www.csdata.org

ISSN 2096-2223
CN 11-6035/N

文献 DOI：
10.11922/csdata.2021.0029.zh
数据 DOI：
10.11922/sciencedb.j00001.00252
文献分类：地球科学

收稿日期：2021-05-24
开放同评：2021-07-14
录用日期：2021-12-01
发表日期：2022-03-30

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）

张虎[1,2]，李静[1,2*]，张召星[1]，吴善龙[1]，仲波[1]，柳钦火[1,2]

1. 中国科学院空天信息研究院 遥感科学国家重点实验室，北京 100101
2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100190

摘要：叶面积指数（leaf area index，LAI）是研究植被生态系统结构和功能的核心参数之一，遥感是获取大范围动态 LAI 的一个主要技术手段。但目前国际上没有高分辨率的 LAI 标准化产品，本研究利用高分一号（GF-1）宽幅相机高时空分辨率的特点，基于三维随机辐射传输模型生产了 MuSyQ（Multi-source data Synergized Quantitative remote sensing production system）高分系列中国地区 2018–2020 年 16 米/10 天分辨率的标准化 LAI 产品 01 版。本产品可为中国地区植被变化分析、农林业示范应用、生态环境监测提供可靠的数据支撑。

关键词：叶面积指数产品；高分辨率；中国区域；高分一号

数据库（集）基本信息简介

数据库（集）名称	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）
数据作者	张虎，李静，张召星，吴善龙，仲波，柳钦火
数据通信作者	李静（lijing01@radi.ac.cn）
数据时间范围	2018－2020年
地理区域	中国区域
空间分辨率	16 m
时间分辨率	10天
数据量	1.55 TB
数据格式	*.h5
数据服务系统网址	http://www.doi.org/10.11922/sciencedb.j00001.00252
基金项目	国家重点研发计划(2018YFA0605503)；高分重大专项（21-Y20B02-9003-19/22）。
数据库（集）组成	每个*.h5文件包括2个数据集，其中：(1) LAI 是叶面积指数产品数据；(2) LAI_QC是叶面积指数质量控制数据。

引 言

叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）是研究植被生态系统结构和功能的核心参数之一。LAI 控制着植被的许多生物、物理过程，如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等，同时为植被冠层表面最初的能量交换提供定量化的信息。在生

* 论文通信作者
李静：lijing01@radi.ac.cn

态过程、大气生态系统的交互作用以及全球变化等研究中，LAI 是过程模型的基础输入参数。目前，遥感是获取长时序动态 LAI 的主要技术手段，是生产 LAI 产品的重要数据源。在过去的二十年中，基于不同的卫星传感器，生产了多套不同时空分辨率的全球 LAI 产品，主要包括 MODIS、CYCLOPES、GLOBCARBON、AVHRR、MISR、POLDER、GLASS 等[1-5]，其时空分辨率及产品覆盖时间范围见表 1。

表 1　LAI 全球产品的主要特征

Table 1　Basic information of some global LAI products

LAI 产品名称	空间分辨率	时间分辨率	时间覆盖范围
AVHRR LAI	0.25°	30 天	07/1981 – 05/2001
CCRS	1 km	10 天	1998 至今
CYCLOPES	1 km	10 天	1997 – 2007
ECOCLIMAP	1/120°	1 个月	
GEOV2	1 km	10 天	1999 至今
GLASS	1 km	8 天	2000 至今
GLOBACARBON	1 km	30 天	1998 – 2006
MERIS	300 m	10 天	2003 – 2011
MISR	1.1 km	1 天	2000 至今
MODIS	500 m	4 天	2000 至今
PROBA-V	300 m	10 天	2014 至今
VIIRS	500 m	8 天	2012 至今

如表 1 所示，现有的 LAI 产品空间分辨率主要分布在 250 m–1 km，目前应用最广泛的 LAI 时序产品仍是以 MODIS 系列为代表的中低分辨率产品。在将生态系统过程建模应用到区域甚至更局部尺度时，特别是在一些地形复杂、地表类型分布多样、异质性像元广泛分布的区域，需要更高空间分辨率的 LAI 分布信息[6-8]。尽管在过去的几十年中，不同国家成功发射了多颗中高分辨率卫星，目前依然缺少高分辨率的 LAI 产品。其原因在于中高分辨率的传感器虽在空间分辨能力上占据优势，但在重访周期较长，例如 Landsat 系列卫星只具有 16 天的时间分辨率，在植被生长期难以满足 LAI 的精细化监测需求，时空分辨率相互制约限制了高时空分辨率 LAI 产品的生产工作。

“高分一号”（GF-1）是国家高分辨率对地观测系统重大专项天基系统中的首发星，于 2013 年 4 月 26 日成功发射。GF1 搭载了 4 台 16 m 分辨率多光谱相机（简称宽幅相机），通过其视场拼接幅宽可达到 800 km，全球重访周期小于 4 天，在单颗卫星上可同时实现高分辨率和大幅宽成像[9]，是获取高分辨率 LAI 时序动态变化的理想数据源。基于 GF1 宽幅相机影像获得的 LAI 产品可为农业林业应用、生态环境监测等相关领域的研究提供更稳定准确的数据支撑，具有重要的意义。本研究利用 GF1 高时空分辨率的优势，使用三维随机辐射传输模型生产了 MuSyQ 高分系列中国区域 2018–-2020 年 16 米/10 天分辨率的 LAI 产品 01 版。

1 数据采集和处理方法

1.1 数据来源

本研究使用的是 GF1 宽幅相机反射率数据产品（36.112.11.166:8083/SCYFWPT/#），该套数据经过了辐射定标、大气纠正、几何纠正、云掩膜等预处理，其处理流程详见[10]。宽幅相机反射率数据产品包含 4 个波段（B1：450–520 nm；B2：520–590 nm；B3：630–690 nm；B4：770–890 nm），本研究使用其 B3（红波段）、B4（近红外波段）波段通过物理模型构造查找表来进行 LAI 产品生产，该反射率产品空间范围覆盖中国全境，空间分辨率为 16 m，时间范围从 2018–2020 年，时间分辨率为 4 天。

1.2 数据处理

本研究使用三维随机辐射传输（3D-SRT）模型和查找表算法进行高分一号宽幅相机叶面积指数产品的生产。3D-SRT 模型能够很好地描述植被冠层的三维结构[11]，基于物理模型的反演算法普适性好、物理机理明确，更适用于全球、长时间序列 LAI 产品的生产，用于生产了多套叶面积指数 LAI 产品，例如 MODIS LAI 产品、VIIRS LAI 产品[12-14]。三维随机辐射传输模型模拟地表反射率的核心是光谱不变理论[11,15-16]。该理论本质是把地表二向性反射因子（BRF）进行重新参数化：

$$\mathrm{BRF}_{\lambda}(\Omega_O,\Omega)=\rho_{\Omega}\frac{i_0}{1-p_A}\cdot\frac{\omega_{\lambda}\cdot(1-p_A)}{1-\omega_{\lambda}\cdot p_A} \quad (1)$$

其中，ω_{λ}是单次散射反照率（single scattering albedo, SSA）是唯一和波长有关的物理量，在叶片尺度上等于其反射率+透过率；Ω_O和Ω是太阳和观测立体角，i_0是冠层截获光子的比率，ρ_{Ω}是光子在和冠层碰撞后从Ω方向上逸出冠层的概率；p_A是再碰撞概率，表征了光子在一次和冠层或叶片交互出射后再次被冠层或叶片组分截获的概率。现有算法中通过不同的土地类型、叶面积指数 LAI、太阳-观测几何关系、单次散射反照率使用 3D-SRT 模型构造了查找表。

但现有算法在用于高分辨率 GF1 宽幅相机时，会出现较大误差，其原因是像元内部非均质特征差异会导致高、低分辨率传感器反射率差异较大，用于低分辨率传感器的现有模型用在高分辨率影像时反演成功率和精度都较低。

高分辨率反演成功率和精度降低是由于高分辨率像元的均质特征较好，在夏季植被的近红外波段反射率通常显著高于低分辨率反射率，红波段反射率低于低分辨率反射率。如果仍采用低分辨率传感器反演时的参数，会在夏季导致大量失效的问题。本研究针对夏季高分辨率传感器红、近红外波段反射率的特征，调整了 3D-SRT 模型中各种植被类型对应的两波段单次散射反照率ω_{red}、ω_{NIR}，及由传感器和模型误差带来的不确定性σ_{red}、σ_{NIR}，并优化了模型以提高反演成功率和准确性（表 2）。

表 2　不同时期 LAI 反演关键参数设置

Table 2　Key parameters for LAI inversion in different seasons

	非夏季时期				夏季时期			
植被类型	ω_{red}	ω_{NIR}	σ_{red}	σ_{NIR}	ω_{red}	ω_{NIR}	σ_{red}	σ_{NIR}
草地	0.15	0.69	0.26	0.08	0.21	0.76	0.40	0.21
作物	0.10	0.84	0.33	0.31	0.28	0.86	0.40	0.16
常绿阔叶林	0.05	0.66	0.10	0.30	0.06	0.61	0.40	0.24
落叶阔叶林	0.11	0.75	0.20	0.20	0.20	0.57	0.55	0.55
针叶林	0.08	0.60	0.25	0.30	0.03	0.54	0.57	0.37

MuSyQ 高分 16 米/10 天叶面积指数产品的生产流程图 1 所示：1）针对 7 种不同的植被类型[17]（草地、灌木、作物、常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林），使用 3D-SRT 模型构造查找表；2）使用 GF1 反射率产品，基于调整参数后的 3D-SRT 模型进行单天 LAI 反演；3）将反演的单天 LAI 进行 10 天内最大值合成；4）添加产品质量描述符。

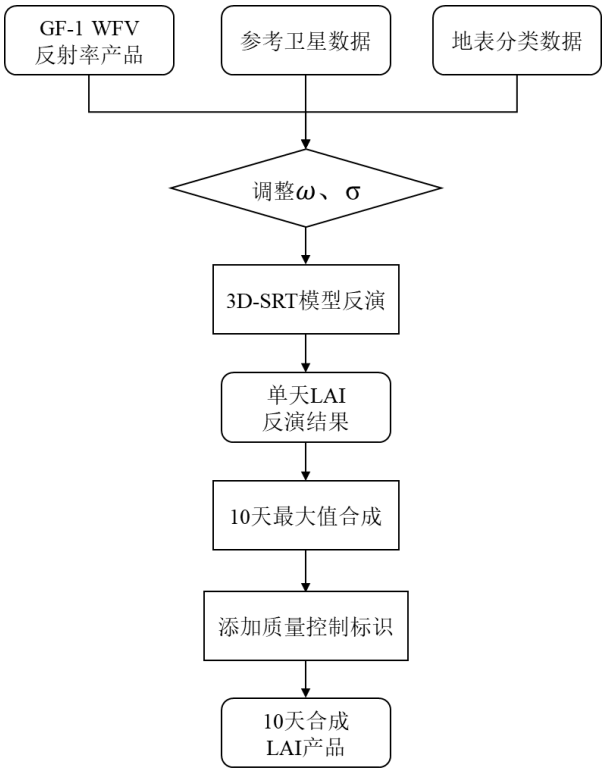


图 1　MuSyQ 高分 16 米/10 天分辨率 LAI 产品生产流程图

Figure 1　Diagram of generating MuSyQ 16 m/10-day LAI product

2　数据样本描述

2.1　数据信息及结构描述

MuSyQ 高分 16 米/10 天分辨率叶面积指数产品存储格式为 h5，参考美国军用网格参考系统（US-Military Grid Reference System, US-MGRS）进行分幅，每个文件大小平均为 15-20 MB，包含叶面积指数信息（LAI）和质量控制信息（LAI_QC）两个数据集，其基本信息和数据结构描述详见表 3。

表 3　MuSyQ 高分 16 米/10 天叶面积指数产品信息及结构描述

Table 3　Description of MuSyQ 16m/10-day LAI product

数据集	LAI	LAI_QC
数据类型	Int16	Int16
像元数量	6863×6863	6863×6863
转换系数	0.001	1
填充值	-1000	-1
地理坐标系	WGS1984	WGS1984
投影方式	UTM	UTM

2.2 数据样本

使用 1.2 章节的数据处理方法，得到了 2018–2020 年中国地区 16 米/10 天分辨率的叶面积指数产品。图 2 展示了全国 2020 年 8 月高分一号 16 m 分辨率 LAI 产品及不同植被类型的 LAI 产品细节特征。

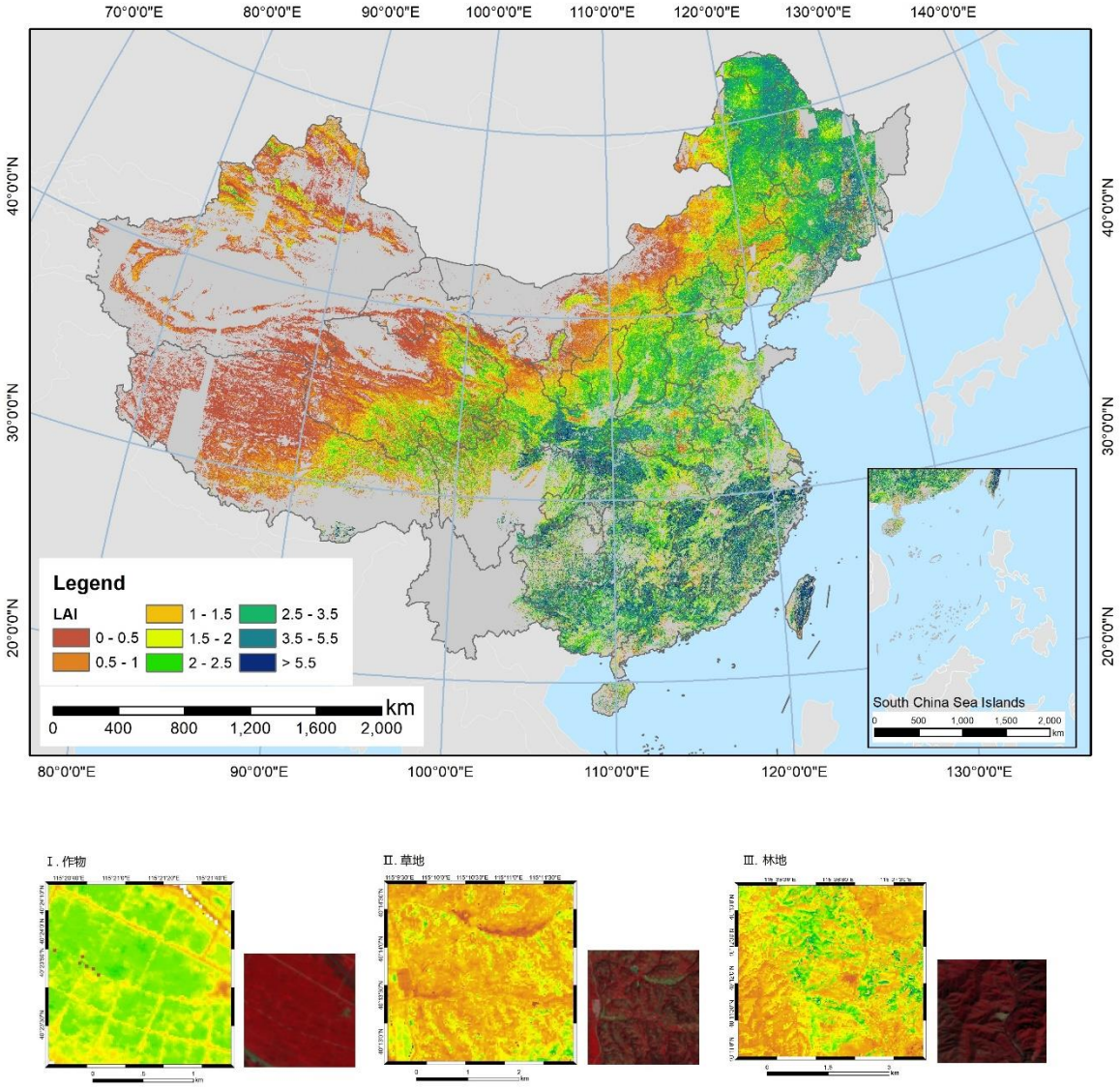


图 2　2020 年 8 月 LAI 产品示意图（审图号：GS(2022)804 号）

Figrure 2　LAI product in August 2020

图 3 为不同植被类型的 LAI 产品时间序列图。不同植被类型的时间序列曲线都呈现出先升后降的趋势，作物、草地及落叶阔叶林的 LAI 值在春季从 0 迅速增长到最大值；在夏季稳定在最大值附近，波动较小；在秋季（年积日 230–250 日）LAI 显著下降，时间序列曲线符合我国不同种类植被的物候特征。

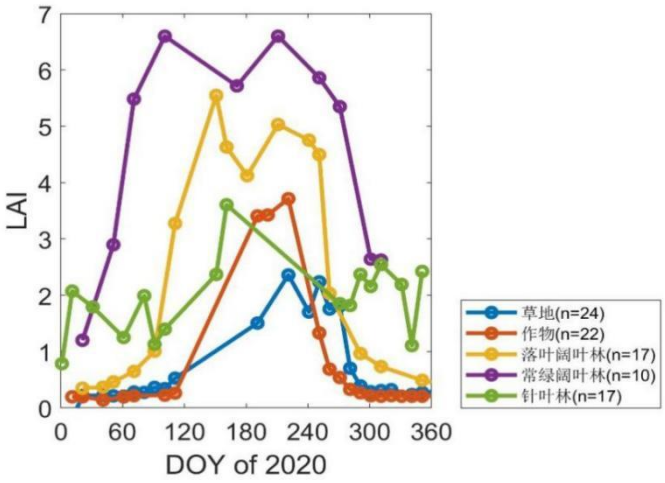


图 3　2020 年不同植被类型 LAI 产品时间序列图（n 为一年中各类型样本的有效反演数）

Figrure 3　Temporal profiles of LAI for different vegetation types in 2020 (n represents the number of valid inversions)

3　数据质量控制和评估

生产过程中确定了 MuSyQ 高分 LAI 产品生产的流程，规范了生成产品的数据格式、数据结构、命名规则等，使数据产品生产标准化。在质量控制方面对 LAI 产品进行了逐像元的数据质量控制标识，每个像元对应一个质量控制描述符，并储存在了 LAI_QC 数据集中：本产品中的质量控制值包括 0、1、4、-1 等四种，其中 0 表示该像元成功使用 3D-SRT 模型完成反演；1 表示使用 3D-SRT 模型反演，但模型模拟的反射率在此时存在饱和现象，LAI 反演精度受限；4 表示使用时间序列重建算法重建得到 LAI；-1 表示填充值，表示非植被区域或反演失效区域。用户可根据个性化需求筛选数据。

本研究使用 2018 年 6–8 月我国新疆石河子地区地面实测 LAI 值对高分一号 16 m 分辨率 LAI 产品进行直接检验（图 4）。植被类型包括玉米、小麦、辣椒、葡萄、棉花等多种作物类型，以及胡杨、怪柳等森林类型。结果表明，与试验区内不同植被类型的 293 组实测 LAI 相比，该产品的均方根误差 RMSE 为 0.743，决定系数 R^2 为 0.877，精度较高，可满足大面积农业林业遥感监测的需要。

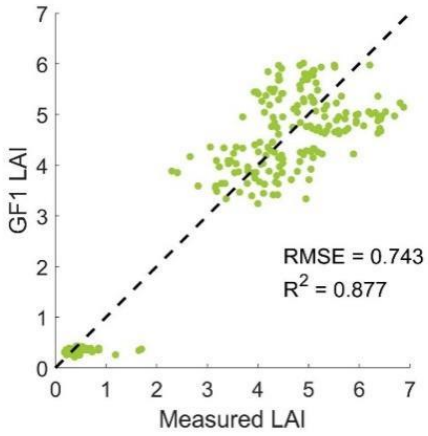


图 4　MuSyQ 高分 LAI 产品直接检验结果图

Figure 4　Validation of MuSyQ 16m/10-day LAI product

4 数据价值

叶面积指数 LAI 是植被遥感监测中最重要的参数之一，目前国际上只有中低分辨率的 LAI 标准化产品，难以满足日益精细化的应用需求。本产品利用国产卫星 GF1 宽幅相机的时空分辨率优势，生产出高分辨率（16 米/10 天）的 LAI 产品。在生产过程中优化了三维随机辐射传输模型，和使用传统三维随机辐射传输模型生产的 MODIS LAI 产品相比，提高了夏季 LAI 反演成功率，算法验证中，夏季高 LAI 条件下研究区反演成功率能从 27%提高至 72%。本产品可覆盖中国全境，能够为植被变化研究、农业林业应用、生态环境监测、政府部门决策提供准确有效的数据支撑。

5 数据使用方法和建议

MuSyQ 高分系列中国区域 16 米/10 天叶面积指数产品存储格式为 h5 格式，能够在 ENVI 等相关软件中进行读取、编辑及分析工作，也可使用 MATLAB、Python 等编程语言进行更加便捷地读取、处理和分析。其中 MATLAB 的读取格式如下：

```
filepath='D:\';   %h5 文件存储路径（如：D 盘根目录）
filename='MuSyQ.LAI.16m.2020001000000.43SFA.001.h5';   %h5 文件名
info = h5info([filepath '\' filename]);
h5disp([filepath '\' filename],'/LAI')
LAI_img=h5read([filepath '\' filename],'/LAI/LAI');   %LAI 文件读取
LAI_QC_img=h5read([filepath '\' filename],'/LAI/LAI_QC'); %LAI 质量控制文件读取
```

数据作者分工职责

张虎，男，河南省开封市人，博士研究生，研究方向为定量遥感。主要承担工作：MuSyQ 高分叶面积指数产品算法及验证研究、论文撰写。

李静，女，黑龙江省齐齐哈尔市人，博士，研究方向为植被遥感。主要承担工作：研究思路及方案设计、论文撰写指导。

张召星，男，新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州人，硕士，研究方向为定量遥感。主要承担工作：数据预处理、产品算法实现、发布产品。

吴善龙，男，浙江省义乌市人，硕士，研究方向为大气气溶胶光学厚度遥感反演。主要承担工作：数据处理、产品生产。

仲波，男，四川省雅安市人，硕士，研究方向为遥感大数据处理与分析、多源遥感数据归一化处理技术。主要承担工作：数据处理、产品生产。

柳钦火，男，江西省九江市人，博士，研究方向为定量遥感。主要承担工作：项目推广、研究方案设计。

参考文献

[1] BARET F, HAGOLLE O, GEIGER B, et al. LAI, fAPAR and fCover *CYCLOPES* global products derived from VEGETATION: part 1: principles of the algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(3): 275–

286. DOI:10.1016/j.rse.2007.02.018.
[2] DENG F, CHEN J M, PLUMMER S, et al. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2219–2229. DOI:10.1109/TGRS.2006.872100.
[3] GANGULY S, SAMANTA A, SCHULL M A, et al. Generating vegetation leaf area index Earth system data record from multiple sensors. Part 2: Implementation, analysis and validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4318–4332. DOI:10.1016/j.rse.2008.07.013.
[4] KNYAZIKHIN Y, GLASSY J, PRIVETTE J L, et al. MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document [M]. 1999, Available online: https://eospso.gsfc.nasa.gov/atbd-category/47 (accessed on March 28, 2022).
[5] XIAO Z Q, LIANG S L, WANG J D, et al. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 209–223. DOI:10.1109/TGRS.2013.2237780.
[6] BONAN G B. Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 43(3): 303–314. DOI:10.1016/0034-4257(93)90072-6.
[7] PIERCE L L, RUNNING S W. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer[J]. Ecology, 1988, 69(6): 1762–1767. DOI:10.2307/1941154.
[8] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京：科学出版社, 2003. [ZHAO Y S. Principles and Methods of Analysis of Remote Sensing Applications [M]. Beijing: Science Press 2003].
[9] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. 中国航天, 2013(8): 5–9. [BAI Z G. Technical properties of Gaofen-1 satellite [J]. Aerospace China, 2013(8): 5 – 9.]
[10] ZHONG B, YANG A X, LIU Q H, et al. Analysis ready data of the Chinese GaoFen satellite data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1709. DOI:10.3390/rs13091709.
[11] HUANG D, KNYAZIKHIN Y, DICKINSON R E, et al. Canopy spectral invariants for remote sensing and model applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(1): 106–122. DOI:10.1016/j.rse.2006.08.001.
[12] KNYAZIKHIN Y, MARTONCHIK J V, MYNENI R B, et al. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D24): 32257–32275. DOI:10.1029/98JD02462.
[13] YAN K, PARK T, CHEN C, et al. Generating global products of LAI and FPAR from SNPP-VIIRS data: theoretical background and implementation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2119–2137. DOI:10.1109/TGRS.2017.2775247.
[14] GANGULY S, NEMANI R R, ZHANG G, et al. Generating global Leaf Area Index from Landsat: algorithm formulation and demonstration[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 122: 185–202. DOI:10.1016/j.rse.2011.10.032.
[15] HUANG D, KNYAZIKHIN Y, WANG W L, et al. Stochastic transport theory for investigating the three-dimensional canopy structure from space measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1): 35–50. DOI:10.1016/j.rse.2006.05.026.
[16] KNYAZIKHIN Y, SCHULL M A, STENBERG P, et al. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(3): E185–E192. DOI:10.1073/pnas.1210196109.
[17] ZHANG X, LIU L Y, WU C S, et al. Development of a global 30 m impervious surface map using multisource and multitemporal remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(3): 1625–1648. DOI:10.5194/essd-12-1625-2020.

论文引用格式

张虎, 李静, 张召星, 等. 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）[J/OL]. 中国科学数据, 2022, 7(1). (2022-03-24). DOI: 10.11922/csdata.2021.0029.zh.

数据引用格式

张虎, 李静, 张召星, 等. 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）[DS/OL]. Science Data Bank, 2021. (2021-07-14). DOI: 10.11922/sciencedb.j00001.00252.

A dataset of 16m/10-day leaf area indices of MuSyQ GF-series (2018–2020, China, Version 01)

ZHANG Hu[1,2*], LI Jing[1,2*], ZHANG Zhaoxing[1], WU Shanlong[1], ZHONG Bo[1], LIU Qinhuo[1,2]

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

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P.R. China

*Email: lijing01@radi.ac.cn

Abstract: Leaf area index (LAI) is a critical variable to study the structure and function of the vegetation ecosystem. However, there is no standardized high-resolution LAI product worldwide. Taking advantage of the high spatial and temporal resolution of Gaofen1, we compiled this dataset by using the three-dimensional radiative transfer model. This product can provide reliable data for the analysis of vegetation change, the application of agriculture and forestry, and ecological environment monitoring in China.

Keywords: leaf area index (LAI) product; high resolution; China; Gaofen-1

Dataset Profile

Title	A dataset of 16m/10-day leaf area indices of MuSyQ GF-series (2018–2020, China, Version 01)
Data corresponding author	LI Jing (lijing01@radi.ac.cn)
Data authors	ZHANG Hu, LI Jing, ZHANG Zhaoxing, WU Shanlong, ZHONG Bo, LIU Qinhuo
Time range	2018–2020
Geographical scope	China
Spatial resolution	16 m
Time resolution	10 days
Data volume	1.55 TB

Data format	*.h5
Data service system	<http://www.doi.org/10.11922/sciencedb.j00001.00252>
Sources of funding	National Key Research and Development Program (2018YFA0605503); GF Project (21-Y20B02-9003-19/22).
Dataset composition	This dataset consists of 2 subsets in total. Subset 1 is made up of the leaf area index image, and Subset 2 is made up of the quality control information of each pixel.