

引 用 格 式:Fang Hongliang.Development and Validation of Satellite Leaf Area Index (LAI) Products in China[J].
Remote Sensing Technology and Application,2020,35(5):990-1003.[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):990-1003.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.5.0990

我国叶面积指数卫星遥感产品生产及验证

方红亮^{1,2}

(1.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;
2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

摘要:利用卫星遥感生产叶面积指数(Leaf area index: LAI)产品并进行真实性检验是植被定量遥感的一项重要研究内容。过去 10 a,我国研究人员利用 MODIS 或 AVHRR 观测数据生产了 GLOBALBNU, GLASS, GLOBMAP, MuSyQ 和 FSGOM 等数套全球和全国 LAI 产品,受到了国内外的广泛关注和应用。在产品生产的同时,我国学者也广泛开展了 LAI 产品在全球和区域尺度的真实性检验研究工作。本文总结了我国 LAI 卫星产品生产和验证研究工作的现状和趋势。近年来,我国在本领域相关的理论、技术和方法研究方面取得了全面进展,LAI 产品精度和连续性已与国外先进水平相当,但仍然存在数据源单一且依赖国外、算法不确定性不清、生产不连续以及缺乏充分验证等问题,客观上影响了 LAI 产品应用的广度及深度。未来应充分利用新的卫星数据特别是国产数据,加强遥感机理模型、反演算法以及应用的创新研究,生产具有特色的高质量 LAI 产品,满足地球系统科学的研究需求。同时,应加强 LAI 验证基础设施建设,发掘利用更广泛的验证站点,同时增进国际合作,加强产品的推广使用,在与用户的互动交流反馈中进一步提高产品的市场。随着我国对相关研究投入的增加,可以预期未来 20 a 将是我国 LAI 遥感产品及验证研究由“跟跑”国际先进水平向“并跑”乃至“领跑”过渡的机遇期。

关 键 词:叶面积指数;遥感产品;验证;真实性检验;中国

中图分类号:TP75 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2020)05-0990-14

1 引 言

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)指单位陆地上植被叶片所占的面积,是描述植被结构特征的重要参数^[1]。LAI 的大小直接影响植被对太阳辐射、大气降水和二氧化碳的截取,在植被与大气之间碳、水和能量交换过程起着关键作用。LAI 已被世界气象组织列为影响全球气候变化的关键陆表参数之一^[1]。

卫星遥感为获取全球 LAI 遥感产品提供了有力手段。以美欧为首,国际上已生产了多套全球 LAI 遥感产品^[2]。例如,美国利用 Terra 和 Aqua 卫

星上的 MODIS 传感器生产了自 2000 年以来的 LAI 产品,至今已发布第六版^[3-4]。欧盟也先后基于 SPOT 卫星的 VEGETATION 传感器生产了 CYCLOPES、GEOV1 和 GEOV2 系列 LAI 产品^[5]。

卫星遥感 LAI 产品已被广泛用于全球植被变化、全球碳水循环模拟和农业应用研究中^[2]。受气候变化、CO₂施肥效应、大气氮沉降和物候变化的影响,卫星遥感 LAI 数值自 1982 年以来在全球大部分区域的呈现了增加的趋势,特别是欧亚大陆植被的绿化趋势很明显^[4],其中中国的绿化幅度比全球平均值高出约 24%^[6-7]。在未来气候变化情景下,预计全球平均 LAI 在本世纪将会继续增加,当然各地

收稿日期:2020-07-21;修订日期:2020-09-18

基金项目:国家重点研发计划(2016YFA0600201)。

作者简介:方红亮(1971—),男,浙江淳安人,研究员,主要从事关键植被参数反演、产品生产与验证研究。E-mail:fanghl@lreis.ac.cn

的增加幅度会有不同^[8]。

在LAI产品生产的同时,关于产品的精度和不确定性评价也随之展开。2000年,国际地球观测卫星委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)下设的定标和真实性检验工作组(Working Group on Calibration and Validation, WGCV)正式成立了陆表产品真实性检验(Land Product Validation, LPV)工作组,其中包括LAI工作小组。LAI工作组于2001年6月在意大利Frascati召开了首届国际LAI对比验证学术研讨会,这是国际上关于LAI验证的首次学术会议,标志着国际上对全球LAI产品综合验证工作的正式启动。

我国在上世纪九十年代开始进行利用遥感技术估算植被LAI的研究^[9-11]。进入本世纪以来,关于LAI的遥感研究取得了蓬勃发展^[12-15]。过去10 a,在国家“863计划”和“973计划”等支持下,由北京师

范大学、中国科学院地理科学与资源研究所以及中国科学院空天信息创新研究院等机构主持生产了数套全球和全国LAI产品(表1)。据中国知网(<https://www.cnki.net/>)的查询显示,以“叶面积指数”和“遥感”作为主题词的中文文献已从2000~2010年间的700余篇,增长到2010~2020年间的1700多篇。

在LAI产品生产的同时,为了更好地理解LAI产品的质量信息,多个研究机构对LAI产品开展了一系列的验证工作。一方面,产品生产机构对自身产品开展了检验研究^[16-18],另一方面大量研究人员也对国产的LAI产品开展了第三方的独立验证^[19-22]。不仅如此,国外的研究团队也对我国的LAI产品展开了对比分析^[6,23]。目前国产LAI产品已经得到国内外的广泛关注和应用,在植被变化研究^[7,24]和陆面过程研究中^[25-26]发挥了显著的作用。

表1 国产的几套主要LAI产品

Table 1 Major LAI products developed in China

产品*	传感器	机构	覆盖范围	空间分辨率	时间分辨率	覆盖时段	输入波段	主要方法	支持项目	参考文献
GLOBALB-NU	MODIS	北京师范大学	全球	1 000 m	8 d	2000~2016	MODIS LAI	时空滤波	自然科学基金	[29]
GLASS	MODIS (GLASS 5.0)	北京师范大学	全球	500 m	8 d	2000+	红-近红外	广义神经网络	863项目	[30]
	AVHRR (GLASS 4.0)	北京师范大学	全球	0.05°	8 d	1981+	红-近红外	广义神经网络	863项目	[31]
GLOBMAP (V3.0)	MODIS/AVRRR	中科院地理资源所	全球	8 km(1981~1999)/500 m(2000~)	半月(1981~1999)/8 d(2000~)	1981+	红/近红外/短波红外	经验植被指数	973项目	[32]
MuSyQ (V2.0)	MODIS	中科院空天院	全球	500 m	5 d	2010~2015	红-近红外	辐射传输模型查找表反演	高分专项	[18]
FSGOM (V1.0)	MODIS	南京大学	中国	500 m	8 d	2000~2014	红/近红外/短波红外	经验植被指数	973项目	[33]

注:*GLOBALBNU(<http://globalchange.bnu.edu.cn/>), GLASS (<http://glass-product.bnu.edu.cn/>), GLOBMAP (<http://modis.cn/global-LAI/>), MuSyQ (<http://www.geodoi.ac.cn/>)

本文首先对全球LAI卫星遥感产品的生产与验证进行了概述,在此基础上分析了国产LAI产品及其验证工作。其目的是通过透视我国LAI遥感研究中的短板和差距,为进一步提升国产LAI产品的生产和验证提供思路。本文虽然是针对LAI,文中所提的观点对于其他陆表参数的遥感研究同样具有借鉴意义。

2 全球LAI遥感产品与验证概述

关于全球LAI的遥感估算与验证,Fang等^[2]已经做了充分的论述,本节在该文的基础上,对其主要观点进行了总结和补充。

2.1 LAI遥感产品

全球LAI遥感产品主要由被动光学传感器通过经验统计或物理模型反演的方法得到^[2]。经验统

计方法通过建立 LAI 和冠层反射率或植被指数的经验关系来估算 LAI。实践中全球 LAI 产品的反演大都使用植被指数而没有直接使用反射率。由于近红外波段(NIR)对植被散射的敏感性,该波段在构建植被指数时通常必不可少。经验统计方法虽然简单易行,但该方法容易受各种外在环境因素的影响。

模型反演方法通过建立叶片和冠层的各种生理和结构(如 LAI)变量和冠层反射率之间的物理模型来估算 LAI^[2]。根据建模方式的不同,这些物理模型可分为辐射传输模型、几何光学模型和计算机模拟模型等。由于模型的复杂性,LAI 反演通常通过数值优化、查找表(LUT)或机器学习的方法进行计算。常用的机器学习方法有神经网络、贝叶斯网络、支持向量机和高斯过程回归方法等。

利用遥感方法,在过去的 20 a 里产生了 20 多套全球中等分辨率(250 m 至 7 km) LAI 产品,如前文所述的 MODIS 和 GEOV2 产品等(<https://lpvs.gsfc.nasa.gov/>)。NOAA AVHRR 提供了生产自 20 世纪 80 年代初以来全球连续 LAI 的唯一数据源。除了 LAI 数值本身,一些全球 LAI 产品,如 MODIS、VIIRS、GEOV2 和 PROBA-V 等还随同提供关于产品的不确定性信息,主要反映输入数据、模型和反演过程的理论不确定性。

2.2 LAI 产品验证

为了满足全球气候模拟研究的需要,全球气候观测系统(GCOS)要求 LAI 产品的不确定性不应超过 15%^[1]。全球陆地观测系统(GTOS)、世界气象组织(WMO)和全球环境与安全监测(GMES)也规定了类似的观测精度要求。一般来说,LAI 应用要求最低相对精度约为 20%^[2]。因此,深入了解当前 LAI 产品的不确定性对地球系统科学的研究至关重要^[27-28]。

遥感产品的验证是指通过独立的手段来评价遥感产品质量的过程(<http://ceos.org/ourwork/workinggroups/wgcv/>)。WGCV 明确指出验证的目的是为了获取产品的客观、全面和完善的质量信息。人们首先要了解关于产品的质量信息,才能更好地使用产品并助力产品质量提升。目前 CEOS 将遥感产品的验证从低到高分四级(表 2)。一级验证表示产品只在少量站点(<30 个)和时间段进行过验证。二级和三级验证表示产品已在全球站点得到验证,其中三级验证代表产品的不确定性已经进行了很好地量化和统计分析,产品的时空一致性也得到了评价。四级验证为最高级,代表产品已经完成三级验证,而且随着产品新版本的发布以及时间序列延展后,能系统性地更新完善验证结果。目前全球 LAI 遥感产品已经完成了二级验证,正在向三级验证的目标努力(<http://ceos.org/ourwork/workinggroups/wgcv/>)。

表 2 遥感产品的四级验证框架*
Table 2 Remote sensing product validation hierarchy

级别	描述	主要特点
一级	只在少量地点(<30)和时间段,通过与实测和其他参考数据对比对产品精度进行过评价	少量地点(<30)和时间段的验证
二级	对产品精度在相当数量的地点和时间段进行了估算;对产品自身及与其他类似产品的时空一致性也已在全球代表性地点和时间段进行了评价;结果发表在审稿期刊上	全球代表性站点和时间段的验证
三级	通过与实测和其他参考数据的对比,对产品的不确定性特征已经得到很好的量化;产品不确定性已经在具有全球代表性的多个地点和时间段进行过深入的统计分析;对产品自身及与其他类似产品的时空一致性也已在全球代表性地点和时间段进行了评价;结果发表在审稿期刊上	全球验证,不确定性很好地进行了量化和统计分析,时空一致性得到评价
四级	在产品新版本发布以及时间序列延长后,三级验证结果能够系统地更新	全球性系统验证

注:* <https://lpvs.gsfc.nasa.gov/>

遥感得到的 LAI 可以通过不同的途径进行检验分析。Fang 等^[2]将遥感 LAI 的验证方法分为 6 种(表 3)。第 I 种方法将遥感 LAI 与地面实测数据进行点对像元尺度的直接对比,第 II 种方法是与高分辨率的参考值升尺度后的数据进行对比。这两种方法可归于直接验证或直接检验方法,因为有参考真值,可以得到关于产品的精度信息。第 III、IV 和

V 方法是将待检 LAI 产品与其他 LAI 产品、相关辅助变量和模型模拟 LAI 进行对比。第 VI 种方法将 LAI 产品作为模型输入,从模型的输出结果判断输入 LAI 的产品质量。后 4 种方法可归于间接验证方法,这些方法能对 LAI 产品的质量进行评价但无法给出可靠的精度信息。不同方法的综合运用有助于增进对 LAI 产品的全面了解。

一般性讲,遥感产品的“验证”、“检验”或“真实性检验”可以互相通用,泛指用各种方法来对产品进行质量评价(表3)。从狭义上说,“真实性检验”因为需要“参考真值”或“相对真值”,因此需要通过直接检验方法(方法Ⅰ和Ⅱ,表3)来进行。表3中的直接检验方法(第Ⅰ和第Ⅱ种方法)与张仁华等^[34]

倡导的“一检两恰”验证方法分别对应,后者提出分别在单点和像元尺度进行产品的检验和验证。在现有工作的基础上,我国目前已完成“陆地遥感产品真实性检验通用方法”和“陆地遥感产品真实性检验地面观测场选址和布设”国家标准,目前正在推进“LAI遥感产品真实性检验”国家标准建设^[35]。

表3 LAI遥感产品的主要验证方法^[2]

Table 3 Validation and evaluation schemes for remote sensing LAI product

方法	描述	参考文献
Ⅰ.点与像元的直接对比	实测点上的LAI与卫星LAI产品的直接对比	[36-37]
Ⅱ.与升尺度后的高分辨率参考数据对比	通过高分辨率遥感数据将实测LAI升尺度,然后与卫星产品对比	[20,22,38]
Ⅲ.多个产品之间的交叉检验	多个时空分辨率相似的产品之间的交叉对比	[21,39-40]
Ⅳ.与其他相关变量的一致性对比	将LAI与其他光谱、生物和大气参数(如NDVI、FAPAR和反照率等)进行一致性评价	[41-42]
Ⅴ.与模型模拟的LAI进行对比	将LAI产品与模型模拟的LAI进行对比	[43-45]
Ⅵ.在模型中LAI作为输入对比输出效果	将不同LAI产品作为模型的输入值,通过输出结果的优劣评价输入LAI的产品质量	[46-47]

2.3 LAI产品的不确定性

全球遥感LAI产品显示全球年平均LAI的值约在1.50左右^[21]。Anav等^[48]报道由波士顿大学的LAI3g产品^[49]计算得到的全球平均LAI为1.46,北京师范大学的GLOBALBNU产品^[29]计算所得全球平均LAI为1.49。但是在生长旺季(如7月),全球平均LAI可达2.0左右^[4]。文献收集的全球LAI实测数据表明,LAI的平均值在1.98(±1.61)到2.31(±1.26)之间^[2]。因为LAI实测通常在生长季节(特别是旺季)进行,全球遥感LAI的数值与实测数据总体上还是非常吻合的^[2]。

从国内外发表的关于全球LAI验证的文献分析来看,LAI产品与参考值之间的相关性较好(中位 $R^2=0.62$,RMSE=0.88)^[2]。对于具体的生态型,比如草地和农田,LAI产品的质量相对其他生态型更高,特别是草地,LAI产品的均方根误差(RMSE)可控制在0.5以内^[2]。而对于稀疏草原(Savanna)和森林,无论地面实测、遥感反演和产品验证都相对更困难,LAI产品的质量比草地和农田生态系统较低。总体来看,目前全球LAI产品的RMSE大致在0.75~1.0区间,未来20 a通过全球同行的通力协作期望能降到0.50~0.75之间。进一步降低RMSE则比较困难,因为同时需要有高质量地面参考数据作保障。从这个意义上说,遥感LAI产品可以比实测值更有代表性。

LAI遥感产品的不确定性来源主要有3方面,一个是输入遥感数据的不确定性,如反射率或辐射值等,另一个是模型的不确定性和参数的“病态”反演问题,再者是反演中所用非遥感辅助数据中的误

差^[22,34,50]。输入的反射率数据,如MODIS反射率产品,相对误差已控制在5%以内^[51]。遥感模型的误差通常以反演值的离散程度来表示,在一些全球产品中(如MODIS和GEOV2)除了提供反演的LAI以外,还提供了反演LAI的离散程度,该离散值可视为LAI的理论不确定性^[21]。非遥感数据中使用最多的是土地覆盖分类数据。目前的全球土地覆盖分类产品的精度还比较低,如MODIS全球土地覆盖C5产品的精度在75%左右^[52],容易造成后续LAI反演的误差。

2.4 LAI产品的周期

LAI产品完整的生命周期是由遥感数据获取与基础处理—算法开发—产品生产—产品验证—产品发布—产品应用以及应用反馈和产品提升等组成的有机循环(图1)。产品的生产和验证是其中的两个重要环节。在LAI产品生命周期的不同阶段,相同或不同的实体扮演着不同的角色,承担不同的任务。表4显示了包括LAI等遥感产品生产与验证的组织管理模式,其中代码ABCD表示承担产品生命周期不同环节的不同专业实体。模式(1)由一个实体承担了从算法开发—产品生产—产品验证—产品发布过程的所有环节,该模式综合性强,集成度高,但产品生产和验证都完全依赖一个实体。模式(8)由不同机构分担了不同的环节,该模式专业化和精细化程度高,但需要各环节之间密切配合。当然在模式(1)和模式(8)之间还可以把产品验证和产品发布独立出来,形成模式(4)或(5)。另外还有其他组合,比如生产和验证可以是一个实体(AB-BC),也可以产品验证和发布一个实体(ABCC),还

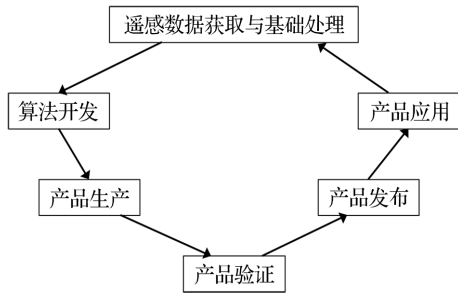


图 1 LAI 遥感产品的生命周期

Fig.1 The life cycle of LAI remote sensing product

表 4 LAI 等遥感产品生产与验证的组织和运行模式

Table 4 Remote sensing product chain: Algorithm development, product generation, product validation, and product distribution

模式	算法开发	产品生产	产品验证	产品发布	描述
(1)	A	A	A	A	产品各环节均由一个机构 A 承担
(2)	A	A	B	A	算法—生产—发布由 A 承担,验证由 B 承担
(3)	A	A	A	B	算法—生产—验证由 A 承担,发布由 B 承担
(4)	A	A	B	B	算法—生产由 A 承担,验证—发布由 B 承担
(5)	A	A	B	C	算法—生产由 A 承担,验证和发布由 B 和 C 分别承担
(6)	A	B	B	C	算法由 A 承担,生产—验证由 B 承担,发布由 C 承担
(7)	A	B	C	C	算法由 A 承担,生产由 B 承担,验证—发布由 C 承担
(8)	A	B	C	D	产品各环节由不同的机构独立承担

注:代码 ABCD 表示承担产品周期各环节的不同实体

3 国产 LAI 遥感产品

3.1 主要国产 LAI 产品

3.1.1 GLOBALBNU

在国家立项生产全球 LAI 产品之前,原北京师范大学戴永久教授团队对 MODIS LAI 原始产品进行滤波和插值处理,生产了时空连续的 GLOBALBNU LAI 产品^[29]。该产品覆盖 2000~2016 年,以 NetCDF 格式提供给用户。处理后的产品去除了原 MODIS 标准产品中低质量的像元值,因其时空连续性,可直接用于各种陆面模型中^[53-54]。因为是基于 MODIS LAI 经过处理得到,在多套产品的交叉检验中,GLOBALBNU 产品与 MODIS 产品特性最为接近^[39]。

3.1.2 GLASS

GLASS LAI (V3.1) 利用一种广义回归神经网络 (GRNN) 方法从 MODIS 和 AVHRR 反射率反演得到^[30]。该方法首先在 BELMANIP 站点将 CYCLOPES 的有效 LAI (LAI_{eff}), 利用 POLDER 聚集指数 (Ω) 数据转换成真实 LAI ($LAI = LAI_{eff} / \Omega$)^[55], 然后将 MODIS 和 CYCLOPES 的 LAI 值通过一个线性加权算法得到最佳的 LAI 估算。对

有 AABBB 等多种组合管理模式。

目前国内外 LAI 遥感产品的验证均存在一个窘境:一方面诸多产品,包括全球和区域产品,还没经过充分检验就被遗忘;另一方面许多研究人员又在不停进行 LAI 产品的生产或更新,难以形成一个产品生产—验证—应用—产品提升和反馈的有机循环 (图 1), 这一境况极大影响了全球 LAI 产品的研究和推广使用。在今后的工作中,需要加强对 LAI 产品生产和验证工作的协调,达到相互促进与提高的目的。

MODIS (MOD09A1) 和 AVHRR 地表反射率数据经过去云和平滑处理^[56-57], 然后联合最佳 LAI 和 MODIS 或 AVHRR 反射率数据在 BELMANIP 站点^[58]对每种生态型进行神经网络训练,利用训练后的模型估算得到全年的 LAI 变化曲线^[30]。GLASS 产品无论在全球站点还是重点区域都得到了充分的验证^[22,31],同时也与 MODIS 和 GEOV1 等其他全球产品进行了对比分析^[17,21,31,59]。

3.1.3 GLOBMAP

GLOBMAP LAI (V3.0) 综合了 MODIS 和 AVHRR 的观测,先从 MODIS 地表反射率 (MOD09A1) 基于不同土地覆盖类型的 LAI 和植被指数关系得到有效 LAI,该关系基于四尺度几何光学模型模拟得到^[60-61]。然后基于全球 500 m MODIS 聚集指数数据将有效 LAI 转换成真实 LAI^[62]。通过 AVHRR 和 MODIS 重叠期间的观测建立逐像元的关系,校准二者的差别并估算非重叠期 AVHRR 和 MODIS 的长时期 LAI^[32]。云覆盖像元通过一个局域调整三次样条滤波方法去除^[63]。与 GLASS 类似,GLOBMAP 产品在全球站点和重点区域都进行了验证^[22,64],同时也与其他全球产品进行了对比分析^[21]。

3.1.4 MuSyQ

MuSyQ LAI 产品反演算法借鉴了 MODIS LAI 的方法,主算法利用三维随机辐射传输模型构建的查找表进行 LAI 反演^[18]。当主算法失败时,启用备用算法,利用不同地类的 LAI 和归一化差值植被指数(NDVI)之间的经验关系反演 LAI。该产品的最大特色是综合利用了 Terra/Aqua 上的 MODIS 和风云三号 A/B 上的 MERSI 地表反射率数据,另外还对水体混合像元专门设计了去除水体影响的步骤。MuSyQ 产品在中国生态系统研究网络的部分农田和森林站点与 LAI 地面测量数据进行了对比验证($R^2=0.54$, $RMSE=0.96$),同时也与 MODIS 和 GLASS 产品进行了对比,一致性较好^[18]。

3.1.5 FSGOM

Liu 等^[33]利用与 GLOBMAP 完全相同的方法,得到了全国 FSGOM 产品。与 GLOBMAP 不同,FSGOM 对每种生态型取一个经验的聚集指数值^[65]。该产品在中国的典型森林和草地站点利用实测数据进行了验证,并与 GLASS 和 MODIS 一起作为生态模型输入数据进行了碳水通量的模拟对比^[47]。

3.2 LAI 产品生产现状

我国在过去 10 a,在不同项目的资助下,生产了多套全球和全国 LAI 遥感产品,在地球系统科学研究中发挥了很大的作用,也积累了丰富的产品生产经验。尽管具体的反演算法有所不同,但所有的 LAI 产品都通过美国 Terra 卫星上搭载的 MODIS 或者通过 NOAA 卫星上的 AVHRR 反射率数据反演得到。目前,还没有国产 LAI 产品使用双星数据进行联合反演(如 Terra 和 Aqua MODIS),也没有利用国产卫星和高空间分辨率数据生产全球 LAI 产品。国产的 LAI 产品中都没有提供必要的质量控制层,用户无法获取像元层面产品的质量信息。另外,需要思考行业发展中是否需要这么多套的 LAI 产品?如果没有一套高质量的产品,现有的大量产品最后都不免成为“数据垃圾”。事实上,这种情况在国内外遥感界都存在。

3.3 提升 LAI 产品生产的建议

3.3.1 拓展数据源

进一步提升我国 LAI 产品的生产,有必要从遥感数据源、基础模型和反演算法三方面着手深入研究。从遥感数据源看,应该加大对国产风云和高分等系列遥感卫星的利用,增强国产卫星数据的基础

处理能力,为后续产品生产提供保障^[66]。目前全球 LAI 产品正在由千米级向百米级产品过渡,如 PROBA-V 生产了全球 300 m LAI 产品^[67],我国也利用风云 MERSI 得到了全国 250 m 的 LAI^[68]。今后应继续深入研究百米级、十米级(利用 Landsat 数据)甚至是米级(如利用 Planet 实验室的小卫星星座数据^[69]) LAI 产品的生产与验证。在极轨卫星生产 LAI 的同时,应充分发掘静止气象卫星估算 LAI 的潜力^[70],充分利用我国风云二号和风云四号静止卫星系列,获取高时空分辨率的 LAI 产品。

3.3.2 发展机理模型

遥感机理模型是定量遥感参数反演的基础。近年来我国研究人员在遥感辐射传输模型研究中取得了多方面的进展,比如对异质地表^[71]和山区地形^[72]的模型构建。徐希孺等^[73]在对现有几何光学模型进行分析的基础上,借助“再碰撞概率”理论并考虑了冠层内部、冠层与土壤间的多次散射过程,开发了植被二向性反射统一模型。通过与国际合作,我国也研发了具有特色的三维模拟模型^[74-75]。不过这些机理模型在 LAI 反演中的实用性有待继续探索,比如三维模型的优势在于数值模拟,目前还难以用于 LAI 产品生产。通过在辐射传输模型中引入水体层,有学者开发了可用于复杂下垫面的辐射传输模型^[76-77],这些模型对于水稻、芦苇和红树林等水体下垫面植被的 LAI 估算具有很好的应用潜力。此外,在冠层机理模型研究的同时,还应继续深入进行叶片^[78]和土壤模型^[79]的研究。

3.3.3 优化反演方法

在遥感反演方法方面应继续深入探索简单高效的 LAI 反演新方法,特别是要充分利用人工智能和机器学习领域的最新进展^[80-81],比如 GLASS LAI 中引入的比较有特色的 GRNN 算法^[30]。北京师范大学还探索了贝叶斯网络算法^[82],尽管没有在全球产品中得到应用,都是有益的尝试。西班牙瓦伦西亚大学一直在倡导的高斯过程回归(GPR)方法^[83-84],已在越来越多的研究中得到试验^[85]。今后应进一步深入探索各种有效的反演算法,提高算法精度和适用性,支持 LAI 产品的生产。产品生产的同时应提供产品的算法精度信息,以便于 LAI 验证中对不确定性进行更好地量化和控制。

近些年,有研究人员考虑各参数之间的相关性,提出了“物理一致性”的反演方法,以保障各参数间的“物理关系”^[86-89]。问题在于,目前各参数之

间的所谓“物理一致性”关系其实并不清晰(至少还没找到),比如 LAI 和 FAPAR 之间并没有一个学术界能普遍接受的物理关系(类似于 $E=mc^2$)。现有研究中的所谓“物理一致性”关系,其实还是一种经验关系。当前的全球 LAI 产品都是针对 LAI 单个参数的反演,对参数反演的各个中间过程都做了充分的质量控制^[2,22]。因此,探索“物理一致性”反演方法,关键还是要先厘清各参数间的物理关系。

3.3.4 注重推广与应用

卫星产品是否成功,一个很重要的指标就是用户的使用情况。用户的及时反馈有助于产品生产者追溯问题改进算法提升产品质量,形成用户与生产者之间的良性循环。经过多年的发展,目前公众的数据共享意识已经成熟,但需要进一步推进共享技术的发展和验证服务平台建设^[90]。我国目前 LAI 产品的用户群还有很大的提升空间,应进一步通过国际交流扩大用户群体,重点关注产品在碳循环、水循环、生态系统管理与保护、生物多样性监测和农情监测等国际大科学计划中的应用。

4 LAI 产品验证

4.1 已开展的验证工作

4.1.1 综合性与针对性试验结合

本世纪特别是过去十余年,我国在大规模真实性检验遥感试验方面以及真实性检验理论与方法方面都取得了长足进展^[34-35,91]。我国 LAI 产品的验证工作,既有依托大型综合遥感验证试验的,如顺义试验^[92]、黑河试验^[93]和怀来试验^[94]等,也有针对某一特定生态系统类型专门开展的,如在我国东北农田^[22]和呼伦贝尔草地^[95]开展的 LAI 验证等。大型遥感试验在特定时间段同时开展各种生物物理参数和水—热平衡参数试验,通过高效综合地使用人员和仪器设备,一次性地对多个参数进行检验,有益于各参数的综合对比分析,同时也增进了对区域生态系统的整体认知。而一些小型的验证工作,主要由单个研究团队独立开展验证,通常只针对单个生态系统和具体的科学问题,验证场的选择也是为了满足单个产品的观测和验证需求,以求获得高精度的参考值^[96-97]。Ma 等^[19]尝试了组建全国性的遥感产品验证网络,选择不同地区的观测站点组合成连续高质量的观测网络。不同类型验证试验的结合,对 LAI 验证形成了互补,有益于促进对产品质量的认知。我国正在大力推进高分真实性检验

网络建设,相信建成后能极大提高 LAI 产品验证的效率和水平^[98]。

4.1.2 验证方法多样

从验证方法来看,我国研究人员尝试了各种检验 LAI 产品的方法(表 3),包括点与像元的直接对比^[36-37],与升尺度后的高分辨率参考数据的对比^[20,22,38]和产品间的交叉对比^[21,39-40]。诸多研究表明中国的 LAI 变化与气候因子(气温和降水)有显著的相关性^[41-42]。一些研究人员对比了遥感 LAI 与陆面过程模型模拟的 LAI^[43-45],但由于陆面模型模拟的不确定性较高,遥感 LAI 在这些研究中主要还是作为参考观测值。最近,Xie 等^[46-47]将不同的 LAI 产品输入 BEPS 生态系统模型,从模拟的总初级生产力(GPP)和蒸散发(ET)分析了不同 LAI 的产品质量,揭示了各产品间存在的差异。

4.1.3 极具特色的验证工作

结合我国的地理实情,我国开展了许多极具特色的验证工作,在异质地表、尺度效应和山地地形等方面取得了许多有益的经验。对于异质地表的验证,张仁华等^[34]等提出应该在寻找特征均匀靶场进行观测和检验,对非均匀靶场,则逐级缩小尺度寻找。这种逐级验证的思路和李小文等^[99]提出的对异质区域先进行自然地理分区,然后利用相对均质的分区进行尺度效应研究和遥感产品生产的思路是一致的。柏军华等^[94]则提出针对不同分辨率遥感产品,分别建立均匀和非均匀两种真实性检验靶场展开验证,为真实性检验的观测试验提供了一种新思路。徐保东等^[100]提出了一套站点空间代表性评价体系,并对中国生态系统研究网络和国际通量观测网络站点^[38]的空间代表性进行评价,分析了站点代表性对千米级 LAI 产品验证精度的影响,建议根据参考数据异质性等级进行验证。Shi 等^[101]等在黑河遥感试验中,先参考地表 NDVI 对点观测进行加权优化得到特定植被类型的代表性 LAI,然后对不同土地覆盖类型进行面积加权得到像元尺度上的 LAI 用于遥感产品的真实性检验。为了更好地验证山区 LAI 产品,Jin 等^[20]提出在计算参考值时,除了利用反射率和植被指数以外,应同时考虑海拔高度、坡度和坡向的影响。

4.2 现有 LAI 验证的局限性

我国现有的验证工作主要还是产品生产者在做的,这么做的优点是产品生产者熟悉产品性能,能够快速给用户提供一个基本的产品质量信息,也有

利于产品生产者改进算法提高产品质量(表4)。不过,由生产者主导产品验证并没有把真实性检验作为一项独立的研究工作来做。由于缺乏独立的第三方检验,对产品质量的判断完全依赖生产者,这在验证的客观性和综合性等方面不可避免会存在一些局限。由于缺乏专业的验证团队,获取的野外实测数据有限,对野外数据获取的方法如仪器的使用和定标等也缺乏足够的了解,这样得到的野外数据可能会存在很多的质量问题,甚至会得到错误的结论。

对于LAI等植被遥感参数的验证,我国目前还没有形成公认的高质量地面验证场和地面基准测量数据集,同时也缺乏高质量的高分辨率参考数据。各项验证工作之间简单重复的比较多,各自没有特色,难以形成知识互补。对于全球LAI产品的质量,还难以给出公认的结论性意见^[22]。此外,我国目前开展的验证工作主要还是在国内进行,还未能走出国门参与或领衔全球性的产品验证工作,部分在国外的验证也主要利用国际开源数据来进行。

4.3 深化LAI产品验证的建议

本小节从LAI的验证规范、验证数据汇聚、验证技术流程和国际合作等方面探讨深化LAI产品验证的几方面举措。

4.3.1 区分真实性检验研究与真实性检验标准

在真实性检验的实践工作中,首先应注意区分真实性检验研究工作与真实性检验标准的建立。“研究”是探索是创新,创新性研究工作讲究千姿百态。“标准”是规范,是具有指导意义的技术流程体系,需要相对稳定和统一。标准可以是一般性的过程指导,也可以是具体的方法指南。二者的共同点一是都需要高质量的参考值,二是都需要在不断探索的基础上获得新的认知从而对真实性检验过程加以革新。对于尚处在科研探索阶段的工作,不应急于建立国家标准。行业内形成共识的可以作为“标准”,未能形成“共识”的方法可以作为“研究”内容继续探索。目前的“研究”内容,也许在未来能成为“标准”。对于LAI真实性检验研究工作来说,需要不断探索新的验证技术和流程,开拓新的验证领域如异质地表和山地地形等。而对于LAI真实性检验标准,本文推荐选择平坦均匀区域进行验证,对于升尺度方法应选用离散统计型方法,最好无须其他的先验知识^[102],以便得到关于产品质量的普遍性结论。

4.3.2 优化扩充验证站点与数据

LAI验证工作受地面数据的影响很大。目前的地面数据以大型综合性试验所获得的数据为主。这些试验通常在区域范围内有多种地表覆盖类型,适于大范围综合验证多种地表参数,比如最近北京师范大学依托塞罕坝机械林场建立的碳、水和能量综合试验场地。毫无疑问这些场地及相关数据还将是未来验证的主要支撑。在验证场的选择方面,需要注意对一些临时站点做及时的更新。由于各种自然和社会因素,原先验证场地会发生改变导致无法再用于产品验证。最近在“国家民用空间基础设施陆地观测卫星共性应用支撑平台项目”支撑下建成的全国LAI自动观测网络为LAI产品的验证提供了高时频的地面参考数据(<http://nsicat.radi.ac.cn/static/home>)。在大型综合试验的同时,需要进一步整理发掘一些小型专业验证场的数据,这些验证场针对某一地表覆盖类型,可进行长时期连续观测。比如黑龙江江山娇试验林场,该林场曾长期作为林业部北方森林遥感试验场。另一方面值得关注的是科研人员个人项目试验收集的数据,这些数据往往针对性强,数据质量也较高。对一些不确定性高的地区,如热带雨林、生态过渡带和复杂下垫区域(湿地)等,目前实测数据库中还很缺乏。未来可以参考法国VALERI地面测量数据库(<http://www.avignon.inra.fr/valeri/>),结合综合性和针对性验证试验,同时吸收公众数据,形成高质量的实测数据库。

4.3.3 提高验证技术

新型验证技术一直是我国非常活跃的研究领域,今后应继续对验证中的尺度效应、异质地表和山地地形等方面开展持续工作,形成有特色的验证结论。随着时序LAI产品的涌现,应该更多的关注LAI时间序列验证^[22]。LAI时间序列验证包括两方面,一是对LAI不同物候期的质量进行检验,二是对LAI多年长时间序列的变化进行质量检验。为了更好的进行时序LAI验证,需要充分利用LAI的自动观测和自动验证技术,提供逐像元的质量信息。从空间分辨率看,目前全球千米级别的产品还需要高分辨率参考数据通过升尺度来进行验证(方案Ⅱ,表3),少数百米级全球产品无需中间过渡,可以直接用方案Ⅰ进行点与像元的对比验证,未来十米或米级的产品更是如此。随着激光雷达(LiDAR)技术在LAI反演中的逐步应用,未来应重视

对LiDAR反演所得LAI的验证^[103]。

4.3.4 加强国际合作

对于卫星遥感产品的验证,不能只局限在国内开展验证,国际间的合作必不可少。尽管我国地理类型丰富,一些重要的生态系统类型还是缺乏,比如热带雨林、稀树草原(Savanna)和灌丛等,对这些类型的验证可以使用国外站点的数据进行。另一方面,我国有广袤的农田、草地和落叶林,这方面的数据可以与国际同行进行交流共享。我国科学家参与国际验证计划,一方面能吸收国际先进经验,另一方面也通过参与国际验证计划的讨论、制定与实施,为卫星产品的验证做出中国贡献。遥感产品开放共享有助于促进遥感机理模型和遥感产品的开发以及产品验证工作。近年来,CEOS WGCV工作组在原先MODIS产品验证站点的基础上,开始布局陆表产品验证超级站(supersite)计划(https://lpvs.gsfc.nasa.gov/LPV_Supersites/LPVsites.html),这方面我国的站点应该可以有所作为。

5 结 论

LAI产品的生产和验证看似一个参数的事情,实际上涉及整个定量遥感模型—算法—产品—验证—应用各个环节的研究工作。我国对于LAI的遥感研究始于20世纪90年代,本世纪开始有了大力发展,经过一段时间的摸索学习,过去10 a研制生产了数套国产全球和全国产品。下一步需要进一步开发自主品牌的遥感机理模型,提出独具特色的实用反演算法,从整体上提升我国LAI产品生产和定量遥感研究水平。

目前国产LAI各产品之间输入数据源的同质性显著,对国外数据的依赖性严重。下一步产品的发展需要发挥国家资助层面的协调和科研团队之间的分工,从而更好地形成合力,同时充分利用我国遥感卫星产出高质量全球LAI产品。目前LAI产品的验证,最大的局限还是缺乏高质量的地面观测数据。未来应该按照真实性检验标准,依托各种研究网络和站点,继续推进地面实测数据的收集、整理和共享。在验证工作中,最重要的一点是必须清楚介绍验证场地、试验步骤和检验结果,要做到整体验证过程可追踪可重复可检验。这样得到的验证结果才能经得起同行和用户的推敲,并且在LAI全球产品质量评价中发出有影响力的声音。

展望未来,我们应该继续推动在各种地学和生

态应用中使用国产LAI产品,通过用户反馈意见,推进LAI产品生产与验证研究,形成互惠的正循环。本文虽然是关于LAI的思考,一些观点也适用其他地表参数的反演与验证工作,希望有助于我国遥感产品的生产与验证工作。

致谢:感谢闫凯、肖志强和肖青对本文的修改意见,刘洋、阎广建和李静在成文过程中的讨论,以及汪垚在文字格式上的帮助(时间顺序)!

参考文献(References):

- [1] GCOS. The Global Observing System for Climate: Implementation Needs (GCOS-200) [R]. World Meteorological Organization, 2016.
- [2] 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: 739-799. doi:10.1029/2018RG000608.
- [3] Yan K, Park T, Yan G, *et al.* Evaluation of MODIS LAI/FPAR Product Collection 6. Part 1: Consistency and Improvements [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 359. doi: 10.3390/rs8050359.
- [4] Yan K, Park T, Yan G, *et al.* Evaluation of MODIS LAI/FPAR Product Collection 6. Part 2: Validation and Intercomparison [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 460. doi: 33901/rs8060460.
- [5] Verger A, Baret F, Weiss M. Near Real-time Vegetation Monitoring at Global Scale[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7: 3473-3481. doi:10.1109/JSTARS.2014.2328632.
- [6] Jiang C, Ryu Y, Fang H, *et al.* Inconsistencies of Interannual Variability and Trends in Long-term Satellite Leaf Area Index Products [J]. *Global Change Biology*, 2017: 13787. doi: 10.1111/gcb.13787.
- [7] Piao S, Yin G, Tan J, *et al.* Detection and Attribution of Vegetation Greening Trend in China over the Last 30 Years [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 1601-1609. doi: 10.1111/gcb.12795.
- [8] Mahowald N, Lo F N, Zheng Y, *et al.* Projections of Leaf Area Index in Earth System Models[J]. *Earth System Dynamics*, 2016, 7: 211-229. doi:10.5194/esd-7-211-2016.
- [9] Pu Ruiliang, Gong Peng, Miller J R. Estimation of Coniferous Forest Leaf Area Index along the Oregon Transect Using CASI Data [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1993, 17(1): 41-48. [浦瑞良, 宫鹏, Miller J R. 用CASI遥感数据估计横跨美国俄勒冈州针叶林叶面积指数[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1993, 17(1): 41-48.]
- [10] Pu Ruiliang, Gong Peng, Miller J R. Correlating Leaf Area Index of Ponderosa Pine with Hyperspectral CASI Data [J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1993, 8(2): 112-125.

- [浦瑞良, 宫鹏, Miller J R. 美国西部黄松叶面积指数与高光谱分辨率 CASI 数据的相关分析[J]. 环境遥感, 1993, 8(2): 112-125.]
- [11] Wu Honggan, Qiao Yanyou, Chen Linhong, *et al.* Remote Sensing Monitoring of Dynamic Changes of Leaf Area Index in Masson Pine Stands[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(5):485-488.[武红敢, 乔彦友, 陈林洪, 等. 马尾松林叶面积指数动态变化的遥感监测研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5):485-488.]
- [12] Chen Xueyang, Meng Jihua, Du Xin, *et al.* The Monitoring of the Winter Wheat Leaf Area Index based on HJ-1 CCD Data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 22(2): 55-58, 62.[陈雪洋, 蒙继华, 杜鑫, 等. 基于环境星 CCD 数据的冬小麦叶面积指数遥感监测模型研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(2):55-58, 62.]
- [13] Lin Wenpeng, Zhao Min, Zhang Yifei, *et al.* Study on Estimation of Urban Forest LAI Models based on SPOT5[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(2):57-59, 63.[林文鹏, 赵敏, 张翼飞, 等. 基于 SPOT5 遥感影像的城市森林叶面积指数反演[J]. 测绘科学, 2008, 33(2):57-59, 63.]
- [14] Wan Huawei, Wang Jindi, Liang Shunlin, *et al.* Estimating Leaf Area Index by Fusing MODIS and MISR Data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 11: 3106-3111.[万华伟, 王锦地, 梁顺林, 等. 联合 MODIS 与 MISR 遥感数据估算叶面积指数[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 11:3106-3111.]
- [15] Xi Jianchao, Zhang Hongqi, Zhang Zhiqiang. Retrieving Effective Leaf Area Index of Conifer Forests Using Landsat TM Images[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(6):36-39.[席建超, 张红旗, 张志强. 应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 36-39.]
- [16] Liu Y, Liu R, Pisek J, *et al.* Separating Overstory and Understory Leaf Area Indices for Global Needleleaf and Deciduous Broadleaf Forests by Fusion of MODIS and MISR Data[J]. Biogeosciences, 2017, 14: 1093-1110. doi: 10.5194/bg-14-1093-2017.
- [17] Xiao Z, Liang S, Jiang B. Evaluation of Four Long Time-series Global Leaf Area Index Products[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 218-230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.016>.
- [18] Ma Peipei, Li Jing, Liu Qinhuo, *et al.* Multisensor Synergistic Quantitative Leaf Area Index Product of China[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(6):1232-1252.[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, 2019, 23(6):1232-1252.]
- [19] Ma M G, Che T, Li X, *et al.* A Prototype Network for Remote Sensing Validation in China[J]. Remote Sensing 2015, 7(5): 5187-5202.
- [20] Jin H A, Li A N, Bian J H, *et al.* Intercomparison and Validation of MODIS and GLASS Leaf Area Index (LAI) Products over Mountain Areas: A Case Study in Southwestern China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 55: 52-67. doi:10.1016/j.jag.2016.10.008.
- [21] Fang H, Jiang C, Li W, *et al.* Characterization and Intercomparison of Global Moderate Resolution Leaf Area Index (LAI) Products: Analysis of Climatologies and Theoretical Uncertainties[J]. Journal of Geophysical Research-biogeosciences, 2013, 118: 529-548. doi:10.1002/jgrg.20051.
- [22] 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. doi:10.1016/j.rse.2019.111377.
- [23] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, *et al.* Satellites Reveal Contrasting Responses of Regional Climate to the Widespread Greening of Earth[J]. Science, 2017, 356 (6343): 1180-1184. doi:10.1126/science.aal1727.
- [24] Zhu Z C, Piao S L, Lian X, *et al.* Attribution of Seasonal Leaf Area Index Trends in the Northern Latitudes with "Optimally" Integrated Ecosystem Models[J]. Global Change Biology, 2017, 23: 4798-4813. doi:10.1111/gcb.13723.
- [25] Guimberteau M, Zhu D, Maignan F, *et al.* ORCHIDEE-MICT (v8.4.1), A Land Surface Model for the High Latitudes: Model Description and Validation[J]. Geoscientific Model Development, 2018, 11: 121-163. doi:10.5194/gmd-11-121-2018.
- [26] Sawada Y, Koike T, Ikoma E, *et al.* Monitoring and Predicting Agricultural Droughts for a Water-Limited Subcontinental Region by Integrating a Land Surface Model and Microwave Remote Sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58: 14-33. doi: 10.1109/tgrs. 2019. 2927342.
- [27] Yuan H, Dai Y, Xiao Z, *et al.* Reprocessing the MODIS Leaf Area Index Products for Land Surface and Climate Modelling[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 1171-1187. doi: 10.1016/j.rse.2011.01.001.
- [28] 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: 209-223. doi:10.1109/TGRS.2013.2237780.
- [29] Xiao Z, Liang S, Wang J, *et al.* Long Time-series Global Land Surface Satellite Leaf Area Index Product derived from MODIS and AVHRR Surface Reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54: 5301-5318. doi:10.1109/TGRS.2016.2560522.
- [30] Liu Y, Liu R, Chen J M. Retrospective Retrieval of Long-term Consistent Global Leaf Area Index (1981-2011) from Combined AVHRR and MODIS Data[J]. Journal of Geophysical Research - Biogeosciences, 2012: 117. doi:10.1029/2012JG002084.
- [31] Liu Y, Ju W, Chen J, *et al.* Spatial and Temporal Variations of Forest LAI in China during 2000-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57: 2846-2856. doi: 10.1007/s11434-012-

- 5064-8.
- [32] Gobron N, Verstraete M M. Assessment of the Status of the Development of the Standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: Leaf Area Index (LAI)[C]//Global Terrestrial Observing System: Rome, May 25, 2009.
- [33] Lafont S, Zhao Y, Calvet J C, *et al.* Modelling LAI, Surface Water and Carbon Fluxes at High-resolution over France: Comparison of ISBA-A-gs and ORCHIDEE[J]. Biogeosciences, 2012, 9: 439-456. doi:10.5194/bg-9-439-2012.
- [34] Zhang Renhua, Tian Jing, Li Zhaoliang, *et al.* Principles and Methods for the Validation of Quantitative Remote Sensing Products[J]. Sci China Ser Earth Sci, 2010, 40(2): 211-222. [张仁华, 田静, 李召良, 等. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(2): 211-222.]
- [35] Jin Rui, Li Xin, Ma Mingguo, *et al.* Key Methods and Experiment Verification for the Validation of Quantitative Remote Sensing Products[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(6): 630-642. [晋锐, 李新, 马明国, 等. 陆地定量遥感产品的真实性检验关键技术与试验验证[J]. 地球科学进展, 2017, 32(6): 630-642.]
- [36] Fang H, Wei S, Liang S. Validation of MODIS and CYCLOPES LAI Products Using Global Field Measurement Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 43-54. doi: 10.1016/j.rse.2011.12.006.
- [37] Guo L B, Wang J D, Xiao Z Q, *et al.* Data-based Mechanistic Modelling and Validation for Leaf Area Index Estimation Using Multi-angular Remote-sensing Observation Time Series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35: 4655-4672. doi:10.1080/01431161.2014.919683.
- [38] Xu B, Li J, Park T, *et al.* An Integrated Method for Validating Long-term Leaf Area Index Products Using Global Networks of Site-based Measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 134-151. doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.049.
- [39] Li X L, Lu H, Yu L, *et al.* Comparison of the Spatial Characteristics of Four Remotely Sensed Leaf Area Index Products over China: Direct Validation and Relative Uncertainties[J]. Remote Sensing, 2018, 10: 148. doi:10.3390/rs10010148.
- [40] Xu B D, Park T, Yan K, *et al.* Analysis of Global LAI/FPAR Products from VIIRS and MODIS Sensors for Spatio-Temporal Consistency and Uncertainty from 2012-2016[J]. Forests, 2018, 9: 73. doi:10.3390/f9020073.
- [41] Ren Hongchang, Shi Xueli, Zhang Zuqiang. Analysis of Leaf area Index Variations over China during 2003~2009[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(2): 171-178. [任宏昌, 史学丽, 张祖强. 2003~2009年中国地区叶面积指数变化特征分析[J]. 气象科学, 2014, 34(2): 171-178.]
- [42] Peng Fei, Sun Guodong. Variation of Leaf Area Index in China from 1982 to 1999 and Its Relationship with Climate Change[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(2): 162-176. [彭飞, 孙国栋. 1982~1999年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系[J]. 气候与环境变化, 2017, 22(2): 162-176.]
- [43] Chen M, Griffis T J, Baker J, *et al.* Simulating Crop Phenology in the Community Land Model and Its Impact on Energy and Carbon Fluxes[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2015, 120: 310-325. doi:10.1002/2014jg002780.
- [44] Sun L Y, Schulz K. Spatio-temporal LAI Modelling by Integrating Climate and MODIS LAI Data in a Mesoscale Catchment[J]. Remote Sensing, 2017, 9: 21. doi:10.3390/rs9020144.
- [45] Zhang Z Q, Xue Y K, MacDonald G, *et al.* Investigation of North American Vegetation Variability Under Recent Climate: A Study Using the SSiB4/TRIFFID Biophysical/Dynamic Vegetation Model[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2015, 120: 1300-1321. doi: 10.1002/2014jd021963.
- [46] Xie X, Li A, Jin H, *et al.* Assessment of Five Satellite-derived LAI Datasets for GPP Estimations Through Ecosystem Models[J]. Science of the Total Environment, 2019. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.516.
- [47] Liu Y, Xiao J, Ju W, *et al.* Satellite-derived LAI Products Exhibit Large Discrepancies and Can Lead to Substantial Uncertainty in Simulated Carbon and Water Fluxes[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 206: 174-188. doi:10.1016/j.rse.2017.12.024.
- [48] Anav A, Friedlingstein P, Kidston M, *et al.* Evaluating the Land and Ocean Components of the Global Carbon Cycle in the CMIP5 Earth System Models[J]. Journal of Climate, 2013, 26: 6801-6843. doi:10.1175/jcli-d-12-00417.1.
- [49] Zhu Z, Bi J, Pan Y, *et al.* Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI) 3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) 3g Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the Period 1981 to 2011[J]. Remote Sensing, 2013, 5: 927-948.
- [50] Wu Xiaodan, Xiao Qing, Wen Jianguang, *et al.* Advances in Uncertainty Analysis for the Validation of Remote Sensing Products: Take Leaf Area Index for Example[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(5): 1011-1023. [吴小丹, 肖青, 闻建光, 等. 遥感数据产品真实性检验不确定性分析研究进展[J]. 遥感学报, 2014, 18(5): 1011-1023.]
- [51] Vermote E F, Roger J C, Ray J P. MODIS Surface Reflectance User's Guide: Collection 6[S]. 2015: 35.
- [52] Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, *et al.* MODIS Collection 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 168-182. doi:10.1016/j.rse.2009.08.016.
- [53] Ke Y, Leung L R, Huang M, *et al.* Development of High Resolution Land Surface Parameters for the Community Land Model[J]. Geoscientific Model Development, 2012, 5: 1341-1362. doi:10.5194/gmd-5-1341-2012.
- [54] Sindelarova K, Granier C, Bouarar I, *et al.* Global Data Set of Biogenic VOC Emissions Calculated by the MEGAN Model over the Last 30 Years[J]. Atmospheric Chemistry and

- Physics, 2014, 14: 9317-9341. doi: 10.5194/acp-14-9317-2014.
- [55] Chen J M, Menges C H, Leblanc S G. Global Mapping of Foliage Clumping Index Using Multi-angular Satellite Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97: 447-457, doi: 10.1016/j.rse.2005.05.003.
- [56] Tang H, Yu K, Hagolle O, *et al.* A Cloud Detection Method based on a Time Series of MODIS Surface Reflectance Images [J]. International Journal of Digital Earth, 2013, 6: 157-171. doi:10.1080/17538947.2013.833313.
- [57] Xiao Z, Liang S, Tian X, *et al.* Reconstruction of Long-Term Temporally Continuous NDVI and Surface Reflectance From AVHRR Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10: 5551-5568. doi:10.1109/JSTARS.2017.2744979.
- [58] Baret F, Morisette J, Fernandes R, *et al.* Evaluation of the Representativeness of Networks of Sites for the Global Validation and Intercomparison of Land Biophysical Products: Proposition of the CEOS-BELMANIP[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44: 1794-1803. doi: 10.1109/TGRS.2006.876030.
- [59] Xiang Yang, Xiao Zhiqiang, Liang Shunlin, *et al.* Validation of Global Land Surface Satellite (GLASS) Leaf Area Index Product [J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(3): 573-596.[向阳, 肖志强, 梁顺林, 等. GLASS叶面积指数产品验证[J]. 遥感学报, 2014, 18(3): 573-596.]
- [60] 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: 2219-2229. doi:10.1109/TGRS.2006.872100.
- [61] Chen J M, Leblanc S G. A Four-scale Bidirectional Reflectance Model based on Canopy Architecture [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35: 1316-1337. doi:10.1109/36.628798.
- [62] He L, Chen J M, Pisek J, *et al.* Global Clumping Index Map Derived from the MODIS BRDF Product [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 118-130. doi: 10.1016/j.rse.2011.12.008.
- [63] Chen J M, Deng F, Chen M. 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: 2230-2238.
- [64] Liu R, Liu Y. Generation of New Cloud Masks from MODIS Land Surface Reflectance Products [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 133: 21-37. doi: 10.1016/j.rse.2013.01.019.
- [65] Tang S, Chen J M, Zhu Q, *et al.* LAI Inversion Algorithm based on Directional Reflectance Kernels [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85: 638-648. doi:10.1016/j.jenvman.2006.08.018.
- [66] Yin G F, Li J, Liu Q H, *et al.* Improving LAI Spatio-temporal Continuity Using a Combination of MODIS and MERSI Data [J]. Remote Sensing Letters, 2016, 7: 771-780. doi: 10.1080/2150704x.2016.1182657.
- [67] Baret F, Weiss M, Verger A, *et al.* ATBD for LAI, FAPAR and FCOVER from PROBA-V Products at 300 m Resolution (GEOV3) [DB]. IMAGINES_RP2.1_ATBD-LAI300M; May 31, 2016, 2016: 61.
- [68] Zhu L, Chen J M, Tang S, *et al.* Inter-Comparison and Validation of the FY-3A/MERSI LAI Product Over Mainland China [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7: 458-468. doi: 10.1109/JSTARS.2013.2280466.
- [69] Kimm H, Guan K, Jiang C, *et al.* Deriving High-spatiotemporal-resolution Leaf Area Index for Agroecosystems in the U.S. Corn Belt using Planet Labs CubeSat and STAIR Fusion Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 239: 111615. doi:10.1016/j.rse.2019.111615.
- [70] Garcia-Haro F J, Camacho F, Martínez B, *et al.* Climate Data Records of Vegetation Variables from Geostationary SEVIRI/MSG Data: Products, Algorithms and Applications [J]. Remote Sensing, 2019, 11: 2103. doi:10.3390/rs11182103.
- [71] Liu Qinghuo, Cao Biao, Zeng Yelu, *et al.* Recent Progresses on the Remote Sensing Radiative Transfer Modeling over Heterogeneous Vegetation Canopy [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 933-945.[柳钦火, 曹彪, 曾也鲁, 等. 植被遥感辐射传输建模中的异质性研究进展 [J], 遥感学报, 2016, 20(5): 933-945.]
- [72] Li Ainong, Bian Jinhu, Yin Gaofer, *et al.* Study on Retrieving Key Ecological Parameters in Mountainous Regions by Remote Sensing Methods and Evaluating their Spatio-temporal Representativeness [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(2): 141-151.[李爱农, 边金虎, 尹高飞, 等. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法 [J], 地球科学进展, 2018, 33(2): 141-151.]
- [73] Xu Xiru, Fan Wenjie, Li Jucai, *et al.* A Unified Model of Bidirectional Reflectance Distribution Function for the Vegetation Canopy [J]. Sci China Ser Earth Sci, 2017, 47(2): 217-232.[徐希孺, 范闻捷, 李举材, 等. 植被二向性反射统一模型 [J], 中国科学: 地球科学, 2017, 47(2): 217-232.]
- [74] Huang Huaguo. Principles and Applications of the Three-dimensional Remote Sensing Mechanism Model RAPID [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(5): 901-913.[黄华国. 三维遥感机理模型 RAPID 原理及其应用 [J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5): 901-913.]
- [75] Qi Jianbo, Xie Donghui, Xu Yue. Principles and Applications of the 3D Radiative Transfer Model LESS [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(5): 914-924.[漆建波, 谢东辉, 许月, 等. 三维辐射传输模型 LESS 原理及其应用 [J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5): 914-924.]
- [76] Yang C, Yang D. An Improved Empirical Model for Retrieving Bottom Reflectance in Optically Shallow Water [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8: 1266-1273. doi:10.1109/JSTARS.

- 2015.2398898.
- [77] Zhou G, Yang S, Sathyendranath S, *et al.* Canopy Modeling of Aquatic Vegetation: A Geometric Optical Approach (AV-GO) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111829. doi:10.1016/j.rse.2020.111829.
- [78] Qiu F, Chen J M, Ju W, *et al.* Improving the PROSPECT Model to Consider Anisotropic Scattering of Leaf Internal Materials and Its Use for Retrieving Leaf Biomass in Fresh Leaves [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56: 3119-3136. doi: 10.1109/TGRS. 2018. 2791930.
- [79] Jiang C, Fang H. GSV: A General Model for Hyperspectral Soil Reflectance Simulation [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 83: 101932. doi:10.1016/j.jag.2019.101932.
- [80] Liang Shunlin, Cheng Jie, Jia Kun, *et al.* Recent Progress in Land Surface Quantitative Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 875-898. [梁顺林, 程洁, 贾坤, 等. 陆表定量遥感反演方法的发展新动态 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 875-898.]
- [81] Verrelst J, Malenovský Z, Van der Tol C, *et al.* Quantifying Vegetation Biophysical Variables from Imaging Spectroscopy Data: A Review on Retrieval Methods [J]. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40: 589-629. doi: 10.1007/s10712-018-9478-y.
- [82] Qu Y, Wang J, Wan H, *et al.* A Bayesian Network Algorithm for Retrieving the Characterization of Land Surface Vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 613-622.
- [83] Verrelst J, Alonso L, Camps-Valls G, *et al.* Retrieval of Vegetation Biophysical Parameters Using Gaussian Process Techniques [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50: 1832-1843.
- [84] Verrelst J, Vicent J, Rivera-Caicedo J P, *et al.* Global Sensitivity Analysis of Leaf-Canopy-Atmosphere RTMs: Implications for Biophysical Variables Retrieval from Top-of-Atmosphere Radiance Data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 1923. doi:10.3390/rs8080673.
- [85] Yin G F, Verger A, Qu Y, *et al.* Retrieval of High Spatio-temporal Resolution Leaf Area Index with Gaussian Processes, Wireless Sensor Network, and Satellite Data Fusion [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 244. doi:10.3390/rs11030244.
- [86] Shi H, Xiao Z, Liang S, *et al.* Consistent Estimation of Multiple Parameters from MODIS Top of Atmosphere Reflectance Data Using a Coupled Soil-canopy-atmosphere Radiative Transfer Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184: 40-57.
- [87] Shi H Y, Xiao Z Q, Liang S L, *et al.* A Method for Consistent Estimation of Multiple Land Surface Parameters from MODIS Top-of-Atmosphere Time Series Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55: 5158-5173.
- [88] Ma H, Liang S L, Xiao Z Q, *et al.* Simultaneous Inversion of Multiple Land Surface Parameters from MODIS Optical-thermal Observations [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128: 240-254.
- [89] Ma H, Liang S L, Xiao Z Q, *et al.* Simultaneous Estimation of Multiple Land-Surface Parameters from VIIRS Optical-Thermal Data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15: 156-160.
- [90] Li Guoqing, Zhang Hongyue, Zhang Lianchong, *et al.* Development and Trend of Earth Observation Data Sharing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 979-990. [李国庆, 张红月, 张连翀, 等. 地球观测数据共享的发展和趋势 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 979-990.]
- [91] Wu Xiaodan, Wen Jianguang, Xiao Qing, *et al.* Advances in Validation Methods for Remote Sensing Products of Land Surface Parameters [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 75-92. [吴小丹, 闻建光, 肖青, 等. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展 [J]. *遥感学报*, 2015, 19(1): 75-92.]
- [92] Li Xiaowen. Review of the Project of Quantitative Remote Sensing of Major Factors for Spatial Temporal Heterogeneity on the Land Surface [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 771-780. [李小文. 地球表面时空多要素的定量遥感项目综述 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(8): 771-780.]
- [93] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous Remote Sensing and Ground-based Experiment in the Hehe River Basin Scientific: Objectives and Experiment Design [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 897-914.]
- [94] Bai junhua, Xiao Qing, Liu Qinhuo, *et al.* The Research of Constructing the Target Ranges to Validate Remote Sensing Products [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(3): 573-578, 585. [柏军华, 肖青, 柳钦火, 等. 遥感产品真实性检验靶场构建方法初步研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(3): 573-578, 585.]
- [95] Li Z, Tang H, Xin X, *et al.* Assessment of the MODIS LAI Product Using Ground Measurement Data and HJ-1A/1B Imagery in the Meadow Steppe of Hulunber, China [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6: 6242-6265.
- [96] Fang H, Li W, Wei S, *et al.* Seasonal Variation of Leaf Area Index (LAI) over Paddy Rice Fields in NE China: Intercomparison of Destructive Sampling, LAI-2200, Digital Hemispherical Photography (DHP), and AccuPAR Methods [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 198-199: 126-141. doi:10.1016/j.agrformet.2014.08.005.
- [97] Fang H, Ye Y, Liu W, *et al.* Continuous Estimation of Canopy Leaf Area Index (LAI) and Clumping Index over Broadleaf Crop Fields: An Investigation of the PASTIS-57 Instrument and Smartphone Applications [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 253-254: 48-61. doi: 10.1016/j.agrformet. 2018.02.003.

- [98] Tong Xudong. Development of China High-resolution Earth Observation System[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5):775-780.[童旭东. 中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5):775-780.]
- [99] Li Xiaowen, Wang Yiting. Prospects on Future Developments of Quantitative Remote Sensing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9):1163-1169.[李小红, 王祎婷. 定量遥感尺度效应刍议[J]. *地理学报*, 2013, 68(9):1163-1169.]
- [100] Xu Baodong, Li Jing, Liu Qinghuo, *et al.* Spatial Representativeness Estimation of Station Observation in Validation of LAI Products: A Case Study with CERN In-situ Data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(6):910-927.[徐保东, 李静, 柳钦火, 等. 地面站点叶面积指数观测的空间代表性评价——以CERN站网观测为例[J]. *遥感学报*, 2015, 19(6):910-927.]
- [101] Shi Y, Wang J, Qin J, *et al.* An Upscaling Algorithm to Obtain the Representative Ground Truth of LAI Time Series in Heterogeneous Land Surface[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7:12887-12908.
- [102] Hao Dalei, Xiao Qing, Wen Jianguang, *et al.* Advances in Upscaling Methods of Quantitative Remote Sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(3):408-423.[郝大磊, 肖青, 闻建光, 等. 定量遥感升尺度转换方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2018, 22(3):408-423.]
- [103] Tang H, Ganguly S, Zhang G, *et al.* Characterizing Leaf Area Index (LAI) and Vertical Foliage Profile (VFP) over the United States[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13:239-252, doi:10.5194/bg-13-239-2016.

Development and Validation of Satellite Leaf Area Index (LAI) Products in China

Fang Hongliang^{1,2}

(1.LREIS, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Development and validation of Leaf Area Index (LAI) product from satellite remote sensing data is a crucial research topic in vegetation remote sensing. Over the past decade, a number of global and national LAI products, such as GLOBALBNU, GLASS, GLOBMAP, MuSyQ, and FSGOM have been developed in China from MODIS and AVHRR observations. These products have been widely used in home and abroad. At the same time, Chinese scholars have carried out extensive product validation studies at global and regional scales. This paper summarizes the current status and future development trends in LAI product development and validation in China. During the past years, significant progresses have been made in theory, technology and method studies in this field. The accuracy and continuity of domestic LAI products are on par with the advanced international level. However, there are still some drawbacks, such as heavily relying on data sources from abroad, unclear algorithm uncertainties, discontinuous product, and lack of sufficient validation, which greatly limit the breadth and depth of the product application. For future research, new satellite data, especially domestic satellite data, should be fully harnessed. The development of remote sensing models and inversion algorithms should be strengthened, and applications broadened in order to generate high quality LAI products to meet the research needs in Earth system sciences. In LAI product validation, current field measurement infrastructure should be improved, more extensive validation sites be developed, international collaboration be facilitated, and product usage broadened. The product market should be improved through more interactions and feedbacks with product users. With the increasing funding opportunities in this field, it is expected that the next two decades will see China's LAI remote sensing production and validation studies transit from a "following" role to a "parallel running" and even a "leading" role internationally.

Key words: Leaf Area Index (LAI); Remote sensing products; Validation; Evaluation; China