

# 基于高光谱的渭北旱塬区棉花冠层 叶面积指数估算

齐雁冰, 楚万林, 解 飞, 陈 洋, 常庆瑞

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以棉花冠层高光谱反射率与冠层叶片叶面积指数(LAI)为数据源,在分析 LAI 与原始高光谱反射率、一阶微分光谱反射率、光谱提取变量和植被指数相关性的基础上,采用一元线性与多元回归的方法构建了棉花 LAI 高光谱估算模型,并进行精度估算。结果显示,在可见光范围内随着生育期的推进及施氮量的增加冠层光谱反射率逐渐降低,在近红外范围内从苗期到花铃期随着施氮量增加反射率逐渐增加,花铃期到吐絮期反射率明显降低;各生育期冠层光谱的提取变量与 LAI 的相关性不强,全生育期各种光谱提取量及植被指数与 LAI 的相关性高于不同生育期;棉花冠层叶片 LAI 在反射光谱 1 461 nm 处相关系数达到最大值( $r = -0.726$ );对于一阶微分光谱, LAI 的敏感波段发生在 742 nm 处,  $r = 0.744$ ;以敏感波段 742 nm 一阶微分光谱反射率建立的逐步回归估算模型精度最高,  $RMSE = 0.94$ ,  $RE = 26.27\%$ ,  $r = 0.78$ 。说明以全生育期为基础,采用一阶微分光谱敏感波段,并根据实际条件选择有效的估测模型,可以进行棉花 LAI 的预测。

**关键词:** 棉花;叶面积指数;高光谱;植被指数

**中图分类号:** TP79; S562 **文献标志码:** A

## Estimating leaf area index of cotton canopy by hyperspectral reflectance in Weibei plateau

QI Yan-bing, CHU Wan-lin, XIE Fei, CHEN Yang, CHANG Qing-ru

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Leaf Area Index (LAI) is an important parameter to assess the growth situation of cotton. In this paper, canopy hyperspectral reflectance and LAI were measured at six growth stages of cotton in a field experiment. The correlation of LAI with the original spectral reflectance, the first derivative spectral reflectance, commonly used spectral variables and vegetation index were analyzed. The estimation models of LAI were established using linear regression and multiply stepwise regression methods, and the predictive precision was analyzed. The results indicated that spectral reflectance of cotton canopy decreased gradually with the advance of the growth stage and increase of nitrogen fertilizer application in the visible band, while it was increased from the seeding stage to the flowering and ball stage and it was decreased from the flowering and ball stage to the ball opening stage in the infrared band. The correlation coefficient of LAI with the common used spectral variables and vegetation index were higher in the whole growth stage than the different stages. The maximum correlation coefficients of LAI occurred at the reflectance bands of 1 461 nm with the  $r = -0.726$ , while the highest correlation coefficients between the first derivative spectral data and LAI occurred at band of 742 nm with  $r = 0.744$ . The model based on the first derivative spectral reflectance by using multiply stepwise regression method obtained the most satisfied results for the estimation of LAI in the 742 nm,  $RMSE = 0.94$ ,  $RE = 26.27\%$ ,  $r = 0.78$ . It is feasible to monitor the cotton growth by the first derivative spectral reflectance based on data of the whole growth stage. But for the different regions, the estimating models should be assessed carefully based on plenty of experiments.

**Keywords:** cotton; leaf area index; hyperspectrum; vegetation index

绿色植物通过叶片进行光合作用,叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI)既是光合作用强度及生物量

估算的重要参数,又是反应植物养分循环及健康状况的重要指标<sup>[1]</sup>。在小尺度范围内植被 LAI 的获取

收稿日期:2016-01-05

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题(2013AA102401-2)

作者简介:齐雁冰(1976—),男,河南淮阳人,副教授,主要从事 3S 技术及其应用方面的研究。

通信作者:常庆瑞(1959—),男,陕西子洲人,教授,博士生导师,主要从事遥感与 GIS 应用方面的研究。E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn。

方法相对成熟,而对于大尺度上植被 LAI 的监测而言,遥感技术的发展提供了一种无损、快速的获取方法,通过植被光谱反射率与 LAI 的关系,构建基于高光谱数据的 LAI 反演模型,能够及时了解作物的生长信息,对作物的精确管理具有重要意义<sup>[2]</sup>。

自 20 世纪 70 年代 Wiegand 等<sup>[3]</sup>开始进行 LAI 与光谱反射率之间关系研究以来,学者们就 LAI 的高光谱估算开展了大量的工作,主要集中在:(1) 不同生产措施及不同生育期农作物的冠层光谱特性<sup>[4-5]</sup>;(2) 以原始光谱反射率或者一阶导数光谱反射率为基础数据,求得 LAI 的敏感波段,并以此波段作为自变量建立回归方程,对 LAI 进行估测<sup>[6-7]</sup>;(3) 以植被指数光谱数据的不同变换形式中的一种或几种作为估测 LAI 的变量,通过相关分析,确定这些不同变化形式的光谱数据与 LAI 的相关性,进而建立 LAI 的预测模型<sup>[8-10]</sup>。农作物在田间的生长状况受到光、温、水及管理措施等众多因素的影响,因此基于高光谱的农作物 LAI 模型估算是一个复杂的过程,其结果受到光谱处理方法、回归方法及所选指标灵敏性的影响,只有在对模型各种影响因素系统分析对比的基础上,才能筛选出适宜的估算模型。同时学者们开展研究的农作物通常包括小麦<sup>[11-13]</sup>、水稻<sup>[14-16]</sup>、玉米<sup>[17-18]</sup>等粮食作物,由于棉花种植的区域性较强,开展的研究相对较少。

棉花的生产管理较其他农作物相对繁琐和复杂,因此我国棉花种植区域有所缩减,主要向新疆地区集中,而对于棉花 LAI 与光谱反射的关系研究区域主要集中在新疆地区<sup>[19-21]</sup>,对渭北旱塬区棉花冠层 LAI 的研究尚未见到,因此,本研究将试验区设置在渭北旱塬区,对不同施氮水平下的棉花冠层光谱反射特性进行分析,以单波段的原始光谱反射率和一阶微分光谱反射率作为自变量与 LAI 进行相关性分析,筛选出 LAI 的敏感波段,并进一步以原始光谱、一阶微分光谱及光谱数据的不同变化形式作为自变量,建立 LAI 的估算模型,并全面对比所建立模型进行棉花冠层 LAI 估测的精度,确定能够较好进行 LAI 估算的光谱变量,为大面积、无损和及时获取棉花冠层 LAI 信息提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

试验于 2014 年在陕西省乾县齐南村进行。该区地处渭北旱源区,属暖温带大陆性季风气候,冬天冷夏天热,春秋温暖,四季分明,气候温和,光、热资源较丰富,全年平均降水量为 525.8 mm,年平均气

温 12.7℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 3 470.3℃,为一年一熟制,以小麦和玉米种植为主,间有油菜与棉花,土壤类型以黄绵土为主。供试品种为鲁棉研 28 号,每个小区面积为 30 m<sup>2</sup>,设置 5 个氮肥梯度,分别为 N0(不施氮)、N1(37.5 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮)、N2(75 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮)、N3(112.5 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮)、N4(150 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮),每个梯度设置 3 个重复,随机排列,氮肥在播种前以碳铵一次性施入,其管理方式按照常规大田管理方式。棉花种植方式为地膜覆盖垄种,行距为 30 cm,待棉花出苗 20 天后定株距为 20 cm。

### 1.2 冠层光谱数据采集与叶面积指数的测定

使用美国 SVCHR 1024i 型便携式高光谱仪,波段范围是 350~2 500 nm,其中 350~1 000 nm 区间光谱分辨率为 1.4 nm,1 000~1 850 nm 区间光谱分辨率为 3.8 nm,在 1 850~2 500 nm 区间光谱分辨率为 2.4 nm。选择试验区各施肥梯度大田内不同长势且无病虫害危害的样本点,分别在棉花苗期(06-20)、现蕾期(07-15)、开花期(08-05)、花铃期(08-25)、盛铃期(09-15)、吐絮期(10-04)等关键生育时期进行棉花群体冠层光谱测定,测定时间选择在晴朗无云无风的 11:00—14:00 之间,测定前经参考板(白板)标定,传感器探头垂直向下,距离棉花冠层顶部约 1 m,光谱仪视场角选用 8°,光谱扫描时间设定在 5 s,每样点测 5 条曲线,最后用其平均值作为该样点的光谱反射值。本研究采用 Boxcar 平滑对原始光谱进行去噪处理,平滑半径为 5。

叶面积指数的测定是采用冠层分析仪(CI-110),测定时位置与冠层光谱测定位置相同,选择同步测量,分 8 个方向进行测量,以平均值作为该点的叶面积指数,每个小区内 3 个样点的平均值作为该小区的叶面积指数值。由于前期植株较小及到后期受棉絮的影响,我们只在现蕾期、开花期、花铃期和盛铃期 4 个生育期测定冠层叶面积指数。

### 1.3 模型参数的选取

为建立不同光谱参数的棉花冠层 LAI 预测模型,评价不同模型的预测精度,进而筛选出预测 LAI 的特征变量和最优模型,本研究采用 3 类高光谱特征参数进行构建模型:

(1) LAI 对于原始光谱和一阶微分光谱的敏感波段,以及 350~1 100 nm 范围内的原始光谱反射率和一阶微分光谱反射率。

光谱的一阶微分方法是对原始反射光谱进行一阶微分,近似计算方法是:

$$R'(\lambda_i) = \frac{dR(\lambda_i)}{d\lambda} = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda}$$

式中,  $\lambda_i$  为通道  $i$  处的波长值;  $R(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  处的光谱反射值;  $\Delta\lambda$  为相邻波长间隔。

(2) 常用植被指数: 比值植被指数、归一化植被指数、垂直植被指数、差值植被指数、土壤调整植被指数、转换型土壤调整指数、修改型二次土壤调整指数、再归一化植被指数。计算方式如下:

比值植被指数 (RVI)

$$RVI = R_{NIR} / R_{Red}$$

归一化植被指数 (NDVI)

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$$

垂直植被指数 (PVI)

$$PVI = \sqrt{(0.355R_{NIR} - 0.149R_{Red})^2 + (0.355R_{NIR} - 0.852R_{Red})^2}$$

差值植被指数 (DVI)

$$DVI = R_{NIR} - R_{Red}$$

土壤调整植被指数 (SAVI)

$$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red} + L} (1 + L)$$

转换型土壤调整指数 (TSAVI)

$$TSAVI = \frac{a(R_{NIR} - aR_{Red} - b)}{aR_{NIR} - R_{Red} - ab}$$

修改型二次土壤调整指数 (MSAVI2)

$$MSAVI2 = 0.5 [ 2(R_{NIR} + 1) - \sqrt{2(R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_{Red})^2} ]$$

再归一化植被指数 (RDVI)

$$RDVI = \sqrt{NDVI \times DVI}$$

式中,  $R$  为光谱反射率;  $NIR$  为近红外范围内第一个拐点对应的波长,  $Red$  为红谷位置对应的波长。  $L$  为调整系数,  $L = 0.5$ ,  $a$ 、 $b$  为土壤线系数,  $a = 10.489$ ,  $b = 6.604$ <sup>[22]</sup>。

(3) 基于原始光谱与一阶微分光谱的提取变量, 见表 1。

表 1 部分光谱变量描述

Table 1 Describes of part of the spectrum variables

光谱变量 Spectrum variables	描述 Describes
绿峰幅值 Reflectance of the green peak position ( $R_g$ )	绿光范围 510 ~ 560 nm 内的最大波段反射率 Reflectance of the green peak position in 510 ~ 560 nm
绿峰位置 Green peak position ( $\lambda_g$ )	绿峰幅值对应的波长位置 Wavelength in green peak position
红谷幅值 Reflectance of the red valley position ( $R_r$ )	红光范围 640 ~ 680 nm 内的最小波段反射率 Reflectance of the red valley position in 640 ~ 680 nm
红谷位置 Red valley position ( $\lambda_r$ )	红谷幅值对应的波长位置 Wavelength red valley position
基于高光谱位置的变量 Variables based on hyperspectral position	
红边幅值 Spectra slop of red edge ( $D_r$ )	红边 680 ~ 760 nm 范围内最大的一阶微分值 Maximum wavelength of first derivative reflectance of red edge in 680 ~ 760 nm
红边位置 Red edge position ( $\lambda_r$ )	红边幅值对应的波长位置 Wavelength in red edge position
蓝边幅值 Spectra slop of blue edge ( $D_b$ )	蓝边 490 ~ 530 nm 范围内最大的一阶微分值 Maximum wavelength of first derivative reflectance of blue edge in 490 ~ 530 nm
蓝边位置 Blue edge position ( $\lambda_b$ )	蓝边幅值对应的波长位置 Wavelength in blue edge position
黄边幅值 Spectra slop of yellow edge ( $D_y$ )	黄边 560 ~ 640 nm 范围内最大的一阶微分值 Maximum wavelength of first derivative reflectance of yellow edge in 560 ~ 640 nm
黄边位置 Yellow edge position ( $\lambda_y$ )	黄边幅值对应的波长位置 Wavelength in yellow edge position
基于高光谱面积的变量 Variables based on hyperspectral area	
红边面积 Red edge area ( $SD_r$ )	红边范围内一阶微分值的总和 Sum of the first derivative reflectance value in red edge position
蓝边面积 Blue edge area ( $SD_b$ )	蓝边范围内一阶微分值的总和 Sum of the first derivative reflectance value in blue edge position
黄边面积 Yellow edge area ( $SD_y$ )	黄边范围内一阶微分值的总和 Sum of the first derivative reflectance value in yellow edge position
$R_g / R_r$	绿峰反射率与红谷反射率的比值 Ratio of $R_g$ and $R_r$
$(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$	绿峰反射率与红谷反射率的归一化值 Ratio of $(R_g - R_r)$ and $(R_g + R_r)$
基于归一化与比值植被指数形式的变量 Variables based on NDVI and RVI	
$SD_r / SD_b$	红边内一阶微分值总和与蓝边内一阶微分值总和的比值 Ratio of $SD_r$ and $SD_b$
$SD_r / SD_y$	红边内一阶微分值总和与黄边内一阶微分值总和的比值 Ratio of $SD_r$ and $SD_y$
$(SD_r - SD_b) / (SD_r + SD_b)$	红边内一阶微分值总和与蓝边内一阶微分值总和的归一化值 Ratio of $(SD_r - SD_b)$ and $(SD_r + SD_b)$
$(SD_r - SD_y) / (SD_r + SD_y)$	红边内一阶微分值总和与黄边内一阶微分值总和的归一化值 Ratio of $(SD_r - SD_y)$ and $(SD_r + SD_y)$

## 1.4 数据处理

相关性分析和逐步回归分析、模型的构建、模型的检验、作图等采用 Excel 2010 与 SPSS19.0 完成。用标准差加减三倍标准差方法异常值剔除后,本研究共选取 148 个样本,其中 128 个作为测试样本,20 个作为精度检验样本。

## 2 结果与分析

### 2.1 生育期内棉花冠层光谱反射特征

由图 1 可知,在棉花生育期内不同波段上光谱反射率差异明显,在可见光范围内,随着生育期的推进冠层光谱反射率逐渐降低,到吐絮期达到最小,而在近红外范围内,从苗期到花铃期反射率逐渐增加,花铃期到吐絮期反射率明显降低,这与棉花冠层叶面积及叶片结构的变化相关。棉花从苗期到花铃期地表覆盖度增加,叶面积及叶片含水量累积量增大,从而增强了对近红外的反射与对可见光的吸收,而在盛铃期与吐絮期,棉花基本停止营养生长,光合作用不断减弱,导致冠层光谱反射率不断降低。不同的施氮水平对棉花光谱反射率也具有明显的影响(图 2,以吐絮期为例),在可见光范围内随施氮量的增加而呈现降低的趋势,这主要是由于叶面积随着施氮水平的提高而有增大的趋势,而叶面积与叶绿素等色素含量对植被在可见光范围内的光谱反射率具有明显影响。冠层光谱反射率在近红外范围内随施氮量增加呈现明显的增长趋势,与施氮量关系密切。

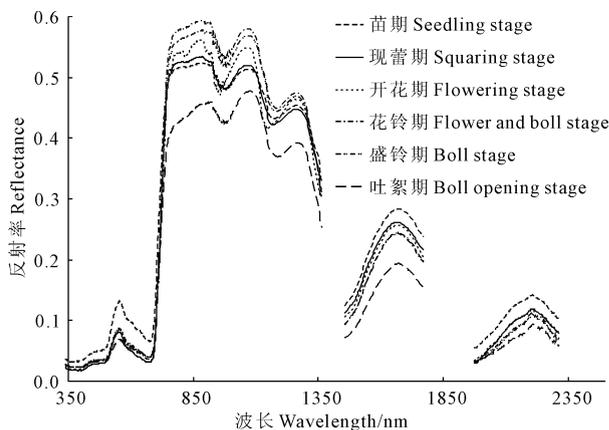


图 1 不同生育时期冠层光谱反射率

Fig.1 Canopy spectral reflectance in different growth stage

### 2.2 叶面积指数与光谱特征参量的相关分析

以棉花现蕾期、开花期、花铃期、盛铃期等 4 个时期为例,由表 2 可知,各生育期冠层光谱的提取变量与 LAI 的相关性不强,现蕾期各光谱提取变量与叶面积指数相关性均不显著,在开花期、花铃期、盛铃期与

LAI 相关性最大的变量分别为  $R_g/R_r$  ( $r = 0.375$ )、红谷幅值  $R_r$  ( $r = -0.379$ )、 $(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$  ( $r = 0.459$ ),但这几个时期的相关性不显著。在对全生育期冠层提取变量与叶面积指数的分析中,相关性明显比单生育期 LAI 与变量的相关性强,与 LAI 相关性最大的变量是  $SDr/SDb$ ,相关系数为 0.601,达到极显著水平。在对叶面积指数进行估测时应利用全生育期冠层高光谱数据建立预测模型。

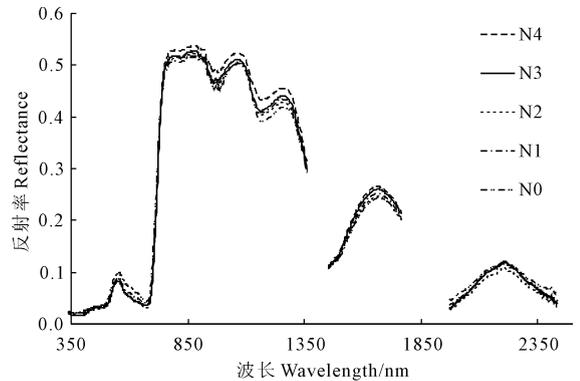


图 2 吐絮期不同施氮水平下冠层光谱反射率

Fig.2 Canopy spectral reflectance in different N treatment in the ball opening stage

利用相关性较大的光谱提取变量建立叶面积指数的回归方程,分别建立线性、一元二次、指数、幂函数、对数 5 种回归方程,从中选取确定系数 ( $R^2$ ) 最大的列于表 3 中,可以看出,以整个生育期变量  $SDr/SDb$  建立的幂函数回归方程确定系数最大,为 0.3713,达到极显著水平,全生育期建立的叶面积回归方程比分时期建立的回归方程估测效果好,与上面相关性的分析结果一致,但利用全生育期提取变量建立的回归方程确定系数也不高。

### 2.3 叶面积指数与敏感波段的相关分析

本研究将棉花现蕾期、开花期、花铃期、盛铃期等 4 个关键生育期共 128 个测试样本的冠层光谱反射率与对应的叶面积指数进行了相关性分析,如图 3 所示,原始光谱与叶面积指数在 1461 nm 处呈现最大的负相关,相关性系数为 -0.726,一阶微分光谱与叶面积指数在 742 nm 处呈现最大正相关,相关性系数为 0.744,一阶微分光谱与 LAI 的最大相关性高于原始光谱与 LAI 的最大相关性,将叶面积指数的两个敏感波段 R1461、DR742 作为单一自变量分别建立 LAI 的估测方程,由图 4a 可知,叶面积指数与 R1461 建立的回归方程,以指数形式的回归方程确定系数最高,为 0.5347,由图 4b 可知,叶面积指数与 DR742 建立的回归方程,以一元线性形式的回归方程确定系数最高,为 0.5539,均达到了极显著的水平,且确定系数较高,

可以用来估测棉花的叶面积指数。

表 2 不同生育期棉花叶面积指数与光谱变量的相关性系数

Table 2 Correlation coefficient of cotton LAI and spectral variables in different growth stages

光谱提取变量 Spectral extraction	现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	花铃期 Flowering and ball stage	盛铃期 Peak balling stage	整个生育期 Whole growth stage
$Rg$	-0.279	0.273	-0.025	-0.163	-0.437 <sup>**</sup>
$\lambda g$	-0.280	-0.095	-0.312	-0.346	-0.019
$Rr$	-0.216	-0.008	-0.379 <sup>*</sup>	-0.443 <sup>*</sup>	-0.139
$\lambda v$	-0.047	0.214	-0.138	0.259	-0.121
$\lambda r$	0.258	0.060	0.112	0.310	0.290 <sup>**</sup>
$SDb$	-0.229	0.332	0.110	0.116	-0.535 <sup>**</sup>
$Db$	-0.237	0.360 <sup>*</sup>	0.100	0.096	-0.491 <sup>**</sup>
$\lambda b$	0.023	-0.015	-0.226	-0.238	0.458 <sup>**</sup>
$SDy$	-0.254	0.372 <sup>*</sup>	0.159	0.250	-0.474 <sup>**</sup>
$Dy$	0.000	0.366 <sup>*</sup>	0.167	-0.058	-0.460 <sup>**</sup>
$\lambda y$	-0.098	-0.114	-0.195	-0.266	0.105
$SDr$	-0.084	0.261	0.316	0.445 <sup>*</sup>	0.082
$Dr$	-0.130	0.102	0.031	0.225	-0.255 <sup>**</sup>
$Rg/Rr$	0.061	0.375 <sup>*</sup>	0.324	0.454 <sup>**</sup>	-0.339 <sup>**</sup>
$(Rg - Rr)/(Rg + Rr)$	0.045	0.365 <sup>*</sup>	0.318	0.459 <sup>**</sup>	-0.326 <sup>**</sup>
$RVI$	0.181	0.177	0.262	0.409 <sup>*</sup>	0.241 <sup>**</sup>
$NDVI$	0.155	0.151	0.309	0.411 <sup>*</sup>	0.201 <sup>*</sup>
$PVI$	-0.140	0.207	0.157	0.340	0.197 <sup>*</sup>
$DVI$	-0.153	0.207	0.152	0.336	0.193 <sup>*</sup>
$SAVI$	-0.099	0.194	0.175	0.344	0.190 <sup>*</sup>
$TSAVI$	-0.217	0.005	-0.372 <sup>*</sup>	-0.433 <sup>*</sup>	-0.129
$MSAVI2$	-0.170	0.217	0.142	0.337	0.203 <sup>*</sup>
$RDVI$	-0.070	0.194	0.186	0.352 <sup>*</sup>	0.196 <sup>*</sup>
$SDr/SDb$	0.201	-0.224	0.047	0.110	0.601 <sup>**</sup>
$SDr/SDy$	0.291	-0.261	-0.033	-0.127	0.531 <sup>**</sup>
$(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$	0.201	-0.244	0.018	0.123	0.597 <sup>**</sup>
$(SDr - SDy)/(SDr + SDy)$	0.291	-0.293	-0.062	-0.104	0.545 <sup>**</sup>

表 3 冠层光谱提取变量与叶面积指数的回归方程

Table 3 The regression equations of LAI and spectral variables

生育时期 Growth stage	入选变量 Selected variables	模型 Model	表达式 Formula	$R^2$
开花期 Flowering stage	$Rg/Rr$	一元二次曲线 Quadric equation	$Y = 3.7656 - 1.5205X + 0.5989X^2$	0.1448 <sup>*</sup>
花铃期 Flowering and ball stage	$Rr$	指数 Exponential model	$Y = 7.3016\exp(-19.61X)$	0.1548 <sup>*</sup>
盛铃期 Peak balling stage	$(Rg - Rr)/(Rg + Rr)$	一元二次曲线 Quadric equation	$Y = -10.672 + 68.751X - 78.731X^2$	0.2199 <sup>**</sup>
整个生育期 Whole growth stage	$SDr/SDb$	幂函数 Power function	$Y = 0.0036X^{2.3743}$	0.3713 <sup>**</sup>

## 2.4 叶面积指数估算模型精度分析

如表 4 所示,可以看出基于全生育期的原始光谱敏感波段以及一阶微分光谱敏感波段建立叶面积指数估测模型的  $RMSE$  均较低,分别为 0.96 和 0.94,预测值与实测值之间的相关性系数相似,均达到 1%的

极显著水平,但估测精度不同,分别为 52.91% 与 73.73%,因此,以一阶微分光谱敏感波段 DR742 为变量建立的一元线性回归方程对棉花叶面积指数的估测精度较高,可以用该模型对棉花叶面积指数进行反演。

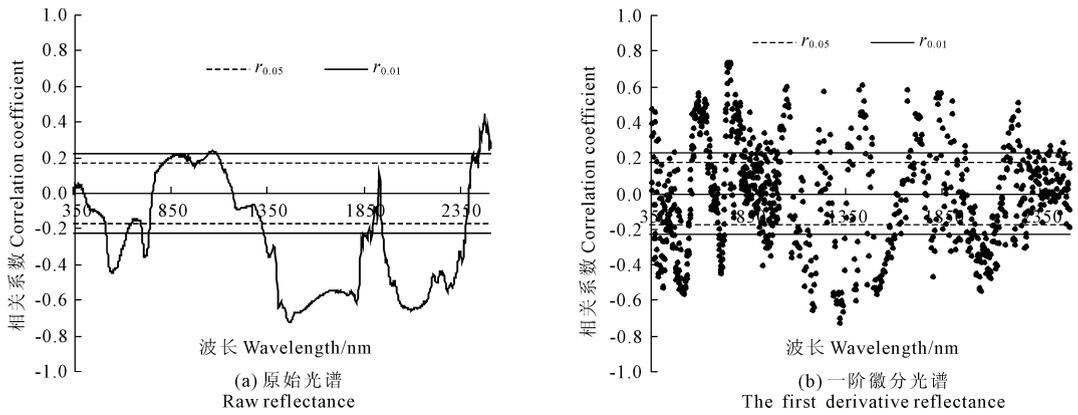


图 3 叶面积指数与原始光谱和一阶微分光谱的相关性

Fig.3 Correlation of LAI with raw reflectance and first derivative reflectance

注:  $r_{0.05}$  表示 0.05 显著相关 ( $r=0.174$ ) 水平线,  $r_{0.01}$  表示 0.01 极显著相关 ( $r=0.227$ ) 水平线。

Note:  $r_{0.05}$ : the horizontal of  $r=0.174$  at  $P \leq 0.05$ ,  $r_{0.01}$ : the horizontal of  $r=0.227$  at  $P \leq 0.01$ .

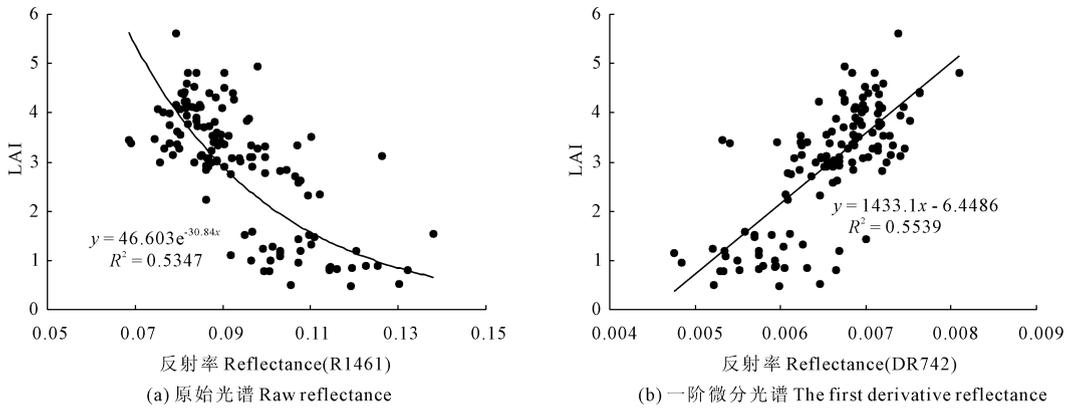


图 4 叶面积指数(LAI)预测回归方程

Fig.4 The predict regression equations of LAI

表 4 棉花叶面积指数估算模型精度分析

Table 4 The accuracy of estimation models of cotton leaf area index

生育时期 Growth stages	拟合模型表达式 Models	变量 Variables	拟合 $R^2$ Coefficient	RMSE	RE/%	预测与实测值相关系数 $r$ Correlation between estimated and measured value
整个生育期 Whole growth stage	$Y = 46.603 \exp(-30.84X)$	R1461	0.5347**	0.96	47.09	0.77**
	$Y = -6.4486 + 1433.1X$	DR742	0.5539**	0.94	26.27	0.78**

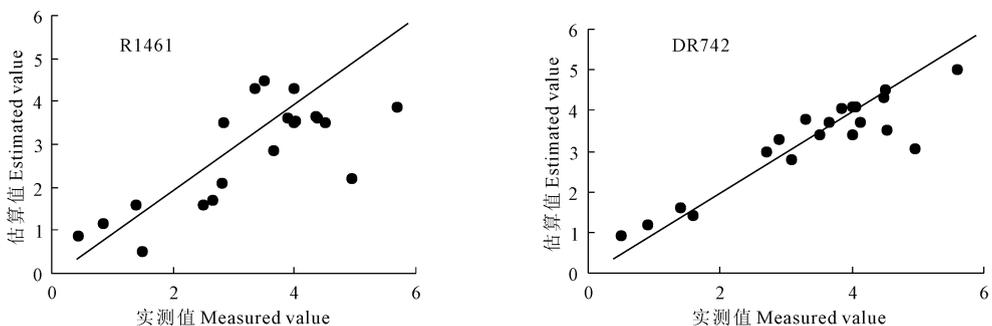


图 5 棉花叶面积指数估算值与实测值分布

Fig.5 Distribution of estimated and measured of cotton leaf area index

对筛选出的预测模型的预测值与实测值间的关系作图分析,从图 5 可以看出,以 DR742 为变量的预测值与实测值分布较优,以变量 R1461 建立的模型的预测值偏离实测值相对较大,估测效果不佳。

### 3 讨论

农作物的反射光谱特征与其生理特点息息相关,因此通过反射光谱特征的观测及对各种生理参数进行反演,进而根据光谱的差异对农作物生长状况进行检测,这也是近年来高光谱遥感在农作物生长环境监测中最为重要的应用方面。唐延林等<sup>[23]</sup>的研究表明随着棉花发育期的推移,冠层光谱反射率在可见光波段逐渐降低,在近红外区域增高,本研究的结果显示冠层光谱反射率由花铃期到吐絮期在可见光谱段逐渐降低,在近红外范围内逐渐升高,与以上结果一致,原因在于在可见光波段光谱反射率主要受叶绿素等色素的影响<sup>[24]</sup>,而在近红外区域,光谱反射率受到冠层叶片细胞的排列方式与植被整体结构影响较大<sup>[25]</sup>,与棉花长势密切相关。

植被指数可以指示地表植被的盖度及其生长状况,通常是由地面光谱中红外和近红外区域光谱反射率进行线性或非线性组合或运算得到的一组参数<sup>[22,26]</sup>。王登伟等<sup>[26]</sup>、马勤建等<sup>[27]</sup>的研究均表明在整个生育期内,棉花冠层光谱反射率及各种形式提取量获得的植被指数与叶面积指数均呈现显著的相关关系,本研究的结果显示在各个生育期内,冠层光谱的提取量与 LAI 的相关性并不强,现蕾期无光谱提取量与 LAI 显著相关,开花期、花铃期及盛铃期也仅有个别提取量与 LAI 具有显著相关性,而将整个生育期综合来计算的时候,光谱提取量与 LAI 的相关性显著提高,大部分指标与 LAI 均呈现显著相关性。其原因有待进一步研究。

在利用高光谱数据构建叶面积的预测模型时,模型精度受到光谱数据的变换形式及所选函数类型的影响。对地物原始光谱进行微分处理可以提高光谱数据与农学参数的相关性,对光谱信噪比非常敏感,因为光谱微分处理可以去除部分由于线性光谱背景及噪声光谱对植被指数的影响,从而能更好地获取地表植被冠层生长信息。马勤建等<sup>[27]</sup>的研究表明对棉花原始光谱进行一阶微分处理后与 LAI 的相关系数由 0.6339 提高至 0.6769,本研究的结果显示原始光谱与 LAI 的相关系数为 -0.726,而经过一阶微分变换之后相关系数略有提高,变为 0.744。利用线性和非线性拟合的方法是当前基于光谱数据的叶面积估算的主要途径,通常选用的函数包括线性、对数、指数、

幂函数、多项式等,由于农作物的生长条件千差万别,所选用的函数模拟精度差异也非常明显,陈志强等<sup>[28]</sup>和易秋香等<sup>[29]</sup>的结果显示指数模型优于对数、幂函数、多项式及线性模型,而王登伟等<sup>[26]</sup>的结果表明幂函数模型优于线性模型。本研究的结果显示以一阶微分光谱敏感波段所建立的预测模型中线性模型精度明显高于幂函数、指数、对数及多项式函数,由此表明预测模型函数的选取并没有孰优孰劣之分,而是要根据实际状况选取最优的模型。

遥感技术的发展尽管为农作物生长环境及基本参数的快速、无损检测提供了一条有效途径,但从众多的农作物遥感反演的研究结果中不难发现,不仅不同农作物之间的反演模型无法通用,即使是相同的农作物之间,在不同研究区域、不同学者之间反演模型也是千差万别<sup>[30-32]</sup>,甚至同一种农作物、相同的研究区内在不同的年份的反演模型都差异很大,因此,就目前的研究水平,建立通用的农作物遥感反演模型仍有很长的路要走。

### 4 结论

本文在对不同施氮水平及不同生育期的棉花冠层光谱反射特性分析的基础上,以棉花冠层光谱与 LAI 的相关性为出发点,建立了基于不同光谱参数的 LAI 估算模型,并检验了各模型的预测精度,筛选出棉花 LAI 的特征变量及精度较高的预测模型。受到气候、地形及生育期的等众多因素的影响,棉花冠层光谱反射率与 LAI 的相关性各生育期内低于全生育期,且以全生育期  $SDr/Sdb$  建立的幂函数方程相关系数最高,对棉花原始光谱进行一阶微分处理后与 LAI 的相关系数则会有所提高,并以一阶微分光谱敏感波段 DR742 为变量建立的一元线性回归方程对棉花 LAI 的估测精度较高。目前以地物光谱反射率进行农作物农学参数估算模型的构建仍然处于探索阶段,不同区域及不同农作物之间不具有可比性,而应该结合实际,通过长期的实验才能得到可靠的结果。

#### 参考文献:

- [1] 吴立峰,张富仓,王海东,等.新疆棉花亏缺灌溉叶面积指数模拟研究[J].农业工程学报,2015,46(1):249-258.
- [2] 陈江鲁,王克如,李少昆,等.基于光谱参数的棉花叶面积指数监测和敏感性分析[J].棉花学报,2011,23(6):552-558.
- [3] Wiegand C L, Gausman H W, Cuellar J A. Vegetation density as deduced from ERTS-1MSS response[C]//Third ETRS Symp, NASA-SP-351, (1) A. Washington, DC:NASA,1974:93-116.
- [4] Thomas I, Ching N P, Benning V M, et al. A review of multi-channel indices of class separability[J]. International Journal of Remote Sens-

- ing, 1987, 18(3):331-350.
- [5] 吴春霞,王 进,任 岗,等.基于高光谱技术的棉花冠层反射特征研究[J].农业与技术,2008,28(4):56-60.
- [6] 卢 霞.沿海滩涂棉花叶片叶绿素含量高光谱遥感估算模型研究[J].安徽农业科学,2011,39(12):7452-7454.
- [7] 王登伟,黄春燕,张 伟,等.高光谱数据与棉花叶绿素含量和叶绿素密度的相关性分析[J].棉花学报,2008,20(5):368-371.
- [8] Horler D N H, Dockray M, Barber J. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content [J]. *Advances in Space Research*, 1983,3(2):273-277.
- [9] Pinar A, Curran P J. Grass chlorophyll and the reflectance red edge [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996,17(2):351-357.
- [10] 姚 霞,吴华兵,朱 艳,等.棉花功能叶片色素含量与高光谱参数的相关性研究[J].棉花学报,2007,19(4):267-272.
- [11] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,81(1):45-57.
- [12] 代 辉,胡春胜,程一松,等.不同氮水平下冬小麦农学参数与光谱植被指数的相关性[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):16-21.
- [13] 靳彦华,熊黑钢,张 芳,等.不同地类春小麦叶片叶绿素含量高光谱植被指数估算模型研究[J].麦类作物学报,2013,33(5):1012-1018.
- [14] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,81(2):416-426.
- [15] 金震宇,田庆久,惠凤鸣,等.水稻叶绿素浓度与光谱反射率关系研究[J].遥感技术与应用,2003,18(3):134-137.
- [16] 徐新刚,赵春江,王纪华,等.新型光谱曲线特征参数与水稻叶绿素含量间的关系研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(1):188-191.
- [17] 宋开山,张 柏,李 方,等.玉米叶绿素含量的高光谱估算模型研究[J].作物学报,2005,31(8):1095-1097.
- [18] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,等.玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究[J].科技通报,2007,23(1):83-87.
- [19] 陈 燕,黄春燕,王登伟,等.北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.
- [20] 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.
- [21] 黄春燕,王登伟,张煜星.基于棉花红边参数的叶绿素密度及叶面积指数的估算[J].农业工程学报,2009,25(2):137-141.
- [22] 浦瑞良,宫 鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [23] 唐延林,王秀珍,黄敬峰.棉花高光谱及其红边特征(I)[J].棉花学报,2003,15(3):146-150.
- [24] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,80(1):76-87.
- [25] Mutanga O, Skidmore A K, Van Wieren S. Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry [J]. *Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003,57:263-272.
- [26] 王登伟,黄春燕,马勤建,等.棉花高光谱植被指数与 LAI 和地上鲜生物量的相关性分析[J].中国农学通报,2008,24(3):426-429.
- [27] 马勤建,王登伟,黄春燕,等.棉花叶面积指数和地上干物质积累量的高光谱估算模型研究[J].棉花学报,2008,20(3):217-222.
- [28] 陈志强,王 磊,白由路,等.整个生育期玉米叶片 SPAD 高光谱预测模型研究[J].光谱学与光谱分析,2013,33(10):2838-2842.
- [29] 楚万林,齐雁冰,常庆瑞,等.棉花冠层叶片叶绿素含量与高光谱参数的相关性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(9):65-73.
- [30] 白 丽,王 进,蒋桂英,等.干旱区基于高光谱的棉花遥感估产研究[J].中国农业科学,2008,41(8):2499-2505.
- [31] 陈 兵,李少昆,王克如,等.病害胁迫下棉花叶片色素含量高光谱遥感估测研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(2):421-425.
- [32] 王 强,易秋香,包安明,等.基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算[J].农业工程学报,2012,28(15):125-132.

(上接第 113 页)

- [7] 王激清,韩宝文,刘社平.施氮量和耕作方式对春玉米产量和土壤硝态氮累积的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):129-135.
- [8] 谭 华,郑德波,邹成林,等.水肥一体膜下滴灌对玉米产量与氮素利用的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):18-23.
- [9] Belanger G, Ziadi N, Walsh J R, et al. Residual soil nitrate after potato harvest [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003,32:607-612.
- [10] 叶东靖,高 强,何文天,等.施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):552-558.
- [11] 淮贺举,张海林,蔡万涛,等.不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2651-2656.
- [12] 于红梅,王志刚,葛建军,等.适量施肥提高土壤残留硝态氮利用率及菠菜产量[J].农业工程学报,2014,30(16):121-128.
- [13] 孙志梅,王艳群,刘 杨,等.不同产量水平的玉米田土壤无机氮时空分布与环境效应分析[J].水土保持学报,2010,24(4):162-166,181.
- [14] 郭军玲,王永亮,郭彩霞,等.春玉米区域专用肥研制及其应用效果[J].中国农学通报,2014,20(21):183-188.
- [15] 李 彬,妥德宝,程满金,等.水肥一体化条件下内蒙古优势作物水肥利用效率及产量分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):216-222.
- [16] 戴明宏,陶红斌,王利纳,等.华北平原春玉米季土壤硝态氮动态及氮素矿化的特征[J].水土保持学报,2008,22(3):76-81.