

融合光谱和改进 BAS-LSSVM 的猪肉新鲜度快速检测方法

汪 垚¹ 任笑真²

(1. 河南工业贸易职业学院, 河南 郑州 450053; 2. 河南工业大学, 河南 郑州 450001)

摘要: [目的] 实现肉类新鲜度的准确、快速和无损检测。[方法] 基于光谱采集系统提取光谱特征信息, 提出一种结合改进天牛须搜索算法与最小二乘支持向量机的肉类新鲜度(TVB-N)快速无损检测方法。通过结合 SG 平滑滤波和标准正态变量进行数据预处理, 通过结合窗口竞争性自适应重加权采样和迭代连续投影进行特征选择, 通过改进的天牛须搜索算法优化最小二乘支持向量机的正则化参数和核函数参数, 完成肉类新鲜度(TVB-N)快速无损检测方法。通过试验分析所提方法的性能。[结果] 试验方法可实现猪肉新鲜度(TVB-N)的准确、快速和无损检测, 具有较高的检测精度和效率, 检测相关系数为 0.978 1, 均方根误差为 0.302 1, 平均检测时间为 0.031 s。[结论] 结合光谱检测和智能算法可以实现肉类新鲜度(TVB-N)的快速无损检测。

关键词: 猪肉; 新鲜度; 光谱采集系统; 天牛须搜索算法; 最小二乘支持向量机; 快速无损检测

Rapid detection method for pork freshness using fusion spectroscopy and improved BAS-LSSVM

WANG Yao¹ REN Xiaozhen²

(1. Henan Industry and Trade Vocational College, Zhengzhou, Henan 450053, China;
2. Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: [Objective] To realize accurate, rapid, and non-destructive testing of meat freshness. [Methods] Extracting spectral feature information based on a spectral acquisition system, proposed a fast non-destructive detection method for meat freshness (TVB-N) by combining an improved beetle whisker search algorithm with least squares support vector machine. By combining SG smoothing filtering and standard normal variables for data preprocessing, combining window competitive adaptive reweighted sampling and iterative continuous projection for feature selection, regularization parameters and kernel parameters of Least-Square Support Vector Machine were optimized by the Improved Beetle Antennae Search Algorithm, a fast non-destructive detection method for meat freshness (TVB-N) was completed. Analyze the performance of the proposed method through experiments. [Results] The experimental method could achieve accurate, rapid, and non-destructive testing of pork freshness (TVB-N), with high detection accuracy and efficiency, the detection correlation coefficient was 0.978 1, the mean square error was 0.302 1, and the average detection time was 0.031 seconds. [Conclusion] A fast non-destructive testing method for meat freshness (TVB-N) can be achieved by combining spectral detection and intelligent algorithms.

Keywords: pork; freshness; spectral acquisition system; beetle antennae search algorithm; least squares support vector machine; rapid non-destructive testing

随着中国肉类产量和消耗量的持续增长, 确保肉类食品安全已成为一个越来越重要的议题。肉类食品在冷链运输中易受微生物污染而发生腐败变质, 危害消费者健康, 同时严重影响中国食品行业的高质量发展^[1-2]。光

谱分析是肉类新鲜度测定的一种非常有效的方法, 具有快速、无损、准确的特点^[3]。因此, 研究基于光谱技术的肉类新鲜度检测方法具有重要的实际意义。

目前, 国内外对肉类新鲜度检测方法进行了较为深

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(编号: 232102210194)

通信作者: 汪垚(1989—), 男, 河南工业贸易职业学院讲师, 硕士。E-mail: fgstgh@126.com

收稿日期: 2024-04-17 改回日期: 2024-08-22

入的研究,主要集中在光谱分析、电子鼻等快速、无损检测技术上^[4-6]。张凡等^[7]为了实现肉类新鲜度的快速、无损检测,将光谱检测、机器视觉和最小二乘支持向量机结合用于肉类新鲜度检测。结果表明,所提方法可实现肉类 TVB-N 含量的定量、快速、无损、准确检测,相关系数为 0.930 0,标准分析误差为 1.873 0,相对分析误差为 2.635 0。张凡等^[8]为了实现肉类新鲜度的快速综合评价,将光谱技术与灰色关联度分析相结合用于肉类新鲜度检测。结果表明,所提方法可以快速、客观地综合评价肉类新鲜度,相关系数为 0.967 0。王轲等^[9]针对传统肉类新鲜度检测感官评定方法主观性较强,提出了一种光谱检测技术与人工神经网络相结合的肉类 TVB-N 含量检测。结果表明,所提方法能够实现无损和高精度的检测,相关系数为 0.860 0,均方误差为 3.330 0。谢安国等^[10]为了评价光谱检测技术在肉类新鲜度检测中的效果,提出了一种结合光谱技术、遗传算法和 BP 神经网络的肉类 TVB-N 含量检测方法。结果表明,所提方法可实现肉类 TVB-N 含量的高精度检验,相关系数为 0.826 0,均方误差为 1.010 0。上述方法结合光谱检测和智能算法实现了肉类新鲜度检测,但上述方法存在计算资源需求大、数据质量依赖性强、数据预处理复杂等问题,导致检测精度和效率有待进一步提高。为了进一步提升肉类新鲜度指标 TVB-N 含量检测的精度和效率,试验选择原理简单、参数少、计算量小、全局寻优能力强的天牛须搜索算法对最小二乘支持向量机参数进行优化,进一步提高检测方法精度和效率。

研究拟提出一种结合光谱采集技术、光谱预处理、特征选择方法、改进最小二乘支持向量机的猪肉新鲜度 (TVB-N) 快速无损检测方法,并通过试验验证其优越性,以期肉类无损检测技术的发展提供依据。

1 光谱采集系统

光谱采集系统如图 1 所示。利用高光谱成像技术可以在不接触被测物体的情况下同时获取图像信息和光谱信息,系统主要由计算机、平台控制器、成像光谱仪、成像镜头、传送装置五部分组成^[11-12]。采用光谱包含 480 波段 (400~1 000 nm), 250 W 光纤卤素灯 (SCHOTT DCR II A20800 型, 狄诺瓦 (北京) 电子设备有限公司), 光谱仪 (V10E-HS 型, 北京卓立汉光仪器有限公司), 工业镜头 (BT-23C0814MP5 型, 陕西维视智造科技股份有限公司), 一组运输设备和计算机 (华为、英特尔酷睿 i7-3700) 等。

2 肉类新鲜度 (TVB-N) 检测方法

试验以 TVB-N 含量作为肉类新鲜度的评估指标, 结合 SG 平滑滤波和标准正态变量 (standard normal variate, SNV) 对采集光谱进行预处理, 结合窗口竞争性自适应重加权采样 (window competitive adaptive reweighted

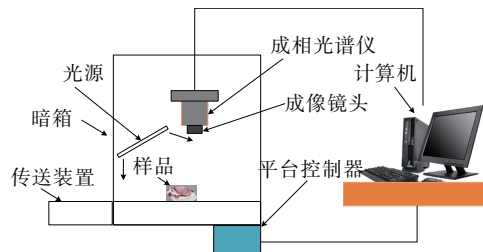


图 1 光谱采集系统

Figure 1 Spectral acquisition system

sampling, WCARS) 结合迭代式连续投影 (iterative successive projection algorithm, ISPA) 算法提取光谱特征, 结合改进天牛须搜索 (beetle antennae search, BAS) 算法和最小二乘支持向量机 (least squares support vector machine, LSSVM) 完成猪肉新鲜度 (TVB-N) 快速无损检测方法。采集光谱包含 480 个波段 (400~1 000 nm)。

2.1 SG-SNV 滤波器和 WCARS-ISPA 特征选择

SG 平滑是一种基于局部多项式拟合的滤波方法, 其通过在每个数据点周围拟合一个多项式来对数据进行平滑。该方法可以有效地去除随机噪声, 同时保留对诸如峰形和宽度的有用信息。但处理光谱之间偏移效应和散射现象 SG 平滑能力有限^[13-14]。SNV 是用于消除光谱之间偏移和散射影响的预处理方法。通过将各光谱点的强度值转换为与该波长点平均光谱的偏差和标准偏差的标准化得分来校正光谱^[15]。卷积平滑 SG 结合标准正态变换 SNV 可以提高去噪性能和效率。因此, 试验使用卷积平滑 SG 结合标准正态变换 SNV 完成高光谱数据的预处理。

高光谱数据中包含光谱信息和图像信息, 既包含肉类新鲜度信息, 也包含不相关信息。在试验中结合迭代连续投影算法 ISPA 的窗口竞争自适应加权采样 WCARS 提取特征 (7 个波长)。

WCARS 策略是在传统 CARS 算法基础上发展起来的, 传统 CARS 算法在计算过程中过于强调校正集的交叉验证结果, 忽略了相邻变量之间的协同效应, 容易引起校正集与验证集结果不一致的问题^[16]。为了解决这个问题, WCARS 引入了“窗口”的概念, 对连续波段进行分组, 通过考虑波段间的协同效应, 增强了特征变量选择的稳健性。迭代连续投影算法 ISPA 算法在现有 SPA 的基础上进行了改进, 通过引入更复杂的迭代和优化策略, 提高了特征选择的准确性和鲁棒性, 通过有效选择最少冗余波长来提高模型的预测性能, 同时解决了共线性问题, 增强了模型的鲁棒性和泛化性^[17]。

WCARS 与 ISPA 相结合的光谱特征波长选择方法是一种有效的光谱数据处理技术, 适用于高光谱图像的特征波长选择。试验方法通过消除冗余信息变量, 选出代

表样品性质的特征波长,建立了更准确稳健的定量模型。

2.2 改进 BASA-LSSVM 检测

LSSVM 是一种基于 SVM 的改进算法。在 SVM 中,目标是找到区分不同类别的最佳超平面,同时最大化不同类别之间的间距^[18-19]。在 LS-SVM 中,目标函数的误差项是误差的平方和,而不是误分类点的数量。这样做的优点是将原始不等式约束条件转化为等式约束条件,从而将问题从一个二次规划问题的求解转化为一组线性方程组的求解,使求解难度显著降低。

对于给定训练样本 (x_i, y_i) ,LSSVM 目标函数如式(1)所示。

$$\min J = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum e_i^2, \quad (1)$$

式中:

$\min J$ ——最小化误差平方和;

ω ——权重矢量;

e_i ——第 i 个样本点误差;

γ ——正则化参数。

通过拉格朗日函数将有约束问题转换为无约束问题,如式(2)所示。

$$\min J = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum e_i^2 - \sum I_i [\omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i], \quad (2)$$

式中:

b ——偏差项;

I_i ——拉格朗日乘子;

$\varphi(\cdot)$ ——非线性映射函数。

通过对 L 关于 ω 、 b 、 e 分别求偏导并令其等于零,可以得到式(3)。

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial \omega} = 0 \rightarrow \omega = \sum I_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial J}{\partial \omega} = 0 \rightarrow \omega = \sum I_i = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial \omega} = 0 \rightarrow I_i = \gamma e_i \\ \frac{\partial J}{\partial I_i} = 0 \rightarrow \omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入拉格朗日函数式,可以最终将问题转换为求解 I 的线性系统。当求出 I 时,可以通过式(3)计算出 ω 和 e ,得到决策函数。决策函数如式(4)所示。

$$y = \sum I_i K(x_i, x_j) + b, \quad (4)$$

式中:

$K(x_i, x_j)$ ——径向基核函数。

采用 RBF 核函数作为 LSSVM 模型的核函数。核函数参数和正则化参数在 LSSVM 模型中发挥着关键作用,它们的合理选择直接影响到模型的学习能力和预测精度。BAS 算法以其原理简单、参数少、计算量小、适应性

强等优点在众多智能优化算法中脱颖而出^[20]。因此,通过 BAS 算法优化 LSSVM 正则化参数和核函数参数。

BAS 算法的核心思想是把问题的解空间看作一个生态系统,其中每个个体代表一个可能的解。算法通过模拟自然选择、遗传变异等生物进化机制生成新的解,并根据适应度函数对解的质量进行评价。

但算法易陷入局部极值和劣势个体参与新的迭代,通过引入蒙特卡洛准则优化和探路反馈更新策略解决上述问题。

(1) 蒙特卡洛准则优化:为了解决陷入局部机制问题,通过模拟退火的蒙特卡洛准则优化 BAS 算法,以概率 p 接受较差的解,如式(5)所示。

$$p = \begin{cases} 1, f(x') < f(x'^{-1}) \\ \exp(-\frac{f(x') - f(x'^{-1})}{T}), f(x') \geq f(x'^{-1}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中:

$f(x')$ ——迭代 t 次后位置的适应度函数值;

$f(x'^{-1})$ ——迭代 $t-1$ 次后位置的适应度函数值;

$\exp$ ——自然指数;

T ——较高温度,℃。

(2) 引入探路反馈更新策略:为了解决劣势个体参与迭代,通过探路反馈更新策略。将反馈最优个体和当前最优个体进行比较,如式(6)和式(7)所示。

$$x_{f,i} = x_g + S_g \cdot \text{sgn}(f_{L,g,i} - f_{R,g,i}) \cdot d_i, \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_{g+1} = x_{f,i,\text{best}}, x_g < x_{f,i,\text{best}} \\ x_{g+1} = x_g, x_g \geq x_{f,i,\text{best}} \end{cases}, \quad (7)$$

式中:

$x_{f,i}$ ——反馈个体位置;

$f_{L,g,i}, f_{R,g,i}$ ——左、右须个体适应度值;

$x_{f,i,\text{best}}$ ——反馈最优个体;

x_g ——天牛的当前最优位置;

d_i ——转动方向向量。

试验通过改进 BAS 算法优化 LSSVM 正则化参数和核函数参数,肉类新鲜度检验步骤:

步骤 1:采集光谱数据并划分。

步骤 2:对采集数据进行预处理和特征提取。

步骤 3:确定 BAS 算法适应度函数,评价天牛个体位置优劣,加快天牛个体寻优过程。如式(8)所示。

$$f(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|}{n}}, \quad (8)$$

式中:

y_i ——实际值;

y'_i ——预测值。

步骤 4: BAS 算法初始化。设置初始步长、控制因子、

迭代次数等。

步骤 5:LSVM 优化参数对应天牛初始位置 x_0 , 计算适应度函数值, 通过改进策略更新。

步骤 6: 迭代次数或适应度设定值是否满足要求, 满足输出最优参数, 否则进入步骤 5。

步骤 7: 通过最优参数建立 LS-SVM 模型, 测试测试集。

肉类新鲜度检测流程如图 2 所示。

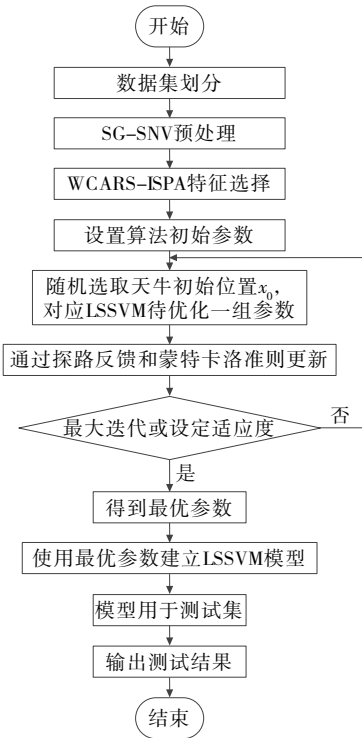


图 2 肉类新鲜度检测流程

Figure 2 Meat freshness testing process

3 试验研究

3.1 参数设置

为验证试验所提方法的优越性, 试验以猪肉 TVB-N 含量为研究对象, 猪肉实际 TVB-N 含量根据 GB 5009.228—2016 检测, 为保证测定值的准确性, 采用 3 次测定取平均值的方式。根据 GB 2707—2016 标准, 肉品的新鲜度可以根据其 TVB-N (挥发性盐基氮) 含量进行划分, 猪肉 TVB-N 含量划分为 3 个等级, TVB-N 含量 ≤ 15 mg/100 g 为新鲜肉, TVB-N 含量 15~25 mg/100 g 为次鲜肉, TVB-N 含量 ≥ 25 mg/100 g 为不新鲜肉。从 3 个等级样本中分别选择 100 个样本, 合计 300 个样本, 将样本按 3:1 的比例分为训练集和测试集。算法参数如表 1 所示。

试验采用预测相关系数 R^2 (训练集 R_c^2 和测试集 R_p^2)、预测均方根误差 R_{MSE} (训练集 R_{MSEC} 和测试集 R_{MSEP})、平均检测时间 t_A 对试验模型性能进行综合评价, R^2 越接近 1 和

表 1 算法参数

Table 1 Algorithm parameters		
参数	数值	单位
初始温度	5 000	℃
降温速率	0.7	
降温次数	5	次
总迭代次数	100	次
步长	3, 10	
收敛精度	0.000 1	
正则化参数	[10, 100]	
核函数参数	[1/2, 16]	

R_{MSE} 值越小, 预测值越接近真实值。 t_A 越短, 模型的效率越高。相关系数、均方根误差和平均检测时间如式 (9)~式 (11) 所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (9)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad (10)$$

$$t_A = \frac{T}{n}, \quad (11)$$

式中:
 $y_i, \hat{y}_i, \bar{y}$ ——实际值、预测值、预测平均值;
 n ——样本数;
 T ——检测时间, s。

3.2 结果分析

为了验证试验预处理方法的优越性, 对试验方法、卷积平滑 SG 和标准正态变换 SNV 在数据处理效果上的差异进行分析, 结果如表 2 所示。

表 2 不同预处理方法结果

Table 2 Results of different preprocessing methods				
预处理方法	训练集		测试集	
	R_c^2	R_{MSEC}	R_p^2	R_{MSEP}
SG	0.930 5	0.490 2	0.921 5	0.603 2
SNV	0.937 0	0.503 2	0.925 6	0.593 2
试验方法	0.980 8	0.265 4	0.978 1	0.302 1

由表 2 可以看出, 试验所提 SG-SNV 预处理方法与单一 SG 和 SNV 方法相比, 在光谱数据预处理上的性能明显提高。与 SG 和 SNV 相比, 试验方法训练集的 R_c^2 分别提高 5.41%, 4.67%, 测试集的 R_p^2 分别提高 6.14%, 5.67%。表明试验方法在光谱数据预处理中提高了模型拟合的优越性和泛化能力。与 SG 和 SNV 相比, 试验方法训练集的 R_{MSEC} 分别下降 45.86%, 47.26%, 测试集的 R_{MSEP} 分别下降

49.92%,49.07%。表明试验方法在预处理光谱数据时能显著降低模型的预测误差。

为了验证试验所提数据特征提取方法的有效性,对试验所提特征提取方法与窗口竞争性自适应重加权采样WCARS和迭代式连续投影算法ISPA在特征提取效果上的差异进行比较,结果如表3所示。

表3 不同特征提取结果

Table 3 Different feature extraction results					
特征提取方法	训练集		测试集		特征波长数
	R_c^2	R_{MSEC}	R_p^2	R_{MSEP}	
WCARS	0.960 6	0.385 5	0.951 2	0.454 4	10
ISPA	0.950 2	0.403 0	0.943 2	0.501 2	12
试验方法	0.980 8	0.265 4	0.978 1	0.302 1	7

由表3可以看出,试验所提特征提取方法在光谱数据分析中表现出了显著的优势,能够更有效地提取关键信息,提高了模型的预测精度,并降低了模型的复杂度。相比WCARS和ISPA,试验方法训练集的 R_c^2 分别提高了2.10%,3.22%,测试集的 R_p^2 分别提高了2.83%,3.70%。表明试验方法在光谱数据预处理上提高了模型的拟合优度和泛化能力。相比WCARS和ISPA,试验方法训练集的 R_{MSEC} 分别降低了31.15%,47.26%,测试集的 R_{MSEP} 分别降低了34.14%,39.72%。表明试验方法在特征提取光谱数据时能显著降低模型的预测误差。试验方法相比WCARS和ISPA,特征波长数分别降低了30.00%,41.67%。表明试验方法能够更有效地选择信息丰富的特征,从而降低模型的复杂度和过拟合的风险。

为了验证改进BAS算法的优化效果,使用改进BAS算法和BAS算法对LS-SVM的参数进行优化。优化前后随迭代变化的适应度值和寻优参数如图3和表4所示。

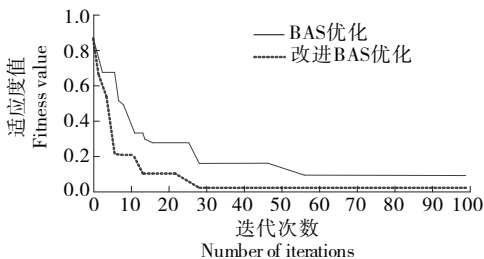


图3 优化前后随迭代变化的适应度值

Figure 3 The fitness value that changes with iteration before and after optimization

由图3和表4可以看出,改进BAS算法在LSVM模型参数优化方面有明显的性能提高,改进BAS算法在迭代28次左右时收敛,而BAS算法在迭代56次左右收敛。表明改进BAS算法在寻找最优解的速度上更快。改进BAS

表4 优化前后寻优参数

Table 4 Optimize parameters before and after optimization

寻优方法	正则化参数	核函数参数	迭代次数
BAS寻优	98.537 1	2.560 3	56
改进BAS寻优	64.621 0	0.875 6	28

算法个体最优适应值为0.265 4,BFO算法为1.103 2。表明改进BAS算法找到了更优的解,即在LSVM模型参数优化问题上获得了更高的精度。这是因为试验方法通过蒙特卡洛准则优化和探路反馈更新策略优化,改进BAS算法能够有效避免陷入局部极值,从而提高了全局搜索能力。

为了验证试验方法与BAS-LSSVM模型在光谱数据上的模型预测性能,将试验方法和BAS-LSSVM模型预测值与实际值进行对比,结果如图4和表5所示。

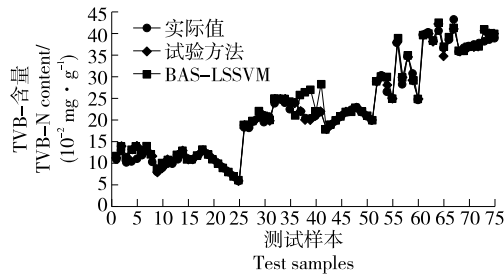


图4 优化前后与实际值对比效果

Figure 4 Comparison effects between optimized and actual values before and after optimization

表5 优化前后指标对比

Table 5 Comparison of indicators before and after optimization

方法	R_p^2	R_{MSEP}	平均检测时间/s
BAS-LSSVM	0.960 8	0.501 2	0.036
试验方法	0.978 1	0.302 1	0.031

从图4和表5可以看出,试验所提方法检测的TVB-N含量与实际值基本一致,且优于BAS-LSSVM方法。试验所提方法在TVB-N含量检测中具有明显优势,不仅提高了检测的准确性,还大大提高了检测的效率。

4 结论

试验结合光谱采集、SG平滑滤波—标准正态变量预处理方法、窗口竞争性自适应重加权采样—迭代连续投影特征选择和改进的天牛须搜索算法—最小二乘支持向量机模型用于肉类挥发性盐基氮含量的快速无损检测。结果表明,试验所提方法可实现肉类挥发性盐基氮含量的准确、快速、无损检测,检测结果相关系数为0.978 1,均方根误差为0.302 1,平均检测时间为0.031 s。与天牛须

搜索算法—最小二乘支持向量机模型相比,相关系数提高 1.80%,均方根误差降低 39.72%,平均测定时间降低 13.89%,可为食品安全检测提供一定的助力。试验仅对肉类挥发性盐基氮含量进行检测,后续可以结合菌落总数和大肠菌群数等指标,不断完善整个检测系统。

参考文献

- [1] 邹金萍,章帅,董文韬,等.应用高光谱图像检测鱼肉挥发性盐基氮含量研究[J].光谱学与光谱分析,2021,41(8):2586-2590.
- ZOU J P, ZHANG S, DONG W T, et al. Research on the application of hyperspectral image detection for total nitrogen content of volatile salt bases in fish meat[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2586-2590.
- [2] 丛军,李星.基于电子鼻、电子舌技术的荣昌猪肉及其制品贮藏过程新鲜度检测研究[J].食品安全质量检测学报,2024,15(7):192-201.
- CONG J, LI X. Research on freshness detection of Rongchang pork and its products during storage process based on electronic nose and electronic tongue technology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(7): 192-201.
- [3] 刘美辰,薛河儒,刘江平,等.牛奶蛋白质含量的SSA-SVM高光谱预测模型[J].光谱学与光谱分析,2022,42(5):1601-1606.
- LIU M C, XUE H R, LIU J P, et al. SSA-SVM hyperspectral prediction model for milk protein content[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(5): 1601-1606.
- [4] ERNA K H, ROVINA K, MANTIHAI S. Current detection techniques for monitoring the freshness of meat-based products: a review[J]. Journal of Packaging Technology and Research, 2021, 5(3): 127-141.
- [5] 何鸿举,王洋洋,王魏,等.NIR高光谱成像技术联用SPA算法快速检测五花肉的过氧化值[J].食品工业科技,2020,41(8):236-241.
- HE H J, WANG Y Y, WANG W, et al. NIR hyperspectral imaging technology combined with SPA algorithm for rapid detection of peroxide value in pork belly[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 236-241.
- [6] 王朝辉,赵层,赵倩,等.基于高光谱成像的大米中蛋白质含量的可视化研究[J].食品研究与开发,2020,41(6):124-129.
- WANG C H, ZHAO C, ZHAO Q, et al. Visualization of protein content in rice based on hyperspectral imaging[J]. Food Research and Development, 2020, 41(6): 124-129.
- [7] 张凡,淑英,张志胜,等.融合光谱和图像特征信息的羊肉TVB-N含量无损检测[J].中国食品学报,2021,21(11):191-200.
- ZHANG F, SHU Y, ZHANG Z S, et al. Non destructive detection of TVB-N content in lamb meat by integrating spectral and image feature information[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(11): 191-200.
- [8] 张凡,姜鑫,张存存,等.近红外光谱结合灰色关联度分析快速综合评价猪肉新鲜度[J].河北农业大学学报,2020,43(1):89-95.
- ZHANG F, JIANG X, ZHANG C C, et al. Rapid comprehensive evaluation of pork freshness using near-infrared spectroscopy combined with grey relational analysis[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2020, 43(1): 89-95.
- [9] 王轲,田海清,张珏,等.基于高光谱成像技术的羊肉挥发性盐基氮检测方法研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2022,43(3):74-79.
- WANG K, TIAN H Q, ZHANG J, et al. Research on the detection method of volatile basic nitrogen in lamb meat based on hyperspectral imaging technology[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 74-79.
- [10] 谢安国,纪思媛,李月玲,等.基于遗传算法和深度神经网络的近红外高光谱检测猪肉新鲜度[J].食品工业科技,2024,45(17):345-351.
- XIE A G, JI S Y, LI Y L, et al. Near infrared hyperspectral detection of pork freshness based on genetic algorithm and deep neural network[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 345-351.
- [11] 牛超,杨卫东,胡鹏明,等.Wi-freshness:基于CSI的猪肉新鲜度检测系统研究[J].物联网学报,2023,7(2):143-152.
- NIU C, YANG W D, HU P M, et al. Wi-freshness: research on CSI based pork freshness detection system[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2023, 7(2): 143-152.
- [12] 刘小花,周彬静,彭菁,等.基于电子鼻和高光谱成像技术的冷鲜肉牛肉微生物的生长模型构建[J].南京农业大学学报,2023,46(3):595-605.
- LIU X H, ZHOU B J, PENG J, et al. Construction of microbial growth model for cold fresh beef based on electronic nose and hyperspectral imaging technology[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(3): 595-605.
- [13] 胡鹏伟,刘江平,薛河儒,等.BP神经网络结合变量选择方法在牛奶蛋白质含量检测中的应用[J].光电子·激光,2022,33(1):23-29.
- HU P W, LIU J P, XUE H R, et al. The application of BP neural network combined with variable selection method in the detection of milk protein content[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2022, 33(1): 23-29.
- [14] 李玉花,史翰卿,熊赞藏,等.融合电子鼻和视觉技术的鸡肉新鲜度检测装置研究[J].农业机械学报,2022,53(11):433-440.
- LI Y H, SHI H Q, XIONG Y W, et al. Research on chicken freshness detection device integrating electronic nose and visual technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 433-440.

(下转第122页)

- 究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020: 26-27.
- LI D H. Isolation, identification of the predominant spoilage bacteria and bacteriostasis in the MAP pot-Stewed duck esophagus[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020: 26-27.
- [14] FU Z X, YANG H, XIAO Y P, et al. Ileal microbiota alters the immunity statues to affect body weight in muscovy ducks[J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 844102.
- [15] 李除夕. 豆腐特定腐败菌研究及货架期预测模型建立[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 26.
- LI C X. Study on the specifics spoilage organisms in tofu and shelf life prediction model[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008: 26.
- [16] 刘彩云, 祝泉馨, 方彦昊, 等. 市售卤牛肉中腐败菌的分离鉴定[J]. *肉类工业*, 2020(5): 38-43.
- LIU C Y, ZHU Q X, FANG Y H, et al. Isolation and identification of spoilage bacteria insaled stewed beef[J]. *Meat Industry*, 2020(5): 38-43.
- [17] 袁先铃, 郑贻丹, 罗焱, 等. 自贡冷吃兔生产环境中细菌的鉴定及溯源分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(1): 112-125.
- YUAN X L, ZHENG Y D, LUO Y, et al. Identification and traceability analysis of bacteria in the production environment of Zigong Lengchitu[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2022, 38(1): 112-125.
- [18] 孟静南, 黄现青, 宋莲军, 等. 储藏温度对鸭皮中细菌多样性的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(1): 106-114.
- MENG J N, HUANG X Q, SONG L J, et al. Effect of storage temperature on bacterial diversity in duck skin[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53(1): 106-114.
- [19] AISHVARYA G, ANAMIKA K, RADHA R. Reduction of hexavalent chromium [Cr(VI)] by heavy metal tolerant bacterium *Alkalihalobacillus clausii* cral and its toxicity assessment through flow cytometry[J]. *Current Microbiology*, 2021, 79(1): 33.
- [20] 邓丽颖. 海南省文昌市铜鼓岭森林土壤嗜盐和耐盐菌多样性研究[D]. 吉首: 吉首大学, 2021: 12-16.
- DENG L Y. Biodiversity of Halophilic and Halotolerant bacteria isolated from forest soil from Tongguling in Wenchang city, Hainan province[D]. Jishou: Jishou University, 2021: 12-16.
- [21] AMARAJA J, SONIA T, PRACHI K, et al. *Alkalihalobacterium elongatum* gen. nov. sp. nov.: an antibiotic-producing bacterium isolated from lonar lake and reclassification of the genus *Alkalihalobacillus* into seven novel genera[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 722369.
- [22] 韩静文, 姜启兴, 许艳顺, 等. 可得然胶对高温杀菌鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(4): 37-41, 98.
- HAN J W, JIANG Q X, XU Y S, et al. Effects of curdlan on gel properties of high-temperature sterilization surimi[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(4): 37-41, 98.
- [23] 张伟娜, 李迎秋. ϵ -聚赖氨酸在食品中应用的进展[J]. *中国调味品*, 2012, 37(12): 5-9.
- ZHANG W N, LI Y Q. Advance on application of ϵ -poly-L-lysine in food[J]. *China Condiment*, 2012, 37(12): 5-9.
- [24] 冯艳芸, 郭海娟, 李海亮, 等. 生物防腐剂聚赖氨酸研究进展[J]. *农产品加工*, 2019(7): 57-62.
- FENG Y Y, GUO H J, LI H L, et al. Research progress of ϵ -polylysine as biological preservative[J]. *Farm Products Processing*, 2019(7): 57-62.
- [25] 史文艳, 孙震. ϵ -聚赖氨酸盐酸盐与 Nisin 对蜡状芽孢杆菌的协同作用及机理[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 15-19.
- SHI W Y, SUN Z. Synergistic effect and mechanism of ϵ -polylysine hydrochloride and Nisin on *Bacillus cereus*[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(3): 15-19.
-
- (上接第 78 页)
- [15] 索婷, 杨书林, 林娜, 等. 小麦粉特性与生湿面品质的关系研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(3): 54-65.
- SUO T, YANG S L, LIN N, et al. A study on the relationship between wheat flour characteristics and wet noodle quality[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2024, 43(3): 54-65.
- [16] 贾哲, 陈晓婷, 潘南, 等. 基于电子舌快速检测冷藏双斑东方鲀的新鲜度[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(5): 220-229.
- JIA Z, CHEN X T, PAN N, et al. Rapid detection of freshness of refrigerated pufferfish based on electronic tongue[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(5): 220-229.
- [17] 王阳阳, 黄勋, 陈浩, 等. 基于同态滤波和改进 K-means 的苹果分级算法研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(12): 47-51, 112.
- WANG Y Y, HUANG X, CHEN H, et al. Apple grading algorithm based on homomorphic filtering and improved k-means[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(12): 47-51, 112.
- [18] 刘光宪, 王丽, 李雪, 等. 3 种天然抗氧化剂对腊肉理化性质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(15): 6 177-6 184.
- LIU G X, WANG L, LI X, et al. The effects of three natural antioxidants on the physicochemical properties of cured meat [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(15): 6 177-6 184.
- [19] 范传会, 黄文俊, 钟彩虹, 等. 猕猴桃品种对猕猴桃脆片品质影响的评价[J]. *食品与机械*, 2022, 38(12): 21-27.
- FAN C H, HUANG W J, ZHONG C H, et al. Evaluation of the impact of kiwifruit varieties on the quality of kiwifruit chips [J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(12): 21-27.
- [20] 王彩霞, 王松磊, 贺晓光, 等. 高光谱图谱融合检测羊肉中饱和脂肪酸含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(2): 595-601.
- WANG C X, WANG S L, HE X G, et al. Hyperspectral fusion detection of saturated fatty acid content in lamb[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(2): 595-601.