

基于高光谱遥感的棉花叶片叶绿素含量估算

王烁¹ 常庆瑞^{1*} 刘梦云¹ 严林¹ 李媛媛¹ 刘秀英^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 河南科技大学 农学院, 河南 洛阳 471003)

摘要 为提高高光谱植被指数对棉花叶绿素含量的估算精度,以陕西省关中地区棉花花期叶片高光谱反射率为数据源,分析了13种植被指数与棉花叶片叶绿素相对含量(SPAD)的相关关系;同时采用降精细采样法,详细分析400~2 000 nm波段范围内原始光谱反射率的任意两两波段组合而成的优化光谱指数RSI与SPAD值的定量关系,构建线性及非线性回归监测模型,并对模型进行验证。结果表明:1)所提取的13种植被指数中NIR/NIR与SPAD值的相关系数最大($r=0.914$),并且基于NIR/NIR(R_{780}/R_{740})构建的回归方程模型优于其他植被指数,其构建的二次曲线方程回归模型建模与验模 R^2 分别为0.900和0.785, RMSE为4.762, RE为7.86%,为基于提取的12种植被指数构建SPAD值估算模型中最佳模型;2)优化后的比值光谱指数RSI(Ration spectral index)的敏感波段为500和563 nm,RSI(500,563)与SPAD值的相关系数 $r=0.999$,与棉花叶片SPAD含量在0.01水平下呈显著相关,其构建的二次曲线方程模型效果最优,建模和验模 R^2 分别为0.912和1.000, RMSE为2.848, RE为4.38%。与提取的13种植被指数相比,基于RSI指数二次曲线回归模型为估算叶绿素含量的最佳模型,并且模型预测值和实测值之间的符合度较高 $R^2=0.843$,表明基于波段优化算法的优化光谱指数RSI能更好的预测棉花叶片叶绿素含量。

关键词 棉花;叶绿素;光谱指数;优化算法

中图分类号 TP722.4; TP722.5

文章编号 1007-4333(2017)04-0016-12

文献标志码 A

Estimation on chlorophyll content of cotton based on optimized spectral index

WANG Shuo¹, CHANG Qingrui^{1*}, LIU Mengyun¹, YAN Lin¹, LI Yuanyuan¹, LIU Xiuying^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Agronomy College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract In order to improve the estimation accuracy of cotton chlorophyll content based on hyperspectral vegetation index, the spectral reflectance of cotton leaves in blooming stage in Guanzhong region was applied to analyze the relationship between 12 extracted vegetation index and chlorophyll content of cotton leaves. By using fine sampling method, a systematic analysis was undertaken on the quantitative relationship between chlorophyll content of cotton leaves and major hyper spectral index RSI (Ration spectral index), which was composed of any two wavebands with original reflectance within the full spectral range of 400 - 2 000 nm. The results showed that: 1) The correlation coefficient between SPAD value and NIR/NIR was 0.914, which is highest among the twelve extracted vegetation index. And the regression equation model based on NIR/NIR was better than model based other extracted vegetation index. The conic regression model was the best of all SPAD estimation models. The determination coefficients of training model and test model were 0.900 and 0.785, respectively, RMSE was 4.762, and RE was 7.86%; 2) The optimized ratio of spectral index RSI of the sensitive wavelengths were 500 and 563 nm, respectively. The correlation coefficient between RSI (500,563) and SPAD value was 0.999, and SPAD value of cotton leaves under the 0.01 level was

收稿日期: 2016-04-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102401-2)

第一作者: 王烁, 硕士研究生, E-mail: wangshuo0304@126.com

通讯作者: 常庆瑞, 教授, 主要从事土地资源与空间信息技术研究, E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

significantly correlated. The conic regression model was the best of all SPAD estimation models. Its determination coefficients of training model and test model were 0.912 and 1 respectively, RMSE was 2.848, and RE was 4.38%. In conclusion, the extracted twelve vegetation index model based on quadratic equation had high degree of coincidence between the estimated and measured values. The analyses above further proved that the optimized spectral index RSI based on the wave bands combination could better predict the chlorophyll content of cotton leaves.

Keywords cotton; chlorophyll content; spectral index; optimized algorithm

在植物成长过程中叶绿素含量是反应植被生长阶段以及营养状况的重要生化参数^[1]。从20世纪末高光谱遥感就进入了农业领域^[2]，其中应用尤为广泛的是高光谱植被指数；Broge等^[3]对于估算农作物冠层叶绿素含量的探索指出基于调整型土壤调节指数MCARI的模型更精确；祁亚琴等^[4]用归一化植被指数和比值植被指数估算棉花生物量，表明基于比值植被指数建立的幂函数模型为估算棉花生物量的最佳模型；姚付启等^[5]选取10个常见的光谱指数对比分析，认为拟合冬小麦LAI效果较好的是比值植被指数；姚霞等^[6]使用新建比值植被指数估算了小麦叶片和冠层氮素含量，指出由提取的敏感波段(990 nm, 720 nm)新建的比值植被指数反演小麦叶片氮素含量较精确；杨杰等^[7]研究波段350~2500 nm的光谱采取随机两两组建的形式建立多个比值与归一化光谱指数，认为由特征波段(728 nm, 709 nm)构建的比值植被指数可精确估算水稻上部叶片叶绿素含量。

目前，我国遥感监测在棉花叶绿素方面的探索仍然存有短板：一是针对关中地区的棉花遥感监测研究少见报道；二是常用的高光谱植被指数均在特定波长下计算的，没有考虑到波段选择对植被指数计算造成的影响。本研究以陕西关中地区很少开展高光谱遥感监测的经济作物棉花为对象，分析各种植被指数与棉花叶片叶绿素含量之间的关系，构建叶绿素含量的估算模型；并采用降精细采样法，详细分析400~2000 nm原始光谱反射率的任意两两波段组建成的优化光谱指数RSI与棉花叶片SPAD值的定量关系，构建叶绿素含量的估算模型，旨在选取最优叶绿素含量估算模型，为无损估测棉花叶绿素含量以及对棉花进行大规模的生长状况监测提供理论依据和方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设置在陕西省咸阳市乾县齐南村，地处

关中平原与渭北旱塬的过度地带，地貌类型为波状台塬，地理坐标108°08'25" E, 34°26'30" N；海拔1047 m；气候温和，属暖温带大陆性季风气候，多年平均气温13.1℃，无霜期为224 d，年均降雨量573~590 mm；土壤类型主要为黄壤土和红黑油土，结构疏松，保水保肥；该区是典型的早耕农业区。农作物的耕作方式为一年一熟或两年三熟轮换，主要为小麦、玉米及油菜等。

1.2 试验设计及样品采集

供试品种使用鲁棉研28号，试验划分48个小区，每个小区大小设为200 m²，设置5个氮肥水平，分别为N0(不施氮)、N1(37.5 kg/hm²(纯氮))、N2(75 kg/hm²(纯氮))、N3(112.5 kg/hm²(纯氮))、N4(150 kg/hm²(纯氮))，每个水平设置3个重复，随机排列，播种前将氮肥以碳铵一次性施入。田间生产管理方式按照当地棉花生产管理方式进行，棉花种植方式为地膜覆盖垄种，行距为70 cm，待棉花出苗20 d后定株距为60 cm。

采样时，在棉花生长的关键生育期每个小区选择8株具有典型性的棉花作为样本，每个小区2个样本，每个样本点依次采集植株倒1叶、倒2叶、倒3叶及倒4叶，并快速用保鲜袋封存，运回实验室对鲜叶片光谱反射率和叶绿素SPAD值同步测量。取4片叶子的平均值作为一个样本数据，共得到96组样本数据，将这些样本数据随机抽取70组数据用于建模，26组数据用于验证。由于棉花花铃期处于营养生长和生殖生长关键时刻，对提高棉花品质和产量起着决定性的作用，所以本研究选取棉花花铃期(2015年8月22日)采集叶片的数据作为研究数据。

1.3 光谱测量及叶绿素测量

叶片光谱的测定使用美国SVCHR 1024i便携式高光谱仪，探测350~2500 nm，其中350~1000 nm(波段间隔1.4 nm)光谱分辨率为3.5 nm，1000~1850 nm(波段间隔3.8 nm)光谱分辨率为9.6 nm，1850~2500 nm(波段间隔2.4 nm)光谱分辨率为6.5 nm。使用内嵌光源手握式光谱探测仪直接测

量叶片,光源为内置卤钨灯。光谱测量之前,均需使用漫反射参考板校正仪器。测定时逐个叶片样本重复测6条曲线,最后将其均值作为此样点的光谱反射值。

多数研究指出 SPAD-502 叶绿素含量测定仪获取的 SPAD 值能较精确的拟合叶绿素含量值,能够代替叶绿素含量值^[8-11]。本试验选用 SPAD-502 叶绿素仪读取值作为叶绿素含量值,选取与测定叶片光谱对应部位处测定 SPAD 值,所有样点反复测定 10 次,以其平均值替代此样点处的叶绿素含量值。

1.4 植被指数的计算

选用波长反射率和相应的生化参数直接进行线

性度分析与估算是全面的,必要对原始波长反射率数据进行整合并构建植被指数^[13]。植被指数是按加、减、乘、除等线性或非线性组建形式解析计算多种光谱遥感数据,从而形成的一些数值在植被长势、生物量等方面有重要的指示意义^[13]。因此本研究选取前辈归纳出来的对叶绿素含量响应敏感的波段构成的 13 种植被指数进行分析建模,具体计算公式见表 1。为了进一步体现高光谱的优势,本试验采用一种较有普适性与解释性的比值光谱指数 RSI,计算从原始光谱波段 400~2 000 nm 所有可能两两组建的比值光谱指数 RSI 拟合棉花叶片叶绿素含量。

表 1 本研究中使用的光谱植被指数

Table 1 Hyperspectral index used in this study

植被指数 Vegetation index	计算公式 Formula	出处 Reference
NIR/NIR	R_{780}/R_{740}	[14]
RVI	R_{780}/R_{670}	[15]
RVI2	R_{787}/R_{765}	[16]
VLOPT2	R_{760}/R_{730}	[17]
ZTM	R_{750}/R_{710}	[18]
G-M	$(R_{750}/R_{550})-1$	[19]
R-M	$(R_{750}/R_{720})-1$	[19]
CARI	$(R_{700}-R_{670})-0.2\times(R_{700}+R_{550})$	[20]
REIP	$700+40\times[(R_{670}+R_{780})/2-R_{700}]/(R_{740}-R_{700})$	[21]
TCARI	$3\times[(R_{700}-R_{670})-0.2\times(R_{700}-R_{550})](R_{700}/R_{670})$	[22]
MCARI	$[(R_{700}-R_{670})-0.2\times(R_{700}-R_{550})](R_{700}/R_{670})$	[23]
TVI	$0.5\times[120\times(R_{750}-R_{550})-200\times(R_{670}-R_{550})]$	[2]
MTVI2	$1.5\times[1.2\times(R_{800}-R_{550})-2.5\times(R_{670}-R_{550})]/[(2\times R_{800}+1)2-(6\times R_{800}-5\times R_{670}-0.5)]$	[22]

1.5 数据分析

试验数据均用 SVC HR-1024i PC、EXCEL 2007 和 Matlab 7.0 进行计算分析。建立不同植被指数对棉花叶片叶绿素数据的线性和非线性回归估算模型(二次方程、指数方程和幂函数方程)。建模结果验证选取相关系数 R 、均方根差 RMSE 和相对误差 RE 作为指标,并将模型估算值与实测值进行回归拟合。式(1)、(2)分别是均方根差和相对误差的计算公式。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: y_i 是观察值, \hat{y}_i 是估算值, n 代表样本数量。

2 结果与分析

2.1 棉花叶片原始反射光谱特征及其与 SPAD 值的相关性

图 1 为波段 400~2 000 nm 区间内花铃期棉

花叶片原始光谱曲线图。从图中可见叶绿素强接收带的蓝、红光区和水接收的近红外区原始光谱反射曲线的差别比较集中。蓝光和红光区间是叶绿素猛烈吸收的波段，吸收低谷在绿光区间，构成

一个反射峰。在 550、760 和 1 610 nm 左右有明显的反射峰，均达到极显著相关，在 650、1 430 和 1 920 nm 左右吸收较猛烈，反射率很小，形成反射谷。

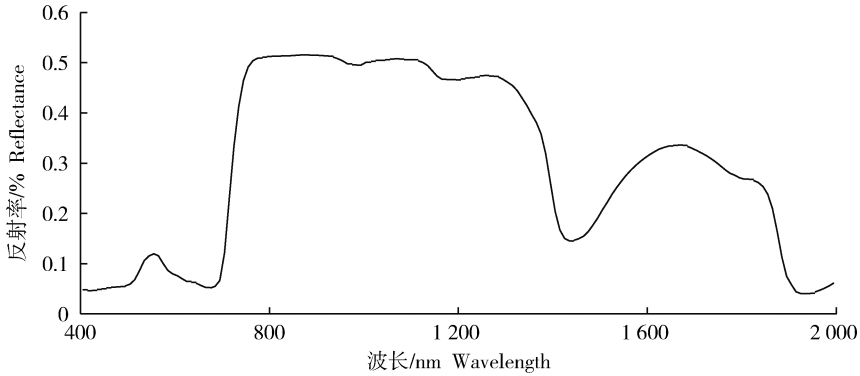
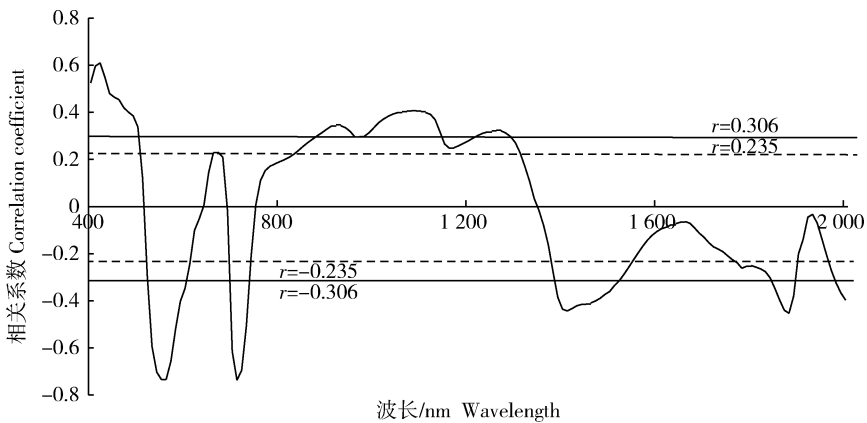


图 1 棉花叶片原始光谱反射曲线

Fig. 1 Spectral raw reflectance of cotton leaf

进一步研究棉花叶片 SPAD 值与叶片原始光谱之间的相关关系(图 2)，发现棉花叶片 SPAD 值与原始光谱位于可见光 530~650 和 710~770 nm 波段区域里为负相关，且相关系数均存在峰值， $r >$

0.73；而在 400~540、610~680 和 750~1 380 nm 波段为正相关；在波段 400~470 nm 达到 $P < 0.01$ ($r_{0.01} = 0.306$) 极显著相关；890~960 nm、960~1 140 nm 内达到 $P < 0.05$ ($r_{0.05} = 0.235$) 显著相关。



---表示 $P \leq 0.05$ 显著相关($r = \pm 0.235$)水平线，—表示 $P \leq 0.01$ 极显著相关($r = \pm 0.306$)水平线，下同。

--- represents significance ($P \leq 0.05$) and $r = \pm 0.235$; — represent Significance ($P \leq 0.01$) and $r = \pm 0.306$. The same below.

图 2 棉花叶片原始光谱反射曲线及其与 SPAD 值的相关性

Fig. 2 Curve of spectral reflectance and relationship of chlorophyll content of cotton leaf with raw reflectance

2.2 光谱指数与棉花叶片 SPAD 值相关性

根据提取的 13 种植被指数计算与棉花 SPAD 值的相关系数见表 2。从表 2 可知：除了植被指数 RVI 与棉花叶片 SPAD 值相关性较弱外，其余的 12 种植被指数与 SPAD 值的相关性均表现 0.01 水平上为极显著相关，其中 NIR/NIR、VLOPT2、G-M、R-M、REIP、TCARI、ZTM 指数与 SPAD 值均呈正

相关，相关系数均高于 0.8，且相关性依次递减；CARI、MTVI2、MCARI、TCAR 指数与 SPAD 值全为负相关，且趋向相关依次增强；其中植被指数 NIR/NIR 与 SPAD 值的相关系数最大， $r = 0.914$ 。为了进一步精确的估算棉花叶片 SPAD 值，选取了以上相关性较好的 12 种植被指数分别与 SPAD 值构建线性与非线性估算模型。

表2 植被指数与叶绿素含量的相关系数($n=70$)Table 2 Correlation coefficient between vegetation index and chlorophyll content ($n=70$)

指标 Index	植被指数 Vegetation index						
	NIR/NIR	RVI	RVI2	VLOPT2	ZTM	G-M	R-M
相关系数 Correlation coefficient	0.938**	-0.049	0.439**	0.914**	0.855**	0.882**	0.876**

指标 Index	植被指数 Vegetation index					
	CARI	REIP	TCARI	MCARI	TVI	MTVI2
相关系数 Correlation coefficient	-0.750**	0.864**	-0.864**	-0.811**	-0.398**	-0.773**

注: ** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; 样本 $n=70$ 。

Note: ** Indicates significant correlation at $P < 0.01$ level(double side); * Indicates significant correlation at 0.05 level (double side). Sample number $n=70$.

表3为各植被指数与棉花叶片 SPAD 值建立的回归模型,如表中显示,所有模型的回归显著性概率均小于 0.01,表明拟合的回归模型方程均达到极显著,全数回归方程中选用的植被指数都涵盖用于估算 SPAD 值的有效信息。其中植被指数 NIR/NIR、VLOPT2 与棉花叶片 SPAD 值构建模型的决定系数在 0.814~0.900,模型拟合的精度相对最好;植被指数 G-M、R-M、TCARI、REIP、ZTM、

MCARI、MTVI2 与 SPAD 值构建模型的决定系数在 0.582~0.818,模型间拟合精度差异较大,虽然植被指数 REIP 的二次曲线方程建模系数 $R^2 = 0.818$,但其构建的指数方程模型 $RMSE = 13.286$ 最大;植被指数 RVI2、TVI 与 SPAD 值构建模型的决定系数在 0.141~0.261,模型拟合结果最差。总体上看,基于植被指数 NIR/NIR 构建的一元线性和二次曲线方程模型相较于其他模型效果更好。

表3 12种植物指数与 SPAD 值的回归模型($n=70$)Table 3 Regression models of the twelve vegetation indexes and chlorophyll content ($n=70$)

植被指数 Vegetation index	模型类型 Model type	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE
NIR/NIR	一元线性 Linear	$y = 268.41x - 245.8$	0.880	2.684
	二次曲线 Polynomial	$y = -2102.6x^2 + 4916.3x - 2812.9$	0.900	2.450
	指数 Exponential	$y = 0.1248e^{5.4268x}$	0.866	2.876
	幂函数 Power	$y = 27.601x^{6.0054}$	0.869	2.841
RVI2	一元线性 Linear	$y = 623.97x - 580.23$	0.193	6.962
	二次曲线 Polynomial	$y = -31692x^2 + 64973x - 33243$	0.261	6.664
	指数 Exponential	$y = 0.0001e^{12.979x}$	0.201	7.763
	幂函数 Power	$y = 43.285x^{13.223}$	0.202	7.069
VLOPT2	一元线性 Linear	$y = 119.19x - 96.402$	0.835	3.151
	二次曲线 Polynomial	$y = -144.69x^2 + 476.47x - 316.45$	0.837	3.129
	指数 Exponential	$y = 2.5927e^{2.3993x}$	0.814	3.227
	幂函数 Power	$y = 26.958x^{2.961}$	0.816	3.193

表3(续)

植被指数 Vegetation index	模型类型 Model type	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE
ZTM	一元线性 Linear	$y=20.238x+5.2541$	0.730	4.024
	二次曲线 Polynomial	$y=1.8345x^2+11.993x+14.32$	0.731	4.020
	指数 Exponential	$y=20.112e^{0.40634x}$	0.709	4.040
	幂函数 Power	$y=24.527x^{0.89449}$	0.701	4.031
G-M	一元线性 Linear	$y=11.39x+13.334$	0.778	3.649
	二次曲线 Polynomial	$y=-5.5264x^2+48.079x-45.526$	0.809	3.389
	指数 Exponential	$y=23.517e^{0.23048x}$	0.767	3.797
	幂函数 Power	$y=20.599x^{0.75896}$	0.783	3.623
R-M	一元线性 Linear	$y=51.598x+24.757$	0.768	3.732
	二次曲线 Polynomial	$y=-2.9453x^2+54.569x+24.06$	0.768	3.732
	指数 Exponential	$y=29.749e^{1.0362x}$	0.746	3.770
	幂函数 Power	$y=71.485x^{0.49175}$	0.726	3.788
CARI	一元线性 Linear	$y=-438.12x+59.201$	0.562	5.126
	二次曲线 Polynomial	$y=13.406x^2-1.0871x+64.529$	0.684	4.353
	指数 Exponential	$y=59.365e^{-8.7609x}$	0.542	4.959
	幂函数 Power	$y=27.948x^{-0.13742}$	0.559	5.299
REIP	一元线性 Linear	$y=3.5919x-2.531.4$	0.747	3.896
	二次曲线 Polynomial	$y=0.64758x^2-926.93x+331.738.971.9$	0.818	3.409
	指数 Exponential	$y=1E-21e^{0.07231x}$	0.729	13.286
	幂函数 Power	$y=2E-147x^{51.934}$	0.729	6.062
TCARI	一元线性 Linear	$y=-125.89x+75.511$	0.746	3.904
	二次曲线 Polynomial	$y=428.22x^2-298.45x+91.685$	0.758	3.809
	指数 Exponential	$y=82.503e^{-2.5322x}$	0.727	3.857
	幂函数 Power	$y=22.162x^{-0.49076}$	0.731	3.920
MCARI	一元线性 Linear	$y=-86.854x+64.563$	0.658	4.530
	二次曲线 Polynomial	$y=521.22x^2-275.82x+78.838$	0.768	3.732
	指数 Exponential	$y=66.165e^{-1.744x}$	0.639	4.352
	幂函数 Power	$y=28.575x^{-0.29019}$	0.698	4.098
TVI	一元线性 Linear	$y=-2.1203x+111.51$	0.158	7.110
	二次曲线 Polynomial	$y=-0.25019x^2+12.174x-92.111$	0.170	7.057
	指数 Exponential	$y=164.2e^{-0.04141x}$	0.145	7.150
	幂函数 Power	$y=2.459.9x^{-1.1609}$	0.141	7.174
MTVI2	一元线性 Linear	$y=-291.69x+207.42$	0.597	4.919
	二次曲线 Polynomial	$y=-448.24x^2+191.27x+77.522$	0.597	4.916
	指数 Exponential	$y=1.176e^{-5.8739x}$	0.583	4.954
	幂函数 Power	$y=7.0277x^{-3.1578}$	0.582	4.971

利用 26 组检验样本数据集对基于上述不同植被指数建立的估算模型预测精度进行检验,其中 R_p^2 表示

验证模型决定系数, $RMSE_p$ 表示验证均方根误差, RE_p 表示验证相对误差,各模型检验结果如表 4 所示。

表 4 棉花叶片 SPAD 值估算模型精度检验 ($n=26$)

Table 4 Performance analysis of the cotton leaf SPAD values estimation models ($n=26$)

光谱参数 Spectral index	模型类型 Model type	回归方程 Regression equation	验证系数 R_p^2	均方根误差 $RMSE_p$	相对误差/% RE_p
NIR/ NIR	一元线性 Linear	$y=268.41x-245.8$	0.775	4.958	8.00
	二次曲线 Polynomial	$y=-2102.6x^2+4916.3x-2812.9$	0.785	4.762	7.86
	指数 Exponential	$y=0.1248e^{5.4268x}$	0.765	5.176	8.39
	幂函数 Power	$y=27.601x^{6.0054}$	0.766	5.151	8.36
RVI2	一元线性 Linear	$y=623.97x-580.23$	0.174	7.018	11.99
	二次曲线 Polynomial	$y=-31692x^2+64973x-33243$	0.461	6.768	11.35
	指数 Exponential	$y=0.0001e^{12.979x}$	0.178	7.464	12.62
	幂函数 Power	$y=43.285x^{13.223}$	0.181	7.443	12.57
VLOPT2	一元线性 Linear	$y=119.19x-96.402$	0.675	5.767	9.47
	二次曲线 Polynomial	$y=-144.69x^2+476.47x-316.45$	0.678	5.801	9.64
	指数 Exponential	$y=2.5927e^{2.3993x}$	0.664	5.879	9.67
	幂函数 Power	$y=26.958x^{2.961}$	0.663	5.870	9.68
ZTM	一元线性 Linear	$y=20.238x+5.2541$	0.541	6.326	10.31
	二次曲线 Polynomial	$y=1.8345x^2+11.993x+14.32$	0.553	6.305	10.23
	指数 Exponential	$y=20.112e^{0.40634x}$	0.533	6.435	10.50
	幂函数 Power	$y=24.527x^{0.89449}$	0.518	6.434	10.59
G-M	一元线性 Linear	$y=11.39x+13.334$	0.279	7.498	11.48
	二次曲线 Polynomial	$y=-5.5264x^2+48.079x-45.526$	0.412	9.517	17.73
	指数 Exponential	$y=23.517e^{0.23048x}$	0.276	7.362	11.27
	幂函数 Power	$y=20.599x^{0.75896}$	0.195	7.843	12.12
R-M	一元线性 Linear	$y=51.598x+24.757$	0.641	5.803	9.61
	二次曲线 Polynomial	$y=-2.9453x^2+54.569x+24.06$	0.642	5.802	9.62
	指数 Exponential	$y=29.749e^{1.0362x}$	0.631	5.958	9.83
	幂函数 Power	$y=71.485x^{0.49175}$	0.619	5.901	9.99
CARI	一元线性 Linear	$y=-438.12x+59.201$	0.613	5.966	10.60
	二次曲线 Polynomial	$y=13406x^2-1087.1x+64.529$	0.614	6.479	10.41
	指数 Exponential	$y=59.365e^{-8.7609x}$	0.611	6.103	10.74
	幂函数 Power	$y=27.948x^{-0.13742}$	0.551	6.577	10.85
REIP	一元线性 Linear	$y=3.5919x-2531.4$	0.465	7.075	11.67
	二次曲线 Polynomial	$y=0.64758x^2-926.93x+331738.9719$	0.666	5.850	9.36
	指数 Exponential	$y=1E-21e^{0.07231x}$	0.461	29.196	46.99
	幂函数 Power	$y=2E-147x^{51.934}$	0.460	10.137	21.43

表4(续)

光谱参数 Spectral index	模型类型 Model type	回归方程 Regression equation	验证系数 R_p^2	均方根误差 $RMSE_p$	相对误差/% RE_p
TCARI	一元线性 Linear	$y = -125.89x + 75.511$	0.616	6.102	10.19
	二次曲线 Polynomial	$y = 428.22x^2 - 298.45x + 91.685$	0.628	6.282	9.95
	指数 Exponential	$y = 82.503e^{-2.5322x}$	0.614	6.269	10.41
	幂函数 Power	$y = 22.162x^{-0.49076}$	0.585	6.467	10.43
MCARI	一元线性 Linear	$y = -86.854x + 64.563$	0.657	5.786	10.38
	二次曲线 Polynomial	$y = 521.22x^2 - 275.82x + 78.838$	0.663	6.285	9.75
	指数 Exponential	$y = 66.165e^{-1.744x}$	0.658	5.839	10.33
	幂函数 Power	$y = 28.575x^{-0.29019}$	0.640	6.119	10.27
TVI	一元线性 Linear	$y = -2.1203x + 111.51$	0.128	7.615	10.28
	二次曲线 Polynomial	$y = -0.25019x^2 + 12.174x - 92.111$	0.180	7.642	7.47
	指数 Exponential	$y = 164.2e^{-0.04141x}$	0.130	8.009	11.26
	幂函数 Power	$y = 2459.9x^{-1.1609}$	0.116	8.336	12.64
MTVI2	一元线性 Linear	$y = -291.69x + 207.42$	0.442	6.214	15.43
	二次曲线 Polynomial	$y = -448.24x^2 + 191.27x + 77.522$	0.723	5.655	14.36
	指数 Exponential	$y = 1176e^{-5.8739x}$	0.444	7.695	18.23
	幂函数 Power	$y = 7.0277x^{-3.1578}$	0.414	8.465	19.66

通过比较发现,植被指数 RVI2、G-M、REIP、TVI、MTVI2 与棉花叶片 SPAD 值的估算模型中二次曲线方程模型、指数方程模型的精度略优于一元线性方程模型和幂方程模型,二次曲线方程模型的精度检验结果最优,由其得到的验模系数 R_p^2 在 0.180~0.723, $RMSE_p$ 在 5.655~9.517, RE_p 在 7.47%~17.73%。植被指数 NIR/NIR、VLOPT2、ZTM、R-M、CARI、TCARI、MCARI 与棉花叶片 SPAD 值估算模型中一元线性方程模型、二次曲线模型的精度均高于指数方程模型和幂方程模型,其中植被指数 TCARI、MCARI 与棉花叶片 SPAD 值构建的二次曲线方程模型验模系数 R_p^2 虽然高于一元线性方程模型,但 $RMSE_p$ 也较大;植被指数 VLOPT2 与棉花叶片 SPAD 值构建的二次曲线方程模型验模系数 R_p^2 也高于一元线性方程模型,但 $RMSE_p$ 和 RE_p 均较大;其余 9 种植被指数与棉花叶片 SPAD 值构建的二次曲线方程验模系数 R_p^2 高于一元线性方程模型, $RMSE_p$ 和 RE_p 均较低,说明一元线性方程模型并不稳定,二次曲线方程模型比较稳定可靠。尤其是基于植被指数 NIR/NIR 构建的二次曲线模型验模系数 R_p^2 最大为 0.785,

$RMSE_p$ 和 RE_p 最小,分别为 4.762%和 7.86%。

综合分析模型建立和检验的 R^2 、RMSE 和 RE 值,筛选出了基于植被指数建立的回归模型中拟合精度和预测精度综合最优的模型见表 5。通过比较这 8 个模型可以发现,基于植被指数 NIR/NIR 构建的二次曲线方程模型建模和验模决定系数 R^2 均最大,验模均方根误差 $RMSE_p$ 和验模相对误差 RE_p 均最小,为棉花叶片 SPAD 值的最佳估算模型,其实测值与估算值的 1:1 图如图 3。

2.3 光谱指数计算及其与棉花叶片 SPAD 值的相关性

为了更充分发挥高光谱遥感数据的优势,将降采样法和精细采样法进行组合,构建降精细采样法,进而满足数据的快速剖析和敏感波段获取^[6]。首先,采取降采样法建立拟合棉花叶片 SPAD 值的比值光谱指数 RSI,即在 400~2 000 nm 区间里相隔 10 个波段获取光谱反射率数据(波段间隔 = 10 nm),用矩阵的方式,读取两两组合的全部存在波段创建的植被指数与棉花叶片 SPAD 值拟合线性方程,提取对应的决定系数,绘制决定系数 R^2 浓度等高线图(图 4,颜色从蓝色到红色代表决定系数

表5 棉花叶片 SPAD 与植被指数最佳估算模型

Table 5 Best estimation model of cotton leaf SPAD and vegetation index

植被指数 Vegetation index	模型类型 Model type	回归方程 Regression equation
NIR/NIR	一元线性 Linear	$y = 268.41x - 245.8$
	二次曲线 Polynomial	$y = -2102.6x^2 + 4916.3x - 2812.9$
	指数 Exponential	$y = 0.1248e^{5.4268x}$
	幂函数 Power	$y = 27.601x^{6.0054}$
VLOPT2	一元线性 Linear	$y = 119.19x - 96.402$
	二次曲线 Polynomial	$y = -144.69x^2 + 476.47x - 316.45$
	指数 Exponential	$y = 2.5927e^{2.3993x}$
	幂函数 Power	$y = 26.958x^{2.961}$

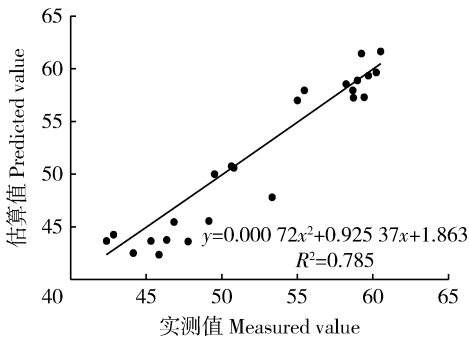


图3 基于指数 NIR/NIR 的二次曲线方程模型 SPAD 实测值与估算值 1 : 1 图

Fig. 3 The figure 1 : 1 between measured and estimated leaf SPAD based on NIR/NIR polynomial model

由小到大,相同色彩浓度越深说明决定系数越大), 选取决定系数最大的波段区间^[6]。随即,使用精细采样法,获取每个波段(波段间隔=1 nm)的光谱反射率数据,两两结合建立全部存在的比值光谱指数 RSI^[6],与棉花叶片 SPAD 值含量构建线性方程,参看决定系数 R^2 和相对误差 RE 及光谱学原理,确定响应敏感波段和对应的植被指数。图 4 表明,基于比值光谱指数 RSI 在波段 420~510 nm 和 530~690 nm 最强,其余波段相关性较弱。然后,采用精细采样法,两两结合建立全部存在的比值光谱指数,与棉花叶片 SPAD 值构建方程,通过计算得出决定系数最高的波段为 500 和 563 nm。

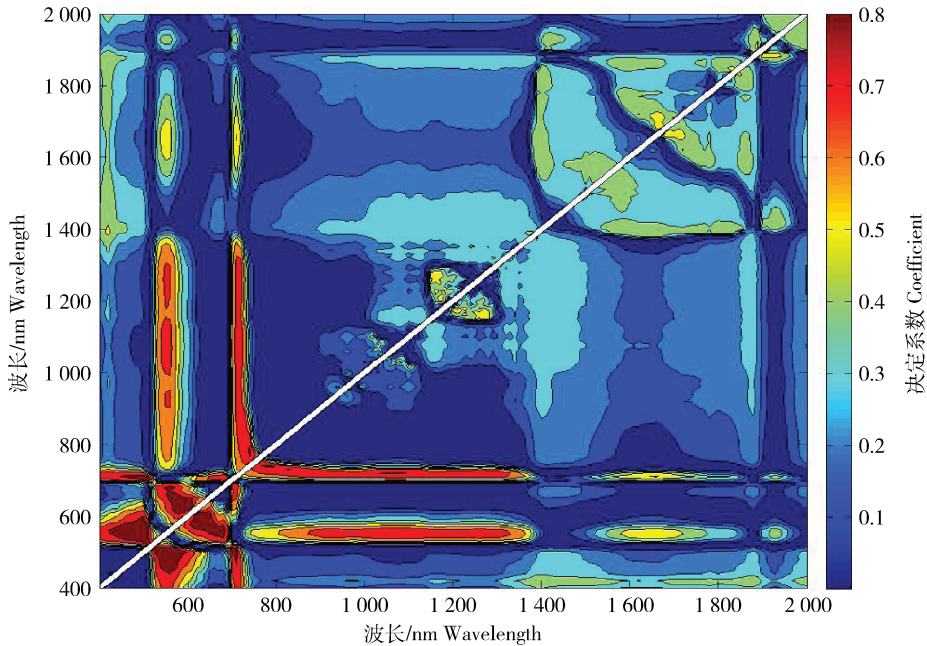


图4 基于 RSI(500、563 nm)和棉花叶片叶绿素含量的决定系数等高线图

Fig. 4 Contour map of the linear relationship of determination coefficient based on RSI (500, 563) and chlorophyll content of cotton leaf

计算优化光谱指数 RSI(500,563 nm)和棉花叶片 SPAD 值的相关系数 $r=0.999$ ，表 6 是基于优化指数 RSI 构建的估算 SPAD 值的线性和非线性回归模型。通过表 6 精度指标比较可知，拟合的回归模型方程均达到了极显著相关，其中指数方程模型和幂方程模型拟合各项指标相对差一些，一元线性方程模型和二次曲线方程模型拟合 R^2 和验模 R_p^2 差别不大，依次为 0.911、0.912 和 0.999、1.000，但

二次曲线方程模型 $RMSE_p$ 和 SE_p 都低于一元线性方程模型，因此，估算棉花叶片 SPAD 值的最佳模型为二次曲线模型 $y = -67.892x^2 + 159.22x - 14.758$ 。这说明拟合曲线方法影响了决定系数，同时波段的选择也是光谱指数计算过程中的重要影响因素。基于二次曲线模型的实测值和预测值的 1:1 关系图。图 5 表明，估算值和实测值之间的预估精度为 0.843，表现呈完全显著性正相关。

表 6 高光谱估算叶绿素含量模型的精度检验结果

Table 6 Result of precision test of the hyperspectral models for chlorophyll content estimation

自变量 Independent variable	模型类型 Mode type	回归方程 Regression equation	拟合 R^2	预测 R_p^2	$RMSE_p$	RE_p
RSI	一元线性 Linear	$y=87.298x+3.8041$	0.911	0.999	2.854	0.044
	二次曲线 Polynomial	$y=-67.892x^2+159.22x-14.758$	0.912	1.000	2.848	0.044
	指数 Exponential	$y=19.35e^{1.7707x}$	0.902	0.971	2.854	0.044
	幂函数 Power	$y=90.23x^{0.92797}$	0.906	0.986	2.917	0.046

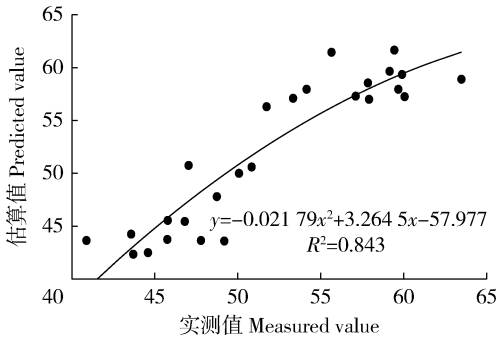


图 5 基于优化指数 RSI 的二次曲线方程模型 SPAD 实测值与预估值 1:1 图

Fig. 5 The 1:1 figure between measured and estimated SPAD based on RSI conic equation model

3 讨论

作物的理化参数是定量阐述地域或全球领域里物质循环和能量传递流程模型的关键指标^[6]。SPAD 值反映了叶片中叶绿素的总含量，表征作物叶片、冠层的养分和长势状况，它和叶片反射光谱之间存在较强的相关关系^[2]。选取特征波段构建光谱指数在不同程度上抵消了由环境变化而引起的噪声，可以用来定量反演作物的理化参数。

选取的光谱植被指数数量较少，对叶绿素敏感的光谱植被指数数量更少^[24]。本研究选取了 13 个植被指数用于棉花叶片 SPAD 值的预测模型建立，最终发现植被指数 NIR/NIR (R_{780}/R_{740}) 与 SPAD 值相关性最高 ($r=0.914$)。有研究认为基于 NIR/NIR (R_{780}/R_{740}) 估算作物叶片 SPAD 的效果要优于其他传统的植被指数^[25]，与本研究结果一致。同时结合降采样法和精细采样法，构成独特的减量精细采样法，于 Matlab 环境中使用矩阵的方式剖析获取新的特征波段(500、563 nm)，构建的优化光谱指数 RSI (500、563)相关性达到最大 ($r=0.999$)，其相关性明显强于 NIR/NIR；植被指数 NIR/NIR 应用的波段为近红外波段的 740 和 780 nm，优化光谱指数 RSI 提取的敏感波段为绿波段 500 和 563 nm，这是由于红波段对较高叶绿素含量响应不敏感，在叶绿素含量稍高后吸收光谱容易饱和，而在绿波段对叶绿素的吸收则不易饱和^[26]。前人研究中有采用构建新的比值光谱指数 RSI 构建水稻叶绿素估算模型，选用的波段为 (728、709 nm)，相关性为 0.81^[7]；有用来估算棉花冠层叶绿素含量，选用的波段为 (635、643 nm)，相关性为 0.82^[25]；另有研究中采用相同构建的比值光谱指数进行小麦叶片氮素含量估算，选用的波段为 (990、720 nm)，相关性高达 0.81^[5]；

针对多光谱数据的叶绿素遥感估算，以往研究

均没有本研究中的RSI(500、563 nm)相关性($r=0.999$)高,表明波段的选择也是光谱指数计算过程中的重要影响因素。

4 结论

本研究以棉花叶片光谱为基础,分别分析了13种植被指数以及优化光谱指数RSI与SPAD值的相关关系,然后在此基础上选择与SPAD值相关性高的指数构建回归模型方程,并进行对比分析,得到以下结论:

1)在提取的13种植被指数中,除了植被指数RVI与棉花叶片SPAD值相关性较差外,其余的12种植被指数与SPAD值的相关性均在0.01水平上呈极显著相关,其中植被指数NIR/NIR(R_{780}/R_{740})与棉花叶片SPAD值相关性最高 $r=0.914$ 。且基于NIR/NIR(R_{780}/R_{740})构建的二次曲线方程模型是最佳估算模型,其建立模型的 R^2 为0.900,验证模型的 R^2 为0.785, RMSE为4.762, RE为7.86%。

2)优化后的光谱指数RSI(500、563 nm)与棉花叶片SPAD值的相关性为 $r=0.999$,基于RSI构建的线性及非线性模型方程的拟合度均较高,拟合决定系数 R^2 在0.902~0.912,其中拟合的二次曲线方程模型的 R^2 为0.912,验证模型的 R^2 为1, RMSE为2.848, RE为4.38%,且对叶绿素含量与较少数目的样本都具有优良的预测能力,能有效规避样本取值区间等因素对叶绿素含量估算的影响。与提取的13种植被指数相比,是进行棉花叶片SPAD值估算的最佳模型。

棉花叶片叶绿素监测是棉花动态监测的基础数据,实时准确的进行棉花叶绿素含量估算是建立棉花生长监测模型的理论依据。本研究中优化光谱指数RSI选用的高光谱特征波段为500和563 nm,需要指出的是,由于本研究使用数据的局限性,该指数需要更多的实测数据的验证。

参考文献 References

[1] 蒋金豹,陈云浩,黄文江.用高光谱微分指数估测条锈病胁迫下小麦冠层叶绿素密度[J].光谱学与光谱分析,2010,30(8):2243-2247
Jiang J B, Chen Y H, Huang W J. Estimation of canopy chlorophyll density in wheat under the stress of strip rust by hyperspectral differential index[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2243-2247 (in Chinese)

[2] 张晓华,常庆瑞,章曼,刘佳岐.基于高光谱植被指数的西北玉米不同时期叶绿素含量估测[J].中国农业大学学报,2015,20(4):75-81
Zhang X H, Chang Q R, Zhang M, Liu J Q. Hyperspectral vegetation index monitoring of chlorophyll content of different corn growth stage in Northwest China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 75-81 (in Chinese)

[3] 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

[4] 祁亚琴,吕新,陈冠文,林海荣,陈燕,陈剑.基于高光谱植被指数的棉田冠层特征信息估算模型研究[J].棉花学报,2011,23(2):167-171
Qi Y Q, Lv X, Chen G W, Lin H R, Chen Y, Chen J. The estimation model of cotton canopy characteristic information based on hyperspectral vegetation index[J]. *Cotton Science*, 2011, 23(2): 167-171 (in Chinese)

[5] 姚付启,张振华,杨润亚,孙金伟,王海江. ANFIS在植被叶绿素含量高光谱反演中的应用[J].光谱学与光谱分析,2010,30(7):1834-1838
Yao F Q, Zhang Z H, Yang R Y, Sun J W, Wang H J. Application of ANFIS in hyperspectral inversion of vegetation chlorophyll content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(7): 1834-1838 (in Chinese)

[6] 姚霞,朱艳,冯伟,田永超,曹卫星.监测小麦叶片氮积累量的新高光谱特征波段及比值植被指数[J].光谱学与光谱分析,2009,29(8):2191-2195
Yao X, Zhu Y, Feng W, Tian Y C, Cao W X. Monitoring wheat leaf nitrogen accumulation amount of high spectral bands and ratio vegetation index [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(8): 2191-2195 (in Chinese)

[7] 杨杰,田永超,姚霞,曹卫星,张玉森,朱艳.水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型[J].生态学报,2009,29(12):6561-6571
Yang J, Tian Y C, Yao X, Cao W X, Zhang Y S, Zhu Y. Hyperspectral estimation model for chlorophyll concentrations in top leaves of rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6561-6571 (in Chinese)

[8] 艾天成,李方敏,周治安,张敏,吴海森.作物叶片叶绿素含量与SPAD值相关性研究[J].湖北农学院学报,2000,20(1):6-8
Ai T C, Li F M, Zhou Z A, Zhang M, Wu H S. Relationship between chlorophyll meter readings and chlorophyll content of crop leaves[J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2000, 20(1): 6-8 (in Chinese)

[9] 李鹏程,董合林,刘爱忠,王润珍,刘爱珍,李如义.棉花上部叶片叶绿素SPAD值动态变化研究[J].中国农学通报,2012,28(3):121-126
Li P C, Dong H L, Liu A Z, Wang R Z, Liu A Z, Li R Y. A study on dynamic change of chlorophyll SPAD values of upper leaves in main stem of cotton [J]. *Chinese Agricultural of*

- Science Bulletin*, 2012, 28(3): 121-126 (in Chinese)
- [10] 李志宏, 刘宏斌, 张福锁. 应用叶绿素仪诊断冬小麦氮营养状况的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 401-405
Li Z H, Liu H B, Zhang F S. Research of nitrogen nutrition status for winter wheat based on chlorophyll meter[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 401-405 (in Chinese)
- [11] 裴正军, 宋海燕, 何勇, 方慧. 应用 SPAD 和光谱技术研究油菜生长期间的氮素变化规律[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 150-154
Qiu Z J, Song H Y, He Y, Fang H. Variation rules of the nitrogen content of the oilseed rape at growth stage using SPAD and visible-NIR[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(7): 150-154 (in Chinese)
- [12] 王娟, 韩登武, 任岗, 郭金强, 张永帅, 危常州, 宋亚明. SPAD 值与棉花叶绿素和含氮量关系的研究[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(3): 167-170
Wang J, Han D W, Ren G, Guo J Q, Zhang Y S, Wei C Z, Song Y M. A study on relation between SPAD value, chlorophyll and nitrogen content in cotton [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2006, 43(3): 167-170 (in Chinese)
- [13] 刘秀英, 熊建利, 臧卓, 林辉. 基于植被指数的马尾松叶绿素含量估算模型[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 44-47
Liu X Y, Xiong J L, Zang Z, Lin H. Estimation Models for Chlorophyll Content of Pinus massoniana based on vegetable indices[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(3): 44-47
- [14] Mistele B, Schmidhalter U. Tractor-based quadrilateral spectral reflectance measurements to detect biomass and total aerial nitrogen in winter wheat[J]. *Agron Journal*, 2010, 102(2): 499-506
- [15] T Person, H Klein, T Itil. Family and environmental variables as predictors of social outcome in chronic schizophrenia[J]. *Comprehensive Psychiatry*, 1972, 13(4): 317-334
- [16] Fava, A Giovanni. *Incorporating the Insights of Psychotherapy Research in Everyday Practice* [M]. Manhattan, New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2009: 135-136
- [17] Jasper P J, Chen W W, Schoeberl B, Niepel M, Nielsen U B. Input-output behavior of ErbB signaling pathways as revealed by a mass action model trained against dynamic data [J]. *Molecular Systems Biology*, 2009, 5(1): 239
- [18] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, Noland T L, Sampson P H. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7): 1491-1507
- [19] Gitelson A A, Merzlyak M N. Quantitative estimation of chlorophyll a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 1994, 22(3): 247-252
- [20] Kim Y J, Björklund S, Li Y, Sayre M H, Kornberg R D. A multiprotein mediator of transcriptional activation and its interaction with the C-terminal repeat domain of RNA polymerase II[J]. *Cell*, 1994, 77(4): 599-608
- [21] Alain Guyot, S Lim A S. Power consumption in digital circuits [C]. In: Proceedings of 1998 3rd International Conference on ASIC. Beijing: Institute of Microelectronics, Tsinghua University, 1998: 245-249
- [22] D Haboudane, J R Miller, N Tremblay, P J Zarco-Tejada, L Dextraze. 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
- [23] Daughtry C S T, Walthall C T, Kim M S, Colstoun E B D, Liu M M. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239
- [24] 黄青, 周清波, 王利民, 李丹丹. 基于遥感的冬小麦长势等级与气象因子相关性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 301-307
Huang Q, Zhou Q B, Wang L M, Li D D. Relationship between winter wheat growth grades obtained from remote sensing and meteorological factor [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 301-307 (in Chinese)
- [25] 王强, 易秋香, 包安明, 罗毅, 赵金. 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, 15(8): 125-132
Wang Q, Yi Q X, Bao A M, Luo Y, Zhao J. Estimation of cotton canopy chlorophyll density based on the hyperspectral reflectance [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 15(8): 125-132 (in Chinese)
- [26] 夏天, 周勇, 周清波, 吴文斌. 基于高光谱遥感和 HJ-1 卫星的冬小麦 SPAD 反演研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 307-313
Xia T, Zhou Y, Zhou Q B, Wu W B. Monitoring winter wheat SPAD Based on hyperspectral remote sensing and HJ-1 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(3): 307-313 (in Chinese)