

# 基于高光谱和 BP 神经网络的棉花冠层 叶绿素含量联合估算

依尔夏提·阿不来提<sup>1,2</sup>, 白灯莎·买买提艾力<sup>4</sup>, 买买提·沙吾提<sup>1,2,3\*</sup>, 安申群<sup>5</sup>

<sup>1</sup>新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

<sup>2</sup>新疆绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

<sup>3</sup>新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

<sup>4</sup>新疆农业科学院核技术生物技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046;

<sup>5</sup>中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

**摘要** 冠层叶绿素能够有效反映植被的生长状况。为了基于高光谱精确估算冠层的叶绿素含量,以棉花为研究对象,实测棉花冠层光谱反射率和叶绿素含量,然后进行原始光谱数据转换,计算高光谱参数,分析叶绿素含量与高光谱参数之间的相关关系,构建估算棉花冠层叶绿素含量的 BP 神经网络模型。结果表明:包络线去除处理后,冠层反射率和叶绿素含量的相关性在 560~740 nm 波段范围内提高了 10.7%,效果优于原始光谱和一阶微分光谱得到的结果;基于原始光谱和去除包络线光谱建立的植被指数 mSR、mND、NDI、DD 与叶绿素含量表现出较高的相关性,相关系数均在 0.8 左右;在所建的 BP 神经网络模型中,基于包络线光谱指数建立的模型的决定系数为 0.85,均方根误差和相对误差分别为 1.37、1.97%,这一结果优于基于红边参数、原始光谱植被指数和一阶微分光谱指数建立的模型。本研究可为作物叶绿素含量估算的实际应用提供理论依据和技术支持。

**关键词** 光谱学; 棉花; 叶绿素含量; 高光谱; BP 神经网络

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0930003

## Combined Estimation of Chlorophyll Content in Cotton Canopy Based on Hyperspectral Parameters and Back Propagation Neural Network

Ershat Ablet<sup>1,2</sup>, Baidengsha Maimaitiaili<sup>4</sup>, Mamat Sawut<sup>1,2,3\*</sup>, An Shenqun<sup>5</sup>

<sup>1</sup>College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Xinjiang General Institutions of Higher Learning for Smart City and Environment Modeling, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

<sup>4</sup>Institute of Nuclear and Biotechnologies, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

<sup>5</sup>College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract** Chlorophyll content in canopy plays an important role in reflecting the growing status of vegetation. To achieve high accuracy of chlorophyll content estimation based on hyperspectral data, the spectral reflectance and chlorophyll content in cotton canopy are measured from field observation. Original spectral data is transformed to calculate the hyperspectral parameters. The correlation between hyperspectral parameters and chlorophyll content is analyzed and a back propagation (BP) neural network model for estimating chlorophyll content in cotton canopy is established. Results show that after continuum-removal transformation, the correlation between canopy reflectance and chlorophyll content improves by 10.7% in the spectral bands of 560-740 nm, which is better than that of the original spectrum and the first-order differential spectrum. Vegetation indices, such as mSR, mND, NDI, and DD, which are established using the original spectrum and continuum-removal spectrum, show a high correlation with chlorophyll content under both spectral conditions with a correlation coefficient of approximately 0.8. In the BP

收稿日期: 2019-03-12; 修回日期: 2019-04-04; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(41361016,41461051)

\* E-mail: korxat@xju.edu.cn; \*\* E-mail: 13201349501@163.com

neural network model, the model determination coefficient based on continuum spectral indices is 0.85, and the root-mean-square error and relative error are 1.37 and 1.97%, respectively. This result is better than that of the model based on red-edge parameters, original spectral vegetation indices, and first-order differential spectral indices. This study provides important theoretical basis and technical support for practical application of chlorophyll content estimation in crops.

**Key words** spectroscopy; cotton; chlorophyll content; hyperspectral parameters; back propagation neural network  
**OCIS codes** 300.6170; 280.4991; 200.4260

## 1 引 言

叶片所吸收的太阳辐射是色素含量的函数,因此,叶绿素含量能直接决定植物的光合作用潜力和初级生产力<sup>[1]</sup>。近年来,高光谱遥感技术因无损、廉价、高效等特点在作物生理生长参数反演中得到了广泛应用,尤其是在叶片色素含量的精确估算中发挥了至关重要的作用,同时这也为应用高光谱成像技术大尺度动态监测农作物长势及生长状况奠定了机理基础<sup>[2]</sup>。

通过高光谱技术预测叶绿素含量时常用的方法有物理模型和经验模型两类。其中物理模型,例如辐射传输(PROSPECT)模型,根据地表物的地物特性来反演冠层光谱,采用辐射传输等物理模型对其进行解译<sup>[3]</sup>。Sun等<sup>[4]</sup>通过高光谱激光雷达技术结合PROSPECT模型对叶绿素含量进行估算。经验模型是根据不同叶绿素含量的叶片在可见光到近红外波段范围内的光谱反射率进行估算的,常用的方法有以下三种:1)根据各类反射光谱和叶绿素含量的相关性分析选取敏感波段,进而进行估算。2)在原始光谱或各种转换数据的基础上构建植被指数,并将其作为变量建立预测模型。例如,Jin等<sup>[5]</sup>提出了降低叶面积指数和土壤因子影响的优化MERIS(medium resolution imaging spectrometer)陆地叶绿素指数(MMTSI)、双峰冠层氮指数(DCNI I<sup>#</sup>)、合并光谱指数Ⅲ(SIPI/RVI Ⅲ)以及合并光谱指数Ⅳ(PPR/NDVI),提高了叶绿素含量估算模型的精度。3)采用红边位置参数来估算叶绿素含量(叶绿素的红带吸收转变为近红外范围的多次散射,从而产生了红边位置<sup>[6]</sup>)。Li等<sup>[7]</sup>基于连续小波变换的作物反射光谱计算红边位置,反演了水稻和小麦的叶绿素含量。尽管辐射传输方程等物理模型能较为准确地预测叶绿素含量,但若输入的参数过多或参数不精确,模型运行结果就会有偏差,且当输入组分模拟不准确或有误时,物理模型的精度会有所降低,导致模型在实际应用中难以推广。经验模型具有结构与参数易于理解,计算速度快等特点,得到了广泛

应用,有效地推进了农作物生理生化参数的评估研究进程。但是,这些模型在不同区域和不同作物上应用时需要重新调整建模变量,而且这些变量的选择是具有随机性和单一性的,从而导致物理模型缺乏定量化和通用性,模型的估算能力受到一定影响。因此,需要进一步改进和提出新的模型。

本文充分考虑了高光谱与棉花长势的响应机理关系,选取了估算叶片叶绿素含量的植被指数和红边参数来估算棉花叶片的叶绿素含量,为叶绿素含量估算的实际应用提供了一定的理论依据和技术支持。

## 2 材料与方 法

### 2.1 试验设计

2017年4月至9月在位于新疆玛纳斯县的新疆农科院试验站(85°19′~86°25′E, 44°16′~44°22′N)开展棉花试验,将试验田划分为60个小区,其中24个小区分别种植24个棉花品种:新陆中35号(XLZ 35)、新陆早1号(XLZ 1)、新陆早2号(XLZ 2)、新陆早13号(XLZ 13)、新陆早19号(XLZ 19)、新陆早50号(XLZ 50)、新陆早57号(XLZ 57)、新陆早31号(XLZ 31)、新陆中4号(XLZ 4)、新陆中40号(XLZ 40)、新陆中201号(XLZ 201)、新陆中54号(XLZ 54)、新陆中21号(XLZ 21)、苏K202(Su K 202)、108夫(108Fu)、KK-1543、C-3174、C-4744、军棉1号(JM 1)、农垦5号(NK 5)、塔什干2号(TSG 2)、车61-72(Che61-72),其余36个小区设置10个磷肥梯度:P1(秸秆+不设磷)、P2(75 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)、P3(150 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)、P4(300 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)、P5(600 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)、P6(1200 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)、P7(无秸秆+不设磷)、P8(加倍秸秆+82.5 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)、P9(有机肥,含150 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)、P10(有机肥,含300 kg/hm<sup>2</sup>磷肥)。每个处理设置3~4次重复,随机排列,2017年4月28日播种,5月5日灌出苗水,其他按照田间设计操作。

### 2.2 冠层叶绿素含量的测定

采用叶绿素仪测量叶片在红光(650 nm左右)和红外光(940 nm左右)两个波长范围内的透射量,

进而可以确定当前叶绿素的相对含量。以往的研究表明,SPAD-502 叶绿素仪测定的 SPAD(soil and plant analyzer development)值与叶绿素含量之间存在极显著的相关关系,能够表征叶绿素的含量<sup>[8]</sup>。因此,本研究采用叶绿素仪(SPAD-502Plus)测定 60 个采样点中棉花冠层的 SPAD 值。测定时间与位置均与光谱测定同步,每个采样点随机测量 5~6 次,将平均值作为该采样点冠层叶绿素的含量。

### 2.3 光谱数据的测定与处理

使用 ASD 便携式光谱仪获取棉花冠层的光谱数据。选择太阳高度角为 45°~50°,时间为北京时间 12:00—16:00,测取波长为 325~1050 nm 的棉花冠层光谱,以研究不同生长条件下棉花冠层的光谱特征。本文以健康棉叶为主,测定缺磷、缺钾以及黄萎病棉叶的光谱反射曲线。测定过程中光谱仪探头保持垂直向下,安置于冠层上方 25 cm 处,每个采样点用光谱仪扫描 8 s,测量 5 次。所得数据用 Viewspec PRO 软件计算出 5 条曲线的平均值,作为该点光谱的反射值。

包络线处理可以减小背景光谱的影响,有效突出光谱曲线的吸收和反射特征;一阶微分处理可以消除背景噪声和分辨重叠光谱,并用于计算红边参数<sup>[9]</sup>。因此本文在原始光谱(R)的基础上,利用 ENVI 5.3 和 Origin 2016 软件计算包络线(CR)和一阶微分(FDR)两种光谱指标。

### 2.4 高光谱参数的选取

本文在一阶微分光谱的基础上计算了 5 个常用的红边参数和两个微分植被指数(VI),其中:红边参数包括红边位置(REP)、红边振幅( $D_{\lambda_{red}}$ )、最小振幅( $D_{\lambda_{min}}$ )、红边面积( $S_{red}$ )、红谷位置( $\lambda_{min}$ );一阶微分指数(FDR-VI)包括基于一阶微分的简单比值指数(BmSR)以及基于一阶微分的归一化指数(BmND)。在原始光谱与包络线光谱的基础上分别计算了 R-VI 和 CR-VI,包括优化比值指数(mSR)、优化归一化指数(mND)、红边归一化指数(NDI)、双差异指数(DD)、优化叶绿素吸收指数(MCARI)、蓝绿色素指数(BGI)、叶绿素吸收转化指数(TCARI)、叶绿素吸收比值植被指数(CARI)。上述参数见表 1。

表 1 高光谱参数

Table 1 Hyperspectral parameters

Transformation	Parameter	Full name	Ref.
Red edge parameter	REP	Red edge position	[7]
	$D_{\lambda_{red}}$	Red edge amplitude	[10]
	$D_{\lambda_{min}}$	Minimum amplitude	[11]
	$S_{red}$	Red edge area	[11]
	$\lambda_{min}$	Red gully	[10]
FDR-VI	BmSR	First derivative mSR	[12]
	BmND	First derivative mND	[12]
R-VI and CR-VI	mSR	Modified simple ratio index	[13]
	mND	Modified normalized difference index	[13]
	NDI	Red-edge normalized difference index	[14]
	DD	Double difference index	[15]
	MCARI	Modified chlorophyll absorption ratio index	[16]
	BGI	Blue/green pigment index	[13]
	TCARI	Transformed chlorophyll absorption in reflectance index	[16]
CARI	Chlorophyll absorption ratio index	[17]	

### 2.5 模型建立与验证

采用 DPS 数据处理系统建立估算棉花冠层叶绿素含量的 BP(back propagation)神经网络模型。建模时,将光谱参数作为神经网络的输入层,叶绿素含量作为输出层,经过多次训练,隐含层节点数调节为最佳估算精度,设置最大迭代次数为 1000,建立

了 BP 神经网络估算模型,在获取的 60 组样本中随机选取 29 组作为训练集,24 组作为验证集,其余 7 组样本用于不同生长条件下棉花冠层的反射特征分析。对于模型效果评价,分别采用决定系数( $R^2$ )、相对误差(RE)和均方根误差(RMSE)来评定模型。 $R^2$ 越接近 1,表明模型的稳定性越好;RMSE 和 RE

越小,表明模型的精度越高。

### 3 结果与分析

#### 3.1 棉花冠层的反射特征

为了准确分析棉花的光谱特征,选出 325~1050 nm 波段范围内花铃期棉花不同叶绿素含量、不同生长条件下的冠层光谱曲线进行分析,结果如图 1 所示。可见,棉花冠层光谱曲线在 350~680 nm 波段与 680~1050 nm 波段,且前者的反射率比后者低,与作物叶片的反射特征相符。下面对不同健康状况、不同磷肥梯度和不同品种的冠层光谱曲线进行具体分析。

图 1(a)展示了缺磷、黄萎病、缺钾和健康棉叶的反射光谱。由图 1(a)可知:所有叶片在蓝光范围(400~500 nm)内的反射率都很低,原因在于叶片对胡萝卜素的吸收非常多,故而导致反射率降低<sup>[18]</sup>;在绿光范围(500~560 nm)内,550 nm 波长附近的 4 类光谱都出现了反射峰,这主要源于叶绿素的强烈吸收作用,此外,缺磷棉叶的反射率最高;

在红光区域(550~680 nm)内,反射率随叶绿素含量的增加而降低,其中黄萎病棉花的光谱反射率变化尤为明显,在 680 nm 处 4 类光谱都出现反射谷;在 700~740 nm 波段,反射率显著上升,这是因为此范围处于叶绿素强吸收的红波段和强散射的近红外波段之间<sup>[19]</sup>;在 750~1000 nm 的近红外范围内,棉花反射光谱随着叶绿素含量的变化没有表现出明显的差异。综上可知,棉花叶片健康状况的不同会导致叶绿素含量的不同,而叶绿素含量的不同会引起棉花反射特征的变化。图 1(b)为不同磷梯度下的棉花冠层叶片的反射曲线,可知,磷梯度对棉花冠层反射光谱特征的影响不大,不同磷梯度下的棉叶未表现出明显的差异。图 1(c)是北疆地区常见的 24 个棉花品种冠层的反射光谱曲线,观察反射率可知:不同品种棉花冠层光谱反射率的变化趋势基本一致;可见光范围内的光谱曲线反射率比近红外范围内的反射率低,近红外范围内叶绿素含量的不同,导致不同品种棉花冠层反射率呈现出梯度差异。

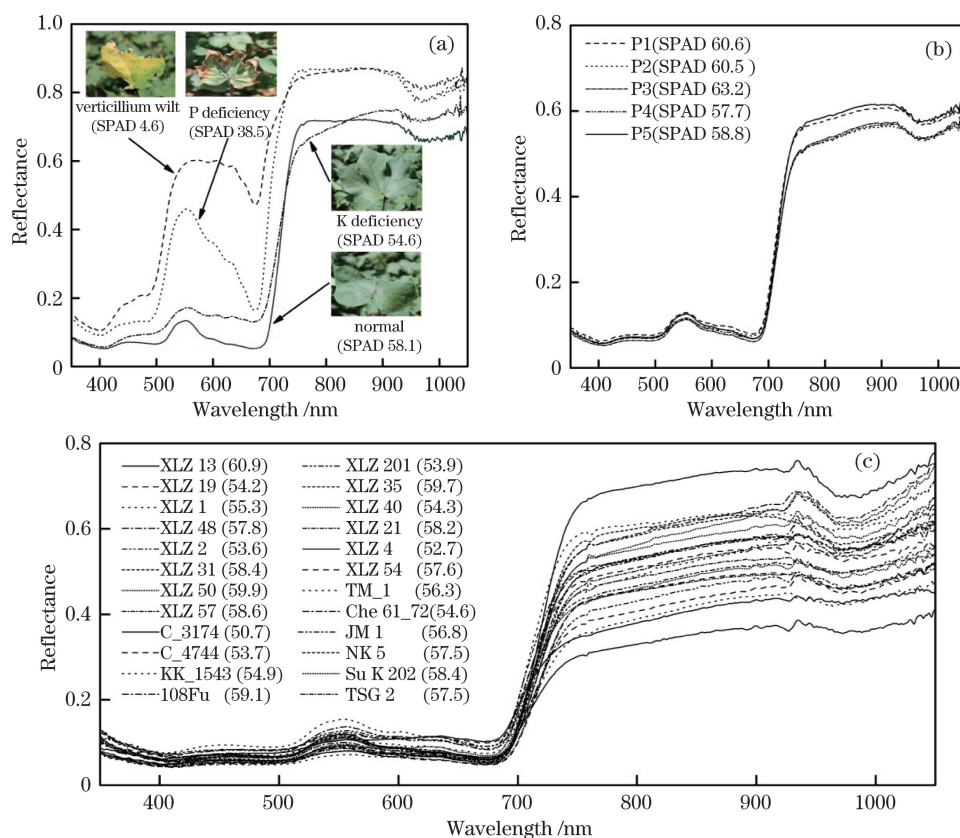


图 1 不同条件下冠层的光谱反射率。(a)不同健康状况棉花的光谱反射率;(b)不同施磷梯度棉花的光谱反射率;(c)各品种棉花的光谱反射率

Fig. 1 Spectral reflectance of canopy at different conditions. (a) Spectral reflectance of cotton with different health conditions; (b) spectral reflectance of cotton with different phosphorus treatments; (c) spectral reflectance of different cotton cultivars



### 3.2 棉花叶绿素含量与冠层反射率的相关性分析

为了进一步定量化叶绿素含量的响应光谱范围和发现特征波段,将棉花冠层叶绿素含量与反射率进行相关性分析,获得了相关系数分布图,如图2所示。图2(a)~(c)分别为原始光谱、一阶微分光谱、去除包络线光谱与棉花叶绿素含量在0.01、0.05显著水平下的相关系数图。

由图2(a)可知:棉花叶绿素含量与原始光谱数据的相关性较高,当波长小于720 nm时,棉花叶绿素含量和原始光谱数据呈负相关,其中380~530 nm和550~720 nm波段范围内表现得尤为明显,相关系数分别达到-0.472、-0.689,相关系数的最大绝对值为0.689,对应波长为688 nm;随着波长增大,棉花叶绿素含量与原始光谱呈正相关,但变化不大,相关系数在0.4以下。

经过变换后的棉花光谱数据与叶绿素含量的相关性有了一定的提高,如图2(b)~(c)所示,其中去除包络线光谱与叶绿素含量呈负相关,相关系数的最大绝对值为0.799,对应波长为692 nm。与原始光谱、去除包络线光谱相比,一阶微分光谱与棉花叶

绿素含量的相关性呈现阶段性特性:在680~696 nm波段内呈负相关,相关系数的最大绝对值为0.705,对应波长为681 nm;在706~757 nm波段内呈正相关,最大相关系数的绝对值为0.765,对应波长为744 nm。总体而言,去除包络线光谱与叶绿素含量的相关性优于一阶微分光谱与叶绿素含量的相关性。

为了进一步直观地表达上述棉花叶绿素含量与冠层反射率之间的相关关系,使用MATLAB软件绘制波段间的相关性等值线图,如图3所示。由图3可知:在620~700 nm波段内,叶绿素含量与原始光谱反射率之间具有较好的相关性;在730~950 nm波段范围内,叶绿素含量与反射率的相关性也比较高,两个指标之间的相关关系保持连续性;包络线光谱指标在590~710 nm波段内表现出较高的相关性;一阶微分光谱指标在700~760 nm波段内表现出较高的相关性。以上结果与前述的Pearson相关性的结果基本吻合,进一步说明利用冠层光谱反射率估算叶绿素含量的方法具有一定的可行性。

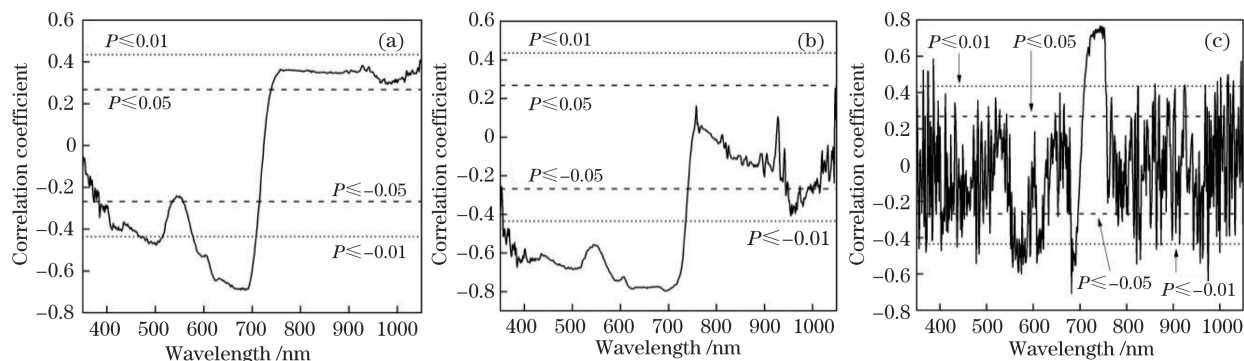


图2 转换光谱曲线与棉花叶绿素含量的相关性。(a)原始光谱;(b)去除包络线光谱;(c)一阶微分光谱

Fig. 2 Correlation between transformation spectral curves and chlorophyll content in cotton. (a) Original spectrum; (b) continuum-removal spectrum; (c) first-order differential spectrum

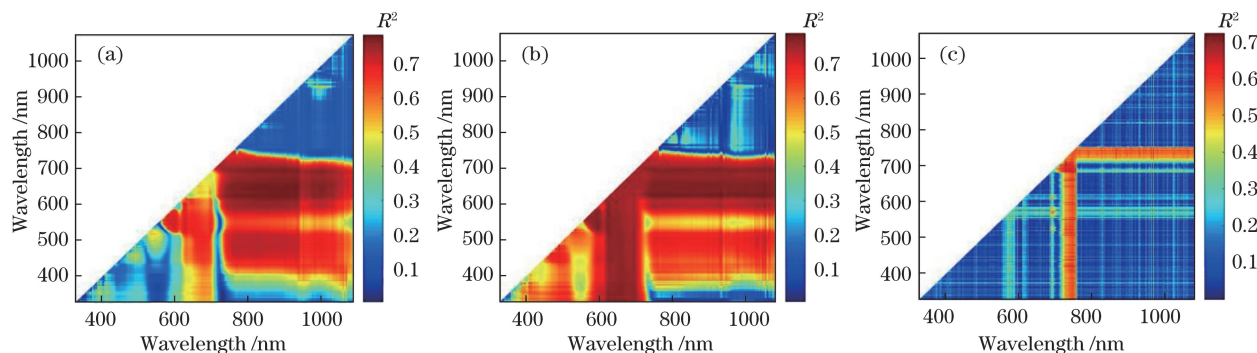


图3 波段之间自相关矩阵的可视化表达图。(a)原始光谱;(b)去除包络线光谱;(c)一阶微分光谱

Fig. 3 Visual representation of autocorrelation matrix between spectral bands. (a) Original spectra; (b) continuum-removal spectra; (c) first-order differential spectra

### 3.3 叶绿素含量与高光谱参数的相关性分析

表 2 列出了基于不同数据处理方法得到的高光谱参数与叶绿素含量的相关性。表 2 表明, mSR、mND、NDI、DD 这 4 个指数在原始和包络线两种光谱条件下都与棉花叶绿素含量具有较高的相关性, 相关系数为 0.76~0.86, 达到了极显著水平, 可客观地反映棉花冠层叶绿素含量。另外, 对于红边参数来说, 红边振幅( $D_{\lambda_{red}}$ )和红边面积( $S_{red}$ )的相关系数最高; 基于一阶微分光谱的两个指数 BmSR、BmND 都与叶绿素含量具有较好的相关关系, 可作为建立估算棉花叶绿素含量的自变量。

表 2 高光谱参数与叶绿素含量的相关性

Table 2 Correlation between hyperspectral parameters and chlorophyll contents

Parameter	Correlation coefficient
CARI	-0.255(R-VI), -0.570(CR-VI)
MCARI	-0.036(R-VI), -0.284(CR-VI)
mSR	0.836(R-VI), 0.782(CR-VI)
mND	0.836(R-VI), 0.782(CR-VI)
NDI	0.868(R-VI), 0.804(CR-VI)
DD	0.809(R-VI), 0.765(CR-VI)
BGI	-0.408(R-VI), -0.229(CR-VI)
TCARI	-0.109(R-VI), -0.397(CR-VI)
REP	0.342
$D_{\lambda_{red}}$	0.528
$D_{\lambda_{min}}$	-0.01
$S_{red}$	0.543
$\lambda_{min}$	-0.09
BmSR	0.759
BmND	0.781

### 3.4 建立模型与验证

表 3 列出了基于不同高光谱参数构建的 BP 神经网络模型, 其中: 基于 R-VI 和 CR-VI 构建的模型, 选取相关性最高的 4 个指数作为输入层; 基于红边参数和 FDR-VI 构建的模型, 分别选取相关性最高的两个参数作为输入层, 叶绿素含量作为输出层, 经过多次训练将隐含层调到最佳估算状态。从建模效果看(表 3), 4 个模型的  $R^2$  都低于 0.7, 模型的稳定性并不高, 其中基于 R-VI 指标的模型的  $R^2$  最高, 接近 0.7, 但其 RMSE 和 RE 最低, 说明该模型的稳定性和预测能力相对较好。

表 3 不同模型的建模结果

Table 3 Comparison of modeling results by different models

Model	Calibration			Validation		
	$R^2$	RMSE	RE / %	$R^2$	RMSE	RE / %
Red edge parameter	0.35	2.42	3.48	0.27	2.77	4.03
FDR-VI	0.53	2.11	2.54	0.56	2.19	2.89
R-VI	<b>0.69</b>	<b>1.69</b>	<b>1.65</b>	0.82	1.46	2.08
CR-VI	0.66	1.70	1.70	<b>0.85</b>	<b>1.37</b>	<b>1.97</b>

从验证效果看: 4 个模型中基于 CR-VI 的 BP 神经网络模型的  $R^2$  最大, 达到了 0.85, RMSE 和 RE 最小, 分别为 1.37 和 1.97, 表明此模型的稳定性和估算精度最高, 可作为估算棉花冠层叶绿素含量的模型; 其余 3 个模型的稳定性和预测精度均没有 CR-VI 模型高。

从预测值和实测值之间的拟合分析图(图 4)可以看出, 与其他 3 种模型的拟合图相比, 基于 CR-VI 指标的 BP 神经网络模型中, 建模样本点和验证样本点大多均匀分布在 1:1 直线的周围, 表明基于 CR-VI 指标的拟合效果最佳。

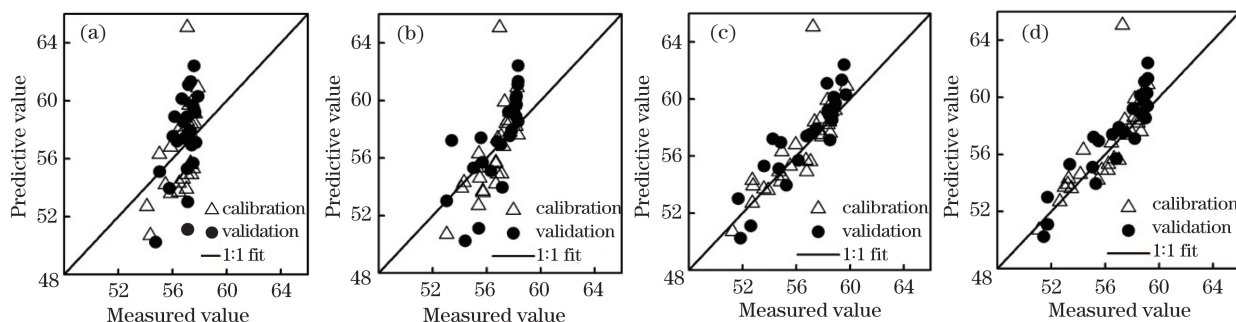


图 4 BP 神经网络模型对实测值与预测值的 1:1 拟合结果图。(a) 基于红边参数的 BP 神经网络模型;

(b) 基于 FDR-VI 的 BP 神经网络模型; (c) 基于 R-VI 的 BP 神经网络模型; (d) 基于 CR-VI 的 BP 神经网络模型

Fig. 4 1:1 fitting results between measured values and predicted values by BP neural network models. (a) BP neural network model based on REP parameters; (b) BP neural network model based on FDR-VI; (c) BP neural network model based on R-VI; (d) BP neural network model based on CR-VI

## 4 讨 论

植被冠层反射是一种综合信息,主要受植被内部生化组分和外界因素(如散射特性、土壤背景、冠层结构)等的影响。植被指数可以反映植被胁迫、衰老和疾病等状况,能够在一定程度上减小土壤背景、大气干扰和冠层结构的影响,在不破坏叶片组织的情况下反演叶片中的叶绿素含量。在以往的研究中,多个植被指数往往被同时用于建立叶片反射率和叶绿素含量之间的关系。然而,由于不同植被叶片包含的色素含量、种类、水分不同,叶片表面和内在结构也有所不同,所以在反演不同的农学参数时需要进一步筛选和调整植被指数。梁亮等<sup>[12]</sup>和肖艳芳等<sup>[13]</sup>认为,mSR、mND、BmSR、BmND 植被指数在叶片叶绿素含量估算上具有一定的潜力,本文在棉花冠层光谱特征分析的基础上,选取了上述植被指数和红边参数来估算棉花冠层的叶绿素含量,结果表明,本文所建立的经验模型为田间和实验室测量叶绿素含量进行验证的无损估算提供了有效方法。

与棉花叶片冠层的反射相比,土壤背景、水背景对冠层反射率的影响很小,而且植物生长的中后期容易出现饱和现象<sup>[20]</sup>,从而可以排除这些因素对棉花冠层光谱的干扰,因此,本文没有考虑归一化植被指数(NDVI)、土壤调节植被指数(SAVI)、优化土壤调节植被指数(OSAVI)、归一化水体指数(NDWI)和水分波段指数(WBI)等光谱指数。这是因为对于处于花铃期的棉花而言,棉株的生长已经比较完善,棉花冠层密闭;试验区在干旱/半干旱地区,棉花作为耐旱作物,其叶片中的水分较少,且冠层水分胁迫指数的构建大部分集中在 980 ~ 1200 nm 波段,而估算叶绿素含量的光谱参数大部分构建在可见-近红外波段上,因此可以忽略土壤和水背景对棉花冠层光谱的干扰。在植被色素估算方面,众多学者提出了一系列植被指数,比如色素特定光谱指数(PSSR)、色素敏感归一化差值指数(PSND)和结构不敏感植被指数(SIPI)等,这些指数对应着多种色素的组合,用这些指数估算叶绿素含量会存在较大偏差,因此本文没有采用这些指数来估算棉花的叶绿素含量。

前人多利用主成分分析、因子分析、逐步回归、最小二乘法等对叶片和冠层进行定量反演,但不同建模方法对模型的预测精度有一定影响<sup>[21-22]</sup>,因此本文尝试用 BP 神经网络方法建立估算模型。结果

表明,神经网络模型可以更好地识别叶片叶绿素含量与光谱指数之间的关系,有助于提高模型的估算精度,这一结果与文献[23-25]中得出的结论基本吻合。但文献[23-25]主要是将神经网络模型与一元线性回归、逐步线性回归、主成分分析等方法进行比较,未根据大量实验数据对 BP 模型网络权值初始化中隐含层的赋值进行确定,因此其模型决定系数  $R^2$  均未达到 0.8。本文采用光谱指数和红边参数等变量进行建模,通过反复试验和分析将隐含层节点数调到最佳估算精度,直至验证集  $R^2$  提高至 0.85,模型精度及通用性得到了实质性改进。

此外,Guo 等<sup>[26]</sup>、Chang 等<sup>[27]</sup>、方孝荣等<sup>[28]</sup> 分别在不同自然光照强度、不同观测角度、不同测定时间下获取的植被光谱数据中发现,与前向散射角度测定的光谱相比,基于后向散射角度测定的光谱建立的模型具有更高的精度,自然光辐照度的变化会导致模型的有效性受到影响,并会引起一定的误差,不同时间条件下的测试结果表明太阳直射植被冠层时得到的光谱较为精确。因此本研究在前人研究的基础上严格按照标准选择了无风无云的最佳气候条件、 $45^\circ \sim 50^\circ$  的太阳高度角、检测高度为 25 cm 的冠层光谱数据,以此保证光谱数据的精确性及其对模型的有效性。但由于实验条件和研究侧重点的限制,本研究尚未仔细考虑特定时段特定光照采集光谱数据对叶绿素 BP 模型的影响,在今后的研究中需要对其进行进一步探索。

## 5 结 论

本文以棉花冠层叶片叶绿素含量与高光谱参数之间的相关关系为基础,构建了估算棉花冠层叶绿素含量的 BP 神经网络模型,并对模型的估算精度进行了验证,得到以下结论:棉花在可见光波段的反射率比近红外波段的低,符合作物叶片反射特征;去除包络线后,叶绿素与光谱的相关性提高了 10.7%,其效果优于原始光谱和一阶微分光谱;在高光谱参数中,分别使用原始光谱和包络线光谱建立的植被指数 mSR、mND、NDI、DD 与叶绿素含量的相关性均在 0.8 左右。在本文所建的 4 个模型中,基于包络线光谱指数建立的模型具有最高的精度,其  $R^2$ 、RMSE 和 RE 分别为 0.85、1.37、1.97%,该模型可以作为较为有效的棉花冠层叶绿素含量的估算方法。

## 参 考 文 献

- [1] Casa R, Castaldi F, Pascucci S, *et al.* Chlorophyll



- estimation in field crops: an assessment of handheld leaf meters and spectral reflectance measurements[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(5): 876-890.
- [2] Guelman M, Ortenberg F. Small satellite's role in future hyperspectral Earth observation missions[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(11/12): 1252-1263.
- [3] Zhang L F, Wang S H, Huang C P. Top-of-atmosphere hyperspectral remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: a review of methods [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 1-12. 张立福, 王思恒, 黄长平. 太阳诱导叶绿素荧光的卫星遥感反演方法[J]. *遥感学报*, 2018, 22(1): 1-12.
- [4] Sun J, Shi S, Yang J, *et al.* Estimating leaf chlorophyll status using hyperspectral lidar measurements by PROSPECT model inversion[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 212: 1-7.
- [5] Jin X L, Li Z H, Feng H K, *et al.* Newly combined spectral indices to improve estimation of total leaf chlorophyll content in Cotton [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(11): 4589-4600.
- [6] Dou Z G, Cui L J, Li J, *et al.* Hyperspectral estimation of the chlorophyll content in short-term and long-term restorations of mangrove in Quanzhou Bay estuary, China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1127.
- [7] Li D, Cheng T, Zhou K, *et al.* WREP: a wavelet-based technique for extracting the red edge position from reflectance spectra for estimating leaf and canopy chlorophyll contents of cereal crops[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 129: 103-117.
- [8] Qiu Z J, Song H Y, He Y, *et al.* Variation rules of the nitrogen content of the oilseed rape at growth stage using SPAD and visible-NIR[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 150-154. 裘正军, 宋海燕, 何勇, 等. 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.
- [9] Zhang X L, Zhang F, Zhang H W, *et al.* Optimization of soil salt inversion model based on spectral transformation from hyperspectral index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1): 110-117. 张贤龙, 张飞, 张海威, 等. 基于光谱变换的高光谱指数土壤盐分反演模型优选 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 110-117.
- [10] Li C L, Jiang K, Ma W, *et al.* Tomato leaf *liriomyza sativae blanchard* pest detection based on hyperspectral technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(1): 253-257. 李翠玲, 姜凯, 马伟, 等. 基于高光谱的番茄叶片斑潜蝇虫害检测 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 253-257.
- [11] Li J L, Peng J Y. Estimation of winter wheat LAI at different growth stages based on canopy hyperspectral remote sensing system[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(8): 979-987. 李军玲, 彭记永. 不同生育时期冬小麦叶面积指数地面高光谱遥感模型研究 [J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(8): 979-987.
- [12] Liang L, Yang M H, Deng K D, *et al.* A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6594-6605. 梁亮, 杨敏华, 邓凯东, 等. 一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数 [J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6594-6605.
- [13] Xiao Y F, Gong H L, Zhou D M. A study on the hyperspectral inversion for estimating leaf chlorophyll content of clover based on factor analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3098-3106. 肖艳芳, 宫辉力, 周德民. 基于因子分析的苜蓿叶片叶绿素高光谱反演研究 [J]. *生态学报*, 2012, 32(10): 3098-3106.
- [14] Xing Q G, Yu D F, Lou M J, *et al.* Using *in-situ* reflectance to monitor the chlorophyll concentration in the surface layer of tidal flat[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2188-2191. 邢前国, 禹定峰, 娄明静, 等. 基于现场光谱的潮滩表层沉积物叶绿素-a 含量遥感模式 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2188-2191.
- [15] Gao D Z, Zhang W L, Chen M T, *et al.* Retrieval of carotenoid contents of *Kandelia candel* based on hyper-spectral remote sensing data[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3053-3059. 高灯州, 章文龙, 陈美田, 等. 秋茄类胡萝卜素含量高光谱反演 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 3053-3059.
- [16] Tian J G, Wang S D, Zhang L F, *et al.* Spectral index sensitivity study of winter wheat chlorophyll inversion using hyperspectral remote sensing vegetation index[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(15): 1-8. 田静国, 王树东, 张立福, 等. 应用高光谱植被指数反演冬小麦叶绿素含量的光谱指标敏感性研究 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(15): 1-8.
- [17] Zhang X Z, Zheng G Q, Dai T B, *et al.* Estimation models of summer maize leaf pigment content based on canopy reflectance spectra[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(6): 55-60.



- 张学治, 郑国清, 戴廷波, 等. 基于冠层反射光谱的夏玉米叶片色素含量估算模型研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 55-60.
- [18] Chen B, Wang Q, Xiao C H, *et al.* Exploration and recognition of spectral characteristics of cotton leaf suffered nine stresses[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 24(10): 64-73.  
陈兵, 王琼, 肖春华, 等. 9种胁迫条件下棉花叶片光谱特征及其识别研究[J]. 西北农业学报, 2015, 24(10): 64-73.
- [19] Wu Y F, Hu X, Lü G H, *et al.* Comparison of red edge parameters of winter wheat canopy under late frost stress[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(8): 2190-2195.  
武永峰, 胡新, 吕国华, 等. 晚霜冻影响下冬小麦冠层红边参数比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8): 2190-2195.
- [20] Yang T, Chen X W, Wan W, *et al.* Soil moisture retrieval in the Tibetan Plateau using optical and passive microwave remote sensing data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2556-2567.  
杨婷, 陈秀万, 万玮, 等. 基于光学与被动微波遥感的青藏高原地区土壤水分反演[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2556-2567.
- [21] Nijat K, Shi Q D, Wang J Z, *et al.* Estimation of spring wheat chlorophyll content based on hyperspectral features and PLSR model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(22): 208-216.  
尼加提·卡斯木, 师庆东, 王敬哲, 等. 基于高光谱特征和偏最小二乘法的春小麦叶绿素含量估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 208-216.
- [22] Chu W L, Qi Y B, Chang Q R, *et al.* Relationship between chlorophyll content and hyperspectral parameters in canopy leaves of cotton[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(9): 65-73.  
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.
- [23] Sun B Y, Chang Q R, Liu M Y. Inversion chlorophyll mass fraction in winter wheat canopy by hyperspectral reflectance[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017, 26(4): 552-559.  
孙勃岩, 常庆瑞, 刘梦云. 冬小麦冠层叶绿素质量分数高光谱遥感反演研究[J]. 西北农业学报, 2017, 26(4): 552-559.
- [24] Yang K M, Zhang W W, Zhuo W, *et al.* Research on inversing chlorophyll content based on neural network methods optimized by the harmonic analysis of red edge spectrum[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(24): 19-24.  
杨可明, 张婉婉, 卓伟, 等. 红边光谱谐波分析的神经网络法叶绿素含量反演研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(24): 19-24.
- [25] Liu W Y, Pan J. A hyperspectral assessment model for leaf chlorophyll content of pinus massoniana based on neural network[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1128-1136.  
刘文雅, 潘洁. 基于神经网络的马尾松叶绿素含量高光谱估算模型[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1128-1136.
- [26] Guo B B, Zhu Y J, Feng W, *et al.* Remotely estimating aerial N uptake in winter wheat using red-edge area index from multi-angular hyperspectral data[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 675.
- [27] Chang J, Clay S A, Clay D E, *et al.* Clouds influence precision and accuracy of ground-based spectroradiometers[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(13/14): 1799-1807.
- [28] Fang X R, Gao J F, Xie C Q, *et al.* Review of crop canopy spectral information detection technology and methods[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(7): 1949-1955.  
方孝荣, 高俊峰, 谢传奇, 等. 农作物冠层光谱信息检测技术及方法综述[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1949-1955.