

网络出版时间:2016-04-07 09:00

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.05.005

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.010.html

净套作下大豆叶绿素密度动态及光谱估测研究

黄 山,杨 峰,张 勇,王 锐,邓俊才,雍太文,刘卫国,杨文钰

(四川农业大学 农学院,农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室,四川 成都 611130)

【摘 要】 【目的】利用高光谱数据构建一种适合于净作和套作群体的大豆叶绿素密度光谱估测通用模型,为监测以叶绿素密度为参数的净、套作大豆长势提供支撑。**【方法】**以南豆 12 为供试大豆品种,设计净作和套作 2 种植模式,测定净、套作下大豆不同生育时期叶绿素密度及其冠层光谱特征,对通过原始、全波段导数光谱和多波段组合计算的植被指数与叶绿素密度进行相关性分析,比较不同高光谱特征参数与叶绿素密度之间的关系,借助高光谱遥感分析方法构建适合于净、套作下大豆叶绿素密度的估测模型。**【结果】**净作和套作大豆叶绿素密度在整个生育期呈先上升后下降的单峰曲线,在结荚期达到最大值,其中净作比套作平均高 5.5%。同样,大豆冠层光谱反射率在近红外波段(700~1 000 nm)也呈现先增后降趋势,结荚期最高,达到 70%,并在结荚期之前红边位置出现红移现象。原始光谱自由组合的比值植被指数 RVI(507/697)与叶绿素密度的相关性最高,相关系数大于 0.962($P<0.01$)。对净、套作下大豆叶绿素密度模型进行比较分析,发现二次模型能够较好地估测净、套作下大豆叶绿素密度($R^2>0.75$, RMSE=0.25)。**【结论】**用比值植被指数 RVI(507/697)构建的叶绿素密度二次估测模型,能够较好地对净、套作下大豆叶绿素密度进行估测。

【关键词】 叶绿素密度;光谱估测模型;冠层光谱;光谱反射率;光谱参数

【中图分类号】 S127

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)05-0029-09

Estimating chlorophyll density of soybean under monoculture and relay intercropping by hyperspectral remote sensing

HUANG Shan, YANG Feng, ZHANG Yong, WANG Rui, DENG Jun-cai,
YONG Tai-wen, LIU Wei-guo, YANG Wen-yu

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: 【Objective】 Hyperspectral data were used to build a chlorophyll density model, which can may provide basis for soybean growth monitoring under monoculture and intercropping systems. **【Method】** In this research, chlorophyll density and canopy spectral characteristics of soybean at different growth stages were analyzed under monoculture and intercropping system using Nandou 12 as species. The correlation between original spectrum, derivative spectrum, vegetation index, combination of more bands and chlorophyll density was also analyzed. The model for estimating chlorophyll density was built by comparing the relationship between hyperspectral feature parameters and chlorophyll density. **【Result】** The chlorophyll density in the whole growth period displayed an trend that increased first and then decreased under mono-

【收稿日期】 2014-10-09

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31571615);农业部公益性行业科研专项(201203096)

【作者简介】 黄 山(1991—),男,四川巴中人,硕士,主要从事作物高产技术与理论研究。E-mail:dcchhs@163.com

【通信作者】 杨 峰(1981—),男,山西晋城人,副教授,博士,主要从事作物生理生态及信息农业研究。

E-mail:f.yang@sicau.edu.cn

杨文钰(1958—),男,四川大英人,教授,博士生导师,主要从事玉米-大豆带状间套作高产与理论技术研究。

E-mail:mssiyangwy@sicau.edu.cn

culture and intercropping system. The maximum value of chlorophyll density appeared in the pod stage, and the monoculture system was 5.5% higher than relay intercropping system. Similar results were found in the canopy spectral reflectance of soybean in the near infrared region (700—1 000 nm) with the highest reflectance spectral value of up to 70% in the pod stage. In addition, the position of red edge appeared a red shift with the increasing growth stage before the pod stage. The ratio vegetation index (507/697) had the highest correlation with chlorophyll density ($r>0.962, P<0.01$) compared with others. Compared to other models, the quadratic function model could estimate the canopy chlorophyll density better with the determination coefficient of >0.75 and $RMSE$ of 0.25. 【Conclusion】 The quadratic function model built with vegetation index RVI (507/697) could be used to estimate soybean chlorophyll density under monoculture and intercropping system.

Key words: chlorophyll density; spectral estimation model; canopy reflectance; spectral reflectance; spectral parameters

大豆是世界上种植面积最大的油、粮、饲兼用作物之一。中国进口大豆数量逐年增加^[1],但大豆种植效益逐年降低,种植面积不断下降;玉米-大豆带状复合种植作为一项新的种植技术已连续多年被农业部列为主推技术之一,该技术能够实现玉米、大豆双高产及机械化播种和收获,在保障玉米生产的情况下多收获一季大豆,有效地提高了大豆的种植面积,增加了大豆产量,对缓解区域粮食安全和保障国家粮食安全具有重要意义^[2-3]。

叶绿素是叶片光合作用过程的重要物质^[4],直接影响光能的截获和转化。叶绿素含量的高低表明了作物的营养生长状况和光合生产能力^[5],而叶绿素密度反映了作物群体所含叶绿素的总量,是衡量农作物群体生产力及监测植被生长发育与营养等状况的重要指标^[6]。合理的叶绿素密度是充分利用光能、保证作物高产优质的首要条件,通常在不同作物群体结构中,适宜的叶绿素密度在作物高产栽培及作物良种选育中具有重要意义。然而,常规化学方法测定叶绿素具有破坏性,且费时、费力、时效性低,因此亟需一种快速、简便、准确的方法对叶绿素密度进行测定^[7]。

近年来,随着遥感技术的迅速发展,高光谱分辨率遥感在农作物的营养、长势等方面应用广泛^[8-12]。前人研究发现,高光谱遥感技术用于估测玉米、水稻和小麦等作物的叶绿素密度具有较好的效果^[13-14],而在大豆上主要集中于叶绿素含量和叶面积等的估测研究^[15-16],关于净作和套作大豆叶绿素密度的相关研究较少^[17],利用高光谱特征参数估测净、套作下大豆叶绿素密度的研究还鲜见报道。本研究以净、套作大豆为研究对象,分析 2 种植植模式下大豆不同生育时期叶绿素密度的变化规律,结合冠层光

谱反射率,构建了一种适合于净作和套作大豆的叶绿素密度光谱估测通用模型,为监测以叶绿素密度为参数的净、套作大豆长势提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年在四川省仁寿县现代粮食产业园区进行。土壤基础肥力:有机质 12.96 g/kg,全氮 1.10 g/kg,全磷 0.68 g/kg,全钾 14.66 g/kg,碱解氮 66.73 mg/kg,速效磷 3.26 mg/kg,速效钾 178.74 mg/kg。供试大豆品种为南豆 12(晚熟,生育期 130 d 左右),玉米品种为登海 605(株型紧凑,生育期 120 d 左右,株高 2.5 m 左右)。

试验中大豆设净作和套作 2 种植植模式,各重复 3 次,详见图 1。

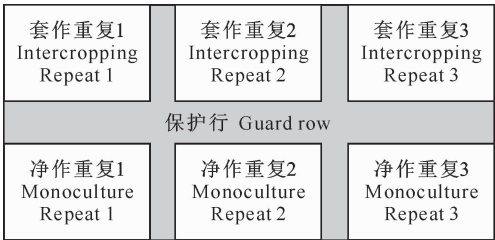


图 1 净套作大豆的田间布局
Fig.1 Layout of monoculture and relay intercropped soybean

玉米-大豆带状套作模式下,玉米 3 月下旬采用宽窄行种植,带宽 2 m,窄行行距 0.4 m,密度 6 万株/hm²,每穴 1 株;大豆于 6 月中旬种于宽行内,行距 0.4 m,密度 10 万株/hm²,每穴 2 株,小区面积为 6 m×5.5 m。净作大豆行距 0.7 m,密度 10 万株/hm²,每穴 2 株,小区面积 6 m×5.5 m。大豆

氮肥用量为纯 N 45 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)用量 70 kg/hm²,钾肥(K₂O)用量 80 kg/hm²。磷、钾肥均作为追肥于大豆三叶期一次性施入,氮肥按质量比 1:1 在大豆三叶期和初花期施入,其他按照大田管理进行。

1.2 冠层光谱数据测定

在天气晴朗无云的上午 11:00—14:00,分别于大豆生长的关键生育时期,即苗期、分枝期、始花期、盛花期、结荚期、鼓粒期,用便携式地物光谱仪(荷兰 Avants 公司生产的 AvaField-3 便携式高光谱地物波谱仪,光谱范围 350~2 500 nm,选用 400 nm 到 1 000 nm 光谱区间,采样间隔为 0.6 nm,视场角为 25°)测定大豆冠层光谱,测量时探头在冠层顶部 1 m 处垂直向下,测定面积约为 0.15 m²,每个小区测定中间区域 3 个位点,每个位点重复 5 次,以其平均值作为该观测点的光谱反射值。在测定过程中,每

次测定完后及时进行标准白板校正。冠层光谱数据测定后,对应测定位置取样测定大豆叶片的叶绿素含量。

1.3 叶绿素密度测定

叶绿素含量的测定:冠层光谱测定后取对应的大豆植株顶部功能叶 2 片,按照光谱测定顺序及小区编号,放入冰盒中,及时送回实验室打孔称质量,根据 Sims 等^[18]的方法测定叶绿素含量。

叶绿素密度为单位土地面积的总叶绿素含量,按下式计算:叶绿素密度(g/m²)=单位土地面积鲜叶质量×叶绿素含量。

1.4 植被指数

本研究选取前人研究中的 15 个植被指数(表 1),以净、套作下大豆叶绿素密度与高光谱植被指数的相关性为基础,筛选敏感指数,以构建净、套作下大豆叶绿素密度光谱估测模型。

表 1 高光谱植被指数计算方法
Table 1 Algorithms of different hyperspectral vegetation indexes

植被指数 Vegetation index	计算公式 Algorithm	参考文献 Reference
简单比值指数 Simple ratio index, SRI	R800/R680	[18]
修正简单比值指数 Modified simple ratio index, mSRI	(R750-R445)/(R705-R445)	[18]
修正归一化差异指数 Modified normalized difference index, mNDI	(R750-R705)/(R750+R705-2R445)	[18]
比值植被指数 Ratio vegetation index, RVI	R810/R680	[16]
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index, NDVI	(R810-R680)/(R810+R680)	[16]
再归一化植被指数 Renormalized difference vegetat ion index, RDVI	(NDVI×DVI) ^{0.5}	[16]
差值植被指数 Difference vegetation index, DVI	R810-R680	[16]
结构不敏感色素指数 Structure insensitive pigment index, SIPI	(R800-R445)/(R800-R680)	[19]
光化学植被指数 Photochemical reflectance index, PRI	(R570-R531)/(R570+R531)	[20]
植被衰老反射率指数 Plant senescence reflectance index, PSRI	(R680-R500)/R750	[21]
二次修正土壤调节植被指数 Modified second soil adjusted vegetation index, MSAVI2	1/2{(2R800+1)-[(2R800+1) ² -8(R800-R670)] ^{0.5} }	[22]
垂直植被指数 Perpendicular vegetation index, PVI	(R810-10.489)×(R680-6.604)/10.536	[16]
近红外与绿光波段的比值 Ratio of NIR (Near infrared) band to green band, NIR/G	R810/R510	[16]
修正叶绿素吸收反射率指数 Modified chlorophyll absorption in reflectance index, MCARI	(R700-R670)-0.2(R700-R550)×(R700/R670)	[23]
绿度植被指数 Green normalized difference vegetation index, GNDVI	(R800-R550)/(R800+R550)	[23]

1.5 数据整理与分析

在剔除畸形异常的光谱曲线的基础上,对光谱数据进行平均平滑,考虑到系统噪音影响,仅截取了 400~1 000 nm 的光谱数据用于分析($n=31$)。采用原始光谱、一阶导数光谱、植被指数和基于波段优选的 3 个常见植被指数 RVI、DVI、NDVI 与叶绿素密度进行了相关分析,从中确定与叶绿素密度相关性较高的敏感波段和光谱参数,选用这些敏感波段和光谱参数反演净、套作大豆叶绿素密度,选取决定系数最高的模型进行验证。采用 Excel 2003 进行原始试验数据的整理,利用 SPSS 17.0 对试验数据

进行统计分析,用 Matlab 和 Origin 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同生育时期净作和套作大豆叶绿素密度的变化规律

由图 2 可知,净作和套作大豆叶绿素密度在生育期内均呈现先上升后下降的单峰曲线变化,这与作物叶片在整个生育期内由营养生长期的逐渐增大到生殖生长期的逐渐衰退凋零有关。套作大豆生育前期受到玉米阶段性遮阴,叶绿素密度增长速度慢于净作大豆,随着生育时期的推进,在结荚期达到最

大值,大豆叶绿素密度在净作、套作下最大值分别为 1.69 和 1.51 g/m^2 ,在鼓粒期净、套作大豆叶绿素密度相差最小,而整个生育期净作大豆叶绿素密度比套作平均高 5.5%。

2.2 不同生育时期净作和套作大豆冠层光谱特征与光谱一阶导数

由图 3 可知,净作和套作大豆冠层光谱反射率在整个生育期变化规律一致,特别是在 700~1 000 nm 的近红外区域,光谱反射率随着生育时期的推进而不断升高,在结荚期达到最大值,随后光谱反射率下降,这与叶绿素密度的变化规律一致(图 2)。净作和套作大豆冠层光谱苗期差异最大,结荚期差异最小,到鼓粒期后差异又逐渐变大。同时,从一阶导数光谱可以看出,随着生育时期的推进,红边位置和红边幅值先逐渐增大,到结荚期后开始降低。从苗期到结荚期,净、套作大豆冠层光谱红边位置分别为

708,717,719,723,725 nm,呈现“红移现象”,而鼓粒期红边位置为 723 nm。

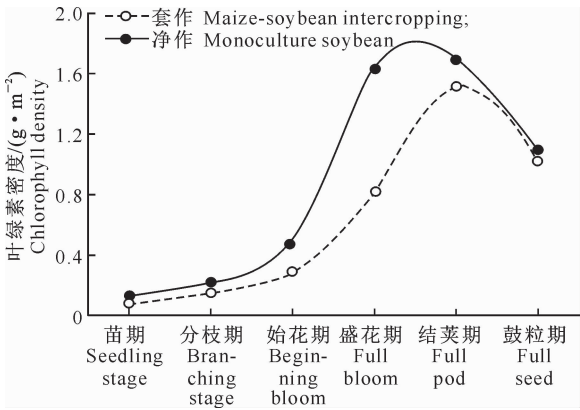


图 2 净作和套作大豆各生育时期叶绿素密度的变化规律
Fig. 2 Chlorophyll density of soybean at different growth stages under monoculture and intercropping condition

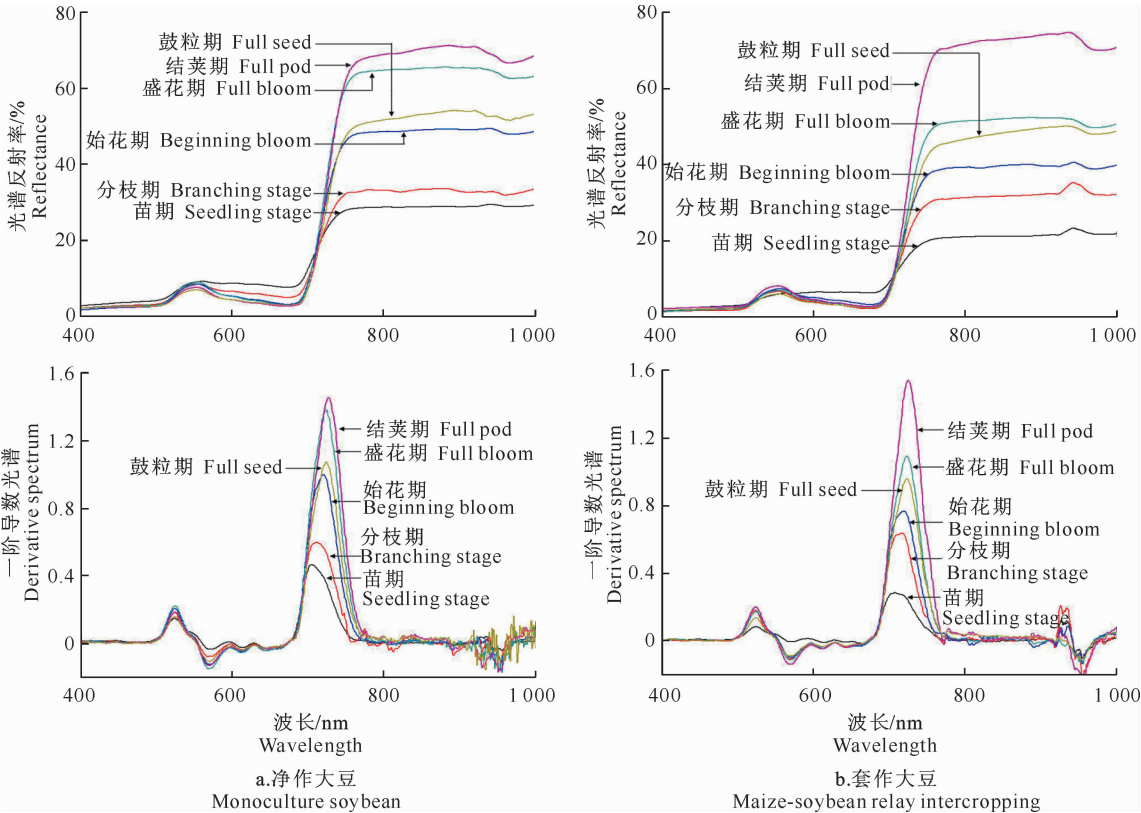


图 3 不同生育时期净作和套作大豆的冠层光谱与一阶导数光谱

Fig. 3 Spectral reflectance and first derivative spectral of soybean canopy at different growth stages under monoculture and intercropping condition

2.3 净作和套作大豆叶绿素密度与光谱反射率及一阶导数光谱的相关性

通过分析净、套作大豆叶绿素密度与光谱特征之间的关系,发现大豆叶绿素密度与冠层光谱反射

率和一阶导数光谱的相关性在不同波段范围内不尽相同(图 4)。在可见光范围内光谱反射率和一阶导数光谱与叶绿素密度的相关性均未达到极显著水平,而在 719~1 000 nm 波段,光谱反射率与叶绿素

密度呈极显著正相关,相关系数最大值为 0.85($P<0.01$),一阶导数光谱与叶绿素密度在 730 nm 红边区域附近有较好的相关性,最大相关系数为 0.92 ($P<0.01$)。

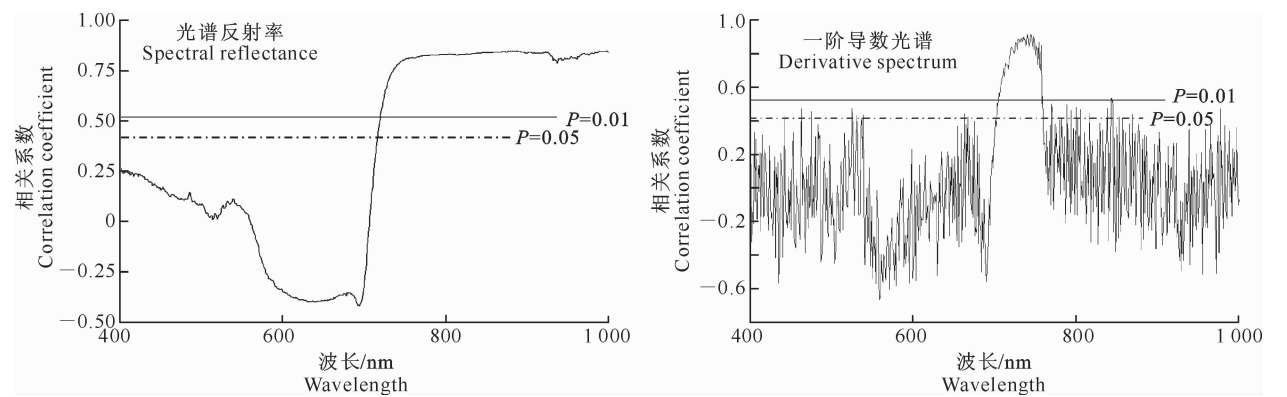


图 4 净作和套作大豆冠层光谱反射率、一阶导数光谱与叶绿素密度的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients among canopy spectral reflectance, first derivative spectral and chlorophyll density of soybean under monoculture and intercropping conditions

2.4 大豆叶绿素密度与植被指数的相关性

根据前人获得的最佳植被指数,分析净、套作大豆叶绿素密度与不同植被指数的关系,结果见表 2。由表 2 可以看出,修正叶绿素吸收反射率指数(MCARI)与大豆叶绿素密度的相关系数为 0.18,

未达到显著水平($P>0.05$)。除此之外,其他植被指数与叶绿素密度的相关系数均达到了极显著水平($P<0.01$),其中修正简单比值指数(mSRI)与叶绿素密度的相关性最好,相关系数为 0.903。

表 2 大豆叶绿素密度与植被指数的相关性

Table 2 Correlation analysis between vegetation index and soybean chlorophyll density

植被指数 Vegetation index	相关系数 Correlation coefficients	植被指数 Vegetation index	相关系数 Correlation coefficients
SRI	0.703 **	PRI	-0.601 **
mSRI	0.903 **	PSRI	-0.538 **
mNDI	0.834 **	MSAVI2	0.553 **
RVI	0.699 **	PVI	0.722 **
NDVI	0.576 **	NIR/G	0.724 **
RDVI	0.806 **	MCARI	0.180
DVI	0.833 **	GNDVI	0.821 **
SIPI	-0.522 **		

注: * 表示达到 $P<0.05$ 水平; ** 表示达到 $P<0.01$ 水平。
Note: * $P<0.05$ level; ** $P<0.01$ level.

2.5 叶绿素密度与基于波段优选的植被指数的相关分析

在分析叶绿素密度与常见植被指数相关性的基础上,为了能更加深入地了解植被指数与叶绿素密度的关系,利用 RVI、DVI 和 NDVI 这 3 种常见的高光谱植被指数表达形式,采用 400~1 000 nm 波段的原始光谱反射率和一阶导数光谱反射率进行两两组合,构建所有可能的 RVI、DVI 和 NDVI,分析叶绿素密度与这些植被指数之间的相关性,结果如图 5 所示。RVI、NDVI 和 DVI 的表达式如下:

$$RVI=R_i/R_j,$$

$$DVI=R_i-R_j,$$

$$NDVI=(R_i-R_j)/(R_i+R_j).$$

式中: R 为原始光谱反射率, i,j 为 400~1 000 nm 任意波段。导数光谱反射率(DR)的光谱指数计算方法相同。图 5 中每个像素点对应横坐标为构成指数的分子波段,纵坐标为分母波段;各像素点的色度值表示所构建的指数与叶绿素密度的相关系数的大小。从图 5 可以看出,原始光谱、一阶导数光谱和二阶导数光谱的任意波段组合的 RVI、DVI 和 NDVI 具有对称分布的特点。原始光谱自由组合的植被指数与叶绿素密度相关系数最高为 0.962,对应指数为 R_{507}/R_{697} ;一阶导数光谱自由组合的植被指数与叶绿素密度相关性最高为 0.935,对应指数为 R_{740}/R_{520} ;二阶导数光谱自由组合的植被指数相对较低。

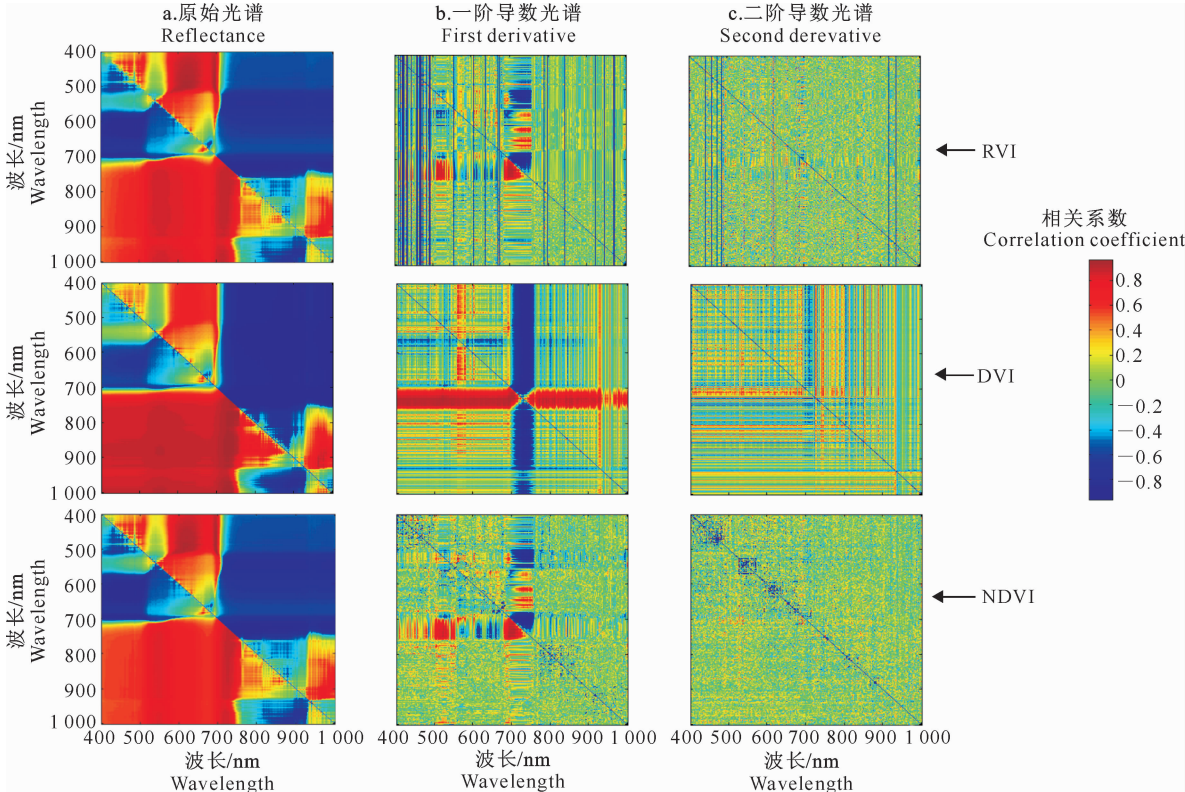


图 5 叶绿素密度与原始光谱、一阶导数光谱、二阶导数光谱的 RVI、DVI 和 NDVI 组合之间的相关系数分布

Fig. 5 Correlation coefficients (r values) for the relationships between chlorophyll density and the two-band combinations of RVI, DVI and NDVI from 400 to 1000 nm

2.6 最佳光谱特征参数与叶绿素密度回归模型的建立

为了构建叶绿素密度光谱估测模型,采用前人常用的 5 个单变量线性和非线性拟合模型进行模型构建,包括:线性函数 $Y=a+bx$;对数函数 $Y=a+b\ln x$;指数函数 $Y=ae^{bx}$;幂函数 $Y=ax^b$;二次函数 $Y=a+bx+cx^2$ 。式中, Y 代表叶绿素密度值, x 代表光谱变量, a 、 b 、 c 分别为常数。

依据叶绿素密度与光谱反射率、一阶导数光谱、植被指数以及基于波段优选的植被指数的相关分析结果,筛选出相关系数最高的光谱变量,构建上述 5 种回归模型,模型的回归系数和决定系数如表 3 所示。根据决定系数最高选择适宜的估测模型,并进行模型精度检验,结果表明,基于波段优选的植被指数 R_{507}/R_{697} 构建的二次函数模型的决定系数 R^2 达到 0.927。同时,根据叶绿素密度实测值和预测值的线性关系,采用常用的均方根误差(RMSE)进行精度检验,计算公式为:

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(Y_i-\bar{Y}_i)^2}。$$

式中: Y_i 和 $\bar{Y}_i$ 分别为实测值和估测值, n 为样本数(包括试验的样本和估计样本)。

表 3 叶绿素密度与高光谱变量的线性和非线性回归分析

Table 3 Linear and non-linear regression analysis between chlorophyll density and hyperspectral variables

变量 Variable	模型 Model	R^2
mSRI	$Y=0.323\ 5x-0.738\ 2$	0.815
	$Y=1.272\ 3\ln x-1.124\ 8$	0.754
	$Y=0.036\ 7e^{0.585\ 7x}$	0.853
	$Y=0.015\ 7x^{2.406\ 6}$	0.861
	$Y=0.026\ 8x^2+0.083\ 7x-0.256\ 4$	0.825
RVI(507/697)	$Y=9.236\ 2x-3.510\ 4$	0.925
	$Y=4.255\ 5\ln x+4.070\ 8$	0.918
	$Y=0.000\ 4e^{15.569\ 1x}$	0.839
	$Y=158.202x^{7.274\ 8}$	0.857
	$Y=8.819\ 6x^2+1.006\ 4x-1.615\ 8$	0.927
R740	$Y=1.469\ 8x-0.146\ 9$	0.841
	$Y=0.718\ 1\ln x+1.221\ 6$	0.774
	$Y=0.114\ 2e^{2.553\ 1x}$	0.809
	$Y=1.335\ 2x^{1.365\ 3}$	0.893
	$Y=-0.378x^2+1.970\ 9x-0.273$	0.846

检验结果(图 6)表明, R^2 为 0.75($RMSE=0.25,n=21$)。因此认为以 R_{507}/R_{697} 为自变量构建的二次函数模型 $Y=8.819\ 6x^2+1.006\ 4x-1.615\ 8$ 估算净、套作大豆叶绿素密度具有一定的可行性。

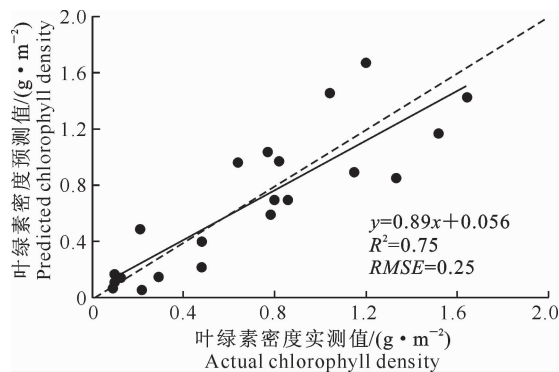


图 6 叶绿素密度估测模型检验

Fig. 6 Examination of chlorophyll density estimation model

3 讨 论

3.1 净作和套作大豆不同生育时期的叶绿素密度

叶绿素密度包含群体叶面积指数和叶绿素含量等信息,是植物冠层结构的重要参数,反映了作物群体的长势状况。叶绿素含量与植被的光合作用、营养状况紧密相关,采用遥感技术监测作物信息的变化可以准确反映植被生长、营养等信息。前人研究发现,水稻、小麦和棉花等作物的叶绿素密度在整个生育期内呈单峰曲线变化,高光谱遥感数据与叶绿素密度具有较好的相关性^[13-14,24]。在本研究中,净作和套作大豆叶绿素密度在整个生育期内也呈单峰曲线变化,且不同种植模式变化规律趋于一致,净作和套作具有相似性,最大值均出现在结荚期,但在整个生育期内净作大豆的叶绿素密度都要高于套作大豆,这与套作大豆在生育前期受玉米阶段性荫蔽胁迫造成其生育前期叶面积低于净作大豆有关^[25]。在玉米收获后,大豆解除荫蔽效应,迅速恢复生长,在鼓粒期净、套作大豆叶绿素密度相差最小,但整个生育期净作大豆叶绿素密度比套作大豆平均高 5.5%,随着作物养分向生殖器官的转移,大豆叶片程序性凋亡,这是大豆生育后期叶绿素密度下降的主要原因。

3.2 净作和套作大豆不同生育时期的冠层反射光谱与微分光谱

冠层光谱反射率是作物生长信息的综合表现。不同作物在不同生育时期的冠层光谱反射率具有相似的变化特点,可见光波段光谱反射率规律不明显,而在近红外区域具有明显的规律性,随着生育进程的推进,在生育前期光谱反射率逐渐增加,在生育后期光谱反射率逐渐下降^[14]。陈燕等^[26]在棉花上的研究表明,在近红外区域光谱反射率呈现明显的层次性,反射率表现为花铃期>盛蕾期>盛铃期>吐

絮期。宋开山等^[16]在大豆、李凤秀等^[27]在玉米上的研究也表明,在近红外波段,随着生育时期的推进,大豆的光谱反射率先增加后降低。本研究结果表明,在可见光波段光谱反射率变化规律不明显,在近红外波段的光谱反射率随着生育时期的推进呈现出先增加后降低的规律,与叶绿素密度随着生育时期的变化规律相同,也与前人研究结果相似。苗期净作与套作间大豆光谱差异最大,随着生育时期的推进,在结荚期时两者差异最小,而鼓粒期差异又逐渐加大,这可能是由于套作大豆光恢复后延长了有效光合时间。

微分光谱能消除背景因素的影响,通过分析微分光谱的红边,可以更清晰地描述植物光谱的变化特征及规律。刘伟东等^[13]发现,红边位置与叶绿素含量有关,随着水稻生育时期的推进,红边位置先后呈现出“红移”和“蓝移”现象。本研究通过一阶导数变换,发现在 2 种模式下的红边位置和红边幅值都随着大豆生育时期的推进呈现出先增加后降低的规律,对一阶导数光谱与大豆叶绿素密度的相关分析发现,在 730 nm 左右的红边区域,一阶导数光谱与叶绿素密度有较好的相关性,红边位置和红边幅值与叶绿素密度均达到了极显著相关水平,高于原始光谱与叶绿素密度的相关系数,说明红边参数也能够较好地用于作物的长势监测^[28]。

3.3 净作和套作大豆叶绿素密度光谱估测通用模型

采用光谱参数对植被进行定量检测是遥感监测常用的手段之一,植被指数能够定量表明植被的活力,比单波段探测绿色植被更具有灵敏性,每一个植被指数都有其对应的绿色植物特定的表达式^[29],分析植被指数的优势和局限性将有助于遥感技术的开发利用。陈书琳等^[30]研究发现,MCARI 反演大豆叶片叶绿素含量的精度高于其他植被指数,而本研究发现 MCARI 与叶绿素密度的相关系数比其他植被指数低,这可能是由于取样间隔时间跨度较远、各处理之间叶绿素密度差异较大造成的。杨峰等^[14]的研究发现,以二次修正土壤调节植被指数(MSA-VI2)建立的线性回归模型对水稻、小麦的叶绿素密度预测精度达到了 89.3%和 70.61%。陈燕等^[24]研究发现,在 729 nm 下一阶导数光谱建立的模型对棉花叶绿素密度的估测精度达到了 84.3%;冯伟等^[31]发现,NDAI 和 RAI 估测受白粉病影响的小麦冠层叶绿素密度模型的 R^2 分别为 0.783 和 0.776,对监测小麦光合潜力和病害影响评价具有积极意

义。本研究结果表明,叶绿素密度与基于原始光谱自由组合的比值植被指数 $RVI(507/697)$ 的相关性最高,基于原始光谱和一阶导数光谱的多波段自由组合的 RVI 、 $NDVI$ 、 DVI 及常见的植被指数与叶绿素密度的相关性大多达到极显著水平,二阶导数光谱自由组合的优选波段组合则对叶绿素密度的相关性较低,这可能是由于原始光谱经过 2 次求导之后对叶绿素密度的敏感性降低造成的。选取 $RVI(507/697)$ 对净、套作大豆叶绿素密度进行模型构建并检验模型, $RMSE=0.25$, 预测 R^2 为 0.75, 预测精度较好,因此可以用特征的植被指数对大豆冠层叶绿素密度进行估算。

4 结 论

对大豆叶绿素密度变化规律和冠层光谱特征的测定结果表明,净作、套作条件下大豆叶绿素密度和近红外波段的冠层光谱反射率在苗期、分枝期、始花期、盛花期、结荚期、鼓粒期变化规律一致,呈现先增高后下降的趋势,最大值出现在结荚期。以原始光谱数据作为输入数据构建的多波段组合植被指数 RVI 、 DVI 和 $NDVI$ 与叶绿素密度的相关性高于一阶导数、二阶导数光谱及其他光谱特征参数。通过原始光谱数据多波段组合获得的 $RVI(507/697)$ 与叶绿素密度建立的回归模型 $Y=8.8196x^2+1.0064x-1.6158$ ($R^2=0.927$, $P<0.01$), 经检验 R^2 为 0.75, $RMSE$ 达到 0.25, 预测精度较好,为估测以叶绿素密度为参数的净、套作大豆长势提供了支撑,进一步提高了高光谱遥感在大豆上的应用潜力。

[参考文献]

- [1] 刘彦坤. 中国大豆进出口贸易影响因素分析 [D]. 江苏无锡: 江南大学, 2008.
Liu Y K. The research on influencing factors of soybean import&export trade in China [D]. Wuxi, Jiangsu: Jiangnan University, 2008. (in Chinese)
- [2] 雍太文, 杨文钰, 王小春, 等. 玉米套大豆高产高效综合栽培技术 [J]. 大豆科技, 2011(2): 52-53.
Yong T W, Yang W Y, Wang X C, et al. High production and high effect comprehension cultivation technology of corn relay intercropping soybean [J]. Soybean Science & Technology, 2011(2): 52-53. (in Chinese)
- [3] 梅林森. 带状套作大豆植株机收特性及化学催熟研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2013.
Mei L S. Research on plant characteristic for mechanized harvesting and chemical ripening of soybean in relay strip intercropping [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [4] 黄持都, 胡小松, 廖小军, 等. 叶绿素研究进展 [J]. 中国食品添加剂, 2007(3): 114-118.
Huang C D, Hu X S, Liao X J, et al. The advancement of chlorophyll [J]. China Food Additives, 2007(3): 114-118. (in Chinese)
- [5] 方 慧, 宋海燕, 曹 芳, 等. 油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(9): 1731-1734.
Fang H, Song H Y, Cao F, et al. Study on the relationship between spectral properties of oilseed rape leaves and their chlorophyll content [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(9): 1731-1734. (in Chinese)
- [6] 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究 [J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228-232.
Wu C S, Xiang Y Q, Zheng L F, et al. Estimating chlorophyll density of crop canopies by using hyperspectral data [J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(3): 228-232. (in Chinese)
- [7] 刘秀丽, 宋 平, 孙成明. 植物叶绿素测定方法的再探讨 [J]. 江苏农业研究, 1999, 20(3): 46-47.
Liu X L, Song P, Sun C M. Rediscussion method for the determination of plant chlorophyll [J]. Jiangsu Agricultural Research, 1999, 20(3): 46-47. (in Chinese)
- [8] 谭昌伟, 周清波, 齐 腊, 等. 水稻氮素营养高光谱遥感诊断模型 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1261-1268.
Tan C W, Zhou Q B, Qi L, et al. Hyperspectral remote sensing diagnosis models of rice plant nitrogen nutritional status [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1261-1268. (in Chinese)
- [9] 梁惠平, 刘湘南. 玉米氮营养指数的高光谱计算模型 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 250-255.
Liang H P, Liu X N. Model for calculating corn nitrogen nutrition index using hyper-spectral data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 250-255. (in Chinese)
- [10] 李卫国, 李秉柏, 王志明, 等. 作物长势遥感监测应用研究现状和展望 [J]. 江苏农业科学, 2006(3): 12-15.
Li W G, Li B B, Wang Z M, et al. Status and prospect on research and application of crop condition monitoring using remote sensing [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2006(3): 12-15. (in Chinese)
- [11] 夏 天, 吴文斌, 周清波, 等. 冬小麦叶面积指数高光谱遥感反演方法对比 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 139-147.
Xia T, Wu W B, Zhou Q B, et al. Comparison of two inversion methods for winter wheat leaf area index based on hyperspectral remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 139-147. (in Chinese)
- [12] 孙 涛. 农作物叶面积指数反演方法研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
Sun T. Retrieval of crop leaf area index [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013. (in Chinese)

- [13] 刘伟东,项月琴,郑兰芬,等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析 [J]. 遥感学报,2000,4(4):279-283.
Liu W D,Xiang Y Q,Zheng L F,et al. Relationships between rice LAI,CH. D and hyperspectral data [J]. Journal of Remote Sensing,2000,4(4):279-283. (in Chinese)
- [14] 杨 峰,范亚民,李建龙,等. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度 [J]. 农业工程学报,2010,26(2):237-243.
Yang F,Fan Y M,Li J L,et al. Estimating LAI and CCD of rice and wheat using hyperspectral remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(2):237-243. (in Chinese)
- [15] 申晓慧. 不同施肥种类对大豆叶片光谱及叶绿素含量的相关性分析 [J]. 黑龙江农业科学,2014(1):34-36.
Shen X H. Correlation analysis of chlorophyll content and spectral characteristics of soybeans leaves under different fertilizer treatments [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014(1):34-36. (in Chinese)
- [16] 宋开山,张 柏,李 方,等. 高光谱反射率与大豆叶面积及地上鲜生物量的相关分析 [J]. 农业工程学报,2005,21(1):36-40.
Song K S,Zhang B,Li F,et al. Correlative analyses of hyperspectral reflectance,soybean LAI and aboveground biomass [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21(1):36-40. (in Chinese)
- [17] 杨 峰,崔 亮,武晓玲,等. 不同空间配置套作大豆后期农学参数及光谱特征分析 [J]. 中国油料作物学报,2012,34(3):268-272.
Yang F,Cui L,Wu X L,et al. Soybean agronomic and hyperspectral characteristics at later stage under spatial patterns of maize-soybean intercropping [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2012,34(3):268-272. (in Chinese)
- [18] Sims D A,Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species,leaf structures and developmental stages [J]. Remote Sensing of Environment,2002,81(2):337-354.
- [19] Penuelas J,Baret F,Fillella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophylla ratio from leaf spectral reflectance [J]. Photosynthetica,1995,31(2):221-230.
- [20] Gamon J A,Pe Uelas J,Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. Remote Sensing of Environment,1992,41(1):35-44.
- [21] Merzlyak M N,Gitelson A A,Chivkunova O B,et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening [J]. Physiologia Plantarum,1999,106(1):135-141.
- [22] 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.
- [23] Daughtry C S T,Walthall C L,Kim M S,et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment,2000,74(2):229-239.
- [24] 陈 燕,黄春燕,王登伟,等. 新疆棉花叶绿素密度的高光谱估算研究 [J]. 新疆农业科学,2006,43(6):451-454.
Chen Y,Huang C Y,Wang D W,et al. Estimation of cotton chlorophyll density in north Xinjiang by using high spectral data [J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2006,43(6):451-454. (in Chinese)
- [25] 崔 亮,苏本营,杨 峰,等. 不同玉米-大豆带状套作组合条件下光合有效辐射强度分布特征对大豆光合特性和产量的影响 [J]. 中国农业科学,2014,47(8):1489-1501.
Cui L,Su B Y,Yang F,et al. Effects of photo-synthetically active radiation on photosynthetic characteristics and yield of soybean in different maize/soybean relay strip intercropping systems [J]. Scientia Agricultura Sinica,2014,47(8):1489-1501. (in Chinese)
- [26] 陈 燕,王登伟,黄春燕,等. 新疆棉花 LAI 和叶绿素密度的高光谱估算研究 [J]. 遥感信息,2007(2):33-36,41.
Chen Y,Wang D W,Huang C Y,et al. Estimating of cotton LAI and chlorophyll density by using hyperspectral data in Xinjiang [J]. Remote Sensing Information,2007(2):33-36,41. (in Chinese)
- [27] 李凤秀,张 柏,宋开山,等. 玉米叶面积指数与高光谱植被指数关系研究 [J]. 遥感技术与应用,2007,22(5):586-592.
Li F X,Zhang B,Song K S,et al. Research and analysis of the correlation between hyperspectral vegetation index and leaf area index [J]. Remote Sensing Technology and Application,2007,22(5):586-592. (in Chinese)
- [28] 王秀珍,王人潮,李云梅,等. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2001,27(3):301-306.
Wang X Z,Wang R C,Li Y M,et al. Study on red edge characteristics of rice spectral caused by nitrogen level [J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences),2001,27(3):301-306. (in Chinese)
- [29] 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展 [J]. 地球科学进展,1998,13(4):327-333.
Tian Q J,Min X J. Advance in study on vegetation indices [J]. Advances in Earth Science,1998,13(4):327-333. (in Chinese)
- [30] 陈书琳,毕银丽,齐礼帅,等. 接种菌根大豆叶片光谱分析和叶绿素含量估测 [J]. 中国农业大学学报,2014(2):125-130.
Chen S L,Bi Y L,Qi L S,et al. Hyperspectral characteristics and estimating for chlorophyll content of soybean inoculated with AMF [J]. Journal of China Agricultural University,2014(2):125-130. (in Chinese)
- [31] 冯 伟,王晓宇,宋 晓,等. 白粉病胁迫下小麦冠层叶绿素密度的高光谱估测 [J]. 农业工程学报,2013,29(13):114-123.
Feng W,Wang X Y,Song X,et al. Hyperspectral estimation of canopy chlorophyll density in winter wheat under stress of powdery mildew [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(13):114-123. (in Chinese)