

油菜氮素光谱定量分析中水分胁迫与光照影响及修正^{*}

张晓东 毛罕平

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部/江苏省重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 研究了油菜氮素和水分胁迫在光谱检测中的相互作用, 以及光照的变化对作物光谱检测的影响。为了克服光照因素对光谱检测的影响, 针对氮素和水分特征波长分别建立了基于光谱反射率变化率的光照修正模型; 为了实现氮素和水分相互作用的解耦, 针对不同含水率水平的植株分别建立了全氮含量光谱特征的主成分回归模型。利用氮素光谱组合分析模型对植株全氮含量进行预测, 结果表明, 实测值与预测值的相关系数 R 为 0.92, 均方根误差 (RMSE) 为 0.53, 优于前期采用 6 特征波长变量和主成分回归法所建立的预测模型。

关键词: 油菜 含氮量 光照 水分胁迫 光谱分析

中图分类号: S121; O657.3 **文献标识码:** A

Effect and Correction of Water Stress and Lighting Factor on Rape Nitrogen Content Spectral Analysis

Zhang Xiaodong Mao Hanping

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

The interaction between rape nitrogen content and water status and influencing factor of lighting in spectrum analysis were developed. In order to avoid the effect of lighting fluctuation, the correction models which based on variation ratio of spectral reflectance were established in each spectral characteristic wavelength of rape nitrogen content and moisture content. The method of principal component analysis (PCA) was used to establish the nitrogen spectral predictive model under different moisture content levels in order to avoid the interaction between rape nitrogen and water status. The combination model was used to predict the nitrogen content of rape. The result showed that the correlation coefficient between the estimated values and the real values is 0.92, the root mean square error is 0.53. The precision of combination model is higher than the previous model which used PCA method and 6 wavelength variables.

Key words Rape, Nitrogen content, Lighting, Water stress, Spectral analysis

引言

油菜缺氮时, 叶片颜色、厚度以及形态结构等会发生一系列变化, 从而引起光谱反射率特征的变化。因此, 可以利用光谱特征来判断植株氮营养状况。目前, 国内外利用光谱分析技术进行作物氮素无损检测的研究已取得了一些进展^[1~6], 但由于作物营

养状态的光谱测量受光照变化、大气窗口等环境因素以及植株自身的水分胁迫状态、叶面积指数等因素的影响很大, 尤其是光照因素和植株水分状态的影响最为显著, 这也使得建立精确的氮素光谱分析模型难度相对较大。在以往的相关研究中, 样本多为土栽, 培育过程不能精确控氮, 这也增加了氮素定量分析的困难。

收稿日期: 2008-07-07 修回日期: 2008-07-23

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA10Z204)和江苏省“333 高层次人才培养工程”专项基金资助项目

作者简介: 张晓东, 博士生, 主要从事系统监测与控制方面的研究, E-mail: zxd700227@126.com

本文采用营养液栽培获得不同氮素水平的油菜样本,利用逐步回归法提取植株含水率和氮素的光谱特征波长,并针对各个特征波长分别建立光照修正模型;在此基础上,对样本按照含水率水平进行分类,进行主成分分析,分别建立不同含水率水平下的氮素光谱检测模型,以实现水分和氮素相互作用的解耦。利用由光照修正模型、含水率光谱预测模型和不同含水率水平的氮素光谱分析模型共同组成的氮素光谱组合分析模型,对油菜氮营养状况进行诊断,以消除光照和水分因素的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验在江苏大学现代农业装备与技术省部共建重点实验室温室中进行,选取的油菜品种为甘蓝型、半冬性杂交油菜“秦优7号”,生长周期为9月份至次年5月份。

油菜于2007年9月15日育苗,按标准种植模式进行管理。移栽期开始,采用营养液盆栽砂培模式,保证样本培养不受土壤等因素的影响。营养液采用山崎配方,按4个氮素水平处理,每20株一个水平组,共4组:第1组(N1)在标准配方的基础上,在不影响其他营养素的情况下,将氮元素增加一倍;第2组(N2)按照标准配方配置营养液;第3组(N3)在标准配方的基础上,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(N4)在标准配方的基础上,在不影响其他营养素的情况下,氮元素减少为标准配方的25%。为了对植株水分状态的光谱特性进行研究,从实验的前40d开始,每组选择10株进行水分胁迫处理,N1组照常灌溉,保持足够的水分供应(含水率水平组W1);N2组在第2和4周各浇灌1次(W2);N3组只在第4周浇灌1次(W3);N4组完全不灌溉(W4)。将全部80个样本中的60个样本用于建模,其余的20个样本用于模型验证。

1.2 实验方法

1.2.1 实验仪器

光谱测量设备采用美国ASD公司生产的FieldSpec®3型手持便携式光谱分析仪,光谱测量范围350~2500nm。在350~1000nm光谱区分辨率为3nm,在1000~2500nm光谱区分辨率为10nm。自行研制的多传感器检测光箱,可以为光谱检测提供稳定的检测环境,光源为宽光谱范围且光照可调的卤素灯,能够满足光谱检测的需要。样本凯氏定氮测量采用的是英国SEAL公司生产的AutoAnalyzer3型连续流动分析仪。使用ZDR-14

型照度记录仪自动采集实验时的光照信息。

1.2.2 光谱反射率测量

实验时间为2008年3月,样本光谱采集在多传感器检测光箱内进行。实验环境的平均温度为16.44℃,平均相对湿度为62.02%。将光谱探头固定于检测光箱的顶端,探头位于植株冠层上方70cm处,实验设定视场为25°。在25000~3000lx的照度调整范围内设置4个照度等级(L1~L4),分别为25000、15000、9000、3000lx。首先,在25000lx下进行标准白板标定,标准白板的反射率为1,此时测量的目标物的光谱是无量纲的相对反射率。光谱测量以10个光谱平均值作为1个采样点光谱,每株选取3个测量点(间隔旋转120°),再以其平均值作为油菜冠层的光谱反射率值。首先在照度25000lx条件下对全部样本进行光谱采集,之后调节照度等级,重复上述过程,依次对所有样本采集不同光照下的冠层光谱数据。

1.2.3 植株全氮含量和含水率的测定

首先测量样本鲜质量,并在恒温80℃烘箱中进行12h的烘干处理之后测量其干质量。样本含水率为

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_1 ——测试样本的鲜质量,mg

m_2 ——测试样本的干质量,mg

植株全氮测定采用凯氏定氮法。首先用浓硫酸及催化剂对干样品进行消煮(150℃加温1.5h后升温至370℃加热4h),再利用连续流动分析仪对测试样本进行分析,最后计算植株全氮含量为

$$N = \frac{c}{m(1-w)} \times 100\% \quad (2)$$

式中 c ——样本液仪器观测值,mg

m ——测试样本的质量,mg

1.3 分析方法

为了建立精确的氮素光谱定量分析模型,不仅需要准确地提取植株氮素和含水率的特征波长,而且还要尽量减少水、氮之间的相互作用以及光照因素对模型精度的影响。

为了准确地获取植株全氮含量和含水率的特征波长,采用前期研究^[7]中应用效果较好的逐步回归法进行特征波长的筛选,在此基础上,建立各个特征波长处的光谱反射率随光照变化的修正模型。光谱采集时,首先准确测量初次白板标定时光照数据,并在整个实验过程记录光照信息,以此为依据,对其后所采集的光谱数据按照修正模型进行修正。利用逐步回归法得到含氮量和含水率的特征波长后,为

了克服光谱变量间的多重共线性的影响,采用主成分回归分析建立光谱分析模型。首先建立植株含水率的光谱预测模型,并将60个建模样本按照植株含水率水平进行分类,分别建立不同含水率水平下的多元氮素光谱分析模型。在对植株进行全氮含量光谱分析时,利用由光照修正模型、含水率光谱预测模型和不同含水率水平的氮素光谱分析模型共同组成的氮素光谱组合分析模型,对油菜氮营养状况进行诊断,以消除光照和水分因素的影响。

在利用组合模型进行含氮量预测时,首先对采集到的光谱数据根据实验时记录的光照数据和反射率随光照的变化率对光谱反射率进行修正,之后按照植株的含水率预测模型对植株含水率进行预测,得到植株的含水率水平,最后利用此前建立的该含水率水平下的氮素预测模型对该样本的氮营养状况进行诊断。

2 结果与分析

2.1 油菜氮素和含水率的冠层光谱特征

油菜冠层的反射光谱在可见光及近红外区域,随含水率上升,光谱反射率均有所下降。如图1a所示,在可见光部分的540~570 nm、700~730 nm区间有较明显的反射峰,两者相关性较高;在近红外区域,930~970 nm、1 430~1 460 nm及1 650 nm附近的光谱反射率也与植株含水率之间存在显著的相关性。

而随着氮素水平的上升,在可见光区域,光谱反射率也均有所下降。如图1b所示,在390~430 nm

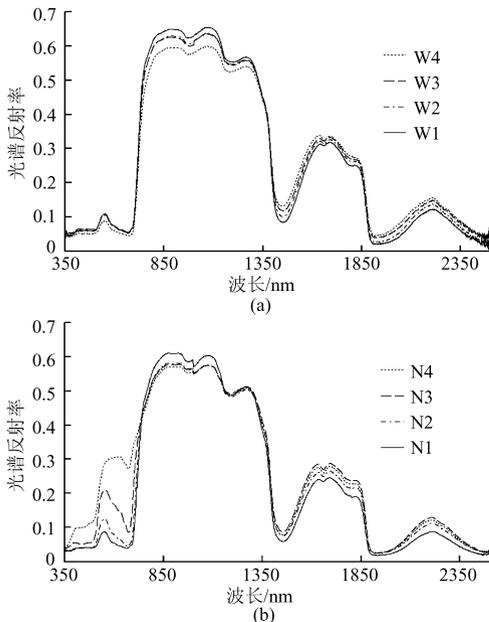


图1 油菜冠层反射光谱

Fig.1 Spectral reflectance of rape canopies

(a) 不同含水率 (b) 不同氮素水平

(叶绿素A的敏感波段)、540~570 nm区间有较明显的反射峰(此区间通常被称为绿峰),反射率与氮含量呈负相关,在绿峰位置相关性和显著性最高;在460 nm附近及630~650 nm之间均可见1个微弱的拐点,这是叶绿素A和B的敏感波段,其反射率与氮含量呈显著负相关;在700 nm附近的红边位置,光谱反射率与植株全氮含量两者的相关性也较高;在近红外区域,随着氮素水平的上升光谱反射率相应上升,但相关关系并不显著。

由上述分析可知,随着油菜氮营养和含水率水平的上升,可见光区域的光谱反射率均明显下降,随着油菜氮营养和含水率水平的下降,可见光区域的光谱反射率也相应上升,且两者与540~570 nm区间和700 nm附近的红边位置也都显著相关。因此,植株氮素和含水率之间存在着相互作用。这主要是因为植株氮素和含水率的变化都会引起叶片颜色、厚度以及内部结构等发生一系列变化,从而影响到冠层光谱的反射率曲线。

2.2 不同光照水平下的油菜冠层光谱特征

图2是油菜冠层在不同光照水平下的光谱反射率。可以看出在整个波长范围内,光谱反射率都随光照增强而显著提高,尤以近红外800~1 300 nm的波长范围上升的梯度最为明显。而在各个反射峰和波谷处的变化率也比较大,在氮素敏感区间400、560、700 nm附近和水分敏感区间960、1 450 nm附近,随着光照的变化,光谱反射率都有显著变化。因此,光照的变化对植株氮素和含水率的光谱诊断都会造成很大影响,是造成模型误差和影响预测精度的重要因素。

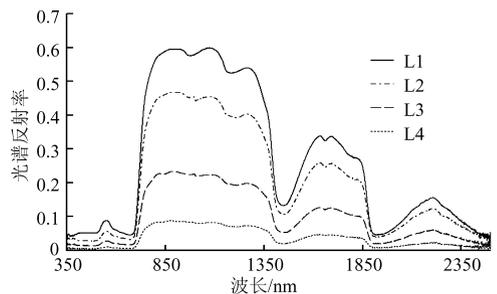


图2 不同光照水平的油菜冠层反射光谱

Fig.2 Spectral reflectance of rape canopies under different lighting levels

2.3 特征波长提取及光照修正模型建立

为了准确提取氮素和含水率的特征波长,对上述的各敏感区间分别应用逐步回归法。以540~570 nm区间为例,具体做法是在此区间每隔3 nm(光谱仪在此区间分辨率为3 nm)选取一个波长点,共11个波长数据作为输入变量与植株全氮数据(或含水率数据)作逐步回归,用偏F检验进行筛选,在

显著性水平(Sig)小于0.001的前提下,选择显著性最高的光谱特征变量。最终在此区间选择556 nm作为氮素光谱特征波长。

对上述的各光谱敏感区间重复上述过程,最终确定406、556、675 nm作为油菜氮素的光谱特征波长,而720、960、1450 nm作为含水率的光谱特征波长,并定义6个变量 $x_1 \sim x_6$ 与之对应(相应的标准

化变量以 $X_1 \sim X_6$ 表示),分别表示各个特征波长处的光谱反射率,光照度变量用 l 表示。将样本在上述6个特征波长处的光谱反射率分别与实验时记录的光照数据做OLS回归,得到各波长处的反射率与光照之间的相关关系,如表1所示,其中 R 代表光谱反射率, ΔR 为反射率随光照的变化率。

采用统计软件SPSS13进行光谱数据的分析。

表1 光谱特征波长的光照修正模型

Tab.1 Lighting correction models of spectral characteristic wavelengths

光谱反射率 R	光照修正模型	$\Delta R / \Delta x^{-1}$	相关系数	标准误差
$x_1(406 \text{ nm})$	$x_1 = 3.14 \times 10^{-6}l - 1.27 \times 10^{-2}$	3.14×10^{-6}	0.96	0.11
$x_2(556 \text{ nm})$	$x_2 = 9.6 \times 10^{-6}l + 1.52 \times 10^{-2}$	9.60×10^{-6}	0.93	0.09
$x_3(675 \text{ nm})$	$x_3 = 5.8 \times 10^{-6}l + 1.48 \times 10^{-2}$	5.80×10^{-6}	0.89	0.74
$x_4(720 \text{ nm})$	$x_4 = 1.6 \times 10^{-5}l + 8.55 \times 10^{-2}$	1.60×10^{-5}	0.94	0.16
$x_5(960 \text{ nm})$	$x_5 = 2.4 \times 10^{-5}l + 1.22 \times 10^{-1}$	2.40×10^{-5}	0.97	0.83
$x_6(1450 \text{ nm})$	$x_6 = 3.29 \times 10^{-6}l + 1.21 \times 10^{-2}$	3.29×10^{-6}	0.93	0.14

2.4 主成分回归及组合模型的建立

在光谱分析方法上,经过多年的发展逐步形成多元线性回归分析(MLR)、逐步回归分析(SRA)、主成分分析(PCA)和偏最小二乘回归分析(PLS)等方法^[8-9]。在光谱数据的多变量分析过程中,若自变量之间存在多重共线性,则各自变量之间的取值可以线性地相互决定,导致回归方程的显著性降低,使回归模型与实际相差较大。为克服数据间的多重共线性,采用主成分回归法建立光谱分析模型。

多重共线性的判别通常是采用方差膨胀因子,自变量 j 的方差膨胀因子定义为

$$V_j = 1/(1 - R_j^2) \quad (j=1,2,\dots,p) \quad (3)$$

式中 R_j ——自变量 j 与其他自变量之间的偏相关系数

V_j 越大,则 R_j 越接近1,说明各自变量间共线性越强。通常,如果自变量的方差膨胀因子大于10,就表明存在着潜在的多重共线性问题^[10]。根据表2可知,各变量的膨胀因子均远大于10,变量之间存在着较严重的多重共线性。

表2 光谱变量的膨胀因子

Tab.2 VIF of spectrum variance

光谱变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
膨胀因子	226.371	131.962	65.288	475.674	2127.545	4674.257

表3为主成分系数表(因子模型),由主成分因子模型可以计算主成分得分(为了方便,将含水率和氮素的因子模型放在同一表中表述),其中 $X_1 \sim X_3$ 为氮素特征波长406、556、675 nm处光谱变量的标

准化变量(X_i 是原变量 x_i 标准化后,转化为均值为0和方差为1的变量,原变量的标准化过程由SPSS13实现); $Z_1 \sim Z_3$ 为氮素的独立主成分变量; $X_4 \sim X_6$ 为含水率特征波长720、960、1450 nm处的标准化变量; $Z_4 \sim Z_6$ 为含水率的独立主成分变量。即各主成分可分别表示为各自特征波长标准化变量的线性组合,如氮素和含水率的第一主成分 Z_1 和 Z_4 可由标准化变量表示为

$$Z_1 = 0.578X_1 + 0.592X_2 + 0.562X_3 \quad (4)$$

$$Z_4 = 0.288X_4 + 0.668X_5 + 0.687X_6 \quad (5)$$

表3 主成分系数表

Tab.3 Principal component coefficients

标准变量	主成分					
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6
X_1	0.578	-0.56	0.593			
X_2	0.592	-0.212	-0.778			
X_3	0.562	0.801	0.209			
X_4				0.288	0.952	0.101
X_5				0.668	-0.276	0.692
X_6				0.687	-0.132	0.715

主成分回归分析的做法是首先将标准化因变量(实测的氮素和含水率数据经标准化处理)与主成分得分进行OLS回归,得到主成分回归系数;然后,把主成分回归系数转化为标准化因变量对标准化自变量回归方程的系数。最后,把该系数转化为原因变量对原自变量的回归系数。通过上述变换,最终得到基于原变量 x_i 的主成分回归模型。

如上所述,为了消除水分因素对氮素诊断的影

响,需要首先建立油菜含水率的光谱特征模型,并将样本按照含水率水平进行分类,分别建立针对不同含水率水平的氮素分析模型,共同构成油菜氮素和含水率组合分析模型。表4是利用主成分回归法建

立的油菜氮素和含水率组合分析模型,其中 W 表示植株含水率, $N_{W1} \sim N_{W4}$ 表示不同含水率水平下的植株全氮含量。

利用20个验证样本的光谱数据对所建立的氮

表4 油菜氮素和含水率组合分析模型

Tab.4 Spectral combination analysis models of rape nitrogen content and moisture content

模型类别	分析模型	样本数	相关系数	标准误差
含水率模型	$W = 69.68 + 59.63x_4 + 15.71x_5 - 167.64x_6$	60	0.92	1.24
全氮模型 ($W > 85\%$)	$N_{W1} = 4.67 + 29.19x_1 - 18.22x_2 - 0.11x_3$	17	0.91	0.79
全氮模型 ($75\% < W \leq 85\%$)	$N_{W2} = 4.87 + 36.45x_1 - 18.33x_2 - 5.6x_3$	20	0.94	1.12
全氮模型 ($65\% < W \leq 75\%$)	$N_{W3} = 5.19 + 18.65x_1 - 17.59x_2 - 1.16x_3$	14	0.91	0.37
全氮模型 ($W \leq 65\%$)	$N_{W4} = 5.17 + 21.3x_1 - 17.9x_2 - 1.19x_3$	9	0.95	0.61

素光谱组合分析模型进行检验。首先,根据实验时记录的光照数据以及光谱反射率随光照的变化率(表1),对各个特征波长处的反射率值进行修正。之后,利用表4的含水率预测模型判断植株的含水率水平。最后,使用与该含水率水平对应的全氮预测模型判断植株的全氮含量。结果表明,油菜全氮含量的实测值与预测值的相关系数 R 为0.92,均方根误差为0.53(图3)。而前期采用6个特征波长变量和主成分回归法建立的全氮预测模型的相关系数为0.88,均方根误差为2.62。不仅参与回归的变量减少了一半,而且模型的预测精度也有一定的提高。

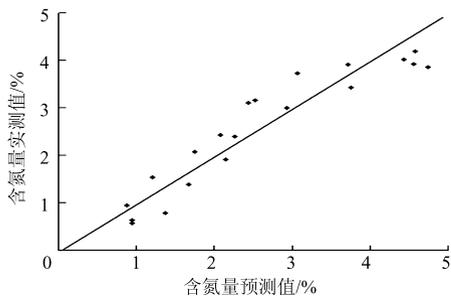


图3 油菜植株全氮含量的预测值与实测值

Fig.3 Scatter plot of estimated values and real values for rape total nitrogen content

在应用组合模型对氮素和含水率水平进行诊断和解耦时,首先要准确判断植株的含水率水平,在此基础上,才有可能应用相应含水率水平下的全氮模型对植株氮素水平进行准确预测。但由于分类建模

时样本的数量较少,使得含水率模型的预测精度不够理想。同时,由于进行氮素和含水率分析时采用的是同一组光谱数据,理论上无法完全消除两者之间的相互影响,真正做到对氮素和含水率相互作用的解耦。由于以上原因,氮素组合模型虽然和原有模型相比,精度有一定的改善,但若想进一步提高组合模型的预测精度,还需增加分类建模的样本数量,以提高植株含水率的预测精度。通过在相同实验条件下,对不同氮素和含水率水平的植株进行独立重复的光谱信息采集,并对组合模型进行交叉验证以实现

3 结束语

研究了油菜氮素光谱定量分析过程中水、氮之间的相互作用以及光照因素的影响。考虑到光谱检测过程中光照变化对光谱检测的影响,针对氮素和含水率的光谱特征波长分别建立了基于反射率随光照变化率的光谱修正模型;考虑到植株含水率和氮素光谱检测的相互影响,建立了基于不同植株含水率水平的氮素光谱分析模型。利用由光照修正模型、含水率光谱预测模型和不同含水率水平的氮素光谱分析模型共同组成的氮素组合分析模型,对验证样本进行预测。结果表明,植株全氮含量的实测值与预测值的相关系数 R 为0.92,均方根误差(RMSE)为0.53,使预测精度有了一定的提高。

参 考 文 献

- Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminate analysis [J]. *Crop Sci.*, 1995, 35: 1400~1405.
- Fitzgerald G J, Rodriguez D, Christensen L K, et al. Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rained and irrigated wheat environments [J]. *Precision Agriculture*, 2006, 7(4): 233~248.
- 薛利红,曹卫星,罗卫红,等.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.

Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7):807~812. (in Chinese)

- 4 王福民,王渊,黄敬峰,等.不同氮素水平油菜冠层反射光谱特征研究[J].*遥感技术与应用*,2004,19(2):80~84.

Wang Fumin, Wang Yuan, Huang Jingfeng, et al. Spectra characteristics of rape canopy at different nitrogen levels[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(2):80~84. (in Chinese)

- 5 方慧,宋海燕,曹芳,等.油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究[J].*光谱学与光谱分析*,2007,27(9):1731~1734.

Fang Hui, Song Haiyan, Cao Fang, et al. Study on the relationship between spectral properties of oilseed rape leaves and their chlorophyll content [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(9):1731~1734. (in Chinese)

- 6 徐志刚,朱艳,焦学磊,等.作物氮素营养无损监测仪的光学系统设计[J].*农业机械学报*,2008,39(3):120~122.

Xu Zhigang, Zhu Yan, Jiao Xuelei, et al. Design of optic system for crop nitrogen non-destructive monitoring instrument[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(3):120~122. (in Chinese)

- 7 毛罕平,张晓东,李雪,等.基于光谱反射特征的葡萄叶片含水率模型的建立[J].*江苏大学学报:自然科学版*,2008,29(5):369~372.

Mao Hanping, Zhang Xiaodong, Li Xue, et al. Establishment of grape leaf dry-basis moisture content models based on spectral signature[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science*, 2008, 29(5):369~372. (in Chinese)

- 8 陈斌,崔广,金尚忠,等.近红外光谱在快速检测棉制品中含棉量的应用[J].*江苏大学学报:自然科学版*,2007,28(3):185~188.

Cheng Bin, Cui Guang, Jin Shangzhong, et al. Application of near infrared spectra in rapid inspection of cotton contents [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science*, 2007, 28(3):185~188. (in Chinese)

- 9 邹小波,赵杰文,夏蓉,等.苹果糖度近红外光谱小波去噪和 iPLS 建模[J].*农业机械学报*,2006,37(6):79~82.

Zou Xiaobo, Zhao Jiewen, Xia Rong, et al. Near infrared determination of sugar content in apples based on multi-resolution decomposition and interval partial least square (iPLS) method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(6):79~82. (in Chinese)

- 10 Michael H K, Christopher J N, John N, et al. *Applied linear statistical models*[M]. Columbus: McGraw-Hill Irwin, 2005:475~518.

(上接第 163 页)

参 考 文 献

- 1 U. S. Department of Defense. Unmanned ground vehicle master plan, T1441-11[R]. Springfield: U. S. Department of Defense Information Service, 1992.
- 2 Zhao Huijing, Ryosuke Shibasaki. Reconstructing a textured CAD model of urban environment using vehicle-borne laser range scanners and line cameras[J]. *Machine Vision and Applications*, 2003, 14(1): 35~41.
- 3 Bishop R. Survey of intelligent vehicle applications worldwide [C] // *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000.
- 4 Aivars, Celmins. Battlefield robot cybernation and navigation[J]. *Jane's Defence Weekly*, 1997, 33(20):119~122.
- 5 Benjamin, Laxton. Planning control of UGV formations in a dynamic environment[J]. *Jane's Defence Weekly*, 2003, 39(30):105~123.
- 6 郭烈,王荣本,毛晓燕,等.基于机器视觉的环境感知坑检测方法研究[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第二届学术会议论文集,2005.