

基于光谱技术的双孢蘑菇新鲜度量化的检测技术研究

马 溟^{1,2}, 张 开¹, 姬江涛^{1,2*}, 金 鑫^{1,2}, 赵凯旋^{1,2}

1. 河南科技大学农业装备工程学院, 河南 洛阳 471003

2. 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003

摘 要 双孢蘑菇质地柔嫩、营养丰富,具有很好的降血压、降血脂、消炎护肝等多种保健价值,其新鲜度是反映内外部品质的重要指标之一。目前双孢蘑菇新鲜度鉴别大多依据其外观品质变化(褐变),缺乏精准的量化评价指标与方法,因此提出了以贮藏天数为新鲜度检测的量化指标,并利用近红外光谱技术对双孢蘑菇新鲜度进行检测分析。依据存储天数不同,将双孢蘑菇样本分为1~5组,每组40个样本,依次采集每组双孢蘑菇的近红外光谱数据。针对采集的原始光谱数据,首先选用卷积平滑滤波(SG)与多元散射校正(MSC)消除原始光谱噪声、基线平移以及光散射的影响,并选取399.81~999.81 nm的光谱波段作为数据处理范围;然后分别使用主成分分析(PCA)和连续投影算法(SPA)进行光谱降维和特征波长选择,继而建立极限学习机(ELM)分类模型;同时考虑到ELM模型中初始值对分类准确率影响较大,分别选用粒子群优化算法(PSO)、海鸥优化算法(SOA)对ELM中初始权值及阈值进行寻优,形成PSO-ELM,SOA-ELM优化组合分类模型;最后分别将全光谱、提取主成分以及所选的特征波长{556.87, 445.51, 481.15, 885.10, 802.25, 720.90, 861.34, 909.79, 924.44, 873.17 nm}输入到分类模型中,建立不同输入、不同分类模型的双孢菇新鲜度检测模型。最终试验结果表明,当ELM为分类模型,以全光谱、主成分以及特征波长为输入时的预测精度分别为75%,95%,88%;以SPA优选特征波长作为输入的PSO-ELM、SOA-ELM分类模型训练集精度为96.25%,93.25%,预测集精度为92.5%,94%。可知,SPA波长选择算法可以有效降低光谱信息中存在的冗余信息,加快建模效率,同时海鸥优化算法能较好的优化ELM分类模型的初始参数,分类精度较ELM模型提高了6.8%,同时不产生过拟合现象。因此,利用光谱特征可以快速、准确无损的识别双孢蘑菇的新鲜度,研究结果为便携式双孢蘑菇新鲜度快速无损检测设备的开发提供了理论依据。

关键词 近红外光谱;双孢蘑菇;新鲜度;极限学习机;SOA-ELM

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)12-3740-07

引 言

双孢蘑菇富含蛋白质、氨基酸、多糖以及多种矿物质元素,备受广大消费者喜爱^[1-3]。双孢蘑菇的新鲜度是大多数消费者购买时考虑的重要因素。现有鉴别方式大多通过其外观品质特征对不同新鲜度的双孢蘑菇进行区分,作为贮藏、销售的依据。而低温恒湿环境下保存的双孢蘑菇在一定存储天数内其新鲜度很难通过其外部变化进行判断,因此亟需一种双孢蘑菇新鲜度量化的检测方法,对于其存储与销售具有重要指导意义。

近年来,基于光谱分析技术的双孢蘑菇营养成分检测、

保鲜以及硬度分析得到了广泛应用,刘燕德等^[4]使用拉曼光谱技术建立了不同成熟度的双孢蘑菇硬度无损检测模型,结果表明直径为3~5 cm的样本可预测性更佳,预测集精度达到89.6%。孟德梅等^[5]开展了双孢菇采后感官品质变化因素分析与保鲜技术研究,对双孢菇采后品质变化因素进行了系统概述。刘灿等^[6]使用原子发射光谱技术对不同成熟度的双孢蘑菇主要营养元素与矿物质进行了分析,发现直径在3 cm以下的双孢菇富含蛋白质以及矿物质元素,具有更高的营养价值。上述研究在鉴别双孢蘑菇内外部品质方面取得了一定的研究成果,但对于存储过程中双孢蘑菇新鲜度的量化检测研究仍有不足。

近红外光谱技术(near infrared reflectance spectroscopy,

收稿日期:2020-11-10,修订日期:2021-03-16

基金项目:国家重点研发计划政府间合作专项(2019YFE0125100-03),国家自然科学基金项目(61805073,51975186)资助

作者简介:马 溟,1985年生,河南科技大学农业装备工程学院讲师 e-mail: mahao@haust.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: jjt0907@163.com

NRS)具有分析速度快、效率高、测试重现性好、适用范围广、对样品无损伤等优点,该技术在农产品及食品检测中已得到广泛应用^[7-8]。王文秀等^[9]利用近红外光谱技术对猪肉新鲜度进行检测,分别使用模拟退火算法和粒子群优化算法作岭参数寻优,进行岭回归运算,相关系数分别为 98.19% 和 97.81%。周娇娇等^[10]使用近红外光谱技术对团头鲂新鲜度进行新鲜度检测,在使用竞争性自适应重加权算法提取特征波长的基础上采用多元线性回归分类方法,识别精度最高达到 93.88%。段宇飞等^[11]基于近红外光谱技术,使用非线性降维局部线性嵌入算法对原始光谱降维,建立了 LLE-SVM 鸡蛋新鲜度检测模型,训练集检测精度达到 91.1%。以上研究表明近红外光谱技术在农产品新鲜度检测方面具有重要研究价值。目前,关于近红外光谱分析技术在双孢蘑菇新鲜度量化检测中的应用尚未见报道。

本文提出一种基于近红外光谱技术的双孢蘑菇新鲜度量化检测方法。以双孢蘑菇贮藏天数作为其新鲜度量化评价指标,对预处理后的原始光谱分别使用主成分分析以及连续投影算法完成数据降维,基于极限学习机分类器结合不同优化算法构建预测模型,以期能在保证预测精度的同时有效提高检测速度。

1 实验部分

1.1 材料及数据采集

实验选用当天采摘的新鲜 A 类双孢菇,2020 年 7 月购于洛阳市奥吉特食用菌工厂并采用分层、分块包装且恒温箱内低温保存快速运至实验室。选择海洋光学 4000+ 近红外光纤光谱仪,有效光谱范围为 345.89~1 040.49 nm,光谱间隔为 0.21 nm,共计 3 648 个波段。

筛选出 200 个菇盖直径 4 cm 且无表面应力损伤、菇体开裂的样本,在洁净的工作台处理后,将样本分为 1~5 组,每组 40 个样本。各组实验样本模拟超市保存条件,放置在 0 °C 恒温恒湿试验箱中贮藏,每天依次从 1~5 组恒温箱内取出 40 个双孢蘑菇样本,使用近红外光谱仪进行光谱数据采集,每次实验前光谱仪预热 20 min,单个样品数据采集时间历时 30 s,实验历时 5 d。

1.2 光谱预处理

在近红外光谱信号采集过程中,受电源稳定状态、采集角度等因素影响,获得的光谱数据存在不同程度的噪声干扰。故选用 SG 平滑滤波与 MSC 校正的方式消除原始光谱噪声、基线平移以及光散射的影响。此外,光谱数据在采集初始与结束阶段,光谱波动较大,噪声明显,为避免这一影响,故选取 399.81~999.81 nm 作为数据处理范围,原始光谱及校正后的光谱如图 1 所示。

1.3 数据降维与分类器

算法流程如图 2 所示,首先使用连续投影算法对原光谱进行降维处理,优选最优光谱波段组合;然后将降维后的优选光谱组合输入到不同分类模型中,进行分类预测。利用分类准确率作为模型的评价指标,其定义如式(1)所示。

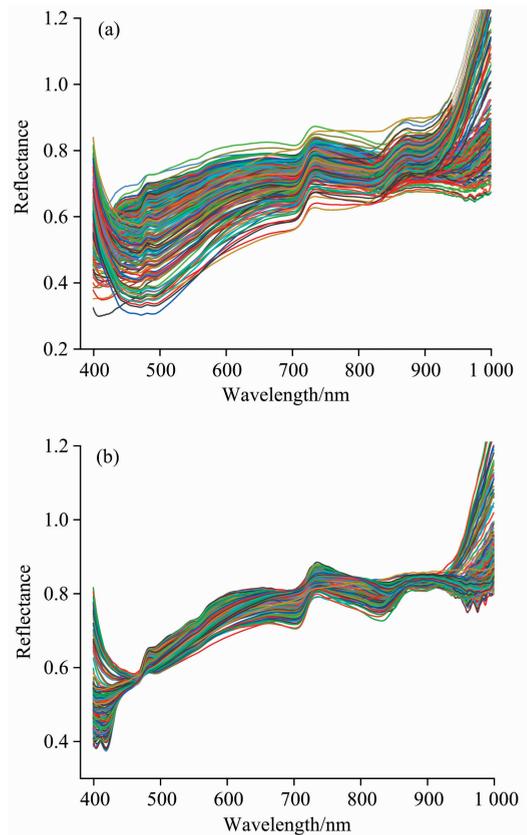


图 1 光谱预处理

(a): 原始光谱; (b): 平滑+多元散射校正

Fig. 1 Spectral pretreating

(a): Original spectra; (b): Smoothing+MSC

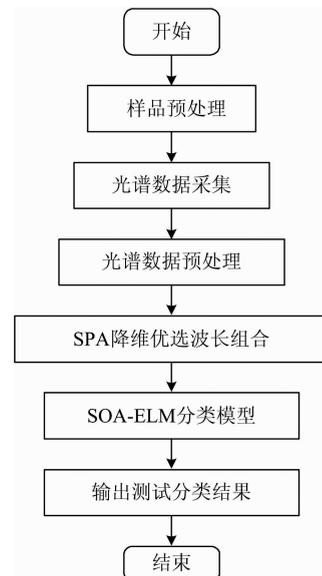


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of data processing

$$\text{Accuracy} = \sum_{i=1}^5 X_i / X \quad (1)$$

式(1)中, X 为测试集样本数量, X_i 为第 i 类识别分类正确

的样本数量。

1.3.1 数据降维算法

连续投影算法(SPA)是一种前向循环特征选择方法^[12],通过分析迭代向量的投影,使变量之间的共线性达到最小,最终优选出最优波长组合 M 及最佳波长变量数 N 。SPA 具体计算步骤如下:

(1)迭代开始前,设定循环次数 N ,在全光谱 $X_{m \times p}$ (m 个样本,每个样本有 p 个波长数据)下,任选一光谱波长不同样本数据记为列向量 x_i ,未选列向量记为集合

$$S\{i, 1 \leq i \leq p, i \notin \{k(0), k(1), \dots, k(n-1)\}\}$$

(2)逐个计算 X_i 在剩余列向量上投影

$$Px_i = x_i - (x_i^T x_{k(n-1)})x_{k(n-1)}(x_{k(n-1)}^T x_{k(n-1)})^{-1}, i \in S$$

(3)记录、提取最大投影向量的光谱波长

$$q(n) = \arg(\max(\|Px_i\|)), i \in S$$

(4)令: $X_i = Px_i, i \in S$;

(5)令 $i = i + 1$,如果 $i < N$,则返回继续循环计算;

(6)最后,提取出的特征波长变量集合为

$$M = \{X_{q(i)}; i = 1, 2, \dots, N - 1\}$$

连续投影算法在全波段下提取的特征波长,能够最大限度消除原始光谱数据矩阵中的冗余信息,建模过程中,能够显著提高模型计算的准确率、运算速度以及模型的稳定性。

1.3.2 分类器

极限学习机(ELM)算法最早由 Huang 等针对传统神经网络容易陷入局部最优解、参数设置多、训练时间长等固有缺点提出的一种单隐层前馈神经网络的神经网络算法^[13]。ELM 训练模型内的输入层与隐含层间的连接权值以及隐含层神经元阈值是随机生成的,其模型预测精度主要由隐含层节点个数决定,因此 ELM 具有极快的学习速度以及泛化性。但是在给定模型参数下,存在随机数值为 0 的情况,导致隐含层的输出矩阵不为满秩,进而使部分隐含层神经元节点失效,最终造成模型预测精度较低、稳定性较差的后果。

粒子群优化(PSO)是一种常用的寻优算法,是通过控制种群规模、速度、以及运动方向计算得到局部最优解,进而得到全局最优解的过程。

海鸥优化算法(SOA)是一种新颖的生物启发式元启发算法,其模仿自然界中海鸥的迁徙和攻击行为,采用仿生智能算法进行参数寻优,目前已广泛用于函数优化、约束优化等问题^[14]。SOA 有较好的寻优能力,能够为学习模型寻找最优的初始值,从而得到最优的 ELM 训练模型,SOA-ELM 算法流程如图 3 所示。

2 结果与讨论

为实现对双孢蘑菇新鲜度快速精准的检测,本研究分别采用主成分分析(PCA)和 SPA 特征波长选择的方式对原始光谱数据进行降维处理,最后通过对比分析模型找出最优的解决方案。

2.1 主成分分析

主成分分析是常用的一种数据压缩特征提取方法,其优势在于简化原始高维变量的同时能最大限度保留原始数据的

信息。采用主成分分析法对双孢蘑菇原始光谱数据进行降维分析,样品在主成分空间的分布如图 4 所示。

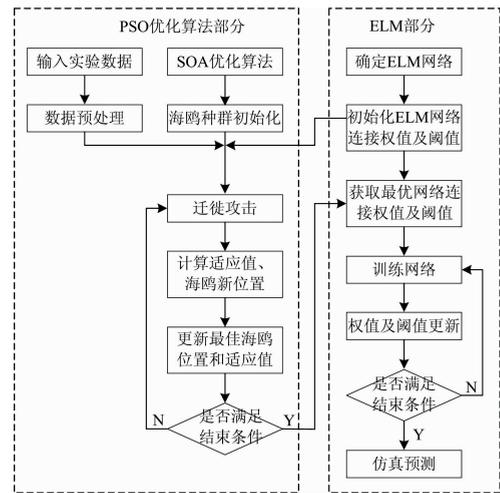


图 3 SOA 优化 ELM 算法流程图

Fig. 3 The flowchart of the ELM algorithm optimized with SOA

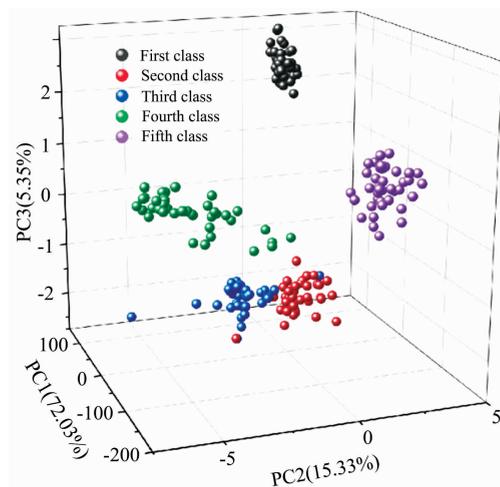


图 4 主成份分析结果

Fig. 4 Results of principal component analysis

从图中可以看出前三个主成分的贡献率分别为 72.03%, 15.33% 和 5.35%, 累计贡献率为 92.89%, 故可以认为三个主成分能够较好的代表原始光谱数据信息。此外,由散点图的分布可知,主成分分析法能有效区分样本的新鲜度,其中,第 1 天与第 5 天的聚合效果最好,区分度最高,这与第 1 天与第 5 天的样本差异性较大紧密相关。此外,由于样本本身差异的不明显及奇异值的存在导致第 2 天到第 4 天的样本出现个别样本重合,聚合效果相对较差,但主体部分仍有显著的区分度。故通过主成分分析结果可以看出,所选择样品具有明确的可分性,且效果较好。

2.2 SPA 特征波长选择

实验所用仪器为高分辨率近红外光谱分析仪,波长较多,共计 3 416 个波段,若将所有波段输入分类模型,波长间冗余信息繁杂,不仅输入量大,训练时间过长,而且精度

较低。SPA 算法是通过最小化变量间共线性来选择最优波长组合，若通过 SPA 特征提取的降维方式对原始光谱提取特征波长，则所提取的特征波长具有相互独立、互不影响的特点且优化波长组合能有效代表全光谱的数据特征。故选用 SPA 算法对原光谱进行降维处理，图 5 是采用 SPA 算法对预处理光谱提取的特征波长组合。

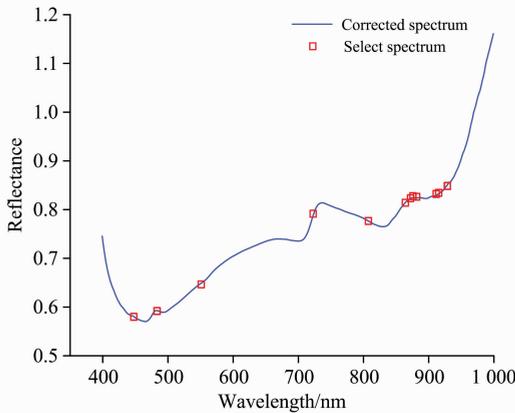


图 5 优选特征波长分布

Fig. 5 Preferred characteristic wavelength distribution

对所采集的 200 条光谱曲线，随机选择 160 个样本为训练集，40 个为测试集，以不同天数的双孢蘑菇为输出，根据测试集的内部交叉验证均方根误差值作为筛选波长组合的选择标准。从图 5 可以看出，SPA 算法提取最佳波长组合为： $\{556.87, 445.51, 481.15, 885.10, 802.25, 720.90, 861.34, 909.79, 905.58, 924.44, 873.17, 879.06\}$ nm，共计 12 个特征波长，RMSE 为 0.124 3，而近红外光谱仪在光谱采集过程中具有连续性的特点，相邻较近的波长具有一定的关联关系，因此可以选择相邻间隔较小波长组内，重要性较高的波长，作为该波段范围内最终选定波长。因此，最终选择特征波长为 $\{556.87, 445.51, 481.15, 885.10, 802.25, 720.90, 861.34, 909.79, 924.44, 873.17\}$ nm，共计 10 个波段，其重要性依次递减，特征数量占原始全光谱的 0.32%。此外，通过观察所选特征波长的分布可以看出，可见光波段范围内的特征波长数为 3，近红外短波波段内的特征波长数为 9，说明近红外短波波段对双孢菇新鲜度检测贡献值更大，并且特征波长选择多集中在 900 nm 处，这是因为特征波长在 910 nm 处对 C—H 键延伸具有吸收特性，说明双孢蘑菇贮藏过程中蛋白质在分解消耗。

2.3 分析模型对比

利用训练集 160 个样本的光谱数据以及天数进行分类，使用 SPA+SOA-ELM 算法建立双孢蘑菇新鲜度检测的分类模型，以分类的准确度作为评价准则。分别与全光谱+ELM、PCA+ELM、SPA+ELM 和 SPA+PSO-ELM 进行对比，考虑到 ELM 分类模型存在一定随机性，取 5 次运行结果的平均值作为最终预测精度，得到的测试集分类结果对比如图 6—图 10 所示。

为了比较不同预处理方式与分类算法的优劣，将模型参数设置和测试结果统计如表 1 所示。从表 1 可以看出，PCA

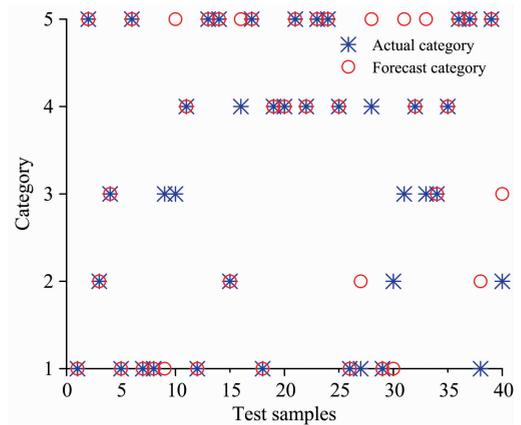


图 6 全光谱+ELM 检测结果

Fig. 6 Full spectroscopy and ELM detection results

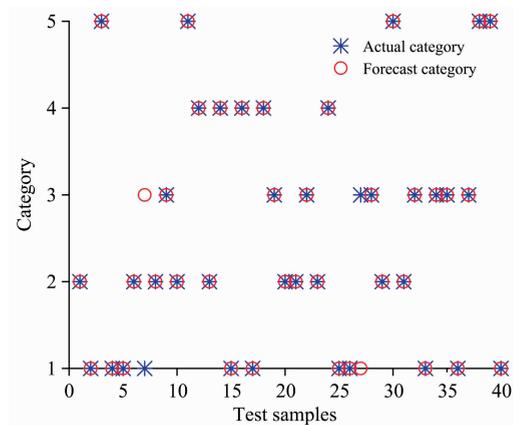


图 7 PCA+ELM 检测结果

Fig. 7 PCA+ELM detection results

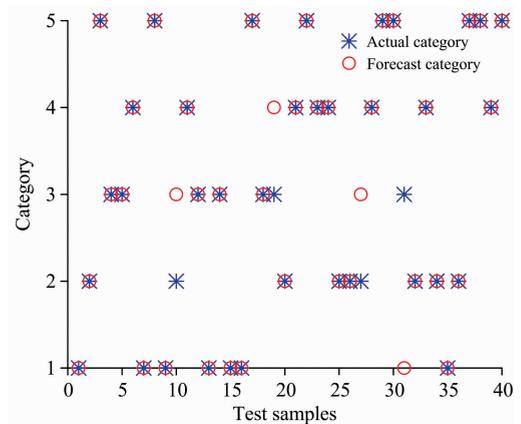


图 8 SPA+ELM 检测结果

Fig. 8 SPA+-ELM test results

+ELM 模型测试集结果最佳，分类准确率为 95%；以 SPA 选择特征为输入的 SOA+ELM、PSO+ELM 与 ELM 分类模型识别准确率分别为 94%，92.5% 和 88%；而全光谱+ELM 分类准确率最低为 75%。由此可知，通过使用 PCA 提取主成份或 SPA 算法提取特征波长作为训练集输入时，其测

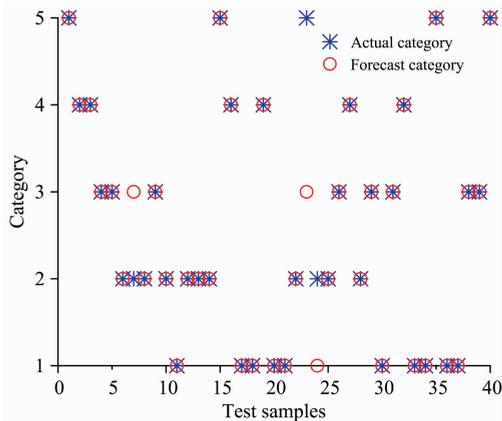


图 9 SPA+PSO-ELM 检测结果

Fig. 9 SPA+PSO-ELM test results

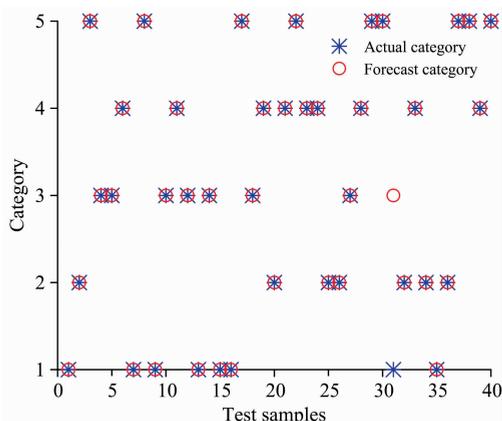


图 10 SPA+SOA-ELM 检测结果

Fig. 10 SPA+SOA-ELM test results

表 1 模型测试结果对比表

Table 1 Comparison results of the classification model testing

分类方法	神经元个数	输入	传递函数	训练集正确率 / %	测试集正确率 / %
ELM	10	全光谱	sig	73.75	75
ELM	10	PCA 主成份	sig	100	95
ELM	10	SPA 特征波长	sig	86.375	88
PSO-ELM	10	SPA 特征波长	sig	96.25	92.5
SOA-ELM	10	SPA 特征波长	sig	93.25	94

试集精度均远高于全光谱训练模型，这是由于通过对样品分类选取合适的特征，能有效降低样本特征的维度和冗余性，增强了变量与因变量的关系。

对于以 SPA 选择特征为输入的 SOA+ELM、PSO+ELM、ELM 算法来说，后两者模型相较于前者模型分别提高了 5.1% 和 6.8% 的识别精度，体现了元启发式算法具有较好的全局寻优能力，能够为 ELM 模型寻找较优的初始值。此外，也可以看出，SOA 优化后的模型测试精度略高于 PSO 优化模型，且 PSO 训练集准确度高于测试集精度，存在过拟合现象。由此可知，PSO 算法寻优过程依赖于参数设定，局部搜索能力较差、搜索精度不高，粒子在俯冲过程中可能错失全局最优解，而海鸥优化算法在全局搜索过程中，是根据当前最佳位置计算新位置、方向，并且在搜索过程中不断改变更新、寻找最佳位置和适应度值，表明 SOA 算法较优的鲁棒性。

由上述分析可知，在所有模型中，以 PCA+ELM 模型结果最佳，这是由于 PCA 提取主成份是通过构建全波段不同权重比例系数得出新特征的过程，能够最大限度保证原始光谱信息，同时去除冗余信息，但是以全光谱作为输入计算主成份过程计算量大、建模效率低，不利于便携式光谱仪的发展，而 SPA+SOA-ELM 模型输入仅为 10 个特征波长，建模速度快且精度较高，为研制新型便携式的光谱仪提供了理论依据。

3 结 论

(1) 分析特征波长分布，可见光波段内的特征波长数为 3，近红外短波段内特征波长数为 9，可知近红外短波区域的特征波长数量多于可见光区域，表明该处特征波长对双孢蘑菇新鲜度量化检测的贡献最大，也反映了双孢蘑菇贮藏过程中蛋白质成分变化较多。

(2) 开展了基于近红外光谱的双孢蘑菇新鲜度量化检测方法研究，提出以贮藏天数作为双孢蘑菇新鲜度量化评判的综合指标。基于 SG+MSC 方法对双孢蘑菇原始光谱预处理的基础上，分别使用 PCA 和 SPA 算法对原光谱数据进行降维处理，继而通过比较全光谱+ELM、PCA+ELM、SPA+ELM、SPA+PSO-ELM 和 SPA+SOA-ELM 模型可知，降维处理后的训练集和测试集精度均显著高于全光谱。

(3) 为了提高模型检测速度，基于统计学方法，探索了可见-近红外短波光谱预测双孢蘑菇新鲜度的有效方式，其中，SPA+SOA-ELM 在全光谱 3416 个波长下提取了 10 个有效波长，进而基于 SOA-ELM 建立了双孢蘑菇新鲜度检测模型，该模型训练集和测试集的正确率分别为 93.25% 和 94%，该结果与采用主成分分析法基本保持一致，但极大的减少了计算量。故 SPA+SOA-ELM 成功用于双孢蘑菇新鲜度的量化检测，为进一步开发快速、便携式及无损双孢蘑菇新鲜度量化检测仪器提供了理论依据。

References

[1] Al-Habib M N, Holliday J, Aladahmy M S, et al. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2018, 20(8): 749.
 [2] Burton K S, Frost C E, Atkey P T. International Journal of Food Science and Technology, 1987, 22: 599.
 [3] Braaksma A, Schaap D J. Postharvest Biology and Technology, 1996, 7(1-2): 119.

- [4] LIU Yan-de, XIE Qing-hua, WANG Hai-yang, et al(刘燕德, 谢庆华, 王海阳, 等). Acta Luminescens(发光学报), 2016, 37(9): 1135.
- [5] MENG De-mei, SHEN Lin, LU Jun, et al(孟德梅, 申琳, 陆军, 等). Food Science(食品科学), 2010, 31(15): 283.
- [6] LIU Can, SHENG Ji-ping, SHEN Lin(刘灿, 生吉萍, 申琳). Spectroscopy and Spectroscopic Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(10): 2820.
- [7] LI Jun-jie, ZHANG Ji, WANG Xiao-wei, et al(李俊杰, 张绩, 汪小伟, 等.). Food Research and Development(食品研究与开发), 2020, 41(20): 193.
- [8] JIN Wen-ling, CAO Nai-liang, ZHU Ming-dong, et al(金文玲, 曹乃亮, 朱明东, 等). China Optics(中国光学), 2020, 13(5): 1032.
- [9] WANG Wen-xiu, PENG Yan-kun, LIU Yuan-yuan, et al(王文秀, 彭彦昆, 刘媛媛, 等). Journal of Food Safety & Quality(食品安全检测学报), 2020, 40(1): 189.
- [10] ZHOU Jiao-jiao, WU Xiao-yang, CHEN Zhou, et al(周娇娇, 吴潇扬, 陈周, 等). Journal of Huazhong Agricultural University(华中农业大学学报), 2019, 38(4): 120.
- [11] WANG Qiao-hua, LI Xiao-ming, DUAN Yu-fei, et al(王巧华, 李小明, 段宇飞, 等). Food Science(食品科学), 2016, 37(22): 187.
- [12] ZHANG Jin-yuan, ZHANG De-xian, ZHANG Miao(张津源, 张德贤, 张苗). Jiangsu Agricultural Journal(江苏农业学报), 2019, 35(4): 960.
- [13] FENG Yu-ming, DONG Xiu-cheng, JIN Tao(冯禹铭, 董秀成, 金滔). Computer Application Research(计算机应用研究), 2019, 36(10): 3000.
- [14] Dhiman G, Kumar V. Knowledge-Based Systems, 2019, 165(FEB. 1): 169.

Quantitative Detection of Agaricus Bisporus Freshness Based on VIS-NIR Spectroscopy

MA Hao^{1, 2}, ZHANG Kai¹, JI Jiang-tao^{1, 2*}, JIN Xin^{1, 2}, ZHAO Kai-xuan^{1, 2}

1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Luoyang 471003, China

Abstract Agaricus bisporus is fragile and nutritious, which helps lower blood pressure, lowering blood lipids, reducing inflammation and protecting the liver. The freshness is one of the most important indicators to reflect the internal and external quality of Agaricus bisporus. At present, the freshness identification of Agaricus bisporus is mostly based on appearance quality (browning), and there is a lack of an accurate quantitative evaluation method. Therefore, in this research, a quantitative index for freshness detection was proposed based on storage days, which was used to analyze the freshness of Agaricus bisporus with VIS-NIR spectroscopy technology. According to the different storage days, the samples of Agaricus bisporus were divided into 1 to 5 groups, each with 40 samples, and the near-infrared spectral data of each group was collected in turn using a fiber optic spectrometer. For the collected raw spectral data, firstly, the SG and MSC transform methods were selected to correct and eliminate the effects of spectral noise, baseline shift and light scattering. Moreover, the spectral band ranging from 399.81 to 999.81 nm were selected as the data processing range simultaneously. Then the method of principal components analysis (PCA) and successive projections algorithm (SPA) were respectively used to reduce the spectral dimensionalities and select the characteristic wavelengths. And the Extreme Learning Machine (ELM) classifier was established based on the spectral features. Since the initial parameters have a greater impact on the classification accuracy of the ELM model, the Particle Swarm Optimization (PSO) and Seagull Optimization Algorithm (SOA) was used to optimize the initial values of weight and threshold for ELM classifier to establish PSO-ELM and SOA-ELM classifiers. Finally, the full spectrum, the extracted principal components and the selected characteristic wavelengths {556.87, 445.51, 481.15, 885.10, 802.25, 720.90, 861.34, 909.79, 924.44, 873.17} nm were input into the classification model to establish the freshness detection model of Pleurotus ostreatus with different inputs and different classification models. The final test results show that when the ELM is the classification model, the prediction accuracy with full spectrum, principal component and characteristic wavelength as input is 75%, 95% and 88% respectively; the training set accuracy of PSO-ELM and SOA-ELM classification model with SPA preferred characteristic wavelength as input is 96.25%, 93.25%, and the accuracy of prediction set is 92.5%, 94%. It can be seen that the method of SPA was effective to reduce the redundant information of VIS-NIR spectra and accelerate the modeling. At the same time, the SOA was better to optimize the initial parameters of the ELM classifier and significantly improve the classification accuracy, and the classification accuracy is 6.8% higher than that of the ELM model. Therefore, the freshness of Agaricus bisporus can be

identified quickly and accurately by using spectral features. The research results provide a theoretical basis for the development of portable equipment for rapid non-destructive testing of the freshness of *Agaricus bisporus*.

Keywords Near infrared; *Agaricus bisporus*; Freshness; Extreme Learning Machine; SOA-ELM

(Received Nov. 10, 2020; accepted Mar. 16, 2021)

* Corresponding author

关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：本刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站(<http://www.gpxygpx.com>)查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，本刊不再受理。交费后本刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070，62182998

电子邮箱：chngpxygpx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日