

MODIS 全球叶面积指数产品再处理数据集 (2001–2021)

刘 丽¹, 张英慧^{2*}, 胡忠文², 高 星³, 王敬哲⁴, 郭国锋²

1. 广东工贸职业技术学院, 广州 510510;

2. 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 深圳 518060;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

4. 深圳职业技术大学人工智能学院, 深圳 518055

摘 要: 全球叶面积指数 (LAI) 产品是全球气候变化、碳循环和可持续发展研究的重要基础数据。本研究在 MODIS 叶面积指数产品的基础上, 筛选主算法反演结果, 采用最大光合有效辐射吸收系数 (FAPAR) 合成法, 设计了顾及植被类型的时空滤波方法, 生产了具有更高数据质量和时空连续性的长时间序列全球叶面积指数产品。数据产品较好地揭示了全球叶面积指数的分布格局, 阐明了气候变化下 2001–2021 年全球叶面积指数的时空变化特征。基于全球叶面积指数验证网络 280 个验证点数据对重建结果进行验证, 结果表明再处理数据集具有较高的精度, 线性拟合决定系数 (R^2) 为 0.748, 偏差为 0.12, 均方根误差为 0.907。数据集空间分辨率为 0.05° , 时间分辨率为 8 天, 存储格式为.tif, 由 1,239 个文件组成, 数据量为 29.9 GB。

关键词: MODIS; 叶面积指数; 全球变化; 时空滤波

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.03.02>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.03.02>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2023.10.03.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.10.03.V1>.

1 前言

叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 表征了植被叶片的疏密程度, 并最早被定义为单位地表面上单面叶片总面积^[1]。但是, 对于非扁平叶面的植被, 例如针叶植被, 该定义并不适用。Chen 和 Black 提出将叶面积指数定义为单位地表面上绿叶表面积总和的一半^[2]。对遥感来说, 实际观测到的是单位面积上绿色植物地上部分全部表面积的一半, 一般称为植被面积指数 (Plant Area Index, PAI), 但是业界依然习惯上称之为 LAI^[3]。叶面积指数量

收稿日期: 2023-06-08; 修订日期: 2023-08-20; 出版日期: 2023-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (42201347); 中国博士后基金 (2022M712163); 广东省粤深联合青年基金 (2021A151511091); 中国科学院 (XDA23090503); 深圳市基础研究重点项目 (JCYJ20220818101617037)

*通讯作者: 张英慧 GYR-3820-2022, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, zyhui@szu.edu.cn

数据引用方式: [1]刘丽, 张英慧, 胡忠文等. MODIS 全球叶面积指数产品再处理数据集(2001–2021)[J]. 全球变化数据学报, 2023, 7(3): 242–251. <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.03.02>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.03.02>.

[2]刘丽, 张英慧, 胡忠文等. MODIS 全球叶面积指数产品再处理数据集(2001–2021) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodb.2023.10.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.10.03.V1>.

化了生态系统中的叶面积,是光合作用、呼吸作用和降水拦截等过程中的一个关键变量^[1–3]。作为全球植被的一个基本属性, LAI 已被全球气候变化研究界列为一个重要的气候变量^[4]。目前利用卫星遥感数据已经生产了多套全球数据产品, 包括 GLASS^[5]、GEOV2^[6]和 MODIS-LAI^[7]等。基于叶面积指数产品揭示了气候变化背景下全球植被的时空变化状况^[8], 并进一步生产了全球陆地生态系统生产力产品^[9], 支撑全球碳循环研究和可持续发展目标评估。MODIS-LAI 产品作为一个标杆产品, 是全球变化研究应用最广泛的数据产品之一。但地面验证表明 MODIS-LAI 产品存在明显的不确定性, 产品存在明显的异常波动^[10, 11], 因此针对 MODIS-LAI 产品的优化一直是科学界关注的问题。Yuan 和 Wang 等人分别提出了 MODIS-LAI 产品优化算法^[12, 13]。但目前算法依赖于先验的滤波算法, 先验知识往往受区域及植被类型影响会导致过分优化或者欠拟合引起不正确的植被变化, 对物候提取等产生不利影响。光合有效辐射吸收系数(fraction of absorbed photo-synthetically active radiation, FAPAR)是 MODIS-LAI 算法的伴生变量^[14], 研究显示最大 FAPAR 对应的叶面积指数反演结果具有较高的精度^[15], 这为进一步优化 MODIS 叶面积指数提供了新的可能。因此, 利用 MODIS 一天内两次 LAI/FAPAR 反演结果, 采用最大 FAPAR 合成方法, 并进一步顾及植被类型开展时空滤波, 可能是继续提高 MODIS-LAI 数据质量和空间完整性的有效手段。本数据集利用两套 MODIS-LAI 产品, 采用最大 FAPAR 合成法进行产品融合, 利用植被类型实现时空滤波, 最终得到了 2001–2021 年全球 0.05°空间分辨率和 8 天时间分辨率的叶面积指数产品数据集。

2 数据集元数据简介

《MODIS 全球叶面积指数产品再处理数据集(2001–2021)》^[16]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

3 数据研发方法

3.1 数据来源

本数据的生产依赖于 MODIS LAI 两套数据产品 MOD15A2H 和 MYD15A2H 以及土地覆盖产品 (MCD12Q1) 数据。MODIS LAI 产品空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 天。反演算法分为主算法和备用算法。主算法是基于三维辐射传输模型构建的查找表来反演 LAI, 该模型的输入包括经过大气校正的 MODIS 反射率和土地覆盖数据, 有效的土地覆盖类型包括 8 种, 作为先验信息来约束植被的光学和结构参数构建不同的查找表: (1) 草类 / 谷类作物, (2) 灌木, (3) 阔叶作物, (4) 稀树草原, (5) 常绿阔叶林, (6) 落叶阔叶林, (7) 常绿针叶林, (8) 落叶针叶林。备用算法利用特定地类的 LAI 和 NDVI 之间的经验关系反演 LAI, 当主算法失败的时候采用备用算法。如果备用算法反演失败, 算法根据地表类型分配一个无效的填充值。MODIS LAI 产品还提供了质量控制信息 (QC), 用以说明 LAI 的反演质量, 包括 LAI 反演时使用的算法类型以及是否受云或雪污染。根据质量控制信息被标记为云、雪、阴影、卷云等像元将视为无效像元。

3.2 算法原理

(1) 直接反演最优结果选取

1) 主算法结果选取: MODIS 提供了两套产品 MOD15A2H 及 MYD15A2H, 产品的质

表 1 《MODIS 全球叶面积指数产品再处理数据集(2001–2021)》元数据简表

条目	描述
数据集名称	MODIS 全球叶面积指数产品再处理数据集(2001–2021)
数据集短名	SZU_LAI
作者信息	刘丽 IVV-8131-2023, 广东工贸职业技术学院, llrain_li@126.com 张英慧 GYR-3820-2022, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, zyhui@szu.edu.cn 胡忠文 AAX-7567-2021, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, zwhoo@szu.edu.cn 高星 CPW-9851-2022, 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, gxing@igsrr.ac.cn 王敬哲 Q-4555-2019, 深圳职业技术大学人工智能学院, jzwang@szpt.edu.cn 邬国锋 B-8735-2018, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, guofeng.wu@szu.edu.cn
地理区域	全球
数据年代	2001–2021 年
时间分辨率	8 天、月、年
空间分辨率	0.05°
数据格式	.tif
数据量	29.9 GB
数据集组成	叶面积指数数据集文件, 包含 8 天分辨率数据、月均及年均数据。其中: MODIS_YYYYDOY_LAI.tif 是 8 天分辨率叶面积指数数据, YYY 代表年份, DOY 代表儒略日, 如 MODIS_2003009_LAI.tif 是 2003 年第 9 天的叶面积指数数据; MODIS_YYYYMM_LAI.tif 是月均叶面积指数数据, YYY 代表年份, MM 代表月份, 如 MODIS_200301_LAI.tif 是 2003 年 1 月的平均叶面积指数数据; MODIS_YYYY_LAI.tif 是 5 天叶面积指数数据, YYY 代表年份, 如 MODIS_2003_LAI.tif 是 2003 年平均叶面积指数数据
基金项目	国家自然科学基金(42201347); 中国博士后基金(2022M712163); 广东省粤深联合青年基金(2021A1515110910, 2023A1515011273); 中国科学院(XDA23090503); 深圳市(JCYJ20220818101617037, 20220811173316001)
数据计算环境	GDAL、Python 3.10
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[17]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

量图层标识了主算法反演结果、主算法反演饱和结果, 因观测几何导致采用备用算法及其他原因导致备用算法等, 一般认为主算法反演结果具有更高的质量, 首先选取两套产品的主算法反演结果作为候选高质量反演值。

2) 最大 FAPAR 结果选取: 利用 MODIS 生产 LAI 产品时, 同时输出 FAPAR 参数, 在 8 天合成过程中选取最大 FAPAR 值作为 8 天合成值。同时 FAPAR 和 LAI 的综合分析表明, 相同时间下较低的 FAPAR 反演值对应的反演质量低。综上, 我们在主算法反演结果上, 选择最大 FAPAR 对应的 LAI 作为最优结果。

(2) 时间连续性处理

针对 MODIS 异常波动, 对 MODIS 数据产品进行时间一致性处理, 已连续 5 个时相结果为周期开展数据, 假设为 $LAI_{t-2}, LAI_{t-1}, LAI_t, LAI_{t+1}, LAI_{t+2}$, 具体过程如下 (公式 1):

1) 如果 LAI_t 是无效值, 且 $LAI_{t-2}, \dots, LAI_{t+2}$ 内有效值小于 3, 则保持无效值;

2) 如果 LAI_t 是无效值, 且 $LAI_{t-2}, \dots, LAI_{t+2}$ 内有效值数量为 3 或 4, 则 LAI_t 取有效值的平均值;

3) 如果 LAI_t 不是无效值, 且 $LAI_{t-2}, \dots, LAI_{t+2}$ 内有效值为 3 和 4, 进行异常高值或低值判断:

(a) 如果 LAI_t 大于有效值平均值的 1.5 倍, 则 LAI_t 为异常高值, 替换为有效值的平均值,

(b) 如果 LAI_t 小于有效值平均值的 0.75 倍, 则 LAI_t 为异常低值, 替换为有效值的平均值,

(c) 其他情况下, 保持原值不变;

4) 如果 LAI_t 不是无效值, 且 $LAI_{t-2}, \dots, LAI_{t+2}$ 内有效值小于 3, 保持原值不变。

$$LAI_t^p = \begin{cases} Nan & N < 3 \\ LAI_{mean} & N \geq 3 \quad LAI_t \text{ is } Nan \\ LAI_t & N < 3 \\ LAI_{mean} & LAI_t > LAI_{mean} \times 1.5 \\ LAI_{mean} & LAI_t < LAI_{mean} \times 0.75 \quad N \geq 3 \quad LAI_t \text{ is not } Nan \\ LAI_t & else \end{cases} \quad (1)$$

(3) 土地覆盖类型的降尺度方法

为了适应全球尺度的研究, 我们对数据集进行降尺度, 获得 0.05° 分辨率的数据。现有的降尺度方式往往采用最邻近插值等统计方法, 忽略了水体、裸地、建成区等非植被像元的影响。本研究提出顾及土地覆盖类型的降尺度方法, 首先统计 0.05° 网格下 12×12 个像元中植被覆盖象元数量 (N_v), 并计算总植被像元 LAI (LAI_v), 则 0.05° 网格下植被 LAI 为 (公式 2):

$$LAI_{0.05} = \frac{LAI_v}{144} \quad (2)$$

(4) 空白值填充

利用 2002–2022 年 0.05° 产品逐时相获得平均值作为基准 LAI (LAI_b), 考虑不同年份的物候差异进行空白值填充。

1) 空白值周围 3×3 网格内有效值大于等于 5 个, 取平均值为 LAI_{bm} ; 对应基准 LAI 的平均值为 LAI_{bm} , 则 (公式 3):

$$LAI = LAI_b + LAI_{bm} - LAI \quad (3)$$

2) 否则, 填补由 MODIS 备用算法获得的反演值。

3.3 技术路线

数据集的主要研发过程如图 1 所示。首先基于 MODIS 两套数据产品 MOD15A2H 和 MYD15A2H 进行最优反演结果筛选，利用质量图层（QA）标识，选择主算法反演的 LAI/FAPAR 结果，在两套产品中选择最大 FAPAR 对应的 LAI 作为最优结果；进一步以 5 期为滑动窗口，采用时序一致性处理算法（公式 1），改善产品中普遍存在的时序异常波动的问题，提高 LAI 产品质量；考虑土地覆盖类型，采用高质量象元反演值平均法（公式 2），生产 0.05°空间分辨率的数据产品，适用全球变化及地球系统科学研究。由于云等导致的数据质量问题，仍然存在大量的空缺值，在基准叶面积数据的基础上，顾及物候变化，对缺失值进行进一步的插补（公式 3），以提高产品的空间连续性。最后，生成 2001–2021 年时间分辨率为 8 天，空间分辨率为 0.05°的全球时空连续叶面积指数产品，并合成了月均及年均产品。

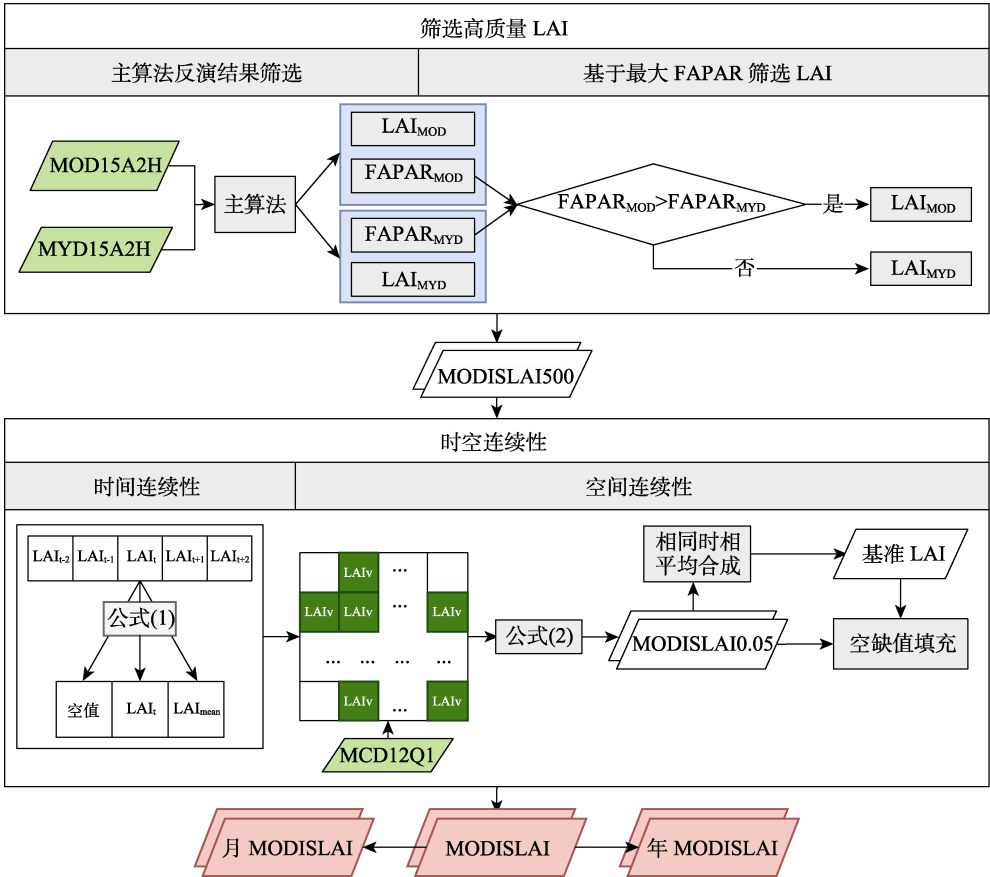


图 1 数据研发技术流程图

3.4 数据验证

本研究使用地面实测数据对数据集进行验证。数据验证需要高质量的地面参考资料来验证产品^[18]。国际卫星对地观测委员会发起成立了陆地表层产品验证小组，构建了 DIRECT V2.1 数据库^[19]。该数据库汇总了全球各地叶面积指数（LAI）测量数据。地面数据是按照 CEOS WGCV LPV LAI 推荐的实测方法开展的高精度测量结果，使用高空间分辨率的图像

进行升尺度到 3 km × 3 km 范围，减少空间异质性的影响。DIRECT V2.1 数据库已经成为卫星叶面积指数产品验证主要数据库，该数据库在全球共有 176 个站点(7 个主要植被类型)，有 280 个 LAI 值，时间为 2000–2021 年(图 2)。

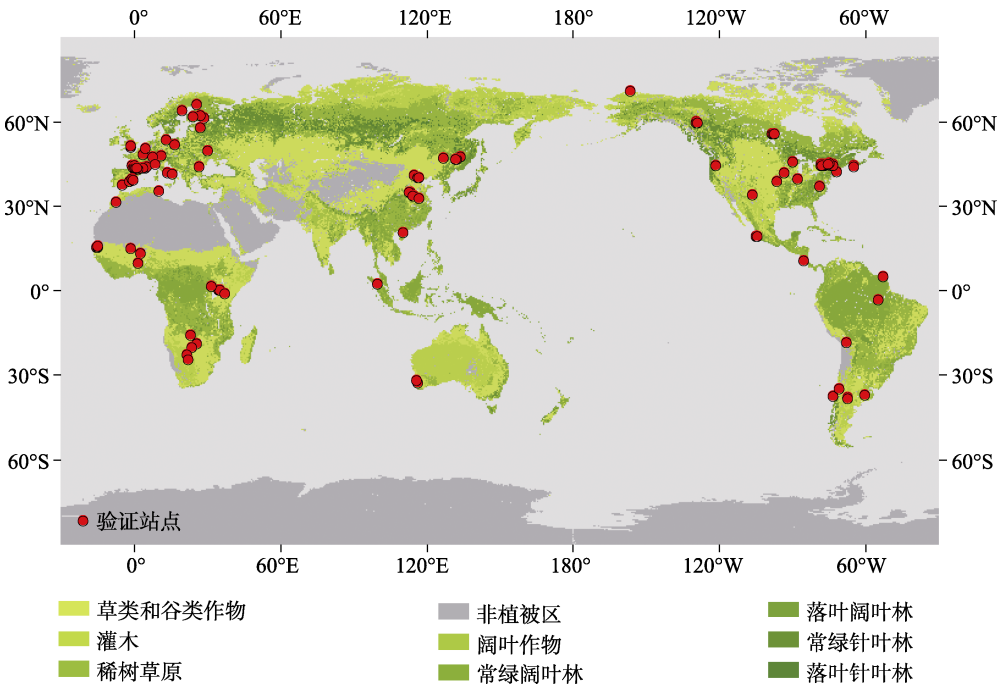


图 2 叶面积指数验证点全球分布图(依据审图号 GS(2016)1666 号的标准地图制作)

表 2 数据集文件表

文件夹名称	命名方式	数据说明	数据格式	数据数量	数据量
叶面积指数 8 天数据	MODIS_YYYYDOY_LAI	YYYY 年第 DOY 天的叶面积指数数据文件。比例因子为 0.1，叶面积指数值为像元值×0.1	.tif	966	23.3 GB
叶面积指数月数据	MODIS_YYYYMM_LAI	YYYY 年第 MM 月的平均叶面积指数数据	.tif	256	6.08 GB
叶面积指数年数据	MODIS_YYYY_LAI	YYYY 年平均叶面积指数数据	.tif	21	519 MB

为验证再处理数据集精度，本文利用相关分析和误差分析对处理结果进行精度检验。检验地面实测数据与产品值之间的相关性，本文计算了决定系数 (R^2)。

$$R^2 = \frac{\sum_i^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{4}$$

式中， y_i 代表第 i 个样本值，分子表示使用预测值(\hat{y}_i)预测的残差；分母表示使用样本均值(\bar{y}_i)预测所有数据得到的残差。 R^2 越大表示模型预测结果的残差越小，预测效果越好。

为评价数据集结果误差，本文计算了均方根误差 (RMSE) 和偏差 (bias)。均方根误差可以作为衡量真实值与预测值误差的重要指标，即当 RMSE 值越小，bias 值绝对值越小，

则验证结果越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \tag{5}$$

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \tag{6}$$

式中， n 为验证样点数量， y 为待验证值， x 为真实值

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

全球长时间序列 MODIS 叶面积指数再处理数据集主要包括 2001–2021 年 8 天、月及年叶面积指数数据集。数据集保存为.tif 格式，比例因子为 0.1。

4.2 数据结果

(1) 全球叶面积指数空间分布

图 3 展示了 2001–2021 年一月、四月、七月及十月全球叶面积指数月平均分布图。一月由于北极地区冰雪覆盖，存在大量的空缺值。非洲东部撒哈拉沙漠区域在一年内均保持空缺。赤道附近区域，包括亚马逊热带雨林、非洲中部及东南亚区域在上述 4 个月份都表现出较高值，接近于 7。北半球地区在 7 月份叶面积指数达到较高值，主要分布在北美东部、欧亚大陆中部、东亚及印度。

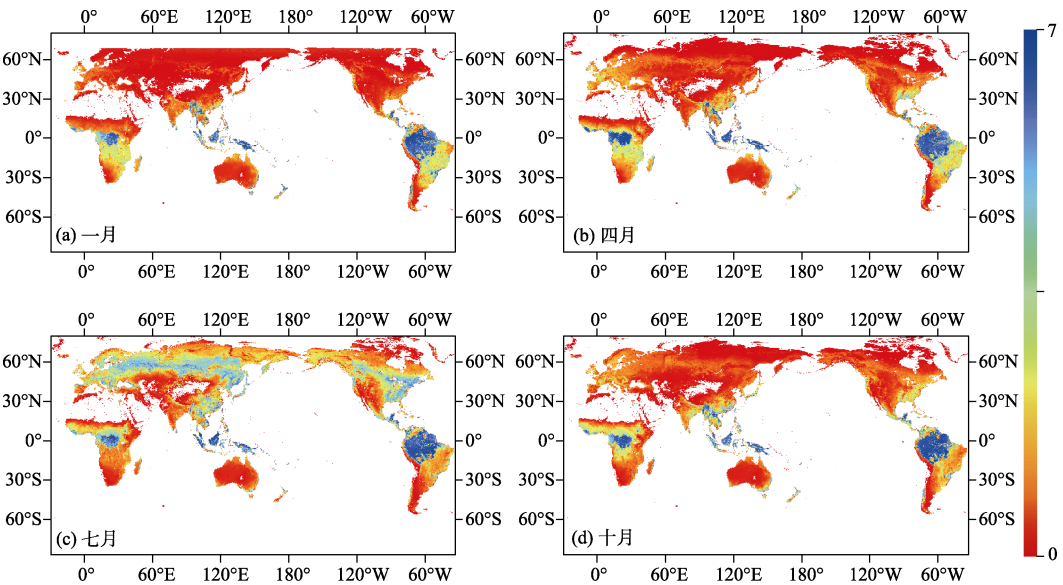


图 3 2001–2021 年全球叶面积指数平均分布图（依据审图号 GS(2016)1666 号的标准地图制作）

(2) 2001–2021 年全球年平均叶面积指数变化

气候变化背景下，全球叶面积指数在 2001–2021 年间持续增长。如图 4 所示，全球和北半球平均叶面积指数持续稳定增长，而南半球叶面积指数在 2004 年后保持稳定，并在 2016–2019 年存在明显的波动。

图 5 展示了全球及南北半球陆地平均叶面积指数时序变化曲线。南半球叶面积指数年内保持在 1.4–2.2, 明显高于全球平均 (0.6–1.7) 及北半球叶面积指数 (0.4–1.7)。南半球叶面积指数在年内先降低后升高, 在一月份达到最高值 (2.2), 在 7 月达到最低值 (1.4), 而北半球叶面积指数表现出相反的季节变化规律, 在一月份达到最低值 (0.4), 在 7 月达到最高值 (1.7)。全球平均叶面积指数与北半球叶面积指数保持相似的季节变化规律和最大叶面积指数, 但最低叶面积指数 (0.6) 高于北半球最低叶面积指数。

进一步探究全球叶面积指数变化的空间分布, 结果如图 6 所示。叶面积指数增长区域主要集中在 中国、印度及欧洲区域, 最大增长速率 0.15/年。在北美五大湖区域附近存在叶面积指数减少的现象。

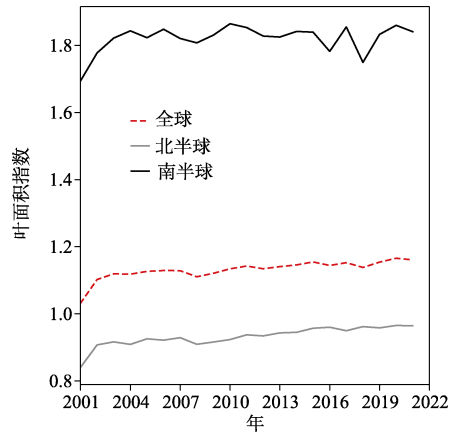


图 4 全球及南北半球陆地年平均叶面积指数变化曲线图

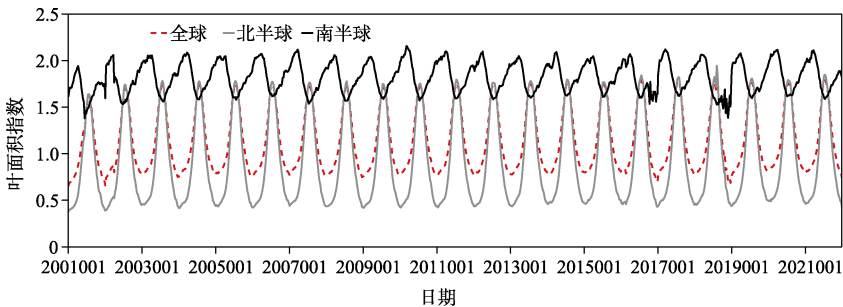


图 5 全球及南北半球陆地平均叶面积指数时序变化图

4.3 数据结果验证

利用全球叶面积指数验证数据对产品进行验证, 散点图如图 7 所示。产品 LAI 和地面实测 LAI 呈现出良好的一致性, 线性拟合结果接近 1 : 1 线, 决定系数 (R^2) 达到 0.748, 偏差 (bias) 为 0.12, 均方根误差 (RMSE) 为 0.907, 优于现有产品精度^[3] ($R^2=0.615$, bias=0.13, RMSE=1.16)。其中常绿阔叶林由于遥感观测存在的饱和效应, LAI 存在低估。

5 讨论和总结

MODIS 叶面积指数产品广泛应用于全球变化研究中, 但是由于算法的缺陷, 产品存在明显的不确定性导致全球变化研究的误差。本研究在 MODIS 叶面积指数产品的基础上提出了基于最大光合有效辐射吸收系数的合成方法, 并经过时空滤波方法进一步减小异常值及空缺值的存在, 获得了时空连续、质量可靠的全球叶面积指数数据集。利用地面实测数据进行验证, 结果显示优化产品具有较高的产品精度, 决定系数 (R^2) 达到 0.748, 偏差 (bias) 为 0.119, 均方根误差 (RMSE) 为 0.907, 优于现有产品精度^[3] ($R^2=0.615$, bias=0.13,

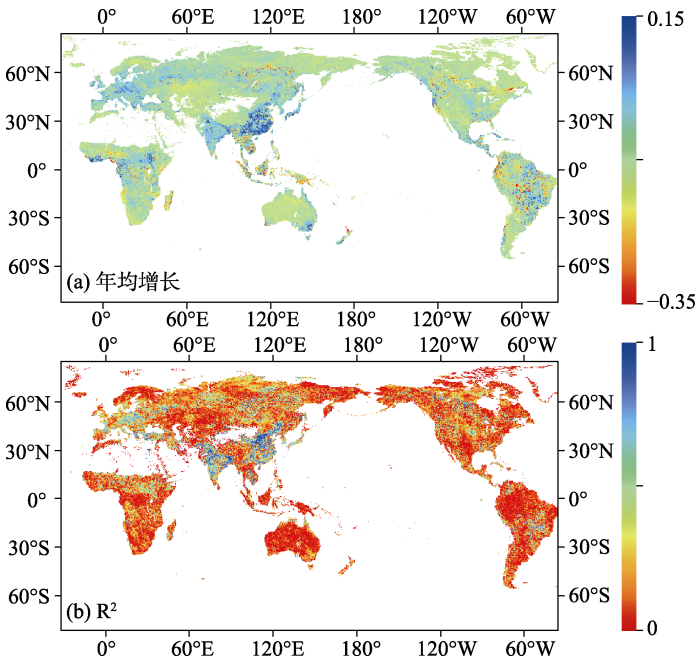


图 6 2001–2021 年全球叶面积指数年均变化分布图(依据审图号 GS(2016)1666 号的标准地图制作)

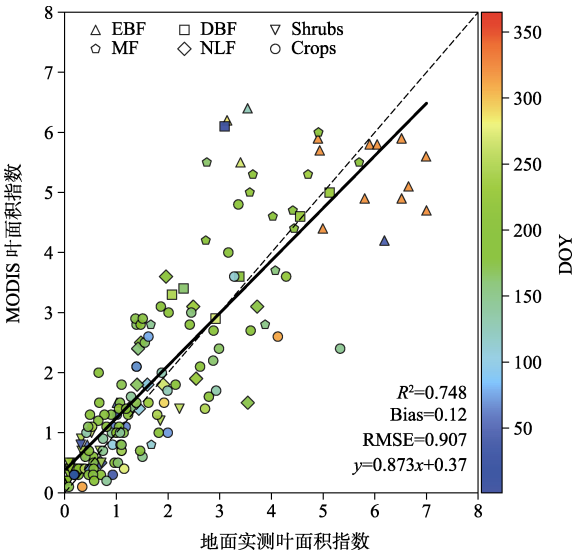


图 7 MODIS 产品再处理数据集验证散点图

(注：EBF，常绿阔叶林；DBF，落叶阔叶林；Shrubs，稀树草原；MF，混交林；
NLF，针叶林；Crops，农作物；DOY，儒略日)

RMSE=1.16)，满足地球观测组织对叶面积指数产品的不确定性要求。利用本套数据，本研究进一步揭示了不同季节全球叶面积指数分布格局，阐述了南北半球叶面积指数的时空变化差异，过去二十年全球叶面积指数呈现增长区域，主要增长区域为中国东部、印度及欧洲地区。本研究进一步揭示了气候变化下全球植被的时空变化情况，并为进一步开展全球气候变化、碳循环研究以及我国生态文明建设及双碳目标的实现提供了高精度数据集。

作者分工: 张英慧、高星、邬国锋对数据集的开发做了总体设计; 刘丽、张英慧采集和处理了数据; 张英慧、胡忠文设计了模型和算法; 刘丽、王敬哲做了数据验证; 刘丽、张英慧撰写了数据论文等。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 刘洋, 刘荣高, 陈镜明等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 734–743.
- [2] Chen, J. M., Black, T. A. Defining leaf area index for non-flat leaves [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(4): 421–429.
- [3] Fang, H., Baret, F., Plummer, S., *et al.* An overview of global Leaf Area Index (LAI): methods, products, validation, and applications [J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 739–799.
- [4] GCOS. The global observing system for climate implementation Needs [R]. 2016.
- [5] Xiao, Z., Liang, S., Wang, J., *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.
- [6] Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., *et al.* LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 275–286.
- [7] 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.
- [8] Chen, C., Park, T., Wang, X., *et al.* China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122–129.
- [9] Zhang, Y., Hu, Z., Wang, J., *et al.* Temporal upscaling of MODIS instantaneous FAPAR improves forest gross primary productivity (GPP) simulation [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 121: 103360.
- [10] Fang, H., Zhang, Y., Wei, S., *et al.* Validation of global moderate resolution leaf area index (LAI) products over croplands in northeastern China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233(4): 111377.
- [11] 马培培, 李静, 柳钦火等. 中国区域 MuSyQ 叶面积指数产品验证与分析[J]. 遥感学报, 2018, 23(6): 1232–1252.
- [12] Yuan, H., Dai, Y., Xiao, Z., *et al.* Reprocessing the MODIS leaf area index products for land surface and climate modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(5): 1171–1187.
- [13] Wang, J., Yan, K., Gao, S., *et al.* Improving the quality of MODIS LAI products by exploiting spatiotemporal correlation information [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1–19.
- [14] Zhang, Y., Fang, H., Wang, Y., *et al.* Variation of intra-daily instantaneous FAPAR estimated from the geostationary Himawari-8 AHI data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 307: 108535.
- [15] Pu, J., Yan, K., Gao, S., *et al.* Improving the MODIS LAI compositing using prior time-series information [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 287: 113493.
- [16] 刘丽, 张英慧, 胡忠文等. MODIS 全球叶面积指数产品再处理数据集(2001–2021) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodb.2023.10.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.10.03.V1>.
- [17] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新)
- [18] 曾也鲁, 李静, 柳钦火. 全球 LAI 地面验证方法及验证数据综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(2): 165–174.
- [19] Weiss, M., Baret, F., Block, T., *et al.* On line validation exercise (OLIVE): a web based service for the validation of medium resolution land products application to FAPAR products [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 4190–4216.