

基于嗅觉和光谱技术融合的面粉脂肪酸值定量检测

江 辉¹ 刘 通¹ 陈全胜²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 提出了一种基于比色传感器数据和近红外光谱特征融合的储藏期面粉脂肪酸值的定量检测方法。开发比色传感器阵列、搭建便携式近红外光谱测量系统, 分别采集不同储藏期面粉样本的比色传感器数据和近红外光谱。利用主成分分析分别对预处理后的比色传感器数据和近红外光谱数据进行特征降维, 采用五折交互验证法在反向传播神经网络(BPNN)模型校正过程中进行优化, 确定基于单技术分析模型的最佳主成分(PCs)个数。将优化后的基于单技术模型的最佳PCs在特征层进行融合, 建立基于融合特征的BPNN分析模型, 以实现对面粉储藏过程中脂肪酸值的快速检测。实验结果显示, 基于比色传感器特征和基于近红外光谱特征建立的最佳BPNN模型的最佳PCs数量分别为3和4, 基于融合特征建立的BPNN模型在预测集中的相关系数和预测均方根误差的均值分别为0.927 6和1.934 5 mg/(100 g)。研究表明, 与单技术数据分析模型相比, 基于比色传感器数据和近红外光谱特征融合模型的检测精度和泛化性能都有所提高。本研究可为粮食储藏品质的高精度原位监测提供一种技术方法。

关键词: 面粉; 脂肪酸值; 比色传感器; 便携式近红外光谱系统; 特征融合; 定量检测

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298 (2021)02-0340-06

OSID:



Quantitative Determination of Fatty Acid Value of Flour Based on Fusion of Olfactory and Spectral Technique

JIANG Hui¹ LIU Tong¹ CHEN Quansheng²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

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

Abstract: A novel quantitative detection method for the fatty acid value of flour during storage was innovatively proposed based on the feature fusion of colorimetric sensor data and near-infrared spectra. A colorimetric sensor array was developed to collect colorimetric sensor data of flour samples in different storage periods. A portable near-infrared spectroscopy system was built to collect near-infrared spectra of flour samples in different storage periods. Principal component analysis was used to perform feature reduction on the preprocessed colorimetric sensor data and near-infrared spectra. In the back propagation neural network (BPNN) model calibration, the five-fold cross-validation method was used to optimize and determine the best principal components (PCs) of the single technique analysis model. The optimized PCs based on the single technique model were fused in the feature layer, and a BPNN analysis model based on the fusion feature was established to realize the rapid detection of the fatty acid value during the flour storage. Experimental results showed that the number of PCs in the best BPNN model based on the characteristics of the colorimetric sensor and the near-infrared spectra were three and four, respectively. The average values of correlation coefficient and root mean square error of prediction of the BPNN model based on the fusion features in the prediction set were 0.927 6 and 1.934 5 mg/(100 g), respectively. The overall results showed that compared with the single technique data analysis model, the detection accuracy and generalization performance of the colorimetric sensor data and the near-infrared spectral feature fusion model were improved. The results can provide a new technical method for high-precision in-situ monitoring of grain storage quality.

Key words: flour; fatty acid value; colorimetric sensor; portable near-infrared spectroscopy system; feature fusion; quantitative determination

收稿日期: 2020-09-29 修回日期: 2020-10-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1600603)和江苏省“六大人才高峰”项目(NY151)

作者简介: 江辉(1983—), 男, 副教授, 主要从事传感器设计和软测量技术研究, E-mail: h. v. jiang@ ujs. edu. cn

通信作者: 陈全胜(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品质量无损检测技术研究, E-mail: qschen@ ujs. edu. cn

0 引言

面粉品质直接影响人类的身体健康^[1]。随着我国国民经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,人们对面粉品质的要求也越来越高。面粉由小麦加工而来,失去了外壳的保护,颗粒变小且裸露在外,其品质极易受到外界环境的影响^[2]。因此,实现储藏期面粉品质的快速监测对保护消费者权益和饮食健康具有重要意义。

新生产的面粉中含有少量的脂质,其颗粒与氧气接触后,脂质被氧化分解而产生游离脂肪酸,脂肪酸进一步氧化产生的醛酮类化合物是导致储藏期面粉产生哈喇味的主要原因^[3]。因此,面粉在储藏过程中,其脂质的变化直接影响面粉的口感和营养价值。面粉脂肪酸值可以反映脂质水解产生的游离脂肪酸的含量,可作为衡量面粉储藏品质的重要指标之一^[4]。一般情况下,面粉脂肪酸值会随着储藏时间的延长而逐渐升高,脂肪酸值越高,面粉的品质越差,且脂肪酸值增加得越快,面粉越容易发生霉变^[5]。目前,脂肪酸值的检测主要根据 GB/T 15684—2015《谷物碾磨制品 脂肪酸值的测定》。尽管该方法准确可靠,但对检测人员要求较高,而且需要配备专用的化学试剂,其操作过程繁琐,不适合应用于现场快速检测。因此,高效、快速检测储藏期面粉脂肪酸值关系到面粉储藏安全与利用,具有显著的经济价值和社会价值。

近红外光谱的吸收带是有机物质中能量较高的化学键(主要是 C—H、O—H、N—H)在中红外光谱区基频吸收的倍频、合频和差频吸收带叠加而成的^[6]。近年来,该技术在食品和农产品质量分析方面取得了成功的应用^[7-14],在粮食储藏品质检测方面也有所涉及^[15]。比色传感器技术是近年来迅速发展的一种无损检测技术,其核心是传感器阵列的设计和制备。该技术可高效捕获有机物质所挥发的简单或复杂的气味信息,并以图像的形式呈现,在食品和农产品质量检测上也得以成功应用^[16-23],在粮食储藏品质分析方面也有所应用^[24]。然而,目前研究均采用单一的无损检测技术,而单一的传感器检测手段往往不能全面反映其过程中的变化信息,会影响检测结果的可靠性。鉴于此,本文融合比色传感器数据和近红外光谱特征,以期实现储藏期面粉脂肪酸值的高精度检测。

1 材料与方法

1.1 样本准备

实验使用的面粉是从江苏省镇江市超市购买的益海嘉里香满园面粉,共 5 袋,规格为 5 kg/袋,放置

于 25℃ 的环境中储藏。以月为单位,从每袋的不同位置随机取 4 个 20 g(精确到 0.01 g)的面粉样本。每个月可以获得 20 个面粉样本。进行 8 个月储藏实验后,共得到 160 个面粉样本。

1.2 脂肪酸值检测

面粉样本的脂肪酸值测定依据 GB/T 15684—2015《谷物碾磨制品 脂肪酸值的测定》来进行,基本原理如下:首先,用 95% 乙醇溶解面粉,提取面粉中的脂肪酸,进行离心分离并提取上层清液;然后加入酚酞试剂,用 0.01 mol/L 的 KOH 标准溶液滴定,根据滴定消耗的 KOH 溶液用量推导计算出脂肪酸值(该值为中和 100 g 面粉试样中游离脂肪酸所需 KOH 的质量)。

1.3 研究思路

图 1 为基于嗅觉和光谱技术融合的储藏期面粉脂肪酸值定量检测的主要思路。首先,制作比色传感器阵列和搭建便携式近红外光谱测量系统,并分别采集不同储藏期面粉样本的比色传感器数据和近红外光谱;然后,对获得的比色传感器数据和近红外光谱分别进行预处理,并对预处理后的比色传感器数据和近红外光谱分别利用主成分分析进行特征降维,在反向传播神经网络(Back propagation neural network, BPNN)模型校正过程中利用五折交叉验证优化并确定最佳主成分(Principal components, PCs)数量;最后,在特征层融合优化后的最佳 PCs 建立 BPNN 模型以实现储藏期面粉脂肪酸值的定量检测。

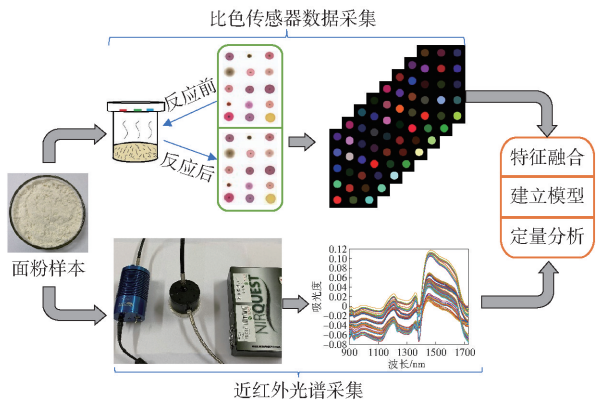


图 1 基于嗅觉和光谱技术融合的储藏期面粉脂肪酸值定量检测示意图

Fig. 1 Schematic of quantitative detection of fatty acid value of flour during storage based on the fusion of olfactory and spectral technique

1.4 数据采集

1.4.1 比色传感器制作和数据采集

比色传感器的具体制作过程如下:① 根据前期预实验结果,筛选出 15 种化学染料,包括 14 种吡啶

(美国西格玛奥德里奇公司)和 1 种疏水性 pH 指示剂(国药集团化学试剂有限公司)。^②称取各化学染料 8 mg 放入 5 mL 的容量瓶中,吡啶类染料用 4 mL 二氯甲烷溶解,pH 指示剂用 4 mL 无水乙醇溶解。再对它们分别进行超声处理 30 min 即可得到质量浓度为 2 mg/mL 的溶液。^③以 C2 反向硅胶板作为传感器阵列的基底,用毛细管(0.3 mm × 100 mm)提取 1 μL 的上述溶液进行点样,制成 5 × 3 的比色传感器阵列。

比色传感器数据采集时,首先利用平板扫描仪扫描获取比色传感器反应前的图像数据;然后将 20 g 面粉样品置于 50 mL 烧杯内,将比色传感器阵列的底部用双面胶固定在烧杯盖上,再用塑料薄膜对烧杯进行密封。待传感器阵列与面粉产生的挥发性气体反应 30 min 后,取出。最后,利用平板扫描仪扫描获取比色传感器反应后的图像数据。

首先对得到的反应前、后的比色传感器阵列的图像分别进行中值滤波、阈值分割,再分别提取各色敏点周围 15 个像素半径内的平均 R 、 G 、 B 值,标准化为 0 ~ 255 之间。然后用反应后色敏点的颜色数值减去反应前的颜色数值,获取对应色敏点的 3 个颜色差值分量 ΔR 、 ΔG 、 ΔB 。最后,对 ΔR 、 ΔG 、 ΔB 进行归一化,叠加灰度图像,从而生成特征图像。在本研究中,每个比色传感器阵列有 15 个色敏点,每个色敏点可以得到 3 个颜色特征分量。因此,每个面粉样本的比色传感器数据为 45 个颜色特征分量。

1.4.2 近红外光谱采集和预处理

所用便携式近红外光谱测量系统主要包括 NIRQuest512 型光谱仪和 ISP-R 型反射用积分球。扫描前,仪器参数设置如下:扫描波长范围为 900 ~ 1 700 nm,积分时间为 5 s,平均次数为 3 次,平滑度为 3。这样,每条光谱包含 512 个数据点。光谱采集时,先将 20 g 面粉样本倒入石英比色皿中,再用光谱仪系统的积分球盖住样品,并进行近红外光谱的采集。为了使采集到的光谱数据更加准确,研究对每个样本分别进行 3 次测量,然后取 3 次测量的平均光谱作为该样本的原始光谱。光谱采集过程中,实验室温度保持在 25℃ 左右。为了消除噪声、基线漂移和光散射等因素的干扰,对原始近红外光谱分别进行了 SG(Savitzky-Golag)平滑和标准正态变换预处理。

1.5 数据分析方法

主成分分析(Principal component analysis, PCA)是一种分析、简化数据集的技术,是多元分析方法中的一种常用方法^[25]。PCA 是对于原先提取的所有变量,建立尽可能少的新变量,使得这些新变

量是两两不相关的,而且这些新变量尽可能保持原有的信息。其基本原理就是根据初选的特征量间可能存在的相关性,找到一种空间变换的方式,通过对原变量进行线性组合,形成若干个新的特征矢量,要求它们相互正交,并且能够最大限度地保留原样本所含的原始信息,同时根据实际需要从中取出几个较少的综合变量尽可能多地反映原来变量的信息的统计方法。在本研究中,利用 PCA 对预处理后的比色传感器数据和便携式近红外光谱进行数据降维和特征挖掘。

BPNN 模型是一种多层前馈神经网络,该网络的主要特点是信号前向传递,误差反向传播,通过迭代优化网络的权值,使 BPNN 模型预测输出与期望输出尽可能一致。BPNN 模型是一个非常强大的学习系统,可以处理许多复杂的非线性系统^[26]。它包括 3 部分:输入层、隐含层和输出层。在前向传递过程中,信号从输入层经隐含层逐层处理,直至输出层,经过非线性变换,产生输出信号。将输出结果与期望结果相比较得到预测误差,转入反向传播阶段。在信号的前向传递期间,网络结构的权值保持不变,每一层的神经元状态只影响下一层的神经元状态。在反向传播阶段,误差通过隐含层向输入层逐层反传,并将误差分摊给各层所有节点,以调整各节点的权值。经过反复学习,确定与最小误差相对应的权值和阈值,使 BPNN 模型预测输出不断逼近期望输出。在本研究中,BPNN 模型的隐含层设置为 3 层,每个隐含层的节点数都设置为 5,迭代次数设置为 100 次,学习率设置为 0.1,最小均方根误差设置为 0.000 04。为了减少 BPNN 模型在初始化时随机因素对模型结果的影响,对 BPNN 模型进行了 50 次独立运行,并对 50 次独立运行后的结果进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 样本集划分

数据分析前,将获得的 160 个面粉样本划分成训练集和预测集。对每个月采集的 20 个面粉样本中随机选取 15 个面粉样本作为训练集,其余 5 个面粉样本作为预测集。这样,训练集中有 120 个面粉样本,预测集中有 40 个面粉样本。表 1 为训练集和预测集中面粉样本脂肪酸值的分布情况。

2.2 BPNN 模型结果

2.2.1 基于比色传感器数据特征的 BPNN 模型结果

图 2 为基于比色传感器数据特征的 BPNN 模型在训练集和预测集中的结果。图 2a 为在不同 PCs 下,50 次独立运行 BPNN 模型后得到的模型在训练

表 1 训练集和预测集中脂肪酸值的分布统计

Tab.1 Distribution statistics of fatty acid values in training set and prediction set

样本集	样本数	最小值/(mg·(100 g) ⁻¹)	最大值/(mg·(100 g) ⁻¹)	平均值/(mg·(100 g) ⁻¹)	标准差/(mg·(100 g) ⁻¹)
训练集	120	29.778 0	48.342 3	37.571 8	5.121 7
预测集	40	29.806 0	48.402 2	37.256 9	5.350 1

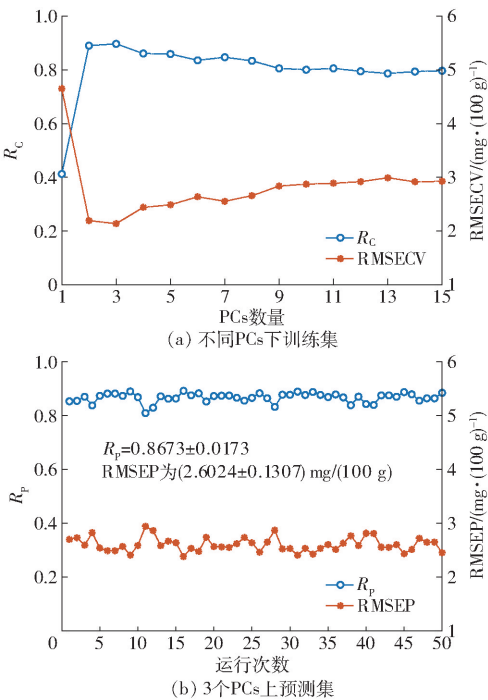


图 2 基于比色传感器数据特征的 BPNN 模型独立运行 50 次后的统计结果

Fig.2 Statistical results of BPNN models based on data characteristics of colorimetric sensor after independent operation of 50 times

集中的检测结果。从图 2a 可以看出,当 PCs 数量为 3 时,交互验证均方根误差(Root mean square error of cross-validation, RMSECV)达到最小,为 2.138 2 mg/(100 g),其对应的校正相关系数(Correlation coefficient of calibration, R_c)为 0.896 7。因此,认为基于比色传感器数据特征的 BPNN 模型的最佳 PCs 数量为 3。图 2b 为建立在 3 个 PCs 上的 BPNN 模型 50 次独立运行后在预测集中的检测结果。从图 2b 可以看出,预测相关系数(Correlation coefficient of prediction, R_p)的均值为 0.867 3,标准差为 0.017 3;预测均方根误差(Root mean square error of prediction, RMSEP)的均值为 2.602 4 mg/(100 g),标准差为 0.130 7 mg/(100 g)。

2.2.2 基于近红外光谱特征的 BPNN 模型结果

图 3 为基于近红外光谱特征的 BPNN 模型在训练集和预测集中的结果。图 3a 为在不同的 PCs 下,50 次独立运行 BPNN 模型后得到的模型在训练集中的检测结果。从图 3a 可以看出,当 PCs 数量为 4 时, RMSECV 最小,为 1.814 4 mg/(100 g),其对应的 R_c

为 0.925 9。因此,认为基于近红外光谱特征的 BPNN 模型的最佳 PCs 数量为 4。图 3b 为建立在 4 个 PCs 上的 BPNN 模型 50 次独立运行后在预测集中的检测结果。从图 3b 可以看出,预测相关系数均值为 0.923 5,标准差为 0.024 1;预测均方根误差均值为 1.977 2 mg/(100 g),标准差为 0.223 9 mg/(100 g)。

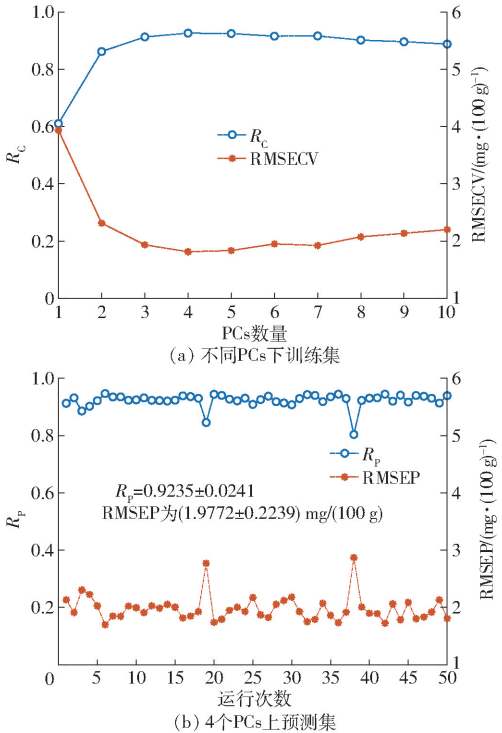


图 3 基于近红外光谱数据特征的 BPNN 模型独立运行 50 次后的统计结果

Fig.3 Statistical results of BPNN models based on near-infrared spectral characteristics after independent operation for 50 times

2.2.3 基于融合特征的 BPNN 模型结果

根据上文的分析,基于比色传感器数据特征的 BPNN 模型的最佳 PCs 数量为 3,基于近红外光谱特征的最佳 PCs 数量为 4。鉴于此,将通过五折交互验证优化得到的基于单技术(比色传感器技术和近红外光谱技术)数据特征的 BPNN 模型的最佳 PCs 在特征层进行融合,并建立基于融合特征的 BPNN 模型。图 4 为建立在融合特征上 50 次独立运行 BPNN 模型后得到的模型在训练集和预测集中的统计结果。从图 4a 可以看出, R_c 的均值为 0.928 9,标准差为 0.014 2;校正均方根误差(Root mean square error of calibration, RMSEC)均值为 1.798 8 mg/(100 g),

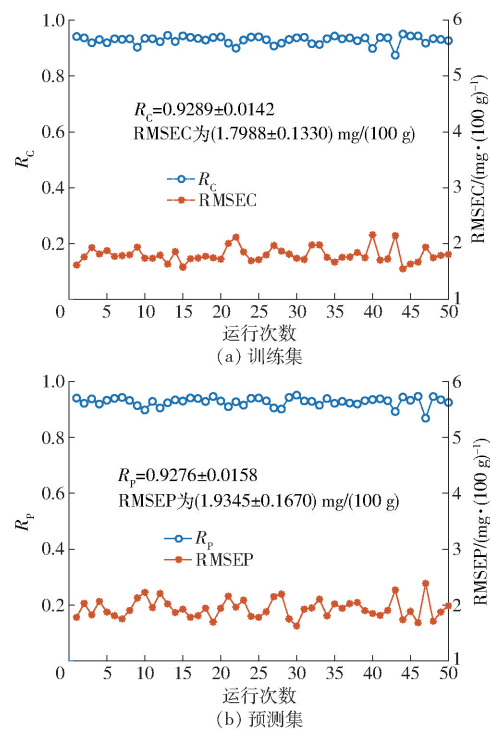


图4 基于融合特征的BPNN模型在训练集和预测集中的统计结果

Fig.4 Statistical results of BPNN models based on fusion features in training set and prediction set

表2 基于不同特征建立的最佳BPNN模型在训练集和预测集中的检测结果

检测技术	主成分数	训练集		预测集	
		R_c	$\text{RMSEC}/(\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1})$	R_p	$\text{RMSEP}/(\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1})$
嗅觉可视化技术	3	0.931 2	1.780 7	0.892 1	2.381 3
近红外光谱技术	4	0.948 0	1.528 3	0.946 6	1.698 0
多传感器信息融合技术	7	0.950 3	1.551 6	0.951 0	1.625 2

用而产生的。比色传感器可以快速获取储藏期面粉样本的气味变化信息,近红外光谱可以快速获取储藏期面粉样本内含物质的微变化。通过融合比色传感器数据和近红外光谱特征,构建了基于比色传感器技术与近红外光谱技术融合的储藏期面粉脂肪酸值的定量检测模型,最佳BPNN融合模型在预测集

标准差为0.133 0 $\text{mg}/(100 \text{ g})$ 。从图4可以看出, R_p 的均值为0.927 6,标准差为0.015 8; RMSEP 的均值为1.934 5 $\text{mg}/(100 \text{ g})$,标准差为0.167 0 $\text{mg}/(100 \text{ g})$ 。

2.3 不同BPNN模型结果的比较

表2为基于不同特征建立的最佳BPNN模型在训练集和预测集中的检测结果。从表2可以看出,在训练集中,基于不同数据特征的BPNN模型的相关系数均在0.93以上,在预测集中的相关系数在0.89以上。这说明利用比色传感器或近红外光谱技术结合化学计量学方法实现储藏期面粉脂肪酸值的定量检测是可行的。另外,基于比色传感器数据和近红外光谱融合特征建立的BPNN模型,无论是在预测精度还是泛化性能方面,较单技术数据特征建立的BPNN模型性能而言均有所提升。这说明基于融合特征建立的BPNN模型能更全面地反映储藏过程中面粉样本的内外特征。因此,根据其特征建立的BPNN模型的预测精度和泛化性能最佳。

3 结束语

储藏期面粉理化指标变化是由内外因素共同作

中的相关系数和预测均方根误差分别为0.951 0和1.625 2 $\text{mg}/(100 \text{ g})$ 。研究表明,相较于单技术检测模型,融合比色传感器数据和近红外光谱特征建立的化学计量学模型可有效提高模型预测精度和泛化性能。本研究为储藏期粮食品质的在线监测提供了一种新的技术方法,对保障粮食储藏品质具有重要的现实意义。

参 考 文 献

[1] 郭孝萱,张芸丹. 小麦面粉营养品质评价指标体系建立的探讨[J]. 农产品质量与安全, 2020(4): 80-84. GUO Xiaoxuan, ZHANG Yundan. Establishment of nutrition quality evaluation indexes for wheat flour[J]. Quality and Safety of Agro-products, 2020(4): 80-84. (in Chinese)

[2] 刘长虹,孙祥祥,王颖,等. 小麦粉储存湿度对面粉品质及其制作馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(22): 12-16. LIU Changhong, SUN Xiangxiang, WANG Ying, et al. Effect of wheat flour humidity on flour quality and steamed bread quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(22): 12-16. (in Chinese)

[3] JAING H, LIU T, HE P H, et al. Rapid measurement of fatty acid content during flour storage using a color-sensitive gas sensor array: comparing the effects of swarm intelligence optimization algorithms on sensor features[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127828.

[4] 刘存卫,康荣荣,郭蓉,等. 不同加工精度对面粉中脂肪酸含量影响的分析[J]. 营养学报, 2019, 41(5): 489-493. LIU Cunwei, KANG Rongrong, GUO Rong, et al. Investigation on the effect of processing accuracy on fatty acid content in flours[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2019, 41(5): 489-493. (in Chinese)

- [5] 胡喜贵, 张海惠, 吴晓军, 等. 4种商品小麦面粉脂肪酸组成的GC-MS分析[J]. 食品科技, 2018, 43(12): 317-320.
HU Xigui, ZHANG Haihui, WU Xiaojun, et al. Analysis of fatty acid compositions of four commercial wheat flours by GC-MS [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(12): 317-320. (in Chinese)
- [6] KUTSANEDZIE F Y H, GUO Z M, CHEN Q S. Advances in nondestructive methods for meat quality and safety monitoring [J]. Food Reviews International, 2019, 35(6): 536-562.
- [7] 倪超, 李振业, 张雄, 等. 基于短波近红外高光谱和深度学习的籽棉地膜分选算法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 170-179.
NI Chao, LI Zhenye, ZHANG Xiong, et al. Film sorting algorithm in seed cotton based on near-infrared hyperspectral image and deep learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 170-179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191219&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.019. (in Chinese)
- [8] 王伟, 赵昕, 褚璇, 等. 基于可见/近红外高光谱的八角茴香与莽草无损鉴别[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 373-379.
WANG Wei, ZHAO Xin, CHU Xuan, et al. Nondestructive identification of star anise and shikimmi by visible/near infrared hyperspectral images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 373-379. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191142&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.042. (in Chinese)
- [9] AGYEKUM A A, KUTSANEDZIE F Y H, MINTAH B K, et al. Rapid and nondestructive quantification of trimethylamine by FT-NIR coupled with chemometric techniques[J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(9): 2035-2044.
- [10] ZAREEF M, CHEN Q S, OUYANG Q, et al. Rapid screening of phenolic compounds in congou black tea (*Camellia sinensis*) during in vitro fermentation process using portable spectral analytical system coupled chemometrics[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(7): e13996.
- [11] KUTSANEDZIE F Y H, CHEN Q S, SUN H, et al. In situ cocoa beans quality grading by near-infrared-chemodyes systems [J]. Analytical Methods, 2017, 9(37): 5455-5463.
- [12] JIANG H, CHEN Q S. Chemometric models for the quantitative descriptive sensory properties of green tea (*Camellia sinensis* L.) using Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(4): 654-662.
- [13] GUO Z M, WANG M M, AGYEKUM A A, et al. Quantitative detection of apple watercore and soluble solids content by near infrared transmittance spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 279: 109955.
- [14] PASCOA R N M J, PORTO P A L S, CERDEIRA A L, et al. The application of near infrared spectroscopy to wine analysis: an innovative approach using lyophilization to remove water bands interference[J]. Talanta, 2020, 214: 120852.
- [15] JIANG H, LIU T, CHEN Q S. Dynamic monitoring of fatty acid value in rice storage based on a portable near-infrared spectroscopy system[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 240: 118620.
- [16] 黄星奕, 周芳, 蒋飞燕. 基于嗅觉可视化技术的猪肉新鲜度等级评判[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 142-145, 124.
HUANG Xingyi, ZHOU Fang, JIANG Feiyan. Evaluation of pork freshness using olfaction visualization detection technique [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 142-145, 124. (in Chinese)
- [17] 林颢, 宋奔腾, 金鸿娟, 等. 基于嗅觉可视化与图像处理的食醋醋龄检测[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 275-280.
LIN Hao, SONG Benteng, JIN Hongjuan, et al. Age discrimination of vinegar based on artificial olfaction visualization and image processing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 275-280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170136&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.036. (in Chinese)
- [18] LI L Q, XIE S M, NING J M, et al. Evaluating green tea quality based on multisensor data fusion combining hyperspectral imaging and olfactory visualization systems[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(4): 1787-1794.
- [19] JIANG H, XU W D, CHEN Q S. Evaluating aroma quality of black tea by an olfactory visualization system: selection of feature sensor using particle swarm optimization[J]. Food Research International, 2019, 126(4): 108605.
- [20] KHULAL U, ZHAO J W, HU W W, et al. Comparison of different chemometric methods in quantifying total volatile basic-nitrogen (TVB-N) content in chicken meat using a fabricated colorimetric sensor array[J]. RSC Advances, 2016, 6(6): 4663-4672.
- [21] URMILA K, LI H H, CHEN Q S, et al. Quantifying of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in chicken using a colorimetric sensor array and nonlinear regression tool[J]. Analytical Methods, 2015, 7(13): 5682-5688.
- [22] SUN S, QIAN S H, ZHENG J P. A colorimetric sensor array for the discrimination of Chinese liquors[J]. Analyst, 2020, 145(21): 6968-6973.
- [23] MAGNAGHI L R, CAPONE F, ZANONI C, et al. Colorimetric sensor array for monitoring, modelling and comparing spoilage processes of different meat and fish foods[J]. Foods, 2020, 9(5): 684.
- [24] JIANG H, LIU T, HE P H. Quantitative analysis of fatty acid value during rice storage based on olfactory visualization sensor technology[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 309: 127816.
- [25] BRO R, SMILDE A K. Principal component analysis[J]. Analytical Methods, 2014, 6(9): 2812-2831.
- [26] GUO Z H, WU J, LU H Y, et al. A case study on a hybrid wind speed forecasting method using BP neural network[J]. Knowledge-Based Systems, 2011, 24(7): 1048-1056.