

河北栾城站小麦叶面积指数数据集（2019）—— “中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列 数据集研发与内容

孙源¹, 杨健¹, 周翔¹, 余涛¹, 顾行发^{1*}, 陈云坪^{2*}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

2. 电子科技大学, 成都 611731

摘要: “中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”（简称“LAI 星地网络”）自 2018 年开始建设, 支撑仪器为叶面积指数无线传感网络观测系统（简称“LAI-NOS”）, 数据全程自动观测, 无人工干预。“LAI-NOS”于 2019 年 3 月 22 日在河北栾城真实性检验站（中心坐标: 114°41'34.80"E, 37°53'22.51"N）布设完成, 持续获取叶面积指数数据, 地物类型为华北区域典型作物——冬小麦和夏玉米, 耕作方式为轮作。本数据集选取栾城站小麦生长季 2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日（小麦返青期至成熟期）三个相邻节点（0901、0902 和 0904）“LAI-NOS”数据, 包括:（1）2019 年栾城站 3 个“LAI-NOS”节点地理位置数据;（2）2019 年栾城站 3 个“LAI-NOS”节点 2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日每日叶面积指数数据。该数据集存储为.xlsx、.shp 和.kmz 数据格式, 由 9 个文件组成, 数据量为 25.6 KB（压缩为 2 个文件, 21.9 KB）。

关键词: 河北栾城; 小麦; LAI 星地网络; LAI-NOS; 平稳窗口算法

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.03.04>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.03.04>

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/geodp.2023.09.08.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.09.08.V1>.

1 前言

叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）被广泛采用的定义方式为单位地表绿叶总面积一半^[1], 是一个无量纲值。叶面积指数在植被冠层研究中占极其重要的地位, 作为植被冠层

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

基金项目: 中华人民共和国财政部（2017-000052-73-01-001735, 30-Y60B01-9003-22/23）

*通讯作者: 顾行发, 中国科学院空天信息创新研究院, guxf@aircas.ac.cn;

陈云坪, 电子科技大学, chenyp@uestc.edu.cn

数据引用方式: [1] 孙源, 杨健, 周翔等. 河北栾城站小麦叶面积指数数据集（2019）——“中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列数据集研发与内容[J]. 全球变化数据学报, 2023, 7(3): 262–271. <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.03.04>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.03.04>. [2] 孙源, 杨健, 高海亮等. 河北栾城站小麦叶面积指数数据集（2019）——“中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.09.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.09.08.V1>.

核心结构参数与植被生物、物理过程密切相关，如光合、呼吸和蒸腾作用等，能够为植被冠层表面的能量交换提供定量化的信息^[2]，是反映植被生长状况，植被生产力评估、碳循环及气候研究等全球生态研究的重要输入参量。因此，快速、准确获取叶面积指数对于评估植物的生长状态、生态系统的结构和功能具有十分重要的意义。

近年来随着遥感技术的快速发展，不同时空分辨率及成像方式的卫星陆续发射成功，为用户提供了丰富的遥感数据，在此基础上衍生出了多种 LAI 遥感数据产品，如 MODIS LAI、GLASS LAI、GEOV1 LAI^[3]等，（见表 1）。LAI 遥感数据产品的反演过程受地表异质性、遥感数据及相关计算模型等多种因素影响，是否准确可靠、能否反映地表相应参量的实际情况都将直接影响使用效果，因此，对 LAI 遥感产品真实性检验研究具有十分重要意义，其中 LAI 遥感产品相对真值获取是 LAI 遥感产品真实性检验研究中非常关键的环节。LAI 遥感产品相对真值获取一般采用能够代表地面目标的地面观测值，从 LAI 测量原理及是否接触植被，分为直接测量法和间接测量法两类。直接测量法在所有 LAI 测量方式中测量精度最高，常用于其他测量方式的校准标准，但具有一定破坏性，对时间及人力、物力消耗较大，另外样本的代表性有时并不能够完全得到保证。依据叶片收集方式，直接法又可细分为破坏性方法和非破坏性方法^[4]，破坏性方法如代表树法、区域采样法，格点法和方格网法等，后者多指落叶框收集法^[5, 6]。

间接测量法通常需要采用光学仪器来获得 LAI，因此也称“光学仪器法”，常见的如 LAI-2000 系列冠层分析仪、TRAC 分析仪及基于半球影像的 LAI 测量仪等。相较于直接测量法，间接测量法设备便携方便、快速高效、通用性强、测量真确性较高等优点广泛应用于植被冠层参数的地面数据获取。随着无线网络技术的发展，无线传感器网络技术与 LAI 光学仪器测量法相结合的方式在实际中得到广泛应用，以该技术研发的叶面积指数无线传感网络观测系统（简称“LAI-NOS”）具备仪器法单点测量的所有优势，同时还兼具遥感长期较大范围监测优点，且测量结果精确可靠，维护方便，为 LAI 遥感产品提供长时间、稳定可靠的地面观测数据^[7]。

表 1 主要 LAI 遥感数据产品

产品名称	发布单位	空间分辨率	时间频率	主要特点
MODIS LAI	美国国家航空航天局	0.5 km	8 天	覆盖全球，适用于大范围区域 LAI 监测
SPOT/VEGETATION LAI	法国国家地理院	0.5 km	10 天	提供高精度的 LAI 监测数据，适用于农业和森林等领域
GLOBMAP LAI	中科院地理研究所	1 km	10 天	提供高质量的 LAI 监测数据，可与其他遥感产品联合应用
CYCLOPES LAI	欧洲地理信息科学联盟	0.5 km	10 天	结合多种遥感数据和地面观测数据，提供高质量的 LAI 监测数据
GLASS LAI	北师大	0.5 km	8 天	运用广义神经网络

LAI 为植被叶片面积与占地面积之比，在短时间不会出现太大变化，但由于采集环境变化（例如光照条件、风、云等环境条件的变化），造成测量值的较大波动。人工测量条件下，可选择早、晚或无风、阴天等天气条件下进行测量，但自动仪器目前难以对环境条件

适宜性进行判断,同时“LAI-NOS”系统一般每 5 分钟进行采样将会得到大量冗余 LAI 值。针对这一问题,本文阐明了河北栾城站小麦叶面积指数数据集(2019)——“中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列数据集的生产与验证结果,采用“平稳窗口法”对原始测量数据进行筛选预处理,剔除异常值,每日获取一个有效地面测量数据^[7]。

2 数据集元数据简介

《河北栾城站小麦叶面积指数数据集(2019)——“中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列数据集》^[8]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 2。

表 2 《河北栾城站小麦叶面积指数数据集(2019)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	河北栾城站小麦叶面积指数数据集(2019)——“中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列数据集
数据集短名	LuanchengLAI_2019
作者信息	孙源,中国科学院空天信息创新研究院, sunyuan@aircas.ac.cn 杨健,中国科学院空天信息创新研究院, yangjian@aircas.ac.cn 高海亮,中国科学院空天信息创新研究院, gaohailiang@aircas.ac.cn 陶醉,中国科学院空天信息创新研究院, taozui@aircas.ac.cn 王春梅,中国科学院空天信息创新研究院, wangchunmei@aircas.ac.cn 顾行发,中国科学院空天信息创新研究院, guxf@aircas.ac.cn 周翔,中国科学院空天信息创新研究院, zhouxiang@aircas.ac.cn
地理区域	中国科学院叶面积指数地面观测网络河北栾城真实性检验站
数据年代	2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日
时间分辨率	1 天
空间分辨率	10 m×10 m
数据格式	.xlsx、.shp、.kmz
数据量	116.0 KB
数据集组成	(1)2019 年栾城站 3 个“LAI-NOS”节点地理位置数据;(2)2019 年栾城站 3 个“LAI-NOS”节点 2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日每日叶面积指数数据
基金项目	中华人民共和国财政部(Y930280A2F, Y930070A2F)
数据计算环境	边缘计算及中国科学院空天信息创新研究院平台
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 ^[9]

数据和论文检索系统 DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

3 数据研发方法

3.1 叶面积指数无线传感网络观测系统算法原理

叶面积指数无线传感网络观测系统（“LAI-NOS”）硬件主要包括传感器终端、采集节点、汇聚节点及辅助设备，服务器及客户端主要用于存储和管理数据，图 1 为“LAI-NOS”系统整体架构图^[10]。LAI 传感器终端结构简单，具有体积小、布设方便，测量精度高特征，主要负责植被冠层图像采集与分析及测量参数，既适用于低矮的禾本科、灌木林测量，也适用于森林等高大乔木测量。

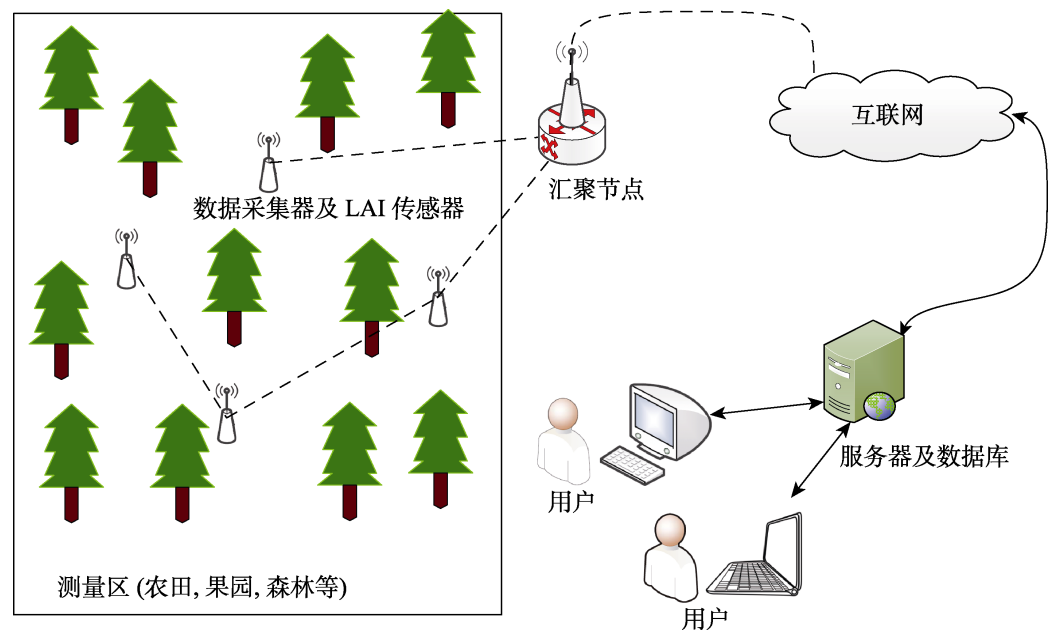


图 1 系统总体结构图^[10]

“LAI-NOS”系统获取植被冠层参数包含冠层图像采集、图像分析处理及参数统计解算三个步骤，其中植被冠层图像采集采用半球摄影法通过底视法或俯视法拍摄完成。采用由 OmniVision 公司生产的 OV2640 鱼镜头获取植被冠层图像，具有焦距较短（小于 16 mm）、视场角较大（通常接近 180 度）等特点，鱼镜头成像原理^[11]如图 2 所示。由 Beer-Lambert 定律知，均匀溶液对阳光的吸收与其浓度和厚度相关，而与入射光线无关。假设植被冠层叶片随机分布且倾角随机，单一叶片面积远小于冠层总面积，整体植被冠层可视作叶片为溶质的均匀溶液。依据 Beer-Lambert 定律，太阳光通过冠层后衰减下来的太阳辐射强度如下式：

$$I_1 = I_0 \times e^{-K \times LAI} \tag{1}$$

$$T(\theta) = e^{-K \times LAI} \tag{2}$$

式中， I_0 表示冠层上方的太阳辐射， I_1 表示经过冠层遮挡后冠层下方的太阳辐射， K 为消光系数， $T(\theta)$ 为入射角 θ 为时的透射率。考虑光线直射进入， $T(\theta)$ 可表示冠层孔隙率，消

光系数 K 与太阳光线入射角 θ 和叶片倾角 β 有关, 进一步从太阳辐射强度出发推导出叶面积指数计算公式。

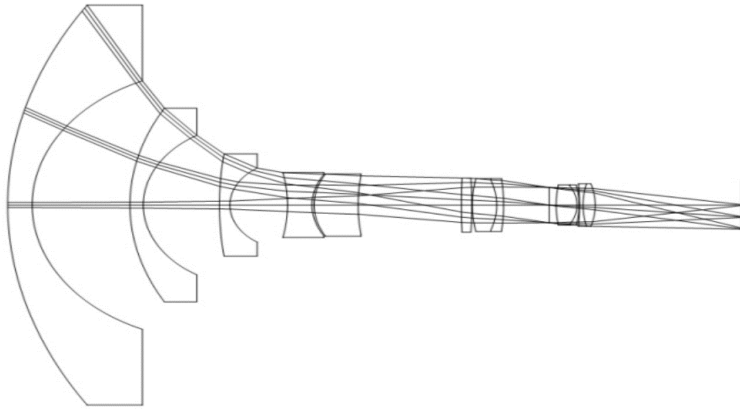


图2 鱼眼相机成像原理示意图

$$K(\theta) = \frac{G(\theta, \beta)}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$LAI_e = -\frac{\ln(T(\theta)) \cos \theta}{G(\theta, \beta)} \quad (4)$$

式中, $G(\theta, \beta)$ 为投影函数, 表示观察角为 θ 叶倾角为 β 时, 单位叶片面积在垂直于 θ 方向平面上的投影面积, LAI_e 为未考虑聚集效应的 LAI 值^[12]。从半球图像的成像原理看, 上式中的 θ 是摄像头视角。

当入射角为 57.5 度时, 投影函数值与叶倾角无关, 投影函数 G 值均接近于 0.5^[13, 14], 公式(5)可简化为:

$$LAI_e = -\frac{\ln(T(57.5^\circ)) \cos 57.5^\circ}{0.5} \quad (5)$$

实际情况下, 植被叶片难以满足随机分布假设, 尤其是林地, 测量结果受到聚集效应影响, 导致最终 LAI 值出现较大误差。Wilson 等引入聚集指数 Ω_θ 的概念加以改进, 通过计算聚集指数来评估、校正测量 LAI 值能有效提高测量精度与可靠性。常见的计算聚集指数 Ω_θ 的方法有有限长度平均法、间隙大小分布法及路径长度分布法等^[15]。其中, 有限长度平均法方法通过有限长度子样线上计算孔隙率均值对数与对数均值的比值可以用于校准叶面积指数, 消除聚集效应的影响。其计算公式如下:

$$\Omega_\theta = \frac{\ln(\overline{T(\theta, \varphi)})}{\ln(T(\theta, \varphi))} \quad (6)$$

式中, Ω_θ 是视角为 θ 时对应的视场环的聚集指数, $T(\theta, \varphi)$ 是视角为 θ 且方位角为 φ 时的冠层孔隙率。

特别地, 当某一视角范围内的冠层孔隙率为 0 时将无法计算聚集指数, 此时, 认为次

视角范围内只有一个背景像素点， $T(\theta, \varphi)$ 计算如公式(7)

$$T(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \quad (7)$$

式中， N 为半球影像有效区域像素总数。聚集指数 Ω_θ 校正后的叶面积指数为真实 LAI，可由公式(8)求得。

$$LAI = \frac{LAI_e}{\Omega_\theta} \quad (8)$$

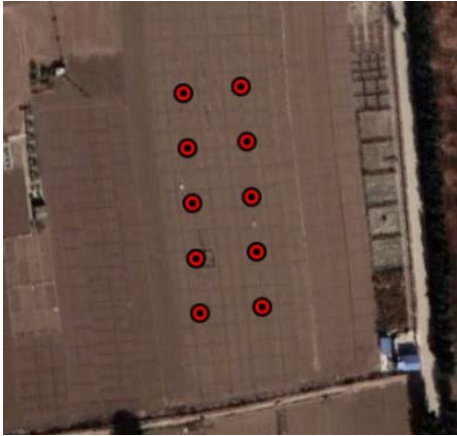
3.2 数据采集

叶面积指数无线传感网络观测系统原始数据采集区，位于中国科学院叶面积指数地面观测网络河北栾城真实性检验站（图3），地处于河北省石家庄市。栾城站属暖温带半湿润季风气候，是华北平原干旱气候的中心区域，年降水量 530 mm，海拔高度在 160–820 m 之间，该地区气候温和，光照充足，降水适中，四季分明。栾城站土壤类型以潮褐土为主，以小麦——玉米为主体的两熟制农田生态系统代表华北平原北部典型潮褐土高产农业生态类型，代表面积 4.98 万 km²，耕地 3,800 万亩的太行山前平原，具有集约高产型、资源约束型、井灌农业类型和城郊型等特征。

叶面积指数无线传感网络观测系统各节点测量频次为 5 分钟，每天每个节点自动测量 288 条 LAI 原始数据，并回传至服务器，本数据集获取了 2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日的叶面积指数无线传感网络观测系统的全部有效原始数据，共 2.4 万余条，测量数据包括：数据采集时间、空气温度和叶面积指数。去除天气影响导致部分数据缺失或无效，有效原始数据共计 1 万余条。



(a) 栾城站实验区现场照片



(b) 栾城站仪器布点图

图3 栾城站实验区及节点分布图

3.3 数据处理方法

叶面积指数无线传感网络观测系统叶面积指数精校正算法通过三步逐步去除异常值（图4）：（1）提取清晨与黄昏时段数据，剔除仪器预定义异常值，如由环境过亮、过暗及云干扰等环境因素和数据采集失败设备因素造成的异常值；（2）利用箱图法进一步滤除异常数据值；（3）最后采用“平稳窗口”算法进行原始数据精校正得到每日数据，最终获得

《河北栾城站小麦叶面积指数数据集（2019）——中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络系列数据集》。

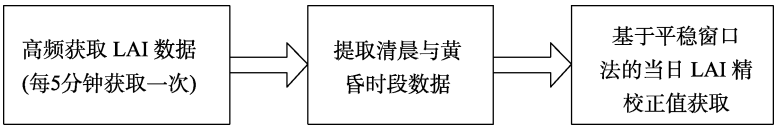


图 4 “LAI 星地网络” “LAI-NOS” LAI 原始数据精校正策略图

基于“平稳窗口”算法进行原始数据精校正流程如下：

（1）对每一条数据进行预处理，即判断是否存在异常值进行删除，去除通讯异常、图像过暗、数据格式转换失败、图像内存分配失败、图像过曝光的异常信息。

（2）设定窗口大小为 m ，并以窗口滑动的形式求解每个窗口对应的均值和方差，如公式(9)、(10)所示：

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m x_{ij} \tag{9}$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \tag{10}$$

式中， \bar{x}_j 表示第 j 个窗口的平均值， x_{ij} 表示第 j 个窗口的第 i 个数据， σ_j^2 表示第 j 个窗口的方差。

（3）公式(10)在公式(9)中找到求解的最小方差，并用如下的条件判断：

$$\min(\sigma_j^2) < \delta \tag{11}$$

式中， δ 为设定阈值，其经验值为 0.5，如大于 0.5 表明方差过大，数据不稳定。

（4）若存在满足式(11)的方差条件，则以该方差对应窗口均值作为 LAI 代表值。若不满足，系统则认为当日无有效数据。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集选取栾城站小麦生长季 2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日（小麦返青期至成熟期）三个相邻节点(0901、0902 和 0904)“LAI-NOS”数据,包括:(1)2019 年栾城站 3 个“LAI-NOS”节点地理位置数据;(2)2019 年栾城站 3 个“LAI-NOS”节点 2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日每日叶面积指数数据。该数据集存储为.xlsx、.shp 和.kmz 数据格式，由 9 个文件组成，数据量为 25.6 KB（压缩为 2 个文件，21.9 KB）。

4.2 数据结果

2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日中国科学院叶面积指数地面观测网络河北栾城真实性检验站 3 个“LAI-NOS”节点每日叶面积指数数据示于图 5。

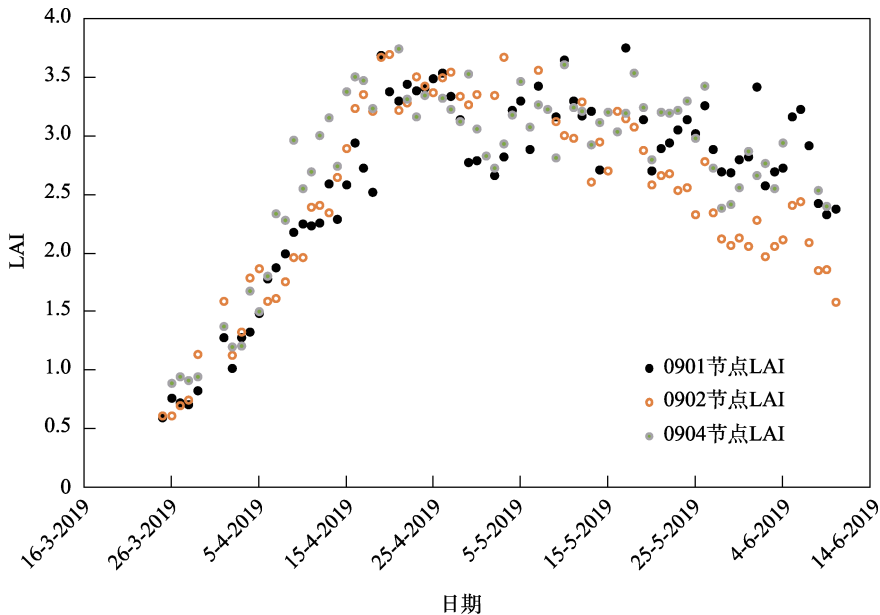


图 5 河北栾城三个“LAI-NOS”节点 LAI 每日数据图（2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日）

4.3 数据结果验证

为验证“LAI-NOS”系统 LAI 测量结果的准确性，2023 年 8 月 15 日在中国科学院叶面积指数地面观测网络河北栾城真实性检验站对仪器测量精度进行实验验证，以美国 LI-COR 公司 LAI-2200C 为对比验证仪器。具体数据采集过程为：采用背靠背测量的方法，由一组人员在“LAI-NOS”系统节点同一位置用 LAI-2200C 获取 LAI 值，另一组人员从系统中下载当天 LAI 值，然后对两者测量结果进行 PB (Passing-Bablok regression) 回归分析。PB 回归是一种用于方法比较研究的非参数回归 (non-parametric regression) 的统计分析方法，在方法和仪器比较研究中广泛应用。PB 回归使用非参数方法拟合线性方程 $y=a+bx$ 的参数 a 和 b (图 6)。

其中截距 a 是两种方法之间系统差异的度量。截距 a 的 95% 置信区间可用于检验 $a=0$ 的假设。如果 a 的置信区间包含值 0，则接受假设， a 值与 0 无显著差异；否则拒绝假设， a 值与 0 有显著差异。斜率 b 是两种方法之间比例差异的度量。斜率 b 的 95% 置信区间可用于检验 $b=1$ 的假设。如果 b 的置信区间包含值 1，则接受假设， b 值与 1 无显著性差异；否则拒绝假设， b 值与 1 有显著性差异。

由表中结果可以看出，PB 回归截距为 2.411,5，95% 置信区间为 -0.653,4-3.697,1，包含 0。PB 回归斜率为 1.081,6，95% 置信区间为 0.526,0-2.443,0，包含 1。因斜率 95% 置信区间内的值包含 ± 1 ，截距 95% 置信区间内的值包含 0，可认为河北栾城站“LAI-NOS”数据有效，与实际 LAI-2200C 数据有显著的相关性。

表 3 河北栾城站 “LAI-NOS” 和 LAI-2200C 数据 PB 回归分析

参数	截距 a	95%置信区间	斜率 b	95%置信区间
结果	2.412	-0.653-3.697	1.082	0.526-2.443

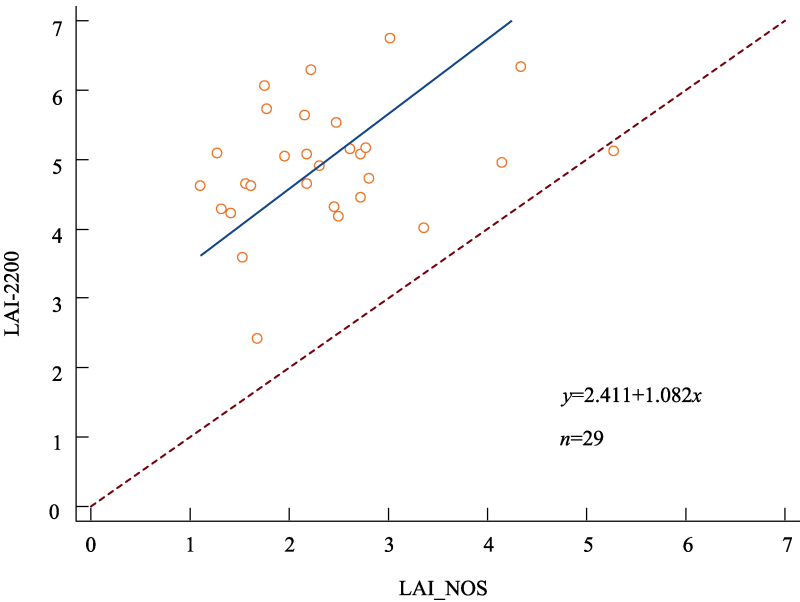


图 6 河北栾城站 “LAI-NOS” 和 “LAI-2200C 样” 本分布与回归方程对比图

5 讨论和总结

本文介绍了《河北栾城站小麦叶面积指数数据集（2019）——“中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列数据集》的研发和内容。本数据集获取了频次为 5 分钟 2019 年 3 月 25 日至 6 月 10 日的叶面积指数无线传感网络观测系统有效原始数据共计 1 万余条。采用“平稳窗口法”对原始测量数据进行筛选预处理，剔除异常值，每日获取一个有效地面测量数据,作为 LAI 遥感产品相对真值从而为 LAI 遥感产品真实性检验研究的数据支撑。该数据集在长时间序列的 LAI 遥感产品真实性检验具有明显优势,尤其是不同物候生长期、不同尺度条件应用场景。本数据集研究区域只集中于研究站点附近的影像，没有考虑广大的地域范围。如何实现全国、全球范围内更广泛长时间序列的 LAI 遥感产品真实性检验问题，仍然是一个值得深入研究的重要问题。未来的真实性检验工作可以对全国各地不同植被类型的实测样区进行评估，以测量这些地区 LAI 遥感产品的不确定性。在更多的植被区域进行实地工作。构建更长的验证数据时间序列，以进一步评估 LAI 遥感产品变化。

作者分工：顾行发、周翔、杨健、余涛对数据集的开发做了总体设计；陈云坪采集、统计数据；孙源完成了数据验证、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] Chen, J. M., Black, T. A. Defining leaf area index for non-flat leaves [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(4): 421–429. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x.
- [2] Fassnacht, K. S., Gower, S. T., Norman, J. M., *et al.* A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1994, 71(1/2): 183–207. DOI: 10.1016/0168-1923(94)90107-4.
- [3] 方红亮. 我国叶面积指数卫星遥感产品生产及验证[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(5): 14. DOI: 10.11873/j.issn.1004.
- [4] 孙晨曦, 刘良云, 关琳琳等. 锡林浩特草原区域MODIS LAI产品真实性检验与误差分析[J]. *遥感学报*, 2014, 18(3): 19. DOI: 10.11834/jrs.20143097.
- [5] 陈晓德. 收集落叶法测定叶面积指数[J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 1990, 15(2): 3. DOI: CNKI:SUN:XNZK.0.1990-02-021.
- [6] 温一博, 范文义, 常颖. 林冠层结构参数自动测量系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 7. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.041.
- [7] Chen, Y. P., Jiao, S. F., Cheng, Y. L., *et al.* LAI-NOS: An automatic network observation system for leaf area index based on hemispherical photography [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2022, 322: 108999. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108999.
- [8] 孙源, 杨健, 高海亮, 等. 河北栾城站小麦叶面积指数数据集(2019)——“中国面向卫星应用叶面积指数自动观测网络”系列数据集[J/DB/OL]. *全球变化数据仓储电子杂志*, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodb.2023.09.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.09.08.V1>.
- [9] 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).
- [10] 陈云坪, 孙源, 杨玥等. 叶面积指数在线监测实验系统设计[J]. *实验室研究与探索*, 2019, 38(11): 5. DOI: CNKI:SUN:SYSY.0.2019-11-015.
- [11] 张潇, 吕丽军. 鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(5): 863.
- [12] Baret, F., Solan, B. D., Lopez-Lozano, R., *et al.* GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5° zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1393–1401. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.04.011.
- [13] Chen, J. M. Black, T. A. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1991, 57(1/3): 1–12. DOI: 10.1016/0168-1923(91)90074-Z.
- [14] 刘培新. 基于半球摄影法的植被参数提取研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [15] 阎广建, 胡容海, 罗京辉, 等. 叶面积指数间接测量方法[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 958–978.