

文章编号: 1007-4619(2008)06-0993-08

中国区域 MODIS LA 产品及其改进

肖志强, 王锦地, 王 森

(北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室,
环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 叶面积指数 (LAI) 是表征地表植被生长状况和进行陆面过程系统模拟的一个重要参数, 搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的 MODIS 传感器能够长时间收集全球陆地表面 LAI 的变化信息。然而, 目前发布的 MODIS LAI 数据产品的时空不连续性制约着 MODIS LAI 产品在农作物长势监测与产量估计、地球表面过程模拟、全球变化研究等领域的应用。论文对中国区域 MODIS LAI 的标准产品进行了分析和总结, 指出造成目前发布的中国区域 MODIS LAI 的标准产品在时间和空间上的不连续性, 既有 MODIS LAI 反演算法的原因, 更有 MODIS 反射率数据质量的原因。针对中国区域 MODIS LAI 标准产品存在的时空不连续性问题, 论文在 TSF 滤波算法的基础上, 进一步考虑地表反射率数据质量对 MODIS LAI 标准产品的影响, 提出了改进的 TSF 滤波算法, 并给出了基于该算法生成的时间上和空间上更具连续性的中国区域的 MODIS LAI 改进产品。本文发展的新算法和 LAI 改进产品可为相关研究提供 LAI 数据和产品算法参考。

关键词: MODIS LAI 产品; LAI 产品改进; TSF 滤波

中图分类号: TP79 文献标识码: A

1 引 言

一直以来, 人们普遍关心的是如何利用太阳、地球及其他行星的知识来建立复杂的环境、气候、自然灾害和自然资源模型, 对全球变化和大范围的区域变化提供较为系统和准确的评估及预报。为了定量地、准确地模拟全球动态变化过程, 区分短期和长期变化趋势以及区域和全球变化现象, 必须长时间收集陆地表面各种要素的变化信息。卫星遥感提供了获取全球数据的一种最有效的方式, EOS-AM1 的成功发射标志着遥感对地观测开启了一个新的时代^[1]。搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS), 是美国地球观测系统 (EOS) 计划中用于观测全球生物和物理过程的重要仪器。MODIS 每两天连续提供地球上任何地方白天反射图像和昼夜的发光光谱图像数据, 包括对地球陆地、海洋和大气观测的可见光和红外波谱数据, 为 EOS 计划获取地球系统信息、全球变

化数据和一些重要参数提供了有力的支持。地面工作组利用 MODIS 获取的数据生产了一系列标准产品, 包括地表反射率、地表覆盖、植被指数、NPP、APAR 及叶面积指数 (LAI) 等^[2]。其中, 叶面积指数是描述陆地表面和植被边界层之间各种物质及能量通量交换的陆面过程模型的一个十分重要的状态参数。自 2000 年公开发布以来, MODIS LAI 标准产品正逐渐应用于各种全球和区域范围的研究。然而, MODIS LAI 标准产品在时间上和空间上存在明显的不连续性, 这种时空不连续性制约着 LAI 标准产品在地球表面过程模拟、全球变化研究等领域的应用^[3]。

造成 MODIS LAI 产品时空不连续的因素主要包括: 云的覆盖、大气中的气溶胶、季节性的雪覆盖、传感器故障及传感器的观测几何。这些因素可能导致 MODIS 数据中估计的 LAI 不准确或者无法估计 LAI。文献 [4] 发展了一种改进 MODIS 标准产品的 LACC 方法, 该方法首先确定受大气影响的像素, 然后通过迭代插值, 逐步确定这些像素改进后

收稿日期: 2007-02-09 修订日期: 2007-06-01

基金项目: 国家科学技术部国际科技合作重点项目 (编号: 2004DFA06300)、973 项目 (编号: 2007CB714407)、国家自然科学基金 (编号: 40571107、40701102)、长江学者和创新团队发展计划联合资助。

作者简介: 肖志强 (1976—), 男, 2004 年获中南大学地球探测与信息技术专业博士学位。主要从事遥感数据反演、数据同化等方面的研究。E-mail: zhqxia@bnu.edu.cn

的 LAI 值。文献 [3] 提出了一种时空滤波 (TSF) 算法, 通过集成同一数据块 (Tile) 中不同功能植被类型多年平均的背景信息和观测信息, 确定改进后像素的 LAI 值。Fang 等利用该算法对整个北美地区 MODIS 集合 4 的 LAI 产品进行处理后的结果表明, 改进后的 LAI 产品与野外实测的 LAI 及 ETM+ 图像中反演的 LAI 的一致性更好。

本文分析了中国区域 MODIS LAI 标准产品的特点, 针对其中存在的问题, 在文献 [3] 算法基础上, 考虑 MODIS 反射率数据的质量对 LAI 反演结果的影响, 提出了进一步利用 MODIS 数据产品中的质量控制 (QC) 值提供的反射率数据质量的相关信息, 对 TSF 滤波算法进行改进的一种可行方法, 生成了中国区域的时空连续性更好的 LAI 数据产品。

2 MODIS LAI 数据产品

MODIS 地面工作组生产 LAI 产品的方法包括主算法和备用算法。主算法基于严格的三向传输理论^[5], 利用了多达 7 个光谱波段 MODIS 地表反射

率的光谱信息, 反演结果精度相对较高。当提取的光谱数据值落在预期范围之外时, 就利用备用算法估计 LAI。备用算法是基于归一化差值植被指数 (NDVI) 和 LAI 的回归关系, 建立全球 6 种植被类型的简单统计关系^[6]。当以上反演算法都不能估计 LAI 时, 依据 MODIS 的土地分类标准产品 MOD12Q1, 赋予像素相应的填充值。

MODIS 地面工作组利用以上算法从经过大气校正的 BRDF (MOD09 表面反射率产品) 反演 LAI, 生产了全球 MODIS LAI 标准产品 MOD15A2。该产品的空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 8 天。MOD15A2 标准产品中除包括全球范围的 LAI 之外, 还提供了各像素对应的 LAI 的质量控制 (QC) 信息。MODIS LAI 标准产品的质量控制信息用一个 8 位的二进制数据来描述, 包括 MODLAND, DEAD-DETECTOR, CLOUD-STATE, SCF_QC 四类, 其中, MODLAND 给出了产品的总体质量, CLOUDSTATE 描述了地表反射率数据产品的相关信息, SCF_QC 提供了主备份算法反演结果的质量。因此, LAI 的质量控制信息可以作为我们改进 MODIS LAI 标准产品的重要依据。

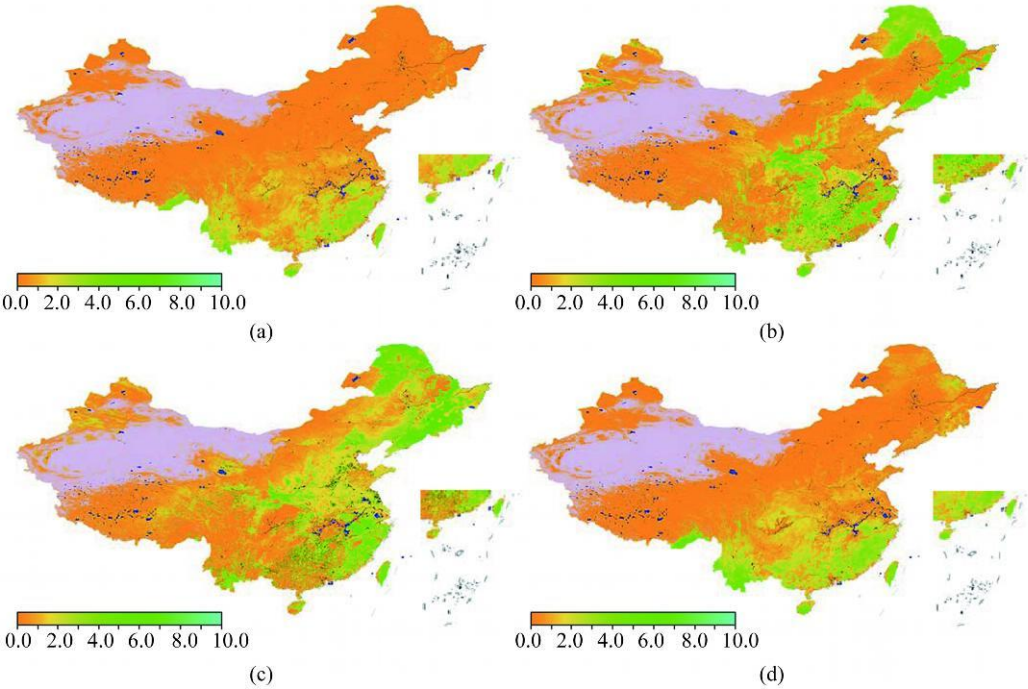


图 1 中国区域 2004 年 MODIS LAI 产品空间分布图
(a) 第 65 天的 MODIS LAI (b) 第 153 天的 MODIS LAI
(c) 第 241 天的 MODIS LAI (d) 第 337 天的 MODIS LAI
Fig 1 The original LAI images of China on four composite date (DOY) in 2004 using the MODIS LAI Product (MOD15A2)
(a) the LAI images on day 65 (b) the LAI images on day 153
(c) the LAI images on day 241; (d) the LAI images on day 337

图 1 给出了 2004 年第 65 153 241 和 337 天中国区域 MODIS LA 标准产品的空间分布图。 LAI 标准产品基本能够反映中国区域 LA 随时间和空间变化的大致趋势, 但同时也注意到, 由于云、传感器故障等因素的影响, 标准产品仍然存在时空不连续性问题, 如图 1 中 LA 标尺以外的各种颜色的像素均为填充值, 又如 2001 年第 169 和 177 两天由于传感器故障原因导致标准产品 LA 整体缺失。图 2

为 2003 年数据块 h26 V05 中地类为草地的某一像元 LA 的时间序列变化曲线, 可以看出, 从 169 天至 257 天, LA 值上下波动, 在时间上呈现出明显的不连续性。通过对 LA 质量控制信息的分析发现该像元在此时间段内的 QC 值均小于 32 (图 2 中虚线), 也就是说, LA 值是由主算法反演得到。因此, 地表反射率数据质量是导致该像元 LA 值时间上不连续性的主要原因之一。

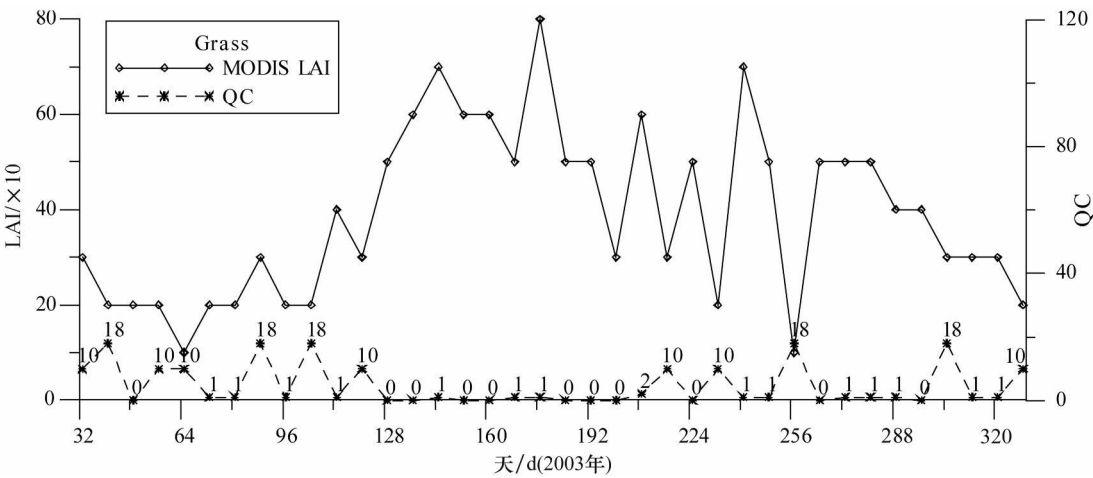


图 2 MODIS LA 产品时间上的不连续性
Fig 2 LAI time series with abrupt rises or drops using the MODIS LAI product

3 中国区域 MODIS LA 产品改进

由上述分析可以看出, 中国区域 MODIS LA 标准产品无论在时间上还是空间上均存在明显的不连续性。造成 LA 的时空不连续性既有 MODIS LA 反演算法本身的原因, 更有反射率数据质量的影响, 在对产品进行改进时, 需要同时考虑以上两个因素。

3.1 TSF 滤波方法

为了填充 LA 产品的空洞, 并提高 MODIS LAI 产品的质量, Fang 等^[3] 发展了时空滤波算法 (TSF)。 TSF 滤波算法包括 3 个主要步骤: (1) 背景值计算, 以相同植被功能类型 LA 的多年平均值或空间平均值作为背景值。首先计算像素连续 6 年 (2000 年至 2005 年) 的 LA 平均值。如果像素连续 6 年的 LA 值均缺失, 多年平均值不存在, 此时应用基于植被连续场的生态曲线拟合方法 (VCF-ECF) 计算像素的背景值。 (2) 观测值计算, 当 32 < QC < 128 时, 将备份算法估计的 LA 值直接作为观测值;

当 QC > 128 时, 应用 Savitzky-Golay (SG) 滤波算法计算像素的观测值。 (3) 用数据同化滤波法 (DAF) 估算新的 LA 值。对 QC < 32 的像素, 由主算法反演得到 MODIS LA 值将不做任何修改; 对 QC > 32 的像素, 利用前两步计算的背景值和观测值, 用公式 (1) 计算各像素新的 LA 值。

$$\hat{x}_b(t_i) = x_b(t_i) + \frac{\sum_{j=1}^n w(t_j, t_i) [x(t_j) - x_b(t_j)]}{\sum_{j=1}^n w(t_j, t_i)}$$

(1)

式中, x_b 为背景值, 即像素多年的平均值; x 为观测值, 即 MODIS 标准产品中像素的 LA 值; $w(t_j, t_i)$ 为权函数, 与点 t_i 和 t_j 之间的距离 d_{ij} 的大小有关, 其表达式如式 (2)

$$w(t_j, t_i) = \max\left\{0, \frac{R^2 - d_{ij}^2}{R^2 + d_{ij}^2}\right\}$$

(2)

式中, R 为预先给定的影响半径。

Fan 等利用 TSF 滤波算法对 MODIS 集合 4 的 LA 产品进行处理, 生成了北美地区时间和空间上

连续的新的 LA 产品,采用野外实测的 LA 及 EIM+图像中反演的 LA 对新的 LA 产品进行验证,结

果表明新的 LA 产品与实测的 LA 及 EIM+图像中反演的 LA 具有很好的一致性^[3]。

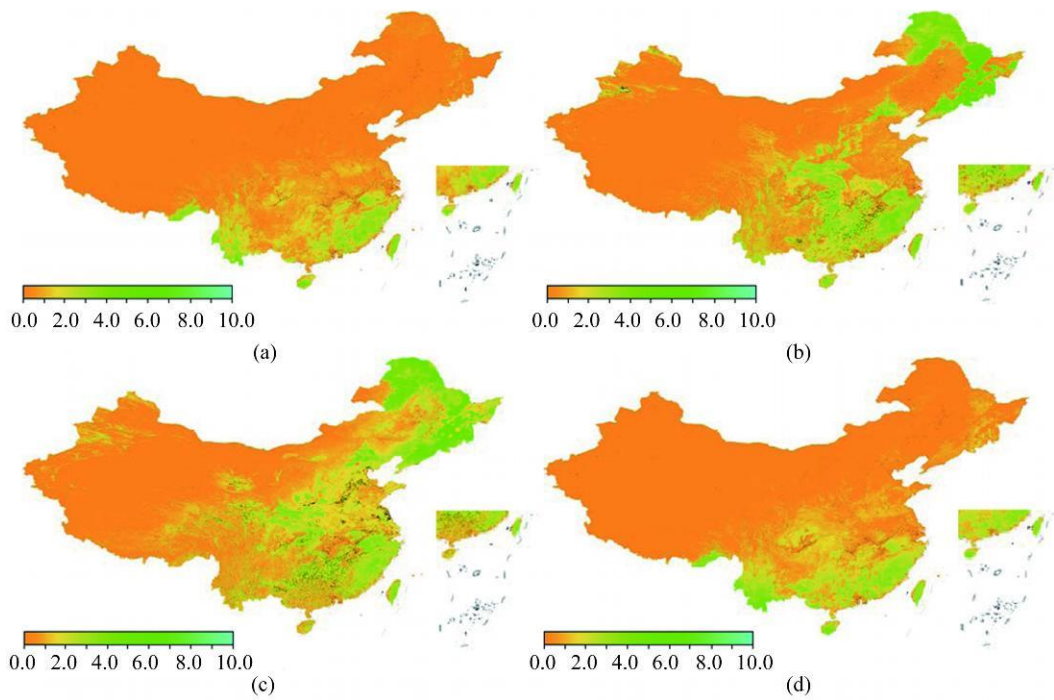


图 3 TSF 滤波后的中国区域 LA 空间分布
(a)第 65 天的 MODIS LAI (b)第 153 天的 MODIS LAI
(c)第 241 天的 MODIS LAI (d)第 337 天的 MODIS LAI

Fig 3 The MODIS LAI images of China after TSF filtering on four composite dates
(DOY) in 2004
(a) the LAI images on day 65 (b) the LAI images on day 153
(c) the LAI images on day 241 (d) the LAI images on day 337

图 3 是利用 TSF 滤波算法对中国区域 MODIS LA 标准产品处理后的结果,和图 1 的 MODIS LAI 标准产品相比,处理后的 LA 产品无论在空间上还是在时间上,具有更好的一致性和连续性。但同时也注意到,在一些地区经 TSF 滤波之后的 LA 在时间和空间上仍存在明显的阶跃变化。图 4 为某一像元时间序列上 LA 值 TSF 滤波前后的结果对比图,由于传感器故障,标准产品在 169 和 177 两天的 LA 值缺失,但通过 TSF 滤波后得到了相对合理的 LA 值。尽管如此,在 113 和 193 天, LA 值明显偏低,这主要是由于反射率数据质量导致, TSF 滤波算法不能对这些点的 LA 值进行修改。更有趣的是,对于图 2 所示 LA 的时间序列变化曲线,由于各时间点的 $QC < 32$ 因此, TSF 滤波算法对此类像素点 LA 值的阶跃变化没有任何改进。因此,针对中国

区域的具体情况,有必要对 TSF 滤波算法进一步进行改进。

3.2 TSF 滤波方法的改进 (ImTSF)

TSF 滤波算法主要是从 MODIS LA 反演时采用的算法不同这个角度对 LA 产品进行改进。如表 1,对于 $QC < 32$ 的像素,主要是由主算法反演得到,反演结果精度相对较高, TSF 滤波对这部分像素未作任何处理。 TSF 滤波算法仅对 $QC > 32$ 的像素进行了处理,其中,对 $32 < QC < 128$ 的像素, TSF 以多年平均的 LA 作为背景值,以标准产品的 LA 作为观测值,通过 DAF 滤波估计新的 LA 值,而对于 $QC > 128$ 的像素,则是以时间滤波 (Tf)的结果作为观测值进行 DAF 滤波估计新的 LA 值。

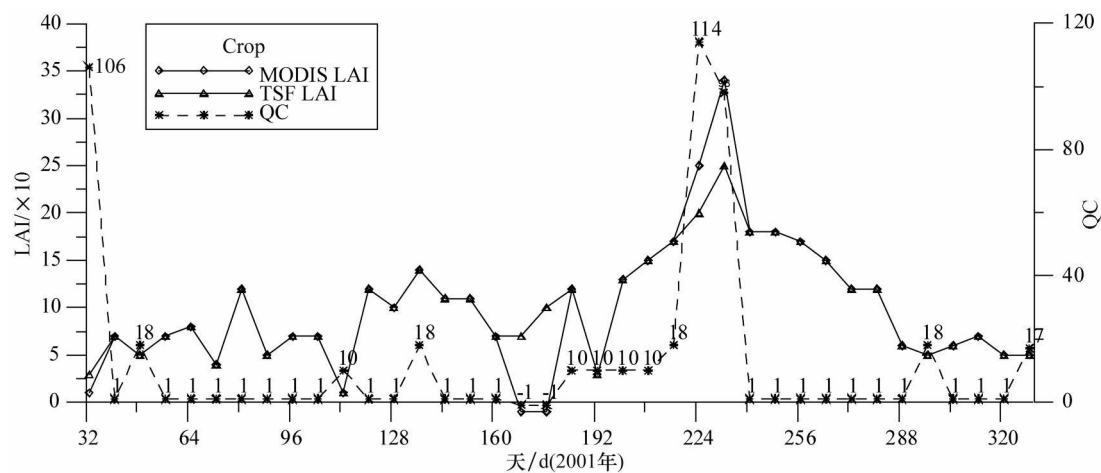


图 4 TSF滤波前后 LAI时间序列变化对比
Fig 4 Comparison of MODIS LAI time series before and after filtering

表 1 TSF滤波算法及 MODIS QC值
Table 1 MODIS quality control (QC) values and TSF filtering methods

QC值	MODIS LA 反演算法	TSF滤波算法	
		背景值	观测值
$QC < 32$	主算法, 反演结果好	好的反演结果, 未作任何处理	
$32 \leq QC < 64$	主算法, 饱和	多年 LA 的平均值或 VCF-ECF 滤波结果	MODIS 标准 LA 产品
$64 \leq QC < 128$	备用算法		时间滤波结果
$QC \geq 128$	不能反演的像素		

实验表明, 虽然新的 LA 产品质量有了明显改进, 但改进后的产品在时间和空间上仍然存在明显的跳跃性。通过对实验结果的分析表明, 导致 TSF 滤波结果不够理想的原因主要包括 2 个方面: (a) 参数反演的反射率数据的质量, 主要是云的影响; (b) LA 标准产品中填充值的处理。因此, 针对以上两个方面对算法进行改进。

3.2.1 基于反射率数据质量分析的滤波处理

云的覆盖是影响反射率数据质量好坏的一个重要因素, MODIS LA 标准产品的质量控制在信息中, 第 4 位和第 5 位描述了云的 4 种状态 (CLOUD-STATE)。

对无云的像素, 反演的 LA 准确度较高, 无论在空间上还是在时间上, LA 产品相对比较连续, 而对于有云覆盖的像素, 由于云的存在, 导致反射率数据质量的下降, 从而影响反演结果的准确性, LA 产品在时间和空间上不连续。结合质量控制中其他位, 计算受云影响的 QC 值主要包括 2, 9, 10, 17, 18, 41, 42, 49, 50, 105, 106, 113, 114 等。图 5 是数据块 h26 v05 中由 QC 值确定的受云影响的像素时间序列变化图, 其中蓝色像素的 $QC > 32$ 在 TSF 滤波算法中已进行了处理, 绿色像素的 $QC < 32$ 在 TSF 滤波算法中认为是好的像素, 未作任何处理。

从前面的分析可知, TSF 滤波后的 LA 时间序列阶跃变化的时间点基本上不同程度受云的影响。因此, 在改进算法中, 对这部分像素同样也进行了滤波处理。

3.2.2 对 MODIS 填充值数据的处理

在 MODIS LA 反演过程中, 对反演算法均失败的像素, 根据 MODIS 地表分类产品 (MOD12Q1), 对这些像素分别赋予不同的填充值, 表示相应的地类。MODIS LA 标准产品中填充值主要包括以下几类: (1) 249 代表未分类区域; (2) 250 代表城市建筑用地; (3) 251 为永久湿地、沼泽地; (4) 252 为永久冰雪、苔原冻土区; (5) 253 为裸地、沙漠及植被覆盖非常稀少的地区; (6) 254 代表海洋或内陆的水体; (7) 255 代表没有计算的像元。

图 6 是数据块 h26 v05 中填充像素的时间序列变化图, 从图中可以看出, 这些填充像素随着时间的变化而变化。因此, 这部分像素同样可以通过 TSF 滤波估计新的在时间和空间上连续的 LA 值。

基于以上的分析, 对 TSF 滤波算法进行改进。对 $QC < 32$ 且云状态标志 CLOUDSTATE = 0 的像素, 认为其 LA 值比较准确, 保留至改进后的 LA 新产品。否则, 其他所有像素均利用 TSF 滤波算法计算新的 LA 值。

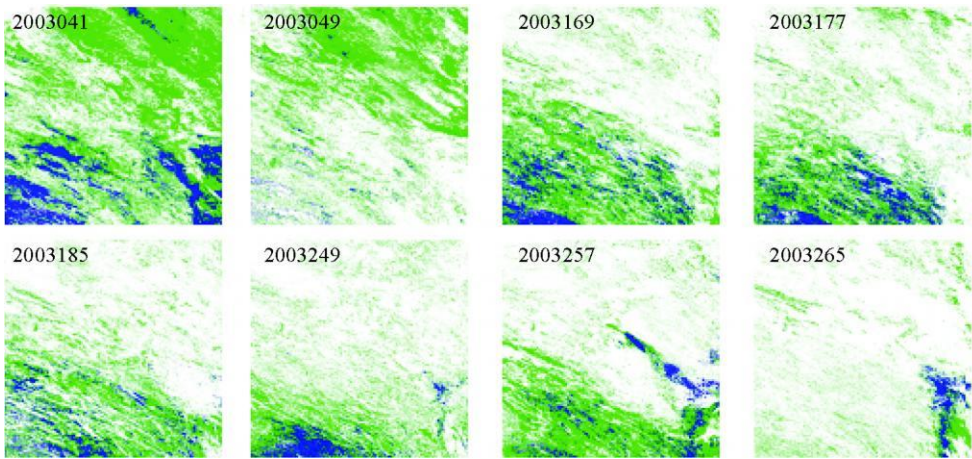


图 5 h26 v05 中受云影响的像素时间序列变化图
Fig. 5 The pixels contaminated by cloud in tile h26 v05

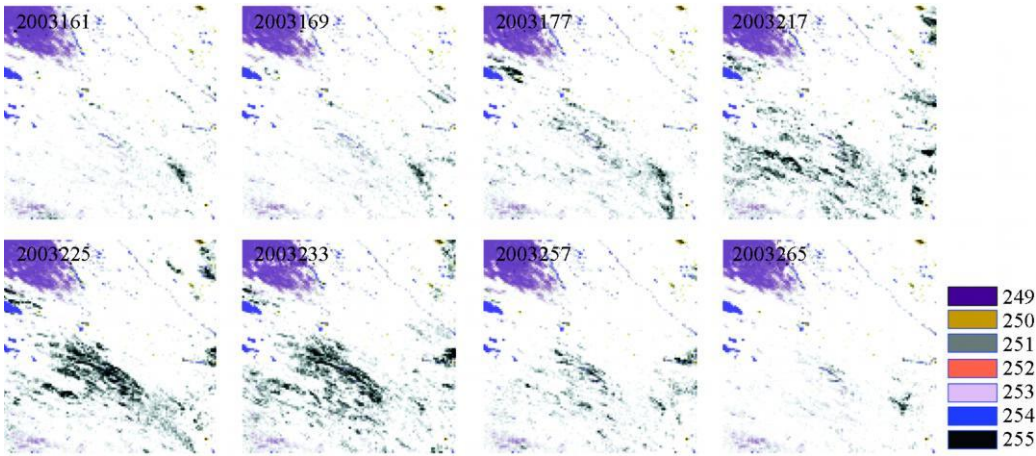


图 6 h26 v05 中填充像素的时间序列变化图
Fig. 6 Change of fill values along with time series in tile h26 v05

利用改进后的算法对数据块 h26 v05 2003 年的 LAI 标准产品进行处理,改进后的结果如图 7,其中图 7(a), (b)和 (c)分别为第 209 天的 MODIS LAI 标准产品、TSF 滤波后的处理结果和改进后的 TSF 处理的结果。很明显,由于改进后的 TSF 滤波算法对受云影响的像素和填充值进行了处理,处理后的结果在空间上表现得更为连续;图 7(d)是 LAI 的时间序列变化对比图,该点的植被类型为谷类作物。从图中可以看出,改进后的 TSF 滤波算法对 $QC<32$ 的受云影响的 LAI 值也进行了改进,改进后的 LAI 的时间变化曲线与作物生长曲线更趋于一致。

图 8 是利用改进后的 TSF 滤波算法对数据块 h26 v05 2004 年 MODIS LAI 标准产品处理后的结果。

4 结 论

造成 MODIS LAI 标准产品在时间和空间上的不

连续性,既有 LAI 反演算法的原因,也有 MODIS 反射率数据质量的原因。论文在 TSF 滤波算法的基础上,针对中国区域,作物生长季节云覆盖比较严重导致反射率数据质量下降的特点,充分利用 MODIS 数据产品中的数据质量控制信息,对 TSF 滤波算法进行了改进。实验结果表明,相对于 TSF 算法,改进后的 ImTSF 算法能更好地处理中国区域 MODIS LAI 标准产品,生成了中国区域 2000—2006 年时间和空间上更为连续的 LAI 产品。已有的研究结果为数据产品与应用模型的衔接提供了更为合理、可靠的数据,进一步的研究考虑将改进后的 MODIS LAI 产品应用于陆面模式,为陆面模式提供遥感输入参数,并与陆面模式对应的输出结果进行对比分析。

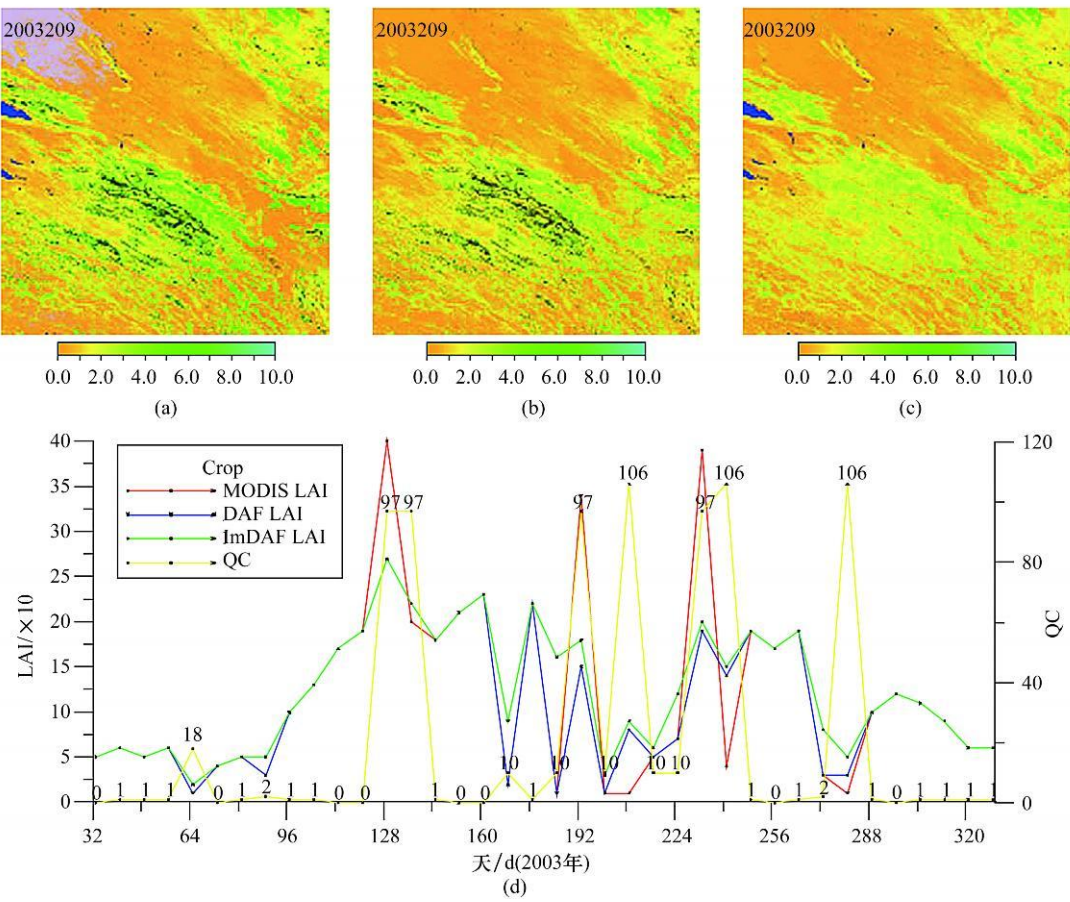


图 7 MODIS LAI 产品改进结果对比
(a) MODIS LAI (b) TSF LAI (c) Im TSF LAI (d) 时间序列变化对比
Fig 7 Comparison of the original MODIS LAI and the filtered LAI with different methods (day 209 2003)
(a) the original MODIS LAI (b) the LAI after TSF filtering (c) the LAI after Im TSF filtering (d) MODIS LAI time series before and after filtering

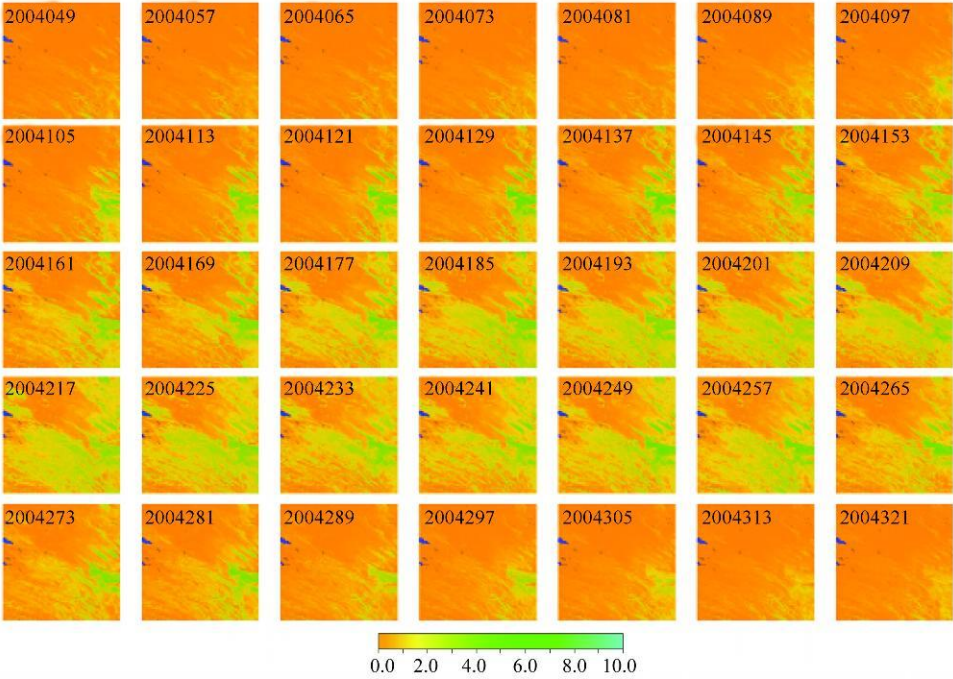


图 8 Im TSF 滤波算法处理后的结果
Fig 8 The new reconstructed LAI datasets with the Im TSF method

参考文献 (References)

[1] Myneni R B, Knyazikhin Y, Privette J L, et al. MODIS Leaf Area Index (LAI) And Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product: Algorithm Theoretical Basis Document[R]. Version 4.0, 1999.

[2] Justice C, Townshend J, Vermote E, et al. An Overview of MODIS land data Processing and Product status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 3—15.

[3] Fang H, Liang S, Townshend J, et al. Spatially and Temporally Continuous LAI Data Sets Based on a New Filtering Method: Examples from North America[J]. Remote Sensing of Environ-

ment, 2008, (112): 75—93.

[4] Chen JM, Deng F, Chen MZ. Locally Adjusted Cubic Spline Capping for Reconstructing Seasonal Trajectories of a Satellite-Derived Surface Parameter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2230—2238.

[5] Privette J L, Myneni R B, Knyazikhin Y, et al. Early Spatial and Temporal Validation of MODIS LAI Product in the Southern Africa Kalahari[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 232—243.

[6] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, et al. Global Products of Vegetation Leaf Area and Fraction Absorbed PAR from Year One of MODIS Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 214—231.

Improvement of MODIS LAI Product in China

XIAO Zhi-qiang, WANG Jin-di, WANG Zhuo-sen

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Leaf area index (LAI) is an important vegetation biophysical variable and has been widely applied to the estimation of crop yield, evapotranspiration, and net photosynthesis. Meanwhile as an important input or output parameter of some dynamic process models such as crop growth model and common land model, LAI is a connecting bridge to couple the process models with remote sensing models. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), carried aboard the Terra and Aqua satellites, can collect the information of LAI change continuously. The MODIS LAI standard product, issued since 2000, have been used in the meteorological and hydrologic field. However, spatio-temporal discontinuity exist in the MODIS standard LAI product, which restricts its application in the crop growth monitoring and yield estimation, land surface process simulation and global change research. The paper analyzed the MODIS standard LAI product in China region, and pointed out that the spatio-temporal discontinuity of the MODIS standard LAI product in China region is caused not only by the MODIS LAI reverse algorithm but also by the MODIS reflectance data quality. Based on the TSF filter algorithm, a new improved TSF filter algorithm is put forward in this paper, in which more attention is paid to the relatively serious cloud covering in the crops growth season that results in poor quality of reflection data in China region. The improved TSF filter algorithm makes full use of the data quality control information in the MODIS data product and takes further consideration of the influence of surface reflectance data quality on MODIS LAI standard product. Experimental results show that the improved TSF algorithm can better process MODIS LAI standard product. Further, the improved TSF algorithm has been used to produce a new suit of MODIS LAI product in China region with much better spatio-temporal continuity, which is more reasonable and reliable dataset for integrating the remote sensing data product with application models.

Key words MODIS LAI product; LAI product improvement; TSF filtering