

基于 PROSAIL 模型的青贮玉米叶面积指数反演

汪彦龙 王 钧 崔 婷

(甘肃农业大学信息科学技术学院, 兰州 730070)

摘要: 精准且高效地估算区域内的玉米叶面积指数(LAI), 对于田间管理决策、地物产量预测以及实施精准农业具有至关重要的意义。针对多尺度、大范围遥感反演中存在的尺度效应、精度低、普适性差等问题, 本文以张掖市民乐县青贮玉米实验田为研究区, 选取青贮玉米为研究对象, 基于 Landsat-8 高光谱和 Modis 多光谱遥感影像, 并结合地面实测数据。通过对 PROSAIL 模型的输入参数进行局部和全局敏感性分析, 构建出青贮玉米在多个生育期内的冠层反射率-LAI 的查找表和最小寻优代价函数的反演策略, 确定研究区域的最佳 LAI 反演模型, 并利用青贮玉米不同生育期内的实测值完成了反演结果的精度验证及线性拟合。结果表明: LAI 反演结果总体较好, 拟合精度较高, 与实测值之间有较强的相关性, 拔节期、抽雄期、成熟期最优决定系数 R^2 分别为 0.85、0.91、0.90; 均方根误差 (RMSE) 分别为 0.35、0.58、0.51。因此, 基于多源高光谱遥感数据结合 PROSAIL 模型的反演策略可为作物参数反演提供新的科学依据和方法。

关键词: 青贮玉米; 叶面积指数; PROSAIL 模型; 反演策略; 高光谱数据

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0205-09

OSID:



Inversion of Leaf Area Index of Silage Corn Based on PROSAIL Model

WANG Yanlong WANG Jun CUI Ting

(College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Accurately and efficiently estimating corn LAI data within a region is of crucial importance for field management decisions, predicting land yield, and implementing precision agriculture. In response to the problems of scale effect, low accuracy, and poor universality in multi-scale and large-scale remote sensing inversion, taking the silage corn experimental field in Minle County, Zhangye City as the research area, silage corn was selected as the research object, based on Landsat-8 hyperspectral and Modis multispectral remote sensing images, combined with ground measured data. Through local and global sensitivity analysis of the input parameters of the PROSAIL model, the lookup table of canopy reflectance-LAI of silage corn in multiple growth periods and the inversion strategy of the minimum optimization cost function were constructed, and the optimal LAI inversion model for the study area was determined. The accuracy verification and linear fitting of the inversion results were completed by using the measured values in different growth periods of silage corn. The results showed that the inversion results of LAI were generally good, with high fitting accuracy and strong correlation with the measured values. The optimal determination coefficients R^2 for the jointing stage, tasseling stage, and maturity stage were 0.85, 0.91, and 0.90, respectively. The root mean square error (RMSE) were 0.35, 0.58, and 0.51, respectively. Therefore, the inversion strategy based on multi-source hyperspectral remote sensing data combined with the PROSAIL model can provide scientific basis and methods for crop parameter inversion.

Key words: silage corn; LAI; PROSAIL model; inversion strategy; hyperspectral data

收稿日期: 2023-11-13 修回日期: 2023-12-12

基金项目: 甘肃农业大学青年研究生指导教师扶持基金项目(GAU-QDFC-2022-18)、甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2022CYZC-41)和中央引导地方科技发展专项(24ZYQA023)

作者简介: 汪彦龙(1998—), 男, 硕士生, 主要从事定量遥感反演研究, E-mail: longwyan@126.com

通信作者: 王钧(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究, E-mail: julianwong82@163.com

0 引言

玉米是我国最重要的粮食作物之一,也是全球最主要的种植作物之一。青贮玉米作为反刍动物主要的粗饲料来源,在中国畜牧业发展中扮演着重要角色^[1],因其特有的性质(高产、高营养、适应性强、保质期长、易于管理等),在农业、养殖业、畜牧业领域,发挥着至关重要的作用。叶面积指数(Leaf area index, LAI)是单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数。它与植被密度、结构(单层或复层)、生物学特性(分枝角、耐荫性等)和环境条件(光照、土壤含水率、土壤营养状况)有关,是表征植被利用光能状况和冠层结构的一个综合指标,此外,LAI在监测植被生长、遥感定量反演和生态学研究等方面有着广泛的应用前景^[2-3]。

目前,LAI反演方法主要有经验模型法和物理模型法^[4-5]。经验模型法是利用原始光谱数据或植被指数与植被地表参数之间的关系构建线性、非线性回归分析模型,进而估算 LAI,该方法具有简单易行、便于操作的特点^[6]。文献[7-10]证明了此方法在参数反演研究中的有效性,但该方法容易受到遥感传感器、地物类型、覆盖度等因素的影响,缺乏可移植性,且普适性不足^[11]。相较于经验模型,物理模型法基于对光学、电磁学原理的研究,通过构建数学模型来估算 LAI,该方法具有机理性强、受环境影响小、反演精度相对较高和普适性的优点。同时物理模型的输入参数较多、反演过程更加复杂,可能存在病态反演问题^[12]。PROSAIL 辐射传输模型是物理模型反演中常用的方法之一,该方法考虑了植物叶片几何形状和空间分布,以及叶片反射和吸收特性,通过模拟植物冠层的辐射传输过程,可以较好地估算出 LAI。并有大量研究证明了该模型在作物参数反演中的可行性,张明政等^[13]利用 PROSAIL 模型结合基于正则化的代价函数、基于光谱响应函数和高斯噪声的反演策略,实现了对 LAI 和叶绿素的反演;杜育璋等^[14]通过构建光谱反射率-LAI 的查找表,结合了两种代价函数(Geman and McClure 代价函数和均方根误差代价函数),得到了很好的反演效果并表明相对最优的反演策略是 Band3、Band4、Band5 波段结合 GM 代价函数;苏伟等^[15]采用马尔可夫链蒙特卡洛方法对 PROSAIL 模型进行参数标定,通过查找表法结合最小二乘法的反演策略,提高了植被冠层 LAI 反演精度;曾琪等^[16]利用 PROSAIL 模型,通过构建毛竹冠层 LAI-冠层反射率的查找表反演策略,取得了较好的反演结果;谷成

燕等^[17]结合 Landsat TM 卫星遥感数据,通过 PROSAIL 模型建立查找表的方式实现了毛竹林 LAI 定量反演;苏伟等^[18]通过 PROSAIL 模型与基于叶倾角分布函数(TLS)优化后 PROSAIL 模型对试验区玉米进行了 LAI 反演,结果表明两种方式都有较好的相关性,且后者的反演精度有明显提高。但相关模型缺乏对多时序、多维度、多源遥感相融合的反演研究,导致反演模型稳健性、普适性、精度偏低。鉴于此,本文基于多源遥感数据结合 PROSAIL 模型,通过构建不同生长阶段青贮玉米冠层反射率-LAI 的查找表和最小寻优代价函数反演策略,找到适合研究区域的最佳反演模型,并对比分析青贮玉米主要生育期(拔节期、抽雄期、成熟期)LAI 反演结果,以确定多源遥感数据结合 PROSAIL 模型在定量遥感参数反演中的适用性。

1 数据获取及处理

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于甘肃省民乐县北部,位于 38°26'50"~38°48'30"N、100°29'42"~100°54'40"E 之间,属大陆性荒漠草原气候,平均海拔在 2 000 m 左右,受季风影响较大。春、秋两季气候温和,夏季炎热潮湿,冬季寒冷干燥。全年无霜期约 140 d,年平均气温为 4.10~5.30℃,降水主要集中在夏秋两季,全年平均降水量为 440~467 mm,日照时间较长,热量资源丰富,平均日照时数约为 2 318 h,有效积温在 1 178.10~3 053.30℃ 之间。该地区多平原丘陵地带,土壤肥沃,水资源丰富,有利于农作物生长和发育。农业是该地区主要经济来源之一,该区域种植的农作物主要包括玉米、小麦、马铃薯等,种植模式为单季节农作物种植,土地利用类型主要以耕地、草地为主。研究区青贮玉米一般在 4 月中下旬播种,9 月下旬收获。

1.2 地面实测数据

LAI 地面实测数据利用 LAI2000 型冠层分析仪测量得到,实测数据采样点分布均匀,大小设置基本相同,在采样区随机选取 24 个样本点并利用北斗定位系统对样本点做地标记录,定位精度较高,在每个样本点附近随机进行 3 次测量,取平均值作为样本点最终值,共获得 24 组有效的 LAI 实测值,为提高 LAI 采样精确度,减少测量误差,在实际操作过程中严格遵循 LAI2000 型冠层分析仪的使用规范,包括采样环境选择在晴朗、无云、微风,大气能见度较好,避免太阳直射等。根据研究区青贮玉米的实际生长状况,将主要生育时期划分为苗期(4 月下旬—5 月 10 日)、拔节期(5 月 10 日—6 月 26 日)、抽雄吐丝

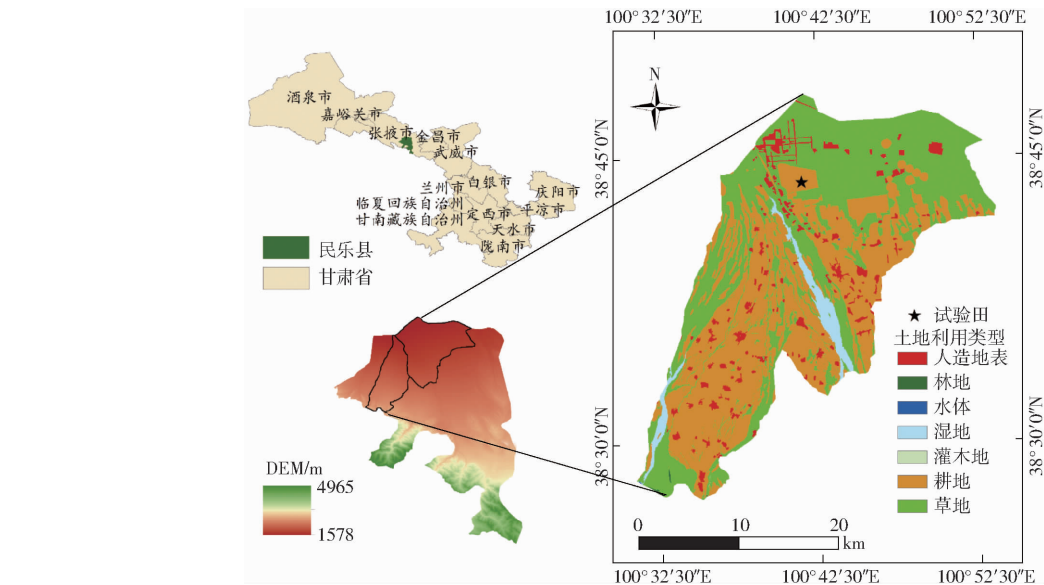


图 1 研究区位置、高程数据、土地利用类型分布

Fig. 1 Location, elevation data, and distribution of land use types in study area

期(6 月 26 日—8 月 6 日)和成熟期(8 月 6 日—9 月上旬)。在青贮玉米重要生育期内共进行 3 次实地采样,测量日期与遥感卫星过境的日期基本保持一致,分别为 2022 年 6 月 12 日、7 月 30 日、8 月 28 日。

1.3 遥感数据获取及预处理

采用的遥感数据分为两类,第 1 类是从 USGS Earth Explorer 官网上获取的 Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 高光谱数据集。Landsat-8 卫星上携带 2 个传感器,分别为 OLI 和 TIRS;11 个光谱带,波段包括

蓝色、绿色、红色、NIR、SWIR-1、SWIR-2 和分辨率 30 m 的卷云波段;取样方法为三次卷积算法,投影坐标系为 UTM-WGS84 投影坐标系,重返周期大于 72 h,倾角为 98.20°,轨道高度 705 km,输出格式为 GIOTIFF。是一种较好的可用于遥感影像处理的数据源。常选用分辨率为 30 m 的数据进行植被生长参数反演,其主要波段信息如表 1 所示。Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 数据预处理通过 ENVI 5.6 软件进行,主要包括辐射定标、大气校正、几何纠正以及影像裁剪等。

表 1 Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 主要波段信息
Tab. 1 Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 main band information

光谱波段	波长/ μm	分辨率/m	用途
Coastal	0.43 ~ 0.45	30	海洋水色要素和大气气溶胶测量
Blue	0.45 ~ 0.51	30	水体穿透、分析土壤和植被
Green	0.53 ~ 0.59	30	分辨植被
Red	0.64 ~ 0.67	30	处于叶绿素吸收区、观测道路、植被种类
NIR	0.85 ~ 0.88	30	估算生物量,分辨潮湿土壤
SWIR-1	1.57 ~ 1.65	30	分辨道路、裸土
SWIR-2	2.11 ~ 2.29	30	辨识植被覆盖和湿润土壤

第 2 类数据是 Modis 多光谱复合数据集产品,时间分辨率 8 d,空间分辨率 500 m,投影坐标系为 WGS84,输出为栅格类。Modis 数据是通过 MRT 工具进行的批量处理(包括批量拼接、重投影、格式转换),将栅格数据导入 ArcGIS 10.8 中进行绝对值转换,异常值剔除,按照掩膜提取、裁剪,最终得到研究区多光谱反射率。

2 模型与方法

2.1 PROSAIL 辐射传输模型

PROSAIL 辐射传输模型由 PROSPECT 叶片光

学模型和植被冠层的二向反射率 SAIL 模型耦合而成,近年来被广泛用于植被冠层参数反演^[19-20]。PROSPECT 模型假定叶片结构是多层次且表面粗糙的平板,基于叶片生化参数(如叶绿素浓度 C_{ab} 、叶片干物质浓度 C_m 、叶片等效水厚度 C_w 、叶片结构参数 N_s)的输入,通过复杂的模拟过程,输出不同波段上叶片反射率和透射率。SAIL 模型假设植被冠层是均匀的,且叶片在各个方向上都具有相同的特性。该模型基于辐射传输方程理论,将 PROSPECT 叶片光学模型输出反射率和透射率作为 SAIL 模型输入,然后通过复杂的模拟过程,再现植被冠层内部多次

反射和散射等辐射传输过程。PROSAIL 模型综合考虑多种参数的影响,包括叶倾角分布、相对方位角、太阳冠层方位角、二向反射、叶片反射率和透射率以及土壤背景反射信息等,它能够更准确地模拟出波段 400 ~ 2 500 nm 的植被冠层反射率光谱^[18]。因此该模型常用于定量植被反演、遥感作物分析、植被生长监测、土壤水分估算等研究领域。在运行 PROSPECT 模型时,需要输入基础参数,如 N_s 、 C_{ab} 、 C_m 、 C_w 等,这些参数经过模型处理后就得到叶片反射率和透射率,接着再将得到的反射率和透射率、平均叶倾角分布、相对方位角、太阳冠层方位角、热点参数、土壤因子等作为输入参数,运行 SAIL 模型,即可得到植被冠层反射率光谱数据。最终耦合后 PROSAIL 模型公式为

$$P(\lambda) = \text{PROSAIL}(N_s, C_{ab}, C_{ar}, C_w, C_m, C_{brown}, V_{LIDF}, V_{LAI}, H, \theta_s, \theta_v, \phi_v, \rho_\gamma)$$

式 中

$P(\lambda)$ ——植被冠层光谱反射率

C_{ar} ——类胡萝卜素浓度

V_{LIDF} ——叶倾角分布函数

V_{LAI} ——叶面积指数

H ——热点效应参数

θ_s ——太阳天顶角

θ_v ——观测天顶角

ϕ_v ——观测相对方位角

ρ_γ ——土壤反射系数

C_{brown} ——棕褐色素浓度

2.2 敏感性分析

敏感性分析是一种用于评估模型输出结果对输入参数变化敏感程度的方法。敏感性分析根据作用范围可分为全局敏感性分析和局部敏感性分析,全局敏感性分析除分析单参数取值变化对模型结果的影响外,同时考虑各个参数间的相互作用,主要用来确定模型中所有输入对输出的贡献程度,常用的方法包括 Sobol 指数、Morris 方法和 EFAST 方法等。局部敏感性分析主要是考虑在特定参数空间内,参数变化对模型输出的影响程度,常用方法包括参数敏感性系数、一次一个变量法(One-at-a-Time, OAT)等。EFAST 方法是 SALTELLI 等^[21]结合了 Sobel 法和傅里叶幅度敏感性检验法的优点,提出的一种基于全局敏感性的分析方法。该方法采用模型方差分析的思想,认为模型输出方差是由模型各输入参数以及参数间相互作用产生,因此模型输出方差可以反映输入参数的敏感性程度。且 EFAST 方法具有鲁棒性强、计算效率高、所需样本少等优点。EFAST 全局敏感性分析方法不仅可以分析单个参数的敏感性,还考虑了参数间的耦合影响,适用于分析高维非

线性模型的参数敏感性^[22]。

PROSAIL 模型中参数较多,地域差异性较大,不同参数之间的耦合度会产生误差,因此本研究将通过局部敏感性方法中的 OAT 方法和全局敏感性 EFAST 方法两种方法进行模型输入参数敏感性分析,完成参数确定及参数本地化。

2.3 输入参数确定与查找表建立

基于物理模型法反演过程中,由于不确定参数的数量比实际观测参数的数量更多更复杂,植被的生化参数与光谱反射率之间的非线性拟合等导致物理模型存在病态反演问题,而查找表法可以很好地解决这一问题。查找表法是根据物理模型输出的冠层反射率与 LAI 之间建立的一一对应关系组合,通过逐个找寻遥感影像反射率与查找表数据组合中的最优代价函数适应度,即反演结果就是代价函数最小时所得到反射率数据对应的叶面积指数。为了建立有效的查找表,提高反演效率和精度,PROSAIL 模型的输入参数及其取值范围根据地面实测数据、参数敏感性分析的定量结果、LOPEX^[23]数据库数据 3 部分确定,同时参考一些先验知识^[24-27],部分参数取值如表 2 所示。

表 2 PROSAIL 模型的输入参数及其取值范围

Tab.2 Input parameters and their value ranges of PROSAIL model

模型	参数	数值	步长
PROSPECT	N_s	1 ~ 3.2	0.1
	$C_{ab}/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	10 ~ 100	5
	$C_{ar}/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	2 ~ 20	0.5
	$C_m/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	0.002 ~ 0.020	0.000 5
	C_w/cm	0.001 ~ 0.045	0.001
SAIL	V_{LAI}	0.1 ~ 7.0	0.1
	V_{LIDF}	椭球分布函数	
	$\theta_s/(\text{°})$	20 ~ 80	2
	$\theta_v/(\text{°})$	0	
	$\phi_v/(\text{°})$	0	
	ρ_γ	0.2	
	H	0.1 ~ 1.0	0.05

2.4 反演策略及代价函数选择

根据不同敏感性参数组合运行 PROSAIL 模型,将模拟冠层高光谱反射率利用光谱响应函数(图 2)重采样至 Landsat-8 影像的中心波长处,得到青贮玉米冠层多光谱反射率,根据前人经验,在预处理完成后,选择 Landsat-8 影像 Band3、Band4、Band5 进行青贮玉米叶面积指数反演。由于代价函数在基于查找表反演叶面积指数中发挥着重要作用,分别利用平方差和函数、基于先验知识代价函数进行 LAI 反演,通过对比分析基于不同代价函数对反演结果

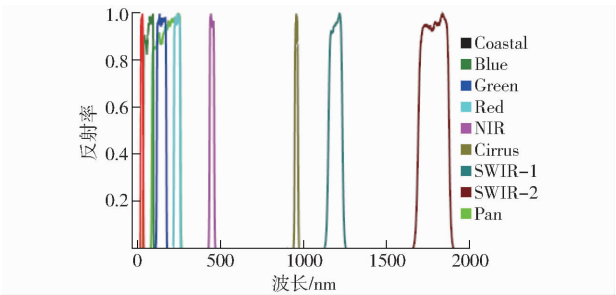


图 2 Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 光谱响应函数
Fig. 2 Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 spectral response function

的影响,最终得到研究区域内基于最优反演策略下的 LAI 反演结果。代价函数计算公式为

$$D_1 = \sum_i^n (\rho_m^{(i)} - \rho_o^{(i)})^2 \tag{2}$$

$$D_2 = \sum_i^n (\rho_m^{(i)} - \rho_o^{(i)})^2 + \sum_j^m \left(\beta_j \frac{x_j - x_p}{x_u^{(j)} - x_l^{(j)}} \right)^2 \tag{3}$$

式中 D_1 ——平方差和函数
 D_2 ——先验知识平方差和函数
 n ——波段数量
 $\rho_m^{(i)}$ ——模型模拟的第 i 个波段反射率
 $\rho_o^{(i)}$ ——遥感影像上某个像元第 i 个波段反射率
 m ——模型输入参数数量

β_j ——第 j 个输入参数先验误差
 x_j ——查找表第 j 个输入参数初始值
 x_p ——查找表第 j 个输入参数先验值
 $x_u^{(j)}$ ——查找表第 j 个输入参数上限
 $x_l^{(j)}$ ——查找表第 j 个输入参数下限

2.5 精度评价

选取决定系数 R^2 、均方根误差 (RMSE) 作为评价指标^[28-30],对基于 PROSAIL 模型反演得到的 LAI 结果进行验证和精度评价。 R^2 越大, RMSE 越小,表明拟合程度越好,反演精度越高。

3 结果与分析

3.1 局部敏感性分析

基于 OAT 局部敏感性分析方法,即通过改变某一个参数,其他参数设置为常量。对 PROSAIL 模型输入参数进行局部敏感性分析,观察冠层反射光谱在波段 400 ~ 2 500 nm 上的响应变化,并分析其敏感度,结果如图 3 所示。不同输入参数在不同波段上对光谱反射率的贡献程度不尽相同。 N_s 在可见光波段 400 ~ 780 nm 之间的变化不大,780 nm 之后随着冠层结构参数 N_s 的增加,光谱反射率有小幅变化;随着 C_{ab} 的增加, C_{ab} 在可见光波段的冠层反射率显著下降,在 780 nm 后,冠层反射率基本无变化;随着 C_{ar} 的增加,冠层反射率在波段 450 ~ 560 nm 内略

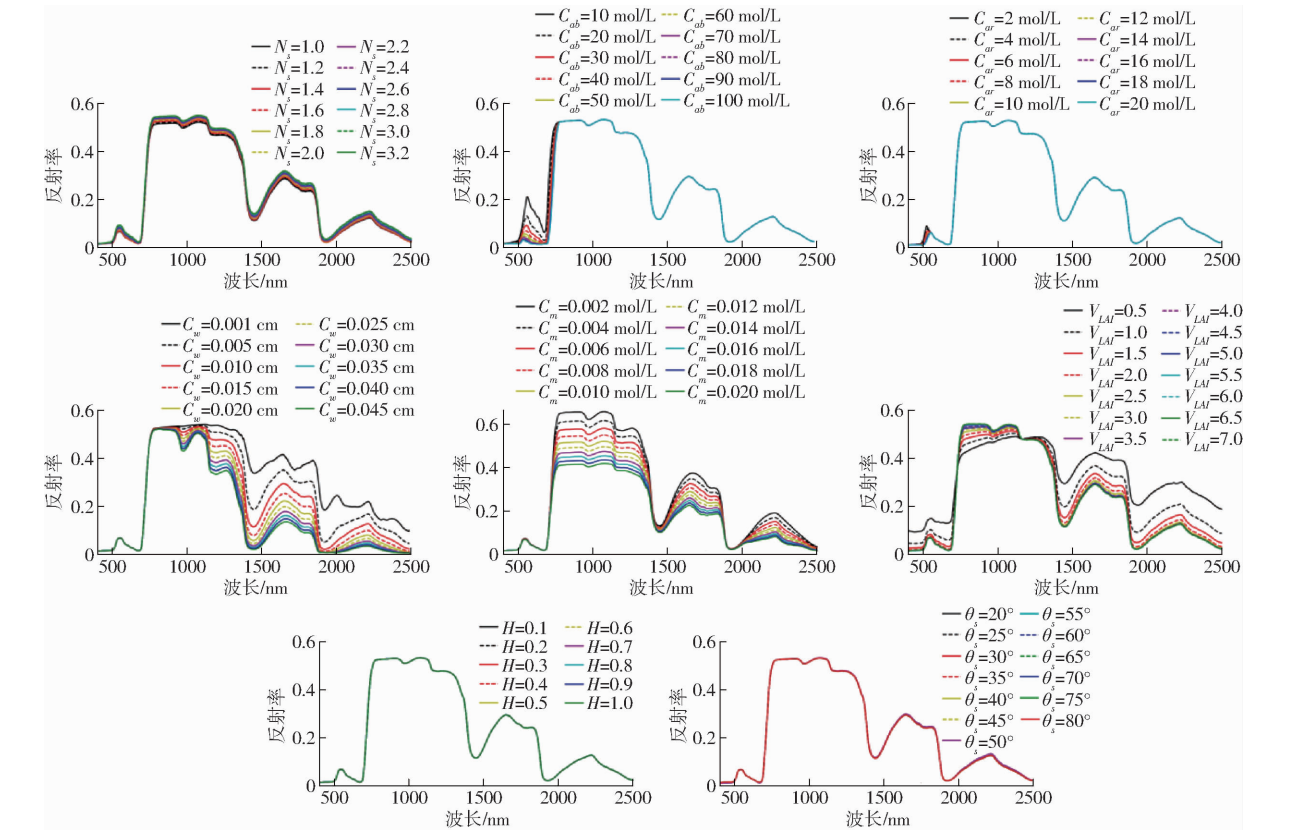


图 3 PROSAIL 模型参数的局部敏感性分析结果

Fig. 3 Local sensitivity analysis results of PROSAIL model parameters

有减小,其他波段上基本无变化;LAI 在全波段上都有变化,随着 LAI 的增加,冠层反射率在波段 400 ~ 730 nm 内、1 150 ~ 2 500 nm 内有明显的减小,在其余波段上均有所增加;随着 C_m 的增加,冠层反射率在 1 300 nm 之后有明显的减小,其余波段内变化不大;随着 C_w 的增加,冠层反射率在波段 780 ~ 1 300 nm 之间有明显的减小,其余波段内变化不大;随着参数的改变, θ_s 、 H 在全波段上基本无变化。通过 OAT 定量分析:在波段 400 ~ 780 nm 范围内, C_{ab} 和 LAI 对光谱反射率的影响程度大, C_{ab} 敏感度最高,LAI 次之;在波段 780 ~ 1 300 nm 范围内敏感度由大到小依次为 C_m 、LAI、 C_w 、 N_s ;在波段 1 500 ~ 2 500 nm 范围内敏感度由大到小依次为 C_w 、LAI、 C_m 、 N_s ; C_{ar} 、 θ_s 、 H 在全波段上的贡献程度低,敏感度小。

3.2 全局敏感性分析

基于 EFAST 全局敏感性分析方法,对结构参数、叶绿素浓度、等效水厚度、干物质浓度、叶面积指数、热点参数、类胡萝卜素和褐色色素等 PROSAIL 模型输入参数进行全局敏感性分析。主要步骤为:①先进行随机采样,选择采样方法,得到参数样本,参数范围设置参照表 1。②通过代入 PROSAIL 模型得到了参数组合输出。③执行蒙特卡罗分析。④敏感性结果及出图。得到全局敏感性结果如图 4 所示,不同颜色表示不同输入参数,参数所占百分比表示该参数在波段 400 ~ 2 500 nm 上的敏感度。在可见光波段 400 ~ 780 nm 之间,青贮玉米冠层反射率受 C_{ab} 、LAI 的影响最大,是模型的主要敏感性参数,占总敏感度的 80% 以上,但 800 nm 后 C_{ab} 的敏感度

为 0,其主要原因可能是因为 C_{ab} 的吸收峰在可见光范围内;近红外波段 800 ~ 1 300 nm 之间, C_m 和 LAI 是模型主要敏感性参数,二者约占总敏感度的 80%;在短波红外段 1 300 ~ 2 500 nm 之间,LAI 和 C_w 是模型主要敏感性参数,二者约占总敏感度的 50% 以上。

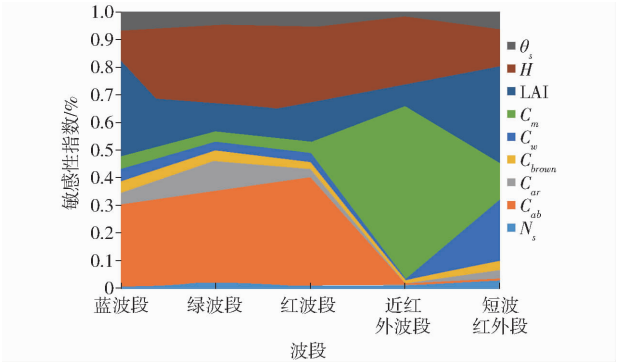


图 4 PROSAIL 模型输入参数在不同波段上的全局敏感性分析结果

Fig.4 Results of global sensitivity analysis of input parameters of PROSAIL model at different bands

3.3 反演结果分析

利用 PROSAIL 辐射传输模型,基于查找表法通过不同的光谱影像反射率结合不同代价函数进行青贮玉米 LAI 的反演,并通过样地实测值完成了精度检验,最终构建了适合研究区域青贮玉米的最佳 LAI 反演模型,得到青贮玉米重要生长阶段(拔节期、抽雄期、成熟期)的 LAI 空间分布结果如图 5 所示。此外,由于代价函数进行最小值匹配过程中,可能存在匹配 LAI 不是唯一的情况,导致反演结果出现多个值,针对这一问题,通过最佳代价函数对应的多

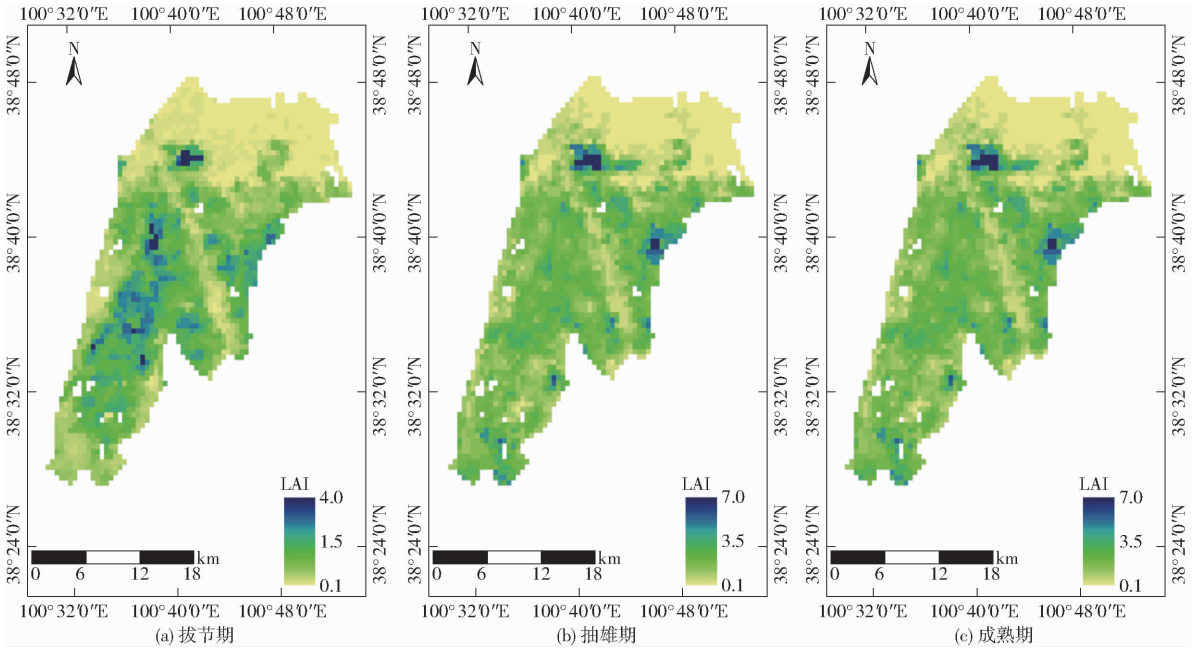


图 5 基于最优反演策略下不同生育期的反演结果空间分布

Fig.5 Spatial distributions of inversion results for different growth stages based on optimal inversion strategy

个叶面积指数求取平均值,作为最终反演结果。

由图 5 可知,处于拔节期的青贮玉米 LAI 反演结果主要分布在 1.50 附近(图 5a),且大部分 LAI 反演结果略低于实测结果,仅有部分 LAI 较实测值偏大($LAI>3.50$),实测点 LAI 均值约为 1.74,对应反演点 LAI 均值约为 1.45,总体上二者的偏离程度不大;处于抽雄期的青贮玉米 LAI 反演结果主要分布在 4.50 附近(图 5b),植被覆盖度高的区域 LAI 整体偏高,城镇、水体、道路等植被覆盖度低的区域 LAI 小于 0.10,反演结果较实测值略低,实测点 LAI 均值约为 4.50,对应反演点 LAI 均值约为 4.20,且抽雄期 LAI 值在青贮玉米整个生育期内达到峰值($LAI>7.50$);处于成熟期的青贮玉米 LAI 较抽雄期有所减少,LAI 的反演结果主要分布在 3.50 附近(图 5c),实测结果略高于反演结果,实测点 LAI 均值约为 3.80,对应反演点 LAI 均值约为 3.50,总体上拟合程度较好。

3.4 反演精度分析及评价

基于实测样本数据和对应实测位置不同的光谱遥感数据,在青贮玉米重要生育期(拔节期、抽雄期、成熟期),通过查找表法结合不同反演策略进行

了青贮玉米 LAI 反演,并完成了其反演结果的线性拟合与精度评价。得到结果如图 6 所示,图中反演 LAI_1 (绿色标记)对应 D_1 、反演 LAI_2 (黑色标记)对应 D_2 。基于 Modis 多光谱数据源的反演结果见图 6a~6c,通过对比 D_2 构建的反演策略与 D_1 构建的反演策略可知,拟合效果有明显提高,在拔节期、抽雄期、成熟期决定系数 R^2 分别为 0.70、0.80、0.81,较后者提高约 4%、5%、4%;但同时均方根误差(RMSE)也较后者分别增大 0.15、0.14、0.15,说明了反演精度降低,而就整体拟合效果在某种程度上是改善的,尽管反演误差有所增大。基于 Landsat-8 高光谱影像数据的反演结果见图 6d~6f,通过对比 D_2 构建的反演策略与 D_1 构建的反演策略可得,拟合效果与反演精度均有不同程度的提高,在拔节期、抽雄期、成熟期决定系数 R^2 分别为 0.85、0.91、0.90;较后者提高约 4%、5%、3%;均方根误差(RMSE)分别为 0.35、0.58、0.51,较后者降低 0.20、0.07、0.22。从总体结果来看青贮玉米不同生育期内拟合效果有所差异,但总体上相关性较高,基于 Landsat-8 高光谱影像数据结合 D_2 构建的反演模型效果更好,反演精度更高。

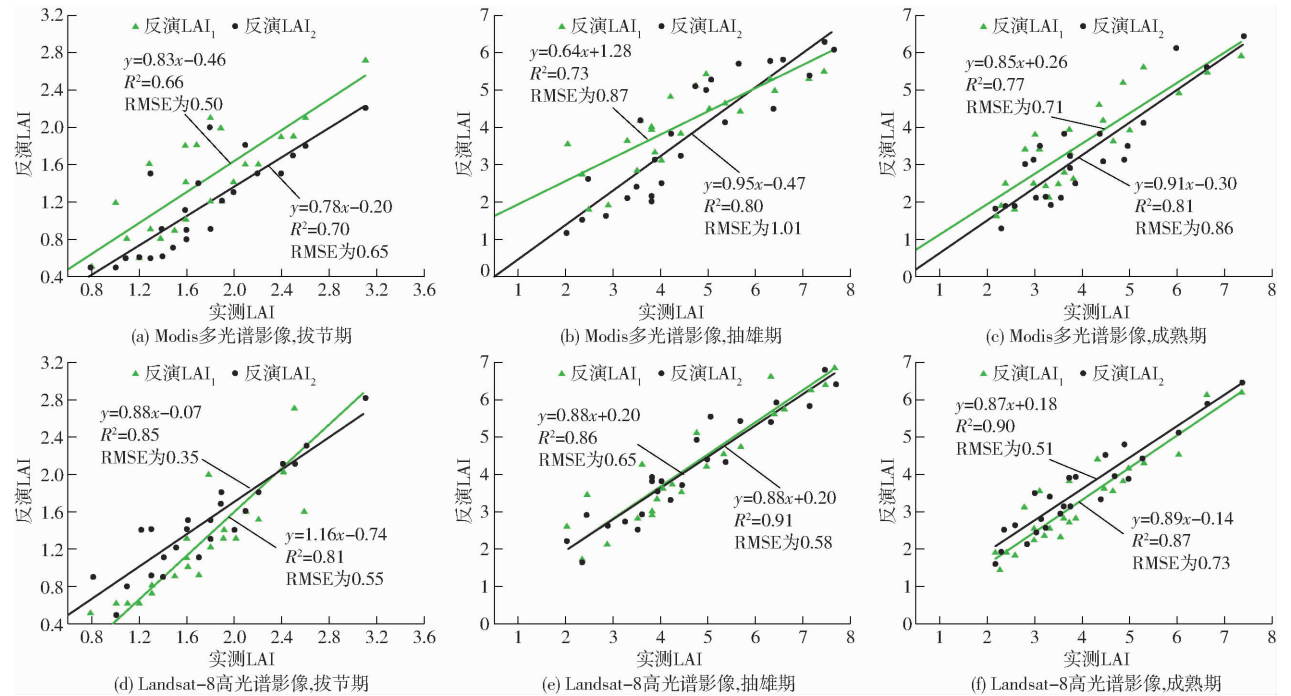


图 6 基于 Landsat-8/Modis 光谱影像反演 LAI 的精度评价

Fig. 6 Accuracy evaluation of LAI inversion based on Landsat-8/Modis spectral images

4 结论

(1) 利用多源光谱遥感影像与 PROSAIL 模型相结合的方式,通过对 PROSAIL 模型的输入参数进行 OAT 分析和 EFAST 分析,确定了敏感参数及其范围,其中, LAI 、 C_m 、 C_w 、 C_{ab} 和 N_s 等参数的敏感度较

高;在解决植被生化指数反演中常见的“病态反演问题”时,先通过光谱响应函数将影像的高光谱反射率转换为多光谱反射率,然后利用 Band3、Band4、Band5 的多光谱波段组合构建了青贮玉米在多个生育期内的冠层反射率-LAI 查找表,显著提高了反演精度。

(2)通过分析不同代价函数对反演结果的影响,确定最优反演策略是基于 Landsat-8 高光谱数据结合先验知识的代价函数所构建的。这种策略不仅增强了反演准确性,还能提高其普适性;基于研究区域的最佳反演模型,得到了青贮玉米拔节期、抽雄期、成熟期 R^2 分别为 0.85、0.91、0.90;RMSE 分别为 0.35、0.58、0.51。根据反演结果,可以较准确地获取区域范围内青贮玉米不同生育期的长势情况,为大范围内作物估产、发展精准农业提供数据支持。

参 考 文 献

[1] 唐德富,陈志刚,李飞,等.青贮玉米不同部位(组织)养分含量近红外预测模型的构建[J].草业科学,2021,38(9):1753-1761.
TANG Defu, CHEN Zhigang, LI Fei, et al. Construction of near-infrared prediction model for nutrient content in different parts (tissues) of silage maize[J]. Pratacultural Science, 2021,38(9):1753-1761. (in Chinese)

[2] DARVISHZADEH R, WANG T, SKIDMORE K A, et al. Analysis of Sentinel-2 and rapideye for retrieval of leaf area index in a saltmarsh using a radiative transfer model[J]. Remote Sensing,2019,11(6):671.

[3] 王宝水,刘旭,杨红军.一种基于高光谱遥感数据的植被 LAI 反演算法[J].地理空间信息,2016,14(11):72-73.
WANG Baoshui, LIU Xu, YANG Hongjun. A vegetation LAI inversion algorithm based on hyperspectral remote sensing data [J]. Geospatial Information, 2016,14 (11): 72-73. (in Chinese)

[4] 刘帅兵,金秀良,冯海宽,等.病害胁迫下玉米 LAI 遥感反演研究[J].农业机械学报,2023,54(3):246-258.
LIU Shuaibing, JIN Xiuliang, FENG Haikuan, et al. Analysis of effect of disease stress on maize LAI remote sensing estimation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):246-258. (in Chinese)

[5] 赫晓慧,冯坤,郭恒亮,等.基于 PROSAIL 模型和遗传算法优化的 BP 神经网络模型的不同大豆种群叶面积指数反演比较[J].河南农业大学学报,2021,55(4):698-706.
HE Xiaohui, FENG Kun, GUO Hengliang, et al. Comparison of leaf area index inversion of different soybean populations based on BP neural network model optimized by PROSAIL model and genetic algorithm[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021,55(4):698-706. (in Chinese)

[6] 邵亚杰,汤秋香,崔建平,等.融合无人机光谱信息与纹理特征的棉花叶面积指数估测[J].农业机械学报,2023,54(6):186-196.
SHAO Yajie, TANG Qiuxiang, CUI Jianping, et al. Cotton leaf area index estimation using UAV spectral information and texture characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 186-196. (in Chinese)

[7] 骆社周,程峰,王方建,等.基于 TM 遥感数据的西藏林芝地区叶面积指数反演[J].遥感技术与应用,2012,27(5):740-745.
LUO Shezhou, CHENG Feng, WANG Fangjian, et al. Inversion of leaf area index in Nyingchi region of Tibet based on TM remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application,2012,27(5):740-745. (in Chinese)

[8] 白兰东,苟叶培,邵文文,等.基于多角度遥感的植被指数与叶面积指数的线性关系研究[J].测绘工程,2016,25(1):1-4.
BAI Landong, GOU Yepi, SHAO Wenwen, et al. Linear relationship between vegetation index and leaf area index based on multi-angle remote sensing[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2016,25(1):1-4. (in Chinese)

[9] 刘珺,庞鑫,李彦荣,等.夏玉米叶面积指数遥感反演研究[J].农业机械学报,2016,47(9):309-317.
LIU Jun, PANG Xin, LI Yanrong, et al. Study on remote sensing retrieval of leaf area index of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):309-317. (in Chinese)

[10] 王军,姜芸.基于无人机多光谱遥感的大豆叶面积指数反演[J].中国农学通报,2021,37(19):134-142.
WANG Jun, JIANG Yun. Leaf area index inversion of soybean based on UAV multispectral remote sensing [J]. China Agriculture Bulletin, 2021,37(19):134-142. (in Chinese)

[11] 范军亮,王涵,廖振棋,等.基于纹理-颜色特征与植被指数融合的冬小麦 LAI 估测[J].农业机械学报,2023,54(7):347-359.
FAN Junliang, WANG Han, LIAO Zhenqi, et al. LAI estimation of winter wheat based on the fusion of texture-color features and vegetation index [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (7): 347-359. (in Chinese)

[12] 郭恒亮,李晓,付羽,等.基于核岭回归算法的 PROSAIL 模型反演高空间分辨率叶面积指数[J].草业学报,2022,31(12):41-51.
GUO Hengliang, LI Xiao, FU Yu, et al. The PROSAIL model based on nuclear ridge regression algorithm the high spatial resolution leaf area index[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(12):41-51. (in Chinese)

[13] 张明政,苏伟,朱德海.基于 PROSAIL 模型的玉米冠层叶面积指数及叶片叶绿素含量反演方法研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(5):28-33.
ZHANG Mingzheng, SU Wei, ZHU Dehai. Research on leaf area index and leaf chlorophyll content based on PROSAIL model [J]. Geography and Geographic Information Science, 2019,35(5):28-33. (in Chinese)

[14] 杜育璋,姜小光,张雨泽,等.基于 Landsat-8 遥感数据和 PROSAIL 辐射传输模型反演叶面积指数[J].干旱区地理,2016,39(5):1096-1103.
DU Yuzhang, JIANG Xiaoguang, ZHANG Yuze, et al. Invert the leaf area index based on the Landsat-8 remote sensing data and the PROSAIL radiative transmission model[J]. Geography of Arid Region, 2016,39(5):1096-1103. (in Chinese)

[15] 苏伟,郭佳昱,王新盛,等.基于 Sentinel-2 影像与 PROSAIL 模型参数标定的玉米冠层 LAI 反演[J].光谱学与光谱分析,2021,41(6):1891-1897.

- SU Wei, WU Jiayu, WANG Xinsheng, et al. LAI inversion of maize canopy based on Sentinel-2 image and PROSAIL model parameter calibration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(6): 1891–1897. (in Chinese)
- [16] 曾琪, 余坤勇, 姚雄, 等. 基于 PROSAIL 辐射传输模型的毛竹林分冠层反射率模拟研究[J]. 植物科学学报, 2017, 35(5): 699–707.
- ZENG Qi, YU Kunyong, YAO Xiong, et al. Simulation of canopy reflectance of *Phyllostachys phyllostachys* based on PROSAIL radiative transfer model[J]. Chinese Journal of Plant Sciences, 2017, 35(5): 699–707. (in Chinese)
- [17] 谷成燕, 杜华强, 周国模, 等. 基于 PROSAIL 辐射传输模型的毛竹林叶面积指数遥感反演[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2248–2256.
- GU Chengyan, DU Huaqiang, ZHOU Guomo, et al. Remote sensing retrieval of leaf area index of bamboo forest based on PROSAIL radiative transfer model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2248–2256. (in Chinese)
- [18] 苏伟, 郭皓, 赵冬玲, 等. 基于优化 PROSAIL 叶倾角分布函数的玉米 LAI 反演方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 234–241.
- SU Wei, GUO Hao, ZHAO Dongling, et al. LAI inversion method for maize based on optimization of PROSAIL leaf inclination distribution function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 234–241. (in Chinese)
- [19] 吴文强. 基于 PROSAIL 模型玉米叶面积指数和叶绿素反演[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- WU Wenqiang. Based on the PROSAIL model maize leaf area index and chlorophyll inversion[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [20] 郭晓燕. 基于 HJ-1A-HSI 数据及 PROSAIL 模型的苹果冠层参数定量反演[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- GUO Xiaoyan. Quantitative inversion of apple canopy parameters based on HJ-1A-HSI data and PROSAIL model[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [21] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis[J]. Technometrics, 1999, 41(1): 39–56.
- [22] 何维, 杨华. 模型参数全局敏感性分析的 EFAST 方法[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 836–843.
- HE Wei, YANG Hua. The EFAST method for the global sensitivity analysis of the model parameters[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 836–843. (in Chinese)
- [23] 白丽, 柏军华, 肖青, 等. 玉米抽穗期雄穗对冠层反射率辐射传输特征的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 162–170.
- BAI Li, BAI Junhua, XIAO Qing, et al. Effects of male ear on radiative transfer characteristics of canopy reflectance at heading stage of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 162–170. (in Chinese)
- [24] 肖艳芳, 周德民, 宫辉力, 等. 冠层反射光谱对植被理化参数的全局敏感性分析[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 368–374.
- XIAO Yanfang, ZHOU Demin, GONG Huili, et al. Global sensitivity analysis of canopy reflection spectrum on physicochemical parameters of vegetation[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 368–374. (in Chinese)
- [25] 王李娟, 牛铮. PROSAIL 模型的参数敏感性研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 219–223.
- WANG Lijuan, NIU Zheng. Parametric sensitivity study of the PROSAIL model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 219–223. (in Chinese)
- [26] 马建威, 黄诗峰, 李纪人, 等. 改进 Sobol 算法支持下的 PROSAIL 模型参数全局敏感性分析[J]. 测绘通报, 2016(3): 33–35.
- MA Jianwei, HUANG Shifeng, LI Jiren, et al. Global sensitivity analysis of PROSAIL model parameters supported by improved Sobol algorithm[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(3): 33–35. (in Chinese)
- [27] 吴伶, 刘湘南, 周博天, 等. 利用 PROSPECT + SAIL 模型反演植物生化参数的植被指数优化模拟[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3250–3256.
- WU Ling, LIU Xiangnan, ZHOU Botian, et al. Optimization simulation of vegetation index using PROSPECT + SAIL model to retrieve plant biochemical parameters[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3250–3256. (in Chinese)
- [28] 贾洁琼. 基于 GF-2 卫星夏玉米不同生育期叶面积指数反演方法研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- JIA Jieqiong. Inversion method of leaf area index of summer maize at different growth stages based on GF-2 satellite[D]. Xi'an: Northwest University, 2018. (in Chinese)
- [29] 张楠楠, 张晓, 王城坤, 等. 基于高光谱和连续投影算法的棉花叶面积指数估测[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 257–262.
- ZHANG Nannan, ZHANG Xiao, WANG Chengkun, et al. Cotton leaf area index estimation based on hyperspectral and continuous projection algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Suppl. 1): 257–262. (in Chinese)
- [30] 向友珍, 王辛, 安嘉琪, 等. 基于分数阶微分和最优光谱指数的大豆叶面积指数估算[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 329–342.
- XIANG Youzhen, WANG Xin, AN Jiaqi, et al. Estimation of soybean leaf area index based on fractional differentiation and optimal spectral index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 329–342. (in Chinese)