

应用数字图像技术诊断苧麻氮素营养的研究简报

李朝东, 崔国贤*, 谢宁, 丁莎莎, 陈兵兵, 白玉超

(湖南农业大学苧麻研究所, 湖南长沙 410128)

摘要: 为了实现苧麻氮素营养快速诊断, 通过盆栽培养 3 个施氮水平的苧麻, 使用信息技术和常规方法, 分别获取了不同生育时期两个苧麻品种叶片的图像和氮营养元素含量。通过自主开发的苧麻叶片数字图像处理系统软件对叶片图像进行处理, 并提取颜色特征值, 分析叶片颜色特征值与叶片全氮营养含量之间的关系。结果表明, 大部分颜色特征都与叶片全氮含量呈极显著相关。根据筛选的能有效预测苧麻叶片全氮营养的颜色特征, 建立预测苧麻叶片全氮含量的 6 个模型, 预测精度在 75.95%~91.50% 之间。说明应用数字图像技术诊断苧麻氮素营养是可行的。

关键词: 苧麻; 叶片; 氮营养; 图像处理; 诊断

中图分类号: Q059; S563.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)03-0767-06

Research notes on N status diagnosis of ramie by using digital image technology

LI Zhao-dong, CUI Guo-xian*, XIE Ning, DING Sha-sha, CHEN Bing-bing, BAI Yu-chao

(Ramie Research Institute of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: For achieving the rapid diagnosis of ramie (*Boehmeria nivea* L. Gaud) nitrogen content, three nitrogen levels of ramie were planted in pots, and the standard images and the nitrogen content of ramie leaves were obtained respectively by using the information technique and the conventional method at different growth stages. Leaf images were processed by ramie leaf digital image processing software, and color features of leaf images were extracted. The relationship between color features and nitrogen contents were analyzed. The results show that most of the extracted color features are significantly correlated with total nitrogen contents of ramie leaves. Six regression models are built by using the selected color features to predict the total nitrogen contents of ramie leaves at each growth stage, and the average prediction accuracies are from 75.95% to 91.50%. Therefore, digital image processing technology can be used to diagnose total nitrogen status of ramie.

Key words: ramie; leaf; nitrogen nutrition; image processing; diagnosis

苧麻是我国重要的纺织工业原料和传统的出口创汇产品^[1]。氮是苧麻生长发育及形成器官所必需的营养物质, 在苧麻需肥的关键时期进行实时、无损、准确的氮素营养诊断, 对实现指导精准施肥具有重要的意义。农作物的营养状态能够通过叶片表面颜色表现出来。近年来, 不少学者利用数字图像处理技术对采集的农作物叶片图像进行分析, 为诊断农作物营养状况提供决策支持。在粮食作物方面, Ahmad 等^[2]利用 3 种图像的彩色模型评价玉米由于缺水和缺氮对叶片造成的色彩特征变化; 刘宏斌

等^[3]发现, 采用红光波段和近红外波段计算的比值植被指数 RVI 可以较为灵敏地反映冬小麦氮素营养水平; 朱艳等^[4]综合研究了稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系。孙钦平等^[5]利用可见光光谱对夏玉米十叶期冠层图像的分析表明, 可见光光谱技术完全可以应用于夏玉米的氮营养诊断。在蔬菜瓜果方面, 胡春华等^[6]用 CCD 摄像对缺氮、缺镁与正常黄瓜的叶片样本进行检测, 分析了叶片的纹理特征和颜色特征, 能较好地区别缺氮、缺镁叶片与正常叶片; 宋述尧等^[7]试验设计了 6 种氮素水平处

收稿日期: 2010-10-09 接受日期: 2010-11-18

基金项目: 国家麻类产业技术体系项目(nycytx-19-E17)资助。

作者简介: 李朝东(1983-), 男, 湖南长沙人, 硕士, 主要从事作物信息科学研究。E-mail: hncslzd@163.com

* 通讯作者 Tel: 0731-84618072, E-mail: gx-cui@163.com

理温室黄瓜,获取黄瓜冠层图像,分析了不同供氮水平下黄瓜冠层图像参数与施氮量、土壤无机氮和植株氮素营养指标之间的关系。在纤维作物上,相关研究主要集中在棉花上,如王克如等^[8]运用数字图像处理技术获取棉花叶片颜色特征,建立和筛选出了6组棉叶叶绿素含量预测模型,预测误差在7.8%~13.65%之间,为棉花生长的快速监测提供了依据。但是,数字图像处理技术在苎麻上的研究鲜见报道。为此,本研究将数字图像处理技术应用在苎麻叶片图像特征的分析,通过分析苎麻叶片图像信息和氮素含量之间的相互关系,筛选出预测精度较高的颜色特征值并建立相关的分析模型,旨在为实现苎麻氮素营养实时、高效、准确诊断提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于2009年4月到7月在湖南农业大学国家麻类长期定位试验基地的盆栽试验场进行(113°04'18"E,28°10'57"N)。供试苎(*Boehmeria nivea* L. Gaud)品种为的“中苎1号”和“多倍体1号”(湖南农业大学苎麻研究所提供)。试验设施N0、10、20 mmol/L 3个水平(以N0、N1、N2表示),使苎麻生长反映出缺氮、适量氮、过量氮3种状况。培养基质为膨胀珍珠岩。营养液参照 Hoagland 及 Snyder 配方^[9]去掉氮元素,其他营养元素浓度保持一致,其中磷和钾的浓度分别为1和6 mmol/L,再往营养液中加入脲素(CH₂N₂O)分析纯作为氮源。每盆为一个试验单位,9次重复。每桶每周分2次浇营养液共1000 mL,每次500 mL。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 叶片图像的获取 分别于6月16日(幼苗

期),7月1日(旺长期)和7月16日(成熟期),对各处理选取植株顶部下新展开的叶片(倒4叶、倒5叶),采用 CANON 40D 单反相机与 CANON EF-S 17-85 mm F/4-5.6 IS USM 变焦镜头,在不透光的封闭暗箱中进行拍摄,红色绒布作背景,22W 的环形灯,光源色温 5400K、Ra > 90,镜头与背景保持 50 cm 的垂直高度,镜头焦距 35 mm,快门速度 1/60 s,光圈 F=5.6,ISO 固定为 100,白平衡自动,闪光灯强制关闭,一副图像只包含一片叶。

1.2.2 颜色模型的选择 在数字图像处理中,对图像必须用定量的数据来表示。颜色模型就是用定量数据来表示颜色的方法。本研究选择在数字图像处理中经常使用的 RGB、HSI 和 HSV 3 种颜色模型。在 RGB 模型中常用 R、G、B 的比值表示色度坐标(r、g、b),即:

$$r = R / (R + G + B) \quad (1)$$

$$g = G / (R + G + B) \quad (2)$$

$$b = B / (R + G + B) \quad (3)$$

从以上公式可得:

$$r + g + b = 1 \quad (4)$$

式中:R、G、B 分别表示三基色的数量,r、g、b 分别表示归一化了的 R、G、B 数量,且 r + g + b = 1,通常被认为是消除了因不同拍摄环境条件下光照强度等差异所造成的系统误差的颜色分量^[10]。

HSI 模型是工业色彩模型的一种,其优点是把图像分成了彩色和灰度信息,其分量 H、S 在光照不同的情况下稳定性最好^[11],作为颜色特征值的可靠性很强。从数字图像中得到的一般是像素的 RGB 值,对于任何 3 个[0,1]范围内的 R、G、B 值,其对应的 HSI 模型中的 H、S、I 分量转换公式如下^[12]:

$$H = \begin{cases} \arccos \frac{(R - G) + (R - B)}{2 \sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} & B \leq G \\ 360 - \arccos \frac{(R - G) + (R - B)}{2 \sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} & B > G \end{cases} \quad (5)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (6)$$

$$I = (R + G + B) / 3 \quad (7)$$

HSV 空间比较直观并且符合人的视觉特性,这些特点使得 HSV 模型非常适合基于人眼视觉特性

的彩色图像处理。从 RGB 颜色模型转换为 HSV 模型,使用如下公式^[13]:

$$H = \begin{cases} \left(6 + \frac{G - B}{\max - \min}\right) \times 60^\circ, & \text{if } R = \max \\ \left(2 + \frac{B - R}{\max - \min}\right) \times 60^\circ, & \text{if } G = \max \quad (8) \\ \left(4 + \frac{R - G}{\max - \min}\right) \times 60^\circ, & \text{if } B = \max \end{cases}$$

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} \quad (9)$$

$$V = \frac{\max(R, G, B)}{255} \quad (10)$$

1.2.3 全氮、磷、钾的测定 将拍照完毕的样品置于烘箱中以 105℃ 杀青 1 h 后, 80℃ 烘 48 h 至恒重。将烘干的样品密封后置于干燥处保存。在 3 次样品都处理完以后, 将干样粉碎、过筛、混匀, 以 $H_2SO_4 - H_2O_2$ 消煮后, 用凯氏定氮法测定全氮含量, 用钒钼黄比色法测定全磷含量, 用火焰光度法测定全钾含量。所有样品称取 2 份, 作为平行样, 分别取均值作为叶片全氮、全磷、全钾含量。同时进行空白试验, 以校正试剂误差。

1.2.4 图像分析软件 在 Microsoft Windows XP SP3 操作系统上, 使用基于 MATLAB R2009b 编程语言,

通过 GUI 设计界面, 自行开发“苕麻叶片图像处理系统 V1.0”(软著登字第 0242484 号), 对苕麻叶片图像进行滤波降噪预处理、自动阈值分割去掉背景和颜色特征值提取。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对苕麻叶片全氮、全磷、全钾营养含量的影响

对整个生育期苕麻叶片全氮、全磷、全钾含量的平均值进行分析, 结果(表 1)发现, 不同施氮处理间, 随着施氮水平的提高, 叶片氮含量增加趋势明显。在相同施氮水平处理下, 中苕 1 号叶片平均氮含量略高于多倍体 1 号。不同的施氮水平对苕麻叶片磷元素含量影响不显著, 且未呈现规律性变化。两个品种苕麻叶片的钾含量随着施氮量的增加有略微减少的趋势, 在过量氮胁迫下, 两个品种叶片的钾含量都显著低于不施氮和正常施氮水平, 但是不施氮和正常施氮水平下的钾含量差异未达显著水平。说明不同的施氮水平仅较好地起到了调节苕麻功能叶片氮素营养含量的作用, 而对磷、钾元素的含量影响不显著。

表 1 不同施氮水平对苕麻叶片氮、磷、钾含量的影响

Table 1 Effects of different nitrogen treatments on the N, P and K contents of ramie leaves

品种 Cultivar	氮水平 N levels	氮含量(%) N content	磷含量(%) P content	钾含量(%) K content
中苕 1 号 Zhongzhu No. 1	N0	2.4858 cC	0.2331 aA	1.0595 aA
	N1	4.2800 bB	0.2422 aA	1.0269 abAB
	N2	4.8292 aA	0.2248 aA	0.9476 bB
多倍体 1 号 Tri-1	N0	2.3148 cC	0.1979 bA	1.1603 aA
	N1	3.8349 bB	0.2147 abA	1.0825 aA
	N2	4.5962 aA	0.2535 aA	0.8476 bB

注(Note): 同列中不同大、小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平 Different capital and small letters within the same column indicate significant at 1% and 5% levels, respectively.

2.2 不同施氮水平下苕麻叶片图像 R、G、B 颜色特征值的比较

通过对苕麻叶片图像处理系统提取的 R、G、B 颜色特征值进行分析结果表明, 随着施氮水平的提高, 叶片图像的 R、G、B 颜色特征值均成减小趋势(表 2)。不同氮水平下, 各颜色特征值不同, R、B 两个颜色特征值在 N1 和 N2 水平下差异性不显著, 但是与 N0 水平下的值差异极显著。而 G 特征值在 3 个氮水平间的差异极显著, 表明施氮与否对叶片的颜色影响非常大。在施氮条件下, 施氮量的不同对叶片绿色程度影响较大, 对叶片红色和蓝色程度影

响较小。

2.3 不同生育时期苕麻叶片图像颜色特征值与全氮含量的相关性

将苕麻叶片图像处理系统提取的 40 个苕麻叶片颜色特征值与全氮含量进行相关分析(表 3), 结果表明, 绝大多数叶片图像颜色特征值与叶片全氮含量具有极显著的相关性。同一个颜色特征, 在不同的生育时期与全氮含量的相关系数不同, 不同的颜色特征在同一时期与全氮含量的相关性差异显著。根据相关系数绝对值最高原则, 对两个苕麻品种的叶片图像分别筛选出 3 个生育

表 2 不同施氮水平下苕麻叶片 R、G、B 颜色特征值的比较

Table 2 Comparison of R, G, B color features under the different nitrogen treatments

品种 Cultivar	氮水平 N level	R 颜色分量 R color value	G 颜色分量 G color value	B 颜色分量 B color value
中苕 1 号 Zhongzhu No. 1	N0	116.8533 aA	183.6225 aA	85.3992 aA
	N1	64.8693 aA	144.9465 bB	76.1969 bB
	N2	60.5824 aA	132.5416 cC	72.3444 bB
多倍体 1 号 Tri-1	N0	110.6747 aA	177.5200 aA	81.9223 aA
	N1	65.6148 bB	140.9926 bB	69.1483 bB
	N2	56.3701 cC	129.4173 cC	68.1764 bB

注(Notes): 同列中不同大、小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平 Different capital and small letters within the same column indicate significant at 1% and 5% levels, respectively.

表 3 不同生育时期颜色特征筛选结果

Table 3 The selected color features at different growth stages

品种 Cultivar	生育时期 Growth stage	颜色特征 Color feature	相关系数 <i>r</i>
中苕 1 号	幼苗期 Seeding stage	G、V、Gray、I	-0.93**
Zhongzhu No. 1	旺长期 Fast growing stage	R-B、H(HSI)、H(HSV)、(B-R)/G、b-r、(B-R)/(B+R)	-0.81/0.81**
	成熟期 Maturity stage	R、2R-G-B、Gray	-0.94/0.94**
多倍体 1 号	幼苗期 Seeding stage	R/(G+B)、r	-0.93**
Tri-1	旺长期 Fast growing stage	(G-R)/(G+R)	0.90**
	成熟期 Maturity stage	R-B、H(HSV)/V、H(HSI)、H(HSV)、(B-R)/G、b-r、(B-R)/(B+R)、B/R	-0.94/0.94**

注(Notes): ** $p < 0.01$

时期与全氮含量相关系数绝对值达到最高的颜色特征作为诊断氮含量的待选参数,结果显示,部分生育时期有多个颜色特征值与全氮含量的相关系数绝对值一致。

2.4 不同生育时期苕麻叶片全氮含量与颜色特征的回归模型

以表 3 中筛选出来的颜色特征作为自变量,全氮含量作为因变量建立回归模型。表 4 看出,建立的预测模型拟合度普遍较高,除了中苕 1 号旺长期模型的决定系数低于 0.7 以外,其它所有模型的决定系数均大于 0.8。同一生育时期与全氮含量相关系数相同的颜色特征,回归模型的决定系数有一定差异。根据建立的回归模型拟合度,可以对各生育时期的回归模型进行进一步筛选,选择回归模型决定系数最高的预测模型作为预测该时期的氮含量的最优模型,并使用未参与建模的样本数据进行模型检验。对实测值和预测值之间的符合程度进行统计分析,每个模型检验样本数量为 27。结果(表 5)表

明,预测值与实测值之间的误差较小,平均相对误差 RE 在 9.50%~24.05% 之间,相应的均方根误差 RMSE 在 0.3058~0.7287 之间,预测精度达 75.95%~91.50%。说明 3 个生育时期颜色特征值都能较好地反映苕麻叶片全氮含量的变化,不同品种和生育时期模型预测精度存在一定差异。

3 讨论与小结

本研究表明,应用数字图像技术获得的颜色特征值能够反映苕麻叶片的氮素营养状况,可用于苕麻叶片含氮量的研究。通过比较不同施氮水平下,苕麻叶片图像的 R、G、B 颜色特征的差异性发现,随着施氮水平的提高,两个苕麻品种叶片图像的 R、B 颜色特征值均成减小趋势。不同氮水平下,叶片各颜色特征值不同,施氮与否对苕麻叶片的颜色影响非常大,而施氮的条件下,施氮量的不同对苕麻叶片绿色程度影响较大,而对苕麻叶片红色和蓝色程度影响较小。不同施氮水平下苕麻叶片全氮含量差异

表 4 不同生育时期两个苕麻品种功能叶片全氮含量和颜色特征值的回归模型

Table 4 Regression models between nitrogen content and color features of ramie functional leaves at different growth stages

品种 Cultivar	生育时期 Growth stage	颜色特征 Color feature	回归模型 Regression model	决定系数 R^2
中苕 1 号 Zhongzhu No. 1	幼苗期 Seeding stage	G	$Y = 8.2238 - 0.028382X$	0.8731**
		V	$Y = 8.2253 - 7.2375X$	0.8729**
		Gray	$Y = 7.8032 - 0.031792X$	0.8692**
		I	$Y = 7.8430 - 9.6251X$	0.8566**
	旺长期 Fast growing stage	R - B	$Y = 3.2124 - 0.033665X$	0.6537**
		H(HSI)	$Y = -3.0481 + 18.5562X$	0.6545**
		H(HSV)	$Y = -2.8727 + 18.0189X$	0.6544**
		$(B - R)/G$	$Y = 3.1471 + 5.4231X$	0.6561**
		$b - r$	$Y = 3.1549 + 11.2564X$	0.6539**
		$(B - R)/(B + R)$	$Y = 3.1616 + 5.8048X$	0.6501**
成熟期 Maturity stage	R	$Y = 7.9859 - 0.0416 X$	0.8863**	
	$2R - G - B$	$Y = 2.0085 - 0.0356X$	0.8803**	
	Gray	$Y = 12.129 - 0.0598X$	0.8811**	
多倍体 1 号 Tri - 1	幼苗期 Seeding stage	$R/(G + B)$	$Y = 8.6178 - 13.6882X$	0.8718**
		r	$Y = 10.4493 - 25.7340X$	0.8684**
	旺长期 Fast growing stage	$(G - R)/(G + R)$	$Y = -0.056862 + 7.6901X$	0.8017**
	成熟期 Maturity stage	R - B	$Y = 4.4885 - 0.065663X$	0.8777**
		H(HSV)/V	$Y = -1.6270 + 10.0383X$	0.8881**
		H(HSI)	$Y = -7.2861 + 34.9404X$	0.8749**
		H(HSV)	$Y = -6.9562 + 33.9419X$	0.8774**
		$(B - R)/G$	$Y = 4.3332 + 10.1158X$	0.8829**
		$b - r$	$Y = 4.3322 + 21.0136X$	0.8869**
		$(B - R)/(B + R)$	$Y = 4.3302 + 10.8642X$	0.8896**
B/R	$Y = -1.0952 + 5.2572X$	0.8771**		

注(Note): ** $p < 0.01$

表 5 不同生育时期两个苕麻品种功能叶片全氮含量和颜色特征值的预测模型

Table 5 Prediction models between nitrogen content and color features of ramie functional leaves at different growth stages

品种 Cultivar	生育时期 Growth stage	预测模型 Prediction model	平均相对误差(%) RE	均方根误差 RMSE
中苕 1 号 Zhongzhu No. 1	幼苗期 Seeding stage	$Y = 8.2238 - 0.028382 G$	14.59	0.5350
	旺长期 Fast growing stage	$Y = 3.1471 + 5.4231 (B - R)/G$	12.88	0.5906
	成熟期 Maturity stage	$Y = 7.9859 - 0.0416 R$	24.05	0.7287
多倍体 1 号 Tri - 1	幼苗期 Seeding stage	$Y = 8.6178 - 13.6882 R/(G + B)$	13.30	0.5712
	旺长期 Fast growing stage	$Y = -0.056862 + 7.6901 (G - R)/(G + R)$	9.50	0.3058
	成熟期 Maturity stage	$Y = 4.3302 + 10.8642 (B - R)/(B + R)$	13.37	0.6054

注(Note): RE—Relative error; RMSE—Relative mean square error.

极显著,叶片图像颜色特征值的差异也达到极显著的水平。通过分析苕麻叶片图像颜色特征值和全氮营养含量的相关性,发现从叶片图像中提取的大部分颜色特征都与叶片全氮含量呈极显著相关。根据相关系数最高原则筛选出了能有效预测苕麻叶片全氮营养的颜色特征。分不同生育时期和品种,建立苕麻叶片全氮含量与筛选的叶片图像颜色特征值之间的6个预测模型的预测精度在75.95%~91.50%之间。说明通过分析苕麻叶片图像的颜色特征值,可以预测苕麻叶片全氮含量。同一氮肥梯度不同品种苕麻在相同生育时期叶色有差异,中苕1号叶色比多倍体1号更绿,所提取的颜色特征值差异也较大,这可能是品种间本身差异的表现。因此如果需要建立适合不同品种、不同时期的普适性、高精度预测模型,还需要进一步的研究。另外,本研究筛选出的有效颜色特征值是基于固定的叶片图像获取条件,如果图像获取条件发生变化,如更换背景布的颜色或光源色温等,预测精度是否会产生较大差异,还有待验证。

数字图像技术已广泛应用于农业领域,基于数字图像技术的苕麻叶片全氮营养预测是一种准确、有效、可靠的新方法。随着信息技术的飞速发展,基于数字图像技术的作物营养元素诊断具有广阔的发展前景。本文是应用数字图像技术诊断苕麻叶片氮素营养的探索性研究。研究内容多为初步探讨,由于研究水平和时间限制,还有许多值得探讨的问题,需要深入的研究。

参考文献:

- [1] 李宗道. 麻作的理论与技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 96-251.
Li Z D. The theory and technology of fiber crops [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982. 96-251.
- [2] Ahmad I S. Evaluation of color presentations of maize [J]. *Agric. Engin. Res.*, 1996, 63: 185-196.
- [3] 刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等. 光谱技术在冬小麦氮素营养诊断中的应用研究[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(11): 1743-1748.
Liu H B, Zhang Y G, Li Z H *et al.* Application of canopy spectral reflectance in monitoring nitrogen status of winter wheat [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2004, 37(11): 1743-1748.
- [4] 朱艳, 李映雪, 周冬琴, 等. 稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3463-3469.
Zhu Y, Li Y X, Zhou D Q *et al.* Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2006, 26(10): 3463-3469.
- [5] 孙钦平, 贾良良, 芮玉奎, 等. 应用可见光光谱进行夏玉米氮营养诊断[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(2): 432-435.
Sun Q P, Jia L L, Rui Y K *et al.* Nitrogen status diagnosis of summer maize by using visible spectral analysis technology [J]. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 2009, 29(2): 432-435.
- [6] 胡春华, 李萍萍. 基于图像处理的黄瓜缺氮与缺镁判别的研究[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2004, 25(1): 9-12.
Hu C H, Li P P. Application of image processing to diagnose cucumbers short of Mg and N [J]. *J. Jiangsu Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2004, 25(1): 9-12.
- [7] 宋述尧, 王秀峰. 数字图像技术在黄瓜氮素营养诊断上的应用研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(4): 460-465.
Song S Y, Wang X F. Diagnosis of N status of cucumber using digital image processing technique [J]. *J. Jilin Agric. Univ.*, 2008, 30(4): 460-465.
- [8] 王克如, 李少昆, 王崇桃, 等. 用机器视觉技术获取棉花叶片叶绿素浓度[J]. *作物学报*, 2006, 32(1): 34-40.
Wang K R, Li S K, Wang C T *et al.* Acquired chlorophyll concentration of cotton leaves with technology of machine vision [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2006, 32(1): 34-40.
- [9] 薛应龙. 植物生理学实验手册[M]. 上海: 上海科技出版社, 1985. 60-63.
Xue Y L. Plant physiology experiment handbook [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985. 60-63.
- [10] Tian L F, Slaughter D C. Environmentally adaptive segmentation algorithm for outdoor images segmentation [J]. *Comp. Elect. Agric.*, 1998, 21(3): 153-168.
- [11] 刘观松, 陆宗骥, 徐建国, 等. 几种彩色模型在不同光照条件下的稳定性分析[J]. *小型微型计算机系统*, 2002, 23(7): 882-885.
Liu G S, Lu Z Q, Xu J G *et al.* Analysis of stability of some color models to different illumination [J]. *Mini-micro Syst.*, 2002, 23(7): 882-885.
- [12] 河东健, 耿楠, 张义宽. 数字图像处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003. 31.
He D J, Gen N, Zhang Y K. Digital image processing [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2003. 31.
- [13] Rogers D F. Procedural elements of computer graphics (2nd ed) [M]. NY: McGraw-Hill, 1997.