

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.043

基于机器视觉的棉花氮素营养诊断系统设计与试验

贾彪¹ 马富裕²

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 石河子大学农学院, 石河子 832002)

摘要: 采用数码相机和 CCD 数字摄像头为图像监测设备,融合机器视觉技术,集成数字图像处理技术、农业物联网技术、Web 远程控制技术、信息传输服务技术和数据库管理技术等构建了远程服务系统平台。通过 2 年试验对棉花的生长状况进行实时跟踪监测,获取其冠层图像,运用数字图像处理技术对棉花群体冠层图像进行分割,筛选棉花长势监测与氮素营养诊断反应敏感的特征颜色参数覆盖度,构建了覆盖度与棉花地上部总含氮量间的关系模型。研究表明,覆盖度与棉花地上部总含氮量间指数函数模型相关性最高,其决定系数为 0.978,根均方差为 1.479 g/m²。依据棉花覆盖度与氮素营养诊断的最佳模型,搭建了棉花长势长相监测中心(田间监测)、网络信息服务控制中心(服务器)、图像分析与数据处理中心、决策诊断与评价中心以及用户浏览中心,形成一个大型环式“一网三层五中心”棉花监测管理诊断体系,初步实现对棉花生长信息和氮素营养状况快速准确的监测与诊断。

关键词: 棉花; 营养诊断; 生长监测; 机器视觉; 远程服务平台

中图分类号: S127; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0305-06

Design and Experiment of Nitrogen Nutrition Diagnosis System of Cotton Based on Machine Vision

Jia Biao¹ Ma Fuyu²

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832002, China)

Abstract: Machine vision technology has been well developed and widely used to monitor crop growth and diagnosis the nitrogen status of crops. A system that combines machine vision technology and near ground remote sensing to monitor crop growth and nitrogen status was established. The system, which should be convenient, efficient, practical and widely applicable, could provide a new theoretical basis and technical support for crop monitoring. The objectives of this study were to calibrate a remote service system platform for monitoring cotton growth and nitrogen nutrient status. The platform involves machine vision technology, digital image recognition segmentation processing technology, agricultural internet of things technology, Web network information transmission service technology, and remote database management technology. In this study, the nitrogen nutrient status of cotton being real-time monitored by two-year experiment data. Color images of cotton canopies were captured with a digital camera fitted with a charged-coupled device (CCD) as an image sensor. An image analysis approach was developed to extract the feature parameters canopy cover of the images. The model described the relationship between the canopy cover and total nitrogen content of cotton aboveground. The results indicated that the best relationship between canopy cover and aboveground total nitrogen content had an R^2 value of 0.978 and an RMSE value of 1.479 g/m². The platform provides users with access to the cotton growth monitoring center (field monitoring), the network information service control center (server), the image analysis

收稿日期: 2015-09-28 修回日期: 2015-12-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(31560339)和宁夏大学博士启动基金项目(BQD2014011)
作者简介: 贾彪(1979—),男,讲师,博士,主要从事精准农业信息化与作物水肥管理研究,E-mail: jiabiao2008@163.com
通信作者: 马富裕(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事作物水分生理与精准农业信息化研究,E-mail: mfy_agr@shzu.edu.cn

and data processing center, the diagnostic decision-making and evaluation center, and the user browsing center. Based on computer vision technology, this “one network, three server layers, and five centers” system can be used to remotely monitor cotton growth and nitrogen status. In conclusion, digital cameras have good potential as a near-ground remote assessment tool for monitoring cotton growth and nitrogen status.

Key words: cotton; nutrition diagnosis; growth monitoring; machine vision; remote service system platform

引言

基于机器视觉的作物生长监测与诊断技术是近地面遥感监测方法之一,其优质清晰的数字图像既能方便地对作物生长发育的季节性变化进行评估^[1,2],也能实时高效、快速准确、自动无损地提供作物长势信息和营养状态诊断^[2],在信息化精准农业生产中扮演着极其重要的角色^[3],还可以帮助农户适时采取农艺措施(施肥、灌水、耕作、收割以及病、虫、草、鼠害防治等),从而提高农作物产量与品质^[2-5]。

目前,用于作物生长信息监测与营养诊断的主要设备是数码相机和高清数字摄像头^[6-9],其获取作物冠层图像的特点是实时规范、精确度高、无偏差^[10-11]且监测误差小等^[4,11-14]。国内外大量研究都是通过数码照相法获取作物覆盖度等特征参数进行作物生长监测^[4,15-18],研究对象包括油菜^[19]、小麦^[3,6,8,17,20,21]、玉米^[6,10,11,18,22]和水稻^[13-14]等作物,研究方法均采用数码相机每隔一定时间段(固定步长)采集作物图像^[1-3,5,10-19,21,23-27],并建立图像特征参数与作物农学属性间的关系模型^[4,5,13-19]。然而,利用数码照相法和数字图像处理技术所建立的图像特征参数与作物生长模拟模型中,对棉花长势监测和营养状况评价的研究极少。棉花生长发育进程和产量形成受肥料影响很大,尤其是氮肥的影响。若利用数码相机对棉花进行长势监测和氮素营养状况评价,可提高棉花氮肥利用率,从而增加产量和提高品质。

本文设计基于机器视觉技术的棉花长势监测与养分诊断远程服务平台。主要采用1 220万像素的佳能数码相机(Canon EOS 450D型,Canon Inc.,日本)获得棉花冠层垂直投影图像,构建棉花图像采集系统,再利用VC++程序设计语言和Matlab 7.1数字图像处理软件对获取的棉花冠层图像进行处理,搭建图像处理系统,计算出棉花群体冠层投影面积在整个图像中所占面积的比重,得出棉花冠层覆盖度,然后通过试验数据建立覆盖度与棉花地上部总含氮量间的关系模型。

1 棉花冠层图像采集系统

1.1 棉花群体冠层图像获取

选用1 220万像素Canon EOS 450D型数码相机获得棉株冠层图像。数码相机安置在一个自制的铝合金单脚支架上,距地面高度2.20 m,镜头与地面垂直拍摄。机械化种植标准宽膜可以播种6行,相机单脚架安装在2.05 m宽膜中间位置1.025 m处,即安装在棉花种植模式的第3行和第4行中间位置,此安装可保证拍摄时每幅图像能完整获取6行棉株,采用远程遥控器抓拍冠层图像。

图像获取过程难免会受到多种环境因子的影响,如天气变化、光照强度等。为确保获取清晰可靠的高清数字图像,根据新疆当地时间,拍摄时间段选为北京时间12:00—14:00。天气状况良好,无风、无云或风速较小的晴天,图像分辨率为4 272像素×2 848像素,图像存储格式为JPEG格式。

1.2 冠层颜色参数提取

将1.1节获取的棉花冠层图像发送到计算机,基于Microsoft Visual Studio.NET软件开发平台,运用Visual C++程序设计语言和Matlab编写代码,将获取的每一幅棉花冠层图像进行分割,数据处理,提取冠层图像对应的R、G、B^[23],并根据RGB模型和HIS模型2种颜色空间的相互关系,转换得到H、S、I^[23](图1)。

1.3 冠层覆盖度获取

棉花冠层覆盖度(Canopy cover,CC)是指棉花群体(包括茎、叶、蕾、铃、枝等)在单位面积内的垂直投影面积所占百分比^[24]。本研究棉花CC的获取方法有2种。

方法1是通过图像分割提取R、G、B^[23],利用覆盖度通用推断公式进行推算^[5](图2),计算公式为

$$C_c = \frac{(1+L)(G-R)}{G+R+L}$$

(1)

式中 C_c ——棉花冠层覆盖度
 R ——图像中红光分量值
 G ——图像中绿光分量值
 L ——土壤基值,取0.5^[5]

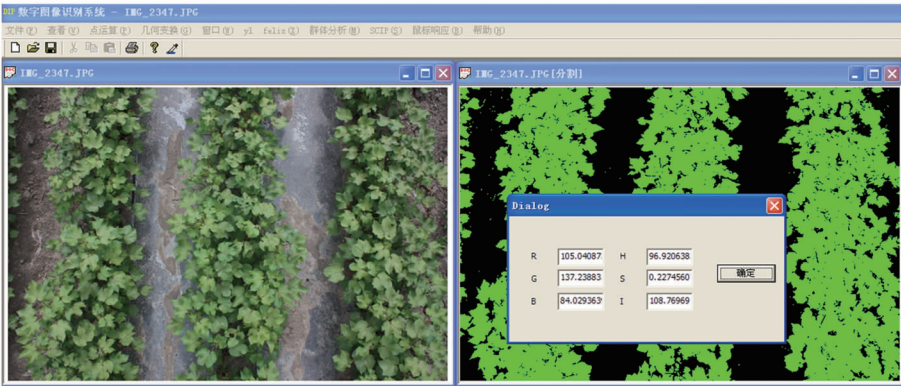


图 1 棉花不同生育阶段冠层图像 R 、 G 、 B 和 H 、 I 、 S

Fig.1 R , G , B , H , I , S values of canopy image of cotton at different growth stages

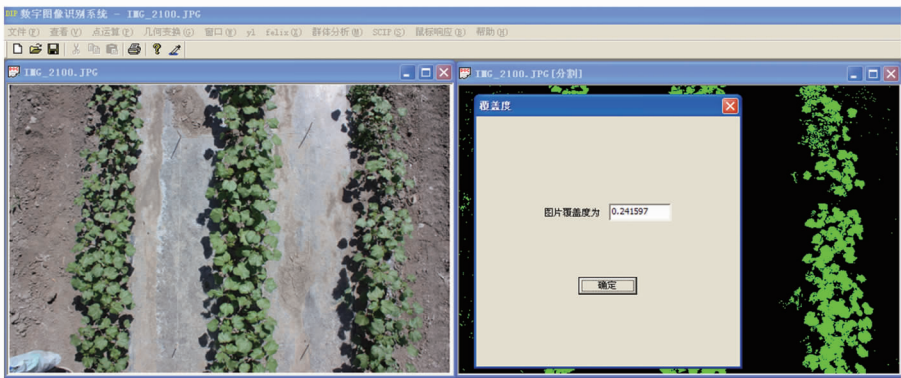


图 2 棉花冠层图像被分为冠层与土壤背景层后提取的冠层覆盖度

Fig.2 Two layers in canopy images and extraction of canopy cover

方法 2 是利用冠层像素数占整个图像像素数的百分比获取 CC。采用图像分割处理,提取数字图像中棉花冠层和土壤背景层^[24-25],改进前人研究思路^[24-25],从而获得棉花冠层覆盖度(图 3)。简言之,为了准确描述复杂自然环境中棉花冠层图像,运用计算机算法将棉花冠层图像分为冠层和土壤背景层,然后将棉花冠层图像分为光照冠层(Sunlit canopy, SC)与阴影冠层(Shaded canopy, ShC);将土壤背景层分为光照土壤层(Sunlit soil, SS)和阴影土壤层(Shaded soil, ShS)。光照冠层和阴影冠层像素所占总像素的百分比之和为 C_c 。其数学表达式为

$$C_c = P_{SC} + P_{ShC} \tag{2}$$

$$P_{SC} + P_{ShC} + P_{SS} + P_{ShS} = 1 \tag{3}$$

式中 P_{SC} ——光照冠层像素所占百分比
 P_{ShC} ——阴影冠层像素所占百分比
 P_{SS} ——光照土壤像素所占百分比
 P_{ShS} ——阴影土壤像素所占百分比

棉花冠层 CC 计算机算法如下:

if $R < 2.6 B$ and $R < G - 5$ and $G > B + 5$ then
canopy pixel
if $R + G + B < 200$ then sunlit canopy (SC)
pixel
else shaded canopy (ShC) pixel
end if

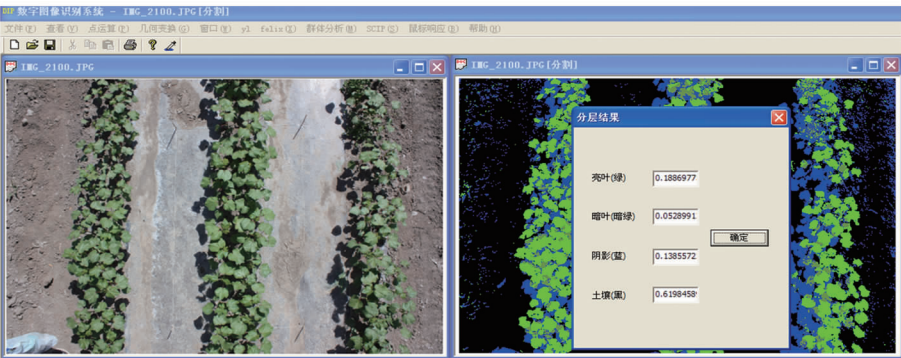


图 3 棉花冠层图像 4 层结果

Fig.3 Four class values in canopy images of cotton

```
else soil backgrounds
    if R + G + B > 250 then sunlit soil (SS) pixel
    else shaded soil (ShS) pixel
end if
end if
```

前人研究表明,随着作物生育进程的不断推进,作物覆盖地面的范围越来越大,CC 越来越大,当 CC 达到一定值时,通过数码相机获取作物 CC 稍偏低 于实际覆盖度^[14]。主要原因是作物冠层上部叶片 遮盖了作物下层的叶片,在图像上形成黑暗部分 (并非阴影冠层)。这部分阴影区域在图像中占据 了相对较小一部分冠层图像,计算机在识别时误认 为土壤背景并删除。然而,方法 2 提取棉花冠层 CC 结果表明(图 3),这部分误差较小,并不影响应用 CC 进行作物长势监测和氮素营养状态诊断的有效性。

2 远程监测与诊断系统平台

该硬件平台客户端为计算机和智能手机 (Android 系统),远程终端采用 B/S 结构,该平台由 棉田视频监控中心(田间监测)、网络远程控制服务 中心(服务器)、图像分析处理中心、系统决策诊断 中心以及用户浏览中心构成。形成一个大型环式的 集棉花监测管理于一体的远程视频监测系统,即 “一网三层五中心”网络服务平台(图 4)。平台以 开放式的物联网架构技术实现分析与决策,直接面 向棉花种植户。整个系统兼容性强,可相对独立工 作。棉田视频监控中心主要完成田间数字图像采 集、基础动态数据采集。图像分析处理中心是将棉 田视频监控中心获取的图像数据,通过图像处理软 件进行分析处理。系统决策分析中心包括模型库管 理和模型参数设定等功能,再将决策分析结果传输 至网络服务中心或手机用户。用户浏览中心实现棉 花种植户、农户以及智能手机客户等通过局域网或 无线网浏览棉田动态。

3 试验

3.1 数据来源

选用 2013—2014 年石河子大学农学院田间试 验站(44°20'N,86°3'E)数据。供试品种新陆早 43(XLZ 43)和新陆早 48(XLZ 48),设置 5 个氮素 处理:N0(0 kg/hm²)对照、N1(120 kg/hm²)、 N2(240 kg/hm²)、N3(360 kg/hm²)、N4(480 kg/hm²), 完全随机排列,3 次重复。应用上述方法获取棉田 冠层图像,提取其颜色特征参数,计算冠层覆盖 度。

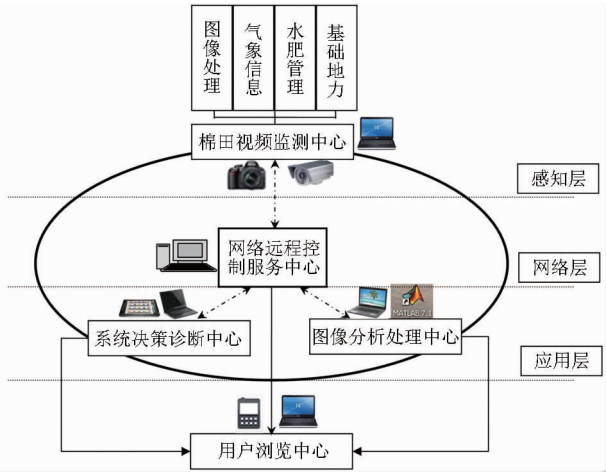


图 4 棉花生长远程视频监测系统框图
Fig. 4 Remote video growth monitoring system of cotton

3.2 覆盖度与棉株地上部总含氮量间动态关系

运用 Origin Pro 8.5 软件将 2 年来 2 个棉花品 种群体冠层 CC 与棉株地上部总含氮量进行拟合, 得到 CC 与棉株地上部总含氮量间的指数函数表 达式,公式为

$$Y_N = ke^{bCc} \tag{4}$$

式中 Y_N ——棉株地上部总氮含量
 k ——曲线函数式初始值
 b ——曲线函数式形状参数

图 5a 直观描述了 2 个品种在盛花期之前 CC 与棉株地上部总含氮量的关系,即 CC 到达最大值 1 或封垅时(出苗后 90 d 左右),CC 与棉株地上部总 含氮量间的动态分布;由图 5a 模拟结果发现, XLZ 43 和 XLZ 48 间拟合曲线的形状差别不明显; 由表 1 参数比较结果可知,2 个品种间的 k 和 b 变化 范围小,规律不明显。主要原因是本研究选用的棉 花品种,均属于早熟型陆地棉,是北疆主栽品种,且 属于同一品系遗传性状,对温光的敏感度相似,其生 长发育规律和株型整齐度差异不大,且同一氮素水 平下植株叶片大小、叶形、叶倾角、叶片颜色以及株 高等都具有一定的相似性。

图 5b 描述了 5 个不同氮素水平下在盛花期之 前,即 CC 到达最大值 1 或封垅时(出苗后 90 d 左右),CC 与棉株地上部总含氮量间的动态分布。由 图 5b 和表 2 参数值可知,不同氮素水平棉花冠层 CC 与棉株地上部总含氮量间非线性指数函数关系 差异显著,且各氮素处理间参数 k 、 b 具有明显的规 律性变化,均随着施氮肥的增加而增加,即 $k_{N4} > k_{N3} > k_{N2} > k_{N1} > k_{N0}$, $b_{N4} > b_{N3} > b_{N2} > b_{N1} > b_{N0}$;其 参数值变化如下, k 从 0.497 增加到 0.801, b 从 4.238 增加到 4.265;这充分证明不同氮素水平下, 棉花冠层覆盖度 CC 与棉株地上部总含氮量间密切

相关,具有很好的模拟效果和生物学意义。由此可见,在棉花从出苗到盛花期这个生长阶段,图像特征参数 CC 能准确诊断棉花氮素营养状况,可作为数字化精准施氮肥和最佳施氮肥的监测指标。

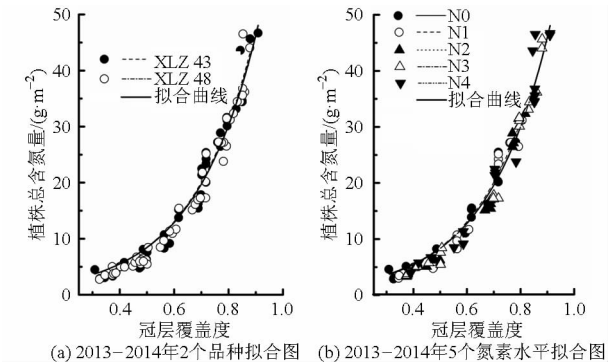


图 5 覆盖度与棉株地上部总含氮量间关系

Fig. 5 Relationship between canopy cover and aboveground total nitrogen content

表 1 不同品种间覆盖度与棉株地上部总含氮量间指数函数关系

作物品种	参数		根均方差/ (g·m ⁻²)	决定系数
	k	b		
XLZ 43	0.712 ± 0.019	4.285 ± 0.020	1.483	0.966 **
XLZ 48	0.769 ± 0.017	4.251 ± 0.018	1.437	0.969 **

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关,下同。

表 2 不同氮素水平下覆盖度与棉株地上部总含氮量间指数函数关系

氮素水平	参数		根均方差/ (g·m ⁻²)	决定系数
	k	b		
N0	0.497 ± 0.034	4.238 ± 0.042	1.793	0.949 **
N1	0.549 ± 0.021	4.241 ± 0.032	1.459	0.965 **
N2	0.632 ± 0.027	4.248 ± 0.025	1.328	0.975 **
N3	0.752 ± 0.024	4.256 ± 0.023	1.287	0.979 **
N4	0.801 ± 0.037	4.265 ± 0.034	1.384	0.957 **

由表 2 结果表明,CC 与棉株地上部总含氮量间有显著的相关性,存在着非线性指数函数关系;5 个氮素水平的 k 具有明显差异,随施氮量的增加其 k 发生规律性变化,主要是由于施氮量不同其棉花叶片大小、叶肉厚度与下垂程度不同。然而,应用 CC

进行作物长势监测也存在一定的局限性,理论上 CC 的取值范围从 0 到 1,但当 CC 达到最大值 1 时,CC 不再增大,但是棉花的总含氮量还继续增加,因此应用数码相机获取 CC 法进行棉花长势监测或氮素营养状态评价,仅局限在 CC 达到最大值 1 之前,超出这个生长发育阶段后,CC 就无法准确评价棉花生长监测或氮素营养状态。

3.3 覆盖度与棉株地上部总含氮量间模拟模型建立

随着棉花生育进程推移,利用 Origin Pro 8.5 软件,通过指数函数式(4)将 2 年试验中提取的棉花冠层图像 CC 与棉株地上部总含氮量间动态变化关系拟合,建立 CC 与其统计回归模型 $Y_N = 0.619e^{4.262C_c}$ ($0 < C_c \leq 1$),由根均方差和决定系数表明,CC 值与植株总氮累积量拟合度好,精确度高,其根均方差为 1.479 g/m²,决定系数为 0.978。

氮肥的应用主要取决于土壤氮的供应量和作物氮的需求量^[20,28-29]。在农业生产中,传统方法在播种前对土壤样本进行提取分析,得到土壤对作物潜在的氮供应量,作物对氮肥需求量仅仅取决于播前第 1 次土壤测试,这种传统的测土配方最终将导致由于过量施氮肥或氮肥不足而引起的环境毁坏和经济损失。本研究应用数码相机实时无损进行近地遥感监测,是在作物生长季节获取冠层图像,提取 CC,通过氮素营养诊断系统实时跟踪监测,及时掌握作物氮肥需求量并做出决策,对于推进现代农业信息技术的发展具有重要的实用价值。

近年来,随着自动控制技术和无人机技术在农业生产中逐渐应用,3D 数码相机(Three-dimensional digital cameras)的快速发展,若将无人机和 3D 数码相机获取 CC 技术与作物远程监测诊断决策系统有机结合起来,可为农业信息化生产和精准管理带来新的技术创新与突破。

4 结论

- (1) 设计了一种基于机器视觉技术的棉花生长监测与氮素营养诊断系统。
- (2) 建立了棉花冠层覆盖度与植株地上部总含氮量间关系模型 $Y_N = 0.619e^{4.262C_c}$ ($0 < C_c \leq 1$)。
- (3) 棉花冠层覆盖度与棉花地上部总氮累积量相关性高,其模型决定系数为 0.978,根均方差为 1.479 g/m²。

参 考 文 献

1 YU Z H, CAO Z G, WU X, et al. Automatic image-based detection technology for two critical growth stages of maize: emergence and three-leaf stage [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 174 - 175: 65 - 84.

2 SAKAMOTO T, SHIBAYAMA M, TAKADA E, et al. Detecting seasonal changes in crop community structure using day and night

- digital images [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2010, 76(6): 713–726.
- 3 SUI R X, THOMASSON J A, HANKSB J, et al. Ground-based sensing system for weed mapping in cotton[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 31–38.
- 4 LI Q Q, DONG B D, QIAO Y Z, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China [J]. Agriculture Water Management, 2010, 97(10): 1676–1682.
- 5 LI Y, CHEN D, WALKER C N, et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera [J]. Field Crops Research, 2010, 118(3): 221–227.
- 6 RAUN W R, SOLIE J B, TAYLOR R K, et al. Ramp calibration strip technology for determining midseason nitrogen rates in corn and wheat [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(4): 1088–1093.
- 7 HABOUDANE D, MILLER J R, PATTEY E, et al. Hyper spectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. Remote Sensing Environment, 2004, 90(3): 337–352.
- 8 MAYFIELD A H, TRENGOVE S P. Grain yield and protein responses in wheat using the N-sensor for variable rate N application [J]. Crop and Pasture Science, 2009, 60(9): 818–823.
- 9 GITELSON A A, KAUFMAN J Y, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. Remote Sensing Environment, 2002, 80(1): 76–87.
- 10 SAKAMOTO T, ANATOLY A G, BRIAN D W, et al. Application of day and night digital photographs for estimating maize biophysical characteristics [J]. Precision Agriculture, 2012, 13(2): 285–301.
- 11 SAKAMOTO T, GITELSON A A, NGUY-ROBERTSON A L, et al. An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 154–155: 113–126.
- 12 JIA L L, CHEN X, ZHANG F. Optimum nitrogen fertilization of winter wheat based on color digital camera image [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(11–12): 1385–1394.
- 13 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.
- 14 WANG Y, WANG D J, ZHANG G, et al. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G–R thresh holding method [J]. Field Crops Research, 2013, 149: 33–39.
- 15 GUEVARA E A, TELLEZ J, GONZALEZ-SOSA E. Use of digital photography for analysis of canopy closure [J]. Agroforestry Systems, 2005, 65(3): 175–185.
- 16 LALIBERTE A S, RANGO A, HERRICK J E, et al. An object based image analysis approach for determining fractional cover of senescent and green vegetation with digital plot photography [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 69(1): 1–14.
- 17 PAN G, LI F, SUN G. Digital camera based measurement of crop cover for wheat yield prediction [C] // IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2007: 797–800.
- 18 RORIE R L, PURCELL L C, MOZAFFARI M, et al. Association of "greenness" in corn with yield and leaf nitrogen concentration [J]. Agronomy Journal, 2011, 103(2): 529–535.
- 19 BEHRENS T, DIEPENBROCK W. Using digital image analysis to describe canopies of winter oilseed rape during vegetative developmental stages [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2006, 192(4): 295–302.
- 20 CHEN X, ZHANG F, RÖMHELD D V, et al. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved Nmin method [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(2): 91–98.
- 21 JIA L L, CHEN X P, ZHANG F S, 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.
- 22 GRAEFF S, CLAUPEIN W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(4): 611–618.
- 23 JIA B, HE H B, MA F Y, et al. Use of a digital camera to monitor the growth and N status of cotton [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(1): 171–192.
- 24 瞿瑛, 刘素红, 谢云. 基于像元二分模型的植被覆盖度遥感信息提取 [J]. 作物学报, 2008, 34(11): 1964–1969.
QU Ying, LIU Suhong, XIE Yun. Computer simulation model of functional vegetation cover and its parameters sensitivity [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(11): 1964–1969. (in Chinese)
- 25 王方永, 王克如, 李少昆, 等. 利用数字图像估测棉花叶面积指数 [J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3090–3100.
WANG Fangyong, WANG Keru, LI Shaokun, et al. Estimation of leaf area index of cotton using digital imaging [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3090–3100. (in Chinese)
- 26 MAO W, WANG Y. Real-time detection of between-row weeds using machine vision [C] // 2003 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 031004, 2003.
- 27 HANSENA P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 86(4): 542–553.
- 28 HUNT E R, CAVIGELLI J M, DAUGHTRY C S, et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status [J]. Precision Agriculture, 2005, 6(4): 359–378.
- 29 RUSSELL C A, DUNN B W, BATTEN G D, et al. Soil tests to predict optimum fertilizer nitrogen rate for rice [J]. Field Crops Research, 2006, 97(2): 286–301.