

文章编号: 1674-148X(2016)02-0091-06

基于冬小麦冠层数码图像的叶面积指数 和叶片 SPAD 值的估算

翟明娟, 刘亚东, 崔日鲜

(青岛农业大学农学与植物保护学院/山东省旱作农业技术重点实验室, 山东 青岛 266109)

摘要: 为探究冠层图像分析技术在冬小麦长势监测中应用, 6 个施氮水平的田间试验条件下, 在冬小麦拔节期采集冠层图像, 并同步测定冬小麦叶面积指数和叶片 SPAD 值。通过图像分析软件计算了冬小麦冠层覆盖度及红、绿、蓝亮度值等 10 种色彩指数, 分析了叶面积指数及叶片 SPAD 值与色彩指数和冠层覆盖度的相关性, 利用逐步回归方法构建了叶面积指数及叶片 SPAD 值的估算模型。结果表明: 冬小麦拔节期叶面积指数与冠层覆盖度及几个色彩指数呈极显著相关; 叶片 SPAD 值与红光标准化值等几个色彩指数呈极显著相关; 利用叶面积指数估算模型计算的预测值与实测值的线性回归方程的决定系数为 0.771, 相对均方根误差为 25.181%; 利用叶片 SPAD 值估算模型计算的预测值与实测值的线性回归方程的决定系数为 0.644, 相对均方根误差为 6.734%。相关分析和估算模型验证结果表明, 基于冠层图像分析的冬小麦拔节期叶面积指数和叶片 SPAD 值的监测是可行的。

关键词: 冬小麦; 冠层图像; 叶面积指数; 叶片 SPAD 值

中图分类号: S126; S512.1⁺1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1674-148X. 2016. 02. 003

Estimation of Winter Wheat Leaf Area Index and Leaf SPAD Value Based on Digital Canopy Image

ZHAI Mingjuan, LIU Yadong, CUI Rixian

(College of Agronomy and Plant Protection, Qingdao Agricultural University/Shandong Provincial

Key Laboratory of Dryland Farming Techniques, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to study the feasibility to using canopy color image analysis to estimate winter wheat leaf area index (LAI) and leaf SPAD value during the elongation stage. Color digital images of winter wheat canopies grown under six levels of nitrogen application experiments were taken for four times, meanwhile LAI and leaf SPAD value were measured. Winter wheat canopy cover and ten color indices including red, green, and blue intensity of color digital images were obtained by using color image analysis program. Correlation analysis was conducted to identify the relationships between LAI, Leaf SPAD value and canopy cover, ten color indices. Stepwise multiple linear regression method was used to establish the models to determine winter wheat LAI and leaf SPAD value. The results showed that, LAI was highly correlated with canopy cover and several color indices; leaf SPAD value was highly correlated with normalized redness intensity (r), normalized greenness intensity (g), normalized blueness intensity (b), and Hue. The stepwise regression models for estimating LAI and leaf SPAD value were constructed. The validation results indicate that the models for estimating LAI and Leaf SPAD value had good performance, and also showed the potential of the method of canopy image analysis to assess the growth and nitrogen nutrition status of winter wheat during the elongation stage.

收稿日期: 2015-03-13

基金项目: 农业部“948”项目(2012-Z5); 山东省旱地作物水分高效利用科研创新团队项目; 青岛农业大学大学生创新计划项目资助

作者简介: 翟明娟(1990-), 女, 山东临沂人, 学士, 研究方向: 作物生态

通讯作者: 崔日鲜, E-mail: chis@qau.edu.cn

Key words: winter wheat; canopy image; leaf area index; leaf SPAD value

作物长势是指作物的生长状况和生长趋势,可以用个体和群体特征来描述,个体特征包括株高、分蘖数、叶片数量、叶片颜色等,群体特征则包括群体密度、叶面积指数和地上部生物量等^[1]。作物长势指标中,叶面积指数是反映作物个体和群体特征的指标,也是作物长势判断和产量预测的重要指标^[2];叶绿素是作物吸收光能的主要物质,直接影响作物的光能利用^[3],对冬小麦生长过程中实施栽培管理具有重要意义。传统获取叶面积指数和叶片叶绿素含量的方法是通过田间破坏性取样和室内分析。叶面积指数方面,除传统方法外,冠层分析系统是一种实用的叶面积指数测定方法,但常受叶片倾角、叶片形态等的影响^[2]。而叶片叶绿素含量方面,常利用 SPAD 叶绿素仪测定作物叶片叶绿素的相对含量。传统获取作物长势信息的田间取样及室内分析方法,既带有破坏性,又有耗时间和资源的缺点,而 SPAD 叶绿素仪虽具有无损监测的特点,但 SPAD 叶绿素仪的叶片测定面积小,仅为 6 mm²,大面积测定需要较长时间,且叶片测定位置(叶位、叶片部位)不同所带来的误差也较大^[4-5]。

随着数码图像采集设备和计算机图像处理技术的发展,数码图像分析技术在作物长势监测领域的研究逐渐增多^[4-10]。Li 等^[6]从小麦冠层图像中提取冠层覆盖度,指出冠层覆盖度与小麦叶面积指数、地上部生物量和地上部氮素浓度显著相关。Lee 等^[7]指出冠层覆盖度与叶面积指数、地上部干物质质量和地上部氮积累量呈显著相关,并拟合了基于冠层图像分析的叶面积指数、地上部干物质质量等长势指标的估算模型。Jia 等^[8]研究指出棉花冠层图像中提取的冠层覆盖度与由手持式主动遥感光谱仪获取的归一化植被指数、叶面积指数及地上部生物量呈极显著相关,并拟合了基于冠层覆盖度的棉花长势估算模型。Wang 等^[9]得出水稻冠层图像参数与叶面积指数、地上部生物量和地上部含氮量呈显著相关。王娟等^[10]研究指出棉花全生育期内,地面覆盖度与棉花叶面积指数、生物量及氮素积累量呈显著相关,并得出地面覆盖度能较好地预测棉花的叶面积指数、生物量及氮素积累量的结论。冬小麦方面,有关某生育阶段冠层数码图像色彩参数与叶面积指数、叶片 SPAD 值相关性方面的研究报道较少。

本研究拟在探究冬小麦拔节期图像冠层覆盖度

及图像色彩指数与冬小麦叶面积指数及叶片 SPAD 值间的相关性,并建立基于冠层覆盖度及色彩指数的冬小麦叶面积指数及叶片 SPAD 值的估算模型,以期基于冠层数码图像分析的冬小麦及其他作物长势监测技术的构建提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年 10 月至 2014 年 6 月在青岛农业大学胶州试验基地进行。供试品种为济麦 22,试验地 0~20 cm 土壤碱解氮 72.67 mg/kg,速效磷 26.38 mg/kg,速效钾 116.95 mg/kg,有机质 15.2 g/kg。试验设 6 个施氮量处理,折合纯氮分别为 0、60、120、180、240、300 kg/hm²。磷肥用量为 P₂O₅ 100 kg/hm²,钾肥用量为 K₂O 120 kg/hm²,全部作为基肥与氮肥(尿素)一次性施入。试验小区大小为 10 m×8 m,行距 18 cm,基本苗 3.5×10⁶/hm²。试验采用随机区组设计,3 次重复。田间管理按常规方法进行。

1.2 测定项目

图像采集之后,图像采集区域内的冬小麦植株进行破坏性取样,样本按部位分样,测叶面积,在 105℃杀青 30 min,于 72℃下烘干至恒重,测干物质质量。图像采集后,用 SPAD 叶绿素仪(SPAD-502,日本 Konica Minolta)测定每个小区 15 株冬小麦植株最上位展开叶的 SPAD 值,在叶片长度 1/2 处进行测定。

1.3 数码图像采集

在冬小麦的拔节期,于 2014 年 3 月 27 日、4 月 6 日、4 月 13 日和 4 月 20 日进行冬小麦冠层图像采集。冠层图像拍摄时间为 11:00—13:00 之间,遮荫拍摄。数码相机(佳能 60D)拍摄模式设定为 P 模式(相机自动设定快门速度和光圈值曝光),关闭内置闪光灯,感光度 ISO 设定为 400。拍摄时将自制 725 cm×45 cm 的取景框置于小麦冠层顶端,框内有 4 行小麦,并将一个大小 15.3 cm×10.2 cm 的爱色丽 Mini 白平衡卡(X-Rite Mini White Balance Card)作为标准白板置于取景框左上角,用于后期图像白平衡处理。相机垂直对准取景框,距离 100 cm,图像以 RAW 格式保存,图像大小为 2592 像素×1728 像素。

1.4 图像处理

利用图像分析软件(冬小麦冠层图像分析系统,用微软 Visual Basic 编写)从冬小麦冠层图像中分割冬小麦图像,读取冬小麦图像每像素点的 R 、 G 和

B 亮度值,进而计算冠层覆盖度^[6]及其他 7 种色彩指数(表 1)。

表 1 冠层覆盖度及色彩参数的计算公式

参数	计算公式	文献
冠层覆盖度 CC	$CC = \frac{\text{冬小麦图像像素数}}{\text{冠层图像总像素数}}$	Li 等 ^[6]
红光标准化值 r	$r = \frac{R}{R+G+B}$	王远等 ^[11]
绿光标准化值 g	$g = \frac{G}{R+G+B}$	Lee 等 ^[7]
蓝光标准化值 b	$b = \frac{B}{R+G+B}$	王远等 ^[11]
归一化差值指数 NDI	$NDI = \frac{r-g}{r+g+0.01}$	Mao 等 ^[12]
色调 Hue	$Hue = \begin{cases} \arccos\left\{\frac{[(R-G)+(R-B)]/2}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\} & \text{if } B \leq G \\ 2\pi - \arccos\left\{\frac{[(R-G)+(R-B)]/2}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\} & \text{if } B > G \end{cases}$	田岩等 ^[13] 、何明一等 ^[14]
饱和度 SAT	$SAT = 1 - \frac{3}{(R+G+B)}[\min(R, G, B)]$	田岩等 ^[13] 、何明一等 ^[14]
亮度 INT	$INT = \frac{1}{3}(R+G+B)$	田岩等 ^[13] 、何明一等 ^[14]

1.5 数据处理

6 个施氮量处理、3 次重复、4 次取样时期,共获取 72 组冬小麦冠层图像色彩指数和对应的叶面积指数及叶片 SPAD 值。数据中,随机选取 52 组样本数据用于建立叶面积指数和叶片 SPAD 值的回归估算模型,其余 20 组样本数据用于验证模型。利用决定系数(R^2)、均方根误差($RMSE$)、相对均方根误差($RRMSE$),对回归模型进行拟合优度的考察及验证。玉米长势估算模型的建立、验证采用 Excel2007 和 SAS9.1 软件。

2 结果与分析

2.1 冬小麦冠层覆盖度及冠层图像色彩指数与叶面积指数的相关性分析

图 1 为叶面积指数与冠层覆盖度及冠层图像色彩指数的相关分析结果,从图中可看出,除亮度(INT)外,叶面积指数与冠层覆盖度及冠层图像色彩指数间均呈显著相关,与冠层覆盖度、红光亮度值、红光标准化值、蓝光标准化值、归一化差值指数

和色调间的相关程度较高,相关系数的绝对值均大于 0.45,其中,与冠层覆盖度的相关程度最高,相关系数为 0.881,达到极显著水平($r_{0.05} = 0.232$, $r_{0.01} = 0.302$)。叶面积指数与冠层覆盖度、蓝光亮度值、蓝光标准化值、色调呈正相关,而与红光亮度值、绿光亮度值、红光标准化值、绿光标准化值、归一化差值指数和饱和度等呈负相关。

2.2 冬小麦冠层覆盖度及冠层图像色彩指数与叶片 SPAD 值的相关性分析

图 2 为叶片 SPAD 值与冠层覆盖度及冠层图像色彩指数的相关分析结果,从图 2 中可看出,除亮度(INT)外,叶片 SPAD 值与冠层覆盖度及冠层图像色彩指数呈显著相关,其中,与冠层覆盖度、蓝光亮度值、蓝光标准化值和色调呈正相关,与红光亮度值、绿光亮度值、红光标准化值、绿光标准化值、归一化差值指数和饱和度呈负相关。红光标准化值、绿光标准化值、蓝光标准化值和色调间的相关系数绝对值均高于 0.70,相关程度较高($r_{0.05} = 0.232$, $r_{0.01} = 0.302$)。

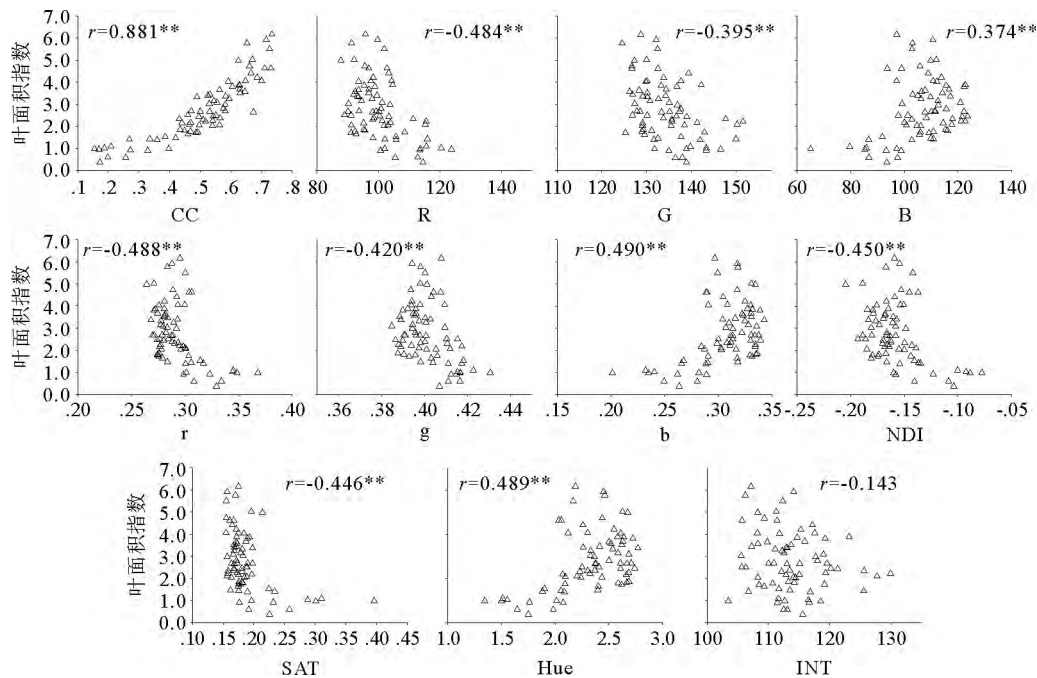


图1 冬小麦叶面积指数与冠层覆盖度及冠层图像色彩指数的关系

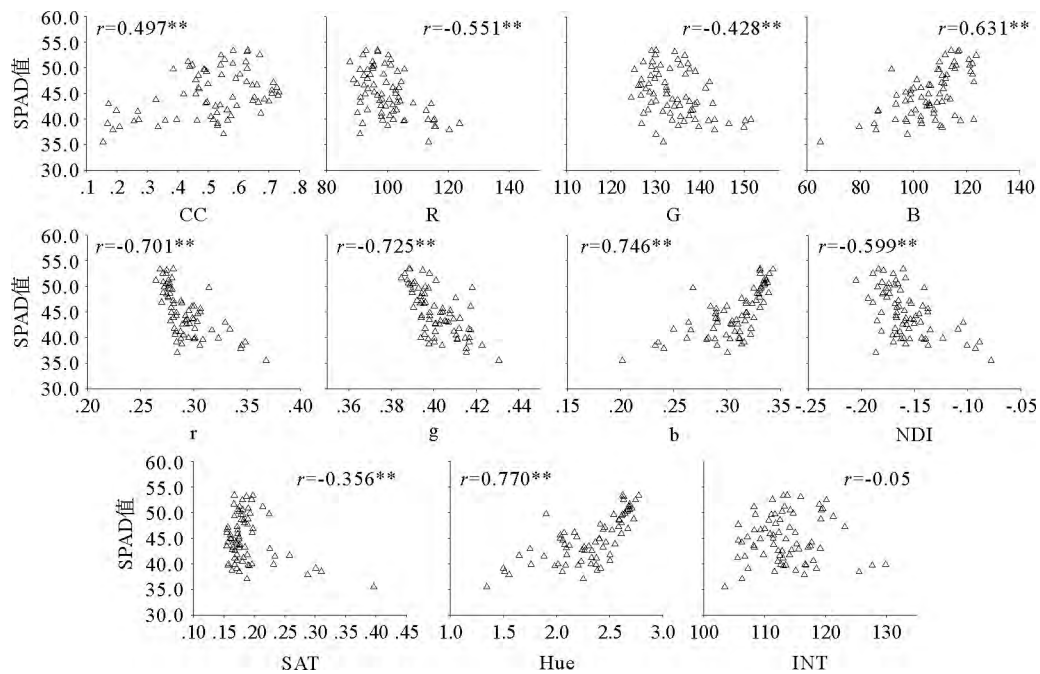


图2 冬小麦叶片 SPAD 值与冠层覆盖度及冠层图像色彩指数的关系

2.3 冬小麦叶面积指数及叶片 SPAD 值估算模型的建立及验证

相关分析结果表明冠层覆盖度及部分冠层图像色彩指数能够较好地反映拔节期冬小麦叶面积指数和叶片 SPAD 值的变化,它也表明基于冬小麦冠层图像色彩指数和冠层覆盖度的叶面积指数和叶片 SPAD 值的估算具有一定的可行性。另外,考虑到叶面积指数、叶片 SPAD 值与冠层覆盖度及图像色

彩指数间的非线性相关,对变量进行自然对数和指数转换(NDI)。以冠层覆盖度和冠层图像色彩指数为自变量,以叶面积指数、叶片 SPAD 值为因变量,采用逐步回归方法分别建立了估算叶面积指数和叶片 SPAD 值的回归模型,以 $\alpha=0.05$ 作为剔出或入选变量的显著性水平。表 2 为叶面积指数和叶片 SPAD 值的估算模型及其统计参数。叶面积指数和 SPAD 值估算模型的决定系数分别为 0.850

和 0.680, 相对均方根误差分别为 21.969% 和 5.895%。

表 2 基于冠层覆盖度及色彩指数的冬小麦叶面积指数和 SPAD 值估算模型及其统计参数

长势指标	估算模型	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	相对均方根误差 RRMSE/%
叶面积指数 LAI	$LAI = CC^{2.233} \times g^{-7.083} \times Hue^{-1.378} \times SAT^{1.663}$	0.850	0.651	21.969
叶片 SPAD 值	$SPAD \text{ 值} = \exp(\exp(0.056 + NDI) \times r^{-1.176} \times g^{-1.928} \times SAT^{0.185})$	0.680	2.662	5.895

为验证叶面积指数和叶片 SPAD 值估算模型的预测精度,利用两个回归模型计算了叶面积指数和 SPAD 值,并通过决定系数、均方根误差、相对均方根误差和实测值与预测值的 1:1 关系图来评价模型的表现。图 3 为叶面积指数、叶片 SPAD 值的实测值与预测值的 1:1 关系图及统计参数,从图中可看出,叶面积指数和叶片 SPAD 值估算模型的决

定系数分别为 0.771 和 0.644,均达到极显著水平 ($r_{0.05} = 0.444$, $r_{0.01} = 0.561$); 叶面积指数和叶片 SPAD 值估算模型的相对均方根误差分别为 25.181% 和 6.734%。模型验证结果表明,基于冠层图像色彩指数和冠层覆盖度的估算模型较好地估测拔节期冬小麦叶面积指数和叶片 SPAD 值。

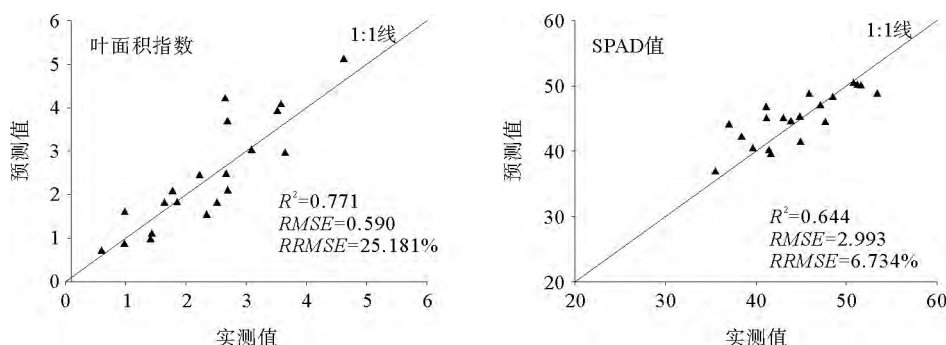


图 3 冬小麦叶面积指数和叶片 SPAD 值实测值与预测值的关系

3 结论与讨论

拔节期是冬小麦生育过程的一个关键时期,其生育状况直接影响穗数、穗粒种重产量构成要素,准确掌握冬小麦拔节期长势是实施田间管理的前提。本研究为探究冠层数码图像分析技术在冬小麦长势监测中的应用,首先,基于冠层图像分析获取冠层覆盖度及包括冠层图像红光、绿光和蓝光亮度值在内的 10 种色彩指数,其次,分析了叶面积指数及叶片 SPAD 值与冠层覆盖度及 10 种色彩指数的相关关系,最后,利用逐步回归方法构建了冬小麦拔节期叶面积指数和叶片 SPAD 值的估算模型。

Li 等^[6]、Lee 等^[7]、王娟等^[10]等指出冠层覆盖度与小麦、水稻和棉花叶面积指数呈显著相关,而 Lee 等^[7]基于冠层覆盖度与叶面积指数间的相关性拟合了叶面积指数的估算模型,本研究结果也表明冬小麦拔节期冠层覆盖度与叶面积指数呈显著相关,达到极显著水平,另外,与红光亮度值、红光标准化值、蓝光标准化值、归一化差值指数和色调等也与

叶面积指数呈极显著相关。利用拔节期叶面积指数与冠层覆盖度及其他色彩指数间的相关性,利用逐步回归方法拟合了叶面积指数估算模型,模型预测值与实测值的回归关系达到了显著水平,其决定系数为 0.771。

叶绿素是作物吸收光能的主要物质,直接影响作物的光能利用^[3],植物的叶绿素对可见光波段的反射率变化敏感,Dash 等^[16]指出可见光波段的绿光、红光及近红外波段附近的光谱反射率对叶绿素含量较敏感。靳彦华^[3]等通过冬小麦冠层原始光谱反射率、冠层光谱导数反射率与 SPAD 值的相关系数曲线,得出冬小麦叶绿素含量的敏感波段为 500、690、760 nm 和 470、630、723 nm,并构建了冬小麦叶绿素含量的预测模型。有关作物 SPAD 值预测方面的研究大多利用冠层高光谱反射数据,而基于冠层图像分析的 SPAD 值估算方面的研究报道较少。本研究以拔节期冠层图像获取的冠层覆盖度和色彩指数为基础,探讨了冬小麦拔节期叶片 SPAD 值的估算潜力。结果表明,拔节期冬小麦叶片

SPAD 值与由冠层图像分析获取的红光标准化值、绿光标准化值、蓝光标准化值和色调等呈极显著相关,即叶片 SPAD 值对可见光的红、绿、蓝波段较敏感。利用逐步回归方法构建的拔节期叶片 SPAD 值估算模型计算的预测值与实测值的回归关系达到了显著水平,决定系数分别为 0.644,相对均方根误差为 6.734%。

研究表明,基于冠层图像分析的冬小麦叶面积指数和叶片 SPAD 值的估测具有一定的可行性,可为基于冠层数码图像分析的作物长势监测技术的建立提供参考依据。

参考文献:

- [1] 杨邦杰,裴志远. 农作物长势的定义与遥感监测[J]. 农业工程学报,1999,15(3): 214—218
- [2] 刘镭源,王纪华,杨贵军,等. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较[J]. 农业工程学报,2011,27(3): 220—224
- [3] 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
- [4] Pagola M, Oritiz R, Irigoyen I, et al. New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis: Comparison with SPAD—502[J]. Computers and electronics in agriculture, 2009, 65(2): 213—218
- [5] Jia L, Chen X, Zhang F, et al. Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China plain[J]. Journal of plant nutrition, 2004, 27(3): 441—450
- [6] Li Y, Chen D, Walker C N, et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera[J]. Field Crop Research, 2010, 118(3): 221—227
- [7] Lee K J, Lee B W. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 48: 57—65
- [8] Jia B, He H B, Ma F Y, et al. Use of a digital camera to monitor the growth and nitrogen status of cotton[J]. The Scientific World Journal, 2014, Article ID 602647
- [9] Wang Y, Wang D J, Zhang G, et al. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G—R thresholding method[J]. Field Crops Research, 2013, 149: 33—39
- [10] 王娟,雷咏雯,张永帅,等. 应用数字图像分析技术进行棉花氮素营养诊断的研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(1):145—149
- [11] 王远,王德建,张刚,等. 基于数码相机的水稻冠层图像分割及氮素营养诊断[J]. 农业工程学报,2012,28(17):131—136
- [12] Mao W, Wang Y, Wang Y. Real time detection of between—row weeds using machine vision[C]. American Society of Agricultural and Biological engineers Paper Number: 031004, 2003
- [13] 田岩,彭复员. 数字图像处理与分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009:140—144
- [14] 何明一,卫保国. 数字图像处理[M]. 北京:科学出版社,2008: 233—253
- [15] Dash J, Corran P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23): 5403—5413