

# 黄瓜叶片叶绿素含量近红外光谱无损检测\*

石吉勇<sup>1</sup> 邹小波<sup>1</sup> 赵杰文<sup>1</sup> 毛罕平<sup>2</sup> 王开亮<sup>1</sup> 陈正伟<sup>1</sup>

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013;

2. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

**【摘要】** 为了简化黄瓜叶片叶绿素光谱模型和提高模型预测精度,采用联合区间偏最小二乘法(SiPLS)结合净分析物法(NAS)提取近红外光谱的特征信息,建立了黄瓜叶片叶绿素光谱模型。收集了110片新鲜黄瓜叶片,用近红外光谱仪采集光谱数据后立刻用化学分析方法测定叶绿素含量。原始光谱经过SNV预处理和子区间总数优化后,将全光谱均匀划分为29个子区间,用联合区间偏最小二乘法优选出4个特征子区间,在上述特征子区间的基础上,用净分析物法分离光谱中同叶绿素相关的光谱信息,并结合线性回归法建立了叶绿素光谱模型。模型对应的校正集相关系数 $R_c$ 、校正均方根误差、预测集相关系数 $R_p$ 和预测均方根误差分别为0.947 2、0.079 5 mg/g、0.925 0和0.090 6 mg/g。结果表明:联合区间偏最小二乘法结合净分析物法能够有效提取叶绿素的特征光谱信息,提高模型精度的同时降低其复杂度。

**关键词:** 黄瓜叶片 叶绿素 无损检测 净分析物法 联合区间偏最小二乘法 近红外光谱

**中图分类号:** S123; O657.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0178-05

## NIR Spectra in Non-invasive Measurement of Cucumber Leaf Chlorophylls Content

Shi Jiyong<sup>1</sup> Zou Xiaobo<sup>1</sup> Zhao Jiewen<sup>1</sup> Mao Hanping<sup>2</sup> Wang Kailiang<sup>1</sup> Chen Zhengwei<sup>1</sup>

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

To improve and simplify the prediction model of chlorophylls content of cucumber leaves, synergy interval partial least squares (SiPLS) and net analyte signal (NAS) were combined to search for optimized informative spectral wavelengths about chlorophylls content from NIR spectra of cucumber leaves, then spectral model was developed on the basis of chlorophylls contents. One hundred and ten cucumber leaves were selected to collect NIR spectra and chlorophylls content according to chemical analysis. The spectra were preprocessed by SNV method and divided into 29 intervals, among which 4 subsets, i. e. No 3, 4, 5, 15 were selected by SiPLS. Then NAS was used to characterize the net signals of chlorophyll from cucumber leaf spectra which were used for regression variables of NAS model. The NAS calibration model was obtained with the correlation coefficient  $R_c$  of 0.947 2, root mean square error of calibration of 0.079 5 mg/g, the prediction coefficient  $R_p$  of 0.925 0 and root mean square error of prediction of 0.090 6 mg/g. It proves that SiPLS-NAS could determine optimal variables in NIR spectra and improve the accuracy of model.

**Key words** Cucumber leaf, Chlorophylls, Non-invasive measurement, Net analyte signal, Synergy interval partial least squares, Near infrared spectra

收稿日期: 2010-08-02 修回日期: 2010-09-15

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA10Z208)、国家自然科学基金资助项目(60901079)和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX\_10B\_277Z)

作者简介: 石吉勇, 博士生, 主要从事农产品、食品品质无损检测研究, E-mail: stoneboy\_2007@vip.sohu.com

通讯作者: 邹小波, 副教授, 主要从事农产品、食品品质无损检测研究, E-mail: zou\_xiaobo@ujs.edu.cn

## 引言

叶绿素含量的快速无损检测对动态监测作物营养状况具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。叶绿素的常规测定方法为分光光度计法,该方法需要有机溶剂浸提叶片组织,既耗时间又会损伤植株;另外叶绿素不稳定,光、酸、碱、氧等都会使其分解,从田间到实验室的运输和样本制备过程中也很可能损失叶绿素导致其含量发生变化。为了克服常规检测方法的不足,实现叶绿素的快速无损检测,学者对叶绿素含量的光谱检测方法进行了广泛的研究<sup>[4-8]</sup>。上述学者主要对光谱的特征波数点选择方法进行了研究,而对光谱中有效信息的分离提取方法研究较少。

净分析物法(net analyte signal, 简称NAS)<sup>[9]</sup>是一种有效的信号分离方法,已被成功用于多元信号校正。黄瓜叶是非常复杂的生物体,除叶绿素外,还有水分、叶黄素、蛋白质、氨基酸等多种组分,造成黄瓜叶光谱中不仅包含叶绿素相关的信息,还包含由水分、叶黄素等其他组分产生的同叶绿素无关的信息。为了有效提取叶绿素的特征信息,本文用联合区间偏最小二乘法优选光谱特征子区间,并用净分析物法分离叶绿素的特征光谱信息,最终建立叶绿素的近红外光谱模型。

## 1 材料与方

### 1.1 试验材料

黄瓜叶片样本采集于镇江市京口区瑞京农业科技示范园,品种为碧玉三号,分两批次在健康黄瓜植株上随机采集110片新鲜黄瓜叶片,其中80片采集于2008年5月份,作为校正集样本;剩余30片采集于2009年5月份,作为预测集样本。黄瓜叶片采摘后放入避光的盒子中带回实验室并立刻采集近红外光谱数据和测定叶绿素含量。

### 1.2 近红外光谱数据采集

数据采集设备为Antaris II型傅里叶变换近红

外光谱仪(Thermo Fisher, 美国),采用InGaAs检测器,光谱范围10 000 ~ 4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次;波数间隔为7.712  $\text{cm}^{-1}$ ;分辨率为16  $\text{cm}^{-1}$ 。数据采集过程中,温度保持在25℃左右,湿度保持基本不变。每个样品避开主叶脉选叶片左、中、右3个点采集近红外数据,取3次数据的平均值作为样本的原始光谱。由于仪器、样本背景、环境条件及其他因素的影响,近红外光谱中常出现噪声、谱图基线漂移和平移等现象,为了消除这些不利因素对建模的影响,本文经多次尝试后采用标准正交变换(SNV)对原始光谱进行预处理,处理后的效果如图1所示,图中R表示样本的近红外光谱反射率。

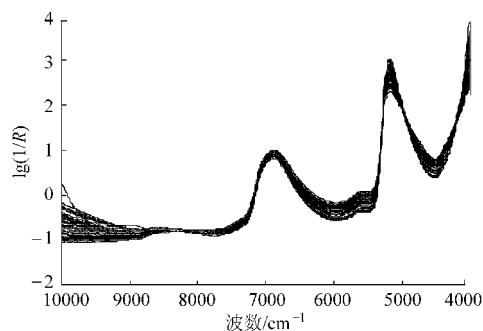


图1 黄瓜叶近红外光谱图

Fig. 1 NIR spectra of cucumber leaves

### 1.3 叶绿素含量测定

叶绿素含量测定与近红外光谱数据采集同步,测定叶绿素含量时,在光谱采集的3个位置避开主叶脉分别剪取0.2 g左右叶子,混匀后取0.2 g左右叶子用作化学测定。测定方法为:将样品置于研钵中加少许 $\text{CaCO}_3$ 研磨成匀浆,用80%丙酮浸提,将上清液过滤,定容到15 mL,以UV2550型岛津分光光度计检测652 nm波长处的吸光度,然后用换算系数公式计算叶绿素含量。为了防止测量过程中叶绿素含量变化,整个测量过程均在橙色灯光下进行,使用的玻璃器皿均为棕色玻璃器皿。表1列出了叶绿素含量测量值的变化范围、平均值、标准差和变异系数。

表1 黄瓜叶片叶绿素含量实测值

Tab. 1 Statistic of chlorophyll content of cucumber leaves

项目	样本数	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	标准偏差/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	变异系数/%
校正集	80	1.73	0.75	1.290	0.19	16.51
预测集	30	1.72	0.78	1.310	0.20	16.29

### 1.4 化学计量学方法

#### 1.4.1 联合区间偏最小二乘法

SiPLS<sup>[10-11]</sup>是对Lars Norgaard于2000年提出的一种波长筛选法的改进,其基本算法步骤为:

(1)对原始光谱进行预处理。

(2)在全光谱范围内建立待测组分的偏最小二乘模型(称为全局偏最小二乘模型)。

(3)将整个光谱区域划分为 $n$ 个等宽的子区间。

(4)在每个子区间上进行偏最小二乘回归,建

立待测组分的局部回归模型,也就是可以得到  $n$  个局部回归模型。

(5)以交互验证时的均方根误差为各局部模型的精度衡量标准,分别比较全光谱模型和各局部模型的精度,取出精度较好的前  $m$  个模型所对应的子区间。

(6)把这  $m$  个子区间联合起来进行偏最小二乘回归,建立待测品质的联合局部回归模型,同样以交互验证时的均方根误差为各联合局部模型的精度衡量标准,最小交互验证均方根误差所对应的联合局部回归模型的子区间组合即为特征波谱区间组合。

### 1.4.2 净分析物法

净分析物法基本原理是通过秩消失因子法构建一个不包含待测组分光谱信息的线性空间,计算光谱矩阵在该空间内的正交部分作为待测组分的净分析物信号,已成功运用于多元信号校正。本文采用净分析物法提取叶绿素对应特征信息的过程如下:

校正集光谱矩阵为  $\mathbf{R}(I \times J, I$  为校正集样本数,  $J$  为波长数),叶绿素含量实测值向量为  $\mathbf{c}_k(I \times 1)$ ,设黄瓜叶中共有  $K$  种组分,各种组分含量为  $y_i (i = 1, 2, \dots, K)$ ,则黄瓜叶的近红外光谱  $r$  可表示为  $r = y_1 X_1 + y_2 X_2 + \dots + y_k X_k + d + e$ ,式中  $X_i (i = 1, 2, \dots, K)$  为第  $i$  种纯组分对应的近红外光谱,  $d$  是由背景、固定干扰引起的系统误差,  $e$  为随机测量误差。

净分析物法提取原始光谱矩阵  $\mathbf{R}$  中仅同第  $K$  种组分  $X_k$  的净分析物信号  $\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}}$  的主要过程如下:

(1)对近红外光谱矩阵  $\mathbf{R}$  进行主成分回归分析,取前  $A$  个主成分构成一个新矩阵  $\tilde{\mathbf{R}}$ 。

(2)根据秩消失法<sup>[12]</sup>构建  $\tilde{\mathbf{R}}_{-k}$ ,使其包含除第  $K$  种组分外所有原始光谱中的信息,计算公式为

$$\tilde{\mathbf{R}}_{-k} = \tilde{\mathbf{R}} - \boldsymbol{\alpha} \cdot \tilde{\mathbf{c}}_k \cdot \tilde{\mathbf{r}}^{\text{T}} \quad (1)$$

其中  $\tilde{\mathbf{c}}_k = \tilde{\mathbf{R}} \cdot \tilde{\mathbf{R}}^+ \cdot \mathbf{c}_k$   $\boldsymbol{\alpha} = 1/\tilde{\mathbf{r}}^{\text{T}} \tilde{\mathbf{R}}^+ \cdot \mathbf{c}_k$

式中  $\tilde{\mathbf{R}}^+$ —— $\tilde{\mathbf{R}}$  的加号逆(穆尔-彭诺斯逆)

$\tilde{\mathbf{r}}$ —— $\tilde{\mathbf{R}}$  的一个行线性组合

(3)构建线性空间  $\mathbf{V}$  的正交投影矩阵  $\mathbf{H}$ ,公式为

$$\mathbf{H} = \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{R}}_{-k}^{\text{T}} (\tilde{\mathbf{R}}_{-k}^{\text{T}})^+ \quad (2)$$

(4)通过投影矩阵计算样本光谱中同第  $K$  种组分相关的净分析物信号  $\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}}$ ,公式为

$$\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{r}^{\text{T}} \quad (3)$$

(5)根据样本的净分析物信号建立校正模型和进行预测。根据式(3)中计算出来的净分析物信号

仅和第  $K$  种组分相关,可用  $\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}}$  向量的长度(模)  $\|\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}}\|$  来表征  $\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}}$  而不会引起信息丢失,  $\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}}$  向量的模表示为

$$N_{\text{Ask}} = \|\hat{\mathbf{r}}_k^{\text{net}}\| \quad (4)$$

由于标量  $N_{\text{Ask}}$  的大小同样品中第  $K$  种组分的含量是正相关关系,第  $K$  种组分含量同净分析物信号的关系可表示为

$$C_{k,i} = f(N_{\text{Ask},i}) + E \quad (5)$$

式中  $C_{k,i}$ ——第  $K$  种组分的含量

$i$ ——样本编号

在建立校正模型时,根据式(4)计算出校正集样本的第  $K$  种组分净分析物信号( $N_{\text{Ask}}$ )结合实测值向量( $\mathbf{c}_k$ )即可计算出  $f(N_{\text{Ask}})$ ;在进行预测时,只需求出预测集样本的净分析物信号,代入式(5)即可。

## 2 结果与分析

### 2.1 联合区间偏最小二乘法优选特征子区间

由于叶绿素在近红外光谱的多个波长处有吸收,且近红外光谱的谱峰较宽,致使黄瓜近红外光谱在一个波长处有多个谱峰重叠,难以确定特征子区间宽度。在子区间宽度不确定的情况下,为了确保 SiPLS 准确定位叶绿素对应的特征子区间,需要对子区间宽度进行优化。

将预处理后的光谱划分为  $n$  个子区间,  $n$  的取值范围为 20 ~ 40。当  $n$  和联合子区间数取不同值时, SiPLS 选出的特征子区间如表 2 所示。从表 2 中可以看出,当光谱划分为 29 个子区间(即  $n = 29$ ),联合子区间数为 4 时,对应的交互验证均方根误差(RMESC)最小,优选出的特征子区间分别为第 3、4、5、15 子区间。

### 2.2 叶绿素净分析物信号计算

同其他区间相比较, SiPLS 优选出的 4 个特征子区间间叶绿素更加相关,但这 4 个子区间对应的光谱信号是由黄瓜叶片的所有组分(叶绿素、类胡萝卜素、水分、蛋白质等)产生的混合信号,因此采用净分析物法进一步挖掘上述光谱信号中同叶绿素相关的特征信息,计算过程为:

对 SiPLS 优选出的 4 个特征子区间对应的光谱进行主成分回归分析,并计算各个主成分对应的预测均方根误差,结果如图 2 所示。根据 RMSEP 来确定最佳主成分因子数即 RMSEP 变化不大的情况下应该选择较小的主成分因子数,由图 2 可看出最佳主成分因子数为 9。然后根据 9 元主成分回归模型重构矩阵  $\tilde{\mathbf{R}}$ ,根据式(1)~(4)计算校正集和预测集样本叶绿素对应的净分析物信号  $N_{\text{Ask}}$ 。

表2 SiPLS子区间优选结果

Tab.2 Optimal spectra regions by SiPLS method

总区间数	联合子区间数	PCs	入选子区间	$R_c$	RMSECV/mg·g <sup>-1</sup>	$R_p$	RMSEP/mg·g <sup>-1</sup>
20	2	7	3,8	0.822 5	0.100 7	0.770 8	0.114 5
	3	8	2,3,16	0.863 8	0.094 6	0.827 3	0.107 8
	4	9	2,3,6,7	0.905 8	0.087 5	0.870 9	0.101 3
21	2	7	3,17	0.841 8	0.097 9	0.795 6	0.111 4
	3	9	2,3,17	0.908 2	0.087 1	0.857 6	0.104 4
	4	10	2,3,6,8	0.900 7	0.088 4	0.833 1	0.108 1
22	2	8	3,9	0.859 4	0.095 2	0.857 3	0.103 0
	3	9	1,3,7	0.867 2	0.094 0	0.811 5	0.110 1
	4	9	1,3,8,13	0.851 0	0.096 6	0.803 0	0.110 9
23	2	7	3,11	0.860 4	0.095 1	0.871 7	0.101 2
	3	8	3,4,11	0.879 8	0.092 0	0.876 4	0.100 5
	4	10	2,3,4,11	0.909 0	0.086 9	0.852 4	0.103 9
24	2	10	4,13	0.929 3	0.083 1	0.891 2	0.095 6
	3	8	4,9,12	0.848 2	0.097 0	0.833 9	0.106 8
	4	8	3,4,11,12	0.868 9	0.093 8	0.865 3	0.102 1
25	2	7	3,12	0.870 0	0.093 6	0.885 6	0.099 3
	3	8	3,4,12	0.883 2	0.091 4	0.887 2	0.099
	4	8	3,4,12,13	0.867 5	0.094 0	0.870 9	0.101 3
26	2	5	3,4	0.758 7	0.108 9	0.755 7	0.115 0
	3	7	3,4,14	0.863 6	0.094 6	0.848 3	0.104 8
	4	8	3,4,12,13	0.866 4	0.094 2	0.864 4	0.102 2
27	2	9	3,14	0.906 2	0.087 4	0.815 9	0.109 4
	3	8	3,14,13	0.885 9	0.091 0	0.880 6	0.099 9
	4	9	3,4,5,13	0.881 8	0.091 7	0.867 7	0.102 0
28	2	7	2,4	0.839 2	0.098 3	0.787 5	0.112 3
	3	6	3,4,14	0.827 8	0.100 0	0.845 0	0.104 6
	4	9	3,4,14,15	0.875 5	0.092 7	0.858 0	0.103 3
29	2	6	3,4	0.811 7	0.102 2	0.779 3	0.112 8
	3	8	3,4,15	0.864 6	0.094 4	0.858 2	0.103 1
	4	9	3,4,5,15	0.930 1	0.083 0	0.908 9	0.094 5
30	2	7	5,15	0.837 6	0.098 6	0.824 6	0.107 8
	3	7	5,14,15	0.849 4	0.096 8	0.840 3	0.105 7
	4	9	5,10,14,15	0.881 8	0.091 7	0.859 1	0.103 4
31	2	7	5,16	0.856 6	0.095 7	0.851 4	0.104 2
	3	9	3,5,15	0.919 3	0.085 0	0.866 5	0.101 8
	4	9	3,4,5,15	0.889 6	0.090 3	0.873 5	0.101 0
32	2	7	5,15	0.871 7	0.093 3	0.817 5	0.109 2
	3	7	5,15,16	0.866 4	0.094 2	0.853 4	0.103 8
	4	9	5,10,12,16	0.880 8	0.091 8	0.862 7	0.102 6
33	2	7	4,16	0.872 7	0.093 2	0.873 3	0.100 8
	3	8	3,4,16	0.880 4	0.091 9	0.851 8	0.104 0
	4	7	4,5,15,16	0.875 9	0.092 6	0.862 2	0.102 4
34	2	7	4,16	0.857 8	0.095 5	0.825 8	0.107 6
	3	8	4,5,18	0.879 3	0.092 1	0.865 5	0.102 2
	4	8	3,4,5,18	0.871 7	0.093 3	0.869 9	0.101 4
35	2	7	4,28	0.857 7	0.095 5	0.795 7	0.111 3
	3	7	4,5,18	0.859 6	0.095 2	0.871 7	0.101 2
	4	8	4,5,16,17	0.885 8	0.091 0	0.875 0	0.101 0
36	2	7	5,17	0.831 6	0.099 4	0.759 2	0.115 7
	3	7	4,5,17	0.871 1	0.093 4	0.826 6	0.108 1
	4	8	4,5,16,17	0.887 7	0.090 7	0.886 4	0.099 1
37	2	7	6,21	0.843 2	0.097 7	0.818 4	0.108 8
	3	7	4,5,19	0.865 0	0.094 4	0.877 3	0.100 3
	4	7	4,5,17,19	0.855 0	0.096 0	0.869 6	0.101 4
38	2	7	6,21	0.842 6	0.097 8	0.820 3	0.108 4
	3	7	4,5,18	0.873 5	0.093 0	0.880 7	0.099 9
	4	8	4,5,6,18	0.883 6	0.091 4	0.870 7	0.101 5
39	2	8	6,21	0.881 2	0.091 8	0.796 8	0.111 8
	3	7	4,6,20	0.866 1	0.094 2	0.867 4	0.101 7
	4	8	3,5,6,20	0.876 2	0.092 6	0.869 3	0.101 5
40	2	9	13,21	0.881 0	0.091 8	0.790 4	0.113 2
	3	7	4,6,20	0.859 2	0.095 3	0.861 2	0.102 6
	4	7	4,5,18,19	0.851 3	0.096 5	0.863 4	0.102 2

注:PCs表示最佳主成分数; $R_c$ 表示校正集相关系数;RMSECV表示交互验证均方根误差; $R_p$ 表示预测集相关系数;RMSEP表示预测集均方根误差。

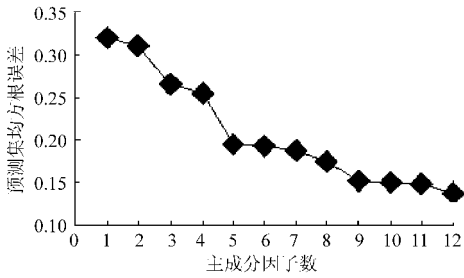


图2 主成分因子数同预测集均方根误差的关系

Fig. 2 Relationship between PCs and RMSEP

### 2.3 叶绿素光谱模型及比较

根据校正集和预测集样本的净分析物信号和叶绿素含量实测值,利用线性回归建立了黄瓜叶叶绿素近红外光谱模型(NAS模型),模型对应的校正集相关系数  $R_c$ 、校正均方根误差(RMSEC)分别为0.9472和0.0795 mg/g;预测集相关系数  $R_p$ 和预测均方根误差分别为0.9250和0.0906 mg/g。为了比较净分析物法的建模效果,同时还建立了黄瓜叶叶绿素含量的全光谱PLS模型和SiPLS模型,结果如表3所示。由表3可以看出,SiPLS模型对应的各项模型指标均要好于PLS模型的各项指标,这表明SiPLS能够有效地从光谱中挑选叶绿素对应的特征谱区;但SiPLS模型不如NAS模型效果好,这是因为SiPLS优选出的4个特征子区间虽然同叶绿素含量比较相关,但是这些波数点对应的光谱信号是由黄瓜叶的所有组分(叶绿素、叶黄素、水分、蛋白质

等)产生的混合信号,而NAS能够从这些混合信号中分离同叶绿素对应的光谱信号,所以NAS模型能够取得更好的预测效果。

表3 不同建模方法效果比较

Tab. 3 Summary of model results after spectra being built by different methods

模型	主成分分数	$R_c$	RMSEC /mg·g <sup>-1</sup>	$R_p$	RMSEP /mg·g <sup>-1</sup>
PLS	10	0.8982	0.0889	0.8653	0.1021
SiPLS	9	0.9301	0.0830	0.9089	0.0945
NAS		0.9472	0.0795	0.9250	0.0906

### 3 结束语

为了有效提取黄瓜叶近红外光谱中同叶绿素相关的特征信息,本文首先采用联合区间偏最小二乘法优选出了4个叶绿素特征子区间(分别是第3、4、5、15子区间),在这4个特征子区间内进一步采用净分析物法提取同叶绿素组分对应的净分析物信号,并建立了定量模型,模型的校正集均方根误差和校正集相关系数分别为0.9472和0.0795 mg/g,预测集均方根误差和预测集相关系数分别为0.9250和0.0906 mg/g,研究结果表明联合区间结合净分析物法能够有效提取近红外光谱中叶绿素对应的特征信息。

### 参 考 文 献

- Ni Lijun, Zhang Liguo, Xie Juan, et al. Pattern recognition of Chinese flue-cured tobaccos by an improved and simplified K-nearest neighbors classification algorithm on near infrared spectra [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 633(1):43~50.
- Bart M Nicola, Katrien Beullens, Els Bobelyn, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(2):99~118.
- Philip X Ye, Lu Liu, Douglas Hayes, et al. Fast classification and compositional analysis of cornstover fractions using Fourier transform near-infrared techniques [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15):7323~7332.
- 孙旭东,章海亮,欧阳爱国,等. 南丰蜜桔可溶性固形物近红外特征波段选择[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7):129~132.  
Sun Xudong, Zhang Hailiang, Ouyang Aiguo, et al. Selection of NIR characteristic wavelength bands for soluble solids content in Nanfeng mandarin fruit [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(7):129~132. (in Chinese)
- 张淑娟,王凤花,张海红,等. 鲜枣品种和可溶性固形物含量近红外光谱检测[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(4):139~142.  
Zhang Shujuan, Wang Fenghua, Zhang Haihong, et al. Detection of the fresh jujube varieties and SSC by NIR spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(4):139~142. (in Chinese)
- 孙焱鑫,王纪华,李保国,等. 基于BP和GRNN神经网络的冬小麦冠层叶绿素高光谱反演建模研究[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(4):492~496.  
Sun Yanxin, Wang Jihua, Li Baoguo, et al. Contrastive analysis based on neural network of winter wheat's chlorophyll concentration inversion with hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(4):492~496. (in Chinese)
- 李庆波,黄彦文,张广军,等. 基于可见-近红外光谱的植物叶绿素含量无损检测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(12):3275~3278.  
Li Qingbo, Huang Yanwen, Zhang Guangjun, et al. Chlorophyll content nondestructive measurement method based on vis/NIR spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(12):3275~3278. (in Chinese)

- 4 Gao Zhenjiang, Lin Hai, Xiao Hongwei. Air-impingement de-shelling of chestnuts (*C. mollissima*): process parameter optimization [J]. International Journal of Food Engineering, 2008, 4(2): 15 ~ 16.
- 5 党新安,张昌松,葛正浩. 板栗真空爆壳技术与设备的研究[J]. 轻工机械, 2001(2): 19 ~ 21.  
Dang Xin'an, Zhang Changsong, Ge Zhenghao. Study of technology and equipment on the vacuum burst opening of the Chinese chestnut shell[J]. Light Industry Machinery, 2001(2): 19 ~ 21. (in Chinese)
- 6 王武,张莉,方红美,等. 预设应力对板栗微波爆壳的影响研究[J]. 食品科学, 2005, 26(9): 333 ~ 336.  
Wang Wu, Zhang Li, Fang Hongmei, et al. Study on technology of microwave shelling of cut Chinese chestnut [J]. Food Science, 2005, 26(9): 333 ~ 336. (in Chinese)
- 7 袁越锦,徐英英,党新安,等. 板栗脱壳技术与破壳机理研究现状及发展趋势[J]. 食品工业科技, 2008, 29(10): 301 ~ 305.  
Yuan Yuejin, Xu Yingying, Dang Xin'an, et al. Current situation and development trend of chestnut shelled technology and cracked mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(10): 301 ~ 305. (in Chinese)
- 8 王灵军,全燕鸣,邓文君. 银杏脱壳的有限元受力分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 59 ~ 61.  
Wang Lingjun, Quan Yanming, Deng Wenjun. Analysis of finite element method for threshing ginkgo fruit shell [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 59 ~ 61. (in Chinese)
- 9 史建新,赵海军,辛动军. 基于有限元分析的核桃脱壳技术研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 185 ~ 188.  
Shi Jianxing, Zhao Haijun, Xin Dongjun. Technology for breaking walnut shell based on finite element analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 185 ~ 188. (in Chinese)
- 10 谢丽娟,宗力. 莲子受力有限元分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 94 ~ 97.  
Xie Lijuan, Zong Li. Analysis of finite element method for loaded lotus seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 94 ~ 97. (in Chinese)
- 11 李心平,高连兴,马福丽. 玉米种子力学特性的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 64 ~ 67, 72.  
Li Xinping, Gao Lianxing, Ma Fuli. Analysis of finite element method on mechanical properties of corn seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 64 ~ 67, 72. (in Chinese)
- 12 张克平,黄建龙,杨敏,等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 352 ~ 356.  
Zhang Keping, Huang Jianlong, Yang Min, et al. Finite element analysis and experimental verification of wheat grain under compression loads[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 352 ~ 356. (in Chinese)
- 13 张荣荣,李小昱,王为,等. 基于有限元方法的板栗破壳力学特性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 84 ~ 88.  
Zhang Rongrong, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Analysis of mechanical properties of Chinese chestnut cracking based on the FEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 84 ~ 88. (in Chinese)
- 14 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- 15 徐秉业,王建学. 弹性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- 16 卢爱红,茅献彪. 湿度应力场的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊2): 2 470 ~ 2 473.  
Lu Aihong, Mao Xianbiao. Numerical simulation on theory of humidity stress field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp. 2): 2 470 ~ 2 473. (in Chinese)
- 17 曹崇文,朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

~~~~~

(上接第 182 页)

- 8 宋开山,张柏,王宗明,等. 大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 21(8): 16 ~ 21.  
Song Kaishan, Zhang Bai, Wang Zongming, et al. Inverse model for estimating soybean chlorophyll concentration using in-situ collected canopy hyperspectral data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 21(8): 16 ~ 21. (in Chinese)
- 9 Joan Ferr, Nicolaas Klaas M Faber. Net analyte signal calculation for multivariate calibration [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2003, 69(1 ~ 2): 123 ~ 136.
- 10 Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Liu Muhua, et al. Determination of total polyphenols content in green tea using FT-NIR spectroscopy and different PLS algorithms [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2008, 46(3): 568 ~ 573.
- 11 Wu Di, He Yong, Nie Pengcheng, et al. Hybrid variable selection in visible and near-infrared spectral analysis for non-invasive quality determination of grape juice [J]. Analytica Chimica Acta, 2010, 659(1 ~ 2): 229 ~ 237.
- 12 Avraham Lorber, Klaas Faber, Bruce R Kowalski. Net analyte signal calculation in multivariate calibration [J]. Analytical Chemistry, 1997, 69(8): 1 620 ~ 1 626.