

黑河中游农作物 MODIS 叶面积指数产品时间序列精度验证与变化特征分析

王丹彤, 屈永华

1. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心/地理科学学部遥感与工程研究院, 北京 100875

摘要: 叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 是表征植被生长状态的一个重要的冠层结构参数。MODIS LAI 产品是全球常用的遥感 LAI 产品之一。然而, 由于地表异质性、数据质量、模型精度等多方面的差异, MODIS LAI 产品质量各有不同。基于无线传感器网络的 LAINet 仪器可以自动获取时间频率更密集的 LAI 实测数据, 为验证卫星遥感 LAI 产品质量提供了有力支持。本文基于 2018 年和 2019 年黑河中游时间序列地面实测 LAI 数据与高空间分辨率卫星遥感植被指数数据, 建立经验回归模型。将该模型反演高空间分辨率卫星遥感 LAI 作为参考 LAI 真值, 对 MODIS LAI 产品进行了精度验证与稳定性评价, 分析了 MODIS LAI 与 LAINet 地面测量的差异原因。结果表明: 与 Landsat 8 参考真值相比, MODIS LAI 生长季的质量 ($RMSE_{2018}=1.17$, $RMSE_{2019}=1.14$) 优于衰落季 ($RMSE_{2018}=1.39$, $RMSE_{2019}=1.84$), MODIS LAI 总体低估, 尤其是生长季后期。时间序列上, MODIS LAI 产品能够刻画植被生长和凋落的季节特征, 但生长前期波动性要强于后期。与 LAINet 观测方式的差异是 MODIS LAI 低估的主要原因, 即遥感传感器从太空平台向下观测, LAI 值在生长季后期受到叶绿素降低的影响, 而 LAINet 仪器从冠层向下向上观测, 主要受到冠层间隙率的影响, 因此对叶片内色素变化不敏感。对 MODIS LAI 产品的精度验证与稳定性评价结果表明, 可以利用地面实测数据和卫星遥感数据反演时间序列 LAI, 但是, 在使用类似玉米作物的生长季后期数据的时候, 需要考虑到 MODIS LAI 与 LAINet LAI 观测对象与算法原理的差异。本研究可为 MODIS LAI 产品的使用者和算法研究者提供参考。

关键词: MODIS, 叶面积指数, LAINet, 精度验证, 稳定性评价

中图分类号: P2

引用格式: 王丹彤, 屈永华. 2024. 黑河中游农作物 MODIS 叶面积指数产品时间序列精度验证与变化特征分析. 遥感学报, 28 (2): 359-374

Wang D T and Qu Y H. 2024. Time-series accuracy validation and variation characteristic analysis of MODIS leaf-area index products for crop in the middle reaches of the Heihe River. National Remote Sensing Bulletin, 28 (2): 359-374 [DOI: 10.11834/jrs.20221216]

1 引言

叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 定义为单位地表面积内植物叶片总面积的一半 (Chen 和 Black, 1992)。LAI 是表征植被生长状态的重要定量指标 (Zhu 等, 2014)。遥感数据反演是目前获取较大空间范围内时序 LAI 的有效手段。随着各种陆面模型和生态水文模型在区域和全球尺度上的广泛应用, LAI 的大尺度精确估计变得越来越

重要。

MODIS LAI 产品是全球常用的 LAI 遥感产品之一。对于 MODIS LAI 产品的验证是将其应用于区域和全球模型的前提 (Yang 等, 2006), 但在产品验证过程中还存在着很多问题。主要表现在以下 2 个方面: (1) 由于地面观测数据不足, 无法做到时间序列的验证与评价; (2) 对于 MODIS LAI 遥感产品与地面实测 LAI 差异的原因分析较少。

传统的手持式 LAI 地面测量方法耗时耗力, 很

收稿日期: 2021-04-16; 预印本: 2022-02-22

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (编号: 42192580, 42192581)

第一作者简介: 王丹彤, 研究方向为遥感产品验证。E-mail: wangdantong0714@163.com

通信作者简介: 屈永华, 研究方向为定量遥感。E-mail: qyh@bnu.edu.cn

难用于LAI地面连续观测。已有研究使用植物冠层分析仪LAI-2000、冠层结构测量仪TRAC、破坏性测量等方法获取地面实测数据(Cohen等, 2003; Tan等, 2005; 胡少英和张万昌, 2005; Fang等, 2012; 孙晨曦等, 2013; Xu等, 2016; 杨帆等, 2016)。受野外人工手持操作模式的限制, 这些测量方法仅能获取不连续观测日期的LAI数据, 因而很难做到对待验证产品进行时间序列验证。随着新技术的出现, 基于地面联网观测设备, 可以自动获取时间频率更密集的LAI数据, 大大降低野外LAI测量成本。现有的LAI自动测量方法有LAINet(Qu等, 2014)、PASTiS-57(Brede等, 2018)、DHP(Brown等, 2020)等。这为MODIS LAI产品时间序列验证提供了可能。

与参考产品相比较, MODIS LAI产品在下垫面为玉米的情况下存在明显的低估现象。付立哲等(2017)认为, 反射率数据的差异对低估结果影响最大, 聚集效应的影响次之, 模型差异的影响最小; 胡少英和张万昌(2005)认为地表异质性及地表覆盖分类差异均会对粗分辨率LAI的提取带来较大影响; 家淑珍等(2014)认为地面观测和卫星像元不同尺度之间存在空间差异以及混合像元的影响是造成低估现象的主要原因。但目前没有研究分析不同产品观测方式的差异对MODIS LAI产品低估造成的影响。

本研究认为遥感传感器从冠层上部向下观测, 遥感信号中包含了叶片色素的变化, 而地面观测仪器从下向上观测, 通过透过率计算LAI, 没有包括叶片色素的变化。为了验证这一假设, 引入绿度指数GI(Greenness Index)和色素指数CCI(Chlorophyll/Carotenoid Index)(Gamon等, 2016)这2个指标用于对比分析地面与遥感数据。GI为绿光与红光波段反射率比值(G/R)的另一种表现形式。Kanemasu分别在生长季早期、中期和晚期对小麦、高粱和大豆的光谱反射率进行测量, 发现545 nm和655 nm的反射率比(分别对应MODIS传感器的绿色波段和红色波段)可以作为判断季节早期土壤暴露和季节晚期作物成熟的指标。当 $G/R < 1$ 时, 土壤反射率占主导地位(Kanemasu, 1974)。可以认为当叶片变绿占主导以后, $G/R > 1$, 反之, 叶片凋落或叶片变黄时, $G/R < 1$ 。因此, G/R 能充分反映叶绿素的变化。CCI是利用MODIS传感器的第11波

段和第11波段反射率计算得到的, 由于第11波段对叶黄素敏感(Gamon等, 2016), CCI可以表征叶绿素与类胡萝卜素含量的比率。Gamon等(2016)证实了用CCI监测陆地生物圈的可行性以及遥感监测植物光合活性方面的前景。已有研究表明冬季寒冷时常绿树叶中叶绿素与类胡萝卜素的比率会降低(Adams III和Demmig-Adams, 1994; Ottander等, 1995; Öquist和Huner, 2003; Ensminger等, 2004)。这些证据表明植被生长季后期, 叶片变黄, 叶绿素含量减少, 类胡萝卜素含量增加, 导致GI和CCI减小。因此, 本研究拟通过GI、CCI分别与地面观测LAI以及MODIS LAI的对比分析, 检验不同产品观测结果差异是否与观测方式有关, 利用时间序列地面观测数据验证黑河流域MCD15A3H LAI产品(Collection 6)的精度与评价产品的稳定性。具体目的包括:(1)基于地面联网观测时序数据生成满足MODIS LAI产品验证的参考产品;(2)基于参考产品, 验证MODIS LAI产品的精度;(3)评价MODIS LAI产品时间序列稳定性;(4)对MODIS LAI产品与地面实测LAI差异的原因进行分析。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域

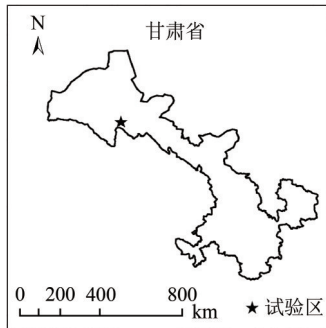
研究区为黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验的核心试验区($100^{\circ}21'36''E-100^{\circ}23'24''E$, $38^{\circ}50'24''N-38^{\circ}52'12''N$), 位置分布如图1(a)所示。研究区下垫面为典型的农田生态系统, 主要地表覆盖类型为玉米、果园、蔬菜、村庄和道路等, 能代表黑河中游灌区的作物结构与耕作方式。核心试验区为位于张掖市约10 km的大满超级站, 如图1(b)所示。观测对象为制种玉米(家淑珍等, 2014), 该区一般是在4月底播种玉米, 在10月初开始收割。于2018年和2019年6月1日—9月20日, 使用LAINet进行地面LAI值测量试验, 试验样方编号与年份如图1(c)所示。

2.2 野外实测数据

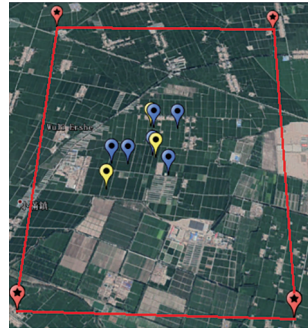
野外实测数据来自无线传感器网络叶面积指数观测系统, 该系统利用本研究自主研发的测量仪器(LAINet)进行测量。LAINet设计原理是自

动测量冠层上部太阳下行总辐射与冠层下部透过辐射(传感器中心波长 650 nm, 半高波宽 10 nm), 计算出不同太阳高度角的冠层透过率, 然后利用

多角度透过率解算出观测日的LAI。其详细原理与计算过程可参考文献(Qu等, 2014)。



(a) 试验区在甘肃省中位置示意图
(a) Schematic diagram of the location of the test area in Gansu Province



(b) 试验区边界及试验站点分布图
(b) Test area boundary and test sites distribution map



(c) 试验站点在试验区分布图
(c) Distribution map of test sites in the test area

图1 试验区样方及节点分布图((b)和(c)图均来自 Google Earth, 影像拍摄日为2019年7月31日, 其中, 黄色和蓝色标记点分别表示2018年和2019年观测点)

Fig. 1 Sample plot and node distribution map in the test area ((b) and (c) are from Google Earth. These images were taken on July 31, 2019. The yellow and blue symbols are the sites of year 2018 and year 2019, respectively)

分别于2018年和2019年6—9月, 在黑河中游进行LAINet的连续观测与验证, 处理后数据时间尺度为1 d。2018年在试验区部署了3个玉米样方, 每个玉米样方大小约为30 m×30 m, 观测期为6月11日—9月18日; 2019年则将样方数扩充到7个, 其中, 6个为玉米样方, 1个为果园样方, 观测期为6月1日—9月20日。2018年和2019年的样方部署分布图如图1(c)所示。可见, 2018年3个站点分别部署了5个冠层下节点和1个冠层上节点; 2019年站点设置4个冠层下节点, 1个冠层上节点。样方内LAINet节点部署分布示意图(以2019年站点2为例)如图2(a)所示, 编号分别为128、129、132和133的蓝色图标为4个冠层下节点, 而编号为109的红色图标为冠层上节点, 其中冠层下节点现场部署照片如图2(b)所示。此两年的LAINet数据集已在国家青藏高原科学数据中心(<http://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/>[2021-04-16])公开发布。

2.3 遥感数据

在遥感产品验证中, 所使用的卫星遥感数据主要达到3个方面的目的: 一是生成过渡尺度的高分辨率遥感产品, 在这个过程中可以是使用10 m分辨率的哨兵2号数据或者30 m分辨率的Landsat 8数据; 二是获取验证工作所需要的目标产品, 即

对应研究区的粗分辨率遥感产品, 如本文的验证目标产品为500 m分辨率的MODIS LAI产品; 三是获取分析参考产品与目标产品差异原因所需要的中间产品, 即为了计算遥感GI和CCI的粗分辨率遥感反射率产品, 如本文中使用的MOD09GA和MOD09GA遥感产品。本文使用的遥感数据集如表1所示。



(a) LAINet仪器下节点分布示意图
(a) Schematic diagram of Below Node distribution of LAINet



(b) 下节点现场部署照片
(b) Below Node site field deployment photo

图2 LAINet仪器下节点分布图及下节点部署
Fig. 2 Distribution map of Below Node of LAINet

上述遥感数据的处理在Google Earth Engine(GEE)平台上实现。选用的高分辨率卫星传感器有Landsat 8 OLI(Operational Land Imager)和Sentinel-2

(S2) 的多光谱传感器 MSI (Multispectral Instrument), 数据为经过大气校正的地表反射率产品 SR (Surface Reflectance), 基于上述反射率数据分别按照式 (1) 和式 (2) 计算了对应数据的归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 与增强植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index)。根据地面样方的经纬度坐标, 在可用的 Landsat 8 观测时间上执行影像数据集空间过滤操作, 从而得到与地面点对应的 NDVI 和 EVI, 最终得到一系列观测数据点对, 即 $(LAI_t, NDVI_t, EVI_t)$, 其中 t 为观

测时间。NDVI 和 EVI 的具体计算公式如下:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{NIR - R}{NIR + 6 \times R - 7.5 \times B + 1} \quad (2)$$

式中, NIR 是近红外波段地表反射率, R 是红色波段地表反射率, B 是蓝色波段地表反射率。NIR、 R 和 B 分别对应 Landsat 8 的第 5 波段、第 4 波段和第 2 波段, 对应 Sentinel-2 的第 8 波段、第 4 波段和第 2 波段。

表 1 遥感卫星数据列表

Table 1 The list of remote sensing satellite data

平台/传感器	空间/时间分辨率	时间范围	GEE 数据集名称	参数名称
Landsat/OLI	30 m/8 d	2015-01—2019-12	LANDSAT_LC08_C01_T1_SR	地表反射率
Sentinel-2/MSI	10 m/5 d	2018-06—2018-10, 2019-06—2019-10	COPERNICUS_S2_SR	地表反射率
Terra 和 Aqua/MODIS	500 m/8 d	2011-01—2019-12	MODIS/006/MCD15A3H	叶面积指数产品
Terra/MODIS	500 m/1 d	2018-06—2019-09	MODIS/006/MOD09GA	地表反射率
Terra/MODIS	1000 m/1 d	2018-01—2019-12	MODIS/006/MOD0CGA	海洋反射率

待验证的 MODIS LAI 是来自 Terra 和 Aqua 卫星的 MODIS 产品合成产品 (MCD15A3H Collection 6), 产品的空间分辨率为 500 m, 时间频率为 4 d, 覆盖研究区的 Tile 的行列编号是 H28V5。本文中使用的 MODIS LAI 数据时间为 2011 年—2019 年, 其中 2018 年和 2019 年的数据用来与参考产品对比验证产品精度, 2014 年—2019 年的数据用于试验区与参考产品对比进行稳定性评价, 而站点 MODIS LAI 时间序列分析所用到的数据则覆盖了全部时间段。

MOD09GA 为地表反射率产品, 空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 d, 波段范围为 1—7 波段。MOD0CGA 为海洋反射率数据产品, 空间分辨率为 1000 m, 时间分辨率为 1 d, 波段范围为 8—16 波段。利用 MOD09GA 和 MOD0CGA, 按照式 (3) 和 (4) 分别计算 MODIS GI、CCI。GI 和 CCI 用于与 LAI_{Net} LAI 和 MODIS LAI 对比分析, 以验证观测方式的差异对不同产品的影响。具体计算公式如下:

$$GI = \frac{G/R - 1}{G/R + 1} \quad (3)$$

$$CCI = \frac{B_{11} - B_1}{B_{11} + B_1} \quad (4)$$

式中, G 是绿色波段地表反射率, R 是红色波段地表反射率, G 和 R 分别对应 MOD09GA 的第 4 波段和第 1 波段。 B_{11} 为 MOD0CGA 第 11 波段反射率, B_1 为 MOD09GA 第 1 波段反射率。

2.4 方法概述

本文采用间接比较方法, 即利用高空间分辨率卫星遥感植被指数和地面实测 LAI 数据, 建立植被指数-LAI 经验回归模型, 反演高空间分辨率卫星遥感 LAI 参考图, 之后将 LAI 参考图升尺度到与 MODIS LAI 产品相同的分辨率, 并以升尺度卫星遥感 LAI 影像为参考 LAI 真值对 MODIS LAI 产品进行验证与评价。具体验证过程如图 3 所示。

2.4.1 MODIS LAI 产品精度验证

精度是反映测量值与真值接近程度的量, 在数值上可以用误差大小来表达, 在时间序列上, 可以通过 2 种产品相关性的高低来表达。本文利用以下 2 个指标进行精度验证: (1) 决定系数 (R^2), 是指由回归模型导出的模拟变量的变化可以用预测变量来解释的比例, 表征回归方程的拟合程度, 计算公式见式 (5), 在本文中用来判断 2 种产品相关性的高低; (2) 均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error), 是预测值与真实值偏差的平方与观测次数 n 比值的平方根, 计算公式见式 (6), 在本文中用来表示 MODIS LAI 产品精度的高低。决定系数的计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

式中, \bar{y} 为平均值, \hat{y}_i 为根据回归方程代入横坐标

变量的值。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

式中， x_i 为预测值（MODIS LAI）， y_i 为真实值（野外测量 LAI 或 Landsat 8 LAI）， n 为样本数（像素数）。

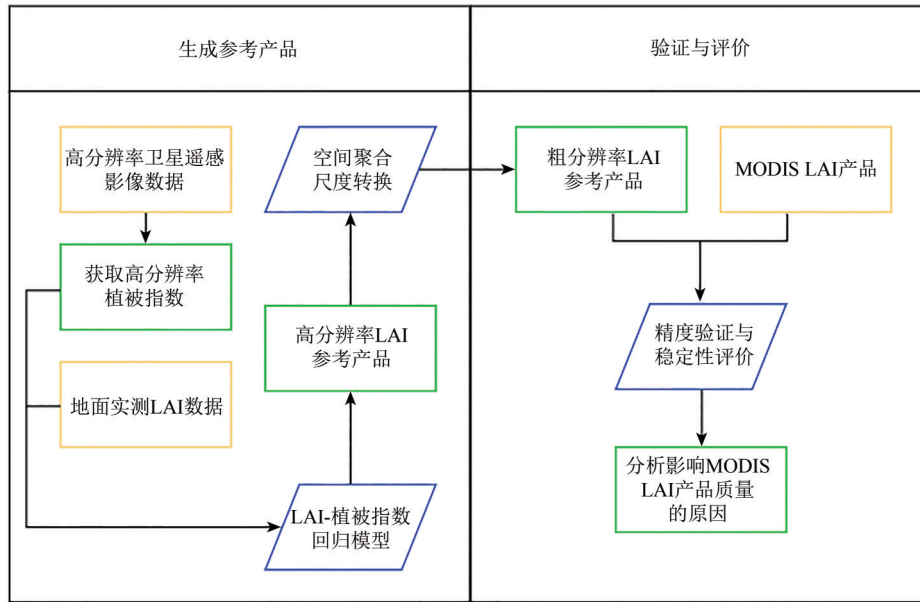


图3 MODIS LAI产品验证与评价流程图(黄色方框表示本文所用数据,蓝色四边形表示中间步骤,绿色方框表示每一步所得结果)

Fig. 3 Flow chart of MODIS LAI product verification and evaluation (The yellow box represents the data used in this article, the blue quadrilateral represents the intermediate step, and the green box represents the result of each step)

本文从两方面对 MODIS LAI 产品进行精度验证。一是对 MODIS LAI 产品和地面实测数据进行对比分析。二是与参考产品的对比分析。在进行时间序列趋势分析和相关性分析的同时，分成生长季与衰落季分别进行分析，生长季为一年中的第 170—240 d，衰落季为一年中的第 240—300 d。

2.4.2 MODIS LAI 产品稳定性评价

产品稳定性评价需要多次重复观测结果和描述产品（算法）自身可重复性的指标。本文从两方面评价 MODIS LAI 产品的稳定性：一是站点尺度上 MODIS LAI 产品本身的时间序列趋势分析；二是在区域尺度上与参考产品进行时间序列对比分析。

对于试验站点的产品稳定性评价，为了更明显地展示 MODIS LAI 的波动幅度，采用日间变化这一指标评价其稳定性，即用第 $(i+1)$ 天的 LAI 值减去第 i 天的 LAI 值表示 MODIS LAI 的日间变化。同时，为了判断多年 MODIS LAI 的时间序列变化趋势是否一致，并且消除 LAI 数值大小的影响，采

用变异系数 CV（Coefficient of Variation）这一指标，其为原始数据标准差与原始数据平均数的比值，反映了数据离散程度。

为了评价试验区域产品稳定性，本研究对 2014 年—2019 年 MODIS LAI 与参考产品均值以及 2018 年、2019 年地面实测数据进行时间序列趋势分析。选择 2014 年—2019 年数据进行分析，是因为 Landsat 8 发射日期为 2013 年 2 月 11 日，因此 GEE 上仅能下载 2013 年 4 月 4 日以后的 Landsat 8 数据。由于仪器出现问题，2018 年实测 LAI 数据在 8 月 8 日以后出现异常，所以此时间段内的 LAINet LAI 不做分析。

3 结果与分析

3.1 基于 Landsat 8 的遥感参考产品

分别利用卫星 NDVI/EVI 数据与 LAINet LAI 进行相关性分析，结果显示 Landsat 8 NDVI、Landsat 8 EVI、S2 NDVI、S2 EVI 与 LAINet LAI 的 R^2 分别为 0.67、0.51、0.20、0.16。可见 Landsat 8 NDVI 与

LAINet LAI 的相关性最好。因此, 进一步选择 Landsat 8 NDVI 与 LAINet LAI 建立回归关系, 回归

关系式如图 4 所示, 利用此回归关系反演 Landsat 8 LAI, 作为参考数据验证 MODIS LAI 产品。

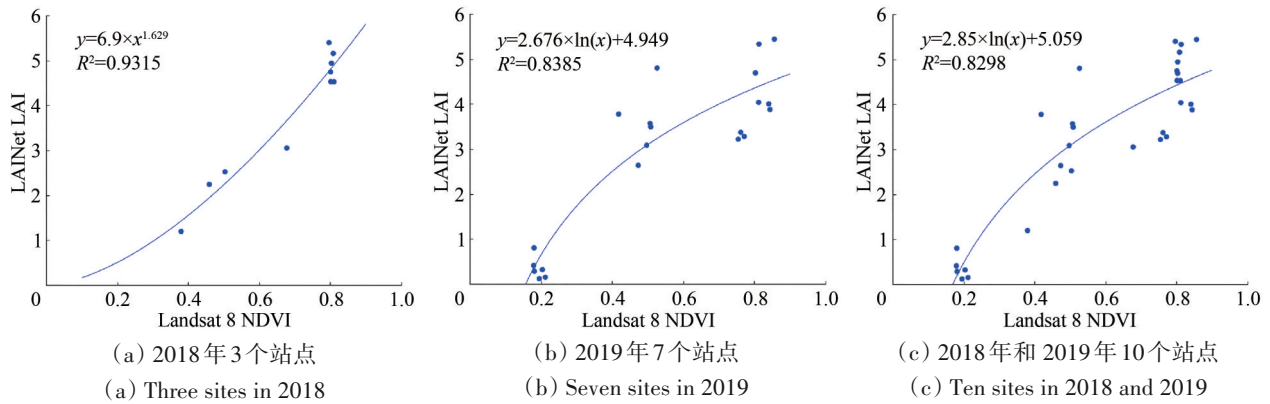


图4 Landsat 8 NDVI和LAINet LAI回归关系

Fig. 4 Regression relationship between Landsat 8 NDVI and LAINet LAI

对3种回归关系反演的2018年和2019年30 m Landsat 8 LAI数据和LAINet数据进行时间序列对比分析, 计算 R^2 和RMSE, 结果如表2所示。表2中“合并数据反演的2018年结果”和“合并数据反演的2019年结果”代表利用2018年和2019年10个站点Landsat 8 NDVI数据和LAINet数据建立的回归关系反演的Landsat 8 LAI结果。由表2可见, 合并2年的数据反演对2018年的效果并不好, RMSE从0.36升高到0.68, 增加明显; 但对2019年数据没什么影响, RMSE只升高了0.01。因此, 本研究选择用对应年份的回归关系式反演参考LAI产品; 30 m Landsat 8 LAI与LAINet LAI的 R^2 都在0.84以上, 说明两者相关性很强, 并且由回归关系式可以看出所有LAI数据点基本分布在1:1线附近。合并数据反演Landsat 8 LAI与LAINet时间序列分析结果如图5所示。可见30 m Landsat 8 LAI与LAINet时间序列趋势吻合度较高, 说明反演质量较好, 可用于MODIS LAI产品的验证。

表2 30 m Landsat 8 LAI与LAINet LAI对比分析结果

Table 2 Comparative analysis results of 30 m Landsat 8 LAI and LAINet LAI

反演结果	R^2	RMSE	回归关系式
2018年数据反演的2018年结果	0.93	0.36	$y=0.94x+0.2$
2019年数据反演的2019年结果	0.84	0.7	$y=0.84x+0.47$
合并数据反演的2018年结果	0.92	0.68	$y=0.54x+1.82$
合并数据反演的2019年结果	0.84	0.71	$y=0.89x+0.29$

基于高分辨率参考产品, 将粗分辨率像元内的多个高分辨像元值进行空间聚合, 得到聚合后

的像元均值作为粗分辨率参考产品。对2018年和2019年500 m Landsat 8 LAI和30 m Landsat 8 LAI进行相关性分析, R^2 都在0.91以上, 2种分辨率的LAI数据的相关性非常高, 说明升尺度参数的可靠性。

3.2 MODIS LAI产品精度验证结果

3.2.1 MODIS LAI与LAINet LAI直接对比分析

对MODIS LAI与LAINet LAI进行时间序列趋势分析和相关性分析, 如图6所示。结果表明, 与地面实测数据比较, MODIS LAI普遍低估, 产品低估最严重的时间是在夏季, 即玉米生长旺季。2018年MODIS LAI与LAINet LAI的 R^2 为0.26, RMSE为1.85; 2019年 R^2 为0.24, RMSE为1.94。说明MODIS LAI与实测数据相关性很低, 误差较大。究其原因, 一是二者的尺度差异, MODIS LAI空间分辨率为500 m, 而实测数据是站点尺度测量; 二是二者的观测对象不同。

3.2.2 MODIS LAI与参考产品对比分析

对站点MODIS LAI与聚合后生成的500 m Landsat 8 LAI进行时间序列趋势分析和相关性分析, 结果如图7和图8所示。可以看出, MODIS较Landsat 8低估了LAI。同时, 也可以看到, MODIS LAI与Landsat 8 LAI的相关性较与实测数据的相关性有所提高, 表明将地面观测数据进行尺度转换以后, 能够在一定程度上消除地表异质性对验证结果的影响。

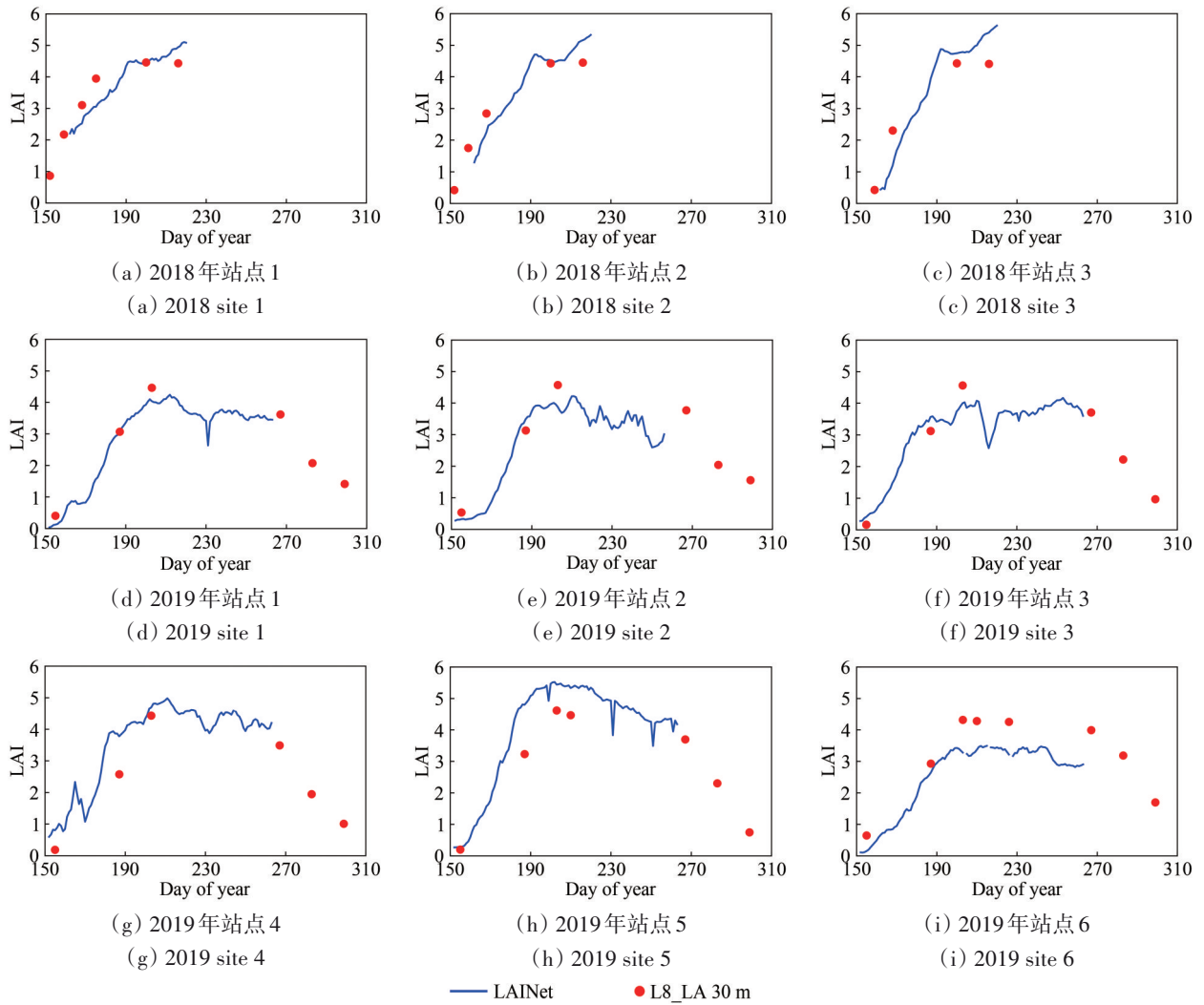
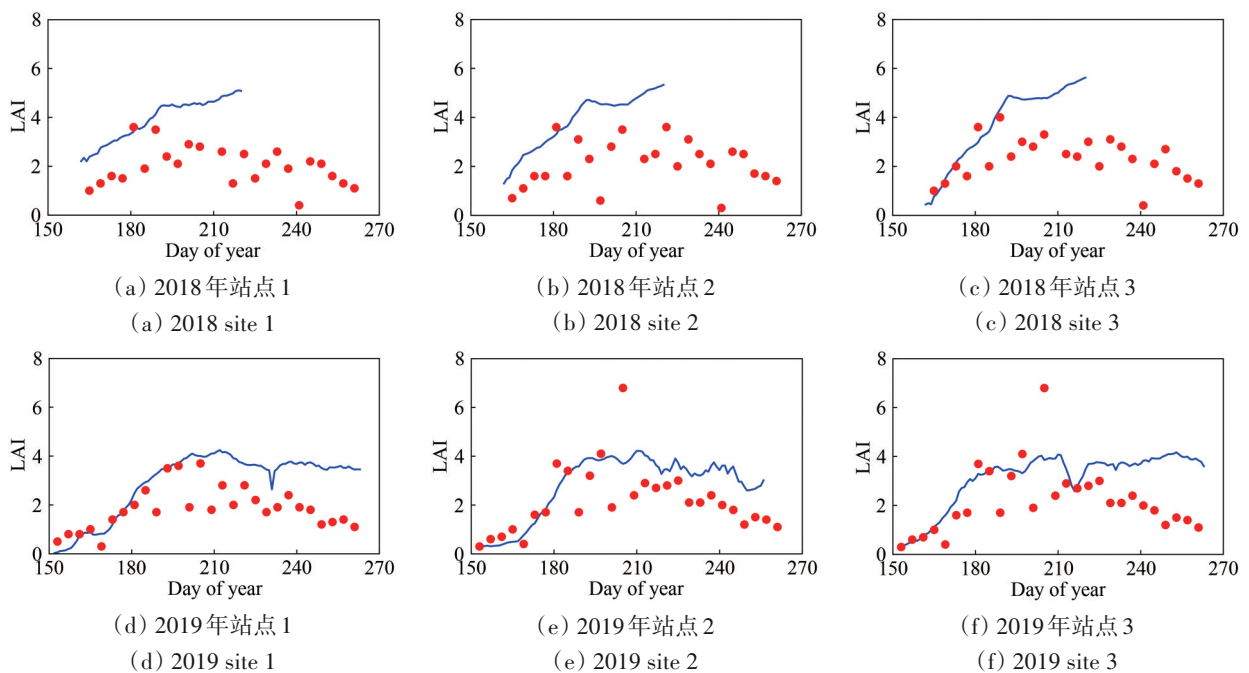


图5 合并数据反演的30 m Landsat 8 LAI与LAINet LAI时间序列图

Fig. 5 Time series plot of 30 m Landsat 8 LAI and LAINet LAI retrieved from combined data



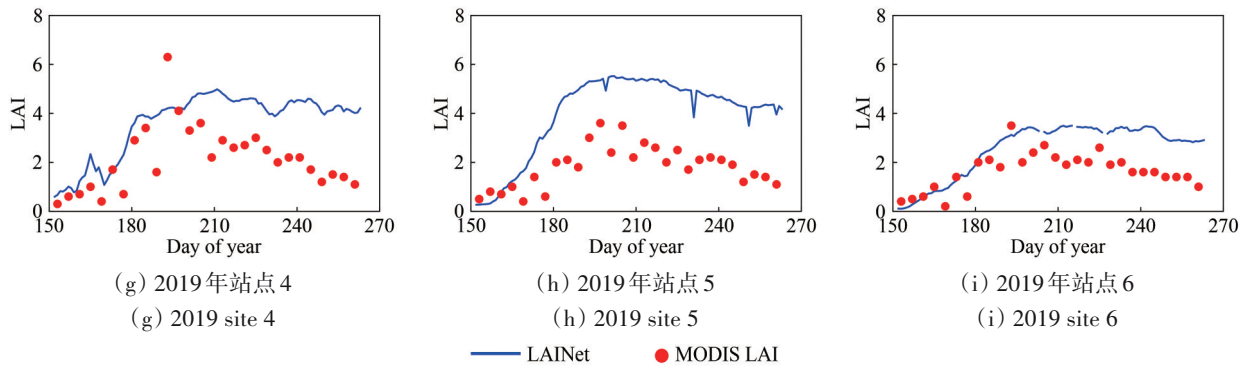


图6 MODIS LAI 与 LAINet LAI 时间序列图

Fig. 6 Time series diagram of MODIS LAI and LAINet LAI

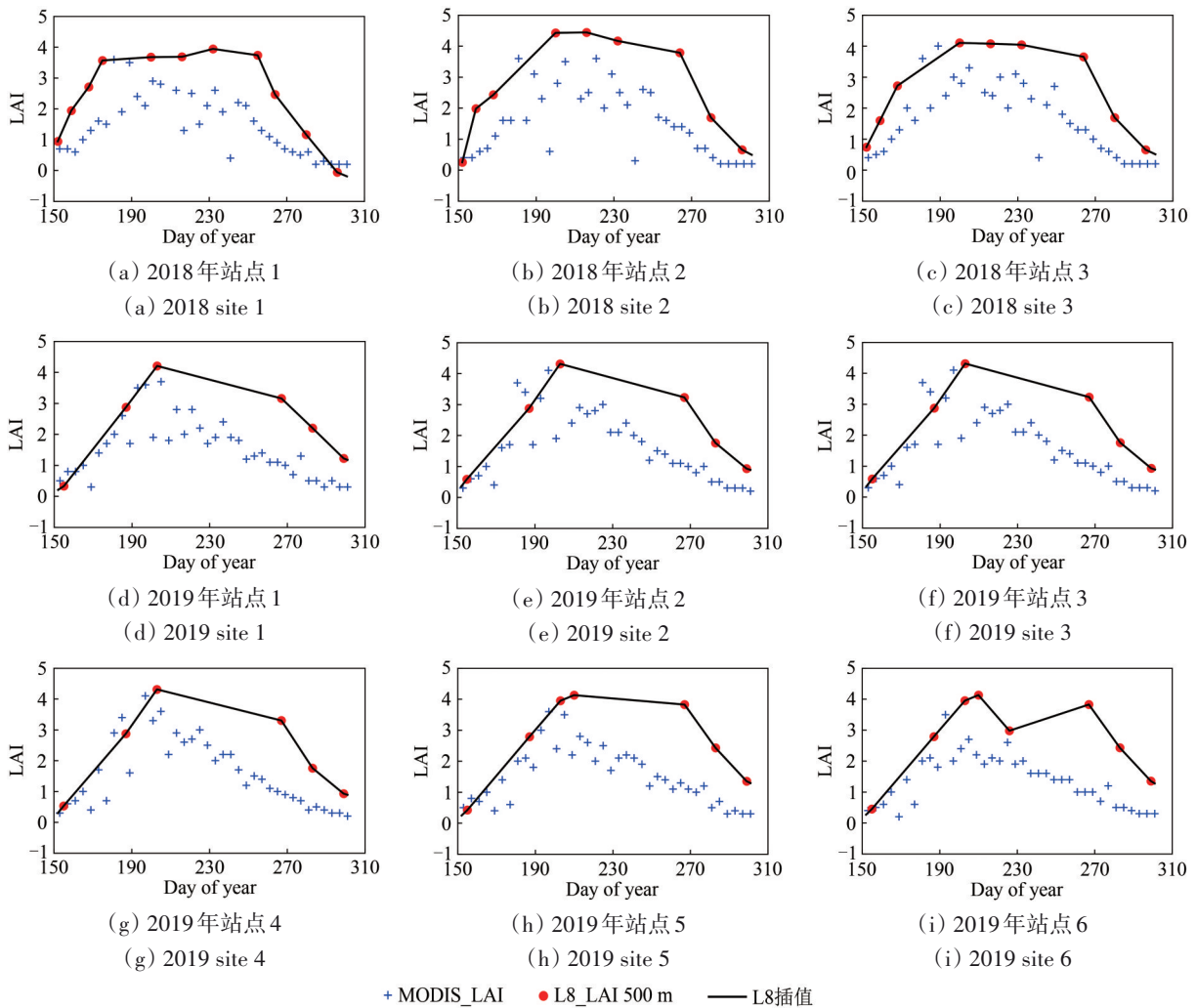


图7 2018、2019年MODIS LAI 与 500 m Landsat 8 LAI 时间序列图

Fig. 7 Time series diagram of MODIS LAI and 500 m Landsat 8 LAI in 2018 and 2019

考虑到MODIS产品在生长季与衰落季有不同的时序变化特征，因此，本研究分2个时间阶段分别进行相关性分析，结果显示，2018年生长季MODIS LAI与500 m Landsat 8 LAI的 R^2 为0.51，RMSE为1.17，衰落季 R^2 为0.72，RMSE为1.39；2019年生长

季 R^2 为0.51，RMSE为1.14，衰落季 R^2 为0.66，RMSE为1.84。MODIS LAI产品质量在植被生长季与衰落季的统计特征明显不同。总体来说，衰落季质量要比生长季较差，其中2019年RMSE达到1.84，远高于生长季的1.14。

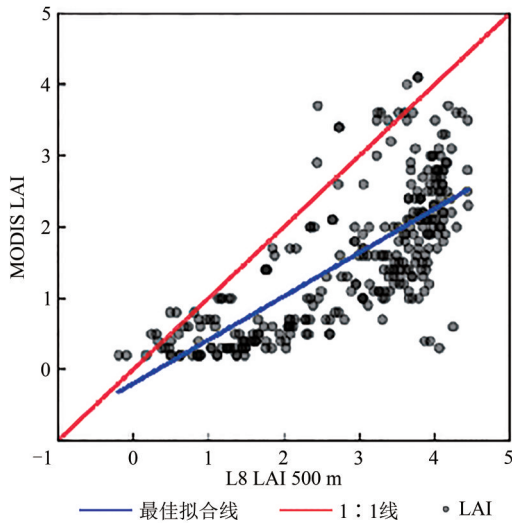


图8 2018年与2019年MODIS LAI与500 m Landsat 8 LAI相关性分析图

Fig.8 Correlation analysis diagram of MODIS LAI and 500 m Landsat 8 LAI in 2018 and 2019

对试验区MODIS LAI与500 m Landsat 8 LAI时间序列数据分别进行逐像元相关性分析。结果如图9所示。 R^2 取值绝大多数在0.1—0.4，误差比较大，RMSE大部分在0.75—2.0，其中最大误差出现在衰落季（257 d），可见500 m Landsat 8 LAI与MODIS LAI相关性总体较低。

3.3 MODIS 产品的稳定性评价

3.3.1 站点MODIS LAI时间序列分析

对2011年—2019年7个站点MODIS LAI产品进行时间序列趋势分析，如图10和图11所示，这

里只展示站点1的连续9年时间序列变化图和日变化值，其余站点的MODIS LAI时间序列变化图和日变化值见附录1图S1（附录1链接：<https://pan.baidu.com/s/ltYAQZZwPfqBcXfeYpnB5og>，提取码：0714）。由图10可见：MODIS LAI在生长季波动剧烈，而在非生长季趋势稳定，变化幅度在0.1—0.2变化，并且不同年份LAI变化趋势大致相同。由图11也可以发现MODIS LAI日变化绝对值较大日期集中在夏季（第170—240 d）。

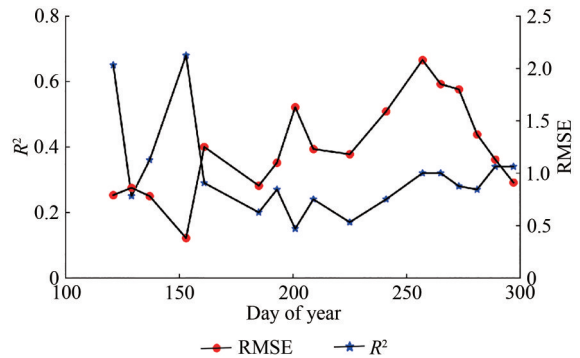
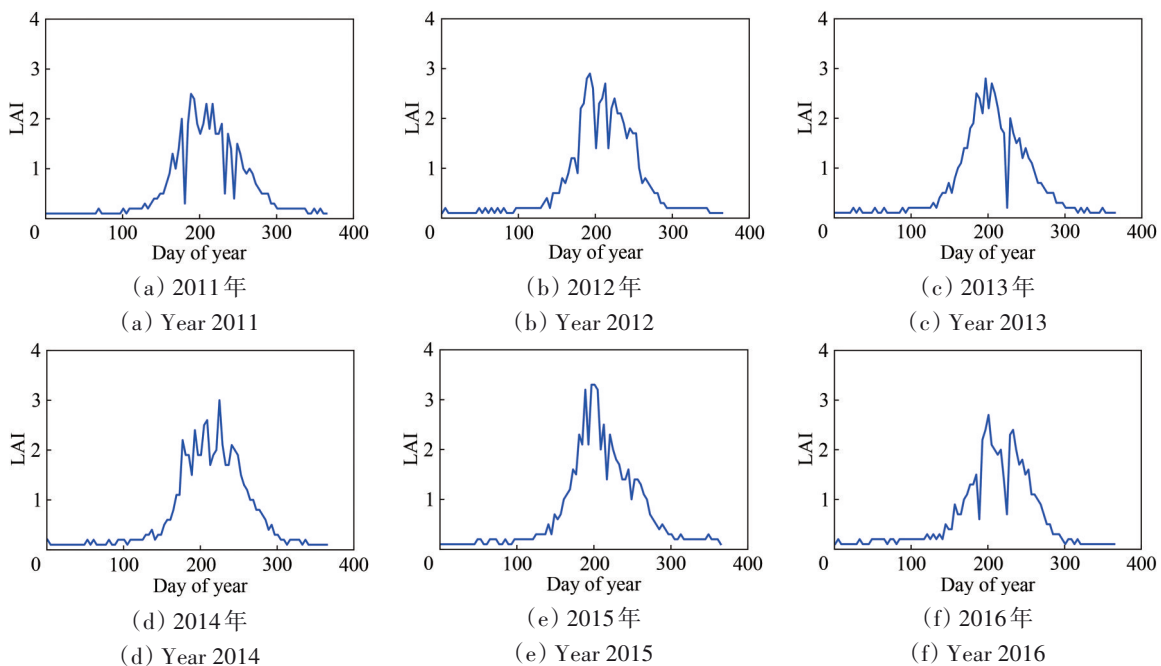


图9 不同天数MODIS和Landsat 8 LAI逐像元相关性分析结果

Fig. 9 Pixel-by-pixel correlation analysis results of MODIS and Landsat 8 LAI on different days

分别利用生长季与衰落季MODIS LAI值计算变异系数，结果如图12所示，其中值较高的衰落季。

由图12可以看出，9年来每个站点生长季CV变化不大，说明生长季波动剧烈现象对于每年各站点均成立。因此，每年各站点MODIS LAI时间序列变化和图10中显示的LAI变化趋势基本相同，具有明显的生长变化规律，生长旺季具有较大的波动性。



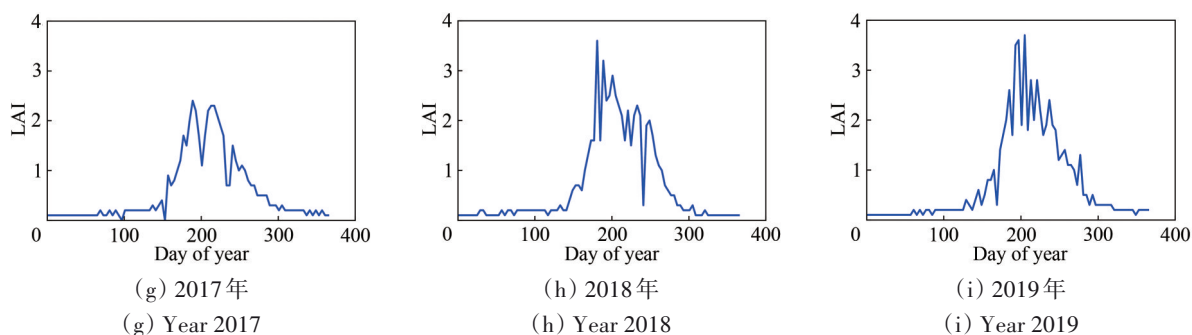


图 10 站点 1 的 2011 年—2019 年 MODIS LAI 时间序列图

Fig. 10 2011—2019 MODIS LAI time series diagram of site 1

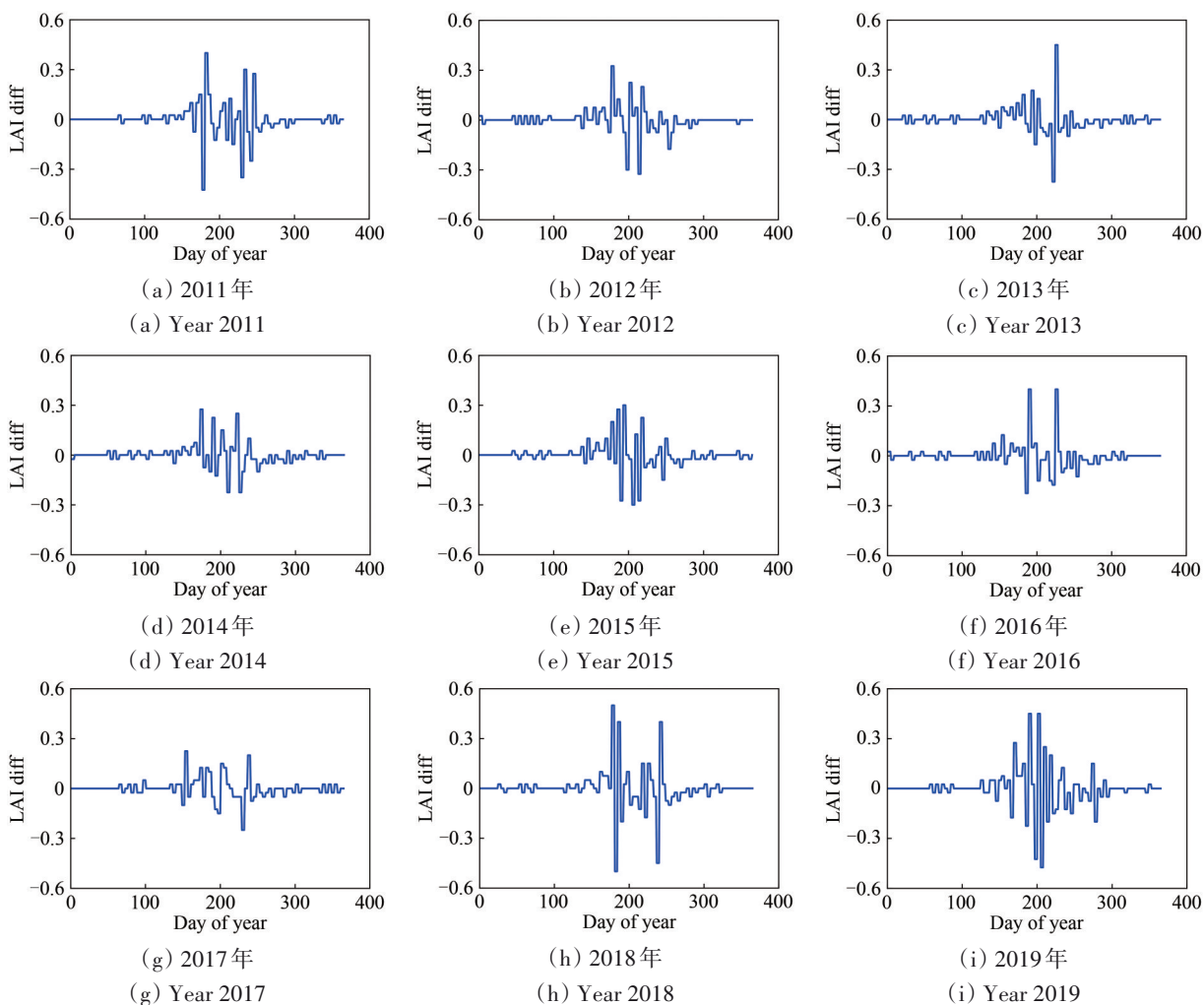


图 11 站点 1 的 2011 年—2019 年 MODIS LAI 日变化时间序列图

Fig. 11 2011—2019 MODIS LAI daily change time series diagram of site 1

3.3.2 MODIS LAI 与 Landsat 8 LAI 时间序列对比分析

对 2014 年—2019 年试验区 MODIS LAI 与 Landsat 8 LAI 的总体均值以及地面实测数据进行了时间序列趋势分析, 结果如图 13 所示。可以看出, 2 种 LAI 产品季节性明显, 生长季有明显的高峰。

Landsat 8 LAI 反演结果和 MODIS LAI 的长期时间序列变化趋势一致, 但可以明显看出 MODIS LAI 有明显的低估, 尤其是生长季。2018 年 8 月以后实测 LAI 高达 5.5, 而卫星影像 LAI 约为 3.5, 但 8 月以前 Landsat 8 LAI 反演结果与地面测量结果吻合较好, 7 月中旬—8 月中旬 2 种产品都有不同程度

的低估，MODIS LAI 低估更加明显。说明 Landsat 8 和 MODIS 能够大致捕捉真实 LAI 的时间轨迹，但生长旺季有低估现象，可能是因为反射率易饱和，所以不能反映 LAI 真实变化情况。

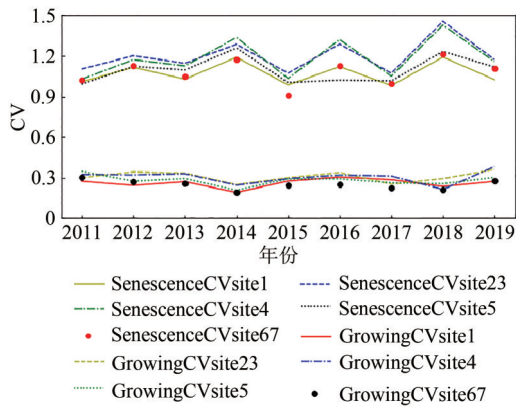


图 12 2011 年—2019 年 7 个站点生长季与衰落季变异系数图
Fig. 12 The coefficient of variation of the growing and senescence stage of the 7 sites from 2011 to 2019

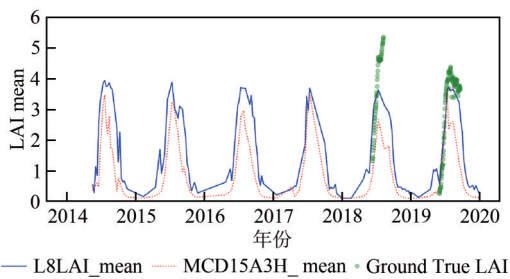
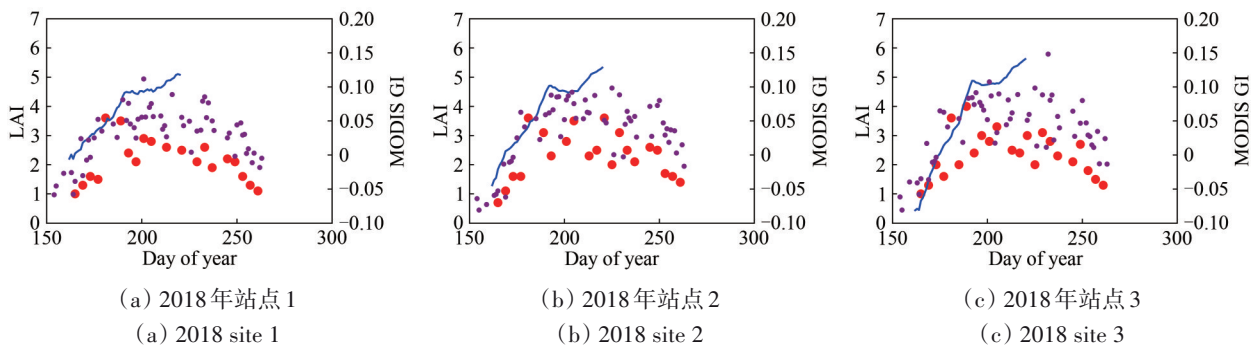


图 13 2015 年—2019 年 MODIS 和 Landsat 8 LAI 时间序列变化
Fig. 13 2015—2019 MODIS and Landsat 8 LAI time series change

3.4 MODIS LAI 产品与仪器测量 LAI 差异分析

分别对 2018 年—2019 年共 9 个站点的 MODIS GI、CCI 与 MODIS LAI 和 LAINet LAI 进行了时间序

列趋势分析，同时，将玉米生长季分成 2 个阶段，分别分析生长季前期（第 150—210 天）、生长季后期（第 210—240 天）以及整个生长季 MODIS GI、CCI 与 MODIS LAI 和 LAINet LAI 的相关性差异。结果如图 14、图 15 和表 3 所示。由图 14 可见，在生长季前期 MODIS GI 与 LAINet LAI 和 MODIS LAI 变化趋势都很相近。说明在生长前期，伴随着叶片生理生长同时，冠层结构也发生了非常明显的变化，且这种变化在遥感与地面观测尺度上均能够被敏感地记录下来。上述关系也可以从表 3 的统计特征上看出来。具体来说，在生长季前期，LAINet 和 MODIS LAI 这 2 个参数与 MODIS GI 具有相近的相关性 (R^2 分别是 0.68 和 0.79)。而在生长后期，它们的相关性具有明显的不同，前者 ($R^2=0.01$) 远远小于后者 ($R^2=0.11$)。因此可以得出，在玉米生长季后期，相比于 LAINet LAI，MODIS GI 与 MODIS LAI 的变化趋势更相近。上述结果表明，MODIS LAI 能够监测到叶绿素的变化情况，而相对 MODIS 来说，LAINet 对叶绿素变化较为不敏感。由图 15 和表 3 还可以发现 MODIS CCI 与 MODIS LAI、LAINet 的相关性与 MODIS GI 具有相似的规律，即生长季前期与两者均高度相关，而后期与 MODIS LAI 的相关性大于与 LAINet 的相关性。由于 GI 和 CCI 均能反映植被冠层叶片内的色素含量的变化，上述结果表明，MODIS LAI 产品比 LAINet 数据更能反应冠层色素衰减过程，而 LAINet 的观测数据更多的受到冠层叶片空隙物理密度的影响，生长季后期叶片衰老但没有明显落叶情况下，地面观测 LAI 值仍然保持高位水平，这是造成 LAINet 与 MODIS 观测结果差异的主要原因。



(a) 2018 年站点 1
(a) 2018 site 1

(b) 2018 年站点 2
(b) 2018 site 2

(c) 2018 年站点 3
(c) 2018 site 3

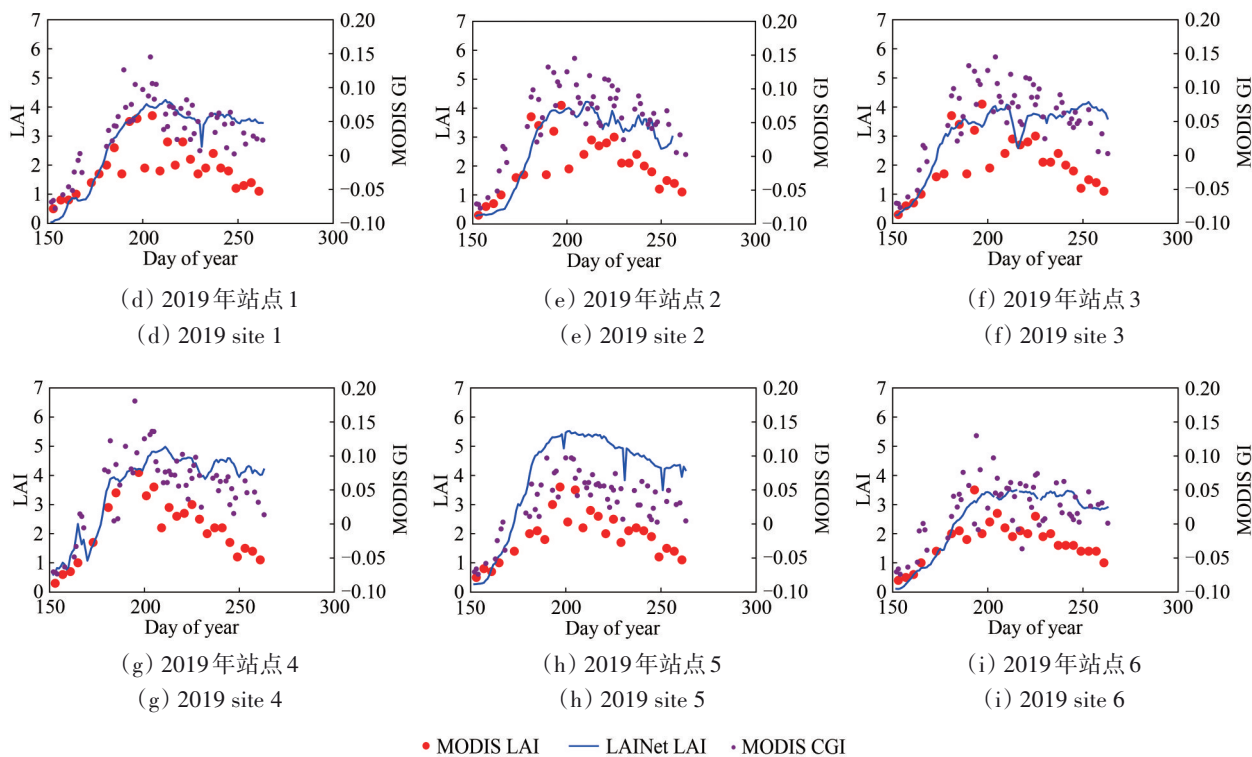
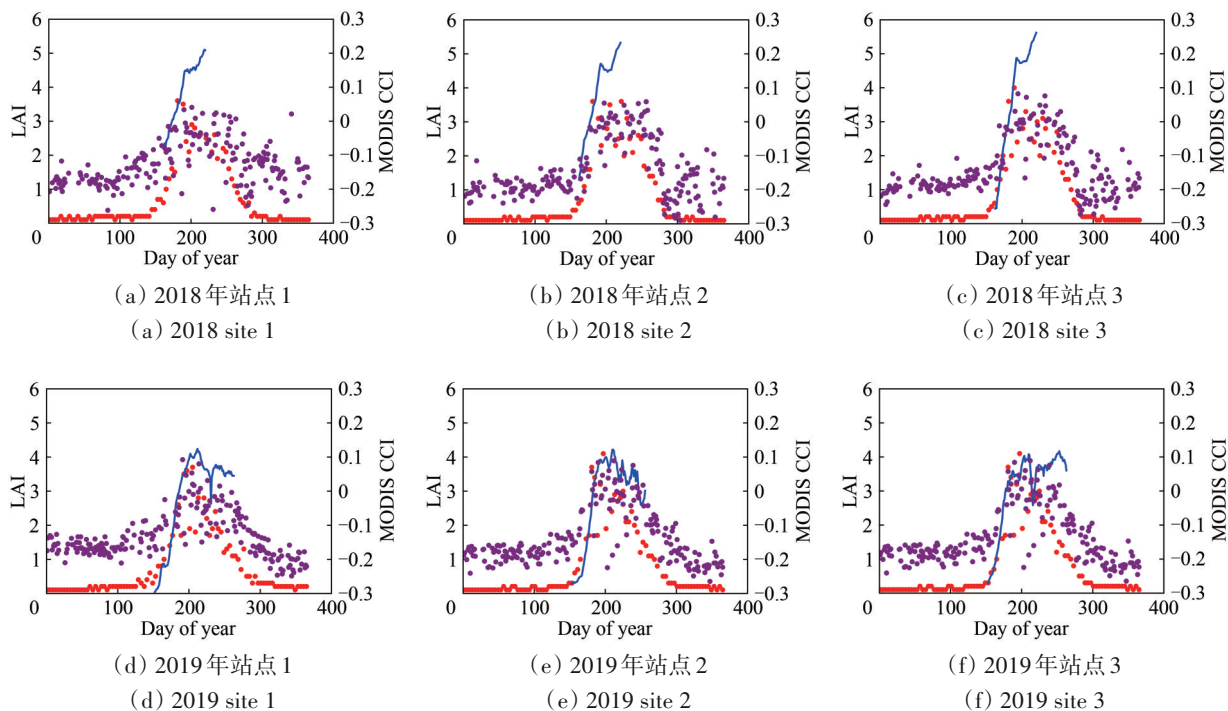


图 14 MODIS GI与MODIS LAI和LAINet LAI时间序列图

Fig. 14 Time series diagram of MODIS GI, MODIS LAI and LAINet LAI



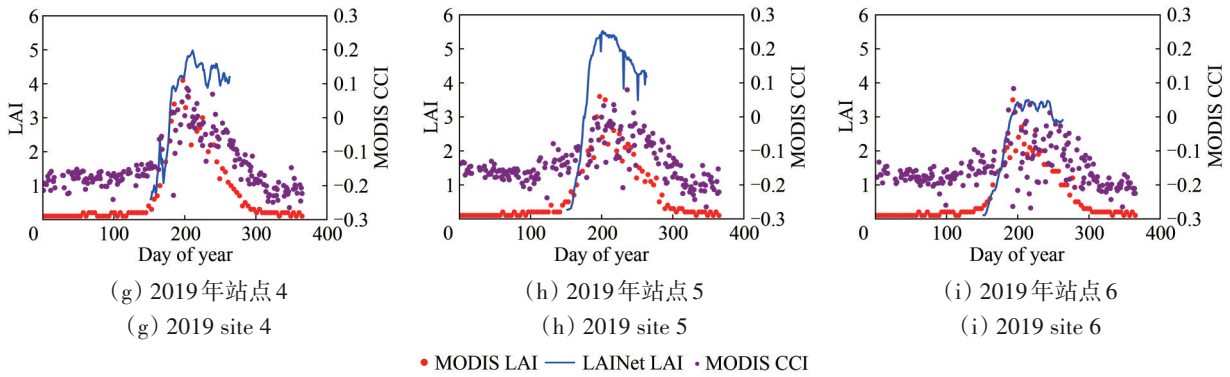


图15 MODIS CCI与MODIS LAI和LAINet LAI时间序列图
Fig. 15 Time series diagram of MODIS CCI, MODIS LAI and LAINet LAI

表3 MODIS GI、CCI与LAINet LAI和MODIS LAI相关性R²分析结果

Table 3 Correlation R² analysis results between MODIS GI, CCI and LAINet LAI and MODIS LAI

数据	MODIS GI			MODIS CCI		
	生长季 前期	生长季 后期	整个生 长季	生长季 前期	生长季 后期	整个生 长季
LAINet LAI	0.68	0.01	0.55	0.23	0.02	0.19
MODIS LAI	0.79	0.11	0.69	0.34	0.06	0.25

4 讨论

与传统的手持式LAI测量仪器（如LAI-2200C）相比，基于无线传感器网络的LAINet提供了近乎实时地自动收集以及远程数据传输的能力。因此，提供连续时间序列地面测量值是LAINet区别于现有人工测量设备的一个主要特点，这也为时间序列遥感产品验证提供了丰富的数据源。然而，研究表明，由于衰落阶段叶片叶绿素含量的下降，玉米冠层叶绿素与LAI之间的正相关关系从线性变为非线性（Gitelson等，2014）。因此，在用地面观测数据验证MODIS产品过程中，应该考虑到由于观测方式的差异带来的观测数据的偏差。

本研究发现在玉米生长后期，叶片叶绿素含量的下降是导致MODIS LAI与LAINet测量存在实质性差异的主要原因。LAINet基于测量冠层间隙率估算植被面积指数，用仪器从冠层底部向上观测时，只能看到冠层间隙率的变化，因此，在玉米生长后期，LAINet无法观测到色素变化引起的反射率的变化。在LAINet传感器设计中，为了保证进入传感器的光以直射光为主，配备了波长为650 nm的带通滤光片（屈永华等，2012），也就是

说，LAINet理论上可以观测到红光波段透射率的变化。虽然有文献表明玉米叶片反射率与透射率的变化几乎是同步的，如谢瑞芝等（2006）与周顺利（2006）所测量的叶片反射、透射与吸收率之间的关系表明，都受到叶片叶绿素含量变化的影响。但是，叶片透过率与冠层透过率之间具有明显的差异。唐延林等（2008）研究表明，随玉米冠层叶片叠加数增加，近红外反射率增加，透射率降低，而可见光反射率基本不变，透射率却急剧降低，在叶片大于两层时透射率趋于零。同样，谢瑞芝（2006）与周顺利等（2006）的观测数据也显示，玉米叶片光谱在红色波段的透过率小于1%，再考虑到冠层叶片层数的堆积，实际观测到的叶片光谱透过率可能接近于零，因此，在冠层这一层次上，基于冠层透过率计算LAI的LAINet仪器，可能不会对叶片叶绿素变化引起的透过率变化有较为敏感的反应。而卫星遥感通过测量植被冠层反射率来反演LAI。具体来说，MODIS产品算法依赖于红色和近红外波段的反射率，其中红色波段属于叶绿素的强吸收波段（谢瑞芝等，2006），近红外波段对叶片内部结构与冠层结构更为敏感。因此，MODIS LAI产品不仅仅代表了冠层结构的变化，也包含了部分冠层的色素变化信息。MODIS产品在玉米生长后期，即使植被冠层叶片面积并没有明显降低的情况下，由于叶片发黄，叶片中叶绿素的减少，此时MODIS LAI值会迅速下降。但是，LAINet的观测值并不能反应这种叶绿素衰减而引起的冠层反射率的变化。在这方面，地面测量的LAI与遥感估计的LAI之间的差异可以归因于两者对LAI定义差异，即前者是全植被面积指数PAI（Plant Area Index），而后者

为绿色叶面积指数 GLAI (Green leaf area index) (Yu 等, 2020)。

基于上述讨论, 推测主导观测值时间序列变化的2个主要因素是植株器官(如茎、叶)的物理尺寸变化与器官内物质成分(如叶绿素)变化, 其中这2个因素在玉米生长过程中, 在不同的生长阶段所占据的主导作用有所不同。在生长季前期, 由于器官生长与物质成分接近于同步变化, 两者为共同主导因素, 因此, 无论是 LAINet 还是 MODIS 均能相对准确地记录这个变化过程。而在生长季后期, 植株器官停止生长而又没有明显凋落情况下, 植株器官物质变化占了主导作用, 这种物质变化对冠层反射率的敏感性要大于透过率, 因此, MODIS 传感器仍能一定程度上记录下冠层表面色素的变化过程, 而 LAINet 则无法同步记录这种变化。然而, 虽然本次实验数据能够验证上述推测的结论, 但是, 如果能够进一步地从辐射传输模型模拟该过程和基于更多的观测实验数据进行分析, 则更能在物理原理上解释该现象, 从而可以对遥感产品地面验证实验提出更为普适性的建议, 也是后期的一个工作方向。

需要说明的是, 本文没有展开空间异质对验证结果的影响, 主要原因是经过统计分析发现, 对于所有试验站点, 每个 MODIS 像元包含的 Landsat 8 NDVI 的像元值的标准差范围很小, 为 0.08—0.18, 说明空间异质性较小, 具体分析详见附录 1。但是, 对于空间异质性较强的区域, 仍然建议考虑在空间异质性条件下分析不同观测尺度对验证结果的影响。

5 结 论

本研究验证了黑河中游农作物 MODIS LAI 产品的精度并对产品稳定性进行了评价, 主要结论如下:

(1) 在时间序列上, MODIS LAI 产品能够刻画植被生长和凋落的季节特征。总体来说, 生长季的质量要优于衰落季。但是, MODIS LAI 产品在生长季波动剧烈, 而在非生长季比较稳定。

(2) 与基于 Landsat 8 的参考真值比较, MODIS LAI 总体低估明显, 尤其是衰落季。

(3) MODIS LAI 与 LAINet LAI 在生长季后期差异较大, 主要是因为二者观测方式的差异。

因此, 可以利用时间序列 LAINet 实测数据,

结合高分辨率卫星遥感植被指数, 生成与 MODIS LAI 产品分辨率一致的参考 LAI 产品, 从而对 MODIS LAI 产品进行精度验证与稳定性评价。研究成果可为使用黑河中游地区 MODIS LAI 产品的用户提供产品性能的参考依据, 为使用定量遥感反演算法的用户提供质量改进的参考。未来将使用 LAINet 进行更多植被类型的连续田间测量, 以收集不同地区、不同作物类型的 LAI 时间序列地面实测数据, 为遥感 LAI 产品时间序列验证提供更多地面实测参考数据集。

参考文献(References)

- Adams III W W and Demmig-Adams B. 1994. Carotenoid composition and down regulation of photosystem II in three conifer species during the winter. *Physiologia Plantarum*, 92(3): 451-458 [DOI: 10.1111/j.1399-3054.1994.tb08835.x]
- Brede B, Gastellu-Etchegorry J P, Lauret N, Baret F, Clevers J G P W, Verbesselt J and Herold M. 2018. Monitoring forest phenology and leaf area index with the autonomous, low-cost transmittance sensor PASTiS-57. *Remote Sensing*, 10(7): 1032 [DOI: 10.3390/rs10071032]
- Brown L A, Ogutu B O and Dash J. 2020. Tracking forest biophysical properties with automated digital repeat photography: a fisheye perspective using digital hemispherical photography from below the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287: 107944 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.107944]
- Chen J M and Black T A. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 15(4): 421-429 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x]
- Cohen W B, Maersperger T K, Yang Z Q, Gower S T, Turner D P, Ritts W D, Berterretche M and Running S W. 2003. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 88(3): 233-255 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.06.006]
- Ensminger I, Svshnikov D, Campbell D A, Funk C, Jansson S, Lloyd J, Shibistova O and Öquist G. 2004. Intermittent low temperatures constrain spring recovery of photosynthesis in boreal Scots pine forests. *Global Change Biology*, 10(6): 995-1008 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2004.00781.x]
- Fang H L, Wei S S and Liang S L. 2012. Validation of MODIS and CYCLOPES LAI products using global field measurement data. *Remote Sensing of Environment*, 119: 43-54 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.006]
- Fu L Z, Qu Y H and Wang J D. 2017. Bias analysis and validation method of the MODIS LAI product. *Journal of Remote Sensing*, 21(2): 206-217 (付立哲, 屈永华, 王锦地. 2017. MODIS LAI 产

- 品真实性检验与偏差分析. 遥感学报, 21(2): 206-217 [DOI: 10.11834/jrs.20175336]
- Gamon J A, Huemmrich K F, Wong C Y S, Ensminger I, Garrity S, Hollinger D Y, Noormets A and Peñuelas J. 2016. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(46): 13087-13092 [DOI: 10.1073/pnas.1606162113]
- Gitelson A A, Peng Y, Arkebauer T J and Schepers J. 2014. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: Implications for remote sensing of primary production. *Remote Sensing of Environment*, 144: 65-72 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.004]
- Hu S Y and Zhang W C. 2005. A quality assessment of MODIS LAI product in Heihe and Hanjiang river basins. *Remote Sensing Information*, (4): 22-27 (胡少英, 张万昌. 2005. 黑河及汉江流域MODIS叶面积指数产品质量评价. 遥感信息, (4): 22-27) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2005.04.007]
- Jia S Z, Ma M G and Yu W P. 2014. Validation of the LAI product in Heihe River Basin. *Remote Sensing Technology and Application*, 29(6): 1037-1045 (家淑珍, 马明国, 于文凭. 2014. 黑河中游LAI产品的真实性检验研究. 遥感技术与应用, 29(6): 1037-1045) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.6.1037]
- Kanemasu E T. 1974. Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean. *Remote Sensing of Environment*, 3(1): 43-47 [DOI: 10.1016/0034-4257(74)90037-6]
- Öquist G and Huner N P A. 2003. Photosynthesis of overwintering evergreen plants. *Annual Review of Plant Biology*, 54: 329-355 [DOI: 10.1146/ANNUREV.PLANT.54.072402.115741]
- Ottander C, Campbell D and Öquist G. 1995. Seasonal changes in photosystem II organisation and pigment composition in *Pinus sylvestris*. *Planta*, 197(1): 176-183 [DOI: 10.1007/BF00239954]
- Qu Y H, Han W C, Fu L Z, Li C R, Song J L, Zhou H M, Bo Y C and Wang J D. 2014. LAI Net - A wireless sensor network for coniferous forest leaf area index measurement: design, algorithm and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 108: 200-208 [DOI: 10.1016/j.compag.2014.08.003]
- Qu Y H, Wang J D, Dong J and Jiang F B. 2012. Design and experiment of crop structural parameters automatic measurement system. *Transactions of the CSAE*, 28(2): 160-165 (屈永华, 王锦地, 董健, 姜富斌. 2012. 农作物冠层结构参数自动测量系统设计与试验. 农业工程学报, 28(2): 160-165) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.028]
- Sun C X, Liu L Y and Guan L L. 2013. Validation of the GLASS LAI products in Xilinhot grassland. *Remote Sensing Technology and Application*, 28(6): 949-954 (孙晨曦, 刘良云, 关琳琳. 2013. 内蒙古锡林浩特草原GLASS LAI产品的真实性检验. 遥感技术与应用, 28(6): 949-954)
- Tan B, Hu J N, Zhang P, Huang D, Shabanov N, Weiss M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2005. Validation of moderate resolution imaging spectroradiometer leaf area index product in croplands of Al-pilles, France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D1): D01107 [DOI: 10.1029/2004JD004860]
- Tang Y L, Huang J F, Wang X Z and Cai S H. 2008. Study on hyper spectral characteristics of corn leaves and their correlation to chlorophyll and carotenoid. *Journal of Maize Sciences*, 16(2): 71-76 (唐延林, 黄敬峰, 王秀珍, 蔡绍洪. 2008. 玉米叶片高光谱特征及与叶绿素、类胡萝卜素相关性的研究. 玉米科学, 16(2): 71-76)
- Xie R Z, Zhou S L, Wang J H and Jiang H R. 2006. Comparison of the leaf hyperspectral reflectance and absorptance in relation to the leaf pigment contents in corn plants. *Journal of Maize Sciences*, 14(3): 70-73 (谢瑞芝, 周顺利, 王纪华, 蒋海荣. 2006. 玉米叶片高光谱反射率、吸收率与色素含量的关系比较分析. 玉米科学, 14(3): 70-73) [DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.2006.03.021]
- Xu X J, Du H Q, Zhou G M and Li P H. 2016. Method for improvement of MODIS leaf area index products based on pixel-to-pixel correlations. *European Journal of Remote Sensing*, 49(1): 57-72 [DOI: 10.5721/EuJRS20164904]
- Yang F, Li Z W, Bao Y H, Li X Y, Zhang B H and Xin X P. 2016. Comparison of different LAI products in hulunber meadow steppe. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(S1): 153-160 (杨帆, 李振旺, 包玉海, 李晓宇, 张保辉, 辛晓平. 2016. 不同叶面积指数遥感产品在呼伦贝尔草甸草原的应用对比. 农业工程学报, 32(S1): 153-160) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.022]
- Yang W Z, Tan B, Huang D, Rautiainen M, Shabanov N V, Wang Y, Privette J L, Huemmrich K F, Fensholt R, Sandholt I, Weiss M, Ahl D E, Gower S T, Nemani R R, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2006. MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1885-1898 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.871215]
- Yu L H, Shang J L, Cheng Z Q, Gao Z B, Wang Z X, Tian L, Wang D T, Che T, Jin R, Liu J G, Dong T F and Qu Y H. 2020. Assessment of cornfield LAI retrieved from multi-source satellite data using continuous field LAI measurements based on a wireless sensor network. *Remote Sensing*, 12(20): 3304 [DOI: 10.3390/rs12203304]
- Zhou S L, Xie R Z, Jiang H R and Wang J H. 2006. Selection of the wavelengths of peak values in analyzing leaf water status by using leaf reflectance, transmittance and absorptance in corn plants. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 22(5): 28-31 (周顺利, 谢瑞芝, 蒋海荣, 王纪华. 2006. 用反射率、透射率和吸收率分析玉米叶片水分含量时的峰值波长选择. 农业工程学报, 22(5): 28-31) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2006.05.007]
- Zhu X C, Yuan G F, Yi X B and Du T. 2014. Leaf area index inversion of riparian forest in the lower basin of Tarim River based on Landsat 8 OLI images. *Arid Land Geography*, 37(6): 1248-1256 (朱绪超, 袁国富, 易小波, 杜涛. 2014. 基于Landsat 8 OLI影像的塔里木河下游河岸林叶面积指数反演. 干旱区地理, 37(6): 1248-1256) [DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.06.019]

Time-series accuracy validation and variation characteristic analysis of MODIS leaf-area index products for crop in the middle reaches of the Heihe River

WANG Dantong, QU Yonghua

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

2. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products/Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Leaf-Area Index (LAI) is an important canopy structural parameter that accounts for the qualities of the growth state of vegetation. MODIS LAI product is one of the most commonly used remote-sensing LAI products in the world. However, the quality of MODIS LAI products varies with different situations because of variations in surface heterogeneity, data quality, and model accuracy, among others. The LAINet instrument, which is based on the wireless sensor network, can automatically obtain the LAI measured data with more intensive time frequency. It can provide strong support for the validation of satellite remote-sensing LAI products.

This article aims to validate the accuracy and evaluate the stability of MCD15A3H LAI products (Collection 6) with time-series ground-observation data. The specific objectives include the following: (1) generation of reference products that meet MODIS LAI product validation based on ground network observation time-series data, (2) validation of accuracy of MODIS LAI products based on reference products, (3) evaluation of the time-series stability of MODIS LAI products, and (4) analysis of the reasons for the difference between the MODIS LAI product and the measured LAI.

This work adopts an indirect comparison method, that is, establishing an empirical regression model based on time-series ground-measured LAI and high-spatial-resolution satellite remote-sensing vegetation index to obtain a high-spatial-resolution satellite remote-sensing LAI reference map. The resolution of the reference map is upscaled to the same resolution as those of MODIS LAI products. Finally, we validate the accuracy and evaluate the stability of MODIS LAI products with the upscaled satellite remote-sensing LAI image.

Results show that compared with the reference true value of Landsat 8, the quality of the growing stage ($RMSE_{2018}=1.17$, $RMSE_{2019}=1.14$) is better than that of the senescence stage ($RMSE_{2018}=1.39$, $RMSE_{2019}=1.84$), and MODIS LAI is generally underestimated to Landsat LAI, especially in the late growing stage. MODIS LAI products can portray the seasonal characteristics in the vegetation growth and falling stages in time series, but the instability in the early period of growth is stronger than that in the later period. The difference in observation methods is the main reason for the underestimation of MODIS LAI, that is, the LAI value of the remote-sensing sensor is affected by the decrease in chlorophyll in the late growing season because the sensor observes from the space platform in the downward direction. Conversely, the LAINet instrument observes from the bottom of the canopy in the upward direction, which is primarily affected by the canopy-gap fraction. However, it is insensitive to changes in the pigment of leaves.

The accuracy validation and stability evaluation results of MODIS LAI products show that the time-series LAI can be retrieved using ground-based data and satellite remote-sensing data. However, considering the difference between the observation objects and algorithm principles of MODIS LAI and LAINet LAI is necessary when using the late-growing-season data of corn crops.

Key words: MODIS, leaf area index, LAINet, accuracy validation, stability evaluation

Supported by National Natural Science Foundation Major Program of China (No. 42192580, 42192581)