

基于机器视觉的棉花群体叶绿素监测

王方永¹ 李少昆^{1,2,*} 王克如^{1,2} 隋学艳³ 柏军华² 陈 兵¹ 刘国庆¹

谭海珍¹

(¹新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室, 新疆石河子 832003; ²中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; ³山东省农业可持续发展研究所, 山东济南 250100)

摘 要: 研究了利用机器视觉技术快速获取棉花群体叶绿素信息的方法, 以期获得预测性高的颜色特征参数。结果表明, RGB颜色系统的 $G-R$ 、 $(G-R)/(G+R)$ 、 r 与 g 的组合值和棉花功能叶叶绿素含量、群体绿色指数呈极显著相关, 而且拟合度较高; HIS颜色系统的Hue值和棉花功能叶叶绿素含量、群体绿色指数之间也极显著相关。对筛选出的两组模型进行检验, 预测精度在 84.07%~93.04%之间, 推荐预测精度最高的 $G-R$ 参数作为获取棉花群体叶绿素信息的最佳颜色指标。 $G-R$ 预测叶绿素含量和群体绿色指数的模型分别为 $y=-1.3008+0.2125(G-R)-0.0038(G-R)^2$ ($R^2=0.8669^{**}$) 和 $y=-0.9726+0.1227(G-R)-0.0016(G-R)^2$ ($R^2=0.7487^{**}$)。

关键词: 棉花群体; 机器视觉; 叶绿素; RGB; HIS; 图像覆盖度

Obtaining Information of Cotton Population Chlorophyll by Using Machine Vision Technology

WANG Fang-Yong¹, LI Shao-Kun^{1,2}, WANG Ke-Ru^{1,2}, BAI Jun-Hua¹, CHEN Bing¹, LIU Guo-Qing¹, and TAN Hai-Zhen¹

(¹ Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crops, Shihezi 832003, Xinjiang; ² Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081; ³ Institute of Agriculture Sustainable Development of Shandong, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: Machine vision have been successful applied to monitor crop morphological and physiological status, such as leaf area index, nitrogen content, chlorophyll content and so on. The trials was conducted from 2004 to 2006 at the experiment station of Shehezi University located in Shihezi, Xingjiang Province to monitor cotton canopy chlorophyll information under field conditions by processing cotton population digital image, which is one measurement method with advantages of convenient, real time, quick and nondestructive. In order to obtain uniform cotton canopy digital images, the assistant device was used. In the field, the cotton canopy images were taken by a digital photo camera (OLYMPUS) at the squaring stage, early flowering stage, full flowering stage, peak boll stage and opening boll stage, respectively. The color characteristics of cotton population images were extracted with the image processing software developed by our lab. The correlation between color parameters of cotton canopy digital image and chlorophyll content of cotton functional leaf was analyzed. The results showed that the correlation of the color characteristics such as $G-R$, $(G-R)/(G+R)$, r/g , g/r , and $g-r$ in the RGB color system, and Hue in the HIS color system with chlorophyll content of functional leaf was significant at $P<0.01$. There also was a significant correlation between the population greenness index (PGI) and color parameter. The chlorophyll predicted models were established. The tested results about the regression models suggested that $G-R$ was the best parameter to monitor cotton population chlorophyll information. The relative error of chlorophyll content and PGI estimations was about 6.96% and 11.60%, and RMSE was 0.1138 and 0.1643. The chlorophyll content predicted model was $y=-1.3008+0.2125(G-R)-0.0038(G-R)^2$ ($R^2=0.8669^{**}$), and PGI predict model was $y=-0.9726+0.1227(G-R)-0.0016(G-R)^2$

基金项目: 国家自然科学基金项目(30360047); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA10A302, 2006AA10Z207)

作者简介: 王方永(1980-), 男, 硕士, 主要从事作物栽培与作物信息技术应用研究。E-mail: fangywang425@163.com

*通讯作者(Corresponding author): 李少昆。Tel: 010-68918891, E-mail: Lishk@mail.caas.net.cn

Received (收稿日期): 2007-02-08; Accepted (接受日期): 2007-05-03.

($R^2=0.7487^{**}$) .

Keywords: Cotton population; Machine vision; Chlorophyll content; RGB; HIS; Percent ground cover of image

叶色是棉花群体的重要特征指标,能够直观地反映叶绿素含量的变化,用于指示作物生长过程中的光合能力、营养状况及水分胁迫等栽培信息,为田间栽培管理,苗情诊断和因苗肥水管理提供重要依据。近年,机器(计算机)视觉技术在农作物长势长相监测方面已显示出良好的应用前景。Adamsen等^[1]对小麦数字图像的研究表明,当 $G/R < 1.2$ 时, G/R 指标和SPAD值呈显著正相关, $R^2=0.910$ 。文新亚等^[2]初步建立了Hue值与生育中后期麦田叶绿素含量、生物产量、叶面积指数及产量的关系,认为可用Hue值来监测麦田生育中后期的长势。李少昆等^[3]使用小麦群体数字图像侧面像与实测数据建立了识别模型,实现了对高产小麦群体单位面积基本苗数、叶面积指数、单位面积穗数等群体性状的识别。单成刚^[4]等利用BP神经网络通过小麦群体田间图像中叶片的边缘像素数预测小麦群体总茎数,预测精度超过90%。相对于小麦、玉米和杂草的识别,机器视觉对棉花长势长相监测的应用研究较少。雷咏雯等^[5]研究表明棉花冠层图像的 $B/(R+G)$ 指标可以灵敏反映施氮量的变化。王克如等^[6]对棉花单叶进行颜色值提取并用于预测单叶的叶绿素浓度,预测精度高于SPAD的估测精度。李亚兵等^[7]研究指出颜色参数 $G/(R+B)$ 和色调Hue与棉花的早衰程度呈线性相关,且 $G/(R+B)$ 有更好的拟合度。王勇^[8]等对棉花进行识别发现, $R-B$ 色差可以将棉花从复杂背景中分割出来。上述研究表明可以应用颜色特征参数来对棉花群体进行监测研究,说明用机器视觉技术获取棉花群体叶绿素信息的可行性。

机器视觉是利用图像处理技术获取作物颜色、形态、纹理等特征参数,对农学指标进行诊断,是一种新兴的快捷、便利的监测手段。本文拟通过对棉花群体数字图像的颜色特征值和实测叶绿素含量的关系分析,筛选预测叶绿素含量精度较高的颜色参数,从而准确、实时、快速地获取其叶绿素含量。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计及栽培管理

试验于2004—2006年在石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室田间试验站($N 44.18^\circ$ 、 $E 86.03^\circ$)进行。土壤质地为壤质灰漠土,含有机质1.93%、碱解氮 77.4 mg kg^{-1} 、速效磷 93 mg kg^{-1} 、速效钾 315 mg kg^{-1} 。供试品种为新陆早13,种植密度为 24 万株 hm^{-2} , $30 \text{ cm} + 60 \text{ cm}$ 宽窄行覆膜种植,4月23日膜上点播,灌溉方式为膜下滴灌,用水表控制滴量。其他田间管理措施和当地大田常规栽培管理措施一致。

为得到叶色浓淡不同棉花群体,设5个氮肥处理(纯氮, kg hm^{-2})的单因素试验(N0-CK:不施N,N1:150,N2:300,N3:450,N4:600),3个重复,完全区组设计。氮肥播种前基施40%,追肥占60%,于花铃期分2次随水滴施;磷、钾肥基施 P_2O_5 150 kg hm^{-2} 和 K_2O 75 kg hm^{-2} 。整个生育期滴水13次,灌水量为 $3900 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$,并根据棉花在各个生育时期占整个生育期需水比例分配每次滴水量。

1.2 棉花群体数字图像获取及特征值提取方法

1.2.1 图像获取 在晴天12:00~14:00田间自然光照条件下,使用OLYMPUS C-5060 Wide Zoom型数码相机直接在田间获取棉花群体的数字图像。固定焦距,以自动曝光模式控制曝光时间与色彩平衡,采取 2592×1944 像素分辨率。利用自制的棉花群体图像采集辅助装置(图1),镜头距地面2 m,垂直拍照,分别在棉花的主要生育时期(现蕾期、初花期、盛花期、盛铃期、吐絮期)获取各处理各重复的图像,以JPEG格式传入计算机。

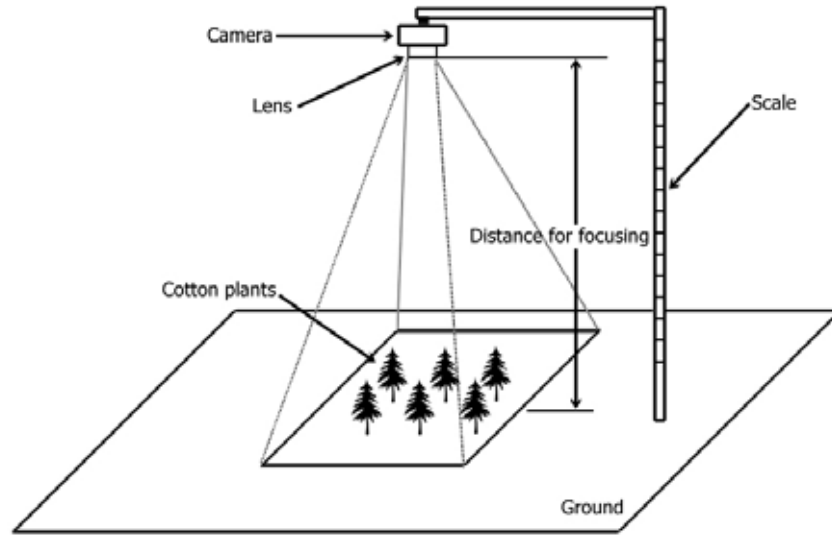


图 1 棉花群体图像采集辅助装置及图像拍摄示意图

Fig. 1 The sketch map of assistant device for cotton population image collection

1.2.2 图像颜色特征提取 选用 RGB 和 HIS 颜色系统，二者具有对光源变化不敏感，且易于区分不同颜色的特点。RGB 颜色系统属于 CIE 标准色度学系统，是在红、绿、蓝 3 基色学说下建立起来的颜色系统，通过改变 3 基色的数量，可混合出各种颜色。

$$C^{**} \equiv R(R) + G(G) + B(B)$$

式中， C^{**} 表示混合后的颜色， \equiv 表示视觉上的相等， (R) 、 (G) 、 (B) 表示 3 基色， R 、 G 、 B 等表示 3 基色的数量，又称为 3 基色的刺激值。

在色度系统中常用 RGB 的比例值表示色度坐标 (r, g, b) ，

$$r = R/(R+G+B) \quad g = G/(R+G+B) \quad b = B/(R+G+B)$$

式中 R 、 G 、 B 为 3 基色的数量， r 、 g 、 b 为归一化了的 R 、 G 、 B ，通常被认为是消除不同拍摄环境条件下光强等差异所造成的系统误差的颜色分量^[9]，且 $r+g+b=1$ 。

HIS 系统直接用亮度(Intensity) (或明度)、色调(Hue)、饱和度(Saturation)来描述颜色，比较符合人的肉眼对颜色的观察习惯。系统中的 I 为光强度， H 为色调， S 为饱和度。HIS 值由 RGB 值转化得到。

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B)$$

$$S = I - \frac{3}{(R+G+B)}[\min(R, G, B)]$$

$$H = \arccos \left\{ \frac{[(R-G) + (R-B)]/2}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

当 $G > B$ 时，由上式直接计算出来的 H 值在 $[0, 180]$ 之间，当 $G < B$ 时， $H=360-H$ 。

每个氮肥处理的棉花图像颜色值取 3 次重复图像的平均值。

1.2.3 图像覆盖度的获取 利用自行开发基于图像的棉花群体特征分析系统获取棉花群体图像覆盖度，该覆盖度是对棉花群体图像中绿色部分所占比例的度量，其算法基于统计学的图像分割方法，用图像中绿色部分的累计像素数除以整幅图像的总像素数，得出棉花群体的图像覆盖度 (Percent Ground Cover of Image, PGCI)。在田间株行距配置一致、图像获取条件相同时，图像覆盖度反映的是在不同肥水条件下棉花冠层的相对大小。各氮肥处理棉花图像覆盖度取 3 次重复图像的平均值。

1.3 软件开发环境

在 Windows XP 操作系统下, 以 Microsoft Visual Studio. NET 为工具, 自行开发基于图像的棉花群体特征分析系统, 以实现棉花群体图像特征的提取与分析。

1.4 叶绿素浓度测定

在获取测定样点棉花群体图像之后, 每样点取有代表性的植株 5 株, 即各处理 3 次重复共取 15 株, 对每样株的上部功能叶片 (打顶前为倒四主茎叶, 打顶后为倒一主茎叶)^[10]立即打孔取样约 0.2 g, 将每个处理打孔样分别用无水酒精与丙酮 1:1 混合液浸泡, 置避光处至叶片组织完全褪色, 用 722 N 型分光光度计比色, 测定特定波长下的光密度, 计算其叶绿素含量 Chlorophyll Content (CHL.C, mg g⁻¹)。将叶片叶绿素含量和单位面积总绿叶鲜重的乘积作为叶绿素密度 Chlorophyll Density (CHL.D, g m⁻²), 用以表征群体叶绿素信息。

群体绿色指数 (Population Greenness Index, PGI) 定义为群体覆盖度与棉花叶片叶绿素含量的乘积, 以反映不同冠层的棉花群体叶绿素含量差异。

2 结果与分析

2.1 颜色特征值与棉花功能叶叶绿素含量间的关系

利用基于图像的棉花群体特征分析系统处理棉花群体的冠层图像, 提取每张图像的 R 、 G 、 B 值及 H 、 I 、 S 值, 并对 R 、 G 、 B 值进行多种组合变换, 以此作为图像的特征信息, 分析各颜色特征值与功能叶叶绿素含量、叶绿素密度间的相关性, 表明部分颜色特征值与叶绿素含量、叶绿素密度极显著相关 (表 1)。

表 1 颜色特征值与棉花功能叶叶绿素含量、叶绿素密度的相关关系

Table 1 Correlation analysis of color characteristic and chlorophyll content and chlorophyll density of cotton functional leaf									
	G	B	I	H	r	G	$g-r$	r/g	g/r
CHL.C	0.5026**	0.2453**	0.3837*	0.3184**	-0.4663**	0.4420**	0.7526**	-0.7712**	0.7593**
CHL.D	0.2474	-0.0191	0.1182	0.1253	-0.2252	0.3891*	0.5350**	-0.5343**	0.5301**
	$2g-r-b$	$G-B$	$G-R$	$R/(G+B)$	$G/(R+B)$	$(G-R)/(G+R)$	$(G-B)/(R-G)$	$2G-R-B$	
CHL.C	0.4420**	0.3500*	0.8214**	-0.4707**	0.4479**	0.7659**	0.4877**	0.5291**	
CHL.D	0.3891*	0.2843	0.5583**	-0.2282	0.3946**	0.5325**	0.2410*	0.3953**	

* 和 **: 显著性分别为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。* and **: Significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

用 RGB 颜色系统的 $G-R$ 、 $(G-R)/(G+R)$ 、 r 与 g 的组合值等颜色参数和叶绿素参量做相关分析比直接用 R 、 G 、 B 值做相关分析的结果好, 且叶绿素密度 (CHL.D) 和各颜色参数之间的相关性低于叶绿素含量 (CHL.C) 和颜色参数的相关性, 但颜色参数与二者的相关趋势是一致的。相关性最好的颜色参数均为 $G-R$ 参数。HIS 颜色系统的 Hue 值与叶绿素含量呈极显著正相关。

对相关系数较高的颜色特征值和叶绿素含量进行了回归分析, 建立模型 (图 2), 建模样本数为 42。

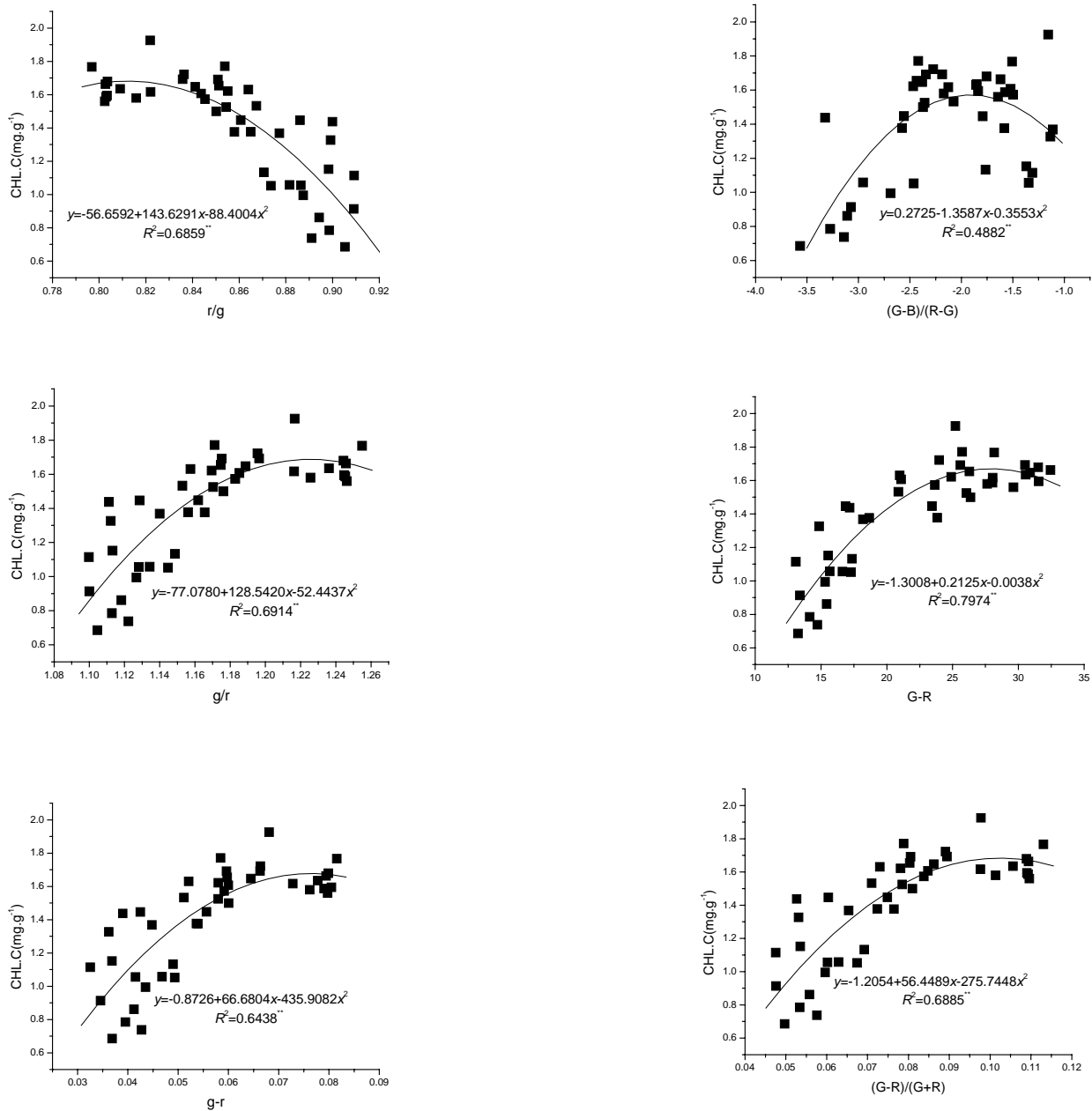


图2 颜色参数与棉花功能叶叶绿素含量的回归分析

Fig. 2 Regression analysis between color parameter and chlorophyll content of cotton functional leaf

2.2 颜色特征值与群体绿色指数之间的相关关系

利用棉花群体特征分析系统提取棉花群体的图像覆盖度(PGCI)作为群体覆盖度,以功能叶叶绿素含量代表棉花叶片叶绿素含量,分析PGI值和颜色值的相关性,并对显著相关的指标进行回归分析。结果表明(表2),RGB颜色系统的 $G-R$ 、 $(G-R)/(G+R)$ 、 r 与 g 的组合值($g-r$ 、 g/r 、 r/g)对PGI值的拟合度较高,这与颜色值和棉花功能叶叶绿素含量拟合结果一致,证明用功能叶叶绿素含量可表征群体叶绿素信息。

表 2 颜色特征值与群体绿色指数的回归方程及决定系数

Table 2 The regression equations and determination coefficients between the color characteristic and population greenness index

回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
$PGI = -0.8166 + 0.0111G$	0.2473**	$PGI = 0.3963 + 0.0109(G - B)$	0.2011**
$PGI = -14.7040 + 0.3296H - 0.0017H^2$	0.3457**	$PGI = -0.6350 - 1.7210(G - B)/(R - G) - 0.4297((G - B)/(R - G))^2$	0.4233**
$PGI = -0.3782 + 0.0097I$	0.1094*	$PGI = 0.7907 - 0.0109(2G - R - B) + 1.6956 \times 10^{-4}(2G - R - B)^2$	0.4094**
$PGI = -145.1449 + 886.8608r - 1344.7543r^2$	0.2539**	$PGI = -85.9035 + 141.8129g/r - 57.6984(g/r)^2$	0.7200**
$PGI = -61.8123 + 155.8205r/g - 96.2845(r/g)^2$	0.7143**	$PGI = -0.9726 + 0.1227(G - R) - 0.0016(G - R)^2$	0.7547**
$PGI = -0.2923 + 0.8308g/b$	0.1125*	$PGI = -1.6861 + 74.7271(g - r) - 478.3891(g - r)^2$	0.6919**
$PGI = -63.9355 + 263.8952R/(G+B) - 267.8032[R/(G+B)]^2$	0.2612**	$PGI = 1.0060 - 7.7998(2g - r - b) + 39.0756(2g - r - b)^2$	0.3494**
$PGI = 16.4756 - 54.9744G/(R+B) + 47.6544 [G/(R+B)]^2$	0.3510**	$PGI = -2.0331 + 62.7685(G - R)/(G + R) - 301.7387[(G - R)/(G + R)]^2$	0.7169**

* 和 **: 显著性分别为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。* and **: significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.3 模型检验

对实测值和预测值之间的符合程度进行统计分析，检验样本数为 28 个。根据所建立回归方程的拟合度筛选出图像特征参数 g/r 、 $G - R$ 、 $g - r$ 、 $(G - R)/(G + R)$ ，对其和棉花功能叶叶绿素含量、群体绿色指数所建立的两组统计预测模型进行精度检验。结果表明(表 3)，实测值和预测值均达极显著相关，其相应的均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error) 小于 0.17，相对误差(RE)介于 6.96%~15.93%之间。预测误差越小则两组数据间偏差越小，模型拟合的预测度较高，可见 g/r 、 $g - r$ 、 $(G - R)/(G + R)$ 3 个指标的预测精度较高且相差不大，而 $G - R$ 指标的预测误差最小，对棉花功能叶叶绿素含量和群体绿色指数的预测精度分别达 93.04%和 88.40%，因此，推荐以 $G - R$ 作为获取棉花功能叶叶绿素含量和群体绿色指数的最佳预测指标。

表 3 棉花功能叶叶绿素含量和群体绿色指数的回归模型检验

Table 3 The test of regression models for cotton functional leaf chlorophyll content and population greenness index

回归模型 Regression model	相对误差 RE(%)	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2
$CHL.C = -77.0780 + 128.5420g/r - 52.4437(g/r)^2$	9.84	0.1666	0.7104**
$CHL.C = -1.3008 + 0.2125(G - R) - 0.0038(G - R)^2$	6.96	0.1138	0.8669**
$CHL.C = -0.8726 + 66.6804(g - r) - 435.9082(g - r)^2$	10.12	0.1699	0.7142**
$CHL.C = -1.2054 + 56.4489(G - R)/(G + R) - 275.7448[(G - R)/(G + R)]^2$	9.86	0.1670	0.7105**
$PGI = -85.9035 + 141.8129g/r - 57.6984(g/r)^2$	14.66	0.1614	0.7592**
$PGI = -0.9726 + 0.1227(G - R) - 0.0016(G - R)^2$	11.60	0.1643	0.7487**
$PGI = -1.6861 + 74.7271(g - r) - 478.3891(g - r)^2$	15.93	0.1685	0.7325**
$PGI = -2.0331 + 62.7685(G - R)/(G + R) - 301.7387[(G - R)/(G + R)]^2$	14.91	0.1643	0.7496**

**：显著性为 $P < 0.01$ 。*: Significance at 0.01 probability levels.

3 讨论

目前对田间作物叶绿素信息的无损监测技术主要包括高光谱遥感、SPAD 叶绿素仪和机器视觉技术。高光谱方法已广泛用于对作物的长势评估及产量预测，但由于高光谱仪价格昂贵，使其推广和普及难度较大。虽然 SPAD 叶绿素仪价格相对低廉，但获取的只是叶片上的点状信息，在不同叶片之间、同一叶片不同部位间差异较大，数据稳定性差，限制该项技术的应用。而近年来发展起来的机器视觉技术能克服这些不足，有望成为作物叶绿素信息获取的新手段。

本文研究发现用 RGB 颜色系统进行各种变换后的颜色参数和棉花叶绿素含量、叶绿素密度、覆盖度等农学参数做相关分析比直接用 R 、 G 、 B 值做相关分析的结果好，这与前人在其他作物上的研究结果一致

[1,5-7]。说明作物在这一方面有共性,同时,作物图像中 R 、 G 、 B 值在反映叶绿素信息时的权重不同。本文提出颜色参数 $G-R$ 是对棉花群体叶绿素信息监测的最佳指标,与Adamsen等^[1]得出的小麦群体冠层图像的 G/R 颜色指标与SPAD值之间存在高符合度,并可用来估测小麦叶绿素含量的结果有相似之处,证实了作物图像中 G 和 R 值与叶绿素信息间的密切关系不仅在小麦中存在,在棉花中也同样存在。但棉花有不同于小麦之处,王克如等^[6]研究认为RGB和HIS颜色系统的 B 、 B/R 、 b 、 b/r 、饱和度 S 值和棉花叶片叶绿素浓度间呈极显著相关,与前人在小麦等作物上的研究结果有所不同,且这一结论能否推演到棉花群体图像,尚需进一步研究。

在用于叶绿素分析的指标中,叶绿素密度与颜色参数的相关性相对较低,可能由于垂直拍摄的图像得到的更多为面状信息,反映的主要是冠层表层叶片叶绿素信息,上层功能叶叶绿素含量和群体绿色指数更多体现的是冠层表层信息;而叶绿素密度为单位土地面积上的叶绿素总量,包含分布在冠层内所有叶片的叶绿素信息,具有三维立体性,这两者间信息的不一致性造成了叶绿素密度与颜色参数间较低的相关性。因此,可以尝试以不同拍摄角度获取棉花群体图像来挖掘棉花冠层的立体信息,深化和完善机器视觉技术在棉花群体叶绿素等生长信息监测上的应用。

虽然机器视觉技术在作物生长监测中有明显优势,但也存在一些急需解决的问题。因为作物群体是开放和动态的,易受诸如天气、风、光强、作物类型、品种等多方面影响,加之操作人员的拍摄方式方法和数码相机的类型等差异,使图像分析更为复杂,影响试验与应用精度。因此,在应用与推广机器视觉技术中研究与制定图像拍摄规范显得尤为迫切与重要。

4 结论

采用机器视觉技术来获取棉花群体叶绿素信息是一种实时、快速、准确的无损监测方法。在表征棉花群体叶绿素信息的指标中,与图像颜色参数极显著相关的为棉花上部功能叶叶绿素含量和群体绿色指数。棉花图像RGB颜色系统中 $G-R$ 、 $(G-R)/(G+R)$ 、 r 与 g 的组合值等颜色参数和棉花功能叶叶绿素含量、群体绿色指数之间极显著相关,拟合度较高;HIS颜色系统的Hue值与功能叶叶绿素含量、群体绿色指数之间也极显著相关;利用这些颜色参数所建模型对叶绿素含量、群体绿色指数测定精度在84.07%~93.04%之间;其中以 $G-R$ 所建模型的预测精度最高,分别为93.04%和88.40%。 $G-R$ 预测叶绿素含量和群体绿色指数的模型分别为 $y_{\text{CHL.C}} = -1.3008 + 0.2125(G-R) - 0.0038(G-R)^2$ ($R^2=0.8669^{**}$)和 $y_{\text{PGI}} = -0.9726 + 0.1227(G-R) - 0.0016(G-R)^2$ ($R^2=0.7487^{**}$)。 $G-R$ 可作为基于机器视觉的棉花功能叶叶绿素含量和群体绿色指数的最佳监测指标。

References

- [1] Adamsen F J, Pinter P J Jr, Barnes E M, LaMorte R L, Wall G W, Leavitt S W, Kimball B A. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Sci*, 1999, 39: 1719-1724
- [2] Wen X-Y(文新亚). The study on theory and technique about monitoring station layout and agricultural information acquirement. PhD Dissertation of China Agricultural University, 2001 (in Chinese with English abstract)
- [3] Li S-K(李少昆), Suo X-M(索兴梅), Bai Z-Y(白中英), Qi Z-L(祁之力), Liu X-H(刘晓鸿), Gao S-J(高世菊), Zhao S-N(赵双宁). The machine recognition for population feature of wheat images based on BP neural network. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(6): 616-620 (in Chinese with English abstract)
- [4] Shan C-G(单成钢), Liao S-H(廖树华), Liang Z-X(梁振兴), Zhu H(朱虹), Zheng L-M(郑丽敏), Wang P(王璞). Study on machine recognition methods for population feature of wheat images—Estimate of wheat population total stem number. *Acta Agron Sin*(作物学报), 2004, 30(12): 1281-1283 (in Chinese with English abstract)
- [5] Lei Y-W(雷咏雯), Wei C-Z(危常州), Ye J(冶军), Hou Z-A(侯振安), Li J-H(李俊华), Jia L-L(贾良良). Application of computer-aided cotton leaf-color analysis in nitrogen status diagnosis in cotton plants. *Shihezi Univ* (Nat Sci Edn) (石河子大学学报·自然科学版), 2004, 22(2): 113-116 (in Chinese with English abstract)

- [6] Wang K-R(王克如), Li S-K(李少昆), Wang C-T(王崇桃), Yang L(杨蕾), Xie R-Z(谢瑞芝), Gao S-J(高世菊), Bai J-H(柏军华). Acquired chlorophyll concentration of cotton leaves with technology of machine vision. *Acta Agron Sin*(作物学报), 2006, 32(1): 34–40 (in Chinese with English abstract)
- [7] Li Y-B(李亚兵), Mao S-C(毛树春), Wang X-H(王香河), Han Y-C(韩迎春), Liu W(刘伟), Wang G-P(王国平), Fan Z-Y(范正义). Study on the parameters of digital of diagnosis on cotton premature senescence grade. *Cotton Sci* (棉花学报), 2006, 18(3): 160–163 (in Chinese with English abstract)
- [8] Wang Y(王勇), Ji C-Y(姬长英), Rao H-H(饶洪辉). Identification of Cotton Using RGB Color Information. Proceeding of Annual Conference, 2005, CSAE (中国农业工程学会 2005 年学术年会论文集) , pp 317–319 (in Chinese with English abstract)
- [9] Tian L F, Slaughter D C. Environmentally odaptive segmentation algorithm for outdoor images segmentation. *Computer & Election in Agric*, 1998, 21(3): 153–168
- [10] Chen B-S(陈布圣). Cotton Cultivation Physiology(棉花栽培生理). Beijing: China Agriculture Press, 1994(in Chinese)