J]. Trans Atmos Sci, 43(5): 932-942. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171030001. (in Chinese).

青藏高原地形复杂、气候恶劣, 卫星遥感是获得青藏高原高精度、高时空分辨率地表反照率的唯一有效途径(方宗义等, 1996; 徐兴奎和林朝晖, 2002; 陈爱军等, 2009, 2018)。目前, 已有多种卫星遥感反演的地表反照率产品可以提供青藏高原的地表反照率, 例如: 美国 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 地表反照率产品 MCD43 (Schaaf et al. 2010), 我国北京师范大学制作的全球地表卫星遥感产品 GLASS (Global LAnd Surface Satellites) 地表反照率 (Liang et al. 2013; Liu et al. , 2013), 以及欧洲航天局发布的全球地表反照率 GlobAlbedo (Lewis et al. 2012)。

地表反照率作为重要的气候变量, 全球气候观测系统 GCOS (Global Climate Observing System) 要求其绝对精度不低于 0.05 (<https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system>)。青藏高原卫星遥感反演地表反照率的精度一直备受关注, 不少研究分析和评估了青藏高原 MODIS 地表反照率产品的精度 (Wang 2004; 余予等 2010; 陈爱军等 2012a), 也有不少研究分析和评估了青藏高原 GLASS 地表反照率产品的精度 (Liu et al. , 2009; Wang et al. 2010; 齐文栋等 2014; 王立钊等, 2014; 陈爱军等 2015)。由于观测站点和资料有限, 只能分析和评估有限的卫星遥感反演结果的精度, 少有研究深入分析影响卫星遥感反演结果精度的因素。反演质量是分析和评估大范围卫星遥感反演结果精度的一条重要途径 (Jin 2003; 陈爱军等, 2016a, 2016b)。此外, 地表反照率卫星遥感反演结果的空间分布连续性, 也是气候和陆面过程模拟与应用研究必须考虑的一个重要因素。

MODIS 地表反照率是目前唯一能够近实时业务化提供青藏高原地表反照率的卫星遥感反演产品 (Schaaf et al. 2010), GLASS 地表反照率则是我国自主研发、时间序列最长的地表反照率卫星遥感反演产品 (Liang et al. 2013; Liu et al. 2013), 两者对于青藏高原地表辐射能量收支和地-气相互作用研究均有重要的应用价值。本文应用 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率反演质量数据, 对比分析了两者在青藏高原大范围的空间分布连续性和高质量反演结果的比例, 应用青藏高原 CAMP/Tibet 国际合作科学观测实验期间获得的高精度地表反照率观测结果评估它们的精度, 通过人工目视解译 MODIS 地表反照率图像并结合 MODIS 积雪产品, 分析和讨论了影响卫星遥感反演结果精度的因素。

1 研究数据

1.1 MODIS 地表反照率数据

MODIS 是搭载在美国地球观测系统 EOS (Earth Observing System) 上午星 Terra 和下午星 Aqua 的一个重要的探测器 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)。美国航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 利用其观测数据开发了大量的大气、陆地、海洋和冰雪产品, MODIS 地表反照率产品就是其中的陆地产品之一。

MODIS 地表反照率采用半经验的线性 Ross-Thick-LiSparse-R 核驱动的二向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 模型, 利用经过大气校正后的 Terra 和 Aqua 双星 MODIS 数据反演地表 BRDF 参数。反演时根据反演周期内累积的高质量多角度晴空观测总数 (记为 N) 采用全反演 (the full inversion) 或者当量反演 (the magnitude inversion) 获得反演结果, 或者直接赋予填充值 (无反演结果) (Lucht et al. 2000)。这里的高质量多角度晴空观测, 是指卫星对地观测时, 卫星-像元-太阳之间形成的观测几何角度尽可能地遍及整个半球空间。如果 $N \geq 7$, 首先尝试全反演; 如果 $3 \leq N < 7$, 首先尝试当量反演; 如果 $N < 3$, 直接赋予填充值。全反演失败, 则尝试当量反演, 当量反演失败则直接赋予填充值 (Lucht et al. 2000)。所谓的当量反演, 是用高质量多角度晴空观测数据修正先验的 (a priori) BRDF 参数, 使它们更加符合地表的实际状态。然后, 对 BRDF 积分获得地表黑空反照率 BSA (Black-Sky Albedo) 和白空反照率 WSA (White-Sky Albedo)。

Aqua 卫星发射前, MODIS 地表反照率仅由 Terra MODIS 数据生成, 每隔 16 d 反演一次, 产品编号 MOD43 (Schaaf et al. 2002)。之后, 则由 16 d 期间的 Terra 和 Aqua 双星 MODIS 数据每隔 8 d 反演一次, 以便提高反演质量和效率, 产品编号改为 MCD43 (Schaaf et al. 2010)。

MODIS 地表反照率产品 MCD43 以 500 m、1 km 和 0.05° 气候网格等三种空间分辨率 (分别编号 A、B、C) 提供地表 BRDF 模型参数、地表 BRDF 参数反演质量、地表反照率和 BRDF 校正后的天底反射率 NBAR (Nadir BRDF Adjusted Reflectance) 等四种产品 (分别编号 1、2、3 和 4)。空间分辨率为 500 m 和 1 km 的 MODIS 地表反照率产品采用正弦投影, 空间分辨率为 0.05° 气候网格的产品则采用等

经纬度投影。空间分辨率相同的 MODIS 地表反照率产品,具有完全一致的时空关系。

MODIS 陆地正弦投影网格(http://landdb1.nascom.nasa.gov/developers/is_tiles/is_grid.html)编号为 h24v05、h25v05、h26v05、h25v06 和 h26v06 的 5 个区域正好覆盖青藏高原。本文所用数据为这 5 个区域 2002—2004 年空间分辨率为 1 km 的 MCD43 正弦投影数据,包括 MCD43B3 和 MCD43B2。MCD43B3 主要提供 MODIS 1—7 通道和可见光 (0.3~0.7 μm)、近红外 (0.7~5.0 μm) 及短波 (0.3~5.0 μm) 等 3 个宽波段的地表黑空反照率 BSA 和白空反照率 WSA (Schaaf et al., 2002)。MCD43B2 主要提供地表 BRDF 参数反演质量,其中:质量标志 0、1 和 255 分别表示地表 BRDF 参数为“全反演结果”、“当量反演结果”和“填充值”(https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd43b2)。研究还采用了部分仅由 Terra MODIS 数据制作的 MOD43B3 和 MOD43B2 数据。

研究数据由美国地质调查局 USGS (United States Geological Survey) 地球资源观测与科学 EROS (Earth Resource Observation and Science) 数据中心提供,数据质量能够满足科学研究的需要 (https://www.umb.edu/spectralmass/terra_aqua_modis)。

1.2 GLASS 地表反照率

GLASS 地表反照率是北京师范大学开发的 5 个全球地表卫星遥感产品之一 (Liang et al., 2013; 梁顺林等, 2014)。该产品首先采用 AB (Angular Bin) 算法生成初级产品(逐日的地表反照率),然后采用基于统计学的时域滤波 STF (Statistics-based Temporal Filter) 算法对初级产品进行数据融合处理,包括数据的时间序列平滑,以及缺失数据的填补,获得多天合成的终级产品(梁顺林等, 2014)。AB 算法实际是一种直接反演算法:利用卫星观测的多波段方向性地表反射率,采用线性统计反演关系获得可见光、近红外和短波波段等三个宽波段的反照率(刘强等, 2012)。具体而言,可以采用 AB1 算法或 AB2 算法,前者的多波段方向性地表反射率经过大气校正,后者则未经大气校正。

目前,对外公开发布的 GLASS 地表反照率产品的时间范围为 1981—2013 年。1981—1999 年的 GLASS 地表反照率产品由 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 生成,仅采用 AB1 算法生成初级产品,终级产品 GLASS02B05 每隔 8 d 由

33 d 期间(产品标记日及其前后 16 d)的初级产品采用 STF 算法融合而成。GLASS02B05 采用等经纬度投影,空间分辨率为 0.05°。2000—2013 年的 GLASS 地表反照率产品由 MODIS 数据生成,每天由 Terra 和 Aqua MODIS 数据分别采用 AB1 算法和 AB2 算法获得 4 种初级产品 (GLASS02A2X, X=1, 2, 3, 4)。然后,每隔 8 d 采用 STF 算法融合 17 d 期间(产品标记日及其前后 8 d)的 4 种初级产品,生成终级产品 GLASS02A06。GLASS02A06 采用与 MCD43 相同的正弦投影方式,空间分辨率为 1 km (Liang et al., 2013; Liu et al., 2013; 梁顺林等, 2014)。

本文研究所用数据为 2002—2004 年的 GLASS02A06 (第 1 版),数据区域与研究所用 MCD43 数据对应。GLASS02A06 主要提供短波波段 (0.3~3.0 μm) 的黑空反照率 BSA 和白空反照率 WSA,同时提供反照率的总体质量及其他数据信息 (Liu et al., 2013; 王立钊等, 2014)。GLASS02A06 采用质量标记 0、1、2 和 3 分别表示产品的总体质量“好”、“可接受”、“较差”和“不可用”。研究所用数据由北京师范大学全球陆表特征参量产品免费提供 (<http://glass-product.bnu.edu.cn>)。

1.3 地面观测数据

本文所用地面观测数据为 BJ、NPAM、TGL 和 XDT 等四个站点在青藏高原 CAMP/Tibet 国际合作科学观测实验期间获得的高精度地表下行和上行太阳短波总辐射观测资料。这四个站点位于 MODIS 陆地正弦投影网格编号为 h25v05 的区域,处于青藏高原中部(表 1)。观测站点所处位置都比较开阔,周围地势也比较平坦,下垫面能够代表藏北高原大范围的地表特征,具有较好的代表性。所有仪器在试验前都经过严格的标定和校准,试验期间也得到较好的维护和保养,因而观测资料的质量较好,具有较好的准确性和可比性。研究所用数据由中国科学院青藏高原研究所提供,其中:BJ 站和 NPAM 站的观测数据为 2002 年资料,时间分辨率为 1 h; XDT 站和 TGL 站的观测数据为 2006 年,时间分辨率为 30 min。

1.4 其他数据

研究还采用了 MODIS 陆地正弦投影网格编号为 h25v05 区域的另外两类数据:一类是空间分辨率为 500 m 经过大气校正的 MODIS 地表反射率产品,包括 Terra MODIS 数据生成的 MOD09GA 和

Aqua MODIS 数据生成的 MYD09GA (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod09.php>); 另一类是空间分辨率为 1 km 的 MODIS 积雪产品, 包括 Terra MODIS 数据制作的 MOD10A1 和 Aqua MODIS 数据制作的 MYD10A1 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod10.php>)。对于大气校正后的 MODIS 地表反射率数据, 研究主要利用它们提供的 MODIS 1—7 通道经过大气校正的地表反射率数据及其质量信息。对于 MODIS 积雪产品, 研究主要利用它们提供的 MODIS 云/雪判识结果及其质量信息。这些数据均由美国地质调查局 USGS 地球资源观测与科学 EROS 数据中心提供, 数据质量能够满足科学研究的需要。

表 1 4 个地面辐射观测站点的基本信息

Table 1 Information regarding the four ground radiation observation sites

站名	经度	纬度	海拔/m
BJ	91.90°E	31.37°N	4 509
NPAM	91.71°E	31.93°N	4 620
TGL	91.93°E	33.07°N	5 100
XDT	94.13°E	35.72°N	4 538

2 研究方法

2.1 地面辐射观测数据处理

首先, 参考陈爱军等(2015)的处理方法, 以下行太阳短波总辐射不低于 600 W/m^2 为标准筛选出“晴空”辐射观测资料, 以上行总辐射与下行总辐射之比计算时间分辨率为 1 h 或 30 min 的“晴空”地表反照率, 然后采用算术平均计算日平均地表反照率。

然后, 采用与研究所用 GLASS 地表反照率产品 GLASS02A06 完全一致的时域窗口, 应用算术平均计算 17 d 平均地表反照率。由于积雪覆盖对地表反照率的影响较大, 研究参考陈爱军等(2015)的处理方法, 以日平均地表反照率 0.4 为标准将 17 d 分为“积雪日”(不低于 0.4)和“无雪日”(低于 0.4), 根据 17 d 期间“积雪日”和“无雪日”的多寡, 选择对应条件的日平均地表反照率计算 17 d 平均地表反照率。

2.2 卫星遥感反演产品处理

无论是 MODIS 地表反照率, 还是 GLASS 地表反照率产品, 它们提供的只是黑空反照率和白空反照率(Schaaf et al., 2002; 刘强等, 2012), 也就是太

阳辐射完全直射和完全漫射条件下的地表反照率, 并不是真实的地表反照率。真实的地表反照率需要根据实际天空漫射光比例对两者进行线性加权平均(Pinty et al., 2005), 即:

$$\alpha = \alpha_{\text{WSA}} \times r + \alpha_{\text{BSA}} \times (1 - r) \quad (1)$$

其中: α 是真实的地表反照率; α_{WSA} 和 α_{BSA} 分别是白空反照率和黑空反照率; r 为实际天空漫射光比例, 可以根据如下经验公式获得(Stokes and Schwartz, 1994):

$$r = 0.122 + 0.85 \times \exp(-4.8 \cos \theta) \quad (2)$$

其中 θ 是正午时的太阳天顶角。

2.3 数据比较方法

采用“点对点”的比较方式对比分析地表反照率地面观测结果与卫星遥感反演结果之间的差异, 即: 将站点对应像元的卫星遥感反演结果与站点的地面观测进行比较。由于 GLASS 地表反照率 GLASS02A06 与 MODIS 地表反照率 MCD43B3 和 MOD43B3 的时域合成窗口存在差异, 本文将时间标记为第 9 天的 GLASS02A06 与时间标记为第 1 天的 MCD43B3 或 MOD43B3 进行比较(图 1), 并依次类推让两种卫星遥感反演产品在时域上尽可能对应一致, 同时忽略两者时域合成周期相差 1 d 引起的差异。另外, 本文忽略地面观测结果、GLASS 地表反照率短波波段、MODIS 地表反照率短波波段的谱宽差异。

3 反演结果对比

3.1 反演效率

反演效率, 即有效反演结果的比例, 可以反映地表反照率反演结果的空间分布连续性。统计分析结果表明: 2002—2004 年青藏高原 GLASS 地表反照率的反演效率几乎达到 100%, 最低也超过 99.9% (图 2a); MODIS 地表反照率的反演效率则相对偏低, 最高约 98%, 一般在 80% 以上, 最低时甚至不足 60% (图 2b)。这表明 GLASS 地表反照率的空间分布连续性更好, 更加有利于气候和陆面过程模拟与应用研究, 而 MODIS 地表反照率的空间分布连续性仍有较大的改进空间。分析其中的原因, 与两种卫星遥感反演产品的算法有着密切关系。根据 GLASS 地表反照率算法, 只要有晴空观测数据即可由 AB 算法获得日产品, 而且终级产品由 17 d 期间的日产品采用 STF 算法融合而成, 因而反演效率较高。然而, MODIS 地表反照率反演算法对高质量多角度晴空观测总数有着较高的要求, 即使当量反演

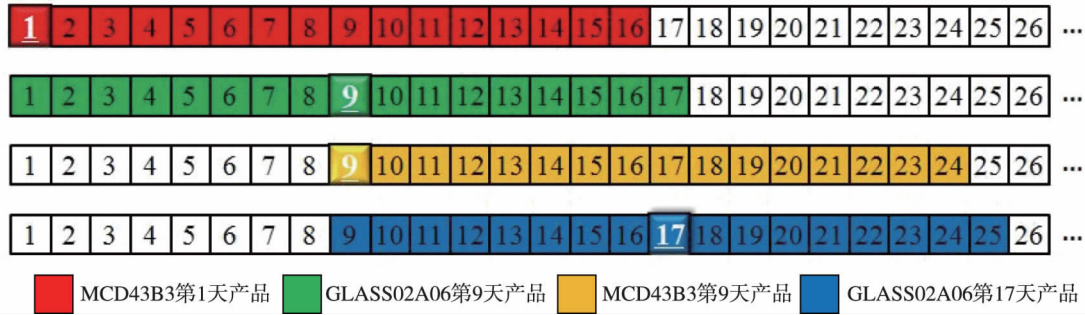


图1 MODIS 与 GLASS 地表反照率产品的时域合成窗口示意

Fig.1 Diagram of the temporal composite window of surface albedo of MODIS and GLASS

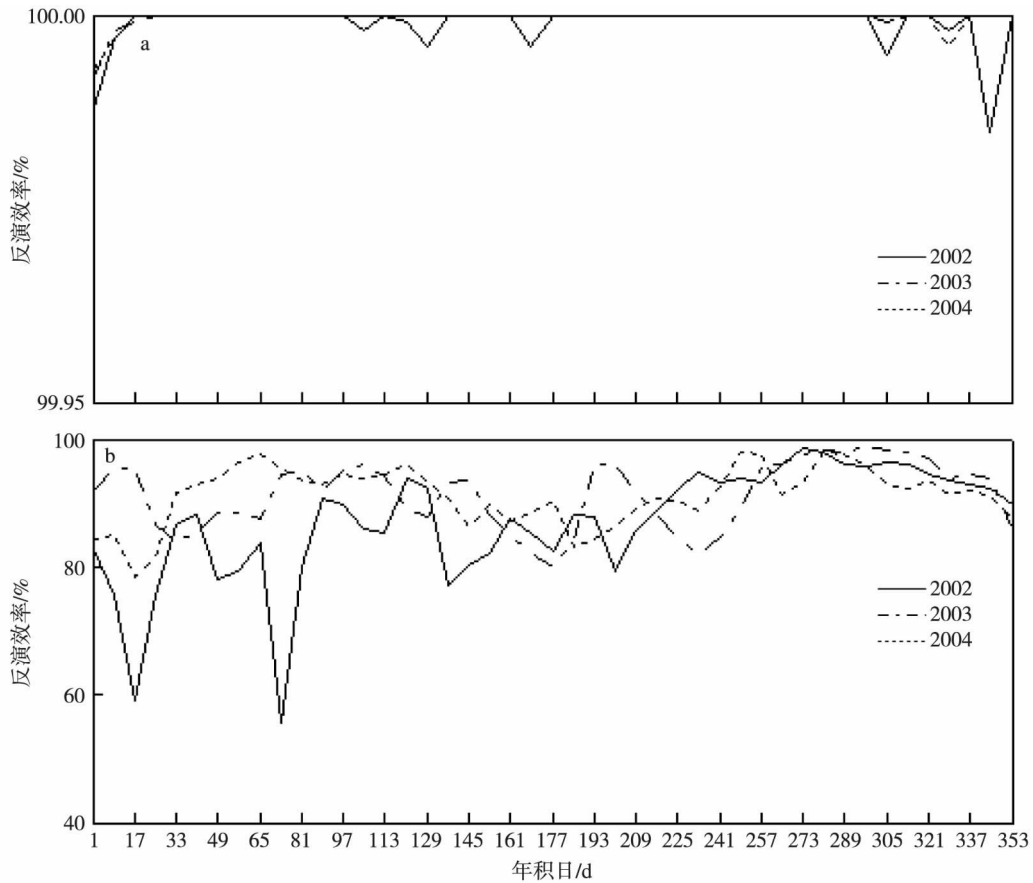


图2 GLASS 地表反照率反演效率 (a) 和 MODIS 地表反照率反演效率 (b) 的对比

Fig.2 Comparison between (a) MODIS land surface albedo and (b) GLASS land surface albedo for inversion efficiency

也要求至少 3 个,全反演则要求至少 7 个(Schaaf et al. 2010)。

3.2 高质量反演结果的比例

反演质量是评价大范围卫星遥感反演结果精度的一个重要指标(Jin 2003)。地表反照率高质量反演结果的精度更高,而低质量反演结果的精度具有较大的不确定性(陈爱军等,2012a,2012b,2015)。分析结果表明:2002—2004 年,青藏高原 MODIS 地表反照率高质量反演结果的比例一般介于 40%和

80%,最高约 90%(2003 年第 281 天开始的 8 d 期间),最低不足 1%(2002 年第 73 天开始的 8 d 期间);GLASS 地表反照率高质量反演结果的比例大多超过 80%,最高约 98%(2002 年第 313 天开始的 8 d 期间),最低约 56%(2002 年第 1 天开始的 8 d 期间)(图 3)。另外,不同反演周期的 GLASS 地表反照率和 MODIS 地表反照率高质量反演结果的比例存在较大的差异。总体而言,青藏高原 GLASS 地表反照率高质量反演结果的比例要高于 MODIS

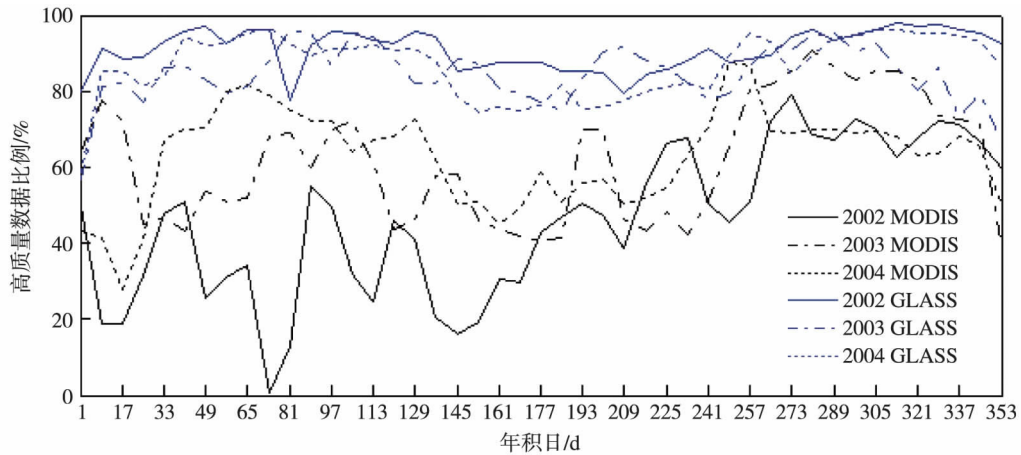


图3 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率反演质量的对比

Fig.3 Comparison between MODIS land surface albedo and GLASS land surface albedo for inversion

地表反照率高质量反演结果的比例,且相对稳定。其中的原因,主要与各反演周期的晴空观测总数有关:即使晴空观测总数不足,GLASS 地表反照率反演算法也可以通过融合多天的反演结果最终获得质量较高的反演结果,而 MODIS 地表反照率反演算法不仅对晴空观测总数有要求,而且只有高质量多角度晴空观测总数不少于 7 个时才有可能通过全反演获得高质量反演结果,必然影响其高质量反演结果的比例。

3.3 精度分析

对比分析 TGL、XDT、NPAM 和 BJ 站的地面观测结果 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率,绝大多数时段内它们都有较好的一致性(图 4)。尽管某些时段存在一定的差异,但是仍然能够保持较为一致的变化趋势,较好地反映地表因为经历降雪、融雪过程而引起的地表反照率异常变化过程,例如:在 TGL 站第 65、73、81、89、97 天开始的时段,以及第 289、297、305、313、321、329、337 天开始的时段(图 4a)。

MODIS 地表反照率或 GLASS 地表反照率在有些时段也与地面观测结果存在较大的差异,大致可以分为以下几种情形:第一种是 MODIS 地表反照率与地面观测结果基本一致或相差较小,而 GLASS 地表反照率明显高于地面观测结果,例如: TGL 站第 41 天开始的 8 d 期间(图 4a)和 XDT 站第 41 天开始的 8 d 期间(图 4b);第二种是 GLASS 地表反照率与地面观测结果基本一致或者相差较小,而 MODIS 地表反照率明显低于地面观测结果,例如: XDT 站 2006 年第 297 天开始的 8 d 期间(图 4b);第三种是 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照

率均显著高于地面观测结果,例如: NPAM 站 2002 年第 25 天开始的 8 d 期间(图 4c);第四种是 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率均显著低于地面观测结果,例如: BJ 站 2002 年第 17、25、33、57、65 天开始的 8 d 期间(图 4d)。深入分析 MODIS 地表反照率或 GLASS 地表反照率与地面观测结果存在较大差异的原因,结果表明:云覆盖是导致第一种情形的主要原因。以 TGL 站 2006 年第 41 天开始的 8 d 期间为例,第 33—49 天期间,人工目视解译结果表明: TGL 站及其周边区域除 8 次无雪之外,其余 9 次均为云覆盖。因此,导致 GLASS 地表反照率明显高于地面观测结果的唯一可能原因是将云覆盖误判为积雪,因而反演结果高达 0.47。MODIS 地表反照率虽然比 GLASS 地表反照率的输入数据少 1 d,但是通过 MODIS 积雪产品提供的云雪判识结果对输入数据的质量进行了严格控制,只能以地表无雪状态的观测数据反演地表 BRDF 参数和反照率,反演结果与地面观测结果非常接近。这说明云雪判识是卫星遥感反演地表反照率必不可少的环节,有助于提高反演结果的精度,尤其是 GLASS 地表反照率。

第二种情形的原因,与地表处于积雪状态和 MODIS 地表反照率当量反演结果的不确定性有关。根据 MODIS 积雪产品提供的云雪判识结果, Terra 和 Aqua 卫星于 2006 年第 289—304 天期间过境观测时, XDT 站 5 次无雪、11 次积雪、1 次云覆盖。根据 MODIS 地表反照率反演算法,应该采用晴空积雪状态下的观测数据反演。理想情况下,完全可能通过全反演获得反演结果,然而实际反演结果不仅是当量反演结果,而且低至 0.23(图 4b),与地面观

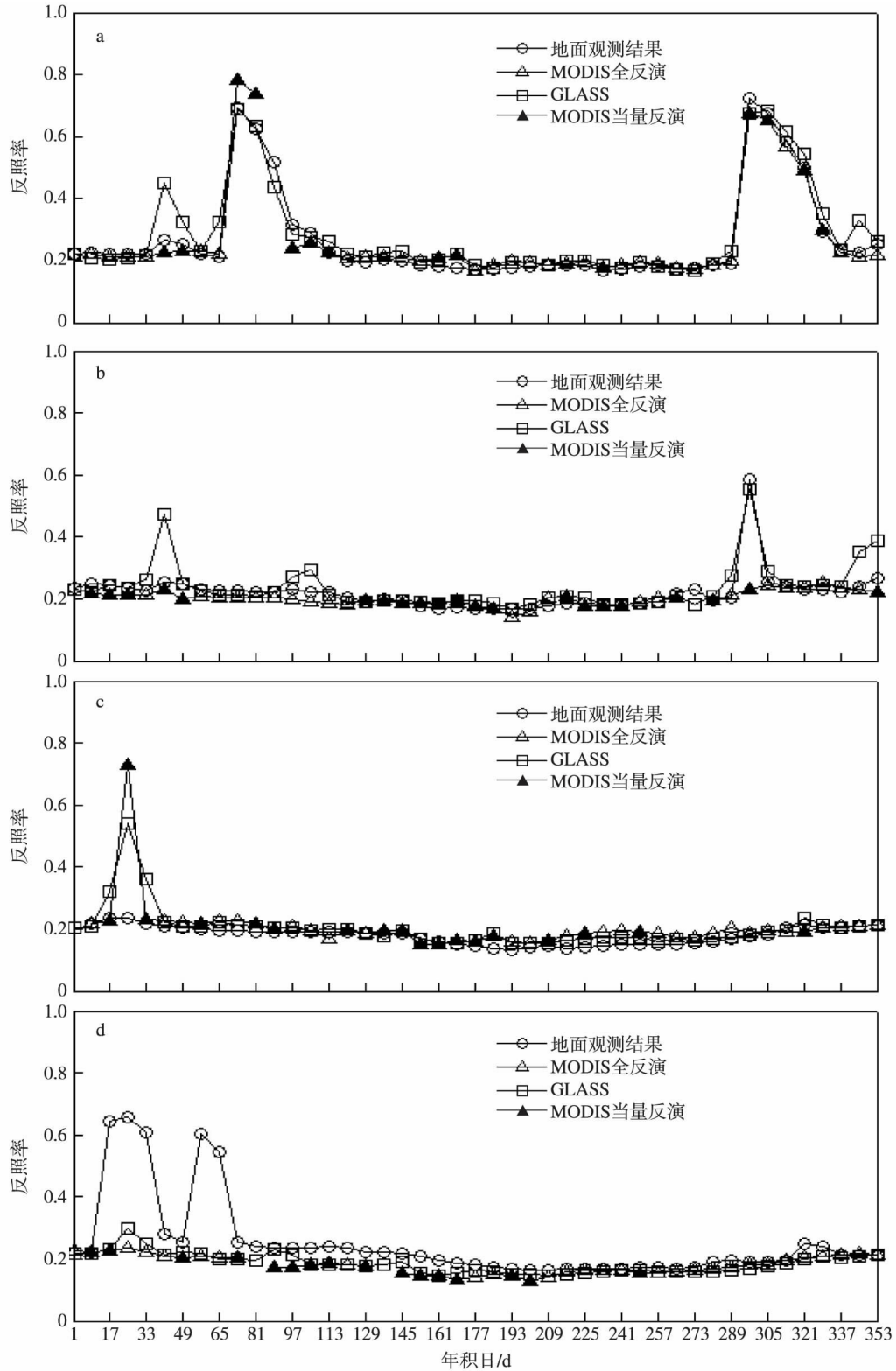


图4 地面观测结果与站点对应像元 MODIS 和 GLASS 地表反照率的比较(空心点为 MODIS 及 GLASS 的高质量反演结果,实心点为非高质量反演结果):(a) 2006 年 TGL 站;(b) 2006 年 XDT 站;(c) 2002 年 NPAM 站;(d) 2002 年 BJ 站

Fig.4 Comparison among MODIS ,GLASS land surface albedo and ground measurements (a—d are the results of 2006 for site TGL ,2006 for site XDT ,2002 for site NPAM ,and 2002 for site BJ; the hollow and solid marks respectively represent the land surface albedo retrievals with high-quality and non-high-quality)

测结果的绝对偏差高达 0.36。这既说明 MODIS 地表反照率反演算法在积雪状态下存在一定的局限性,也说明 MODIS 地表反照率当量反演结果存在较大的不确定性。相反, GLASS 地表反照率反演结果为 0.56,与地面观测结果的绝对偏差只有 0.03,显示出该反演算法的优势,尤其地表处于积雪状态。

对于第三种情形,较为合理的解释是地面观测站点无雪,而站点对应的像元存在积雪。根据 MODIS 积雪产品提供的云雪判识结果,2002 年第 17—33 天期间 NPAM 站有 9 次积雪、3 次无雪状态,另有 5 次云覆盖状态。人工目视解译结果也显示该站有 10 次积雪、3 次无雪状态,其余 4 次云覆盖状态。在此期间, GLASS 地表反照率和 MODIS 地表反照率分别高达 0.54 和 0.73(图 4c),都是较为合理的结果。然而,这 17 天期间的地表反照率地面观测结果表明该站并无积雪,只有第 21 天的地表反照率略高,为 0.34,其余大多约 0.22。因此,只有 NAPM 站对应的像元因为积雪覆盖引起卫星观测的地表反射率偏高,导致地表反照率反演结果偏高。比较而言,这期间 GLASS 地表反照率应该比 MODIS 当量反演结果的可靠性更高。另外,这期间 MODIS 地表反照率仍然为当量反演结果,也再次说明 MODIS 地表反照率反演算法在积雪状态下的局限性,以及当量反演结果的不确定性。

第四种情形则与站点对应像元存在局地积雪有着密切关系。以 BJ 站 2002 年第 57 天开始的 8 d 期间为例,人工目视解译结果表明:2002 年第 49—66 天期间, BJ 站及周边区域出现 6 次积雪,而且 BJ 站多次处于薄雪区或积雪边缘区,另有 7 次云覆盖和 4 次无雪。BJ 站地面观测的日平均地表反照率普遍较高,最高约 0.80,最低也有 0.41,只有 2 d 的日平均地表反照率约为 0.30。显然, BJ 站出现了积雪和消融过程,因而 17 d 平均的地表反照率超过 0.60(图 4d)。然而,由于站点对应的像元经常处于薄雪或积雪边缘区,积雪覆盖比例较小,对卫星观测的地表反射率的影响较小,导致地表反照率卫星遥感反演结果偏低。其他几个类似的情形,也与 2002 年第 57 天开始的 8 d 期间的情况基本类似。

导致第三、四种情形的实质都是局地积雪的影响,根本原因在于卫星遥感反演结果与地面观测结果比较时存在“点”对“面”的差异。采用对应时次的高空间分辨率、高精度卫星遥感反演结果,无疑是消除这种差异、实现“面”对“面”比较的一条有效途径。然而,目前仍然是定量评估卫星遥感反演结果

精度的难点之一。

综合 TGL、XDT、NPAM 和 BJ 等 4 个站点的地面观测结果,统计分析它们与卫星遥感反演结果的均方根误差,结果表明: MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率与地面观测结果的均方根误差分别高达 0.086 1 和 0.077 1;即使只考虑高质量反演结果,也仍然高达 0.078 7 和 0.077 5。尽管 MODIS 地表反照率的均方根误差略小,仍然无法达到全球气候观测系统 GCOS 对地表反照率的绝对精度不低于 0.05 的要求。不过,结合人工分析剔除错误的反演结果, MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率的均方根误差均减小至 0.05 以内,分别为 0.028 0 和 0.032 9;如果只考虑高质量反演结果,则进一步减小至 0.020 6 和 0.033 0。

4 结论

本文采用 MODIS 和 GLASS 地表反照率反演质量数据,分析了两种卫星遥感反演结果在青藏高原大范围的空间分布连续性和高质量反演结果的比例,应用青藏高原 CAMP/Tibet 试验期间 BJ、NPAM、TGL 和 XDT 等 4 个站点的高精度地面观测结果评估了两种遥感反演结果的精度,通过人工目视解译 MODIS 地表反射率图像并结合 MODIS 积雪产品提供的云雪判识结果,分析和讨论了影响卫星遥感反演结果精度的因素,结论如下:

1) GLASS 地表反照率和 MODIS 地表反照率的反演效率和高质量反演结果的比例在不同的反演周期存在较大的差异: GLASS 地表反照率的反演效率超过 99.9%,高质量反演结果的比例大多超过 80%,最高约 98%; MODIS 地表反照率的反演效率一般超过 80%,但最低不足 60%,高质量反演结果的比例一般介于 40%和 80%,最低不足 1%。相对而言, GLASS 地表反照率具有比 MODIS 地表反照率更好的空间分布连续性和更高的反演质量。

2) MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率在绝大多数时段内都能与地面观测结果保持较好的一致性,能够准确地反映地表积雪及消融过程引起地表反照率的异常变化过程,但是部分时段也与地面观测结果存在较大的差异。

3) 局地积雪是导致地表反照率卫星遥感反演结果与地面观测结果产生差异的重要原因,云雪判识有助于提高 GLASS 地表反照率的反演精度。GLASS 地表反照率反演算法在积雪条件下比 MODIS 地表反照率反演算法更具优势,反演结果的

精度更高。

4) 青藏高原地表反照率卫星遥感反演结果的精度存在不确定性: 即使 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率高质量反演结果, 如果未经人工分析, 与地面观测结果的均方根误差高达 0.078 7 和 0.077 5; 经过人工分析并剔除错误的反演结果后, 与地面观测结果的均方根误差可以减小至 0.028 0 和 0.032 9, 能够满足全球气候观测系统 GCOS 要求地表反照率的绝对精度不低于 0.05 的要求。

本文研究结果有助于进一步优化和改进 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率反演算法, 提高青藏高原地表反照率卫星遥感反演结果的精度、反演质量和空间分布连续性, 促进地表反照率卫星遥感反演产品在青藏高原辐射能量收支和地-气相互作用研究中的应用。

致谢: 衷心感谢中国科学院青藏高原研究所提供的地面观测数据。

参考文献(References)

- 包云轩, 邵艺, 李迅. 2018. 基于 MODIS 的北京地区一次霾过程的能见度反演[J]. 大气科学学报, 41(5): 710-719. Bao Y X, Shao Y, Li X. 2018. Visibility inversion of a haze process in Beijing by remote sensing based on MODIS satellite observations[J]. Trans Atmos Sci, 41(5): 710-719. (in Chinese).
- 陈爱军, 卞林根, 刘玉洁, 等. 2009. 应用 MODIS 数据反演青藏高原地区地表反照率[J]. 南京气象学院学报, 32(2): 222-229. Chen A J, Bian L G, Liu Y J, et al. 2009. Using MODIS data to retrieve albedo over the Qinghai-Tibet plateau[J]. J Nanjing Inst Meteor, 32(2): 222-229. (in Chinese).
- 陈爱军, 梁学伟, 卞林根, 等. 2012a. 青藏高原地区 MODIS 反照率的精度分析[J]. 大气科学学报, 35(6): 664-672. Chen A J, Liang X W, Bian L G, et al. 2012a. Assessment on the accuracy of MODIS albedos over the Tibetan Plateau[J]. Trans Atmos Sci, 35(6): 664-672. (in Chinese).
- 陈爱军, 王飞, 卞林根, 等. 2012b. 青藏高原地区 MODIS 反照率两种反演结果差异的对比分析[J]. 高原气象, 31(6): 1479-1487. Chen A J, Wang F, Bian L G, et al. 2012b. Study on difference between two kinds of MODIS albedo over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 31(6): 1479-1487. (in Chinese).
- 陈爱军, 胡慎慎, 卞林根, 等. 2015. 青藏高原 GLASS 地表反照率产品精度分析[J]. 气象学报, 73(6): 1114-1120. Chen A J, Hu S S, Bian L G, et al. 2015. An assessment on the accuracy of the GLASS albedo products over the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor Sin, 73(6): 1114-1120. (in Chinese).
- 陈爱军, 梁学伟, 卞林根, 等. 2016a. 青藏高原 MODIS 地表反照率反演质量分析[J]. 高原气象, 35(2): 277-284. Chen A J, Liang X W, Bian L G, et al. 2016a. Analysis on MODIS albedo retrieval quality over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 35(2): 277-284. (in Chinese).
- 陈爱军, 梁学伟, 卞林根, 等. 2016b. 青藏高原 MODIS 地表反照率反演结果的空间分布[J]. 高原气象, 35(6): 1409-1418. Chen A J, Liang X W, Bian L G, et al. 2016b. Spatial distribution characteristics of MODIS land surface albedo inversions over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 35(6): 1409-1418. (in Chinese).
- 陈爱军, 周芬, 梁学伟, 等. 2018. 中国地区 MODIS 地表反照率反演结果的时空分布研究[J]. 大气科学学报, 41(2): 267-274. Chen A J, Zhou F, Liang X W, et al. 2018. Analysis of the distribution of MODIS albedo inversion in China[J]. Trans Atmos Sci, 41(2): 267-274. (in Chinese).
- 储鹏, 江志红, 李庆祥, 等. 2016. 城市分类对中国城市化影响评估的不确定性分析[J]. 大气科学学报, 39(5): 661-671. Chu P, Jiang Z H, Li Q X, et al. 2016. Analysis of the effect of uncertainty in urban and rural classification on urbanization impact assessment[J]. Trans Atmos Sci, 39(5): 661-671. (in Chinese).
- Dickinson R E. 1995. Land processes in climate models[J]. Remote Sens Environ, 51(1): 27-38.
- Evans J P, Meng X H, McCabe M F. 2017. Land surface albedo and vegetation feedbacks enhanced the millennium drought in south-east Australia[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 21(1): 409-422.
- 方宗义, 刘玉洁, 林曼芸. 1996. 青藏高原地表反照率计算研究[J]. 气象学报, 54(5): 580-589. Fang Z Y, Liu Y J, Lin M Y. 1996. The research and calculation of surface albedo over Tibetan Plateau from satellite data[J]. Journal of Meteorological Research, 54(5): 580-589. (in Chinese).
- Haywood J M, Jones A, Dunstone N, et al. 2016. The impact of equilibrating hemispheric albedos on tropical performance in the HadGEM2-ES coupled climate model[J]. Geophys Res Lett, 43(1): 395-403.
- Hu S N, Boos W R. 2017. Competing effects of surface albedo and orographic elevated heating on regional climate[J]. Geophys Res Lett, 44(13): 6966-6973.
- Jin Y F. 2003. Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 2. Validation[J]. J Geophys Res, 108(D5): 4159.
- Levine X J, Boos W R. 2017. Land surface albedo bias in climate models and its association with tropical rainfall[J]. Geophys Res Lett, 44(12): 6363-6372.
- Lewis P, Guanter L, Lopez Saldana G, et al. 2012. The ESA globAlbedo project: algorithm [C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote

Sensing Symposium.Munich ,Germany.

- Li Y ,Wang T ,Zeng Z Z ,et al. 2016.Evaluating biases in simulated land surface albedo from CMIP5 global climate models[J].*J Geophys Res Atmos* , 121(11) : 6178-6190.
- Liang S ,Zhao X ,Liu S ,et al. 2013.A long-term Global Land Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies[J].*International Journal of Digital Earth* 6(S1) : 5-33.
- 梁顺林 ,张晓通 ,肖志强 等 .2014.全球陆表特征参量(GLASS) 产品算法验证与分析[M].北京: 高等教育出版社: 33-72. Liang S L ,Zhang X T ,Xiao Z Q ,et al. 2014.Global Land Surface Satellite(GLASS) products: validation and analysis[M].Beijing: Higher Education Press: 33-72.(in Chinese) .
- 林楚勇 ,邓玉娇 ,徐剑波 等 .2015.基于 MODIS 的广东省气溶胶光学厚度时空分布特征分析[J].*热带气象学报* ,31(6) : 821-826. Lin C Y , Deng Y J ,Xu J B ,et al. 2015.Temporal variation and spatial distribution of aerosol optical depth in Guangdong Province based on MODIS data [J].*J Tropic Meteor* 31(6) : 821-826.(in Chinese) .
- Liu F S ,Chen Y ,Lu H Y ,et al. 2017.Albedo indicating land degradation around the Badain Jaran Desert for better land resources utilization[J].*Sci Total Environ* 578: 67-73.
- Liu J C ,Schaaf C B ,Strahler A ,et al. 2009.Validation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) albedo retrieval algorithm: dependence of albedo on solar zenith angle[J].*J Geophys Res* ,114: D01106.doi: 10. 1029/2008JD009969.
- 刘强 ,瞿瑛 ,王立钊 等 .2012.GLASS 陆表反照率产品使用手册[R].北京: 北京师范大学. Liu Q ,Qu Y ,Wang L Z ,et al. 2012.GLASS-Global land surface broadband albedo product: user's guide[R].Beijing: Beijing Normal University.(in Chinese) .
- Liu Q ,Wang L ,Qu Y ,et al. 2013.Preliminary evaluation of the long-term GLASS albedo product[J].*International Journal of Digital Earth* 6(S1) : 69-95.
- Lucht W ,Schaaf C B ,Strahler A H 2000.An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J].*IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 38(2) : 977-998.
- Lukeš P ,Stenberg P ,Möttus M ,et al. 2016.Multidecadal analysis of forest growth and albedo in boreal Finland[J].*Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 52: 296-305.
- Lyons E A ,Jin Y ,Randerson J T 2008.Changes in surface albedo after fire in boreal forest ecosystems of interior Alaska assessed using MODIS satellite observations[J].*J Geophys Res* ,113: G02012.doi: 10. 1029/2007JG000606.
- Pinty B ,Lattanzio A ,Martonchik J V ,et al. 2005.Coupling diffuse sky radiation and surface albedo[J].*J Atmos Sci* 62(7) : 2580-2591.
- Planque C ,Carré D ,Roujean J L 2017.Analysis of MODIS albedo changes over steady woody covers in France during the period of 2001—2013[J].*Remote Sens Environ* ,191: 13-29.
- 齐文栋 ,刘强 ,洪友堂 .2014.3 种反演算法的地表反照率遥感产品对比分析[J].*遥感学报* ,18(3) : 559-572. Qi W D ,Liu Q ,Hong Y T 2014. Comparison analysis based on different inverse algorithms of surface albedo products[J].*J Remote Sens* ,18(3) : 559-572.(in Chinese) .
- Saha M V ,D'Odorico P ,Scanlon T M 2017.Albedo changes after fire as an explanation of fire-induced rainfall suppression[J].*Geophys Res Lett* 44 (8) : 3916-3923.
- Schaaf C B ,Gao F ,Strahler A H ,et al. 2002.First operational BRDF ,albedo nadir reflectance products from MODIS [J].*Remote Sens Environ* , 83(1/2) : 135-148.
- Schaaf C B ,Liu J ,Gao F ,et al. 2010.Aqua and terra MODIS albedo and reflectance anisotropy products[M]//*Land Remote Sensing and Global Environmental Change*.New York: Springer: 549-561.
- Stokes G M ,Schwartz S E 1994.The atmospheric radiation measurement (ARM) program: programmatic background and design of the cloud and radiation test bed[J].*Bull Amer Meteor Soc* 75(7) : 1201-1221.
- Vahmani P ,Ban-Weiss G A 2016.Impact of remotely sensed albedo and vegetation fraction on simulation of urban climate in WRF-urban canopy model: a case study of the urban heat island in Los Angeles[J].*J Geophys Res Atmos* ,121(4) : 1511-1531.
- Wang K C 2004.Validation of the MODIS global land surface albedo product using ground measurements in a semidesert region on the Tibetan Plateau [J].*J Geophys Res* ,109(D5) : D05107.
- Wang K C ,Liang S L ,Schaaf C L ,et al. 2010.Evaluation of moderate resolution imaging spectroradiometer land surface visible and shortwave albedo products at FLUXNET sites[J].*J Geophys Res* ,115(D17) : D17107.
- 王立钊 ,郑学昌 ,孙林 等 .2014.利用 Landsat TM 数据和地面观测数据验证 GLASS 反照率产品[J].*遥感学报* ,18(3) : 547-558. Wang L Z , Zheng X C ,Sun L ,et al. 2014.Validation of GLASS albedo product through Landsat TM data and ground measurements[J].*J Remote Sensing* , 18(3) : 547-558.(in Chinese) .
- Wang Z S ,Schaaf C B ,Sun Q S ,et al. 2017.Monitoring land surface albedo and vegetation dynamics using high spatial and temporal resolution synthetic time series from Landsat and the MODIS BRDF/NBAR/albedo product[J].*Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 59: 104-117.
- 谢志鹏 ,胡泽勇 ,刘火霖 等 .2017.陆面模式 CLM4. 5 对青藏高原高寒草甸地表能量交换模拟性能的评估[J].*高原气象* 36(1) : 1-12. Xie Z P , Hu Z Y ,Liu Y ,et al. 2017.Evaluation of the surface energy exchange simulations of land surface model CLM4. 5 in alpine meadow over the Qinghai-Xizang plateau[J].*Plateau Meteor* 36(1) : 1-12.(in Chinese) .

- 徐兴奎 林朝晖 2002.青藏高原地表月平均反照率的遥感反演[J].高原气象,21(3):233-237. Xu X K, Lin Z H 2002.Remote sensing retrieval of surface monthly mean albedo in Qinghai-Xizang Plateau[J].Plateau Meteor,21(3):233-237.(in Chinese).
- Ye D Z,1981.Some characteristics of the summer circulation over the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its neighborhood[J].Bull Amer Meteor Soc,62(1):14-19.
- Ye D Z,Wu G X,1998.The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation[J].Meteor Atmos Phys,67(1/2/3/4):181-198.
- 余予 陈洪滨 夏祥鳌 等 2010.青藏高原纳木错站地表反照率观测与 MODIS 资料的对比分析[J].高原气象,29(2):260-267. Yu Y,Chen H B,Xia X A et al. 2010.Comparison of surface albedo measurement with MODIS product at namco station of Tibetan Plateau[J].Plateau Meteor,29(2):260-267.(in Chinese).

Comparative analysis on land surface albedo from MODIS and GLASS over the Tibetan Plateau

CHEN Aijun^{1,2}, MENG Wentong^{1,2}, HU Shenshen³, BIAN Lingen⁴

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

²School of Atmosphere Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

³Xuzhou Meteorological Observatory, Xuzhou 221003, China;

⁴Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

In this paper, the spatial distribution continuity and ratio of the high-quality retrievals over the Tibetan Plateau of two land surface albedo products, namely MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) land surface albedo and GLASS (Global LAND Surface Satellite Products System) land surface albedo, were comparatively analyzed. Next, the accuracies of these two products were evaluated using the high-precision ground observation data obtained during the CAMP/Tibet experiments. Furthermore, the factors affecting the accuracies of these two products were analyzed through artificial visual interpretation combined with the MODIS snow product. The results of the study are as follows: 1) The product of the GLASS land surface albedo is superior to that of the MODIS land surface albedo in terms of both spatial distribution continuity and the ratio of the high-quality retrievals. 2) These two products both have high consistency with land surface albedo ground measurements during most of the retrieval periods and rather accurately reflect the abnormal changing processes of land surface albedo. 3) The patchy snow is an important factor affecting the accuracies of these two products when performing comparison with the ground measurements. 4) The inversion algorithm of the GLASS land surface albedo has a great advantage over that of the MODIS land surface albedo under snow conditions. The above results are conducive to the users to acquiring better knowledge of these two products. In addition, the results also contribute to the improvements of the algorithm of satellite remote sensing land surface albedo over the Tibetan Plateau, so as to assist in obtaining retrievals with better precision, quality and spatial distribution continuity.

the land surface albedo; accuracy analysis; the Tibetan Plateau; MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer); GLASS (Global LAND Surface Satellite Products System)

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171030001

(责任编辑: 刘菲)