

高分一号卫星中国植被覆盖度高时空分辨率产品验证与分析

赵静¹, 李静^{1,2}, 穆西晗³, 张召星¹, 董亚冬¹, 吴善龙¹,
仲波¹, 柳钦火^{1,2}

1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 植被覆盖度FVC (Fractional Vegetation Cover) 是衡量地表植被状况的重要指标之一。卫星遥感是获取全球与区域动态FVC的主要技术手段, 但现有FVC产品空间分辨率主要为中等(300 m)及中低分辨率, 难以满足应用需求。已有高分辨率卫星较长的重访周期是制约高分辨率FVC产品难以生产的主要原因。国产高分一号(GF-1)宽幅相机(WFV)具有高时空分辨率特点, 16 m空间分辨率和4天重访周期为高时空分辨率FVC产品生产提供数据支撑。本文对中国2018年—2020年16 m/10天GF-1 FVC产品从直接验证和间接验证两方面进行定量分析与评价, 结果显示: (1) 基于中国甘肃黑河站、吉林净月潭站、河北塞罕坝站等地面实测数据进行直接验证, GF-1 FVC产品精度($R^2=0.57$, $RMSE=0.12$, $BIAS=-0.03$) 优于GEOV3 FVC产品, 能够降低森林类型高估现象; (2) 中国陆地近88%的像元GF-1 FVC产品全年缺失率低于70%, 在生长季内约占82.73%的像元缺失率低于73.68%, 产品能够较好的体现植被季节变化特征。基于国产GF-1卫星的高时空分辨率FVC产品能够满足植被变化监测相关应用的需求。

关键词: 植被覆盖度(FVC), 直接验证, 间接验证, 中国, 高分一号(GF-1)

中图分类号: P2

引用格式: 赵静, 李静, 穆西晗, 张召星, 董亚冬, 吴善龙, 仲波, 柳钦火. 2023. 高分一号卫星中国植被覆盖度高时空分辨率产品验证与分析. 遥感学报, 27(3): 689–699

Zhao J, Li J, Mu X H, Zhang Z X, Dong Y D, Wu S L, Zhong B and Liu Q H. 2023. Validation and analysis the fractional vegetation cover product from GF-1 satellite data in China. National Remote Sensing Bulletin, 27(3): 689–699 [DOI:10.11834/jrs.20231703]

1 引言

植被覆盖度FVC (Fractional Vegetation Cover) 定义为单位面积内绿色植被冠层垂直投影面积所占比例 (Gitelson等, 2002)。FVC是衡量地表植被状况的重要指标之一, 也是区域生态系统环境变化的重要指示, 对水文、生态、区域变化等都具有重要意义 (Bian等, 2017; Jiapaer等, 2011)。遥感是区域与全球尺度FVC估算的主要手段, 目前国际主流FVC产品以300 m—1 km分辨率为主, 主要包括1.2 km/10 d ENVISAT/FVC (Bacour等, 2006)、

1 km/10 d CYCLO-PES/FVC (Baret等, 2007)、1 km/300 m、10 d GEOV/FVC (Baret等 2013; Camacho等, 2013; Fuster等, 2020)、1 km/5 d MuSyQ/FVC (Mu等, 2017) 和500 m/8 d GLASS/FVC (Jia等, 2019) 等。但在区域建模与生态过程模拟分析以及农业林业应用中, 亟需更高分辨率的FVC信息监测植被生长状况 (Yang等, 2017)。

自1972年美国第一颗陆地卫星 (Landsat) 发射后, 在过去的几十年中又发射了多颗中高分辨率卫星, 但到目前为止仍没有形成有效的中高分辨率植被参数反演产品。制约中高分辨率时空连

收稿日期: 2021-11-05; 预印本: 2022-04-08

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项 (编号: 21-Y20B01-9003-19/22, 21-Y20B01-9001-19/22); 中国科学院空天信息创新研究院重点部署项目 (编号: E0Z202010F)

第一作者简介: 赵静, 研究方向为植被参数定量遥感反演。E-mail: zhaojing1@radi.ac.cn

通信作者简介: 李静, 研究方向为植被辐射传输模型、叶面积指数反演等。E-mail: lijing200531@aircas.ac.cn

续FVC产品生产的主要因素除了云雨导致的数据缺失外,还受到卫星较长的重访周期影响,例如Landsat系列的重访周期是16天、SPOT是26天、CBERS是26天、ASTER是16天、Sentinel-2是10天。中国于2013年4月26日发射的“高分一号”(GF-1)卫星,搭载了4台16 m分辨率宽幅相机(WFV),其视场拼接幅宽达到800 km,重访周期4天。高时空分辨率GF-1 WFV数据为区域FVC反演和产品生成提供重要的数据支撑(柳钦火等,2023)。目前,已基于多源协同定量遥感产品生成系统MuSyQ(Multi-source data Synergized Quantitative remote sensing production system)高分系列中国区域的植被指数(NDVI)产品(李松泽等,2022)和叶面积指数(LAI)产品(张虎等,2022),针对森林和非森林类型特点,分别建立基于孔隙率方法和像元二分法的高分FVC反演算法体系,生产了2018年—2020年16 m/10 d FVC产品(赵静等,2022),为高空间分辨率植被遥感监测提供数据支撑。

产品精度是开展产品后续分析与应用的基础。现有全球CYCLOPES、GEOV系列以及GLASS FVC产品,都单独进行了产品的精度分析与评价研究(Weiss等,2007; Camacho等,2013; Fuster等,2020; Jia等,2018)。目前,陆地遥感产品真实性检验包括直接验证和产品间接验证(马培培等,2019)。直接验证是利用地面测量对产品进行检验,国际上已有全球尺度的地面观测项目可用于验证卫星FVC反演产品,如VELARI(Validation of Land European Remote sensing Instruments)项目(<http://w3.avignon.inra.fr/valeri/>[2022-04-20])和ImagineS计划(<http://fp7-imagines.eu/>[2022-04-20])分别提供了2000年—2008年和2013年—2015年的地面实测数据和高空间分辨率参考图像。产品间接验证通过产品之间的对比来评价产品的时空连续性和时空一致性,如BELMANIP-2.1项目(BENchmark Land Multisite ANalysis and Intercomparison of Products)提供了全球420个10 km×10 km均质地面观测站点坐标和植被类型信息,被广泛用于全球尺度产品的间接检验(Baret等,2006)。

本文研究目标是对中国区域GF-1 FVC产品进行精度检验与质量评价,从两个方面进行分析:(1)通过中国区域的地面测量数据对GF-1 FVC和GEOV3 FVC产品直接验证,评价GF-1 FVC和GEOV3 FVC产品精度;(2)通过分析GF-1 FVC

产品在空间和时间的缺失率、以及GF-1 FVC与GEOV3 FVC产品在均质样点的对比分析,评价GF-1 FVC产品的时空连续性以及与GEOV3 FVC产品的时空一致性。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

2.1.1 FVC遥感产品

中国区域2018年—2020年16 m/10天GF-1 FVC产品针对森林和非森林类型分别基于GF-1 LAI和NDVI产品(张虎等,2022; 李松泽等,2022)生产得到(赵静等,2022)。针对森林类型,采用基于孔隙率理论的FVC反演方法(Zhao等,2020),但由于聚集指数(Ω)空间分辨率为500 m,尚缺乏高分辨率产品,因此在实际生产中构建了不同植被类型在不同气候分区的聚集指数先验知识查找表进行FVC反演。针对非森林类型,采用Mu等(2017, 2021)提出的一种非线性像元二分模型反演。

GEOV3 FVC产品是由欧洲哥白尼全球陆地服务中心CGLS(Copernicus Global Land Service)免费发布的全球产品(<https://land.copernicus.eu/global/prod-ucts/FCover>[2022-04-20])。利用PROBA-V传感器数据,基于PROSAIL模型神经网络算法,生产2014年1月至今的300 m/10 d合成FVC产品,同时为提高产品时空连续性采用时间平滑和小区域填补等后处理(Fuster等,2020)。

2.1.2 地面实测数据

地面实测数据集收集了2018年甘肃黑河流域、吉林净月潭站和河北塞罕坝站、2020年重庆北碚和云南普洱地区、2021年内蒙古呼伦贝尔草原区,涵盖农田、森林和草地类型的多时相实测点共569个数据(即100个农作物、81个森林和388个草地数据)。所有站点空间分布如图1(审图号:GS京(2023)0652号)所示,各站点观测数据信息详见表1。甘肃黑河站、河北塞罕坝站、重庆北碚和云南普洱地区的样点利用鱼眼相机观测,观测样方大小10 m×10 m,在正方形样方内采用对角线法均匀步长拍摄若干张照片;吉林净月潭站采用固定点的PhenoCam获取;内蒙古呼伦贝尔草原区采用针刺法在全区域进行样方布设,样方大小为1 m×1 m。本文使用的鱼眼相机和PhenoCam照片均由基于高斯分布算法进行后处理得到FVC实测值(Liu等,2012)。

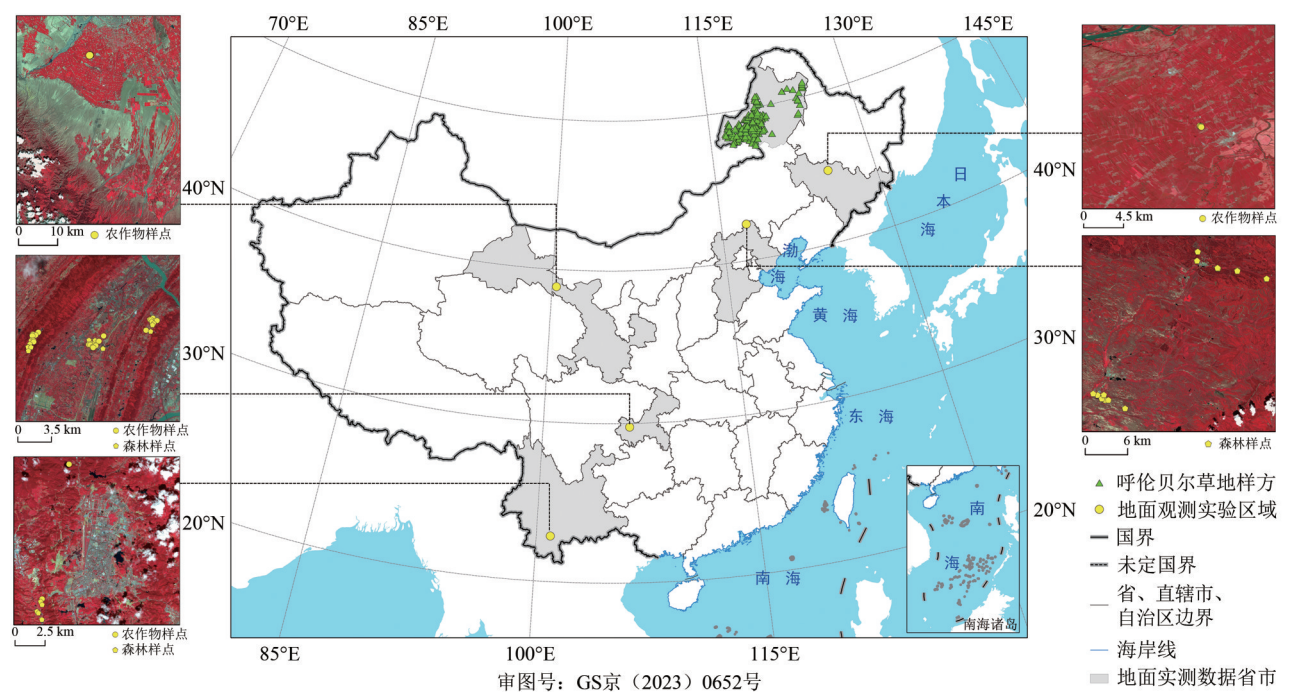


图1 地面实测验证点空间分布
Fig. 1 The spatial distribution of ground measurements

表1 地面观测数据信息表
Table 1 Information of ground measurements

实验站名称	经纬度	作物类型	观测日期
甘肃黑河流域	38°30'20"N—39°35'59"N, 99°24'8"E—100°48'20"E	玉米	2018-05-26—09-26
吉林净月潭站	43°47'24.55"N, 125°26'41.45"E	玉米和大豆	2018-07-16—12-31
河北塞罕坝站	42°24'5.72"N, 117°16'49.84"E	松树和白桦	2018-05—08
重庆北碚	29°44'58"N—29°47'26"N, 106°18'47"E—106°26'52"E	农作物和森林	2020-10—11
云南普洱	22°44'4"N—22°51'24"N, 100°55'43"E—100°56'57"E	农作物和森林	2020-12
呼伦贝尔草原区	47°30'39"N—50°56'35"N, 116°27'40"E—125°23'46"E	草地	2021-07-26—08-25

2.1.3 间接验证站点

BELMANIP-2.1项目和中国生态系统研究网络(CERN)提供了具有代表性的地表植被类型均质站点,常用于全球或区域尺度的间接检验。中国区域内共有24个均质BELMANIP-2.1站点(图2圆点,审图号:GS京(2023)0652号)和11个均质CERN站点(图2五角星),其中森林类型站点12个(图2绿色、蓝色和粉色点)、农作物和草地等其他植被类型站点23个(图2红色和黄色点)。

2.1.4 中国气候分区数据

中国气候分区数据采用1 km空间分辨率Köppen-Geiger(柯本—盖格)气候分类产品(Beck等,2018)(<http://www.gloh2o.org/koppen/>[2022-04-20]),用于产品空间缺失率分析。柯本—盖格气候分类自1936年由柯本提出,依据世界植

被类型划分出5种一级气候带,即赤道气候带(A)、干旱气候带(B)、温暖气候带(C)、冷温气候带(D)和极地气候带(E)。在第一级气候分类基础上,采用气温和降水进行了第二、第三级分类,中国共包括15种主要气候分区(王婷等,2020)(表2)。

2.2 验证分析方法

本文从直接验证和间接验证两方面实现16 m/10天GF-1 FVC产品的精度检验与质量评价(图3)。在利用2019年全年GF-1 FVC和GEOV3 FVC产品进行分析时,需将两个产品的时间分辨率和空间分辨率匹配得到具有可比性的产品,因此将16 m GF-1 FVC产品聚合为空间分辨率300 m结果;同时为了消除时间差异的影响,将GF-1 FVC和GEOV3 FVC产品时间分辨率聚合为月尺度。

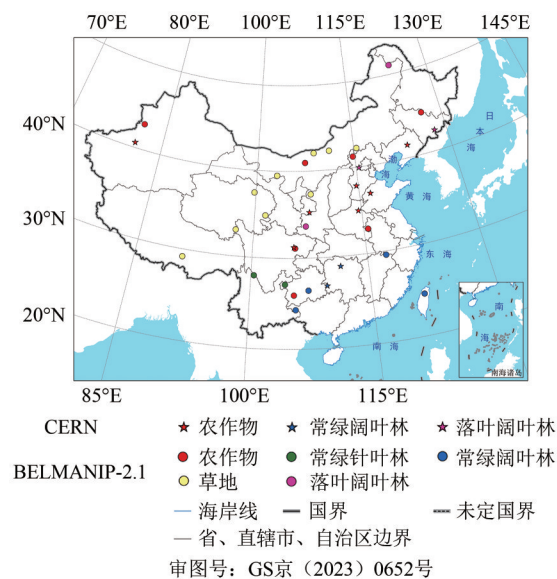


图2 中国区域BELMANIP-2.1和CERN站点空间分布
Fig. 2 The spatial distribution of BELMANIP-2.1 and CERN sites in China

2.2.1 直接验证

在利用2018年—2021年6个野外观测实验区内共569个不同时相地面观测数据对FVC产品进行直接检验前,考虑到FVC产品分辨率为300 m,需要在Google earth engine上基于10 m分辨率Sentinel

数据考察300 m尺度内像元均质性,各个站点较均一,因此多个实测点位于相同像元时则采用多个样点均值作为验证真值。同时为了保证两种产品的结果具有可比性,选择两种产品均为有效值的验证点,经处理后共418个(其中含农作物35个、森林38个和草地345个)不同时相的地面实测数据参与精度评价。

直接验证精度通过决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 以及偏差 (BIAS) 描述,各指标计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (FVC_p(i) - FVC_s(i))^2}{\sum_{i=1}^N (FVC_p(i) - FVC_t(i))^2} \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (FVC_p(i) - FVC_t(i))^2 / N} \tag{2}$$

$$BIAS = FVC_p - FVC_t \tag{3}$$

式中, $FVC_p(i)$ 为FVC产品值, $FVC_t(i)$ 为相对真值, $FVC_s(i)$ 为由FVC产品和相对真值拟合得到的拟合值, N 表示参与检验的像元数目。其中, RMSE及BIAS表征FVC产品相对于验证数据的偏离程度, R^2 表征FVC产品与验证数据变化趋势的一致性状况。

表2 中国气候分区名称对照表
Table 2 The climate types of Köppen-Geiger in China

一级	二级
赤道气候带(A)	热带季风气候(Am)、热带疏林草原气候(Aw)
干旱气候带(B)	冷性沙漠气候(BWk)、冷性草原气候(BSk)
温暖气候带(C)	热夏冬干暖温气候(Cwa)、温夏冬干暖温气候(Cwb)、热夏常湿暖温气候(Cfa)和温夏常湿暖温气候(Cfb)
冷温气候带(D)	热夏冬干冷温气候(Dwa)、温夏冬干冷温气候(Dwb)、冷夏冬干冷温气候(Dwc)、热夏常湿冷温气候(Dfa)、温夏常湿冷温气候(Dfb)和冷夏常湿冷温气候(Dfc)
极地气候带(E)	苔原气候(ET)

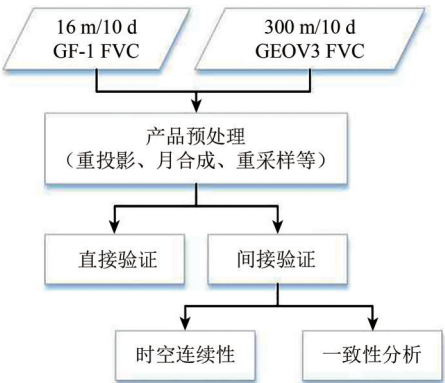


图3 FVC产品验证分析方法
Fig. 3 Methods of validation and analysis for FVC products

2.2.2 间接验证

间接验证通过不同产品在时间和空间上的连续性、以及产品之间的一致性进行对比,衡量待验证产品质量。

(1) 时空连续性。本文通过探讨16 m/10 d GF-1 FVC产品在时空上的分布特征,分析GF-1遥感产品在提高空间分辨率和时间连续性的优势。在空间格局上,利用缺失率描述空间分布特征,缺失率即为全年每个合成周期内的无效反演像元累计占全年的比例;同时统计了不同气候类型区

的缺失率。在时间尺度上，利用生长周期内的缺失率描述产品在时间尺度的连续性，此外还探讨了产品在不同季度缺失率随纬度、植被类型的变化特征。

(2) 一致性分析。本文通过2019年GF-1 FVC和GEOV3 FVC产品相互对比，评价产品之间的一致性及其差异。在空间一致性上，评价在中国区域内的BELMANIP-2.1和CERN共35个均质站点以及401个单时相地面采样点坐标的GF-1 FVC和GEOV3 FVC产品值的差异、以及产品有效值的空

间差异图。在时间一致性上，针对BELMANIP-2.1站点典型植被类型，分析评价GF-1 FVC和GEOV3 FVC产品的时间序列曲线特征。

3 结果与讨论

3.1 时空连续性

图4（审图号：GS京（2023）0652号）为2019年1月、4月、7月、10月中国区域16 m空间分辨率GF-1 FVC产品空间分布，本章后续分析FVC产品在空间和时间的分布特征。

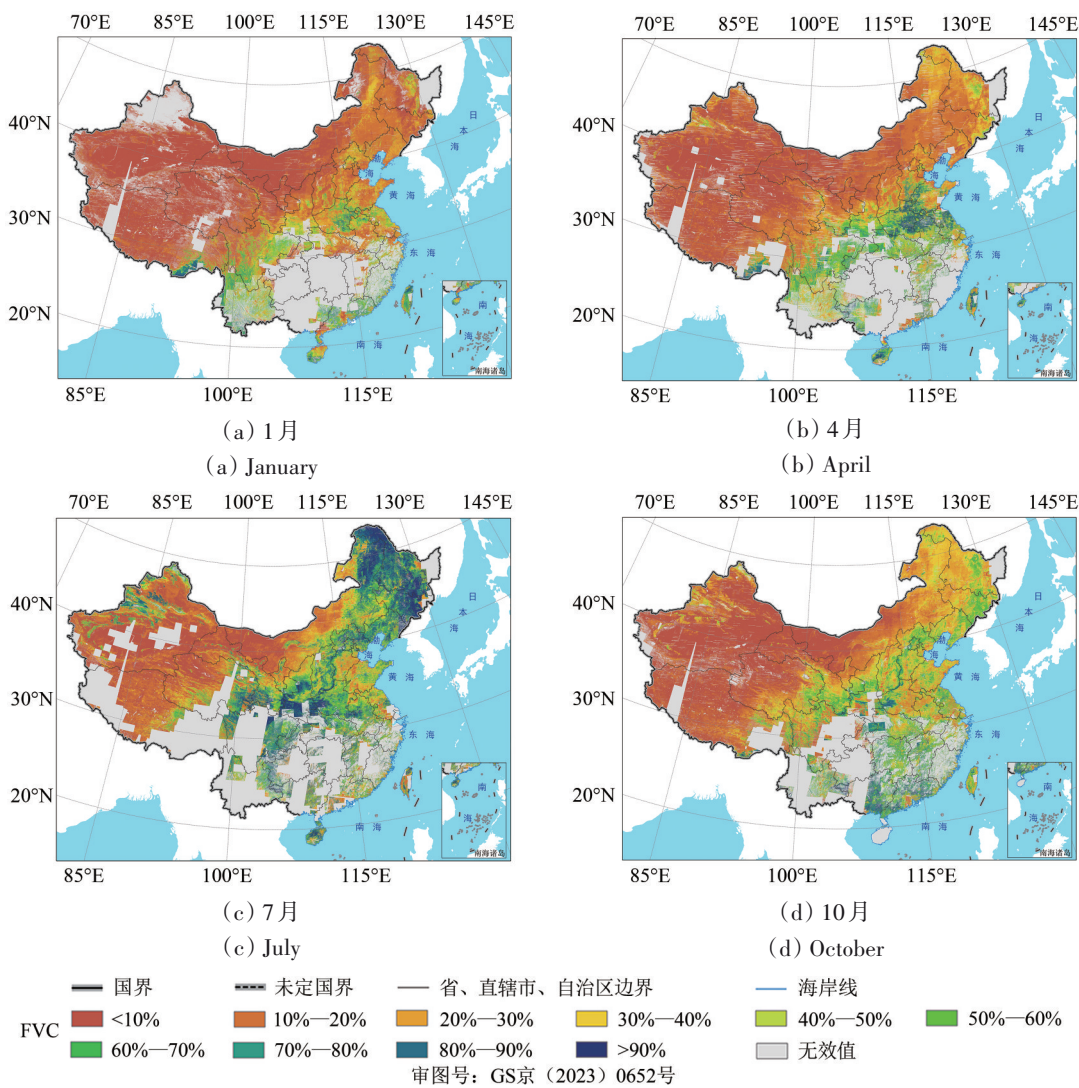


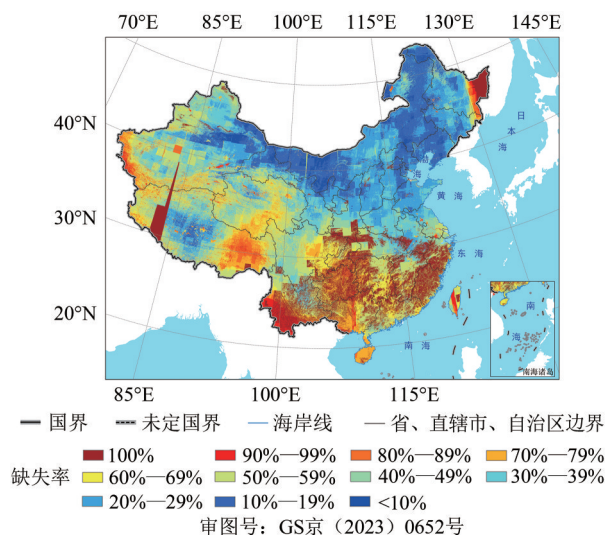
图4 2019年FVC产品空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of GF-1 FVC products in 2019

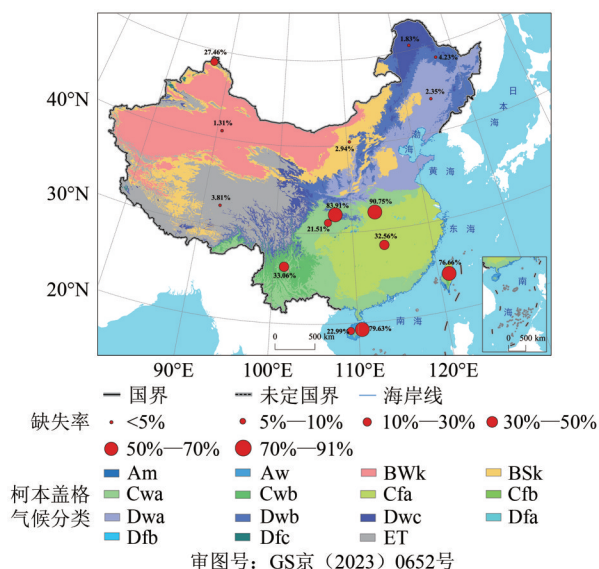
3.1.1 空间缺失率

图5（审图号：GS京（2023）0652号）为2019年中国16 m/10 d GF-1 FVC产品的年缺失率空间分布。中国东北、西北地区和青藏高原中部无云晴天比例最高，全年缺失率低于20%，占中

国陆地面积的35%；中国西部地区缺失率介于30%—70%，占中国陆地面积的52.99%；中国南方大部分区域缺失率超过80%，受云覆盖和降雨影响较大，占中国陆地面积的12.01%。



考虑到不同气候分区的气候特点差异,进一步定量分析中国柯本-盖格不同气候类型的GF-1 FVC产品平均缺失率分布(图6,审图号:GS京(2023)0652号)。结果显示:中国自北向南不同气候类型的缺失率逐渐升高,其中位于北部和西部的BWk、BSk、Dwa、Dwb、Dwc和ET气候类型平均缺失率低于5%;而位于南部的Am、Cfb、Dfa和Dfb气候类型平均缺失率高于75%;其他气候类型如Aw、Cwa、Cwb、Cfa和Dfc的平均缺失率介于20%—35%。



3.1.2 时间缺失率

基于中国区域GF-1 FVC产品在植被生长期内(即4—9月,共含19个合成周期)的时间缺失频率统计结果(图7):在植被生长期内缺失小于3个合成周期的占13.64%;生长季内缺失低于6个合成周期的占36.66%;全国约82.73%的像元生长季内缺失率低于73.68%。

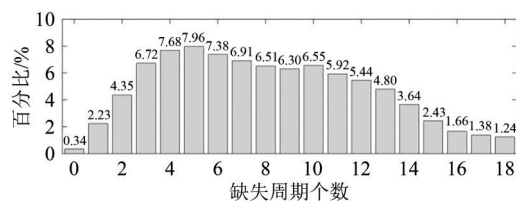


图8为2019年中国GF-1 FVC产品在4个季度的缺失率随纬度变化曲线,从当年1月份开始每3个月为一个季度。GF-1 FVC产品在40.3°N—53.4°N的中高纬度地区缺失率相对较低,显著低于低纬度地区,在每个合成周期内能够获取无云过境数据,GF-1 FVC产品的缺失率较低,普遍低于40%。在18.2°N—30°N低纬度地区的缺失值百分比最高,普遍高于70%,主要受到云雨影响导致无云过境数据较少。不同季节的GF-1 FVC产品缺失率随纬度变化曲线存在一定差异,中纬度(22°N—43°N)缺失率的季节变化不显著;中高纬度(43°N—53°N)缺失率在第1季度和第4季度与第2季度和第3季度的差异较显著;低纬度(18°N—22°N)缺失率在第1季度低于其他季度。缺失率与所处气候带气候特征显著相关。

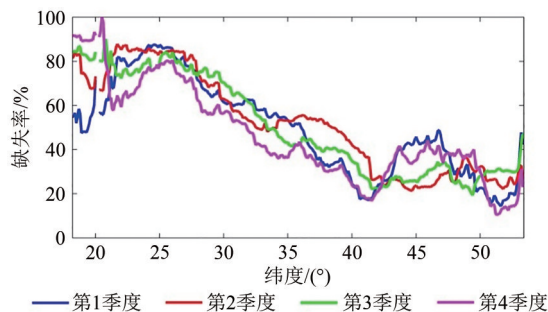


图9为不同植被类型包括农作物、阔叶林、针叶林、混交林、灌木和草地等类型4个季度的平均缺失率。受反演算法和输入参数影响，基于NDVI产品的像元二分法反演的农作物和草地类型在4个季度平均缺失率较低(<10.6%)，而基于LAI产品的孔隙率理论反演的森林类型如混交林4个季度平均缺失率最高(>33%)，阔叶林、针叶林和灌木4个季度平均缺失率介于20%—32%。除农作物和草地外，其他植被类型在第三季度的平均缺失率高于其他季度。

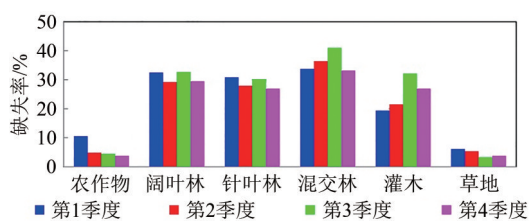


图9 2019年不同植被类型GF-1 FVC产品缺失率

Fig. 9 Percentage of missing values over China as a function of latitude in the year of 2019 for GF-1 FVC product with different vegetation types

3.2 一致性分析

考虑到本文针对森林和非森林两种类型采用不同算法，因此在后续分析对比中将森林和非森林进行区分。提取中国区域内 BELMANIP-2.1、CERN 和地面测量均质样点在2019年1月至12月 GF-1 FVC 聚合成300 m产品和 GEOV3 FVC 产品每

月的有效像元值，图10为森林和非森林类型两种 FVC 产品之间的散点密度图。对于森林类型，两产品相差较大 ($R^2=0.33$, $RMSE=0.24$, $BIAS=-0.06$)，少数一致，多数两者互有高低，除神经网络算法和孔隙率反演法的两产品算法差异外，也存在一定尺度转化差异影响。对于农作物、草地等非森林类型，两产品一致性较好 ($R^2=0.78$, $RMSE=0.14$, $BIAS=-0.05$)，说明在均质站点的像元二分法结果与 GEOV3 FVC 神经网络算法结果相近。已有研究也指出 GEOV 系列 FVC 算法产品存在一定的系统高估 (Mu 等, 2015; Zhao 等, 2020)，本文间接对比分析结果也显示 GF-1 FVC 产品与 GEOV3 FVC 相比系统偏低尤其是森林类型，一定程度上说明本产品对已有产品的高估有一定的修正。

图11 (审图号: GS京(2023)0652号) 为 GF-1 FVC 和 GEOV3 FVC 产品2019年7月的空间差异图及有效 FVC 值频率直方图。为了保证数据具有可比性，选择两个产品都为有效值的像元参与对比，结果显示: GEOV3 FVC 产品在主要森林分布区的高值比 GF-1 FVC 产品高 (图11 (a) 红色)，同样的图11 (b) 频率直方图也表明 GEOV3 FVC 产品在高值区比例超过 GF-1 FVC 产品; 而对于 FVC 低值区，GF-1 FVC 产品值则略高于 GEOV3 FVC 产品 (图11 (a) 蓝绿色)，图像与图11 (b) 频率直方图规律一致。

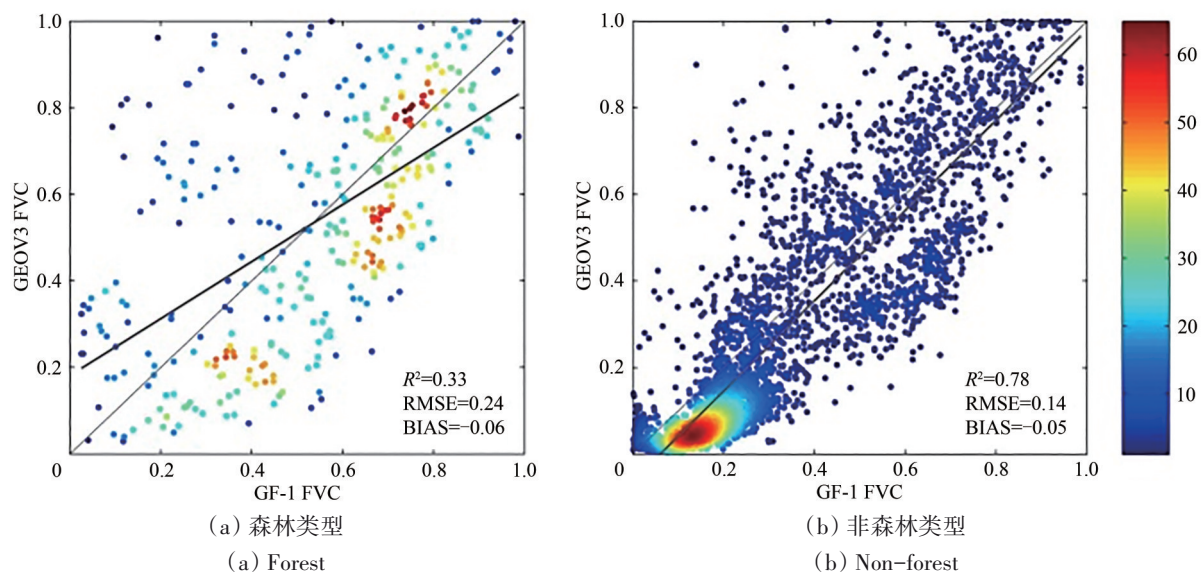


图10 基于2019年中国 BELMANIP2.1、CERN 和实测站点 FVC 产品之间的散点密度图

Fig. 10 The density scatter plots among FVC products over BELMANIP2.1, CERN and ground measurements sites in China in the year of 2019

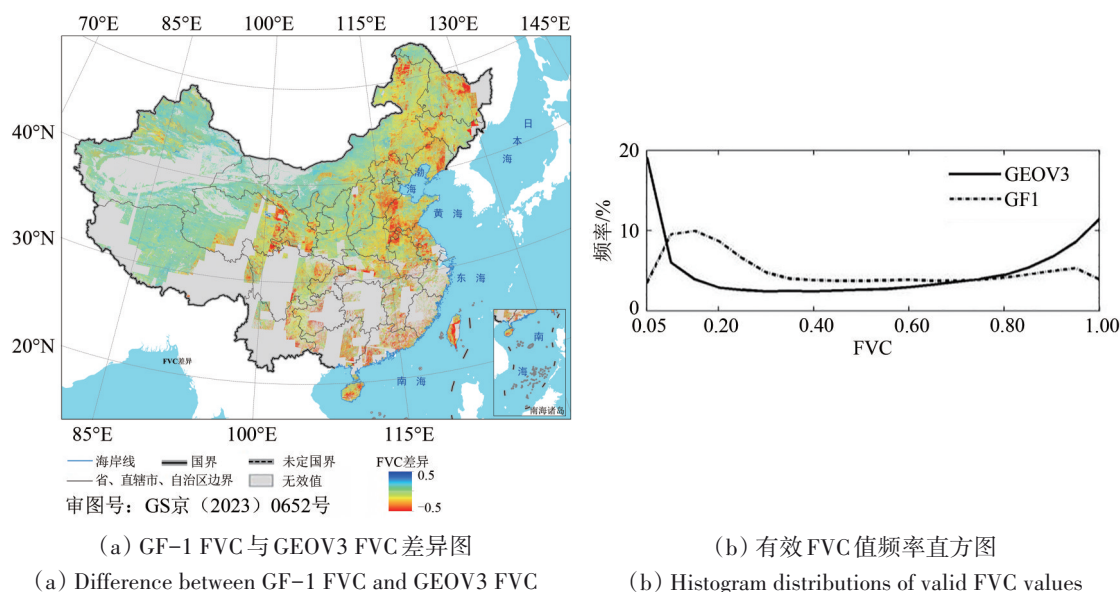


图 11 2019 年 7 月 GF-1 和 GEOV3 中国区域有效 FVC 空间差异及频率直方图

Fig. 11 Histogram distributions of GF-1 and GEOV3 valid FVC values in July, 2019 in China

在时间一致性方面, 针对 BELMANIP-2.1 站点 3 类典型植被类型 (如落叶阔叶林、农作物和草地), GF-1 FVC 和 GEOV3 FVC 产品都能很好的体现植被季节变化 (图 12)。GEOV3 FVC 时间序列曲线相对比较完整, 而 GF-1 FVC 在生长峰值期存在部分缺失 (图 12 (a))。整体而言, GF-1 FVC

产品在 3 种典型植被类型的生长初期和生长末期反演值高于 GEOV3 FVC 产品, 考虑到相对于 300 m 像元 GEOV3 植被综合信息, GF-1 FVC 从高分辨率结果聚合而成, 区域内子像元对植被生长响应敏感, 使得植被生长初期监测早于 GEOV3 FVC 产品 (图 12 (b))。

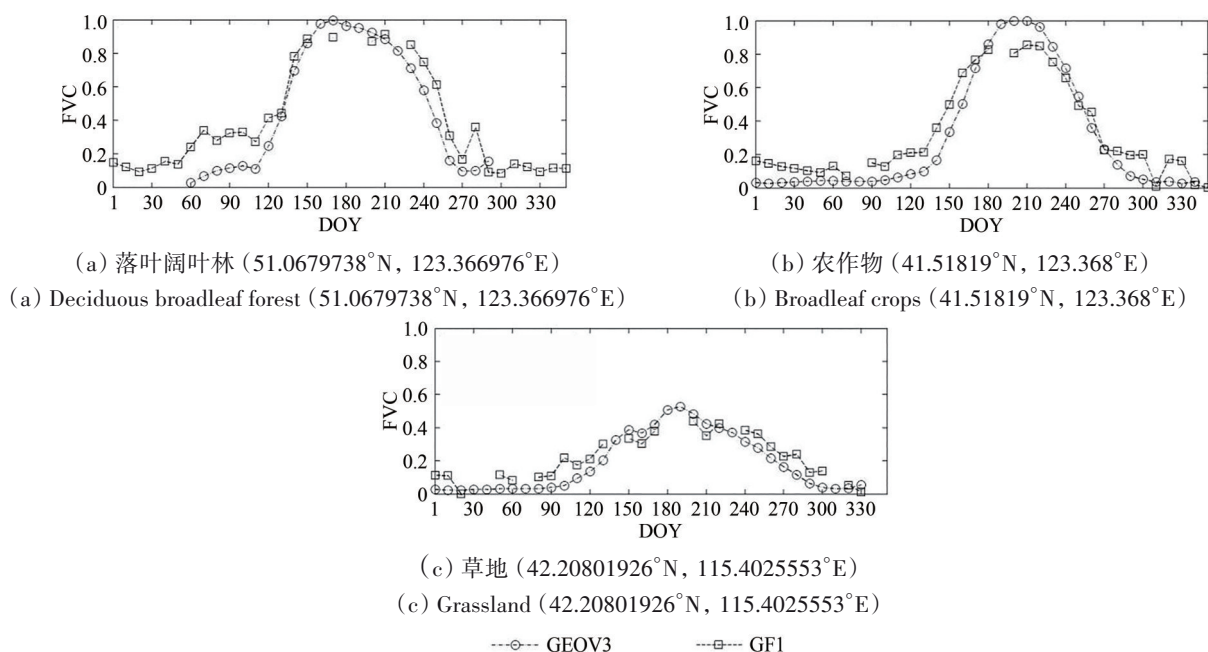


图 12 BELMANIP2.1 站点典型植被类型 FVC 产品时间序列曲线

Fig. 12 Temporal profiles of FVC products for typical vegetation types over BELMANIP2.1 sites

3.3 直接验证

图 13 为聚合到 300 m 分辨率的 GF-1 FVC 结果和 GEOV3 产品与地面实测数据的散点图, 表 3 为

两种产品在森林和非森林 (含农作物和草地) 类型的精度评价统计表。与 FVC 地面实测数据直接验证结果表明: 研究区 GF-1 FVC 产品精度 ($R^2=$

0.57, RMSE=0.12, BIAS=-0.03) 优于 GEOV3 FVC 产品 ($R^2=0.15$, RMSE=0.25, BIAS=-0.18)。针对森林类型, GF-1 FVC 产品算法考虑了植被空间聚集效应, 与地面实测数据具有较好的一致性; 而 GEOV3 FVC 产品值受一维辐射传输模型神经网络算法影响, 与地面实测数据值相比存在高估。针对非森林类型, 农作物类型的 GF-1 FVC 产品与

GEOV3 FVC 产品精度相当, 但部分点存在高估; 草地类型的 GF-1 FVC 产品精度显著优于 GEOV3 FVC 产品, GEOV3 FVC 产品受算法和分辨率限制, 存在普遍低估现象 (图 13 (b)), 而 GF-1 FVC 产品由 16 m 尺度聚合得到, 能够保留像元内部细节信息, 与地面实测数据更接近。

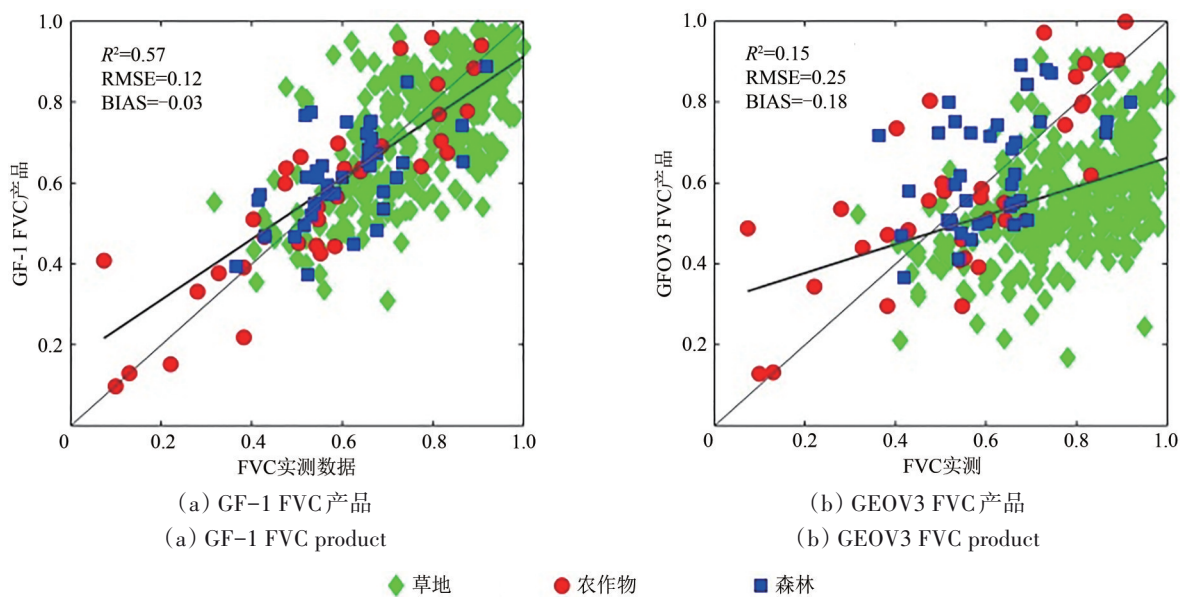


图 13 300 m 空间分辨率 FVC 产品与地面实测数据散点图
Fig. 13 The scatter plots between FVC products of GF-1 and GEOV3 with 300 m spatial resolution and ground measurements

表 3 FVC 产品与地面观测数据精度评价表
Table 3 Statistics of accuracy between FVC products and ground measurements

指标		N	R ²	RMSE	BIAS
GF-1 FVC	整体	418	0.57	0.12	-0.02
	农作物	35	0.77	0.11	0.01
	森林	38	0.33	0.11	0.01
	草地	345	0.46	0.12	-0.03
GEOV3 FVC	整体	418	0.18	0.24	-0.18
	农作物	35	0.58	0.16	0.02
	森林	38	0.22	0.14	0.02
	草地	345	0.22	0.26	-0.22

注: N 实测个数; RMSE 均方根误差; BIAS 偏差。

4 结 论

本文首先从产品的时间和空间缺失率评价了中国 16 m/10 天 GF-1 FVC 产品的时空连续性, 其次与 GEOV3 FVC 产品进行了一致性定量分析与评价, 最后基于典型植被类型的地面实测数据对产品进行直接验证。结果表明: (1) 全年内高纬

度气候类型的产品时空连续性优于低纬度气候类型, 且与植被类型密切相关, 森林类型平均缺失率 (>20%) 高于农作物、草地等非森林类型 (<10.6%); (2) GF-1 FVC 产品森林类型反演算法引入 CI 参数能够考虑植被结构和空间分布特征, 与地面实测的一致性 (RMSE=0.11) 优于 GEOV3 FVC 产品 (RMSE=0.14), 两个产品在非森林类型尤其是草地类型差异显著, GF-1 FVC 产品精度最优 (RMSE≤0.12)。GF-1 FVC 产品在 16 m 尺度上具有 10 天时间分辨率, 能够有效捕捉典型植被类型的关键物候信息, 但是受到卫星数据源有效观测频次限制, 仅利用 GF-1 数据生产的 FVC 产品的缺失率仍低于现有中低分辨率产品如 GEOV、GLASS 等, 尤其是在夏季云雨天气较多的地区。未来考虑融合多传感器数据如国产 GF-6、国外 Sentinel-2 等卫星数据, 提高单个合成周期内的有效观测信息; 同时研究符合植被生长规律的时间序列重建方法, 构建时空连续的全国 16 m/10 天 FVC 产品。

志 谢 此次云南普洱和重庆北碚野外实验数据来自高分辨率对地观测系统重大专项北碚和普洱高分真实性检验星机地综合实验, 内蒙古呼伦贝尔草地野外实验数据来自中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 甘肃黑河野外实验数据来自中国科学院西北生态环境资源研究院耿丽英老师, 吉林净月潭野外实验数据来自中国科学院空天信息创新研究院阚建光研究员, 塞罕坝野外实验数据来自遥感科学国家重点实验室空天院与北师大共建野外试验站, 对以上共享的数据在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Bacour C, Baret F, Béal D, Weiss M and Pavageau K. 2006. Neural network estimation of *LAI*, *fAPAR*, *fCover* and $LAI \times C_{ab}$ from top of canopy MERIS reflectance data: principles and validation. *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 313-325 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.014]
- Baret F, Morisette J T, Fernandes R A, Champeaux J L, Myneni R B, Chen J, Plummer S, Weiss M, Bacour C, Garrigues S and Nickerson J E. 2006. Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: proposition of the CEOS-BELMANIP. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1794-1803 [DOI: 10.1109/tgrs.2006.876030]
- Baret F, Hagolle O, Geiger B, Bicheron P, Miras B, Huc M, Berthelot B, Niño F, Weiss M, Samain O, Roujean J L and Leroy M. 2007. *LAI*, *fAPAR* and *fCover* CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1: principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 110(3): 275-286 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.02.018]
- Baret F, Weiss M, Lacaze R, Camacho F, Makhmara H, Pacholczyk P and Smets B. 2013. GEOV1: *LAI* and *FAPAR* essential climate variables and *FCOVER* global time series capitalizing over existing products. Part1: principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 137: 299-309 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.027]
- Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, Vergopolan N, Berg A and Wood E F. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5: 180214 [DOI: 10.1038/sdata.2018.214]
- Bian J H, Li A N, Zhang Z J, Zhao W, Lei G B, Yin G F, Jin H A, Tan J B and Huang C Q. 2017. Monitoring fractional green vegetation cover dynamics over a seasonally inundated alpine wetland using dense time series HJ-1A/B constellation images and an adaptive endmember selection LSMM model. *Remote Sensing of Environment*, 197: 98-114 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.031]
- Camacho F, Cernicharo J, Lacaze R, Baret F and Weiss M. 2013. GEOV1: *LAI*, *FAPAR* essential climate variables and *FCOVER* global time series capitalizing over existing products. Part 2: validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment*, 137: 310-329 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.030]
- Fuster B, Sánchez-Zapero J, Camacho F, García-Santos V, Verger A, Lacaze R, Weiss M, Baret F and Smets B. 2020. Quality assessment of PROBA-V *LAI*, *fAPAR* and *fCOVER* collection 300 m products of copernicus global land service. *Remote Sensing*, 12(6): 1017 [DOI: 10.3390/rs12061017]
- Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R and Rundquist D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 76-87 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9]
- Jia K, Liang S L, Wei X Q, Yao Y J, Yang L Q, Zhang X T and Liu D Y. 2018. Validation of Global Land Surface Satellite (GLASS) fractional vegetation cover product from MODIS data in an agricultural region. *Remote Sensing Letters*, 9(9): 847-856 [DOI: 10.1080/2150704x.2018.1484958]
- Jia K, Yang L Q, Liang S L, Xiao Z Q, Zhao X, Yao Y J, Zhang X T, Jiang B and Liu D Y. 2019. Long-term global land surface satellite (GLASS) fractional vegetation cover product derived from MODIS and AVHRR Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(2): 508-518 [DOI: 10.1109/jstars.2018.2854293]
- Jiapaer G, Chen X and Bao A M. 2011. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12): 1698-1710 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.07.004]
- Li S Z, Li J, Yu W T, Zhang Z X, Wu S L, Zhong B and Liu Q H. 2022. A dataset of 16 m/10-day normalized difference vegetation index of MuSyQ GF-series (2018—2020, China, version 01). *China Scientific Data*, 7(1): 231-240 (李松泽, 李静, 于文涛, 张召星, 吴善龙, 仲波, 柳钦火. 2022. MuSyQ 高分 16 米空间分辨率 10 天合成的 NDVI 植被指数产品(2018 年—2020 年中国 01 版). *中国科学数据*, 7(1): 231-240) [DOI: 10.11922/csdata.2021.0030.zh]
- Liu Y K, Mu X H, Wang H X and Yan G J. 2012. A novel method for extracting green fractional vegetation cover from digital images. *Journal of Vegetation Science*, 23(3): 406-418 [DOI: 10.1111/j.1654-1103.2011.01373.x]
- Ma P P, Li J, Liu Q H, He B B and Zhao J. 2019. Multisensor synergistic quantitative leaf area index product of China. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1232-1252 (马培培, 李静, 柳钦火, 何彬彬, 赵静. 2019. 中国区域 MuSyQ 叶面积指数产品验证与分析. *遥感学报*, 23(6): 1232-1252) [DOI: 10.11834/jrs.20198071]
- Mu X H, Huang S, Ren H Z, Yan G J, Song W J and Ruan G Y. 2015. Validating GEOV1 fractional vegetation cover derived from coarse-resolution remote sensing images over croplands. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(2): 439-446 [DOI: 10.1109/jstars.2014.2342257]
- Mu X H, Liu Q H, Ruan G Y, Zhao J, Zhong B, Wu S L and Peng J J. 2017. A 1 km/5 day fractional vegetation cover dataset over China-ASEAN (2013). *Journal of Global Change Data and Discovery*, 1(1): 45-51 (穆西哈, 柳钦火, 阮改燕, 赵静, 仲波, 吴善龙, 彭菁菁. 2017. 中国—东盟 1 km 分辨率植被覆盖度数据集. *全球变化数据学报*, 1(1): 45-51) [DOI: 10.3974/geodp.2017.01.07]
- Mu X H, Zhao T, Ruan G Y, Song J L, Wang J D, Yan G J, McVicar T R, Yan K, Gao Z, Liu Y K and Wang Y Y. 2021. High spatial resolution and high temporal frequency (30-m/15-day) fractional vegetation cover estimation over China using multiple remote sensing

- datasets: method development and validation. *Journal of Meteorological Research*, 35(1): 128-147 [DOI: 10.1007/s13351-021-0017-2]
- Wang T, Zhou D W, Shen X J, Fan G H and Zhang H. 2020. Koppen's climate classification map for China. *Journal of the Meteorological Sciences*, 40(6): 752-760 (王婷, 周道玮, 神祥金, 范高华, 张慧. 2020. 中国柯本气候分类. *气象科学*, 40(6): 752-760) [DOI: 10.3969/2019jms.0040]
- Weiss M, Baret F, Garrigues S and Lacaze R. 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 110(3): 317-331 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.001]
- Yang L Q, Jia K, Liang S L, Wei X Q, Yao Y J and Zhang X T. 2017. A robust algorithm for estimating surface fractional vegetation cover from landsat data. *Remote Sensing*, 9(8): 857 [DOI: 10.3390/rs9080857]
- Zhang H, Li J, Zhang Z X, Wu S L, Zhong B and Liu Q H. 2022. A dataset of 16m/10-day leaf area indices of MuSyQ GF-series (2018—2020, China, Version 01). *China Scientific Data*, 7(1): 211-220 (张虎, 李静, 张召星, 吴善龙, 仲波, 柳钦火. 2022. MuSyQ 高分16米分辨率10天合成的叶面积指数产品(2018—2020年中国01版). *中国科学数据*, 7(1): 211-220) [DOI: 10.11922/csdata.2021.0029.zh]
- Zhao J, Li J, Liu Q H, Xu B D, Yu W T, Lin S R and Hu Z. 2020. Estimating fractional vegetation cover from leaf area index and clumping index based on the gap probability theory. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90: 102112 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102112]
- Zhao J, Li J, Zhang Z X, Wu S L, Zhong B and Liu Q H. 2022. A dataset of 16 m/10-day fractional vegetation cover of MuSyQ GF-series (2018—2020, China, Version 01). *China Scientific Data*, 7(1): 221-230 (赵静, 李静, 张召星, 吴善龙, 仲波, 柳钦火. 2022. MuSyQ 高分16米空间分辨率10天合成的植被覆盖度产品(2018—2020年中国01版). *中国科学数据*, 7(1): 221-230) [DOI: 10.11922/11-6035.csd.2021.0037.zh]

Validation and analysis the fractional vegetation cover product from GF-1 satellite data in China

ZHAO Jing¹, LI Jing^{1,2}, MU Xihan³, ZHANG Zhaoxing¹, DONG Yadong¹, WU Shanlong¹,
ZHONG Bo¹, LIU Qinhuo^{1,2}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

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

3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Fractional Vegetation Cover (FVC) is a critical parameter for monitoring vegetation growth status. Remote sensing effectively generates FVC at a large scale. However, the spatial resolution of the existing FVC products at the global scale is more than 300 m. The major limitation of the FVC produced from high-spatial-resolution satellite images is the lack of effective observations, mainly due to a small range of view and long periods of revisit time for satellite images with 30 m or higher spatial resolutions. The Chinese GaoFen No. 1 satellite (GF-1) wide-field view data with 16 m spatial resolution and 4-day revisit time provide an available data resource for FVC extraction. The objective of this study is to assess the quality of the 16 m/10-day FVC product based on GF-1 images from 2018 to 2020.

The assessment of the GF-1 FVC product was accomplished through direct validation with ground measurements and indirect validation with the GEOV3 FVC product. Two FVC products were postprocessed with the same temporal (month) and spatial (300 m) resolution to compare GF-1 FVC with 16 m/10-day and GEOV3 FVC with 300 m/10-day. A total of 32 ground measurements (including 18 ground measurements for crops and 14 ground measurements for forest) throughout the growing season at the middle reach of Heihe River Basin, the Jingyuetan station, and the Saihanba plantation forestry farm were used to validate the FVC product in China. The indirect validation was evaluated by the spatial and temporal continuity with missing values and the product consistency with GEOV3 FVC.

The percentage of the annual missing value lower than 70% accounted for 88% of the main land in China. During the growing season, the percentage of the annual missing value lower than 73.68% approached 82.73%. According to different inversion algorithms and input products, the percentage of the average missing value of forest types (>20%) was higher than that of nonforest types, such as crops and grassland (<10.6%). The GF-1 FVC agreed well with GEOV3 FVC for the nonforest type based on the homogeneous samples in China from January to December 2019. The direct validation results indicated that the accuracy for the FVC product achieved by the GF-1 FVC product is reasonable compared with the ground measurements ($R^2 = 0.57$, root mean square error = 0.12, BIAS = -0.03) in China. Moreover, it is better than the accuracy achieved by the GEOV3 FVC product, particularly for forest type.

In conclusion, the GF-1 FVC product of China with 16 m/10-day resolution reflects the seasonal characteristics of vegetation well. Moreover, the GF-1 FVC product with high spatial and temporal resolutions meets the requirements of vegetation monitor at the regional scale.

Key words: Fractional Vegetation Cover (FVC), direct validation, indirect validation, China, GF-1

Supported by China High-resolution Earth Observation System (No. 21-Y20B02-9003-19/22, 21-Y20B01-9001-19/22); The Key Project Supported by Aerospace Information Research Institute of Chinese Academy of Sciences (No. E0Z202010F)