

# 基于高光谱图像的香醋醋醅均匀性快速判别

邹小波 申婷婷 朱瑶迪 石吉勇 胡雪桃 沈冰

(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

**摘要:**以镇江香醋固态发酵过程中总酸质量分数和pH值为表征指标,利用高光谱图像技术和化学计量学实现翻醅均匀性快速判别。以翻醅前后醋醅为研究对象,首先采集其高光谱信息,同时检测对应的总酸质量分数和pH值;然后以联合区间偏最小二乘(siPLS)和遗传算法(GA)优选特征变量;采用偏最小二乘(PLS)和最小二乘支持向量机(LS-SVM)方法建立表征醋醅均匀性指标的快速预测模型;最后使用最优模型计算高光谱图像每个像素点的总酸质量分数和pH值,伪彩色处理,获得醋醅总酸质量分数和pH值分布图。结果表明,总酸质量分数和pH值最佳模型的相关系数( $R$ )分别为0.775 1和0.797 4,预测均方根误差(RMSECP)为0.389%和0.041 7;分布图中翻醅前总酸质量分数和pH值范围为3.0%~7.8%和3.5~4.2,醋醅局部有明显结块,分布不均匀,翻醅后总酸质量分数和pH值范围较集中,为4.8%~7.0%和3.6~3.9,醋醅分布较均匀。结果表明利用高光谱技术快速预测醋醅均匀性是可行的。

**关键词:**镇江香醋; 固态发酵; 醋醅分布; 高光谱图像; 均匀性

**中图分类号:** TS264.2<sup>+</sup>2; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0215-06

## Quick Discrimination of Uniformity Degree of Zhenjiang Balsamic Vinegar Grains Based on Hyperspectral Imaging Technology

Zou Xiaobo Shen Tingting Zhu Yaodi Shi Jiyong Hu Xuetao Shen Bing

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** This study selected total acid content and pH value as characterization indicators and used hyperspectral imaging technology and chemometric methods to discriminate uniformity of Zhenjiang balsamic vinegar grains. First, hyperspectral transmission images in 432~960 nm of vinegar grains, total acid content and pH value were acquired. Secondly, PLS and LS-SVM method were used to establish uniformity indicators content prediction models after preferred variables which were selected by GA and siPLS. The root mean square error of prediction (RMSEP) and correlation coefficient ( $R$ ) for the test set are 0.389% and 0.775 1 for total acid content, 0.041 7 and 0.797 4 for pH value. Total acid content and pH value in each pixel point on the vinegar grains were obtained by the above prediction models. After pseudo-color processing, the distribution map of total acid content content and pH value before and after turning up the vinegar grains were obtained. In the distribution maps, the range of total acid content and pH value in the grain were 3.0% to 7.8%, 3.5 to 4.2 before the overturning, and 4.8%~7.0%, 3.6~3.9 after the overturning. By overturning the grains, the degree of uniformity was improved while high local concentrations phenomenon still exists. The overall results revealed that hyperspectral imaging technology is a promising technique to discriminate the degree of uniformity of grains after overturning rapidly and nondestructively.

**Key words:** Zhenjiang balsamic vinegar; solid-state fermentation; vinegar grains distribution; hyperspectral image; uniformity degree

收稿日期: 2015-05-15 修回日期: 2015-06-06

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100807)、国家自然科学基金项目(61301239)、全国优秀博士基金项目(200968)、新世纪优秀人才项目(NCET-11-00986)、江苏省杰出青年基金项目(BK20130010)和江苏省研究生创新基金项目(KYLX\_1070)

**作者简介:** 邹小波(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事食品无损检测研究,E-mail: Zou\_xiaobo@ujs.edu.cn

## 引言

镇江香醋是固态发酵(Solid-state fermentation, SSF)的典型代表,以糯米、麸皮和米糠为原料,采用固态分层发酵工艺,酿得的成品醋具有“酸而不涩、香而微甜、色浓味鲜、愈存愈香”等特点<sup>[1]</sup>。制醋是制醋的关键环节之一,其中醋醅均匀性是保证镇江香醋固态发酵生产的关键,决定醋醅发酵的好坏程度。SSF过程建立在醋酸菌等微生物生长代谢的基础上<sup>[2]</sup>,因其发酵基质呈固态形式,微生物往往在环境适宜的局部繁殖,易造成物料局部消耗大、温度高、板结等现象,进而严重影响菌体自身生长代谢,最终影响香醋的品质,所以需要醋醅进行翻醅处理。翻醅机的出现满足了SSF过程定时翻醅的要求,然而由于翻醅机的局限性,无法直观、快速地判断翻醅的均匀性,传统的判断方式是依据人工经验式手触或眼看等传统的方法<sup>[3-4]</sup>,其人为误差大,且费时费力。

如何快速地判断翻醅均匀性是目前亟待解决的问题。翻醅是为了使醋醅发酵均匀,使微生物均匀地分布生长和代谢,避免造成局部醋醅板结或坏醅。在制醋过程中,醋酸菌等主要微生物产生大量的有机酸等代谢产物,使得醋醅中总酸含量和pH值不断发生变化<sup>[5]</sup>。这些指标在一定程度上说明微生物的活动状况,可表征醋醅的均匀程度。目前,国内外对于食醋的研究主要集中在微生物多样性、发酵产物的变化规律以及功能性物质的含量等方面,对如何快速预测翻醅前后醋醅的均匀性研究较少。本研究尝试提出集光谱信息和图像信息于一身的高光谱图像技术快速预测醋醅均匀性。近年来已有研究者利用高光谱技术实现检测有效成分在研究对象中的分布<sup>[6-7]</sup>。如邹小波等<sup>[8]</sup>和石吉勇等<sup>[9]</sup>利用高光谱图像技术预测黄瓜叶片叶绿素同时获得叶绿素分布图;朱瑶迪等<sup>[10]</sup>利用高光谱图像技术预测醋醅中总酸分布。

本文尝试以总酸含量和pH值为醋醅均匀性表征指标,选取翻醅前后醋醅为研究对象,利用高光谱

技术实现醋醅均匀性可视化研究。使用联合区间偏最小二乘法(siPLS)优选特征波段,遗传算法(GA)优选最佳波数点,以偏最小二乘法(PLS)和最小二乘支持向量机(LS-SVM)方法建立醋醅均匀性快速预测模型,并选出最优模型;最后计算每个像素点对应的总酸质量分数和pH值,得到高光谱图像信号与总酸和pH值的映射关系,通过伪彩色方式直观地获得醋醅总酸质量分数和pH值分布图,实现醋醅均匀程度可视化,为智能翻醅机的实现提供科学手段。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

样品来源:镇江市恒顺香醋股份有限公司的醋醅发酵车间。本试验翻醅前后分别取样,装入冰盒立即取回,采集其高光谱数据,同时检测总酸的质量分数和pH值,见表1。

表1 醋醅总酸质量分数和pH值统计表

Tab.1 Total acid content and pH value in vinegar grains

均匀性表征指标		范围	均值	方差
总酸质量 分数/%	校正集(50)	2.391~7.800	5.713	1.369
	预测集(25)	2.513~7.136	5.705	1.440
pH值	校正集(50)	3.60~4.22	3.88	0.092
	预测集(25)	3.68~4.14	3.79	0.142

### 1.2 高光谱图像采集和标定

如图1a所示,高光谱图像采集系统主要有:高光谱摄像机(V10E型,ImSpector,芬兰)、150 W 光纤卤素灯(MA Fiber-Lite DC 950 Illuminator型,Dolan Jenner Industries Inc,美国)、精密电控平移台(SC30021A型,Zolix,北京)和计算机等组成。数据采集时,将装有醋醅样品的培养皿平铺在电控载物台上。设定摄像机曝光时间为50 ms,输送装置速度为1.25 mm/s,工作模式为step模式。采用的高光谱摄像头图像分辨率为775像素×1628像素(即图像空间分辨率),光谱范围是430~965 nm,光谱分辨率为2.8 nm。采集618个波长下的图像,最终得到一个大小为775像素×1628像素×618的高光谱

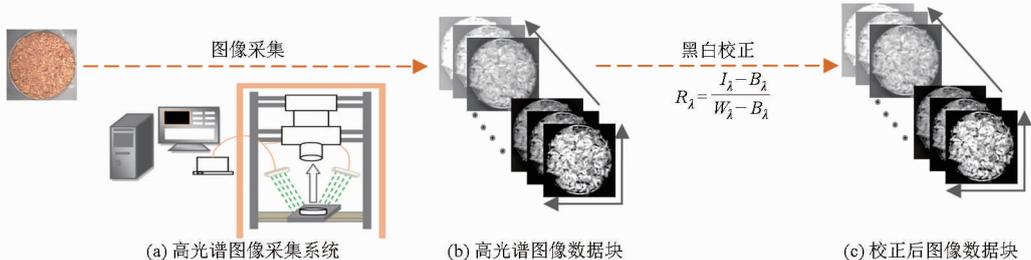


图1 高光谱采集系统

Fig.1 Hyperspectral system

图像数据块,如图 1b 所示。醋醅样品采用直径 90 mm 透明玻璃培养皿装置。为了减弱噪声的影响,每幅样本的高光谱图像  $I_\lambda$  采用白板图像  $W_\lambda$  和全黑图像  $B_\lambda$  以公式

$$R_\lambda = \frac{I_\lambda - B_\lambda}{W_\lambda - B_\lambda}$$

进行校正<sup>[11]</sup>。校正在图像采集过程中进行,如图 1c 所示。

### 1.3 醋醅发酵过程中总酸质量分数和 pH 值的测定

取圆形培养皿中心位置 10 g 醋醅样品,用 50 mL 蒸馏水浸泡 20 min 后充分搅拌,用纱布过滤后得滤液;将滤液放入 100 mL 容量瓶中,用蒸馏水定容到刻度,用于测定总酸质量分数和 pH 值<sup>[12]</sup>。使用 K-S (Kennard - Stone) 方法,将 75 个样本分成 50 个和 25 个 2 组,分别作为校正集和预测集。总酸质量分数计算公式为

$$X = \frac{(V_1 - V_0) C k_1}{m \frac{V}{100}} \times 100\% \quad (1)$$

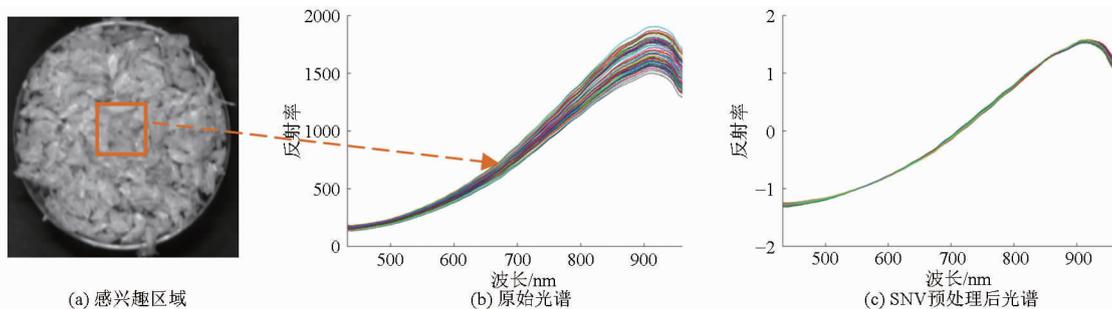


图 2 原始光谱的提取和预处理

Fig. 2 Extraction spectral data and pretreatment spectrum

### 1.4.2 特征变量筛选

根据化学成分对光能的吸收具有选择性,可知并不是所有波长下的光谱都同酸物质高度相关,故需要对全光谱进行特征变量筛选。采用 siPLS 方法筛选特征子区间,采用 GA 在特征子区间基础上筛选特征波长。siPLS 是联合精度较高的几个局部 PLS 模型所在的子区间,筛选出的子区间均为交互验证均方根误差 (RMSECV) 最小时所对应的区间<sup>[13]</sup>。遗传算法的实现需要以下基本要素<sup>[14-15]</sup>: 基因编码、种群初始化、适应度函数设计、遗传操作算子设计和收敛判据。

### 1.5 软件

使用 Spectral Cube (ImSpector, 芬兰) 软件采集醋醅高光谱图像,采用 ENVI 5.0 提取高光谱图像中的光谱信息,模型建立的相关程序在 Matlab 7.4 平台上编程实现。

式中  $X$ ——总酸质量分数, %

$C$ ——NaOH 标准溶液的浓度, mol/L

$V$ ——吸取的样液体积, mL

$m$ ——样品质量, g

$V_0$ ——样品稀释液的总体积, mL

$V_1$ ——滴定时消耗 NaOH 标准溶液的体积, mL

$k_1$ ——酸的系数(醋酸为 0.060 g/mmol)

## 1.4 数据处理

### 1.4.1 光谱提取和预处理

选取醋醅上中心位置 100 像素 × 100 像素的矩形感兴趣区域 (Region of interest, ROI) 作为研究对象,表征指标含量真实值的测定区域均与所选取的 ROI 区域对应。通过计算 ROI 的各个像素点的光谱响应平均值来估算醋醅的相对反射率。75 个样品共获得 75 条平均反射光谱用于后面的分析 (图 2a)。标准正态变量变换 (Standard normal variate, SNV) 可以使分散的光谱曲线集中,有效实现对基线的校正,故采用 SNV 对原始光谱 (图 2b) 进行预处理,结果如图 2c。

## 2 结果和分析

### 2.1 特征子区间筛选

由图 2c 可知光谱谱峰较宽,且光谱在一个波长处可能有多个谱峰重叠。在酸物质特征子区间宽度不确定的情况下,为了使 siPLS 准确定位包含酸物质特征波长的子区间,需要对子区间划分总数进行优化。将预处理后的光谱数据划分为  $k$  个子区间,  $k$  的取值范围为 10 ~ 30, 区间联合数为 2、3 或 4。siPLS 优选的特征子区间如表 2 所示 (各区间联合中前 3 个最小 RMSECV): 对于总酸含量,当  $k = 21$ , siPLS 筛选到 4 个区间, RMSECV 最小为 0.573 6; 对于 pH 值,当  $k = 27$ , siPLS 筛选到 3 个区间, RMSECV 最小为 0.043 48。

采用 GA 提取特征波长,并设置 GA 参数如下: 遗传代数 200、染色体个数为 50、基因交换概率

表2 siPLS对总酸和pH值子区间优选结果

Tab.2 Optimizing interval selected by siPLS on total acid (TAC) and pH value

指标	2 区间联合		3 区间联合		4 区间联合	
	<i>k</i>	RMSECV	<i>k</i>	RMSECV	<i>k</i>	RMSECV
总酸质量分数	15	0.679 8	18	0.603 4	21	0.573 6
	20	0.685 1	21	0.594 8	23	0.597 0
	21	0.684 9	24	0.613 1	27	0.599 8
pH 值	12	0.046 00	20	0.044 4	28	0.044 28
	13	0.045 39	22	0.044 0	29	0.043 86
	28	0.045 81	27	0.043 48	30	0.043 87

0.95、基因变异概率0.01时,通过交互验证及显著性检验,选出总酸最优波长850.95、440.14、453.41、609.58、435.18、624.15、625.01、848.32、442.63、610.44 nm共10个;当GA参数为:遗传代数为200、染色体个数为50、基因交换概率0.95、基因变异概率0.01时,pH值最优波长12个,分别为731.29、722.60、555.02、729.55、726.08、604.44、568.61、595.04、717.39、719.13、734.77、723.47 nm(按贡献率从大到小排列)。所选特征波长与醋醅的乙酸等有机酸中C—H、O—H等基团吸收波长相关<sup>[16]</sup>。

## 2.2 定量预测模型建立

经过siPLS和GA筛选特征变量,模型自变量由全波段光谱数据的618个降至15个以下。将对应的10个和12个有效变量作为输入向量,采用PLS和LS-SVM分别建立表征指标预测模型,模型主元

数目(PCs,即主成分数)依据RMSECV最小化原则选取。LS-SVM建模<sup>[17]</sup>过程中采用径向基函数(RBF)为核函数,RBF核参数的选择采用二部格点搜索法和留一法相结合,优选RBF核的正则化参数 $\gamma$ 和 $\sigma^2$ ,初始值设为 $\gamma=2, \sigma^2=2$ 。模型预测结果如表3所示。总酸质量分数和pH值的PLS和LS-SVM定量模型的相对预测性能(RPD)均大于0.3,说明4种定量模型均能给出准确的预测结果。在总酸方面,LS-SVM模型预测效果均好于PLS模型,其最优核参数为 $[1\ 311.004, 34.51]$ ,主成分数为6,RPD为5.8,相关系数 $R$ 为0.775 1,均方根误差RMSE为0.389%。在pH值方面,LS-SVM和PLS预测效果与RPD相近,由于PLS较LS-SVM模型简便<sup>[18]</sup>,且主成分数较小,故采用PLS预测pH值。

表3 总酸质量分数和pH值的PLS和LS-SVM模型预测结果

Tab.3 Results of PLS and LS-SVM prediction models for total acid content and pH value

指标		PLS			RPD	LS-SVM			
		PCs	RMSE	$R$		PCs	RMSE	$R$	RPD
总酸质量分数	校正集	5	0.553%	0.639 4	3.9	6	0.347%	0.784 3	5.8
	预测集		0.580%	0.608 0			0.389%	0.775 1	
pH 值	校正集	4	0.040 2	0.802 6	4.7	6	0.039 6	0.824 7	5.0
	预测集		0.041 7	0.797 4			0.032 6	0.805 3	

## 2.3 醋醅均匀性可视化分布图

将醋醅高光谱图像简化为最优特征波长下的图像,图像中每个像素点的光谱信息代入2.2节中选中的定量模型,获得翻醅前后醋醅中表征均匀性的总酸质量分数和pH值分布情况,并伪彩色处理,利用不同颜色深浅直观表现醋醅均匀程度,如图3所示。就总酸而言,翻醅前醋醅中总酸质量分数范围为3.0%~7.8%,分布随机且不均匀,局部浓度过高(质量分数保持在7.2%~7.8%),有一定结块;翻醅后总酸质量分数范围多集中在4.8%~7.0%,分布较翻醅前均匀,局部浓度过高现象有所减缓,但依然存在。翻醅前醋醅中pH值分布范围为3.5~4.2,分布较随机;翻醅后分布范围为3.6~3.9。总

体来看,总酸质量分数和pH值在醋醅中分布位置一致,总酸质量分数反映酸物质总体含量,pH值侧重描述电离的酸物质,故总酸质量分数分布范围较广;翻醅前局部浓度差异大,分布梯度大,分布不均匀;翻醅后,醋醅分布更加均匀,含量范围缩小但依然存在局部浓度偏高,说明存在醋醅一定程度板结现象,故目前翻醅效率和技术有待改进。

## 3 结束语

利用高光谱图像系统采集发酵阶段翻醅前后醋醅的高光谱图像,以总酸质量分数和pH值作为醋醅均匀性表征指标,利用siPLS和GA筛选最优变量,总酸质量分数和pH值各获得10个和12个最

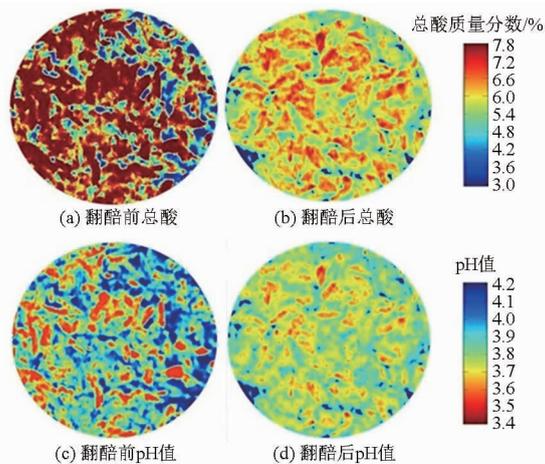


图 3 翻醅前后总酸质量分数和 pH 值的分布图

Fig. 3 Distribution maps of total acid and pH value before and after turning up the vinegar grains

优波数点;结合 PLS 和 LS-SVM 方法选出最优预测模型,总酸质量分数和 pH 值预测集相关系数分别达到 0.775 1 和 0.797 4,均方根误差分别为 0.389% 和 0.041 7;最后将最优波长对应的特征图像转化为一维输入表征指标含量预测模型,计算特征图像每个像素点总酸 1 分数和 pH 值,得到其灰度分布图,再伪彩色处理后得彩色分布图。分布图中翻醅前总酸质量分数和 pH 值范围分别为 3.0% ~ 7.8% 和 3.5 ~ 4.2,醋醅局部有明显结块,分布不均匀,翻醅后总酸质量分数和 pH 值范围较集中,分别为 4.8% ~ 7.0% 和 3.6 ~ 3.9,醋醅分布较均匀但仍出现局部浓度过高现象。结果表明,利用高光谱图像技术和偏最小二乘回归预测醋醅均匀性是可行的。翻醅前后分布图对比也说明翻醅技术需要进一步改进。

### 参 考 文 献

- 倪峥飞. 镇江香醋固态发酵过程中酿造微生物强化及醋醅总 DNA 提取方法的初步研究[D]. 无锡:江南大学, 2009.  
Ni Zhengfei. Research on bioaugmentation of brewing microbes and total DNA extraction during solid-state fermentation of Zhenjiang vinegar[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- 苏俊霞. 镇江香醋醋醅中醋酸菌多样性及 *Gluconacetobacter intermedius* 特性的研究[D]. 无锡:江南大学, 2014.  
Su Junxia. Biodiversity of acetic acid bacteria in the vinegar pei of Zhenjiang aromatic vinegar and the properties of *Gluconacetobacter intermedius*[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014. (in Chinese)
- 马新村. 食醋固态发酵机械制醅工艺[J]. 中国调味品, 2000, 2(2): 24 - 26.
- 孙启亮. ZNF 型转臂式翻醅机[J]. 山西食品工业, 2004, 6(2): 44 - 45.
- 许伟. 镇江香醋醋酸发酵过程微生物群落及其功能分析[D]. 无锡:江南大学, 2011.  
Xu Wei. Analysis of the microbial diversity and function during acetic acid fermentation process of Zhenjiang aromatic vinegar[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011. (in Chinese)
- He Hongju, Sun Dawen, Wu Di. Rapid and real-time prediction of lactic acid bacteria (LAB) in farmed salmon flesh using near-infrared (NIR) hyperspectral imaging combined with chemometric analysis[J]. Food Research International, 2014, 62(8): 476 - 483.
- He Hongju, Sun Dawen. Toward enhancement in prediction of *Pseudomonas* counts distribution in salmon fillets using NIR hyperspectral imaging[J]. LWT -Food Science and Technology, 2015, 62(1, Part 1): 11 - 18.
- Zou Xiaobo, Zhao Jiewen, Holmes M, et al. Independent component analysis in information extraction from visible/near-infrared hyperspectral imaging data of cucumber leaves[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2010, 104(2): 265 - 270.
- Shi Jiyong, Zou Xiaobo, Zhao Jiewen, et al. Nondestructive diagnostics of nitrogen deficiency by cucumber leaf chlorophyll distribution map based on near infrared hyperspectral imaging[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 138: 190 - 197.
- 朱瑶迪, 邹小波, 石吉勇, 等. 高光谱图像技术快速预测发酵醋醅总酸分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 320 - 327.  
Zhu Yaodi, Zou Xiaobo, Shi Jiyong, et al. Rapidly detecting total acid distribution of vinegar culture based on hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 320 - 327. (in Chinese)
- Huang M, Wan X, Zhang M, et al. Detection of insect-damaged vegetable soybeans using hyperspectral transmittance image[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(1): 45 - 49.
- 朱瑶迪, 邹小波, 石吉勇, 等. 基于高光谱图像技术的镇江香醋固态发酵过程研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(12): 119 - 125.  
Zhu Yaodi, Zou Xiaobo, Shi Jiyong, et al. Analysis of the solid-state fermentation process in Zhenjiang vinegar by using hyperspectral imaging[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(12): 119 - 125. (in Chinese)
- Jiang H, Liu G, Mei C, et al. Measurement of process variables in solid-state fermentation of wheat straw using FT-NIR spectroscopy and synergy interval PLS algorithm[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2012, 97: 277 - 283.
- Li L, Cheng Y B, Ustin S, et al. Retrieval of vegetation equivalent water thickness from reflectance using genetic algorithm (GA)-partial least squares (PLS) regression[J]. Advances in Space Research, 2008, 41(11): 1755 - 1763.
- 石吉勇, 邹小波, 赵杰文, 等. 基于 GA-ICA 和高光谱图像技术的黄瓜叶叶绿素检测[J]. 江苏大学学报:自然科学版,

2011,32(2):134-139.

Shi Jiyong, Zou Xiaobo, Zhao Jiewen, et al. Measurement of chlorophyll content in cucumber leaves based on GA-ICA and hyper-spectral imaging technique [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011, 32(2): 134-139. (in Chinese)

- 16 牛晓颖. 基于傅立叶变换近红外光谱的绍兴黄酒风味成分定量分析及其酒龄鉴别的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.  
Niu Xiaoying. Flavor components quantitative evaluation and age discrimination of Shaoxing rice wine based on Fourier transform near infrared spectroscopy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- 17 江辉. 基于近红外光谱和电子鼻技术的固态发酵过程检测研究及应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.  
Jiang Hui. Research and application on process measurement of solid-state fermentation (SSF) based on near-infrared spectroscopy (NIRS) and electronic nose techniques[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 18 张筱蕾, 刘飞, 聂鹏程, 等. 高光谱成像技术的油菜叶片氮含量及分布快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2513-2518.  
Zhang Xiaolei, Liu Fei, Nie Pengcheng, et al. Rapid detection of nitrogen content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2513-2518. (in Chinese)

(上接第 214 页)

- 14 Fujioka K, Arakawa E, Kita J, et al. Detection of *aeromonashydrophila* in liquid media by volatile production similarity patterns, using a ff-2a electronic nose [J]. Sensors, 2013, 13(1): 736-745.
- 15 Sberveglieri V, Comini E, Zappa D, et al. Electronic nose for the early detection of different types of indigenous mold contamination in green coffee [C]//2013 Seventh International Conference on Sensing Technology, 2013:461-465.
- 16 喻勇新, 孙晓红, 潘迎捷, 等. 应用电子鼻检测食源性致病菌的研究[J]. 化学通报, 2010(2):154-159.  
Yu Yongxin, Sun Xiaohong, Pan Yingjie, et al. Research on food-borne pathogen detection based on electronic nose [J]. Chemistry Online, 2010(2):154-159. (in Chinese)
- 17 张红梅, 王俊, 叶盛, 等. 电子鼻传感器阵列优化与谷物霉变程度的检测[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6):1207-1210.  
Zhang Hongmei, Wang Jun, Ye Sheng, et al. Optimized of sensor array and detection of moldy degree for grain by electronic nose [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(6): 1207-1210. (in Chinese)
- 18 Zhang H M, Wang J, Ye S, et al. Application of electronic nose and statistical analysis to predict quality indices of peach [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 65-72.
- 19 Harrison E, Muir A, Stratford M, et al. Species-specific PCR primers for the rapid identification of yeasts of the genus *Zygosaccharomyces* [J]. Fems Yeast Research, 2011, 11(4): 356-365.
- 20 Huang X C, Guo C F, Yuan Y H, et al. Detection of medicinal off-flavor in apple juice with artificial sensing system and comparison with test panel evaluation and GC-MS[J]. Food Control, 2015, 51:270-277.
- 21 Lima Tribst A A, de Souza Sant' Ana A, de Massaguer P R. Review: microbiological quality and safety of fruit juices-past, present and future perspectives [J]. Critical Reviews in Microbiology, 2009, 35(4): 310-339.