

温室黄瓜叶片近红外图像消噪算法与含氮量快速检测\*

杨 玮 李民赞 孙 红 郑立华

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 在温室基质栽培条件下,研究了温室黄瓜叶片近红外图像的消噪算法以及叶片氮素含量非线性预测。用普通 CCD 相机加滤光片采集不同生长时期水果型小黄瓜 Deitastar 的叶片图像,利用小波变换对黄瓜近红外图像进行小波消噪处理,再采用基于邓氏关联度的图像边缘检测法对图像进行分割,得到信噪比较好的目标图像,之后通过计算灰度值得到黄瓜叶片的植被指数。对获得的各种植被指数与黄瓜叶片氮含量之间进行相关分析后得到 CNDVI 与氮素含量相关系数最高达 0.67,同时 GNDVI、NDGI、NDVI 与氮素相关性显著且相关系数均高于 0.50。采用最小二乘支持向量机算法 (LS-SVM) 对植被指数同黄瓜叶片含氮量进行拟合,拟合模型的决定系数  $R^2$  为 0.825,验证  $R^2$  为 0.728,达到了较为理想的预测精度。

**关键词:** 温室 黄瓜叶片 图像处理 小波消噪 含氮量 快速检测

**中图分类号:** O433.4; S123      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0216-06

De-noising Algorithm of Multispectral Images and Nonlinear Estimation of Nitrogen Content of Cucumber Leaves in Greenhouse

Yang Wei Li Minzan Sun Hong Zheng Lihua

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** De-noising of near infrared image and nonlinear estimation of nitrogen content were carried out to cucumber leaves in greenhouse. Fruit cucumber Deitastar was chosen as the object. A CCD camera with special filters was used to collect cucumber leaves' images in different growth time. After eliminating noise of image with wavelet transform, the images were separated based on grey theory. Correlation analysis between nitrogen content and each kind of vegetation index of cucumbers was conducted, and  $t$  tests to those coefficients of correlation were executed. The result showed that CNDVI, GNDVI, NDVI and NDGI were significantly related to nitrogen content of cucumber leaves. The correlation coefficient between CNDVI and nitrogen content of cucumber leaves reached 0.67, and the correlation coefficients between GNDVI, NDGI, NDVI and nitrogen content of cucumber leaves were all higher than 0.50. LS-SVM algorithm was used to construct estimation models between vegetation indexes and nitrogen content and CNDVI, GNDVI, NDGI and NDVI were used as the input of the model. The  $R^2$  values of calibration and validation models were 0.825 and 0.728 respectively.

**Key words:** Greenhouse Cucumber leaf Image processing Eliminating noise Nitrogen content Rapid detection

引言

水果型小黄瓜是近年来引进的鲜食黄瓜,利用

温室无土栽培可实现周年供应,但生长过程中氮营养的丰缺直接影响其品质和产量。传统基于化学分析的氮素检测手段费时费力,且会对作物造成伤

收稿日期: 2013-04-06 修回日期: 2013-04-16

\* 国家自然科学基金资助项目(31271619)

作者简介: 杨玮,博士后,主要从事电子技术在农业中的应用研究, E-mail: weiwei810311@163.com

通讯作者: 李民赞,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究, E-mail: limz@cau.edu.cn

害<sup>[1]</sup>。黄瓜缺氮时,会引起叶片颜色、厚度以及形态特征等发生一系列变化,从而使其光反射特性(反射强度分布、颜色、纹理等)发生改变,因此,充分利用黄瓜叶片的光学特性信息对氮素进行无损检测具有重要意义<sup>[2~5]</sup>。

利用光谱图像进行氮素检测受到国内外学者的重视,并进行了较多研究<sup>[6~9]</sup>。但是,目前用于作物光谱图像分析的多光谱相机普遍存在算法过于复杂的缺陷,而且对拍摄条件、目标都有一定的严格要求,仪器成本也高,因此寻找一种快速、简便、低成本的作物生长多光谱图像监测方法有重要的意义。

CCD 照相机加滤光片技术构成简单,可以用于植物氮素含量信息快速诊断,但是图像所包含的噪声会对分析结果产生较大影响。本文选择温室黄瓜作为研究对象,采用操作简单、成本低廉、易于广泛推广使用的 CCD 照相机加滤光片的方法获得作物叶片(或冠层)的近红外图像,探索近红外图像的有效降噪算法,计算多个来源于近红外图像的植被指数,优化建立黄瓜叶片氮素含量的非线性预测模型,以提高预测精度。

## 1 试验

### 1.1 试验方法

选择水果型小黄瓜 Deitastar 作为研究对象。该品种长势中等,适合于早秋和早春日光温室和大棚种植,生产期较长,叶面开展度大。为了在试验中研究不同营养水平下生长的作物,采用不同营养胁迫条件种植和管理<sup>[10~11]</sup>。种植条件选择了基质栽培法,保证样本不受土壤等因素的影响。所有黄瓜样本各生长期均按 4 个氮素水平处理,常规氮含量( $N$ )选取 0.067 kg/L,设为标准配方。每 10 株作为一个水平组,共分为 4 组 40 个样本;其中,第 1 组( $2N$ )是在不影响其他营养素的情况下,将标准配方的氮元素增加一倍;第 2 组( $N$ )按照标准配方配置营养液;第 3 组( $0.5N$ )是在不影响其他营养素的情况下,氮元素减少为标准配方的 50%;第 4 组( $0.2N$ )是在不影响其他营养素的情况下,氮元素减少为标准配方的 20%。

### 1.2 试验方案

本研究采用普通 CCD 照相机加滤光片的方式获得近红外图像,选择信息含量多、数据相关性小、地物光谱差异大、可分性好的 670 nm 红光和 780 nm 近红外光作为最佳工作波长。一般数码相机/摄像机采用的 CCD/CMOS 感光元件能感应到红外线,但相机厂商为保证正常拍摄不会因红外线干扰而产生

色偏,都在 CCD 前装有 ICF 来阻拦红外线,只允许通过可见光。与 ICF 正好相反红外滤镜的作用是阻挡可见光而让红外光通过。有夜摄功能的相机就是通过机械装置将这片 ICF 移开使 CCD 能充分接收红外线。当 ICF 移开后就可以通过在相机镜头前增加特定波段的滤光片来获取特定波长的光谱图像。试验中分别在相机镜头前增加直径为 2.5 cm 的红光 670 nm 窄带滤光片及近红外光 780 nm 窄带滤光片<sup>[12]</sup>。为了提高测量的精度和准确性,选择从顶部第 6 片叶子作为测量叶片,此处叶片的大小、位置合适,方便测量。采样时间分别在黄瓜生长期的发芽期、幼苗期、初花期和结果期。获取黄瓜叶片近红外图像时采用白板将黄瓜叶片托起,以减少背景光的影响。采下的黄瓜叶片样本采用半微量凯氏定氮法测量其氮素含量。对采集的黄瓜叶片样本 105℃ 杀青 1 h,50℃ 干燥,称量,消化,蒸馏,最后计算黄瓜叶片样本的氮含量(设氮的原子量为 14)

$$N = \frac{0.01 \times 14(A - B)}{1\,000C} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $N$ ——黄瓜叶片样本的氮含量,%  
 $A$ ——滴定样品用去的盐酸平均体积,mL  
 $B$ ——滴定空白用去的盐酸平均体积,mL  
 $C$ ——样本的质量,g

## 2 结果和讨论

### 2.1 近红外图像的小波降噪算法

为了从所采集的图像中获取作物检测所需的图像特征参数,首先需要对采集的作物近红外图像做必要的预处理,尽可能地减少土壤背景的影响和随机因素所产生的干扰。对近红外图像的预处理主要包括对原始图像噪声的过滤、图像增强、图像分割处理。在近红外光谱中,光谱信息可以分解成背景噪声(一般属于低频)、组分信息(一般属于中频)和随机噪声(一般属于高频),因此光谱信号经过小波分解,光谱的各信息组成部分在频域里面就可完全区分开来,从而比较方便地把这些噪声滤除掉,提取组分信息<sup>[13~16]</sup>。

应用小波变换对图像滤波的实现步骤如图 1 所示。首先,通过选取适合的小波基函数和分解层数  $m$ ,对图像进行分解;然后,对高频系数进行阈值量化,去除表征图像噪声的高频分量;进而依据小波分解后的第  $m$  层近似系数和经过阈值处理的各层细节系数进行小波重构,实现图像的滤波,消除图像噪声。研究比较分析了基于 bior3.1、coif3 和 db4 的小波基函数的图像分解结果。

将原始信号  $x(t)$  作为标准信号,则经过小波去

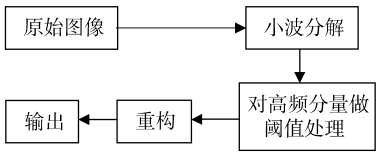


图1 小波变换对图像滤波的实现步骤  
Fig.1 Procedures of image filtering using wavelet transforms

噪后的估计信号  $x'(t)$  的信噪比  $R_{\text{SNR}}$  公式为

$$R_{\text{SNR}} = 10\lg \left( \frac{\sum_{t=1}^n x(t)^2}{\sum_{t=1}^n [x(t) - x'(t)]^2} \right) \quad (2)$$

原始信号与估计信号之间的均方根误差定义为

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [x(t) - x'(t)]^2} \quad (3)$$

信号的信噪比越高,原始信号与估计信号的均方根误差越小,则估计信号就越接近于原始信号,去噪效果越好。图 2a 和图 3a 是一片叶片样本的近红外光和红光原始图片,小波变换后的图像如图 2b 和图 3b 所示,表 1 列出了用这 3 种方法去噪后信号的信噪比和均方根误差的比较,从表中可以看到 bior3.1 的信噪比最高,均方根误差最小,图像中的噪声得到了有效去除,满足图像分解要求,因而选取 bior3.1 小波分解对黄瓜叶片近红外图像进行处理。

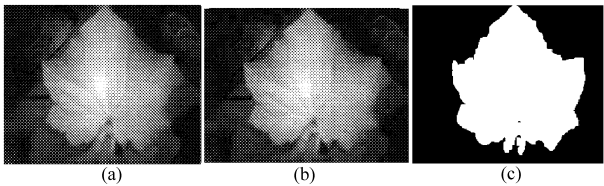


图2 采用小波变换和邓氏关联度法分割叶片近红外图像  
Fig.2 Near infrared binary image separated by genetic algorithm and watershed algorithm

(a) 近红外光原始图片 (b) 小波变换后图像  
(c) 邓氏关联度法分离后的图像

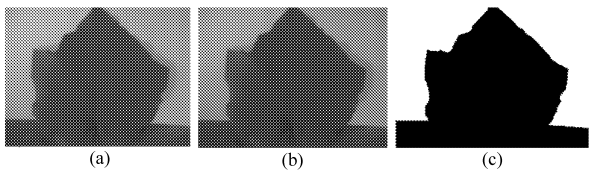


图3 采用小波变换和邓氏关联度法分割叶片红光图像  
Fig.3 Red binary image separated by genetic algorithm and watershed algorithm

(a) 红光原始图片 (b) 小波变换后图像  
(c) 邓氏关联度法分离后的图像

近红外图像进行小波变换之后采用基于邓氏关联度的图像边缘检测法对叶片和背景进行分离。邓氏关联度分析实质上是对比较数列中的数据点进行几何关系的比较,如果两比较数列在各时刻均重合在

表 1 3 种小波基函数图像分解结果对比(样本数为 40)

Tab.1 Comparison of image decomposition result of three wavelet basis functions

| 参数                | bior3.1 | coif3  | db4    |
|-------------------|---------|--------|--------|
| $R_{\text{SNR}}$  | 28.146  | 24.554 | 21.709 |
| $e_{\text{RMSE}}$ | 15.967  | 20.656 | 28.865 |

一起,则关联度为 1,否则关联度小于 1。其方法为:令  $X_0$  为参考数列 ( $X_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ ),  $X_i$  为比较数列 ( $X_i = \{x_i(k) | i = 1, 2, \dots, n\}$ ),其中  $n$  表示参考数列和比较数列中数据的个数,则关联系数的计算公式为

$$\zeta_{i,0}(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (4)$$

其中,  $\rho$  称为分辨系数,是一个事先取定的 0 到 1 之间的常数,一般情况下取 0.5。 $\zeta_{i,0}(k)$  表示在第  $k$  个时刻比较数列  $x_i$  与参考数列  $x_0$  之间的相对差值,将其定义为数列  $x_i$  对  $x_0$  在  $k$  时刻的关联系数,它反映了不同数列在同一点与参考数列的相似程度。因为关联系数是比较数列与参考数列在各个时刻(即曲线中的各点)的关联程度值,所以它的数值不止一个,信息过于分散不便于进行整体性比较。因此本研究将各个时刻(即曲线中的各点)的关联系数求平均值,作为比较数列与参考数列间关联程度的数量表示,关联度公式为

$$r(x_i, x_0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \zeta_{i,0}(k) \quad (5)$$

$(r(x_i, x_0) \in (0, 1])$

利用邓氏关联度对光谱图像进行背景分离是利用位移差来计量两数列之间的相似程度。在图像中非边缘点就是像素值与周围相邻像素值没有差别或差别不大的点,理想的非边缘点就是该点像素值与周围像素值完全相同。因此把某一像素和其相邻像素一起形成参考序列,令其取相同的值 1,该点为非边缘点作为参考序列;比较序列分别由各个像素及其相应的 8 邻域位置的像素来组成。计算以各像素点为中心形成的比较数列与参考序列之间的灰色关联度。边缘点的判断原则:当灰色关联度大于某一既定的关联度阈值时,说明该点与参考序列具有相同的特征,不是边缘点;反之,则是边缘点。图 2c 为采用邓氏关联度法进行背景分离后的近红外光图像,图 3c 为采用邓氏关联度法进行背景分离后的红光图像。从图中可以看出采用邓氏关联度法进行背景分离可以得到边缘非常清晰的目标图像。

2.2 近红外图像参数与叶片氮含量相关性分析

黄瓜的近红外图像经滤波、分割后,得到黄瓜叶片 NIR、R、G 各波段平均灰度  $g_{NIR-IA}$ 、 $g_{R-IA}$ 、 $g_{G-IA}$ ,应用各波段灰度均值对应的经验公式可得到黄瓜叶片 NIR、R、G 各波段对应计算得到的植被指数共计 9 个,各个植被指数的定义和计算方法如表 2 所示。得到的近红外图像数据分析黄瓜叶片氮素含量和各种植被指数的相关性,并用  $t$  检验法对所有的相关系数进行了显著性检验,检验结果表明图像的组合归一化植被指数(CNDVI)、绿色归一化植被指数(GNDVI)、归一化植被指数(NDVI)和归一化差异绿度植被指数(NDGI)4 个指数与叶片氮素含量显著相关,4 个指数对黄瓜叶片氮素含量检测能力高于其他植被指数。主要原因是由于近红外波段冠层反射率变化主要受黄瓜叶片冠层结构和叶片反射特性影响,随施氮量的增加黄瓜叶片生物量和叶面积增加,从而增强散射返回的概率。而且含氮量高的叶细胞大且间隙也大,细胞壁水化度也高,对近红外光反射亦强,从而两方面共同作用表现出近红外波段的反射率增加。在红光范围内,冠层反射率随叶片氮素含量的增加而降低。叶片氮素含量的变化也会在绿光波段引起叶片反射率的变化。以上 4 个植被指数,基本上综合考虑了上述 3 个波段范围的叶片反射率,因此获得了较高的相关系数<sup>[17-19]</sup>。

2.3 近红外图像参数与叶片氮含量的建模分析

根据  $t$  检验结果,选用 4 种与叶片氮素含量显著相关的植被指数进行研究,包括 CNDVI、GNDVI、NDGI 和 NDVI。建立 4 种类型的植被指数同黄瓜叶片含氮量的相关关系模型。本文采用最小二乘支持向量机(LS-SVM)作为建模方法。

SVM 是基于统计学理论的新型机器学习方法,SVM 通过非线性核函数,将输入样本空间映射到高

维线性特征空间,因此 SVM 能够处理高度非线性的分类和回归等问题。它克服了人工神经网络训练时间长、泛化能力差、易陷入局部极小等缺点,提高了模型的学习泛化能力。LS-SVM 模型采用的核函数是径向基核函数 RBF,它的参数相对较少,且数值限制条件少,可以降低模型的复杂性,提高训练速度。采用交叉验证法来确定相关参数,将样本数据分为训练(建模)集和验证集。随机选取了 30 个样本用于建立预测模型,另外 10 个样本用于验证模型。在建模过程中,4 种类型的植被指数作为模型的输入,以叶片含氮量作为输出,对植被指数和叶片含氮量之间进行数值拟合,建立黄瓜叶片含氮量和植被指数的预测模型。如图 4 所示,黄瓜叶片氮素含量 SVM 模型的预测决定系数  $R^2$  达 0.825,验证  $R^2$  达 0.728。

表 2 基于光谱图像的植被指数计算  
Tab.2 Vegetation values based on multispectral image

| 名称          | 简写    | 公式                                                                           |
|-------------|-------|------------------------------------------------------------------------------|
| 差值植被指数      | DVI   | $g_{NIR-IA} - g_{R-IA}$                                                      |
| 绿色差值植被指数    | GDVI  | $g_{NIR-IA} - g_{G-IA}$                                                      |
| 比值植被指数      | RVI   | $g_{NIR-IA} / g_{R-IA}$                                                      |
| 绿色比值植被指数    | GRVI  | $g_{NIR-IA} / g_{G-IA}$                                                      |
| 归一化植被指数     | NDVI  | $\frac{g_{NIR-IA} - g_{R-IA}}{g_{NIR-IA} + g_{R-IA}}$                        |
| 土壤调整植被指数    | SAVI  | $\frac{g_{NIR-IA} - g_{R-IA}}{g_{NIR-IA} + g_{R-IA} + L} (1 + L) (L=0.5)$    |
| 绿色归一化植被指数   | GNDVI | $\frac{g_{NIR-IA} - g_{G-IA}}{g_{NIR-IA} + g_{G-IA}}$                        |
| 归一化差异绿度植被指数 | NDGI  | $\frac{g_{G-IA} - g_{R-IA}}{g_{G-IA} + g_{R-IA}}$                            |
| 组合归一化植被指数   | CNDVI | $\frac{2g_{NIR-IA} - g_{R-IA} - g_{G-IA}}{g_{NIR-IA} + g_{R-IA} + g_{G-IA}}$ |

由于采用小波分析方法大大降低了图像噪声,叶片含氮量预测精度  $R^2$  为 0.825。由于栽培条件、

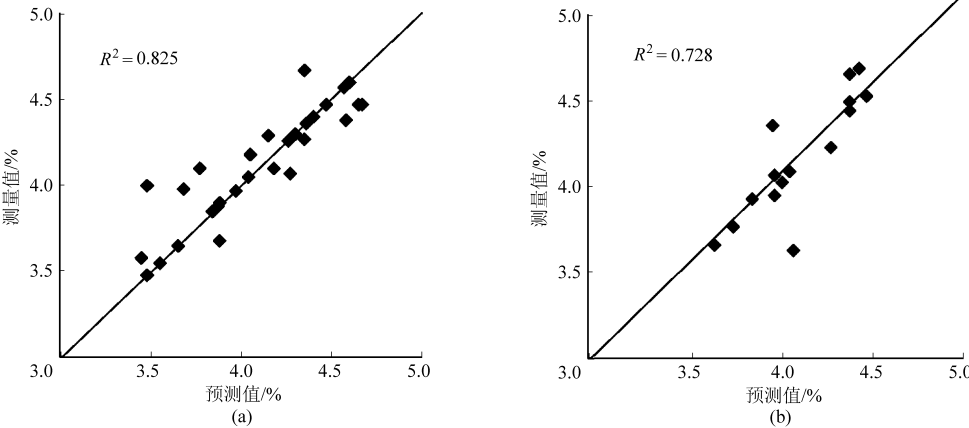


图 4 黄瓜叶片氮素含量 SVM 预测结果和验证结果  
Fig.4 SVM prediction result of nitrogen content of cucumber leaves  
(a) SVM 模型预测结果 (b) SVM 模型验证结果

品种的原因,不同的研究与模型之间不具备绝对可比性,但是与类似的研究相比,本论文的模型还是达到了相当高的水平<sup>[20~22]</sup>。

预测模型的结果表明,采用普通 CCD 相机加滤光片的方式获得近红外图像,采用小波消噪以及邓氏关联度法对图像进行分割,选择 CNDVI、GNDVI、NDGI 和 NDVI 这 4 种植被指数作为模型输入,采用最小二乘支持向量机算法对植被指数同黄瓜叶片含氮量进行拟合,达到了较理想的预测精度,可为黄瓜生长信息的采集和检测提供理论和技术支持<sup>[23~26]</sup>。

不同品种的黄瓜叶片由于构造、形状、营养性状特征、光谱特征的不同,基于黄瓜叶片光谱图像数据的营养诊断模型也会有所不同。但是光谱图像处理方法是一样的,可以采用本文提出的方法建立模型来预测黄瓜叶片氮素含量。

3 结 论

(1) 采用 CCD 相机加滤光片的方法获取温室作物近红外图像,进而计算植被指数并预测作物叶片营养成分含量,简便易行,对于实现温室作物的精细管理具有重要意义。

(2) 采用小波消噪以及邓氏关联度法对图像进行分割,得到了信噪比较高的目标图像,证明可以将此方法用于多光谱图像背景分离。

(3) 利用 CNDVI、GNDVI、NDGI 和 NDVI 这 4 种植被指数作为模型输入,采用最小二乘支持向量机算法对植被指数同黄瓜叶片含氮量进行拟合,预测模型的决定系数  $R^2$  为 0.825,验证  $R^2$  为 0.728,达到了较理想的预测精度,为黄瓜生长信息进一步采集和检测提供了理论和技术支持。

参 考 文 献

1 郭建华,赵春江,陈立平,等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展[J]. 中国土壤与肥料,2008(4):10~14.  
Guo Jianhua,Zhao Chunjiang,Chen Liping,et al. Research advancement and status on crop nitrogen nutrition diagnosis [J]. Soil and Fertilizer Science in China,2008(4):10~14. (in Chinese)

2 易小琳,曹一平,王敬国. 作物氮素快速营养诊断方法的初探[J]. 北京农业大学学报,1995,21(增刊):37~41.  
Yi Xiaolin,Cao Yiping,Wang Jingguo. Study on crop tissue testing methods for nitrogen [J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis,1995,21(Supp.):37~41. (in Chinese)

3 李俊华,董志新,朱继正. 氮素营养诊断方法的应用现状及展望[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2003,7(1):80~83.  
Li Junhua,Dong Zhixin,Zhu Jizheng. Present application and outlook for method of nitrogen nutrition diagnosis [J]. Journal of Shihezi University:Natural Science,2003,7(1):80~83. (in Chinese)

4 郭建华,陈立平,杨月英,等. 温室黄瓜氮素营养状况诊断效果研究[J]. 长江蔬菜,2010(22):60~63.  
Guo Jianhua,Chen Liping,Yang Yueying,et al. Effect of nitrogen nutrition diagnosis on cucumber in greenhouse [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2010(22):60~63. (in Chinese)

5 焦雯珺,闵庆文,林焜,等. 植物氮素营养诊断的进展与展望[J]. 中国农学通报,2006,22(12):351~355.  
Jiao Wenjun,Min Qingwen,Lin Kun,et al. Progress and perspective on nutrition diagnosis of plant nitrogen [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2006,22(12):351~355. (in Chinese)

6 冯雷,方慧,周伟军. 基于多光谱视觉,传感技术的油菜氮含量诊断方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(9):1749~1752.  
Feng Lei,Fang Hui,Zhou Weijun. Nitrogen stress measurement of canola based on multi-spectral charged coupled device imaging sensor [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2006,26(9):1749~1752. (in Chinese)

7 Peterson D L,Rolfe G L. Nutrient dynamics of herbaceous vegetation in upland and floodplain forest communities [J]. American Midland Naturalist,1982,107(2):325~339.

8 Ahmad I S,Reid J E. Evaluation of colour representation for maize images [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996,63(3):185~195.

9 唐强,李少昆,王克如,等. 基于高光谱反射率的冬小麦生长后期氮素丰度监测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(11):3061~3066.  
Tang Qiang,Li Shaokun,Wang Keru,et al. Monitoring canopy nitrogen status in winter wheat of growth anaphase with hyperspectral remote sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(11):3061~3066. (in Chinese)

10 杨玮,Nick Sigrimis,李民赞. 基于多光谱图像分析的温室黄瓜叶片营养元素检测与诊断[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(1):210~213.  
Yang Wei,Sigrimis N,Li Minzan. Nitrogen content testing and diagnosing of cucumber leaves based on multispectral imagines [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(1):210~213. (in Chinese)

11 徐坤范,李明玉,艾希珍. 氮对日光温室黄瓜呈味物质——硝酸盐含量及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学,2006,12(5):717~721.  
Xu Kunfan,Li Mingyu,Ai Xizhen. Effect of nitrogen on taste compounds,nitrate and yield of cucumber in solar-greenhouse [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2006,12(5):717~721. (in Chinese)

12 张喜杰,李民赞,崔笛,等. 温室作物长势的光谱学诊断方法研究与仪器开发[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(5):887 ~ 890.  
Zhang Xijie, Li Minzan, Cui Di, et al. New method and instrument to diagnose crop growth status in greenhouse based on spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2006,26(5):887 ~ 890. (in Chinese)

13 秦侠,沈兰荪. 小波分析及其在光谱分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2000,20(6):892 ~ 897.  
Qin Xia, Shen Lansun. Wavelet transform and its application in spectral analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2000, 20(6):892 ~ 897. (in Chinese)

14 田高友,袁洪福,刘慧颖,等. 小波变换在近红外光谱分析中的应用进展[J]. 光谱学与光谱分析,2003,23(6):1 111 ~ 1 114.  
Tian Gaoyou, Yuan Hongfu, Liu Huiying, et al. The application of wavelet transform in near infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2003,23(6):1 111 ~ 1 114. (in Chinese)

15 祝诗平,王一鸣,张小超. 小波消噪及其在小麦蛋白质近红外光谱分析中的应用[J]. 西南农业大学学报:自然科学版, 2003,25(6):522 ~ 525.  
Zhu Shiping, Wang Yiming, Zhang Xiaochao. Wavelet denoising theory and its application in wheat protein concentration prediction with near infrared spectroscopy analysis [J]. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science,2003, 25(6):522 ~ 525. (in Chinese)

16 Sorol N, Arancibia E, Bortolato S A, et al. Visible/near infrared-partial least-squares analysis of brix in sugar cane juice: a test field for variable selection methods [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2010,102(2): 100 ~ 109.

17 李红军,张立周,陈曦鸣,等. 应用数字图像进行小麦氮素营养诊断中图像分析方法的研究[J]. 中国生态农业学报, 2011,19(1):155 ~ 159.  
Li Hongjun, Zhang Lizhou, Chen Ximing, et al. Image analysis method in application of digital image on diagnosing wheat nitrogen status[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2011,19(1):155 ~ 159. (in Chinese)

18 李映雪,朱艳,曹卫星. 不同施氮条件下小麦冠层的高光谱和多光谱反射特征[J]. 麦类作物学报,2006,26(2):103 ~ 108.  
Li Yingxue, Zhu Yan, Cao Weixing. Characterizing canopy hyperspectral and multispectral reflectance under different N-application conditions in wheat [J]. Journal of Triticeae Crops,2006,26(2):103 ~ 108. (in Chinese)

19 Feyaerts F, van Gool L. Multi-spectral vision system for weed detection[J]. Pattern Recognition Letters,2001,22(67):667 ~ 674.

20 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.  
Qiu Zhengjun, Song Haiyan, He Yong, et al. Variation rule 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. (in Chinese)

21 刘飞,王莉,何勇. 应用多光谱图像技术获取黄瓜叶片含氮量及叶面积指数[J]. 光学学报,2009,29(6):1 616 ~ 1 620.  
Liu Fei, Wang Li, He Yong. Application of multispectral imaging technique for acquisition of cucumber growing information [J]. Acta Optica Sinica,2009,29(6):1 616 ~ 1 620. (in Chinese)

22 吴长山,童庆禧,郑兰芬,等. 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的相关分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2000,8(1):31 ~ 37.  
Wu Changshan, Tong Qingxi, Zheng Lanfen, et al. Correlation analysis between spectral data and chlorophyll of rice and maize [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2000,8(1): 31 ~ 37. (in Chinese)

23 Blackmer T M, Schepers J S, Varel G E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves [J]. Agron. J., 1994,6:934 ~ 938.

24 Scharpf P C, Lory J A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict side dress nitrogen needs [J]. Agron. J., 2002, 94:397 ~ 404.

25 Silva M C C, Fontes P C R, Miranda G V. SPAD index and potato yield, in two planting periods, depending on nitrogen rates [J]. Horticultura Brasileira,2009,27(1): 17 ~ 22,38.

26 Bauerle W L, Weston D J, Bowden J D, et al. Leaf absorptance of photosynthetically active radiation in relation to chlorophyll meter estimates among woody plant species [J]. Scientia Horticulturae,2004,101(1/2): 169 ~ 178.

27 顾清,邓劲松,陆超,等. 基于光谱和形状特征的水稻扫描叶片氮素营养诊断[J]. 农业机械学报,2012,43(8):110 ~ 114.  
Gu Qing, Deng Jinsong, Lu Chao, et al. Diagnosis of rice nitrogen nutrition based on spectral and shape characteristics of scanning leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):110 ~ 114. (in Chinese)