

# 锦橙叶片氮含量可见近红外光谱模型研究

易时来, 邓 烈, 何绍兰, 郑永强, 张 璇

(西南大学柑桔研究所, 中国农科院柑桔研究所, 国家柑桔工程技术研究中心, 重庆 400712)

**摘 要:** 以单系积砧蓬安 100 号锦橙为试材, 采用田间试验的方法开展利用鲜叶可见近红外光谱估测叶片氮素营养状况的研究。运用偏最小二乘法 (PLS) 分析叶片反射光谱与氮含量之间的关系。结果表明, 在可见光 350~700 nm, 随着氮肥用量的增加, 叶片光谱反射率呈下降趋势; 而在 750~1 075 nm 范围内, 叶片光谱反射率随着氮肥用量增加而增加。通过对叶片反射光谱、一阶微分、二阶微分和倒数对数光谱进行变量标准化 (SNV) 处理, 运用偏最小二乘法 (PLS) 与内部交叉验证建立的氮含量预测回归模型, 其中反射光谱的一阶微分光谱氮含量定标模型具有最好的预测能力, 其建模与预测均方根误差和标准差都较低且接近, 偏差绝对值最小。因此, 可以利用叶片反射光谱的一阶微分值来预测蓬安 100 号锦橙叶片氮含量。

**关键词:** 锦橙; 叶片; 氮含量; 偏最小二乘法; 可见近红外光谱

中图分类号: S666 文献标识码: A 文章编号: 1009-9980(2010)01-13-05

## Research on nitrogen content of leaf of Jincheng orange cultivar using visible near infrared spectroscopy model

YI Shi-lai, DENG Lie, HE Shao-lan, ZHENG Yong-qiang, ZHANG Xuan

(Citrus Research Institute, Southwest University, Citrus Research Institute, CAAS, National Engineering Technology Research Center for Citrus, Chongqing 400712 China)

**Abstract:** Visible/near-infrared spectroscopy (Vis/NIRS) appears as a prominent technique for non-destructive evaluation. In this research, the potential of using the Vis/NIRS was investigated for measuring the nitrogen content in Peng'an 100 Jincheng orange leaves, and the relationship was established between non-destructive VNIRS measurement and the nitrogen content in Peng'an 100 Jincheng orange leaves. Intact Peng'an 100 Jincheng orange leaves were measured by reflectance VNIR in 350 to 1000 nm range. The data set as the reflectance VNIR was analyzed in order to build the best prediction model for these characteristic, using several spectral pretreatments such as First Derivatives Spectrum (FDS), Second Derivatives Spectrum (SDS) and Reciprocal Logarithm Spectrum [Log (1/R)] with Standardization of Variables (SNV) techniques. The results showed the reflectance spectrums of leaves presented downward trend within 350 to 700 nm and upward trend within 750 to 1000 nm with the increasing of the nitrogen fertilizer in potted plant of Peng'an 100 Jincheng orange (*Citrus sinensis* Osbeck.) on trifoliolate (*Poncirus trifoliata*) rootstock. The model for the nitrogen content in Peng'an 100 Jincheng orange leaves prediction using FDS with SNV spectral pretreatments showed an excellent prediction performance. This non-destructive, fast and accurate technology can be used in citrus industry that would be beneficial to predict the plant nutrition.

**Key words:** Jincheng orange; Leaf; Nitrogen content; Partial least squares (PLS); Vis/NIR spectroscopy

测量作物叶片氮含量是精准农业中一项重要而又关键的工作, 只有精确诊断作物的营养水平, 才能及时进行精确、科学施肥<sup>[1]</sup>。因此, 寻找一种具有实时、快速、无损、准确度高的提取作物氮素营养信息的方法, 成为了世界各国精准农业研究的热点之一<sup>[2-4]</sup>。光谱技术尤其是高光谱遥感技术的发展, 利用遥感数据提取作物生物化学参数体现出明显的优越性, 特别是应用近红外遥感信息估测作

物氮含量的研究受到了高度重视。目前, 有关可见近红外光谱估测作物氮素的研究主要集中在水稻<sup>[5-6]</sup>、小麦<sup>[1,7-10]</sup>、油菜<sup>[11-13]</sup>等大田作物上, 而关于多年生常绿果树柑橘的叶片氮素含量高光谱诊断研究的报道甚少。我们通过对柑橘重要品种锦橙的叶片氮含量与可见近红外光谱相关性和基于光谱的预测模型研究, 旨在为柑橘氮素水平的快速、实时诊断及氮肥科学管理提供理论依据。

收稿日期: 2009-06-24 接受日期: 2009-10-16

基金项目: 重庆市重大攻关项目 (CSTC, 2006)、科技部支撑计划项目 (2007BAD47B04-1, 2008BAD92B08-7-4); 重庆市柑桔学重点实验室和重庆市教委果树学重点实验室联合资助

作者简介: 易时来, 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为柑桔栽培生理与农业信息技术。Tel: 023-68349726, E-mail: yishilai@126.com  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

试验品种为盆栽单系积 (*Poncirus trifoliata*) 砧蓬安 100 号锦橙 (*Citrus Sinensis* (L.) cv. Jincheng)。苗木于 2007 年 9 月嫁接, 2008 年 4 月 5 日定植于直径 20 cm×高 45 cm 的圆柱体盆钵 (每钵装土 66 kg) 中, 每钵 1 株, 共 25 株。土壤为沙土, pH 值 8.04, 全氮 0.85%, 全磷 0.04%, 全钾 6.28%, 有机质 1.54%。控制施氮肥试验设计  $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  共 5 个施氮水平, 施氮总量分别为 0, 30, 75, 90, 120 g·株<sup>-1</sup>·年<sup>-1</sup>, 单株处理, 5 次重复, 施用氮肥为含 N46% 的尿素, 各处理磷钾肥施用量相同。年施肥量分别在春梢、夏梢、秋梢萌动和顶芽停长时分 6 次施用。2008 年 11 月夏梢叶片完全老熟后, 采集正常夏梢叶 10 片·株<sup>-1</sup>, 洗净, 擦干, 用于光谱与氮素测定。另外, 在附近商品化生产的锦橙果园随机采集 10 组夏梢叶片样组成验证集, 测定光谱后, 用化学分析方法测定叶片的氮素含量, 用于模型的验证。

### 1.2 光谱采集与分析

利用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec HandHeld 手持式光谱辐射仪 (325~1 075 nm) 在暗室中进行鲜叶光谱数据采集。以 USHIO 公司生产的 A128932 型钨卤灯作光源, 光源距离检测叶片 30 cm。光谱采样间隔约 1.5 nm, 光谱分辨率为 3.5 nm, 视场角为 25°。叶片光谱反射率测试前以标准白板进行定标。被测叶片放置在 100 cm×100 cm 黑布上, 探头离目标物的距离视其大小而定, 保证探头的视野范围落在目标物体上, 每株测定 10 片叶, 每叶测定 10 条曲线, 每条光谱曲线设为 10 次平均值。叶片氮含量采用半微量凯氏定氮法测定<sup>[14]</sup>。

原始 (反射) 光谱 (Original Spectrum, OS) 数据用 ViewSpec Pro 光谱软件进行转换, 得到一阶微分光谱 (First Derivatives Spectrum, FDS)、二阶微分光谱 (Second Derivatives Spectrum, SDS) 及倒数对数光谱 (Reciprocal Logarithm Spectrum, Log (1/R)) 数据, 然后用 unscramble v9.7 软件进行偏最小二乘法 (PLS) 处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮水平蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量

不同施氮量处理对蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量的影响见表 1。施氮处理的锦橙叶片含氮量均

高于对照, 且随着氮肥施用量的增加叶片氮含量呈增加趋势。其中, 不同处理的叶片氮含量从大到小依次为  $N_4 > N_3 > N_2 > N_1 > N_0$ , 施氮处理平均比对照高 28%。经 SPSS 方差统计分析, 各施氮处理的叶片氮含量与对照相比均达显著水平。

表 1 不同施氮处理对蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量的影响

Table 1 The nitrogen content of Peng'an 100 Jincheng summer shoot leaves with different nitrogen treatments

处理 Treatments	氮含量 Nitrogen Content/g·kg <sup>-1</sup>	比对照高 Higher than control/%
$N_0$	0.246 d*	-
$N_1$	0.297 c	20.97
$N_2$	0.312 bc	27.07
$N_3$	0.322 b	31.12
$N_4$	0.331 a	34.71

注: \* 不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。

Note: \* Different lowercase letters indicated significant differences in the level of 0.05.

### 2.2 不同施氮水平蓬安 100 号锦橙夏梢叶片光谱特征

不同氮素水平蓬安 100 号锦橙夏梢叶片的原始反射光谱如图 1 所示。从图 1 可见, 所有施氮水平处理的蓬安 100 号锦橙叶片, 反射光谱在可见光区 350~700 nm 内都具有较低的反射率, 并且都在 550 nm 处, 有一个强反射峰。在 700~750 nm 反射率迅速增强, 在 750~1 000 nm 内趋于平缓而略呈降低趋势, 形成一个高的“反射平台”。不同氮肥处理, 蓬安 100 号锦橙反射光谱有明显的不同, 在可见光区域, 反射光谱反射强度随着氮肥用量的增加呈降低趋势, 即  $N_0 > N_3 > N_2 > N_4 > N_1$ , 尤其在 550 nm 附近, 各施氮肥处理反射强度差异较明显; 而在近红外区域, 随着氮肥用量的增加, 反射光谱反射率基本呈增加趋势, 即  $N_3 > N_2 > N_0 > N_4 > N_1$ 。并且在 750~1 000 nm, 各施氮处

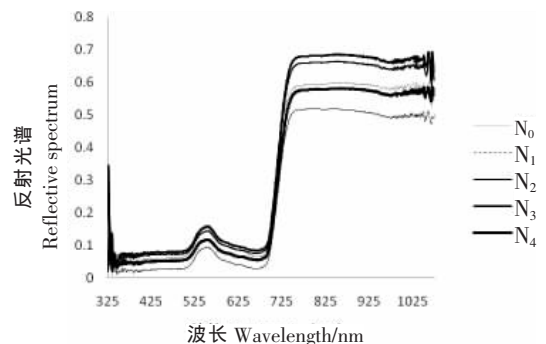


图 1 不同氮处理蓬安 100 号锦橙夏梢叶片反射光谱特征  
Fig. 1 The reflective spectrum characteristics of Peng'an 100 Jincheng summer shoot leaves with different nitrogen treatment

理反射光谱反射率之间差异非常明显,这就为利用光谱诊断氮素提供了可能。

### 2.3 光谱预处理方法选择

目前,偏最小二乘法(PLS)是化学计量学中最普遍使用的定量分析方法,该方法可有效地除去噪声,解决光谱共线问题,有效地提取光谱信息<sup>[15-16]</sup>。为了减少光程变化、样品粒度、基线平移与旋转可能对模型的影响,实验采用 Savitzky-golay 平滑法(S-G)、多元散射校正(Multiple Scattering Correction, MSC)、消噪(Noise)和变量标准化(Standardization of Variables, SNV)4种光谱预处理方法经 PLS 及内部交叉验证建模,不同光谱预处理方法的 PLS 建模结果见表 1。

从表 1 可以看出,从模型校正和预测相关系数( $R_c$  and  $R_p$ ) 尽量高、校正标准误(standard error of calibration, SEC)和预测标准误(standard error of prediction, SEP)应尽量低并且接近等评价角度考虑,变量标准化(SNV)处理光谱所建模型较优。因此,本实验采用 SNV 校正方法进行光谱预处理。

### 2.4 蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量与反射光谱定标模型

蓬安 100 号锦橙夏梢叶片原始光谱经 SNV 校正及内部交叉验证,运用 PLS 建立了原始光谱

(OS)、一阶微分光谱(FDS)、二阶微分光谱(SDS)以及倒数对数光谱( $\text{Log}(1/R)$ )与叶片氮含量之间定标模型,所建模型的相关参数如表 2 所示。

从表 2 可以看出,在定标波长 325~1 075 nm,蓬安 100 号锦橙夏梢叶片的反射光谱、一阶微分、二阶微分和倒数对数 4 种光谱数据经变量标准化(SNV)校正后,运用偏最小二乘法(PLS)和交叉验证方法建立的氮含量预测模型,4 种光谱数据的建模和预测相关系数( $r$ )都在 0.9 以上,均都达到了极显著相关水平( $n=25$ ,  $r_{0.01}=0.496$ ,下同)。从建模质量要求建模和预测标准误(Standard Error, SE)低并且接近,以及偏差的绝对值要较小来考虑,一阶微分光谱建模效果最佳;并且用 2 个因子数(Factor Number)能表达定标波段 88%的信息。根据传统主成分方法需选取前 2 个主成分来进行综合评价,按照累计贡献率  $G(r) \geq 85\%$  的原则<sup>[7,12-13]</sup>,可以用一阶微分光谱进行氮含量定标模型构建,能更好地预测蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量。

### 2.5 蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量与反射光谱相关的定标模型回归系数

蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量与一阶微分光谱经 SNV 处理及内部交叉验证构建的定标模型,其回归系数如图 2 所示。进一步统计分析表明,442~

表 2 不同光谱预处理方法的 PLS 建模结果

Table 2 Modeling results of partial least squares with different spectrum pretreatment methods

光谱预处理 Spectrum pretreatment	因子数 Factor number	累积贡献率* Cumulative contribution rate /%	校正模型 Calibration model		内部交叉验证 Internal cross-validation	
			相关系数 $R_c$	校正标准误 SEC	相关系数 $R_p$	预测标准误 SEP
S-G 平滑 Savitzky-golay smoothing	4	85	0.955 6	0.095 6	0.924 9	0.123 7
多元散射校正 Multiple Scattering Correction	3	88	0.963 6	0.086 8	0.938 1	0.112 6
消噪 Noise	2	89	0.943 5	0.107 6	0.889 0	0.153 2
变量标准化 Standardization of variables	3	89	0.961 6	0.089 1	0.936 9	0.113 6

注: \* 累积贡献率: 前  $k$  个主成分共有多大的综合能力,用这  $k$  个主成分的方差和在全方差中所占比重来描述,为累积贡献率。

Note: Cumulative Contribution Rate: a representation of the total comprehensive ability of the pre- $k$  principal components, which is described by the variance of  $k$ -principal components and the proportion of it occupied in the total variance.

表 3 蓬安 100 号锦橙夏梢叶片光谱与氮含量定标模型参数( $n=25$ )

Table 3 The parameters of calibration models between spectrum and nitrogen content of Peng'an 100 Jincheng in summer shoot leaves ( $n=25$ )

光谱预处理 Spectrum pretreatment	因子数 Factor number	累积贡献率* Cumulative contribution rate/%	校正模型 Calibration model		内部交叉验证 Internal cross-validation	
			相关系数 $R_c$	校正标准误 SEC	相关系数 $R_p$	预测标准误 SEP
原始光谱+变量标准化 OS+SNV	3	88	0.952 4	0.098 9	0.928 0	0.121 4
一阶微分+变量标准化 FDS+SNV	2	88	0.936 1	0.114 2	0.918 8	0.128 3
二阶微分+变量标准化 SDS+SNV	2	87	0.935 4	0.114 8	0.919 5	0.127 6
倒数对数+变量标准化 $\text{Log}(1/R)$ +SNV	6	74	0.973 3	0.075	0.929 0	0.120 3

556 nm、560~658 nm、661~714 nm 和 718~786 nm 波段处的回归系数为原始反射光谱的一阶微分值与氮含量定标模型的特征变量,因此,442~556 nm、560~658 nm、661~714 nm 和 718~786 nm 波段区是蓬安 100 号锦橙夏梢叶片反射光谱的一阶微分值与氮含量定标模型的特征波段。

2.6 模型验证

图 3 为蓬安 100 号锦橙夏梢叶片原始光谱一阶

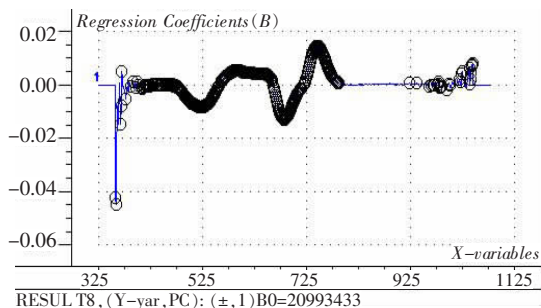


图 2 蓬安 100 号锦橙夏梢叶片氮含量与一阶微分光谱定标模型回归系数  
标“○”为特征变量。

Fig. 2 The regression coefficients of the nitrogen content and the first derivatives spectrum in summer shoot leaves of Peng'an 100 Jincheng  
‘○’significant x-variables.

微分值经变量标准化(SNV)校正后,运用偏最小二乘法(PLS)和交叉验证方法建立的氮含量校正模型对验证集样品的预测结果。用校正模型对随机采集的 10 个样品组成的验证集进行预测,预测模型的相关系数  $r=0.9540$ , 决定系数  $R^2$  达 0.899, 预测均方根误 RMSEP=0.1181, 偏差 Bias 为 -0.0354, 预测性能较好。结果表明,利用锦橙夏梢叶片反射光谱的一阶微分值经变量标准化(SNV)校正后对柑橘叶片氮素含量的快速测定是有效的。

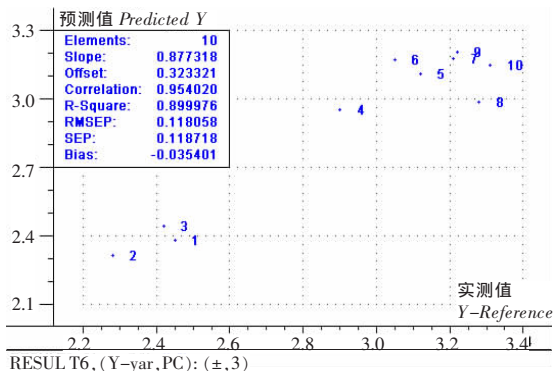


图 3 蓬安 100 号锦橙夏梢叶片样品预测值与实测值的相关图  
Fig. 3 The relationship between predictive and true values in summer shoot leaves of Peng'an 100 Jincheng

3 讨 论

本试验表明,在可见光区域,锦橙叶片光谱反射强度随着氮肥用量的增加呈下降趋势,这与叶片中叶绿素含量的多少有关,叶绿素含量越低,则反射率越高<sup>[7]</sup>。而在近红外区域,随着氮肥用量的增加,叶片光谱反射率有增加的趋势,这可能是因为在近红外区域植被的反射率主要受叶片内部结构、生物量、蛋白质、纤维素等的影响<sup>[1]</sup>。在本试验中出现了高氮(N<sub>4</sub>)处理在近红外区域反而比对照叶片反射率更低,可能与在盆栽沙土条件下,过量施氮处理导致柑橘叶片的结构有所破坏有关,同时,我们在田间也观察到,过量施氮处理的盆栽植株长势比其他处理稍弱。

现代近红外分析技术包括近红外光谱仪、化学计量软件和应用模型三部分及有机结合才能满足快速分析的技术要求。目前应用模型的建立方法主要有多元线性回归(MLR)、逐步回归(SMR)、主成分分析(PCA)与偏最小二乘法(PLS)等<sup>[18]</sup>。MLR 和 SMR 法在分析样品时只用了一些特征波长点的光谱信息,其他点的信息被丢失,易产生模型的过适性。PCR 和 PLS 的最显著特点就是利用了全部的光谱信息,可以压缩所需样品数量,将高度相关的波长点归于一个独立变量中,根据为数不多的独立变量建立回归方程,通过内部检验来防止过模型现象,并且比 SMR 和 MLR 分析精度高。

由于原始光谱数据含有来自高频随机噪声、样本不均匀、基线漂移、光散射等不利因素的影响,需对其进行预处理。本试验所用的光谱辐射计,其配套的数据采集与处理软件能将原始反射光谱数据转化成一阶微分、二阶微分和倒数对数光谱数据。通过对原始反射光谱、一阶微分、二阶微分等 4 种光谱数据进行平滑(Smoothing)、变量标准化(SNV)、多元散射校正(MSC)、去燥(Noise)等预处理,多次尝试后的结果表明,变量标准化(SNV)光谱预处理的偏最小二乘 PLS 建模最佳。

在“三基肥”(氮、磷、钾)中,氮素对作物的生长发育和产量的影响最大,施用量也最大,亦是表征作物生长状况的重要参数之一。尽管对氮素含量的光谱诊断已有了大量研究<sup>[1,6-9,11-13]</sup>,但由于影响因素众多,特别是作物品种类型不同,对氮素的吸收利用规律差异很大,迄今为止,还没有通用的氮素估测模型可以推广,采用光谱参数及其变换形式对柑橘叶片营养进行的相关研究还比较缺乏。本试验通过对锦

橙夏梢叶片反射光谱、一阶微分光谱等 4 种光谱预处理与氮含量相关性的研究, 结果表明, 蓬安 100 号锦橙夏梢叶片反射光谱的一阶微分经变量标准化 (SNV) 处理, 运用 PLS 与交叉验证回归建立的氮含量定标模型, 用 2 个因子数能表达波段 88% 的信息, 建模和预测相关系数分别为 0.94 和 0.92, 建模和预测均方根差和标准差都非常低, 并且各自非常接近, 建模和预测的偏差 (Bias) 分别为 0.000E+00 和 4.080E-04, 因此, 利用叶片反射光谱的一阶微分来预测叶片氮素营养状况水平是可行的。

## 4 结 论

在可见光区域, 随着氮肥用量的增加, 叶片光谱反射率呈下降趋势; 而在近红外区域, 叶片光谱反射率随着氮肥用量增加而增加。利用叶片反射光谱的一阶微分值来预测蓬安 100 号锦橙叶片氮含量具有一定的可行性, 在与锦橙夏梢叶片类似的其他甜橙品种上也具有较好的实用性。

### 参考文献 References:

- [1] JIANG Jin-bao, CHEN Yun-hao, HUANG Wen-jiang, LI Jing. Hyperspectral estimation models for LTN content of winter wheat canopy under stripe rust stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (1): 35-39.  
蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 李京. 条锈病胁迫下冬小麦冠层叶片氮素含量的高光谱估测模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24 (1): 35-39.
- [2] XUE Li-hong, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, JIANG Dong, MENG Ya-li, ZHU Yan. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 807-812.  
薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 姜东, 孟亚利, 朱艳. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 807-812.
- [3] BRONSON K F, CHUA T T, BOOKER J D. In-season nitrogen status in irrigated cotton II Leaf nitrogen and biomass[J]. Soil Science Society of American Journal, 2003, 67: 1439-1448.
- [4] RACY M B, JAMES S S, GARY E V. Nitrogen deficiency detection using reflected short-wave radiation from irrigated corn canopies[J]. Agronomy Journal, 1996, 88: 1-5.
- [5] ZHANG Jin-heng, WANG Ke. New vegetation index for estimating nitrogen concentration using fresh leaf spectral reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (1): 158-161.  
张金恒, 王珂. 基于鲜叶光谱估测氮素营养的新植被指数[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 158-161.
- [6] WANG Xiu-zhen, WANG Ren-chao, LI Yun-mei, SHEN Zhang-quan. Study on red edge characteristics of rice spectral caused by nitrogen level[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University: Agric. & Life Sci, 2001, 27(3): 301-306.  
王秀珍, 王人潮, 李云梅, 沈掌泉. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001, 27(3): 301-306.
- [7] ZHANG Jun-hua, ZHANG Jia-bao. Response of winter wheat spectral reflectance to leaf chlorophyll, total nitrogen of above ground[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(3): 586-592.
- [8] WANG Ji-hua, HUANG Wen-jiang, LAO Cai-lian, ZHANG Lu-da, LUO Chang-bing, WANG Tao, LIU Liang-yun, SONG Xiao-yu, MA Zhi-hong. Inversion of winter wheat foliage vertical distribution based on canopy reflected spectrum by partial least squares regression method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27 (7): 1319-1322.  
王纪华, 黄文江, 劳彩莲, 张录达, 罗长兵, 王韬, 刘良云, 宋晓宇, 马智宏. 运用 PLS 算法由小麦冠层反射光谱反演氮素垂直分布[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(7): 1319-1322.
- [9] LU Yan-li, LI Shao-kun, BAI You-lu, XIE Rui-zhi, GONG Yong-mei. Spectral red edge parametric variation and correlation analysis with N content in winter wheat[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(1): 1-7.  
卢艳丽, 李少昆, 白由路, 谢瑞芝, 宫永梅. 冬小麦冠层光谱红边参数的变化及其与氮素含量的相关分析[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(1): 1-7.
- [10] LUKINA E V, RAUN W R, STANE M L. Effect of row spacing, growth stage, and nitrogen rate on spectral irradiance in winter wheat [J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, 23(1): 103-122.
- [11] ZHANG Xue-hong, LIU Shao-min, HE Bei-bei. Analysis on hyperspectral characteristics of rape at different nitrogen levels [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition, 2007, 43(3): 245-248.  
张雪红, 刘绍民, 何蓓蓓. 不同氮素水平下油菜高光谱特征分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 245-248.
- [12] WANG Yuan, HUANG Jing-feng, WANG Fu-min, LIU Zhan-yu. Predicting nitrogen concentrations from hyperspectral reflectance at leaf and canopy for rape[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(2): 273-277.  
王渊, 黄敬峰, 王福民, 刘占宇. 油菜叶片和冠层水平氮素含量的高光谱反射率估算模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(2): 273-277.
- [13] ZHANG Xue-hong, LIU Shao-min, HE Bei-bei. Hyperspectral evaluation of rape nitrogen nutrition using continuum-removed method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 151-155.  
张雪红, 刘绍民, 何蓓蓓. 基于包络线消除法的油菜氮素营养高光谱评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 151-155.
- [14] Soil Science Society of China, Agricultural Chemistry Committees. Routine analysis of agricultural soils[M]. Beijing: Science Press, 1983.  
中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农化常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [15] ZHU Er-yi, YANG Peng-yuan. Application and technique of chemometrics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 11.  
朱尔一, 杨芃原. 化学计量学技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 11.
- [16] Phil William Karl Norris. Near-Infrared technology in the agricultural and food industries[M]. St. Paul: the American Association of Cereal Chemists, Inc. Minnesota, USA, 1987.
- [17] YI Shi-lai, HE Shao-lan, DENG Lie, XIE Rang-jin, CHEN Zhong-xin, REN Jian-qiang. The correlation between leaf spectral reflectance and chlorophyll content of Satsuma leaves[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2007, 29(1): 90-93.  
易时来, 何绍兰, 邓烈, 谢让金, 陈仲新, 任建强. 温州蜜柑叶片光谱反射率与叶绿素含量的相关性[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(1): 90-93.
- [18] LIU Jian-xue. Analysis techniques of practical near-infrared spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2007.  
刘建学. 实用近红外光谱分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.