

高光谱技术结合改进 LSSVM 的大米 脂肪酸检测方法

Rice fatty acid detection method combining hyperspectral technology with improved LSSVM

付娟娟¹ 陈春茹² 黄珍琳³ 孙峰³

FU Juanjuan¹ CHEN Chunru² HUANG Zhenlin³ SUN Feng³

(1. 潞安职业技术学院, 山西 长治 046000; 2. 山西工商学院, 山西 太原 030006;

3. 太原科技大学, 山西 太原 030024)

(1. Lu'an Vocational and Technical College, Changzhi, Shanxi 046000, China;

2. Shanxi Technology and Business University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

3. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

摘要:目的:解决食品企业现有大米品质检测方法存在的准确性低和效率差等问题。方法:基于高光谱数据采集系统,提出一种结合改进细菌觅食算法和最小二乘支持向量机的贮藏大米品质快速无损检测方法。通过改进的细菌觅食算法对最小二乘支持向量机超参数(正则化参数和核参数)进行寻优,实现贮藏大米品质的快速无损检测。通过试验分析其性能。结果:所提方法可以实现贮藏大米脂肪酸含量的快速无损检测,决定系数为 0.940 5,均方根误差为 0.543 5,平均检测时间为 1.12 s。结论:所提检测方法具有较高的检测性能,可用于大米品质的鉴别与检测。

关键词:大米;脂肪酸;高光谱数据;细菌觅食算法;最小二乘支持向量机;快速无损检测

Abstract: Objective: To solve the problems of low accuracy and poor efficiency in the existing rice quality testing methods of food enterprises. **Methods:** Based on a hyperspectral data acquisition system, a fast and non-destructive detection method for stored rice quality was proposed, which combined an improved bacterial foraging algorithm and least squares support vector machine. By applying the improved bacterial foraging algorithm, the hyperparameters (regularization parameter and kernel parameter) of the least squares support vector machine were optimized to achieve rapid and non-destructive detection of rice

quality. its performance was analyzed through experiments. **Results:** The proposed method can achieve rapid and non-destructive detection of fatty acid content in stored rice, with a determination coefficient of 0.940 5, root mean square error of 0.543 5, and an average detection time of 1.12 seconds. **Conclusion:** The proposed detection method has high detection performance, which can be used for the identification and detection of rice quality. **Keywords:** rice; fatty acid; hyperspectral data; bacterial foraging optimization algorithm; least squares support vector machine; rapid non-destructive testing

大米贮藏是食品企业对大米进行加工到消费必不可少的中间环节,贮藏时间与大米口感、价格等直接相关。脂肪酸含量是大米品质评估的重要指标,更决定着大米的市场价格。将复杂耗时的传统方法替换为简单高效的检测方法已成为当前研究的热门话题^[1]。

高光谱检测技术是近年来蓬勃发展起来的一种快速检测方法,在食品检测中应用越来越广泛^[2]。目前,高光谱成像技术被广泛应用于食品检测,在大米品质检测中主要应用有蛋白质检测、产地检测等^[3-4]。罗浩东等^[5]提出将高光谱成像技术与主成分分析和支持向量机相结合用于大米产地快速检测,该方法可以实现大米产地的快速无损检测,具有较高的检测准确率。王朝辉等^[6]提出结合高光谱成像和偏最小二乘回归检测大米中蛋白质含量,该方法对大米中蛋白质含量分布的可视化研究具有可行性。翁士状等^[7]提出一种将高光谱成像技术和深度学习网络相结合的名优大米无损鉴别方法,该方法可以实现名优大米种类的准确鉴别,具有较高的检测准确

基金项目:山西省教育科学“十三五”规划课题(编号:GH-2012503);山西省高等学校科研项目(编号:2022W234)

作者简介:付娟娟(1984—),女,潞安职业技术学院讲师,硕士。
E-mail: snrt9303@126.com

收稿日期:2023-11-06 **改回日期:**2024-02-02

率。孙俊等^[8]提出将高光谱图像、堆栈自动编码器和支持向量机相结合用于大米蛋白质含量检测,该方法可以有效融合深度特征,提高检测的精度。上述方法虽然可以实现大米品质的无损检测,但在实际应用中的检测准确率和效率还有待进一步提高。

相比于传统学习方法,最小二乘支持向量机具有结构简单、精度高、运算速度快等优势,在食品检测中应用广泛,但其参数根据经验选取,增加了计算量和易陷入局部极值。细菌觅食算法具有收敛速度快、求解质量好、搜索能力强等特点。研究拟提出一种应用于大米品质的快速无损检测,将高光谱技术、改进细菌觅食(bacterial foraging optimization, BFO)算法、最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LSSVM)相结合完成大米品质检测。通过改进 BFO 对 LSSVM 的正则化参数和核参数进行寻优。并与常规方法进行试验对比分析,旨在为食品质量检测方法的发展提供一定的参考和借鉴。

1 高光谱图像采集系统

通过高光谱图像采集系统采集大米高光谱数据,采集系统如图 1 所示。该系统主要由 4 部分组成,高光谱相机、镜头、计算机和光源。所测光谱包含 477 个波段(408.360~1 007.220 nm),系统通过黑箱采集大米图像,降低外部光干扰,但高光谱相机采样存在一定的噪声干扰,为降低噪声干扰,对高光谱采集图像进行图像预处理^[9-10]。

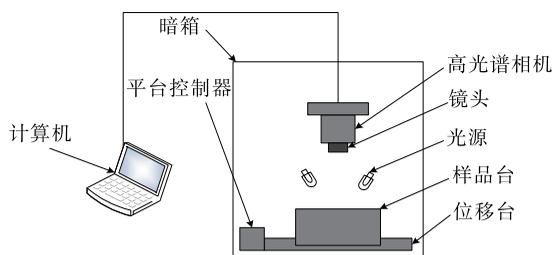


图 1 高光谱图像采集系统

Figure 1 Hyperspectral imager acquisition system

2 大米品质检测方法

首先通过高光谱图像采集系统采集不同贮藏月份大米的光谱数据,通过平均中心化(MC)进行数据预处理,通过连续投影算法(SPA)进行大米高光谱特征波长的提取,最后通过改进 BFO 算法优化的 LSSVM 模型对脂肪酸含量进行检测。图像采集时设置物距为 0.135 m,曝光时间为 0.015 s,位移台速度为 1.62 mm/s。

2.1 数据预处理和特征提取

为了降低外部噪音等干扰,对采集数据进行预处理,目前应用最广泛的有 3 种方法:卷积平滑(SG)、平均中心化(MC)、多散射校正(MSC),通过对比分析,选择平均中心化(MC)作为数据预处理方法^[11-13]。高光谱数据包括

光谱信息和图像信息,数据量庞大,其中既包括贮藏大米脂肪酸信息,也包括不相关的信息。采用 SPA 进行大米高光谱特征波长的提取(26 个波长)^[14-15]。

2.2 检测方法

LSSVM 是针对支持向量机(SVM)的改进,将目标函数误差的平方项作为优化指标,利用等式约束加快求解速度,达到降低求解难度的目的^[16-18]。对于样本(x_i, y_i),使用与 SVM 相同的算法理论,构建了 LSSVM 的目标函数,如式(1)所示。

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

式中:

e_i ——误差;

γ ——正则化参数,可控制误差精度;

ω ——权矢量。

通过引入 Lagrange 算子,可转化为:

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

进一步求解可得:

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

求解线性方程组可得式(4)。

$$\begin{bmatrix} b \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & E^T \\ E & K + \frac{1}{\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma \end{bmatrix}, \tag{4}$$

式中:

I ——单位列向量, $I = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T$;

K ——核函数;

E ——单位矩阵, $E = [1, 1, \dots, 1]^T$ 。

基于式(4)可以计算出 I_i 和 b 的值,进而可以计算 LSSVM 模型,如式(5)所示。

$$y = \sum I_i K(x_i, x_j) + b. \tag{5}$$

核函数的选择非常重要,通过比较 SVM 的 4 种常用核函数,发现 RBF 核函数可以在大米品质检测中获得最准确的结果。其使用范围非常广泛,采用 RBF 核函数作为 LSSVM 模型的核函数。

确定核函数后, LSSVM 模型的求解问题可归结为超参数(核函数参数 K , 正则化参数 γ)的选取问题,其中核参数直接影响低维样本数据在映射空间中的分布复杂度,正则化参数与模型对训练样本的拟合情况和模型的

推广能力相关。但参数根据经验选取,增加了计算量和易陷入局部极值。BFO 算法具有鲁棒性强、搜索能力强等优点,通过改进 BFO 算法寻优 LSSVM 核参数和正则化参数。

BFO 通过趋化、聚集、复制和迁移来寻找最优解。但其存在适用性不强、易陷入局部最优等缺点^[19]。通过两个方面的优化解决上述问题。

(1) 引入混沌理论:利用 logistic 映射生成混沌序列 ch ,将趋化过程中细菌 i 的固定步长 C_i 映射到混沌序列,形成新的混沌趋化步长 C_i^* ,如式(6)所示。

$$C_i^* = ch_i \cdot C_i \quad (6)$$

将得到的混沌趋化步长进行降序排序,以确保细菌与周围环境相互作用,自适应地选择趋势化步长,以防止陷入局部最优困境。

(2) 高斯变异操作:在当前细菌群体中的最佳位置 G_{best} 应用高斯变异,生成变异位置 G_{bestG} 。如式(7)所示。

$$G_{bestG} = G_{best} \cdot (1 + Gauss(0, 1)), \quad (7)$$

式中:

Gauss(0,1)——标准正态分布。

在 G_{best} 的基础上添加高斯分布随机扰动项,不仅可以使细菌摆脱局部最优值并收敛到全局最优值,而且可以提高收敛速度。

利用改进的 BFO 算法寻优 LSSVM 模型参数(K 和 γ)的最优值。大米品质检测步骤:

步骤 1:对采集的高光谱图像进行数据集划分,划分为训练集和测试集。

步骤 2:对输入的高光谱图像进行特征提取。

步骤 3:算法初始化。设置细菌个数、趋化因子次数、复制次数、迁移次数等。

步骤 4:各细菌随机产生一组 K 和 γ 值,计算其适应度值。

步骤 5:进行趋化、聚集、复制和迁移操作。

步骤 6:对结束条件进行判断,达到输出最优参数,否则重复步骤 2~4。

步骤 7:通过最优参数构建 LSSVM 模型。

步骤 8:采用模型对测试集进行测试,输出大米品质参数。

贮藏大米品质检测流程如图 2 所示。

3 大米品质检测试验

3.1 试验参数

为了验证试验方法的优势和可行性,以黑龙江五常市上市 1 月新大米为研究对象,将其置于 25 °C 恒温箱中,模拟贮藏环境,恒温箱共 5 个,以月为单位每月从各恒温箱中取出 8 份 20 g 大米样品进行数据采集,共获得 480 份大米样品。将数据集划分为训练集和测试集,比例

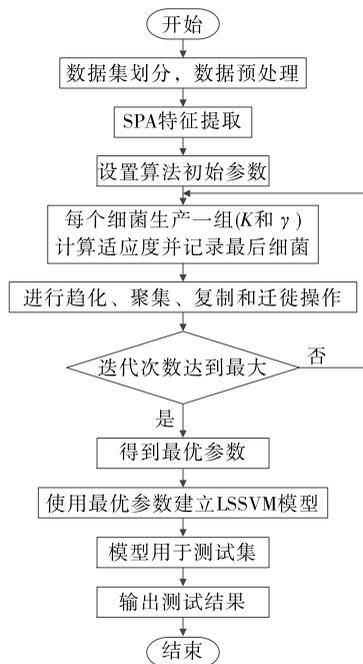


图 2 贮藏大米品质检测流程

Figure 2 Quality inspection process for stored rice

为 3 : 1。研究的目的是建立大米品质快速无损检测模型,用脂肪酸含量评估大米品质,脂肪酸含量实际值通过 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行测定,每个样品测定 5 次,将平均值作为实际值。表 1 为不同贮藏时间大米脂肪酸含量均值。

设备采用华为 PC,操作系统为 Windows11 64 位旗舰机,Intel i513400CPU,频率 4.0 GHz,高光谱采集系统的构成如表 2 所示。

通过大米样本集的训练对所提模型的初始参数进行微调,算法参数见表 3。

模型性能的优劣需要相关指标进行评价,选择决定系数、均方根误差和检测时间来评估模型的性能。

决定系数(R^2)的值越接近 1,表示模型预测值越接近真实值,决定系数(R^2)如式(8)所示。

表 1 不同贮藏时间大米脂肪酸含量

Table 1 Composition of hyperspectral acquisition system

贮藏时 间/月	脂肪酸含量/ ($10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	贮藏时 间/月	脂肪酸含量/ ($10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
1	8.824 7	7	15.623 2
2	9.432 1	8	17.323 1
3	10.312 5	9	19.021 3
4	11.521 2	10	21.086 7
5	12.987 5	11	23.324 5
6	14.123 2	12	25.982 3

表 2 高光谱采集系统组成

Table 2 Composition of hyperspectral acquisition system

设备	型号
成像光谱仪	Impector V10E-QE
CCD 相机	DL-604M
镜头	V23-f/2.4 030603
光源	50 W 全光谱卤素灯为光源
控制器	2900ER
可升降样品台	GZ02DS20
电控位移台	PSA200-11

表 3 算法参数

Table 3 Algorithm parameters

参数	数值	参数	数值
搜索范围维度	2	迁移概率	0.28
细菌个数	30	迭代次数	100
趋化次数	50	正则化参数	[100,150]
复制次数	4	核函数	[1,10]
迁移次数	2		

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (8)$$

式中:

R^2 ——决定系数;

y_i 、 \hat{y}_i 、 \bar{y}_i ——实际值、模型输出值、平均值, mg/100 g;

n ——样本数。

均方根误差(R_{MSE})值越小,则说明模型对待测样本的检测越接近实际值,均方根误差(R_{MSE})如式(9)所示。

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

式中:

R_{MSE} ——均方根误差, mg/100 g。

检测时间为所有样本检测时间之和除以样本总数作为模型运行速度的评估指标。

3.2 试验分析

为了验证改进 BFO 算法的寻优能力,将其与优化前的 BFO 算法进行比较分析,对 LSSVM 进行参数寻优,不同方法随迭代次数变化的适应度值如图 3 所示。

从图 3 可以看出,BFO 算法在迭代 55 次左右时收敛,个体最优适应度值最低,为 1.602 5。所提改进 BFO 算法在迭代 30 次左右时收敛,个体最优适应度值最低,为 0.803 6,收敛精度较高。结果表明,通过混沌映射和高斯变异操作优化 BFO 算法可以提高 BFO 算法在 LSSVM

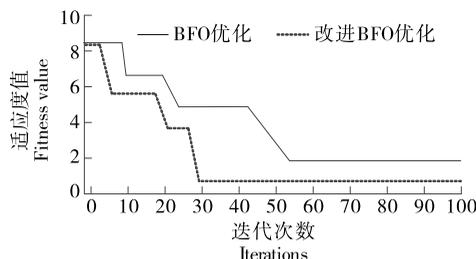


图 3 不同方法随迭代次数变化的适应度值

Figure 3 The fitness values of different methods vary with the number of iterations

模型参数寻优中的收敛性,避免陷入局部极值。改进前后优化参数如表 4 所示。

为了验证所提数据预处理方法的优越性,将该方法数据预处理方法与卷积平滑(SG)、多散射校正(MSC)进行对比分析,检测结果相关系数和均方根误差如表 5 所示。

表 4 改进前后参数优化结果

Table 4 Optimization results of parameters before and after improvement

方法	γ	K	迭代次数
BFO-LSSVM	138.32	6.77	55
改进 BFO-LSSVM	145.45	9.85	30

表 5 光谱数据预处理结果

Table 5 Optimization results of parameters before and after improvement

预处理方法	训练集		测试集	
	R^2	R_{MSE}	R^2	R_{MSE}
SG	0.930 5	0.560 5	0.920 8	0.856 6
MSC	0.927 0	0.517 8	0.900 6	0.808 3
MC	0.950 2	0.433 3	0.940 5	0.543 5

由表 5 可以看出,经平均中心化(MC)预处理方法对光谱数据进行预处理,所建模型最佳。训练集和测试集 R^2 分别为 0.950 2 和 0.940 5, R_{MSE} 分别为 0.433 3 和 0.543 5。与 SG 和 MSC 光谱数据预处理方法相比,平均中心化(MC)训练集 R^2 分别提高了 2.12% 和 2.50%,测试集 R^2 分别提高了 2.14% 和 4.43%,训练集 R_{MSE} 分别降低了 22.69% 和 16.32%,测试集 R_{MSE} 分别降低了 36.57% 和 36.55%。

为了验证所提特征提取方法的优越性,将该方法和主成分分析法(PCA)进行对比分析,不同特征提取方法的检测结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出,经连续投影算法(SPA)对光谱数据进行特征提取,所建模型最佳。与 PCA 特征提取方法相比,连续投影算法(SPA)训练集和测试集 R^2 分别提高了

表 6 不同特征提取方法检测结果

Table 6 Optimization results of parameters before and after improvement

特征提取方法	训练集		测试集	
	R^2	R_{MSE}	R^2	R_{MSE}
PCA	0.940 6	0.487 4	0.935 2	0.745 6
SPA	0.950 2	0.433 3	0.940 5	0.543 5

1.02% 和 0.57%，训练集和测试集 R_{MSE} 分别降低了 11.10% 和 27.11%。

为了进一步验证改进 BFO-LSSVM 方法的有效性，将其与文献[20]的 AlexNet 卷积神经网络进行对比分析，不同模型的检测效果如图 4 所示，不同方法的检测结果如表 7 所示。

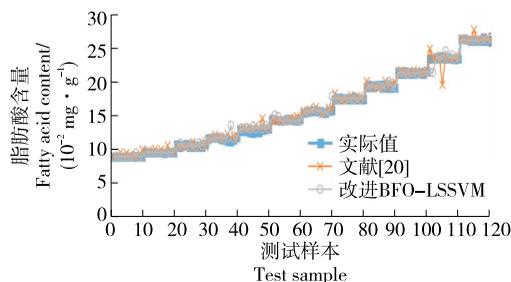


图 4 不同方法检测结果与实际值对比

Figure 4 Comparison of detection results and actual values using different methods

表 7 不同方法检测结果

Table 7 Test indicators by different methods

方法	R^2	R_{MSE}	平均检测时间/s
文献[20]	0.930 8	0.923 2	3.20
改进 BFO-LSSVM	0.940 5	0.543 5	1.12

由图 4 和表 7 可知，改进 BFO-LSSVM 方法检测的脂肪酸含量与贮藏大米脂肪酸实际值基本一致，优于文献[20]方法，与文献[20]的高光谱图像检测方法相比，改进 BFO-LSSVM 方法具有优异的 R^2 、 R_{MSE} 和平均检测时间， R^2 提高了 1.04%， R_{MSE} 下降了 41.13%，平均检测时间下降了 65.00%。表明改进 BFO-LSSVM 方法在大米品质检测中具有较好的性能，可用于大米品质的检测。

4 结论

研究提出将高光谱技术、改进细菌觅食算法和最小二乘支持向量机相结合用于贮藏大米品质的快速无损检测。通过平均中心化对高光谱采集图像进行数据预处理，通过连续投影算法完成特征波长的提取，结合改进细菌觅食算法和最小二乘支持向量机实现贮藏大米脂肪酸含量的检测。结果表明，所提方法可以实现贮藏大米脂

肪酸含量的快速无损检测，具有较优的决定系数、均方根误差和平均检测时间，相比于文献[20]方法，决定系数提高了 1.04%，均方根误差降低了 41.13%，平均检测时间降低了 65.00%，具有一定的实用价值。试验仅对大米品质参数脂肪酸进行了检测，后续可在此基础上检测大米水分、蛋白质等参数，不断完善和优化所提方法。

参考文献

- [1] 石小晶, 姚安阳, 李思维, 等. 我国大米品质研究发展动态的可视化分析[J]. 粮食问题研究, 2021, 6(2): 34-39, 51.
- [2] SHI X J, YAO A Y, LI S W, et al. Visual analysis of the development dynamics of rice quality research in China[J]. Research on Food Issues, 2021, 6(2): 34-39, 51.
- [3] 项辉宇, 薛真, 冷崇杰, 等. 基于 Halcon 的苹果品质视觉检测试验研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 123-126.
- [4] XIANG H Y, XUE Z, LENG C J, et al. Experimental study on visual inspection of apple quality based on Halcon[J]. Food & Machinery, 2016, 32(10): 123-126.
- [5] 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): 1 601-1 606.
- [6] 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): 1 601-1 606.
- [7] 邓杨, 王粤, 尚玉婷. 基于深度学习的大米蛋白分割算法研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 12(4): 139-144.
- [8] DENG Y, WANG Y, SHANG Y T. Research on rice chalkiness segmentation algorithm based on deep learning[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2021, 12(4): 139-144.
- [9] 罗浩东, 刘翠玲, 孙晓荣, 等. 基于高光谱成像技术的大米溯源研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 183-186.
- [10] LUO H D, LIU C L, SUN X R, et al. Research on rice traceability based on hyperspectral imaging technology[J]. Chinese Brewing, 2021, 40(4): 183-186.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 翁士状, 唐佩佩, 张雪艳, 等. 高光谱成像的图谱特征与卷积神经网络的名优大米无损鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(9): 2 826-2 833.
- [14] WENG S Z, TANG P P, ZHANG X Y, et al. Spectral features of hyperspectral imaging and non-destructive identification of high-quality rice using convolutional neural networks[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(9): 2 826-2 833.
- [15] 孙俊, 靳海涛, 芦兵, 等. 基于高光谱图像及深度特征的大米蛋白质含量预测模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 295-303.
- [16] SUN J, JIN H T, LU B, et al. A prediction model for rice protein content based on hyperspectral images and depth features[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 35(15): 295-303.

- [9] 肖仕杰, 王巧华, 李春芳, 等. 傅里叶变换中红外光谱的牛奶品质无损检测分级[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1 243-1 249.
XIAO S J, WANG Q H, LI C F, et al. Non destructive testing and grading of milk quality using Fourier transform mid infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(4): 1 243-1 249.
- [10] 王丰霞, 冯骁骄. 凯氏定氮法检测牛奶中蛋白质含量的不确定度评定[J]. 粮食加工, 2022, 47(4): 127-129.
WANG F X, FENG X J. Evaluation of uncertainty in the determination of protein content in milk by Kjeldahl nitrogen method[J]. Grain Processing, 2022, 47(4): 127-129.
- [11] 夏杨毅, 赵鸾. 高光谱成像技术在肉类安全无损检测的应用研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(12): 6-13.
XIA Y Y, ZHAO L. Research progress on the application of hyperspectral imaging technology in non-destructive testing of meat safety[J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 39(12): 6-13.
- [12] 李琴, 朱家明, 郎红, 等. 基于带 RBF 核的 SVM 模型对红酒品质的精准分类[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 417-422.
LI Q, ZHU J M, LANG H, et al. Accurate classification of red wine quality based on SVM model with RBF kernel[J]. Journal of Hubei University (Natural Science Edition), 2021, 43(4): 417-422.
- [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]. Optoelectron Laser, 2022, 33(1): 23-29.
- [14] 殷坤, 刘金明, 张东杰, 等. 基于近红外光谱的大米蛋白质含量快速检测[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 82-88, 175.
YIN K, LIN J M, ZHANG D J, et al. Rapid detection of rice protein content based on near-infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 82-88, 175.
- [15] 周雨帆, 李胜旺, 杨奎河, 等. 基于轻量级卷积神经网络的苹果表面缺陷检测方法[J]. 河北工业科技, 2021, 38(5): 388-394.
ZHOU Y F, LI S W, YANG K H, et al. Apple surface defect detection method based on lightweight convolutional neural network[J]. Hebei Industrial Technology, 2021, 38(5): 388-394.
- [16] 杨双艳, 杨紫刚, 张四伟, 等. 基于近红外光谱和 PSO-SVM 算法的烟叶自动分级方法[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(12): 141-144.
YANG S Y, YANG Z G, ZHANG S W, et al. Automatic tobacco grading method based on near infrared spectroscopy and PSO-SVM algorithm[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 141-144.
- [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] 王立扬, 张瑜, 沈群, 等. 基于改进型 LeNet-5 的苹果自动分级方法[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 105-110.
WANG L Y, ZHANG Y, SHEN Q, et al. Automatic apple classification method based on improved LeNet-5[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 105-110.
- [19] 杨志锐, 郑宏, 郭中原, 等. 基于网中网卷积神经网络的红枣缺陷检测[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 140-145, 181.
YANG Z R, ZHENG H, GUO Z Y, et al. Defect detection of jujube based on convolutional neural network of net in net[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 140-145, 181.
- [20] 吴静珠, 李晓琪, 林珑, 等. 基于 AlexNet 卷积神经网络的大米产地高光谱快速判别[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 282-288.
WU J Z, LI X Q, LIN L, et al. Rapid hyperspectral discrimination of rice production areas based on AlexNet convolutional neural network[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 282-288.

(上接第 35 页)

- [19] 李茂琳, 谭军, 王红英, 等. 一株产胶原蛋白酶细菌的鉴定及产酶条件优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 118-126.
LI M L, TAN J, WANG H Y, et al. Identification of a collagenase-producing bacterium and optimization of enzyme producing conditions[J]. Science and Technolgr of Food Industry, 2019, 40(14): 118-126.
- [20] 范海延, 梁胜贤, 王栋, 等. 利用甘薯淀粉生产废水培养侧孢短芽孢杆菌的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2015(3): 352-356.
FAN H Y, LIANG S X, WANG D, et al. Production of *Brevibacillus laterosporus* using sweet potato processing wastewater[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015(3): 352-356.
- [21] 杨旭, 武天宁, 荀明强, 等. 1 株地衣芽孢杆菌发酵条件研究及其微生物制剂的制备[J]. 饲料研究, 2022, 45(24): 91-96.
YANG X, WU T N, XUN M Q, et al. Study on fermentation conditions of *Bacillus licheniformis* and preparation of microbial agents[J]. Feed Research, 2022, 45(24): 91-96.
- [22] 刘蒲临, 程德勇, 缪礼鸿. 产几丁质酶侧孢短芽孢杆菌的筛选及其酶学性质研究[J]. 生物技术通报, 2016, 32(6): 174-180.
LIU P L, CHENG D Y, MIAO L H. Isolation of a chitinase-producing strain *Brevibacillus laterosporus* and its enzymatic properties[J]. Biotechnology Bulletin, 2016, 32(6): 174-180.
- [23] 卜雯丽, 李凤伟, 王杰, 等. 出芽短梗霉固态发酵啤酒糟制备阿魏酰低聚糖和膳食纤维工艺研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(5): 38-43.
BU W L, LI Y W, WANG J, et al. Preparation process of feruloyl oligosaccharides and dietary fiber from brewer's spent grain by solid-state fermentation of *Aureobasidium pullulans* [J]. China Brewing, 2019, 38(5): 38-43.