

中国大陆地区GF-1 WFV地表反射率产品

余文庆^{1,2}, 张兆明^{1,2,3}, 彭燕^{1,3}, 何国金^{1,2,3}, 龙腾飞^{1,2,3}, 王桂周^{1,3}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 海南空天信息研究院海南省地球观测重点实验室, 三亚 572029

摘要: 高分一号卫星 (GF-1) 搭载的 WFV 传感器具有高空间分辨率和宽幅成像能力, 是资源调查和生态环境保护等领域的重要数据源。目前 GF-1 WFV 数据仅提供 L1 级标准化产品, 缺少地表反射率产品, 而大多数定量遥感研究都是建立在地表反射率产品的基础上。为了研发 GF-1 WFV 地表反射率产品, 本文提出一种基于多源 MODIS AOD 空间融合和动态查找表的 6S 大气校正算法并生产和共享中国大陆地区 2020 年 GF-1 WFV 地表反射率产品。在产品精度验证方面, 通过比较大气校正前后的影像质量、直方图和典型地物反射率差异并利用同步过境的 Landsat 8 OLI 地表反射率产品和地面实测数据进行定量验证。精度验证和分析结果表明, 经过大气校正后的影像质量改善明显, 与 Landsat 8 OLI 地表反射率产品具有良好的 consistency。基于实测地表反射率数据的精度验证结果表明蓝、绿、红和近红外波段的均方根误差 (Root Mean Square Error) 分别为 1.21%、1.53%、1.26% 和 6.14%。研究表明, 研发的 GF-1 WFV 地表反射率产品的质量可靠且产品算法具有自动化和业务化的生产能力。

关键词: 遥感, GF-1 WFV, 地表反射率, 大气校正, 6S 模型, 空间融合, 动态查找表, 中国大陆地区

中图分类号: P237/P2

引用格式: 余文庆, 张兆明, 彭燕, 何国金, 龙腾飞, 王桂周. 2023. 中国大陆地区 GF-1 WFV 地表反射率产品. 遥感学报, 27(9): 2206-2218

She W Q, Zhang Z M, Peng Y, He G J, Long T F and Wang G Z. 2023. GF-1 WFV surface reflectance product in China's land area. National Remote Sensing Bulletin, 27(9): 2206-2218 [DOI:10.11834/jrs.20222190]

1 引言

高分一号卫星 (以下简称 GF-1) 是中国高分辨率对地观测系统的首颗卫星, 于 2013 年 4 月 26 日在酒泉卫星发射中心成功发射。GF-1 卫星搭载两台 2 m 分辨率的全色、8 m 分辨率的多光谱相机和 4 台 16 m 分辨率的宽幅相机。其中 4 台宽幅相机影像拼接合成后, 幅宽可达到 800 km (白照广, 2013)。目前 GF-1 卫星数据已广泛应用于林业、农业和生态环境等领域, 在一定程度上弥补了中国高分辨率卫星数据的应用短板。

地表反射率是表征物体表面对太阳辐射反射的能力, 是许多生态遥感参数反演的输入数据, 例如生物量和叶面积指数等。目前国内外公开共

享的地表反射率产品主要有 250 m、500 m、1 km 分辨率的 MODIS 地表反射率产品 (Liang 等, 2002; Vermote 等, 2002)、30 m 分辨率的 Landsat 系列地表反射率产品 (Roy 等, 2010; Vermote 等, 2016; 彭燕 等, 2020) 和 10 m、20 m、60 m 分辨率的 Sentinel-2 地表反射率产品 (Main-Knorn 等, 2017)。国产 GF-1 WFV 数据已面向公众开放共享, 但是仅提供 L1 级标准化产品。如果能在 GF-1 WFV L1 级数据的基础上生产 16 m 分辨率的地表反射率产品, 即可与 Landsat 系列、Sentinel 系列的地表反射率产品协同形成中国区域近每日的密集时间序列中高分辨率地表反射率产品。

地表反射率反演的关键步骤是大气校正, 大气校正方法主要分为统计模型和物理模型 (李正

收稿日期: 2022-04-24; 预印本: 2022-04-24

基金项目: 中科院 A 类先导专项 (编号: XDA19090300); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (编号: 2019QZKK030701); 海南省自然科学基金 (编号: 620MS075); 国家自然科学基金 (编号: 62101531)

第一作者简介: 余文庆, 研究方向为遥感定量参数反演。E-mail: shewenqing20@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 张兆明, 研究方向为遥感大数据智能处理与信息提取。E-mail: zhangzhaoming@aircas.ac.cn

强 等, 2018)。统计模型方法是利用地表变量和遥感数据之间建立的统计关系模型进行大气校正, 但由于区域之间存在差异性, 统计模型通常适用于局部地区 (郑伟和曾志远, 2004; 申茜 等, 2021)。物理模型方法的基本原理是利用电磁波在大气中的辐射传输原理建立起来的模型对遥感影像进行大气校正, 其大气校正精度高且应用范围广 (郑伟和曾志远, 2004)。基于物理模型的遥感影像大气校正的一个核心问题是如何获取成像时的气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth)、大气水蒸汽含量 WV (Water Vapor) 和臭氧含量 TO (Total Ozone) 等大气参数。通常的做法是采用相关的大气产品或利用自身数据进行反演。如 Hu 等 (2014) 和 Peng 等 (2016) 分别将 MOD04 (AOD)、MOD05 (WV) 和 MOD07 (TO) 应用于 Landsat 5 和 Landsat 8 影像的大气校正, 地面实测地表反射率数据验证表明了算法的可行性。Martins 等 (2018) 将 MCD19A2 (AOD 和 WV) 和 MOD08D3 (TO) 应用于 CBERS-4 MUX 影像的大气校正, 生产南美洲的 CBERS-4 MUX 地表反射率产品, 利用 Landsat 8 OLI 地表反射率和 AERONET 站点数据验证了产品的精度, 验证结果表明产品具有较高的可靠性。美国 WELD (Web Enabled Landsat Data) 团队利用 MODIS 大气产品 (MOD04、MOD05 和 MOD07) 生产美国区域的 Landsat 地表反射率产品 (Roy 等, 2010)。这些研究表明了将相关的 MODIS 大气产品应用于大区域遥感影像大气校正的可行性。在大气参数反演方面, 大气水蒸汽含量反演需要数据具有水汽吸收通道 (Main-Knorn 等, 2017), 不适用于 GF-1 WFV 数据; 气溶胶光学厚度反演常用的算法为暗目标 (Dark Target, DT) 法, 该算法是利用短波红外波段受大气影响较小的特性, 根据暗目标区域短波红外波段与蓝、红波段地表反射率之间的经验线性关系来反演 AOD (Kaufman 和 Sendra, 1988), 但由于 GF-1 WFV 数据缺少短波红外波段, 导致 DT 方法应用于 GF-1 WFV 数据存在较大困难 (Richter 等, 2006)。

因此利用 MODIS 大气产品辅助 GF-1 WFV 大气校正成为了一个重要途径。然而 MODIS 大气产品在部分区域存在无效值, 尤其是 AOD 产品, 在一定程度上会影响地表反射率反演的精度。针对此问题, 通常的做法是直接对单一 AOD 产品采用传统克里金法插值填充无效值区域 (Hu 等, 2014;

胡勇 等, 2018)。该方法虽然能在一定程度上解决无效值问题, 但是其计算复杂, 且对大量无效值区域的插值会出现数据失真的现象。目前已发布和共享了多种不同分辨率的 MODIS AOD 产品, 若能将这些多源产品在空间上进行融合, 就可以减少大范围无效值的情况。

本文在参考相关工作的基础上, 开展多源 MODIS AOD 产品协同的 GF-1 WFV 大气校正方法研究。基于多源 MODIS AOD 空间融合和动态查找表, 设计和实现一种针对 GF-1 WFV 的 6S 大气校正算法, 并利用该算法生产和共享中国陆地区域 2020 年地表反射率产品。该产品可为全国植被生长监测、地表覆盖分类和重要生态遥感参数反演等研究提供基础数据支撑。

2 数据源介绍

2.1 GF-1 WFV 数据

GF-1 卫星传感器由 2 台多光谱相机 (PMS) 和 4 台宽视场相机 (WFV) 组成。本文所用的数据为 GF-1 WFV, 其参数如下表 1 所示。本文选取 2020 年覆盖中国陆地区域的无云或者少云的 GF-1 WFV 正射数据, 总共 850 景。所有数据来源于中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com/>[2022-10-22]) 和对地观测数据共享计划 (<http://ids.ceode.ac.cn/>[2022-10-22])。

表 1 GF-1 WFV 数据参数
Table 1 GF-1 WFV data parameters

参数	16 m 分辨率宽视场相机		
	波段	波段索引	波段范围/nm
光谱范围	蓝	1	450—520
	绿	2	520—590
	红	3	630—690
	近红外	4	770—890
空间分辨率/m	16		
幅宽/km	800(4 台相机组合)		
重访周期/d	4		

2.2 MODIS 大气产品

GF-1 WFV 大气校正所使用的 MODIS AOD 产品包括 MOD08D3、MOD09CMA 和 MCD19A2。其中 MOD08D3 提供 3 种全球逐日 1° AOD 产品 (Wei 等, 2019), 本文采用 DTB (DT 和 DB (Deep Blue, 深蓝) 结合) 算法获取的 AOD; MOD09CMA 提供全球逐日 0.05° AOD 产品 (Vermote 和 Kotchenova,

2008); MCD19A2提供全球逐日1 km AOD (Lyapustin等, 2018)。大气水蒸汽含量和臭氧含量分别来自MCD19A2和MOD09CMG产品。上述产品均可在MODIS产品网站下载和使用 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/>[2022-10-22])。

2.3 其他数据

其他数据包括全球30 m分辨率ASTER GDEM (Abrams等, 2020)和重采样到2.5 nm步长的GF-1

WV光谱响应函数。

3 数据处理算法

中国陆地区域2020年GF-1 WV地表反射率产品的生产技术流程如图1所示, 主要包括GF-1 WV预处理、多源MODIS AOD产品空间融合、动态查找表构建和快速大气校正等步骤。

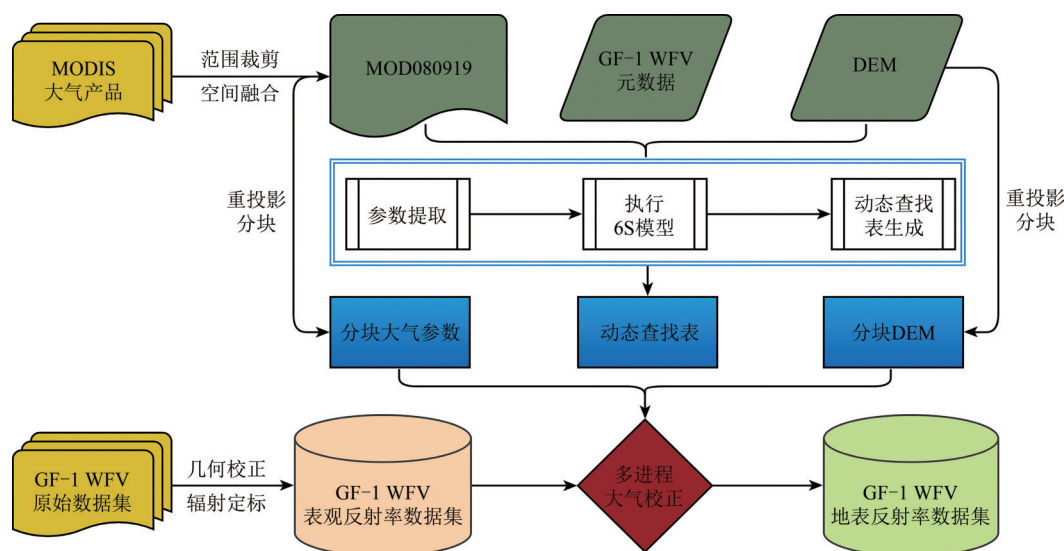


图1 GF-1 WV 地表反射率产品生产技术流程图

Fig. 1 Flow chart of GF-1 WV surface reflectance product generation

3.1 GF-1 WV 数据预处理

在对GF-1 WV L1级数据进行正射校正的基础上, 利用辐射定标系数和式(1)将卫星影像DN值转换为辐射亮度值, 然后利用式(2)计算表观反射率TOA (Top of Atmosphere reflectance)。

$$Le = Gain \times DN + Bias \quad (1)$$

式中, Le 为辐射亮度, $Gain$ 和 $Bias$ 分别为辐射定标系数增量和偏移量。本文中的辐射定标系数来源于包头辐射定标场获取的数据 (Ma等, 2020)。

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi \cdot Le \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

式中, ρ_{TOA} 为表观反射率、 Le 是辐射亮度、 d 为日地相对距离, 近似取值为1 (刘佳等, 2015)、 $ESUN$ 为大气外层太阳辐照度, θ 为太阳天顶角。

3.2 多源MODIS AOD产品空间融合

多源MODIS AOD产品的空间融合通常是在以确定某一AOD产品为主数据, 其他AOD产品为副

数据的基础上, 可采用直接替换法、线性替换法或泛克里金法UK (Universal Kriging) 进行替换。直接替换法针对主数据未覆盖而副数据覆盖的地区, 直接用副数据的值进行替换。线性替换法针对主数据和副数据的相同覆盖区域, 建立线性回归模型; 对主数据未覆盖而副数据覆盖的区域, 利用线性回归模型计算的值进行替换。UK方法是普通克里金法的改进版本, 它是一种考虑存在漂移的无偏线性估计的地统计方法 (Armstrong, 1984)。UK法替换针对主数据和副数据的相同覆盖区域, 在泛克里金的漂移项内考虑副数据的影响因素, 构建泛克里金模型。对于主数据未覆盖而副数据覆盖的地区, 利用泛克里金模型计算的值进行替换。Chatterjee等 (2010) 曾利用UK方法将MODIS AOD和MISR AOD数据进行融合研究, 表明了UK方法在AOD融合上的可行性和有效性。

为了验证不同融合方法的效果, 以MCD19A2多个AOD产品的融合为例进行实验。MCD19A2

AOD 产品在一天内包含多个时间的产品。将产品按上午和下午时间段划分并取均值, 得到上午数据和下午数据。以上午数据为主数据, 下午数据为副数据, 分别采用直接法、线性法和泛克里金法进行替换, 替换结果如图 2 所示。结果显示由于气溶胶随时间变化的影响较大, 直接替换会造成融合数据出现不连续和一致性差的问题 (图 2 (c))。线性

替换由于考虑了两者的线性关系, 一致性得到了一定的提升, 但是融合后的数据在局部地区依然会出现连续性和一致性较差的问题 (图 2 (d))。泛克里金替换通过结合副数据漂移影响和主数据插值, 融合结果整体上具有较好的连续性和一致性 (图 2 (e))。

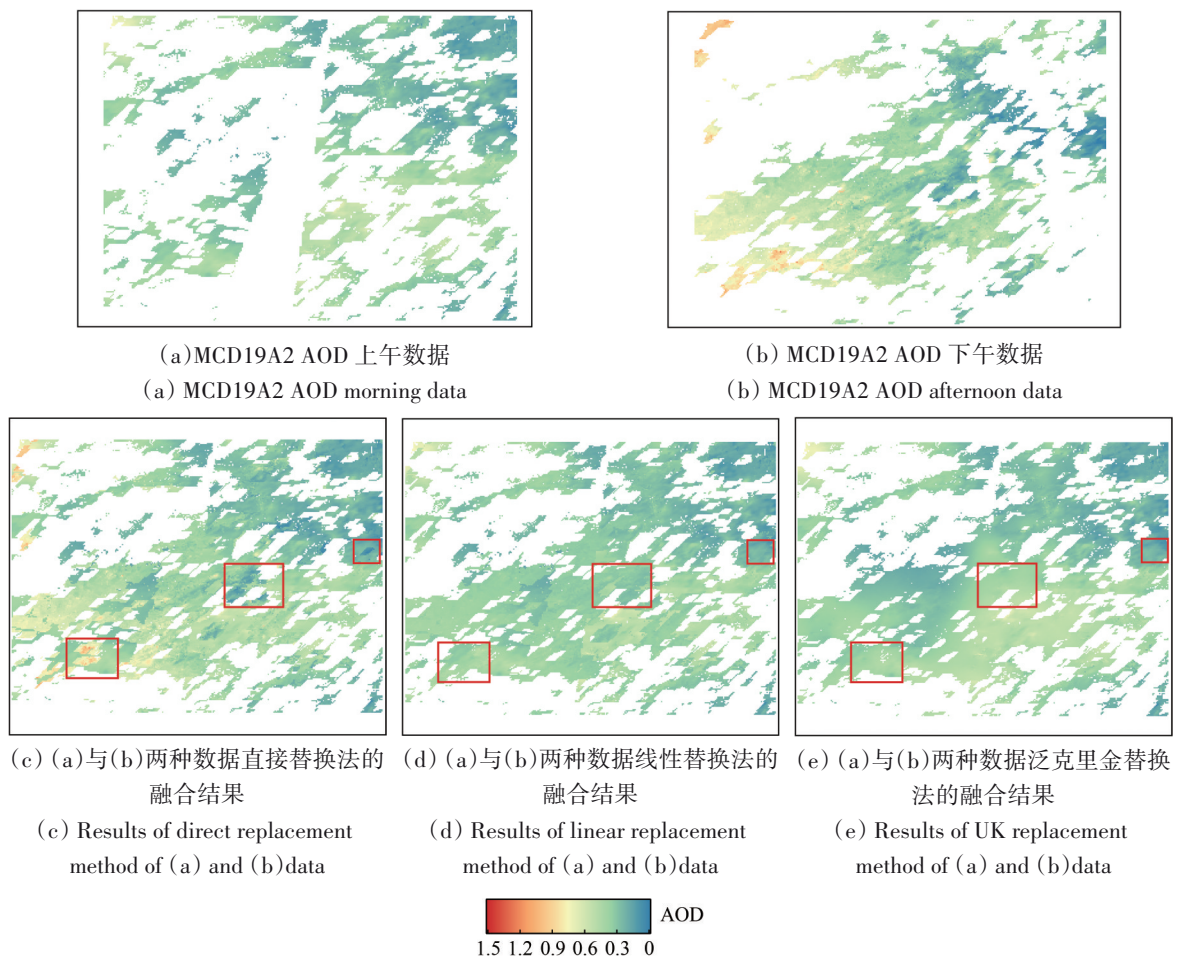


图2 不同替换方法的效果比较

Fig. 2 Effects of different replacement methods

因此本文采用泛克里金替换, 将 MOD08D3、MOD09CMA 和 MCD19A2 的 AOD 数据进行空间融合, 获得三者空间覆盖度的并集产品。首先将 MCD19A2 上午和下午的 AOD 数据空间融合得到 MCD19A2 (1 km)。然后将 MOD08D3 和 MOD09CMA 不同分辨率的 AOD 数据空间融合得到 MOD0809 (5 km)。最后将 MCD19A2 (1 km) 和 MOD0809 (5 km) 的 AOD 数据再进行空间融合, 得到 MOD080919 (1km) 的 AOD 数据, 具体流程如图 3 所示。

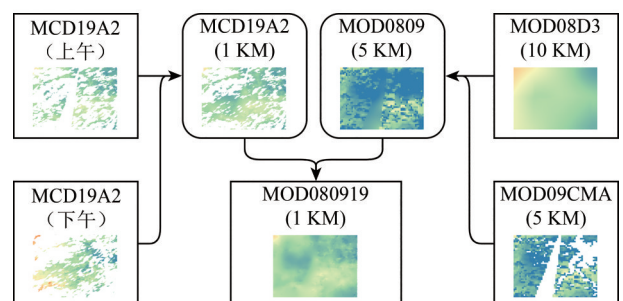


图3 泛克里金融合 MODIS 大气参数产品流程

Fig. 3 Fused MODIS atmospheric parameter product generation through UK method

3.3 动态查找表构建

6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 模型是由法国大气光学实验室 Tanre D. 和美国马里兰大学地理系 Vermote E. 在 5S 模型基础上发展而来 (Vermote 等, 1997)。6S 模型对大气辐射传输过程进行模拟和计算, 得到用于大气校正的系数 x_a , x_b 和 x_c , 利用式 (3) 可计算得到地表反射率。

$$y = x_a \times Le - x_b \quad (3)$$

$$\rho_{ac} = \frac{y}{1 + x_c \times y}$$

式中, ρ_{ac} 为地表反射率, Le 为辐射亮度, x_a , x_b 和 x_c 为大气校正系数。

查找表可近似替代真实模型, 提高大气校正的效率。传统查找表的维度和步长是预先设定的, 不同的维度和步长会影响查找表的精度和构建时间。传统查找表在维度上选择气溶胶光学厚度、高程、大气水蒸汽含量、太阳天顶角和卫星天顶角等 (Peng 等, 2016)。本文在参考传统查找表基

础上, 提出动态查找表方法。

通过对 2013 年—2019 年 4 万余景 GF-1 WFV 的星下点太阳和卫星天顶角进行统计, 发现其星下点太阳天顶角主要在 60° 以内, 星下点卫星天顶角均在 50° 以内 (图 4)。一景 GF-1 WFV 影像星下点到影像边缘的太阳天顶角和卫星天顶角相差约 1° 和 8° (王中挺 等, 2015)。逐像元天顶角与星下点天顶角反演的地表反射率结果差异较小, 因此以星下点天顶角代表整景影像的天顶角。

根据上述分析结果, 动态查找表在维度上选取气溶胶光学厚度、高程和大气水蒸汽含量。

动态查找表的步长则是根据 GF-1 WFV 影像的成像时间和空间范围提取对应的气溶胶光学厚度、高程和大气水蒸汽影像的数值范围, 并分别划分为 8 等分、6 等分和 4 等分来动态确定。由于每景 GF-1 WFV 影像的成像角度不同, 根据每景影像的具体成像条件, 均会构建一个独立的查找表。

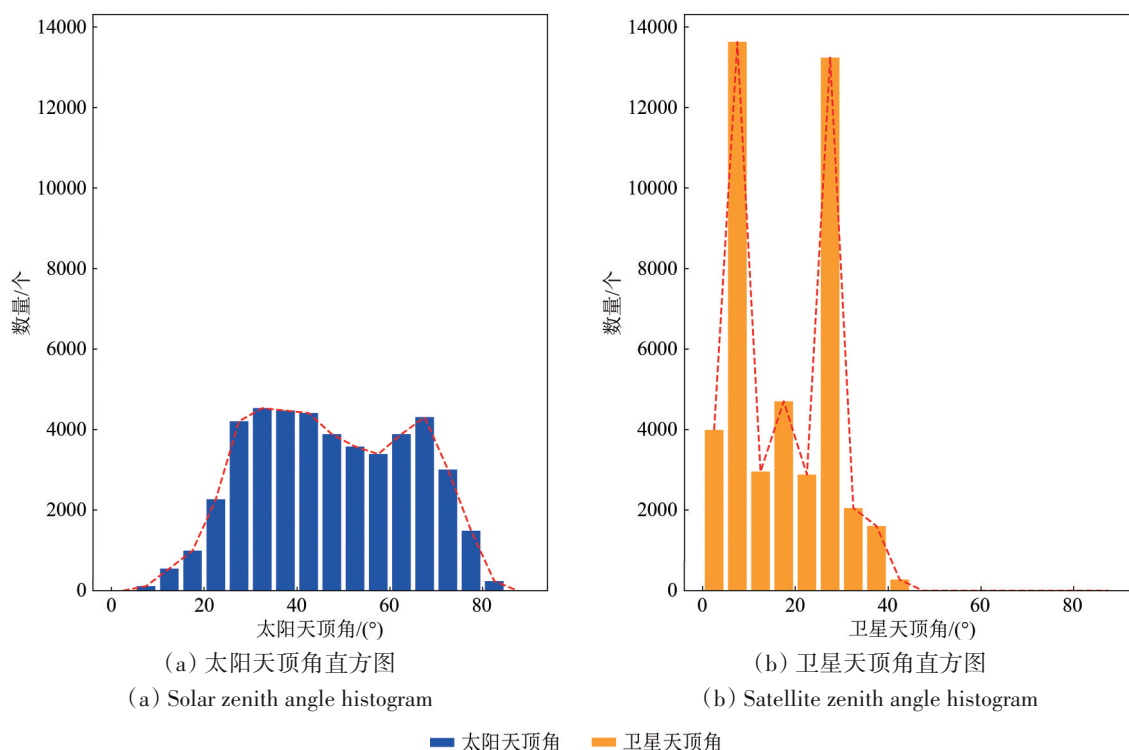


图4 天顶角统计结果

Fig. 4 Statistics of zenith angles

3.4 快速大气校正

在上述 GF-1 WFV 数据预处理、MODIS 大气产品预处理和动态查找表构建的基础上, 实现了

GF-1 WFV 快速大气校正, 具体流程如下:

(1) 根据 GF-1 WFV 影像提取对应成像时间和空间范围的 MODIS WV 和 AOD 产品及 DEM 数

据。利用泛克里金法将多种不同分辨率的 MODIS AOD 产品进行空间融合，得到 1 km 分辨率全覆盖的 MODIS AOD 产品。

(2) 提取对应的 MODIS WV、泛克里金融合的 AOD 和 DEM 数据的值域范围以及 GF-1 WFV 影像星下点的天顶角，调用 6S 模型构建动态查找表。

(3) 综合考虑大气校正算法的空间成本和时间效率，将大气校正辅助数据重采样到 64 m。对所有数据分块，利用动态查找表生成 64 m 分辨率的校正系数图像。利用线性插值将校正系数图像重采样到 16 m，结合式 (3)，计算地表反射率。

(4) 在多线程支持下，并行逐块执行步骤 (3)，最后将每一块结果进行拼接得到 GF-1 WFV 的地表反射率图像。

在 Python 开发环境中按照上述流程编写代码

实现 GF-1 WFV 快速自动化地表反射率反演。

4 结果与分析

利用开发的 GF-1 WFV 地表反射率反演算法生产 2020 年中国陆地区域的 GF-1 WFV 地表反射率产品，共计 850 景。为了验证产品的可靠性，分别采用大气校正前后影像对比、与已有地表反射率产品交叉验证以及实测数据验证进行产品质量分析和精度验证。

4.1 GF-1 WFV 大气校正前后影像对比

将全国陆地区域 GF-1 WFV 的表现反射率和地表反射率影像采用相同的拉伸比进行对比，结果如图 5 所示。从图 5 可以看出，大气校正后影像的清晰度和质量都得到了改善，影像具有更好的辐射一致性。

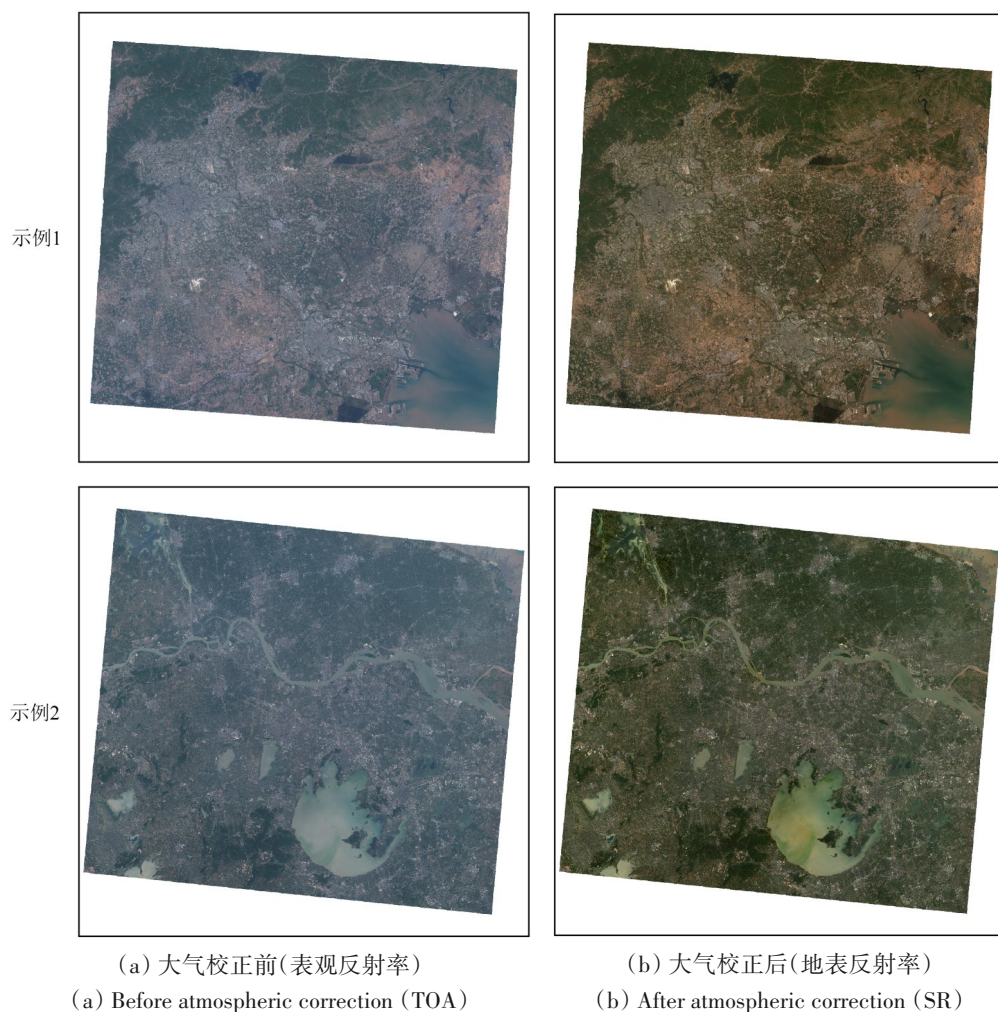


图5 GF-1 WFV 大气校正前后的影像质量对比

Fig. 5 Comparison of image quality of GF-1 WFV before and after atmospheric correction

通过计算大气校正前后的影像直方图,发现对于蓝、绿和红波段,地表反射率的峰值明显低于表观反射率峰值(图6)。这是由于对于蓝、绿和红等较短波长,大气影响主要表现为气溶胶散射,经过大气校正,消除了气溶胶散射的影响,

地表反射率直方图峰值整体“左移”。从“左移”的幅度来看,由于蓝光波长最短,受大气散射影响最大,“左移”的幅度最大,其次是绿光,红光波段“左移”的幅度最小。

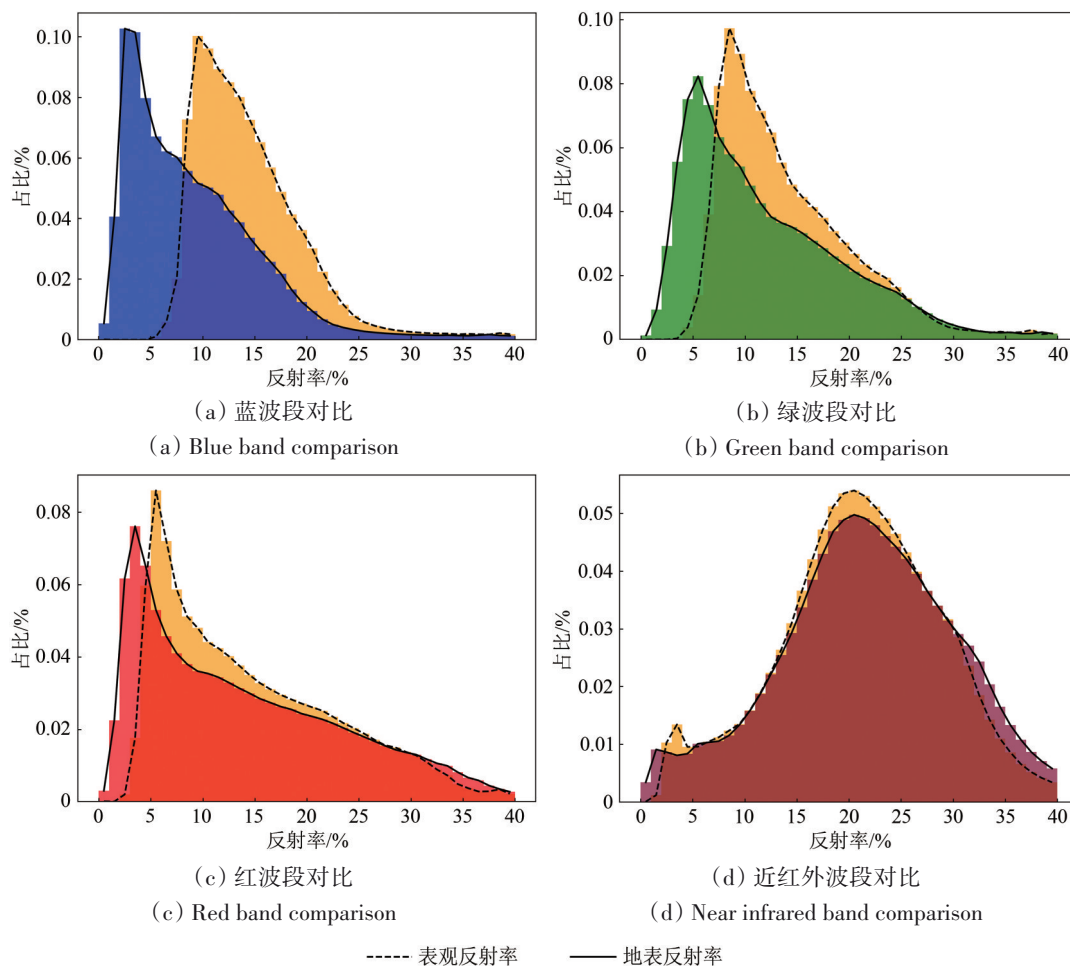


图6 GF-1 WFV大气校正前后的反射率直方图对比

Fig. 6 Comparison of GF-1 WFV reflectance histograms before and after atmospheric correction

在GF-1 WFV影像内采集林地、农田、海水、湖水、裸土和建筑6种典型地物,比较大气校正前后的反射率,如图7所示。经过大气校正,各地物的反射率曲线与标准地物反射率曲线更为一致,例如植被在绿波段有小的反射峰,在红和蓝波段有吸收谷。同时典型地物可见光波段反射率的差异随波长的变短而增大,这也符合较短波长波段更容易受到大气影响的规律。

4.2 GF-1 WFV与Landsat 8 OLI交叉精度验证

采用USGS的Landsat 8 OLI Collection1 Level2地表反射率产品(<https://earthexplorer.usgs.gov/>[2022-10-22])作为参考,对GF-1 WFV地表反射率产品

开展交叉精度验证。

选取同步过境且覆盖同一地理区域的Landsat 8 OLI和GF-1 WFV影像,在影像重叠区域目视解译得到验证样本,样本类型包含植被、裸土和水体(图8),得到40组Landsat 8 OLI和GF-1 WFV验证数据(表2)。

在每组验证数据的重叠区域目视解译得到约30个验证样区,40组验证数据共得到1206个验证样区,其中裸土样区740个、植被样区293个、水体样区173个。计算每个验证样区的均值来代表整个验证样区。选择均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)作为精度评估指标。

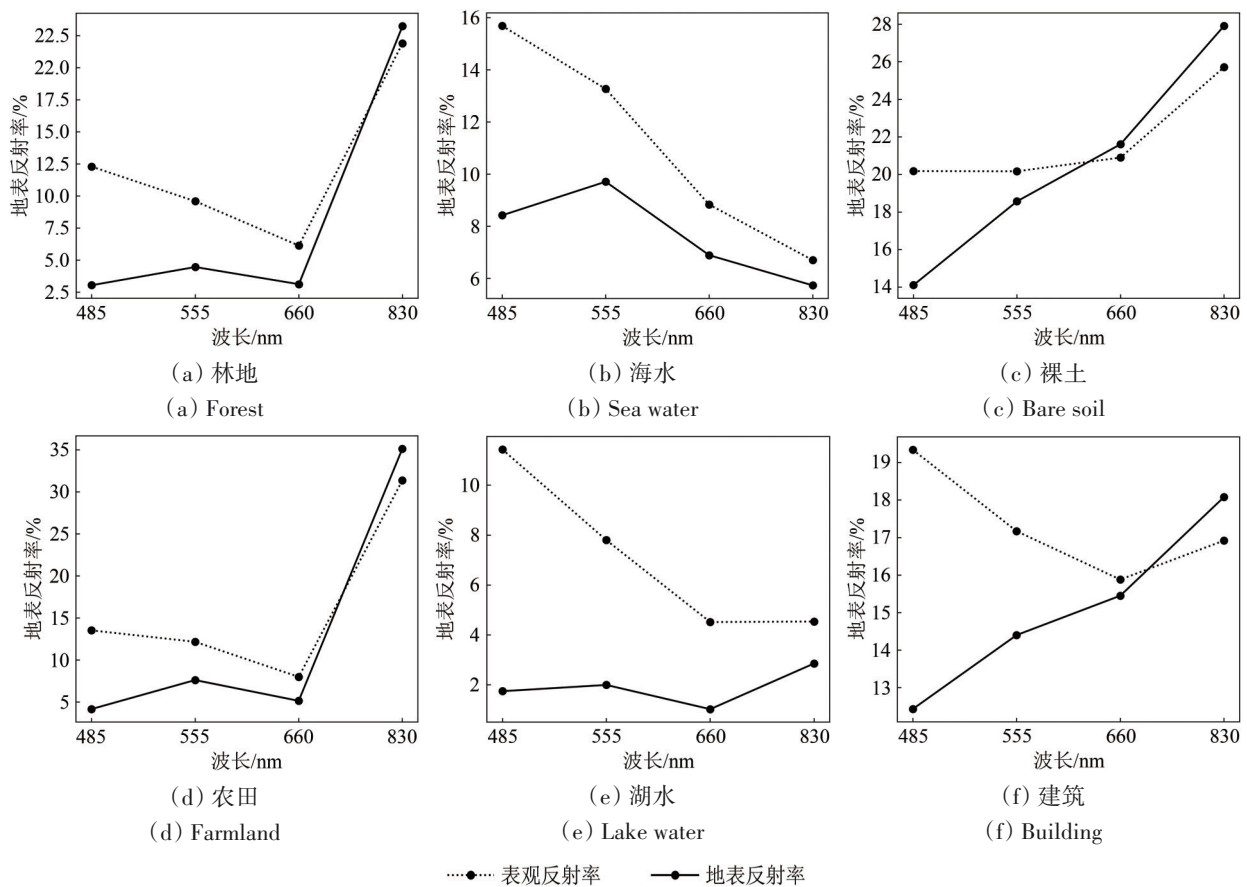


图7 GF-1 WFV典型地物大气校正前后反射率差异

Fig. 7 Reflectance difference of typical land cover with atmospheric correction of GF-1 WFV

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5)$$

式中, n 为验证样区总数, y_i 为 Landsat 8 OLI 地表反射率, $\hat{y}_i$ 为 GF-1 WFV 地表反射率。

考虑到 GF-1 WFV 数据观测角度与 Landsat 8 OLI 观测角度存在一定差异, 利用 C 因子 BRDF 校正方法 (Roy 等, 2016) 对 GF-1 WFV 数据进行 BRDF 校正, 减小两种卫星数据观测角度差异的影响。为减小两种卫星传感器光谱响应函数差异的影响, 本文基于 USGS splib07 的光谱测量数据 (Kokaly 等, 2017), 利用光谱匹配因子 (SBAF) (Chander 等, 2013) 将 GF1 WFV 的地表反射率转换为等效的 Landsat 8 OLI 地表反射率。最终交叉验证结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 蓝、绿、红和近红外波段的平均 RMSE 分别为 1.79%、2.33%、2.90% 和 2.83%, 最大 RMSE 不超过 3%, 且 GF-1 WFV 和 Landsat 8

OLI 各波段地表反射率的相关性较好, R^2 均大于 0.9。交叉精度验证结果表明本文生产的 GF-1 WFV 地表反射率产品具有较好的可靠性。

4.3 实测数据验证

为进一步验证 GF-1 WFV 地表反射率产品精度, 采用 ASD 光谱仪实际观测的地表反射率数据开展直接精度验证。实测数据共有 6 组, 包括 2019 年 9 月 13 日福建南平的水稻、2019 年 9 月 24 日甘肃张掖的燕麦、2019 年 10 月 20 日湖南株洲的水体、2019 年 9 月 15 日福建平潭的沙滩、2019 年 9 月 20 日甘肃敦煌的戈壁滩和 2019 年 9 月 22 日甘肃嘉峪关的戈壁滩。

首先将所有实测数据转化为 GF-1 WFV 等效的地表反射率, 然后挑选与实测数据同天或者相差 3 天内的 GF-1 WFV 数据, 并提取实测数据对应的验证区域, 计算验证区域内蓝、绿、红和近红外波段的地表反射率均值, 最后与实测数据进行对比验证, 验证结果如表 3 和图 10 所示。

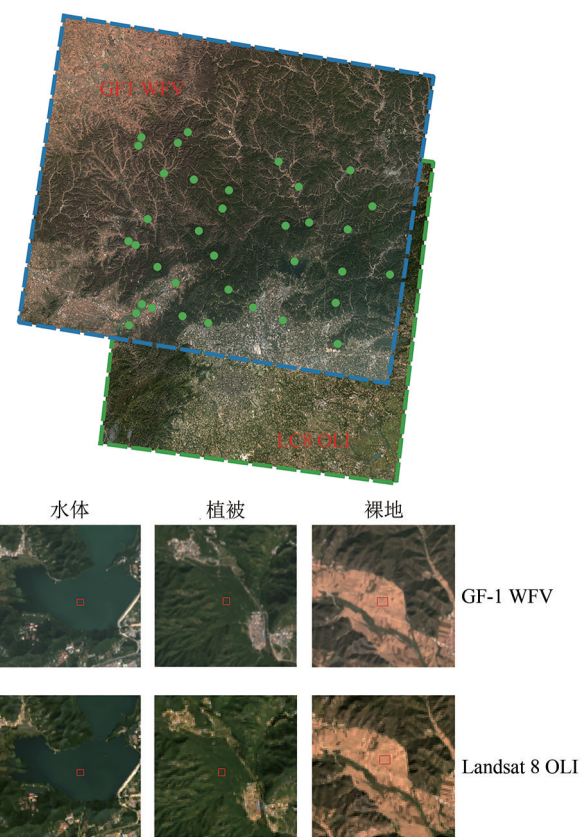


图8 交叉验证样区样本空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of validation samples in cross-validation

从表 3 和图 10 可以看出，各实测点各波段的平均 RMSE 在 1.21%—6.14%，各实测点的测量光谱曲线和 GF-1 WFV 的光谱曲线趋势基本一致。对于植被（水稻和燕麦），实测反射率和 GF-1 WFV 反演反射率在蓝、绿和红波段较为接近，但近红外波段的反演反射率低于实测反射率。对于水体，两者在蓝、绿和红波段的差异也较小，但在近红外波段反演反射率高于实测反射率。对于裸地（沙滩和戈壁滩），GF-1 WFV 蓝、绿、红和近红外波段的反演反射率与实测值均非常接近。直接验证结果表明本产品具有较好的精度和可靠性。但从验证结果中也可以发现，相较于蓝、绿和红波段，植被和水体在近红外波段的反演误差较大。这可能是由于清洁水体在近红外波段的反射率非常低（接近于 0），而健康植被在近红外波段具有较高的反射率（超过 50%），但是 GF-1 WFV 传感器在近红外波段的波谱范围相对较宽，导致该波段的光谱探测精度和敏感性降低，对于较高或较低反射特性地物，反演误差较大。

表 2 交叉验证数据对应关系表
Table 2 Cross-validation data correspondence table

GF-1 WFV ID	Landsat 8 OLI ID	RMSE/%
GF01_WF2_MY220_01_018	LC08_L1TP_121040_20200906	2.254
GF01_WF2_KS152_01_008	LC08_L1TP_146031_20201007	5.148
GF01_WF2_MY4K1_01_009	LC08_L1TP_123028_20201006	1.94
GF01_WF2_KS152_01_013	LC08_L1TP_123031_20201006	2.35
GF01_WF4_MY351_01_007	LC08_L1TP_123032_20201006	1.387
GF01_WF4_MY351_01_009	LC08_L1TP_139032_20201006	1.981
GF01_WF4_MY351_01_010	LC08_L1TP_139034_20201006	1.765
GF01_WF4_KS653_01_007	LC08_L1TP_129033_20201101	2.027
GF01_WF4_KS653_01_009	LC08_L1TP_129037_20201101	2.011
GF01_WF4_KS153_01_011	LC08_L1TP_135031_20201111	2.334
GF01_WF4_KS153_01_015	LC08_L1TP_135033_20201111	1.484
GF01_WF4_KR112_01_007	LC08_L1TP_135035_20201111	1.68
GF01_WF4_KR112_01_009	LC08_L1TP_135038_20201111	2.437
GF01_WF4_KR112_01_011	LC08_L1TP_135040_20201111	1.802
GF01_WF4_KR112_01_014	LC08_L1TP_119029_20201111	2.717
GF01_WF4_KR112_01_016	LC08_L1TP_121040_20200906	2.684
GF01_WF4_KS7Y2_01_006	LC08_L1TP_146031_20201007	3.038
GF1_WFV1_L1A0005235180	LC08_L1TP_146039_20201023	2.029
GF1_WFV1_L1A0005235175	LC08_L1TP_146038_20201023	2.136
GF1_WFV1_L1A0005235170	LC08_L1TP_146037_20201023	2.637
GF1_WFV1_L1A0005067870	LC08_L1TP_134036_20200917	1.598
GF1_WFV2_L1A0005187167	LC08_L1TP_126043_20201112	1.278
GF1_WFV2_L1A0005187168	LC08_L1TP_126042_20201112	1.308
GF1_WFV2_L1A0005187166	LC08_L1TP_126041_20201112	1.246
GF1_WFV2_L1A0005187165	LC08_L1TP_126040_20201112	1.189
GF1_WFV2_L1A0005187137	LC08_L1TP_126039_20201112	1.287
GF1_WFV2_L1A0005187138	LC08_L1TP_126037_20201112	1.464
GF1_WFV2_L1A0005191763	LC08_L1TP_142035_20201112	2.709
GF1_WFV2_L1A0005191760	LC08_L1TP_142034_20201112	3.059
GF1_WFV2_L1A0005105723	LC08_L1TP_143028_20201002	3.5
GF1_WFV2_L1A0005105715	LC08_L1TP_143027_20201002	3.696
GF1_WFV2_L1A0005105710	LC08_L1TP_143026_20201002	3.721
GF1_WFV3_L1A0004760180	LC08_L1TP_120035_20200424	2.188
GF1_WFV3_L1A0004760179	LC08_L1TP_120034_20200424	2.188
GF1_WFV3_L1A0004760172	LC08_L1TP_120033_20200424	1.852
GF1_WFV3_L1A0004993993	LC08_L1TP_118039_20200816	2.277
GF1_WFV4_L1A0005115567	LC08_L1TP_123023_20201006	1.482
GF1_WFV4_L1A0004833410	LC08_L1TP_116030_20200530	1.684
GF1_WFV4_L1A0004833426	LC08_L1TP_116029_20200530	1.709
GF1_WFV4_L1A0004833422	LC08_L1TP_116028_20200530	1.899

5 产品简介

中国陆地区域 2020 年 GF-1 WFV 地表反射率产品共有 850 景，总计 1.9 TB。数据格式包括 TIF、XML 和 json。产品由地表反射率数据（*_AIRAC_MOD080919_SR.TIF）、表观反射率数据（*_TOA.TIF）、元数据信息（*.XML）、动态查找表（*.json）和区域 DEM、TO、WV、AOD（*.tif）组成。其中

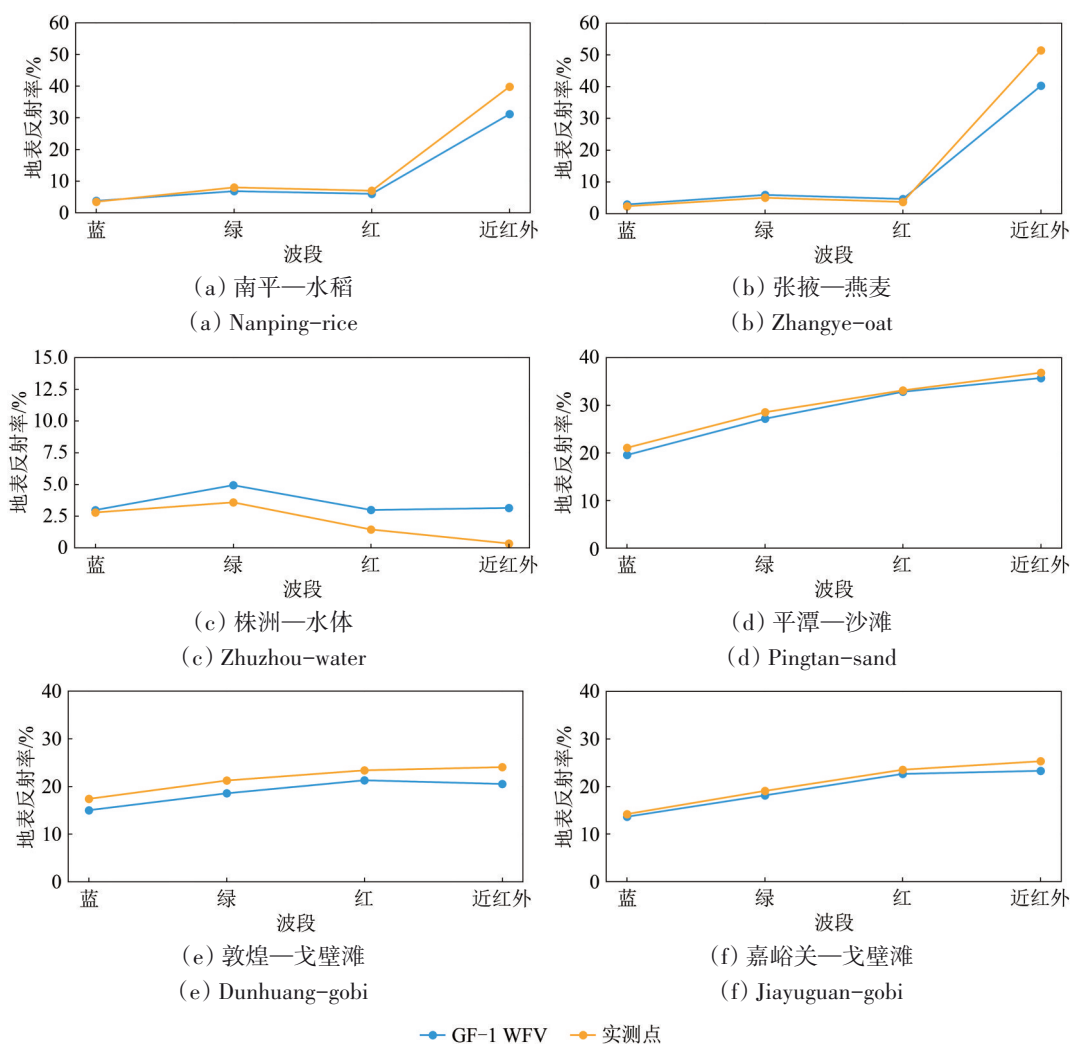


图10 光谱曲线对比

Fig. 10 Comparison of spectral curves

6 结论

GF-1 WFV是目前应用最为广泛的国产卫星数据之一。本文利用多源MODIS AOD融合产品和动态查找表,采用分块多进程的方法设计和实现GF-1 WFV快速大气校正算法,并利用该算法生产和共享中国大陆地区2020年GF-1 WFV地表反射率产品。通过定性分析、Landsat 8 OLI地表反射率产品交叉验证和地面实际测量的地表反射率数据对产品进行精度验证和分析。验证结果表明,本文生产的GF-1 WFV地表反射率产品的质量良好,与Landsat 8 OLI地表反射率产品具有较高的一致性,基于实测地表反射率数据的直接精度验证结果表明各波段的均方根误差(Root Mean Square Error)位于1.21%—6.14%,产品具有较高的精度和可靠性。

参考文献(References)

- Abrams M, Crippen R and Fujisada H. 2020. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). *Remote Sensing*, 12(7): 1156 [DOI: 10.3390/rs12071156]
- Armstrong M. 1984. Problems with universal kriging. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16(1): 101-108 [DOI: 10.1007/BF01036241]
- Bai Z G. 2013. The technology characteristics of GF-1 satellite. *Aerospace China*, (8): 5-9 (白照广. 2013. 高分一号卫星的技术特点. *中国航天*, (8): 5-9)
- Chander G, Mishra N, Helder D L, Aaron D B, Angal A, Choi T, Xiong X X and Doelling D R. 2013. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for cross-calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1267-1281 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2228007]
- Chatterjee A, Michalak A M, Kahn R A, Paradise S R, Braverman A J and Miller C E. 2010. A geostatistical data fusion technique for

- merging remote sensing and ground-based observations of aerosol optical thickness. *Journal of Geophysical Research*, 115(D20): D20207 [DOI: 10.1029/2009JD013765]
- Hsu N C, Tsay S C, King M D and Herman J R. 2006. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3180-3195 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.879540]
- Hu Y, Liu L Y, Liu L L, Peng D L, Jiao Q J and Zhang H. 2014. A Landsat-5 atmospheric correction based on MODIS atmosphere products and 6S model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5): 1609-1615 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2290028]
- Hu Y, Zhong B, Ma Z Z and He M. 2018. GF-1 WFV atmospheric correction based on MODIS atmosphere products and 6S model. *Remote Sensing Information*, 33(5): 35-40 (胡勇, 仲波, 马泽忠, 何敏). 2018. 采用MODIS大气产品的高分一号WFV数据大气校正. *遥感信息*, 33(5): 35-40 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2018.05.006]
- Kaufman Y J and Sendra C. 1988. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 9(8): 1357-1381 [DOI: 10.1080/01431168808954942]
- Kokaly R F, Clark R N, Swayze G A, Livo K E, Hoefen T M, Pearson N C, Wise R A, Benzel W, Lowers H A, Driscoll R L and Klein A J. 2017. USGS Spectral Library Version 7. United States Geological Survey
- Li Z Q, Chen X F, Ma Y, Qie L L, Hou W Z and Qiao Y L. 2018. An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellites. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition)*, 10(1): 6-15 (李正强, 陈兴峰, 马葵, 伽丽丽, 侯伟真, 乔延利). 2018. 光学遥感卫星大气校正研究综述. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 10(1): 6-15 [DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2018.01.002]
- Liang S L, Fang H L, Chen M Z, Shuey C J, Walthall C, Daughtry C, Morisette J, Schaaf C and Strahler A. 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 149-162. [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00092-5]
- Liu J, Wang L M, Yang L B, Teng F, Shao J, Yang F G and Fu C H. 2015. GF-1 satellite image atmospheric correction based on 6S model and its effect. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(19): 159-168 (刘佳, 王利民, 杨玲波, 滕飞, 邵杰, 杨福刚, 富长虹). 2015. 基于6S模型的GF-1卫星影像大气校正及效果. *农业工程学报*, 31(19): 159-168 [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.19.022]
- Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S and Huang D. 2018. MODIS collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5741-5765 [DOI: 10.5194/amt-2018-141]
- Ma L L, Zhao Y G, Woolliams E R, Dai C H, Wang N, Liu Y K, Li L, Wang X H, Gao C X, Li C R and Tang L L. 2020. Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples. *Remote Sensing*, 12(11): 1696 [DOI: 10.3390/rs12111696]
- Main-Knorn M, Pflug B, Louis J, Debaecker V, Müller-Wilm U and Gascon F. 2017. Sen2Cor for Sentinel-2//Proceedings Volume 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII. Warsaw: SPIE [DOI: 10.1117/12.2278218]
- Martins V S, Soares J V, Novo E M L M, Barbosa C C F, Pinto C T, Arcanjo J S and Kaleita A. 2018. Continental-scale surface reflectance product from CBERS-4 MUX data: assessment of atmospheric correction method using coincident Landsat observations. *Remote Sensing of Environment*, 218: 55-68 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.017]
- Peng Y, He G J, Zhang Z M, Long T F, Wang M M and Ling S G. 2016. Study on atmospheric correction approach of Landsat-8 imageries based on 6S model and look-up table. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(4): 045006 [DOI: 10.1117/1.JRS.10.045006]
- Peng Y, He G J, Zhang Z M and Yin R Y. 2020. Landsat surface reflectance products over China. *China Scientific Data*, 5(4): 53-62 (彭燕, 何国金, 张兆明, 尹然宇). 2020. 中国区域Landsat地表反射率产品. *中国科学数据*, 5(4): 53-62 [DOI: 10.11922/csdata.2020.0032.zh]
- Richter R, Schlöpfer D and Müller A. 2006. An automatic atmospheric correction algorithm for visible/NIR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10): 2077-2085 [DOI: 10.1080/01431160500486690]
- Roy D P, Ju J C, Kline K, Scaramuzza P L, Kovalsky V, Hansen M, Loveland T R, Vermote E and Zhang C S. 2010. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+composited mosaics of the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 35-49 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.011]
- Roy D P, Zhang H K, Ju J, Gomez-Dans J L, Lewis P E, Schaaf C B, Sun Q, Li J, Huang H and Kovalsky V. 2016. A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 176: 255-271 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.023]
- Shen Q, Yao Y, Li L W, Long T F, Chen F and Zhang B. 2021. Annual 0.8 m surface reflectance data set of Beijing plain area from 2015 to 2019. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(11): 2303-2312 (申茜, 姚月, 李利伟, 龙腾飞, 陈甫, 张兵). 2021. 北京市平原区2015年—2019年0.8 m地表反射率数据集. *遥感学报*, 25(11): 2303-2312 [DOI: 10.11834/jrs.20210407]
- Vermote E F, El Saleous N Z and Justice C O. 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 97-111 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00089-5]
- Vermote E F and Kotchenova S. 2008. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23): D23S90 [DOI: 10.1029/2007JD009662]
- Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, Herman M and Morcette J J. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 675-686 [DOI: 10.1109/36.581987]
- Vermote E F, Justice C, Claverie M and Franch B. 2016. Preliminary

- analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185(2016): 46-56. [DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.008]
- Wang Z T, Xin J Y, Jia S L, Li Q, Chen L F and Zhao S H. 2015. Retrieval of AOD from GF-1 16 m camera via DDV algorithm. *Journal of Remote Sensing*, 19(3): 530-538 (王中挺, 辛金元, 贾松林, 厉青, 陈良富, 赵少华. 2015. 利用暗目标法从高分一号卫星 16 m 相机数据反演气溶胶光学厚度. *遥感学报*, 19(3): 530-538) [DOI: 10.11834/jrs.20154110]
- Wei J, Li Z Q, Peng Y R and Sun L. 2019. MODIS collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison. *Atmospheric Environment*, 201: 428-440 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.004]
- Zheng W and Zeng Z Y. 2004. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing images. *Remote Sensing Information*, (4): 66-70 (郑伟, 曾志远. 2004. 遥感图像大气校正方法综述. *遥感信息*, (4): 66-70) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2004.04.019]

GF-1 WFV surface reflectance product in China's land area

SHE Wenqing^{1,2}, ZHANG Zhaoming^{1,2,3}, PENG Yan^{1,3}, HE Guojin^{1,2,3},
LONG Tengfei^{1,2,3}, WANG Guizhou^{1,3}

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Hainan Aerospace Information Research Institute, Sanya 572029, China

Abstract: Land surface reflectance, as a key physical parameter describing the basic properties of the land surface, is one of the key parameters for quantitative remote sensing research and applications, such as remote sensing indices computation, leaf area index retrieval, dynamic forest cover monitoring. The main representative land surface reflectance products at home and abroad are MODIS surface reflectance products, Landsat surface reflectance products and Sentinel surface reflectance products. The WFV (Wide Field of View) sensor onboard the Gaofen-1 satellite (GF-1) has high spatial resolution and wide imaging capability. GF-1 WFV data have become an important data source in the fields of resource investigation and ecological environment. At present, GF-1 WFV data have been fully opened to the public, however the GF-1 WFV data are only provided in L1-level product and lack land surface reflectance product. The aim of this paper is to produce GF-1 WFV land surface reflectance product.

This paper proposes a coupled atmospheric correction algorithm that integrates the universal kriging method of MODIS AOD spatial fusion, 6S model, and dynamic look-up table and produced an open-access GF-1 WFV land surface reflectance product of 2020 in China's land area.

In terms of product accuracy validation, first, visual inspection, histogram, and spectral curve changes of typical land cover types before and after atmospheric correction were compared. Second, cross-validation was performed between GF-1 WFV and Landsat-8 OLI land surface reflectance products. Third, ground-based measurements were used for validation. The validation results show the image quality after atmospheric correction is remarkably improved and agrees with the Landsat 8 OLI land surface reflectance product. The root mean square error with the Landsat 8 OLI land surface reflectance products do not exceed 3%, and the R^2 is greater than 0.9. The validation results with the ground-based measurements indicate the mean values of root mean square error are 1.21%, 1.53%, 1.26%, and 6.14% for blue, green, red, and near infrared band, respectively. The validation results show that the GF-1 WFV land surface reflectance retrieval algorithm has good accuracy.

The GF-1 WFV land surface reflectance product produced by this algorithm is reliable, and the algorithm can be used in operational production. In addition, the algorithms and products can provide a stable and reliable data source for subsequent quantitative remote sensing research and application of GF-1 WFV data, and the GF-1 WFV land surface reflectance products can also be synergized with Landsat and Sentinel series land surface reflectance products to form a dense time-series of near-daily, high spatial resolution land surface reflectance products for China's land area.

Key words: remote sensing, GF-1 WFV, surface reflectance, atmospheric correction, 6S model, spatial fusion, dynamic lookup table, China's land area

Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA19090300); Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (2019QZKK030701); Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (620MS075), National Natural Science Foundation of China (No. 62101531)