

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.019

不同覆膜处理下春玉米叶面积指数高光谱估算

黄茜^{1,2} 杨伟才^{1,2} 魏夏永^{1,2} 毛晓敏^{1,2}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部作物高用水武威科学观测实验站, 武威 733000)

摘要: 为实现快速、无损、实时监测不同覆膜处理下春玉米的叶面积指数(Leaf area index, LAI), 研究覆膜因子对 LAI 及冠层反射率的影响, 借助高光谱遥感技术获取了各生育期春玉米的冠层反射率, 在对光谱数据进行预处理后, 经相关性分析提取各覆膜处理 LAI 的敏感单波段、敏感植被指数和特征指数, 据此构建了全生育期各覆膜处理下 LAI 的高光谱估算模型。结果表明, 覆膜对 LAI 的影响主要在抽雄期之前, 相同施肥水平下覆膜与无覆膜处理之间 LAI 的差异随生育期的推进呈先减小、后增大的趋势, 其中苗期差异最大, 覆膜比无覆膜处理 LAI 增加 78% 以上; 各覆膜处理冠层反射率之间的差异由大到小为生育中期、生育末期、生育初期, 覆膜主要影响玉米对绿光和红光的吸收。基于 3 个指标构建各覆膜处理下 LAI 的估算模型, 以特征指数为因变量建立的模型对 LAI 的反演结果精度较高, 其拟合和验证决定系数 R^2 均在 0.8 以上, 均方根误差 RMSE 为 0.45 ~ 0.65 cm^2/cm^2 , 剩余预测偏差 RPD 均大于 2, 由于覆膜的影响, 无覆膜处理 LAI 反演精度高于覆膜处理。以特征指数 NI(722, 731) 为自变量建立的所有处理的混合 LAI 估算模型表现了反演的优越性, 能降低覆膜对 LAI 反演的影响。

关键词: 叶面积指数; 春玉米; 高光谱遥感; 覆膜; 回归模型

中图分类号: S127; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0184-11

OSID:



Hyperspectral Estimation of Leaf Area Index of Spring Maize under Different Film Mulching Treatments

HUANG Xi^{1,2} YANG Weicai^{1,2} WEI Xiayong^{1,2} MAO Xiaomin^{1,2}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Wuwei Experimental Station for Efficient Water Use in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuwei 733000, China)

Abstract: Spring maize is the main food crop in the alpine black soil area of Northeast China. As an effective measure to increase the final yield of crops, film mulching has the potential to be widely used in Northeast China. In order to monitor leaf area index (LAI) of spring maize under film mulching in real time and explore the influence of film mulching factors on LAI and hyperspectral reflectance of canopy, field experiments were carried out in the black soil area of Northeast China in 2019. In the experiments, three treatments, including no film mulching (M0), degradable film mulching (M1), and conventional plastic film mulching (M2) were tested. The hyperspectral reflectance data of each growth stage were obtained by hyperspectral remote sensing technology. After pre-processing the spectral data, the sensitive bands, sensitive vegetation indices and characteristic indexes of the LAI values of each film mulching treatment were extracted by correlation analysis, and the hyperspectral estimating models of LAI during the whole growth period were constructed. The results showed that the effect of film mulching on LAI was mainly before the tasseling stage. The difference in LAI between film mulching and non-mulching treatments under the same fertilization level showed a trend of first decreasing and then increasing with the growing of maize. The difference of LAI in seedling stage was the largest, and the LAI was increased by 78% under film mulching condition. The difference in hyperspectral reflectance of canopies was the largest in the middle growth period, followed by the end of growth period, and the smallest in the early growth period. Film mulching mainly affected the absorption of green and red lights by maize. The sensitive hyperspectral parameters of LAI values were different among the different film mulching

收稿日期: 2020-08-30 修回日期: 2020-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YF040106-3)和国家自然科学基金项目(51679234)

作者简介: 黄茜(1995—), 女, 博士生, 主要从事水文水资源研究, E-mail: huangxi1005@163.com

通信作者: 毛晓敏(1971—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源与农业水土工程研究, E-mail: maoxiaomin@cau.edu.cn

treatments. Among the LAI estimation models established based on the three sensitive hyperspectral parameters (mentioned above), the models established based on the characteristic indexes had relatively high accuracy for LAI inversion results. Their fitting and verification determination coefficient R^2 were above 0.80, the root mean square error RMSE were between $0.45 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$ and $0.66 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$, and the residual prediction deviation RPD were greater than 2. Film mulching had impact on LAI inversion, the inversion accuracy of LAI without film mulching was higher than that with film mulching. Model based on characteristic index was the best to monitor LAI of all treatments. Based on the characteristic index NI(722,731) showed the superiority of inversion, which was stable, accurate and effective for all film mulching treatments.

Key words: leaf area index; spring maize; hyperspectral remote sensing; film mulching; regression model

0 引言

玉米是黑龙江省种植的主要粮食作物之一,2018年玉米种植面积 $6.318 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全省粮食作物种植面积的44.45%^[1]。覆膜种植可以增加土壤温度,从而促进作物生长、提高作物产量^[2-4]。叶面积指数(Leaf area index, LAI)是反映作物长势、胁迫程度的重要指标之一^[5-7],因此精准监测不同覆膜处理下春玉米 LAI,对准确掌握玉米生长状况具有重要意义。传统测量 LAI 的方法不仅费时、费力,还对作物有一定的破坏性。高光谱遥感技术能从光谱信息中获得作物生长的相关参数,可实现对作物生长状况的实时、无损、快速监测^[8-9]。

基于高光谱遥感数据对作物 LAI 进行估算已有大量的研究成果,形成了较为成熟的 LAI 反演方法,主要分为统计经验模型反演、机器学习算法模型反演和物理模型反演^[10-11]。统计经验反演通过建立作物 LAI 与光谱变量之间的统计关系求得 LAI。袁媛^[12]研究确定了夏玉米各个生育期 LAI 高光谱估算模型的最佳植被指数。LIANG 等^[13]根据光谱数据收集计算了43种不同的植被指数,经相关性分析,确定了用于估计 LAI 的最佳植被指数。谭昌伟等^[14]研究发现,R810/R560为夏玉米 LAI 最佳估算植被指数。NGUYEN 等^[15]分别测定了两个不同品种水稻的冠层反射率,确定了水稻 LAI 的特征植被指数。ALI 等^[16]分析比较了不同方法获取的红边位置,并以此为因变量建立了柑桔 LAI 的最小二乘法估算模型。何小安等^[17]基于相关性分析优选47个植被指数,构建了冬小麦生育前期 LAI 的反演模型。近年来,随着计算机技术的发展,机器学习方法逐渐用于作物生长指标的反演。VERRELST 等^[18]基于高斯过程回归(Gaussian processes regression, GPR)筛选敏感波段,并用于对 LAI 的估算。ROCHA 等^[19]采用支持向量机(Support vector regression, SVR)算法对 LAI 进行预测。YUAN 等^[20]采用随机森林(Random forest, RF)、人工神经

网络(Artificial neural network, ANN)和 SVR 对大豆 LAI 进行回归分析。基于物理学光学模型的方法,例如 PROSAIL 模型在作物 LAI 反演研究中得到广泛的应用^[21-23]。

已有研究表明,根据高光谱数据建立相应作物 LAI 的估算模型往往具有较好的效果,但植被指数和光谱变量都具有地域性,在不同地区会表现出较大的差异,建立适用于东北高寒黑土区春玉米 LAI 估算模型还需进一步探究^[24-26]。目前,对玉米冠层高光谱特征研究已有许多成果,但对不同覆膜处理下春玉米冠层光谱曲线形状差异及覆膜对 LAI 的估算影响的研究鲜见报道^[27]。本文利用高光谱数据估算不同覆膜处理下春玉米 LAI,研究覆膜因子对 LAI 估算的影响,探讨利用敏感光谱变量估算混合各覆膜处理 LAI 的可行性,以期为覆膜春玉米种植长势监测、优化农业生产管理策略提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2019年5—9月在黑龙江省齐齐哈尔市克山县北联镇北部战区空军保障部克山农副基地农场($48^{\circ}15'N$, $125^{\circ}36'36''E$)进行。该地区年平均气温 $2.4^{\circ}C$,有效积温 $2400^{\circ}C$,年降水量为 500 mm ,无霜期 122 d ,年平均风速 4 m/s 。土壤质地为粉壤土, 1 m 土层平均田间持水量为 $0.41 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,饱和含水率为 $0.54 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,干容重为 $1.23 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

1.2 试验设计

春玉米种植品种为富单2号,种植日期2019年4月16日,收获日期为2019年9月16日。种植模式为 1.1 m 大垄双行南北向种植,播种方式为平播,耕作方式为免耕,播种深度约 5 cm ,垄行距 40 cm ,株距 20 cm ,单株玉米占地面积为 0.11 m^2 ;除草、喷洒农药等农艺措施以当地经验为准。底肥由二铵 $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、硫酸钾 $120 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和尿素 $42 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 混合均匀施入,其中二铵含氮量不小于 18% ,含有效磷(P_2O_5)不小于 46% ;硫酸钾含有效钾(K_2O)不低

于50%；尿素含氮量不小于46.4%。相当于施入纯氮量60 kg/hm²，有效磷(P₂O₅)104 kg/hm²，有效钾(K₂O)60 kg/hm²。本试验考虑覆膜、追肥2种因子，设置3种覆膜方式：不覆膜(M0)、覆可降解膜(西安新秦塑料有限责任公司，膜宽2.5 m，膜厚0.012 mm)(M1)、覆普通透明膜(哈尔滨市山水东华硕农膜厂，膜宽1.2 m，膜厚0.008 mm)(M2)，均在播种次日人工覆膜。设置4种追氮水平：不追肥；在大喇叭口期追氮30 kg/hm²、吐丝期追氮30 kg/hm²；在大喇叭口期追氮70 kg/hm²、吐丝期追氮70 kg/hm²；在大喇叭口期追氮100 kg/hm²、吐丝期追氮100 kg/hm²。共12种处理，每种处理设置3个重复，共36个小区，小区随机布置。每个小区均为矩形，长度7.5 m，宽度8.8 m。

1.3 试验监测指标与方法

(1)生育期：将试验区中超过70%的春玉米植株具有一定的某生育期特征，作为进入该生长期的标准，记录每个小区进入各个生长期的时间。

(2)冠层反射率：使用美国 Analytical Spectral Devices (ASD)公司生产的 Field-Spec HandHeld2

型手持式地物光谱仪测量春玉米冠层光谱反射率，光谱仪视场角25°，波段为325~1075 nm，光谱采样间距为1 nm，光谱分辨率3 nm。采集时间为10:30—14:00，在拔节期、抽雄期、吐丝期、灌浆期、成熟期选择晴天无风无云天气测定玉米的冠层反射率，测定时传感器探头始终保持垂直向下，距玉米冠层1 m^[28-29]。每个试验小区选择具有代表性的3个观测点，每个观测点连续采集6个冠层数据，剔除异常数据后，取平均值作为该小区的冠层光谱最终测量值。每个样品测量完毕后，及时对准标准白板进行校正，从而准确测定下一个样品。

(3)LAI：在收集春玉米冠层光谱数据后，在每个采样点取2株玉米，每个试验小区共6株，带回室内测量所有完全展开叶的长和宽，用叶片的实际面积乘以修正系数0.75计算LAI。

1.4 植被指数选取

植被指数是由高光谱数据线性和非线性组合而成的各个数值，但一般植被指数只利用了特定的波段，没有携带全波段光谱信息，本文选择红光和近红外波段范围反射率的平均值计算植被指数，具体见表1。

表1 植被指数及其计算公式

Tab.1 Vegetation indices and their calculation formulas

植被指数	计算公式	文献序号
比值植被指数 RVI	$RVI = R_{NIR} / R_{RED}$	[30]
归一化植被指数 NDVI	$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	[31]
RVI/NDVI	$RVI/NDVI = [R_{NIR} / R_{RED}] / [(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})]$	
差值植被指数 DVI	$DVI = R_{NIR} - R_{RED}$	[32]
土壤调整植被指数 SAVI	$SAVI = (1 + L) \cdot ((R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED} + L))$	[33]
再归一化植被指数 RDVI	$RDVI = \sqrt{NDVI \cdot DVI}$	[34]
修正土壤调节植被指数 MSAVI	$MSAVI = 0.5 [2R_{NIR} + 1 - \sqrt{(2R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_{RED})}]$	[35]
抗大气植被指数 ARVI	$ARVI = [R_{800} - (2R_{800} - R_{450})] / (R_{NIR} + 2R_{680} - R_{450})$	[36]

注： R_{RED} 为波段630~690 nm内反射率的平均值； R_{NIR} 为波段760~790 nm内反射率平均值； R_i 为波长*i*对应反射率，如 R_{600} 为波长600 nm对应的反射率；*L*为调整系数，取0.5。

利用 Matlab 编程计算原始光谱和一阶微分光谱任意两波段比值指数($R_i = R_i / R_j$)、归一化指数($N_i = (R_i - R_j) / (R_i + R_j)$)及再比值指数($A_i = (R_i / R_j) / [(R_i - R_j) / (R_i + R_j)]$)，计算3个指数与LAI的决定系数(Coefficient of determination, R^2)，并绘制3个指数与LAI的 R^2 等势图。

1.5 数据分析与处理

为了探究玉米冠层反射率的特征，以及量化光谱数据与LAI之间的关系，采用 Matlab 编写计算光谱变量的程序，运用软件 IBM SPSS Statistics 20、Excel 2010 和 OriginPro 9.0 分析处理试验数据。

1.5.1 光谱数据预处理

使用高光谱仪的光谱处理软件 ViewSpecPro 将

田间测得原始光谱导入，每个小区测得光谱数据进行平均处理后分别将一阶导数^[12]和原始光谱转成 ASCII 文本文档，之后导入 Excel 2010，对原始光谱数据进行平滑处理(五点移动平均法)^[37]。

1.5.2 春玉米 LAI 估算模型

采用统计回归方法进行建模。

单变量线性模型

$$y = ax + b$$

单变量指数模型

$$y = ae^{bx}$$

单变量幂函数

$$y = ax^b$$

一元二次多项式

$$y = a + bx + cx^2$$

式中 y ——预测值 x ——自变量

a 、 b 、 c ——系数

1.5.3 模型评价指标

采用 R^2 评价春玉米生长指标与模型输出值之间的拟合效果,采用实测值与预测值之间的均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 对模型的预测精度进行评价;采用剩余预测偏差 (Residual prediction deviation, RPD) 评价模型的预测能力^[38],根据 MOUAZEN 等^[39]提出的阈值对 RPD 范围划分:RPD < 1.5 表示模型预测能力差,模型不可靠;1.5 ≤ RPD < 2 表示模型的预测能力可接受,可进行粗略的估算;RPD ≥ 2 表示模型稳定预测能力好,可以采用该模型对变量进行预测。

利用 R^2 、RMSE 和 RPD 评价各光谱变量对 LAI 的估算能力,但这 3 个指标只是评价了样本总体上与实测值的相关和偏离程度,为了评价光谱变量对所有处理中每一种处理的拟合程度,采用绝对积分差值 (Bias of square integral, BSI) 进行评价,BSI 越小表示各处理的 LAI 值估算模型一致,反之则表示各处理 LAI 不适合混合估算^[24],计算式为

$$BSI = \frac{\int_{x_1}^{x_2} |f_1 - f_2|}{\min \left(\int_{x_1}^{x_2} f_1, \int_{x_1}^{x_2} f_2 \right)} \quad (1)$$

式中 $\int_{x_1}^{x_2} |f_1 - f_2|$ ——两处理的 LAI 估算中采用的光谱变量对两种处理 LAI 估算分开建模形成的积分差

f_1 、 f_2 ——两处理 LAI 的拟合函数

$[x_1, x_2]$ ——积分区间,两处理的 LAI 估算模型在光谱变量下形成的共同区间的下限与上限

$\min \left(\int_{x_1}^{x_2} f_1, \int_{x_1}^{x_2} f_2 \right)$ ——两个拟合函数中与 x 轴围成的面积较小值

2 结果与讨论

2.1 不同覆膜处理下春玉米 LAI 及冠层光谱的变化特征

图 1 为高肥水平下不同覆膜处理春玉米各生育期 LAI 的变化特征,图中相同小写字母表示在 $P = 0.05$ 水平上差异不显著。从图 1 可以看出,从苗期到抽雄期春玉米 LAI 持续增长,到拔节期各覆膜处理春玉米 LAI 增长速度最大,达 $0.12 \text{ cm}^2 / (\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 左右。到抽雄期各覆膜处理 LAI 值达最大,分别为 4.58 、 5.16 、 $4.52 \text{ cm}^2 / \text{cm}^2$,进入灌浆期后玉米底部

叶片变黄脱落, LAI 逐渐减小。覆膜处理 LAI 在抽雄期前显著高于无覆膜小区,但可降解膜和普通透明膜之间差异不显著,在吐丝期到灌浆期期间 3 个处理玉米 LAI 间差异不显著,到灌浆期后 M0 和 M2 处理之间无显著性差异,但与 M1 处理之间差异显著。

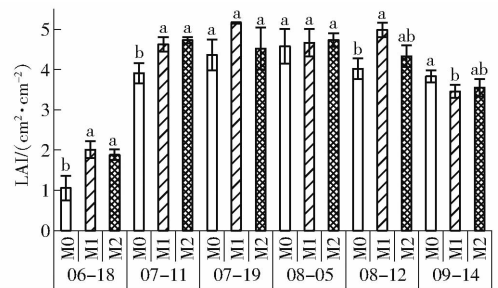


图 1 不同覆膜处理的春玉米 LAI

Fig. 1 LAI of spring maize under different film mulching treatments

总体上覆膜与无覆膜处理之间春玉米 LAI 差异随生育期呈先减小后增大的趋势,苗期最大, M2、M1 比 M0 处理 LAI 分别增加 90.54% 和 78.24%,到成熟期, M0 处理相较于 M1、M2 处理 LAI 分别增加 9.8% 和 7.2%。由此可见,覆膜对春玉米 LAI 的影响主要在抽雄期之前,覆膜增加了生育初期土壤温度,玉米提前出苗,使其峰值到达时间明显早于不覆膜,提前了约 14 d,随着气温升高,无覆膜处理迅速生长,导致覆膜与无覆膜处理之间差异减小,之后覆膜处理由于生育期的提前,叶片开始衰败,无覆膜处理 LAI 高于覆膜处理,各处理之间 LAI 差异开始增大。整体上看,可降解膜在玉米生育初期的增温效果更好。

图 2 为各覆膜处理在高肥水平下不同生育期春玉米的冠层光谱曲线。由图 2 可见,3 个覆膜处理的冠层反射率在不同生育期的变化趋势一致,在可见光 (波段 380 ~ 760 nm) 范围内,由于叶绿素的强烈吸收,反射率较低,各生育期差异不大;在近红外反射平台 (波段 760 ~ 1 000 nm),反射率均是随生育期的推进呈先增大后下降的趋势,在抽雄期达到最大。与 LAI 在整个生育期内变化趋势一致,在抽雄期春玉米的 LAI 也达到最大值。

为了确定各覆膜之间冠层光谱曲线差异,计算了生育初、中、末期同一时间同一追氮水平下不同膜处理 (M2、M1、M0) 冠层反射率的比值 (用百分数表示^[40-41]),结果如图 3 所示。各覆膜处理间冠层反射率的差异由大到小为生育中期、生育末期、生育初期,覆膜增加作物生长速率使其生育期提前,各覆膜间玉米冠层反射率的差异主要是由生育期不同所致。由图 2 可知,不同覆膜处理冠层反射率均在抽

雄期达到最大值,在7月11日,覆膜处理处于抽雄期而无覆膜处理处于大喇叭口期,因此反射率相差最大;在8月12日,覆膜处理处于抽雄灌浆期,叶片已呈减小的趋势,叶片结构等也发生较大的变化,冠层反射率与无覆膜处理差异明显;而6月18日各处理均处于苗期,虽然覆膜处理 LAI 显著高于无覆膜

处理,但苗期各处理的冠层反射率均较低,所以各覆膜玉米冠层反射率间的差异反而小于生育中后期。另外可以看出,各覆膜处理冠层反射率曲线的形状差异主要在波长 530、670 nm 和波段 680 ~ 760 nm 处,表明覆膜主要影响植物对绿光和红光的吸收和利用。

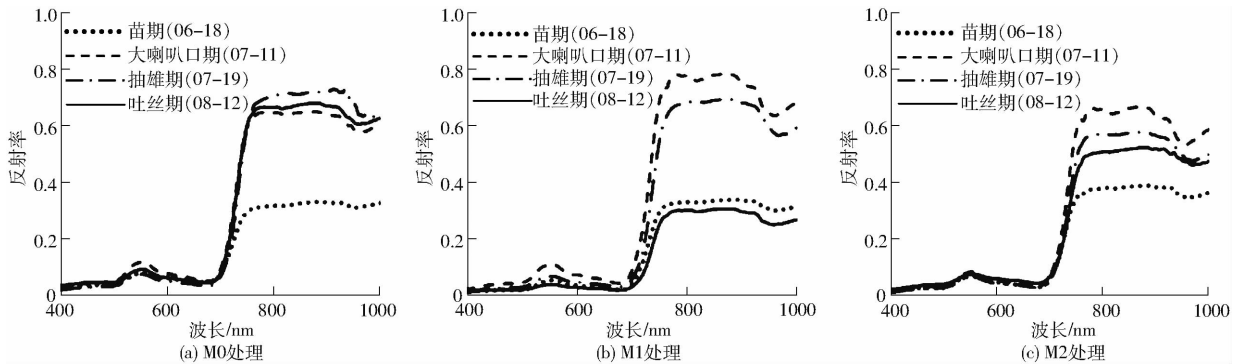


图2 不同膜处理下不同生育期的春玉米冠层光谱曲线

Fig. 2 Canopy spectral curves of spring maize at different growth stages under different film mulching treatments

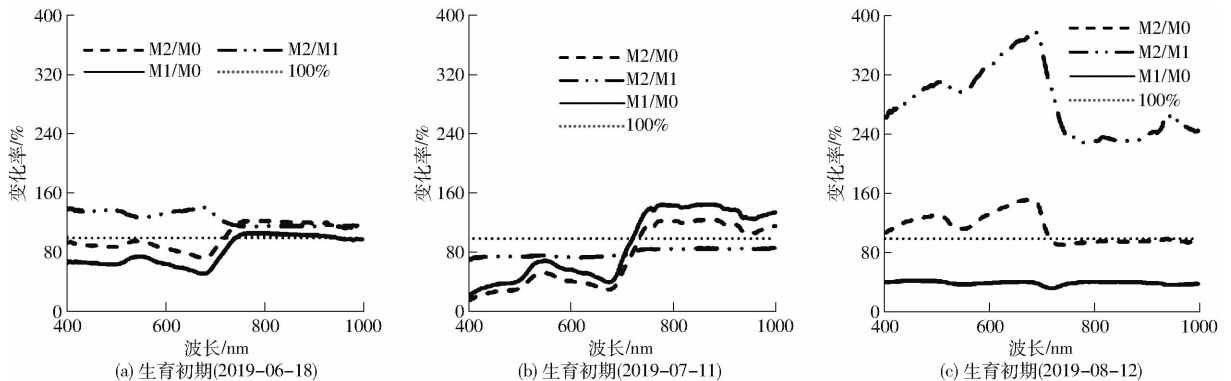


图3 各覆膜处理春玉米冠层反射率的变化曲线

Fig. 3 Changes of canopy reflectance of spring maize under different film mulching treatments

2.2 相关性分析

2.2.1 冠层反射率及一阶微分光谱与 LAI

为了进一步探究春玉米 LAI 与原始光谱和一阶微分光谱的定量关系,利用全生育期监测的各覆膜处理的 LAI 和对应的光谱数据,进行 Pearson 相关性分析,相关性分析结果见图 4。各覆膜处理对应的采用样本数分别为 53、33、60。选择显著性水平 0.05、0.01 进行显著性检验。

由图 4 可见, M0 处理在波段 707 ~ 1 000 nm 范围内光谱反射率与 LAI 呈显著正相关 ($P \leq 0.01$), 在波段 760 ~ 800 nm 范围内反射率与 LAI 间相关系数的平均值为 0.80, 为 LAI 的敏感波段。M1 处理在波段 690 ~ 720 nm 范围内反射率与 LAI 间的相关系数绝对值均大于 0.50, 其相关系数的均值为 -0.52, 在波段 400 ~ 500 nm 范围内相关系数平均值为 -0.52, 这两个波段范围反射率与 LAI 均显著相关, 但波段 350 ~ 500 nm 范围内的光谱反射率易受土壤背景的影响^[11], 因此选择波段 690 ~ 720 nm

作为 M1 处理 LAI 的敏感波段。M2 处理在波段 700 ~ 725 nm 范围内 LAI 与光谱反射率呈显著相关, 其相关系数绝对值均大于 0.50。所有处理 LAI 与波段 690 ~ 715 nm 范围内反射率呈显著相关, 其相关系数平均值为 -0.35。一阶微分光谱与 LAI 间的相关系数在一些波段处高于原始光谱与 LAI 的相关系数, 这是由于求导过程去除了背景等噪声对原始光谱的影响, 与刘露等^[29]、高雨茜^[42]得到的结论相同。其中 M0、M1、M2 处理和最大相关一阶微分光谱波长分别为 742、773、546 nm 的相关系数绝对值均在 0.68 以上。

综上各覆膜处理 LAI 的敏感原始光谱波段均位于近红外波段范围内, 但覆膜处理 LAI 的敏感波段往短波方向移动。

2.2.2 植被指数与 LAI

为了确定覆膜对植被指数的影响, 进行了方差分析, 并基于参数 η^2 进行覆膜因子影响植被指数程度的评估, 该参数反映了因变量 (植被指数) 的变异

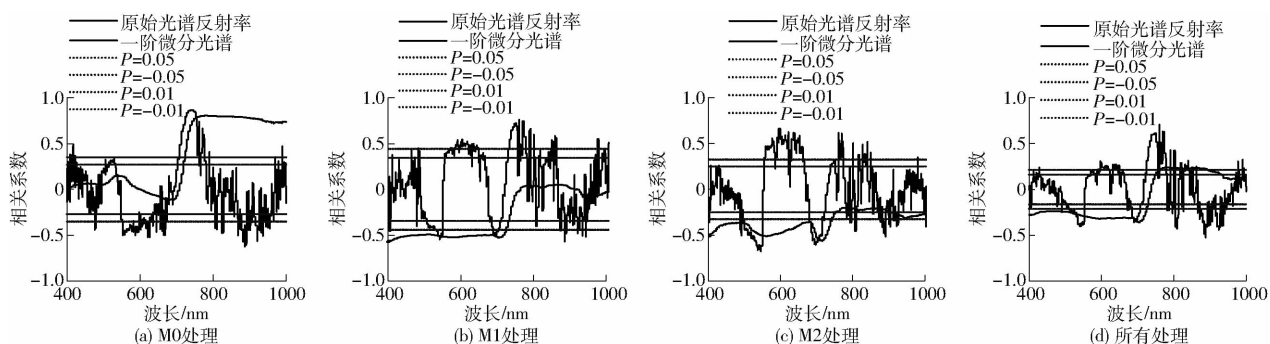


图 4 各覆膜处理春玉米 LAI 与光谱反射率、一阶微分光谱相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between LAI values and canopy reflectance spectrum and first derivative spectral of spring maize under each film mulching treatment

被自变量(覆膜类型)解释的比例^[11]。分析结果见表 2。从表 2 可以看出,各覆膜处理下各植被指数之间没有显著性差异(ARVI 除外),另外各植被指数对应的 η^2 都小于 0.05,说明覆膜因子对各植被指数的影响较小。

表 2 覆膜类型因子对春玉米全生育期植被指数值的影响

Tab.2 Influence of film mulching type factor on values of vegetation indices of spring maize in whole growth period

植被指数	均值	P	η^2
RVI	13.20	0.53	0.009
NDVI	0.84	0.12	0.029
RVI/NDVI	15.40	0.53	0.009
DVI	0.48	0.06	0.038
SAVI	0.65	0.16	0.026
RDVI	0.63	0.10	0.032
MSAVI	0.69	0.39	0.017
ARVI	0.84	0.04	0.045

在方差分析基础上,进行了植被指数与 LAI 的相关性分析,结果见表 3。从整体上看,M0 处理 LAI 与表中所选植被指数均达到了 0.01 极显著水平;M1 处理 LAI 与 RVI、NDVI、RVI/NDVI、ARVI 达 0.01 极显著水平,与 MSAVI 达 0.05 显著水平;M2 处理相对于 M0、M1 处理与各个植被指数相关性弱,仅与 RVI、NDVI、RVI/NDVI 达 0.05 显著水平;所有处理的 LAI 与各个植被指数均达 0.01 极显著水平。从单个植被指数看,RVI、NDVI、RVI/NDVI 均达到 0.05 显著水平,普适性较好。根据相关系数绝对值最大为原则确定 M0、M1、M2、所有处理 LAI 的敏感植被指数分别为 MSAVI、NDVI、RVI、NDVI。

2.2.3 春玉米 LAI 的特征指数

经对比原始光谱计算的 3 个指数最大 R^2 相较于一阶微分光谱小,因此本节只展示一阶微分光谱波段 400~1000 nm 范围内 R^2 的等高线图。如图 5 所示,各覆膜处理全生育期春玉米 LAI 与 3 个指数的 R^2 较大区域分布一致,集中在波段 700~800 nm

表 3 植被指数与各覆膜处理 LAI 之间的相关系数

Tab.3 Correlations between vegetation indices and LAI of each film mulching treatment

植被指数	相关系数			
	M0 处理	M1 处理	M2 处理	所有处理
RVI	0.67 **	0.60 **	0.31 *	0.53 **
NDVI	0.74 **	0.69 **	0.27 *	0.60 **
RVI/NDVI	0.66 **	0.60 **	0.30 *	0.53 **
DVI	0.82 **	0.13	-0.18	0.30 **
SAVI	0.87 **	0.32	-0.10	0.42 **
RDVI	0.86 **	0.28	-0.11	0.41 **
MSAVI	0.89 **	0.38 *	-0.057	0.46 **
ARVI	0.76 **	0.65 **	0.20	0.59 **

注:**表示在 0.01 水平上极显著相关;*表示在 0.05 水平上显著相关。

范围内,其中 M0 处理计算的 3 个指数与 LAI 间 R^2 最大值对应的指数分别为:NI(691,741)、RI(691,749)、AI(715,719),其 R^2 分别为 0.90、0.91、0.90。M1 处理计算的 3 个指数与 LAI 间 R^2 最大值对应的指数分别为:NI(698,755)、RI(728,754)、AI(618,754),其 R^2 分别为 0.85、0.87、0.84。M2 处理计算的 3 个指数与 LAI 间 R^2 最大值对应的指数分别为:NI(723,731)、RI(716,741)、AI(715,719), R^2 分别为 0.69、0.73、0.78。所有处理计算的 3 个指数与 LAI 间 R^2 最大值对应的指数分别为:NI(722,731)、RI(722,731)、AI(641,751),其 R^2 分别为 0.76、0.77、0.67。

从整体上看与各覆膜处理春玉米 LAI 间 R^2 最大值对应的特征指数均由波段 600~760 nm 的一阶微分光谱组成,即大多集中在“红光”范围,这也证明了“红光”可广泛用于对作物长势、生理生态指标的监测^[43-45],相较于敏感波段和表 1 选取的植被指数,特征指数可更好地用于 LAI 的估算。

2.3 各覆膜处理春玉米 LAI 估算模型

以敏感光谱为自变量,LAI 为因变量建立各覆膜处理下基于统计方法的 LAI 单变量估算模型,2/3

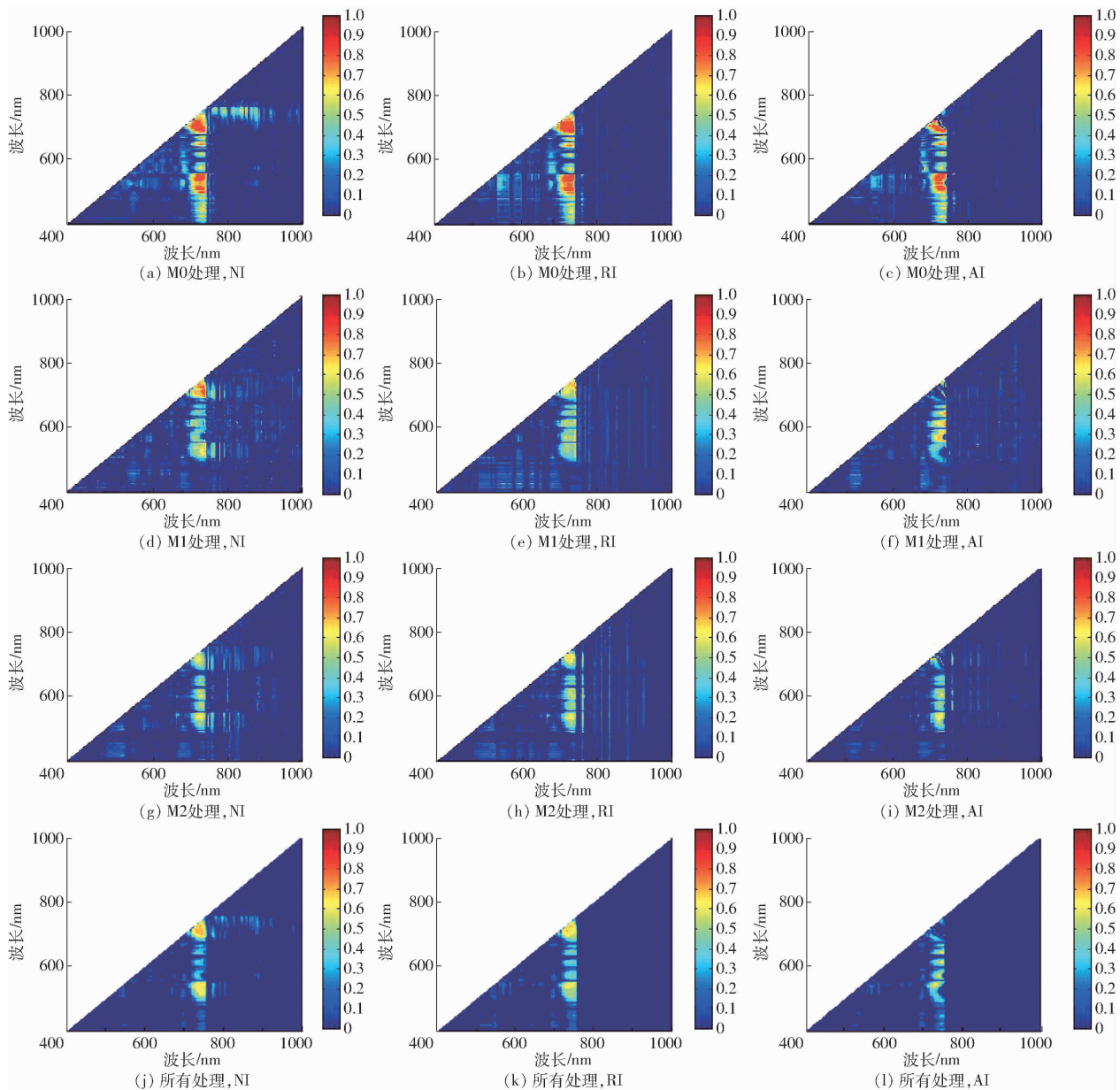


图5 春玉米 LAI 与一阶微分光谱任意两波段组合的 3 类指数 R^2 等高线图

Fig.5 Contour maps of R^2 between LAI values and three types of two-band indexes based on the first derivative spectral

的数据用于模型建立,1/3 的数据进行模型验证,并以 R^2 、RMSE、RPD 为模型评价标准,确定各覆膜处理的估算模型,模型拟合和验证结果见表 4。从表 4 可知,M0 处理的 LAI 与各敏感光谱变量建立的估算模型估算精度较高,其拟合和验证的 R^2 在 0.76~0.94 之间,RPD 在 2.10~5.01 之间,均大于 2,说明模型都较为稳定,具有较好的预测能力;M1 处理的 LAI 与特征指数 NI(698,755)建立的估算模型能较为精确地估算 LAI,其 RPD 为 2.15,其余模型 RPD 均小于 1.5;M2 处理 LAI 与特征指数 AI(715,719)建立的模型估算精度理想,RPD 为 2.11,其余模型均不稳定,预测能力差。

从各敏感光谱变量分析,以特征指数建立的 LAI 估算模型相较于一阶微分光谱单波段、植被指

数模型估算精度有所提高,郑煜^[46]也得出相同的结论;各覆膜之间,M0 处理与各敏感光谱变量的拟合效果最好,地膜覆盖的土壤表面与无覆膜有着不同的光谱特性。采集的光谱反射信息表现为:地膜覆盖的反演目标有效光谱信息较无覆膜处理少,即存在杂散射等情况,噪声较强,降低了信噪比,影响了光谱相关性,因此覆膜处理 LAI 反演精度较无覆膜低。姚志华等^[47]研究发现覆膜会降低无人机对土壤盐分反演的精度,武江星^[48]也发现覆膜处理高粱土壤呼吸速率高光谱反演的精度较无覆膜低。

2.4 所有处理春玉米 LAI 估算模型

所有处理全生育期 LAI 的估算模型拟合和验证的结果见表 5 和图 6,以特征指数 NI(722,731)建立的估算模型较为稳定,估算精度较高。进一步计算

表 4 各覆膜处理 LAI 基于敏感光谱变量的统计估算模型结果

Tab. 4 Results of statistical estimating models based on sensitive hyperspectral parameters for LAI of each film mulching treatment

处理	光谱变量	选择参数	拟合结果			验证结果		
			拟合方程	R ²	RMSE/(cm ² ·cm ⁻²)	R ²	RMSE/(cm ² ·cm ⁻²)	RPD
M0	一阶微分 单波段	742 nm	$y = -39\ 911x^2 + 936.31x - 1.28$	0.88	0.49	0.90	0.28	5.01
M1		773 nm	$y = -1 \times 10^6 x^2 + 4\ 123.7x + 1.29$	0.66	0.90	0.52	1.03	1.31
M2		546 nm	$y = 6.339e^{-1.419x}$	0.49	0.92	0.41	0.88	0.78
M0	植被指数	MSAVI	$y = 0.213\ 6e^{3.76x}$	0.76	1.01	0.92	0.64	2.10
M1		NDVI	$y = 16.41x - 10.17$	0.51	1.01	0.42	0.73	0.95
M2		RVI	$y = 0.09x + 3.69$	0.10	1.11	0.10	0.95	0.38
M0	特征指数	AI(715,719)	$y = 7.71e^{0.19x}$	0.94	0.48	0.91	0.45	3.18
M1		NI(698,755)	$y = -3.77x + 3.48$	0.87	0.49	0.84	0.65	2.15
M2		AI(715,719)	$y = 6.72e^{0.12x}$	0.83	0.63	0.84	0.50	2.11

表 5 所有处理 LAI 基于敏感光谱变量的统计估算模型结果

Tab. 5 Results of statistical estimating models based on sensitive hyperspectral parameters for LAI of all treatments

选择参数	拟合结果			验证结果		
	拟合方程	R ²	RMSE/(cm ² ·cm ⁻²)	R ²	RMSE/(cm ² ·cm ⁻²)	RPD
一阶微分单波段 763 nm	$y = -189\ 991x^2 + 1\ 457.4x + 1.78$	0.55	0.92	0.67	0.89	0.49
NDVI	$y = 0.07e^{4.60x}$	0.30	1.21	0.56	1.09	0.66
NI(722,731)	$y = -50.15x^2 - 23.54x + 1.79$	0.81	0.66	0.81	0.55	2.14

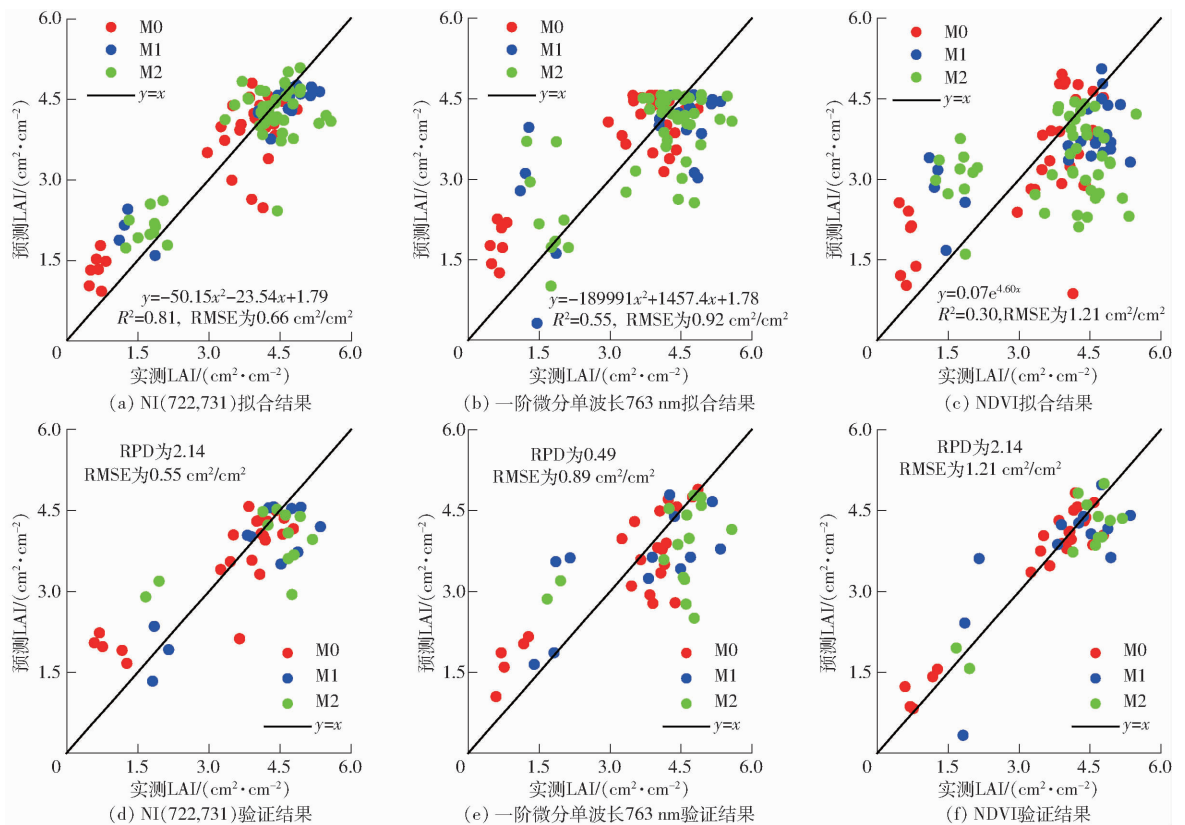


图 6 所有处理 LAI 的基于敏感光谱单变量拟合和验证的结果

Fig. 6 Results of fitting and validation based on sensitive spectra parameters of LAI of all treatments

了采用特征指数 NI(722,731)建立的拟合方程 $y = -50.15x^2 - 23.54x + 1.79$ 单独估算各覆膜处理的 LAI,其拟合的 RMSE 分别为 0.68、0.68、0.66 cm²/cm², 验证的 RMSE 分别为 0.36、0.71、0.55 cm²/cm²,可

以看出,3 个处理拟合和验证的 RMSE 相差不大,说明各处理的 LAI 值均可用特征指数 NI(722,731)建立的估算模型反演,并且反演效果相差不大,精度较高。

为了探究特征指数 NI(722,731)对所有处理中

每一种处理的拟合程度,采用绝对积分差(BSI)进行评价。经计算 M0 和 M1 处理组合间 BSI 值为 0.13, M0 和 M2 处理组合间 BSI 值为 0.09, M1 和 M2 处理组合间 BSI 值为 0.18。各处理之间的组合 BSI 均小于 0.2,说明以特征指数 NI(722,731)建立的 LAI 估算模型对所有覆膜处理均有效,可降低覆膜对 LAI 的估算影响^[24]。

3 结论

(1)研究了不同覆膜处理下 LAI 和冠层光谱形状的变化。结果表明,覆膜对春玉米 LAI 的影响主要在抽雄期之前,相同施肥水平下覆膜与无覆膜处理之间 LAI 的差异随生育期的推进呈先减小、后增大的趋势,苗期差异最大。各覆膜处理间冠层反射率的差异由大到小为生育中期、生育末期、生育初期,覆膜对春玉米冠层光谱曲线产生一定的影响,且反映在光谱的某些波段上,在波长 530、670 nm,波段 680~760 nm 处,各覆膜处理下冠层反射率曲线形状有明显的变化。

(2)研究了不同覆膜处理下 LAI 的敏感光谱变量。结果表明,M0、M1、M2 处理 LAI 的原始光谱敏感波段分别为 760~800 nm、690~720 nm、700~725 nm,一阶微分光谱敏感波长分别为 742、773、546 nm,敏感植被指数分别为 MSAVI、NDVI、RVI;一阶微分光谱任意两波段组合的 3 个指数与各覆膜 LAI 决定系数 R^2 较大的区域集中在波段 700~800 nm 范围内,其中 AI(715,719)、NI(698,755)、AI(715,719)与 M0、M1、M2 处理的 LAI 相关性强, R^2 分别为 0.90、0.85、0.78。

(3)通过对不同 LAI 估算模型比较得到最佳估算模型。以特征指数为自变量建立的估算模型稳定性和精度较好,能够对各覆膜处理下玉米 LAI 进行准确估算,其中无覆膜处理 LAI 的反演精度高于覆膜处理。

(4)对于 3 种覆膜处理下的 LAI 混合反演,以特征指数 NI(722,731)为自变量建立的估算模型表现了反演的优越性,模型较为稳定,估算精度较高,可降低覆膜处理对 LAI 估算的影响。

参 考 文 献

- [1] 黑龙江统计局. 黑龙江统计年鉴(2019)[M]. 北京:中国统计出版社,2019.
- [2] WU D L, XU X X, CHEN Y L, et al. Effect of different drip fertigation methods on maize yield, nutrient and water productivity in two-soils in Northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213(9): 200-211.
- [3] ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Effects of film mulching on evapotranspiration, yield and water use efficiency of a maize field with drip irrigation in northeastern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 205(3): 90-99.
- [4] 刘洋,栗岩峰,李久生,等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 93-104.
LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of northeast China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 93-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151014&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.014. (in Chinese)
- [5] XIE Q Y, DASH J, HUANG W J, et al. Vegetation indices combining the red and red-edge spectral information for leaf area index retrieval[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(5): 1482-1493.
- [6] GITELSON A A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(2): 165-173.
- [7] 谢巧云,黄文江,蔡淑红,等. 冬小麦叶面积指数遥感反演方法比较研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1352-1356.
XIE Qiaoyun, HUANG Wenjiang, CAI Shuhong, et al. Comparative study on remote sensing inversion methods for estimating winter wheat leaf area index[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1352-1356. (in Chinese)
- [8] 潘庆梅,张劲松,张俊佩,等. 不同品种核桃叶片含水量与高光谱反射率的相关性差异分析[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(6): 1-6.
PAN Qingmei, ZHANG Jinsong, ZHANG Junpei, et al. Analysis of correlation and differences between leaf moisture and hyperspectral reflectance among different walnut varieties[J]. *Forest Research*, 2019, 32(6): 1-6. (in Chinese)
- [9] 张淳民,穆廷魁,颜廷昱,等. 高光谱遥感技术与展望[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(3): 104-114.
ZHANG Chunmin, MU Tingkui, YAN Tingyu, et al. Overview of hyperspectral remote sensing technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 104-114. (in Chinese)
- [10] DORIGO W A, ZURITA-MILLA R, WIT A J W D, et al. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(2): 165-193.
- [11] PRUDNIKOVA E, SAVIN I, VINDEKER G, et al. Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1-52.

- [12] 袁媛. 夏玉米叶绿素及叶面积指数高光谱遥感估算[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
YUAN Yuan. Chlorophyll and leaf area index estimation based on hyperspectral remote sensing of summer corn[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [13] LIANG L, DI L P, ZHANG L P, et al. Estimation of crop LAI using hyperspectral vegetation indices and a hybrid inversion method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 165: 123 – 134.
- [14] 谭昌伟,黄义德,黄文江,等. 夏玉米叶面积指数的高光谱遥感植被指数法研究[J]. *安徽农业大学学报*,2004,31(4): 392 – 397.
TAN Changwei, HUANG Yide, HUANG Wenjiang, et al. Study on colony leaf area index of summer maize by remote sensing vegetation indexes method[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2004, 31(4): 392 – 397. (in Chinese)
- [15] NGUYEN H T, LEE B W. Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(4): 349 – 356.
- [16] ALI A, IMRAN M M. Evaluating the potential of red edge position (REP) of hyperspectral remote sensing data for real time estimation of LAI & chlorophyll content of kinnow mandarin (*Citrus reticulata*) fruit orchards[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 267: 1 – 11.
- [17] 何小安,李存军,周静平,等. 冬小麦生育前期 LAI 高光谱反演研究[J]. *中国农业信息*,2019,31(6):35 – 46.
HE Xiaoan, LI Cunjun, ZHOU Jingping, et al. Comparative studying on hyperspectral inversion of LAI in the early growth stage of winter wheat[J]. *China Agricultural Information*, 2019, 31(6): 35 – 46. (in Chinese)
- [18] VERRELST J, RIVERA J P, GITELSON A, et al. Spectral band selection for vegetation properties retrieval using Gaussian processes regression[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 52: 554 – 567.
- [19] ROCHA A, GROEN T, SKIDMORE A, et al. Machine learning using hyperspectral data inaccurately predicts plant traits under spatial dependency[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1263 – 1282.
- [20] YUAN H H, YANG G J, LI C C, et al. Retrieving soybean leaf area index from unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing: analysis of RF, ANN, and SVM regression models[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 309 – 323.
- [21] JAY S, MAUPAS F, BENDOULA R, et al. Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping[J]. *Field Crops Research*, 2017, 210: 33 – 46.
- [22] 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, SHU Wei, ZHU Dehai. Retrieval of LAI and LCC in summer corn canopy based on the PROSAIL model using an improved inversion strategy[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(5): 28 – 33. (in Chinese)
- [23] 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/OL]. *农业机械学报*,2016,47(3):234 – 241,271.
SU Wei, GUO Hao, ZHAO Dongling, et al. Leaf area index retrieval for maize canopy using optimized leaf angle distribution function of PROSAIL model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 234 – 241,271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160333&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.033. (in Chinese)
- [24] 李玉翠. 多种农作物的叶面积指数反演研究[D]. 武汉:武汉大学,2019.
LI Yucui. Research on leaf area index retrieval of different crops[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese)
- [25] 贺佳,郭燕,王利军,等. 基于作物生长监测诊断仪的玉米 LAI 监测模型研究[J/OL]. *农业机械学报*,2019,50(12): 187 – 194.
HE Jia, GUO Yan, WANG Lijun, et al. Monitor model of corn leaf area index based on CGMD-402[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 187 – 194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191221&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.021. (in Chinese)
- [26] 刘潭,许童羽,于丰华,等. 基于 PROSAIL 模型偏差补偿的水稻叶绿素含量遥感估测[J/OL]. *农业机械学报*,2020,51(5):156 – 164.
LIU Tan, XU Tongyu, YU Fenghua, et al. Remote sensing estimation of rice chlorophyll content based on PROSAIL model deviation compensation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 156 – 164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200517&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.017. (in Chinese)
- [27] 孟庆兰,高军凯,卢筱茜,等. 覆膜种植对玉米生长初期 NDVI 识别的影响[J]. *生态学杂志*,2016,35(7):1761 – 1766.
MENG Qinglan, GAO Junkai, LU Xiaoqian, et al. Impacts of film mulch planting on NDVI identification in corn early growth[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(7): 1761 – 1766. (in Chinese)
- [28] 刘明星,李长春,李振海,等. 基于高光谱遥感与 SAFY 模型的冬小麦地上生物量估算[J/OL]. *农业机械学报*,2020,51(2):192 – 202,220.
LIU Mingxing, LI Changchun, LI Zhenhai, et al. Estimation of dry aerial mass of winter wheat based on coupled hyperspectral remote sensing and SAFY model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 192 – 202, 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002021&journal_id=

- jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.021. (in Chinese)
- [29] 刘露, 彭致功, 张宝忠, 等. 基于高光谱的夏玉米冠层 SPAD 值监测研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 353–360.
LIU Lu, PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, et al. Monitoring of summer corn canopy SPAD values based on hyperspectrum [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 353–360. (in Chinese)
- [30] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213–224.
- [31] ADAMS M L, PHILPOT W D, NORVELL W A. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(18): 3663–3675.
- [32] RICHARDSON A J, WIEGAND C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541–1552.
- [33] HUETE A, JUSTICE C, LIU H. Development of vegetation and soil indices for MODIS – EOS [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 224–234.
- [34] ROUJEAN J L, BREON F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 375–384.
- [35] QI J, CHEHBOUNI A, HUETE A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 119–126.
- [36] KAUFMAN Y J, TANRE D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS – MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 261–270.
- [37] 林楠, 刘翰霖, 孟祥发, 等. 基于高光谱的黑土区土壤重金属含量估测[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 218–225.
LIN Nan, LIU Hanlin, MENG Xiangfa, et al. Hyperspectral estimation of heavy metal contents in black soil region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 218–225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210324&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.024. (in Chinese)
- [38] CHANG C W, LAIRD D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N [J]. Soil Science, 2002, 167(2): 110–116.
- [39] MOUAZEN A M, DE BAERDEMAEKER J, RAMON H. Effect of wavelength range on the measurement accuracy of some selected soil constituents using visual-near infrared spectroscopy [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2007, 14(3): 189–199.
- [40] JONG S M D, ADDINK E A, HOOGENBOOM P, et al. The spectral response of *Buxus sempervirens* to different types of environmental stress—a laboratory experiment [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 74: 56–65.
- [41] RAPAPORT T, HOCHBERG U, COCHAVI A, et al. The potential of the spectral ‘water balance index’ (WABI) for crop irrigation scheduling [J]. The New Phytologist, 2017, 216(3): 741–757.
- [42] 高雨茜. 夏玉米叶绿素、叶面积指数高光谱估测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
GAO Yuqian. Chlorophyll and leaf area index estimation based on hyperspectrum of summer corn [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [43] 孙红, 刘宁, 邢子正, 等. 马铃薯冠层光谱响应特征参数优化与生长期判别 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6): 1870–1877.
SUN Hong, LIU Ning, XING Zizheng, et al. Parameter optimization of potato spectral response characteristics and growth stage identification [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6): 1870–1877. (in Chinese)
- [44] 罗丹, 常庆瑞, 齐雁冰. 基于红边参数和人工神经网络的苹果叶片叶绿素含量估算 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 107–115.
LUO Dan, CHANG Qingrui, QI Yanbing. Estimation of chlorophyll content in apple leaves based on red edge parameters and artificial neural network [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 107–115. (in Chinese)
- [45] 朱咏莉, 李萍萍, 毛罕平, 等. 生菜叶片光谱红边参数对氮营养的响应特征分析 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 174–177.
ZHU Yongli, LI Pingping, MAO Hanping, et al. Response features of red edge parameters for lettuce leaf spectra under different nitrogen levels [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 174–177. (in Chinese)
- [46] 郑煜. 油菜高光谱特征及其农学参数遥感监测 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
ZHENG Yu. Hyperspectral characteristics of rapeseed and remote sensing monitoring of its agronomic parameters [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [47] 姚志华, 陈俊英, 张智韬, 等. 覆膜对无人机多光谱遥感反演土壤含盐量精度的影响 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 89–97.
YAO Zhihua, CHEN Junying, ZHANG Zhitao, et al. Effect of plastic film mulching on soil salinity inversion by using UAV multispectral remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 89–97. (in Chinese)
- [48] 武江星. 生物炭和覆膜对高粱高光谱特征及其土壤呼吸的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2016.
WU Jiangxing. The effect of biochar and film mulching on the high spectral characteristics of sorghum and soil respiration [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016. (in Chinese)