

基于高光谱成像技术的板栗产地溯源

孙晓荣^{1,2}, 张晨光^{1,2*}, 刘翠玲^{1,2}, 吴静珠^{1,2}, 张善哲^{1,2}

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 北京工商大学,
北京市食品安全大数据技术重点实验室, 北京 100048)

摘要: **目的** 建立了一种基于高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)技术的板栗产地溯源模型。**方法** 采集怀柔、迁西和沂蒙短枝 3 种不同产地板栗的高光谱图像, 提取感兴趣区域, 建立支持向量机(support vector machine, SVM)板栗产地溯源模型, 通过比较分析不同预处理方法对建模结果的影响, 选出最佳的预处理组合方法, 并使用遗传算法(genetic algorithm, GA)对模型进一步优化。**结果** 实验结果表明, 经多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)和移动窗口平滑法(moving window smoothing, MWS)组合预处理后的数据所建立的溯源模型预测性能最好, 分类的预测精确率达到了 95%以上, 模型整体的预测准确率为 96.61%。经 GA 对 SVM 的参数 *C* 进行优化, 优化后的模型对怀柔板栗和沂蒙短枝板栗的预测精确率达到了 100%, 模型整体的准确率提高到了 98.31%。**结论** 本研究基于高光谱成像技术建立了一种板栗产地溯源模型, 经预处理和参数优化后, 所建立的模型具有较好的预测性能, 为板栗的产地溯源提供了一种新方法。

关键词: 高光谱成像; 支持向量机; 遗传算法; 板栗; 产地溯源

Origin tracing of *Castanea mollissima* based on hyperspectral imaging technology

SUN Xiao-Rong^{1,2}, ZHANG Chen-Guang^{1,2*}, LIU Cui-Ling^{1,2}, WU Jing-Zhu^{1,2}, ZHANG Shan-Zhe^{1,2}

(1. School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2. Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: Objective To establish a model of *Castanea mollissima* origin tracing based on hyperspectral imaging (HSI) technology. **Methods** Hyperspectral images of 3 kinds of different origin *Castanea mollissima* from Huairou, Qianxi and Yimeng were collected, region of interest was extracted, and support vector machine (SVM) tracing model of *Castanea mollissima* origin was established. By comparing and analyzing the influence of different pretreatment methods on the modeling results, the best pretreatment combination method was selected, and the genetic algorithm (GA) was used to further optimize the model. **Results** The experimental results showed that the traceability model established by the combination of multiplicative scatter correction (MSC) and moving window smoothing (MWS) had the best prediction performance. The prediction accuracy of classification reached more than

基金项目: 北京市自然科学基金项目(4222043)、2021 年教育部高教司产学合作协同育人项目(202102341023)、2022 年北京工商大学研究生教育教学改革专项(20220613)

Fund: Supported by the Beijing Natural Science Foundation Project (4222043), the 2021 Production University Cooperation Collaborative Education Project of the Department of Higher Education of the Ministry of Education (202102341023), and the 2022 Beijing Technology and Business University Postgraduate Education and Teaching Reform Project (20220613)

*通信作者: 张晨光, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测技术。E-mail: 1102622879@qq.com

*Corresponding author: ZHANG Chen-Guang, Master Degree, Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China. E-mail: 1102622879@qq.com

95%, and the overall accuracy of the model was 96.61%. The GA was used to optimize the parameter C of SVM, and the prediction accuracy of the optimized model reached 100%, and the overall accuracy of the model increased to 98.31%. **Conclusion** In this study, based on hyperspectral imaging technology, a *Castanea mollissima* origin tracing model is established. After preprocessing and parameter optimization, the established model has better prediction performance, which provides a new method for the origin tracing of *Castanea mollissima*.

KEY WORDS: hyperspectral imaging; support vector machine; genetic algorithm; *Castanea mollissima*; origin tracing

0 引言

板栗是我国著名的“干果之王”，其果仁富含多种微量元素和营养物质。板栗不仅是我国传统的农副产品，更是重要的经济作物，我国的板栗产地众多，不同产地的板栗口感、营养价值以及品质均存在差异，同时其储存条件、加工特性也存在差异。由于带壳板栗的颜色、形状、大小等外观特征的差异化小，采用肉眼等传统的方法进行产地鉴别的准确性较低，且受鉴别工作人员个人经验的影响，具有较强的主观性^[1-4]。除通过肉眼人工鉴别产地之外，目前常用的板栗产地溯源方法还有稳定同位素法和近红外光谱法，基于稳定同位素的产地溯源需要将板栗切碎后取样检测，检测速度较慢。而近红外光谱法虽具有快速、无损检测的特点，但受到其光谱范围的限制，所含信息量较小^[5-6]。而以品质较差、价格较低的某些产地的板栗，掺假或者冒充迁西、沂蒙等知名产地的板栗进行销售的事件屡见不鲜，因此建立一种可以快速、无损、准确地实现板栗产地溯源的方法非常必要。

光谱检测技术具有无损、耗时短、成本低、可靠性高、绿色环保等特点，近年来广泛应用在食品检测领域。高光谱的波长范围为 200~2500 nm，分辨率可达 2~3 nm，具有波段多、通道连续等特点。通过光谱仪，可使待测样本在超多光谱频段中连续成像，从而同时获取样本的图像信息和光谱信息。由于其兼具光谱信息及图像信息，不仅可以实现待测样本的定性、定量分析，同时还能对其进行遥感定位分析，已经被广泛应用于众多学科^[7-12]。

目前，应用高光谱成像技术实现农产品产地的区分和追溯在国内已有较多研究^[13-16]。罗浩东等^[17]采用高光谱成像技术对 5 种东北大米和 5 种非东北大米进行了溯源研究，将样本区分为东北大米、江苏小町米、河北小町米、安徽小町米、江苏长粒香和浙江圆粒香，使用主成分分析法进行降维后，建立支持向量机(support vector machine, SVM)大米溯源模型，模型的预测准确率为 79%。艾施荣等^[18]基于高光谱成像技术实现了庐山云雾茶的产地鉴别，通过主成分分析法获取 4 种不同产地云雾茶的特征波长并提取纹理特征，建立误差反向传播(back propagation, BP)神经网络模型，识别率为 95%。YIN 等^[19]采用光谱范围在 874~1734 nm 的高光谱成像系统对不同

产地的枸杞进行了产地识别研究，通过提取不同产地枸杞样本的光谱特征，分别基于全谱和特征波长建立极限学习机(extreme learning machine, ELM)判别分析模型，判别准确率能达到 90%以上。高光谱成像技术虽然已经广泛的应用于农产品产地溯源，但对于板栗的产地溯源研究仍较少^[20]。

鉴于此，本研究提出基于高光谱成像技术建立板栗产地溯源模型，采集 3 种产地的板栗高光谱，提取感兴趣区域，对比 8 种不同光谱预处理组合算法，结合 SVM 算法建立模型，并使用遗传算法(genetic algorithm, GA)进一步优化参数，提升模型整体预测能力和稳健性，实现了对怀柔、迁西和沂蒙 3 个品种板栗的产地溯源，有助于对市场中的板栗产地进行快速、准确地判断。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验选用 3 种市场上常见的来自不同产地的完整饱满的新鲜板栗样本共 300 粒，其中怀柔板栗、迁西板栗和沂蒙短枝板栗各 100 粒。

采集板栗高光谱的设备选用芬兰 SPECIM 公司的 SisuCHEMA-SWIR 高光谱成像仪，如图 1 所示。仪器参数设置：分辨率 3.45 nm，采集光谱波长范围 968~2575 nm，采集高光谱图像维度 640 (pixels)×972 (line)×224 (band)。

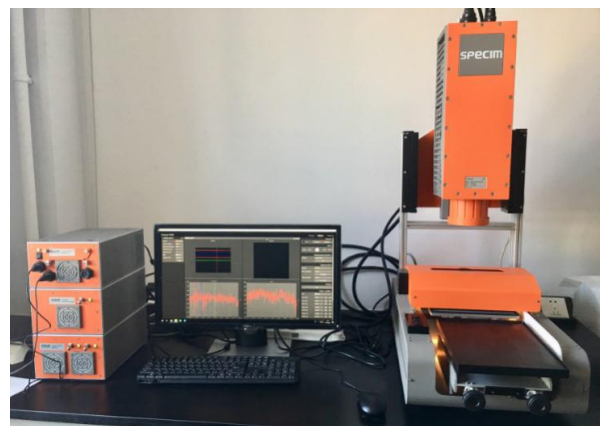


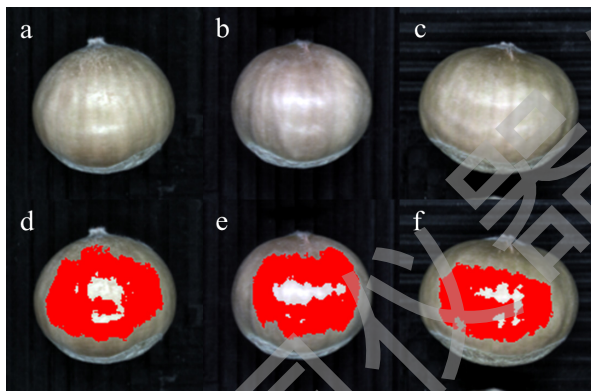
图 1 SisuCHEMA-SWIR 高光谱成像仪
Fig.1 SisuCHEMA-SWIR hyperspectral imager

1.2 高光谱数据采集

仪器预热 30 min 后, 每次将 10 粒板栗置于载物台, 调整载物台的距离以及镜头与板栗样本的距离, 确保所有样本都在镜头内, 调整仪器参数, 确认板栗的成像情况良好后, 获取板栗高光谱图像。采集系统应用 Lumo-scanner 软件进行仪器参数设计及采集过程控制^[21]。

1.3 感兴趣区域的提取

经过高光谱成像系统采集板栗的高光谱图像后, 采用 ENVI4.8 软件对板栗样本的图像进行校正和光谱特征进行提取^[22]。对单个板栗图像手动选取若干像素点后, 由软件根据区域增长算法, 将手动选取的像素点作为初始种子集, 将这些点的频谱作为阈值, 自动搜索种子集附近的符合阈值条件的新像素点, 并将这些点加入种子集, 继续搜索, 直至没有符合要求的新点, 生成感兴趣区域, 并将选中的感兴趣区域内所有像素点的平均光谱作为该样本的光谱数据, 重复操作, 得到 3 种不同产地板栗的高光谱数据, 共计 300 份。3 种不同产地板栗的高光谱图像和感兴趣区域如图 2 所示。



注: a 为怀柔板栗; b 为迁西板栗; c 为沂蒙短枝板栗;
d-f 分别为对应的感兴趣区域。

图 2 不同产地板栗高光谱图像和感兴趣区域

Fig.2 Hyperspectral images and areas of interest of *Castanea mollissima* from different origins

1.4 建模算法

SVM 是一种有监督的分类算法, 通过建立分类决策面, 将训练样本展开分类使其间隔最大化。SVM 在处理小样本和高维度数据上具有优势, 利用核函数将数据映射到高维空间, 使其尽可能的线性可分^[23-25]。

混淆矩阵(confusion matrix)是一种可视化工具, 通常用于比较分类结果和实际测量值, 可以把预测值和实际值显示在一个混淆矩阵图中, 也可以通过精准率和准确率对分类结果进行描述。精准率表示在模型预测为正类的样本中, 实际为正类的样本所占的比例, 用于衡量模型预测为正类的准确性, 高精确率表示模型在预测为正类的样本中

有较低的误判率; 准确率则表示模型预测正确的样本占所有样本的比例, 用于衡量模型整体分类的准确性, 高准确率表示模型对于所有样本的分类都有较高的准确性。

1.5 数据处理

数据处理与分析、模型建立均在 Python3.9 环境下完成, 绘图采用 Origin 2022 软件完成。

2 结果与分析

2.1 异常值处理

样本表面的不平整可能会引起散射现象的发生, 进而影响感兴趣区域的选取, 导致真实的光谱信息和采集得到的信息存在一定误差, 应用 3sigma 准则对板栗高光谱数据中误差较大的异常值进行剔除。3 种产地的板栗样本分别剔除了 3 个、2 个和 4 个样本, 剩余 291 个样本。剔除异常值后的高光谱图像和平均光谱图像如图 3、4 所示。

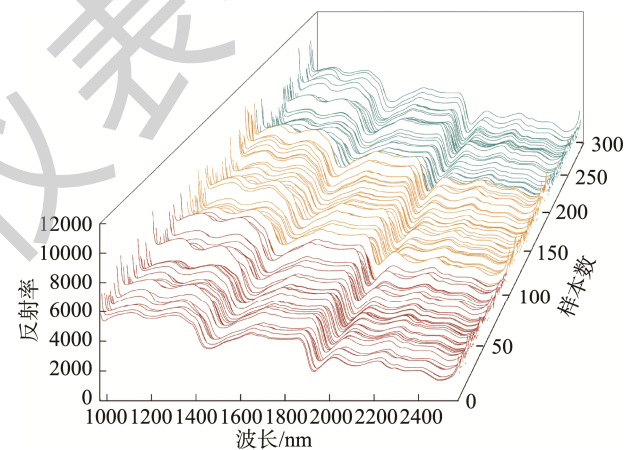


图 3 板栗高光谱曲线图

Fig.3 Hyperspectral graphs of *Castanea mollissima*

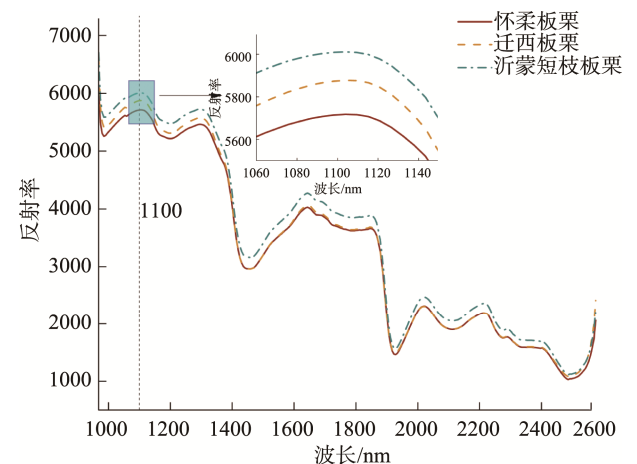


图 4 板栗平均高光谱曲线图

Fig.4 Average hyperspectral graphs of *Castanea mollissima*

观察图 4 可以发现在 1100、1300、1600、2000 和 2200 nm 波长范围附近,不同产地板栗的高光谱图均存在特征峰,且 3 种产地板栗的谱线变化趋势一致,特征峰差异较为明显,说明实现不同产地的板栗溯源存在较高的可能性。

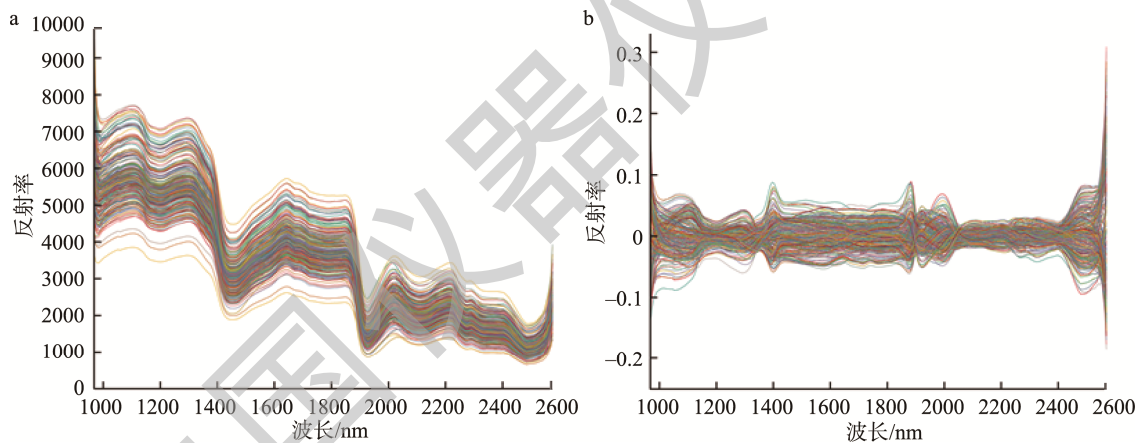
2.2 数据集划分

将剩余的 291 份板栗样本数据按分层采样的方式划分为训练集和测试集,划分比例为 4:1,即 232 份样本作为训练集,剩余 59 份样本作为测试集^[26-28]。

2.3 数据预处理

板栗的原始光谱图像如图 5a 所示,观察图像发现,原始高光谱数据存在谱峰堆叠、谱区复杂的问题,可能会影响后续的分析,因此分别选用归一化法(normalization)、多元散射校正法(multiplicative scatter correction, MSC)、移动窗口平滑法(moving window smoothing, MWS)和卷积平滑法 Savitzky-Golay (S-G)等 4 种预处理方法以及 4 种上述预处理方法的组合策略,来消除基线漂移、光程变换、光散射等因素的影响^[29-31]。

对 8 种预处理方法的数据建立 SVM 产地溯源模型,



注: a 为原始光谱; b 为标准化处理后的 MSC+MWS 组合预处理后的光谱。

图 5 板栗光谱图

Fig.5 Spectral image of *Castanea mollissima*

表 1 预处理结果

Table 1 Pretreatment result

序号	预处理方法	精确率/%			准确率/%	
		怀柔板栗	迁西板栗	沂蒙短枝	训练集	预测集
1	MSC	76	75	72	75.00	74.58
2	Normalization	100	46	28	47.85	38.98
3	S-G	51	0	68	48.71	57.63
4	MWS	51	0	68	55.17	57.63
5	MSC+S-G	87	100	100	96.12	94.92
6	MSC+MWS	95	100	95	99.57	96.61
7	Normalization+S-G	50	51	0	57.76	50.85
8	Normalization+MWS	54	43	0	40.95	45.76

SVM 的参数 C 设为默认值 1, 模型结果如表 1 所示。对比不同预处理方法的精确率和准确率发现, MSC+MWS 的组合预处理效果最好(MWS 的窗口大小设置为 15), 建立的板栗产地溯源模型对于任一板栗产地判断正确率达到了 95%以上, 预测结果的可信度较高, 模型总体预测准确率为 96.61%; S-G、MWS 和 Normalization+MWS 的模型预测集准确率明显高于训练集, 说明出现了不同程度的过拟合现象。MSC+MWS 的预处理结果如图 5b 所示, 对比图 5a、b 发现, 经过组合处理后的光谱基线漂移等现象得到明显抑制, 整体谱线更为集中。

2.4 产地溯源模型

GA 是一种模仿生物进化过程的优化算法^[32], 其主要任务和目的是通过选择、交叉和变异操作产生能够充分体现出解空间中解的优良新个体, 不断迭代直至收敛或达到最优解, 从而提高算法的效率并避免早熟收敛现象的产生。目前, GA 已经广泛应用于机器学习、函数优化、自动控制、模式识别、图像处理等众多领域。本研究采用 GA-SVM 技术路线, 使用 GA 算法进一步优化模型参数 C , 提升模型的预测准确率, 针对不同预处理方法的优化结果如表 2 所示。

表 2 参数优化结果
Table 2 Parameter optimization result

序号	预处理方法	C	精确率/%			准确率/%	
			怀柔板栗	迁西板栗	沂蒙短枝	训练集	预测集
1	MSC	9.81	82	90	88	96.12	86.44
2	Normalization	19.87	59	60	53	60.78	57.63
3	S-G	0.74	79	94	78	61.63	72.88
4	MWS	0.77	76	70	68	67.67	71.19
5	MSC+S-G	13.82	95	100	100	99.57	98.31
6	MSC+MWS	13.55	100	95	100	100	98.31
7	Normalization+S-G	6.11	63	76	100	71.55	71.18
8	Normalization+MWS	9.78	54	86	0	67.67	66.10

由表 2 可知, 经过 GA 算法优化后, 不同预处理方法所建立的模型的精确率和准确率均有较为明显的提升。部分数据集的过拟合现象经过优化后, 得到了一定的改善。当 $C=13.55$ 时, 经 MSC+MWS 组合处理后的模型预测准确率从 96.61% 提高为 98.31%, 对怀柔板栗和沂蒙短枝板栗的识别准确率均为 100%, 分类得到的混淆矩阵如图 6 所示, 研究表明, 高光谱成像技术成功实现了对来自怀柔、迁西和沂蒙 3 种不同产地的板栗的鉴别, 为板栗的产地溯源提供了一种新的方法。

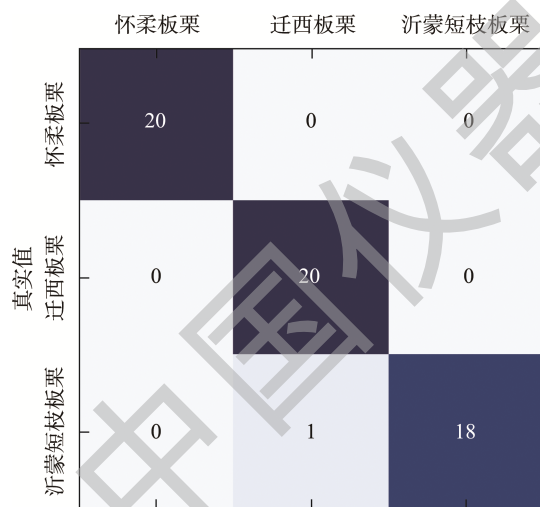


图 6 混淆矩阵图

Fig.6 Confusion matrix graph

3 结论

本研究利用高光谱成像技术采集了 3 种产地板栗的光谱数据, 建立了板栗产地溯源 SVM 模型, 通过比较不同预处理方法, 确定了 MSC+MWS 的组合为最佳的预处理方法, 模型预测准确率为 96.61%。针对溯源模型, 使用优化算法对模型参数 C 进一步优化, 当 C 取 13.55 时, GA-SVM 模型的训练集准确率达到 100%, 预测集准确

率达到了 98.31%, 模型分类的可信度得到了进一步提升, 实现了对于 3 种不同产地板栗的准确鉴别。目前, 应用高光谱成像技术对板栗产地溯源的研究仍较少, 但其在产地溯源的研究和应用已较为成熟, 在水稻产地溯源的研究中, 基于高光谱成像技术, 成功区分了外部表征差异不明显的东北和非东北 10 个产地水稻样品^[33]。在对 8 个产地椴子样品的高光谱图像, 使用多种预处理方法进行降噪处理后, 成功建立了线性 SVM 产地识别模型, 准确率达到 100%^[34]。同时, 应用高光谱成像技术, 不仅能准确实现产地溯源, 还能对年份进行鉴别, 所建立的玉米种子产地和年份的鉴别模型, 其训练集和测试集精度分别达到了 99.11% 和 98.39%^[35]。今后可以增加模型中板栗数据的品类, 以实现对市场主要流通的板栗产地快速、可靠地溯源和分类。

参考文献

- 董元. 基于高光谱的小米产地溯源模型研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
DONG Y. A study on the traceability model of millet origin based on hyperspectral analysis [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- 王植, 贾劲松, 李红, 等. 基于高光谱遥感对板栗品质预测的实际意义及可行性分析[J]. 辽宁林业科技, 2009, (4): 47-49, 60.
WANG Z, JIA JS, LI H, et al. Practical significance and feasibility analysis of predicting chestnut quality based on hyperspectral remote sensing [J]. Liaoning For Sci Technol, 2009, (4): 47-49, 60.
- MASSANTINI R, MOSCETTI R, FRANGIPANE MT. Evaluating progress of chestnut quality: A review of recent developments [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 113: 1062.
- 李勇, 周文化. 板栗全粉对鲜湿面品质影响及主成分分析[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 152-157.
LI Y, ZHOU WH. The effect of whole chestnut powder on the quality of fresh and wet noodles and principal component analysis [J]. Ciencia Technol Alime, 2019, 44(8): 152-157.
- 胡嘉琪. 近红外漫反射法快速测定板栗的品质[D]. 北京: 北京林业大

- 学, 2019.
- HU JQ. Rapid determination of chestnut quality by near infrared diffuse reflectance method [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [6] 邓诗意, 殷萍, 张强, 等. 基于稳定同位素和矿物元素的板栗产地判别分析[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 351-359.
- DENG SY, YIN P, ZHANG Q, *et al.* Discriminant analysis of chestnut production areas based on stable isotopes and mineral elements [J]. Food Sci, 2023, 44(12): 351-359.
- [7] 孙艺博. 基于高光谱图像技术的柑橘黄龙病诊断方法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- SUN YB. Study on diagnosis method of citrus greening disease disease of citrus based on hyperspectral image technology [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020.
- [8] 吉海彦, 任占奇, 饶震红. 基于高光谱成像技术的不同产地小米判别分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(7): 2271-2277.
- JI HY, REN ZQ, RAO ZH. Discriminant analysis of millet from different regions based on hyperspectral imaging technology [J]. Spectrosc Spect Anal, 2019, 39(7): 2271-2277.
- [9] MA J, SUN DW, PU HB, *et al.* Advanced techniques for hyperspectral imaging in the food industry: Principles and recent applications ann [J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2019, 10: 197-220.
- [10] FARAHMAND B, JITENDRA P, CHYNGYZ E, *et al.* Early detection of chilling injury in green bell peppers by hyperspectral imaging and chemometrics [J]. Postharvest Biol Technol, 2020, 162: 111100.
- [11] DU ZJ, ZENG XQ, LI XX. Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables [J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 99: 131-141.
- [12] SAJAD S, RAZIEH P, MOHAMMAD HR, *et al.* Early detection of excess nitrogen consumption in cucumber plants using hyperspectral imaging based on hybrid neural networks and the imperialist competitive algorithm [J]. Agronomy-Basel, 2021, 11(3): 575.
- [13] 卢旭恒, 蒙庆华, 唐柳, 等. 高光谱成像在农产品疾病以及农药残留检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4566-4574.
- LU XH, MENG QH, TANG L, *et al.* Application of hyperspectral imaging in the detection of agricultural product diseases and pesticide residues [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(11): 4566-4574.
- [14] 丁玲玲. 基于近红外高光谱图像技术对板栗果实的无损检测与品质鉴定[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- DING LL. Non destructive detection and quality identification of chestnut fruits based on near-infrared hyperspectral image technology [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [15] 卢诗扬, 张雷蕾, 潘家荣, 等. 特色农产品产地溯源技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(14): 4849-4855.
- LU SY, ZHANG LL, PAN JR, *et al.* Research progress on traceability technology of characteristic agricultural products origin [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(14): 4849-4855.
- [16] 摆小琴, 张娅俐, 洪晶, 等. 坚果品质检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8737-8744.
- BAI XQ, ZHANG YL, HONG J, *et al.* Research progress in methods for detecting nut quality [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(22): 8737-8744.
- [17] 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.
- LUO HD, LIU CL, SUN XR, *et al.* Research on rice traceability based on hyperspectral imaging technology [J]. China Brew, 2021, 40(4): 183-186.
- [18] 艾施荣, 吴瑞梅, 吴彦红, 等. 利用高光谱图像技术鉴别庐山云雾茶产地[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(2): 428-433.
- AI SY, WU RM, WU YH, *et al.* Using hyperspectral image technology to identify the origin of Lushan Yunwu tea [J]. J Jiangxi Agric Univ, 2014, 36(2): 428-433.
- [19] YIN W, ZHANG C, ZHU H, *et al.* Application of near-infrared hyperspectral imaging to discriminate different geographical origins of Chinese wolfberries [J]. PLoS One, 2017, 12(7): e0180534.
- [20] 杨雨图, 熊杰, 司万, 等. 基于可见/近红外光谱技术的板栗产地识别[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 189-194, 203.
- YANG YT, XIONG J, SI W, *et al.* Identification of chestnut origin based on visible/near infrared spectroscopy technology [J]. J Chin Agric Mech, 2021, 42(12): 189-194, 203.
- [21] 林珑, 吴静珠, 刘翠玲, 等. 基于模型集群的东北/非东北大米产地高光谱鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 905-910.
- LIN L, WU JZ, LIU CL, *et al.* Study on hyperspectral identification method for rice production areas in northeast/non northeast china based on model cluster [J]. Spectrosc Spect Anal, 2020, 40(3): 905-910.
- [22] 刘翠玲, 秦冬, 孙晓荣, 等. 基于高光谱图像与光谱特征融合技术的鸡蛋新鲜度无损判别模型的建立[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6): 172-182.
- LIU CL, QIN D, SUN XR, *et al.* Establishment of nondestructive Discriminative model for egg freshness based on hyperspectral image and spectral feature fusion technology [J]. J Food Sci Technol, 2022, 40(6): 172-182.
- [23] 孙晓荣, 胡毅然, 刘翠玲, 等. 基于近红外光谱技术的茶叶新旧鉴别及产地溯源研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 53-59.
- SUN XR, HU YR, LIU CL, *et al.* Study on the identification of old and new tea leaves and their origin traceability based on near infrared spectroscopy technology [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(5): 53-59.
- [24] 张琛, 栾东磊, 赵英才, 等. 基于高光谱成像技术快速检测鸡蛋中二十二碳六烯酸与虾青素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(21): 8010-8020.
- ZHANG C, LUAN DL, ZHAO YC, *et al.* Rapid detection of docosahexaenoic acid and astaxanthin in eggs based on hyperspectral imaging technology [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(21): 8010-8020.
- [25] 章海亮, 任众财, 刘雪梅, 等. 基于可见-近红外光谱法无损检测赣南脐橙中总酸含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(23): 8985-8992.
- ZHANG HL, REN ZC, LIU XM, *et al.* Non destructive detection of total acid content in Gannan navel orange based on visible near-infrared spectroscopy [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(23): 8985-8992.
- [26] 王彩霞, 王松磊, 贺晓光, 等. 基于可见/近红外高光谱成像技术的牛肉品种鉴别[J]. 食品工业科技, 2019, 40(12): 7.
- WANG CX, WANG SL, HE XG, *et al.* Identification of beef breeds based

- on the Vis/NIR hyperspectral imaging technique [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(12): 7.
- [27] GAO J, LI X, ZHU F, *et al.* Application of hyperspectral imaging technology to discriminate different geographical origins of *Jatropha curcas* L. seeds [J]. *Comput Electron Agric*, 2013, 99(6): 186–193.
- [28] 刘瑶, 李梓楠, 吴涛, 等. 基于高光谱图像和邻域粗糙集理论的大豆品种识别算法及其综合性能评估[J]. *大豆科学*, 2018, 37(4): 596–605.
LIU Y, LI ZN, WU T, *et al.* A soybean variety identification algorithm based on hyperspectral image and neighborhood roughset theory and its comprehensive performance evaluation [J]. *Soybean Sci*, 2018, 37(4): 596–605.
- [29] 管佳睿, 刘翠玲, 凌彩金, 等. 基于高光谱技术的红茶茶多酚可视化研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(5): 37–44.
ZAN JR, LIU CL, LING CJ, *et al.* Visualization of black tea polyphenols based on hyperspectral technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(5): 37–44.
- [30] 李佳琮, 谷晏, 刘翠玲, 等. 基于高光谱技术检测小麦粉灰分含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(5): 60–67.
LI JC, GU Y, LIU CL, *et al.* Detection of ash content in wheat flour based on hyperspectral technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(5): 60–67.
- [31] 宋科, 杨崇龙, 石永宏, 等. 基于可见-近红外高光谱技术对鸡种蛋性鉴定研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(17): 5518–5525.
SONG K, YANG CL, SHI YH, *et al.* Study on sex identification of chicken eggs based on visible near infrared hyperspectral technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(17): 5518–5525.
- [32] 孙晓荣, 周子健, 刘翠玲, 等. 基于 GA-PLS 算法的小麦粉灰分含量快速检测[J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(5): 135–137, 143.
SUN XR, ZHOU ZJ, LIU CL, *et al.* Rapid detection of ash content of wheat flour based on GA-PLS algorithm [J]. *Sens Microsyst*, 2018, 37(5): 135–137, 143.
- [33] 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 JZ, LI XQ, LIN L, *et al.* Fast hyperspectral identification of rice origin based on AlexNet convolutional neural network [J]. *J Chin Inst Ciencia Tecnol Alime*, 2022, 22(1): 282–288.
- [34] 周聪, 王慧, 杨健, 等. 基于高光谱成像技术的中药栀子产地识别[J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(22): 6027–6033.
ZHOU C, WANG H, YANG J. *et al.* Origin identification of *Gardenia jasminoides* based on hyperspectral imaging technology [J]. *China J Chin Mater*, 2022, 47(22): 6027–6033.
- [35] 王庆国, 黄敏, 朱启兵, 等. 基于高光谱图像的玉米种子产地与年份鉴别[J]. *食品与生物技术学报*, 2014, 33(2): 163–170.
WANG QG, HUANG M, ZHU QB, *et al.* Identification of maize seed origin and year based on hyperspectral images [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2014, 33(2): 163–170.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



孙晓荣, 硕士, 教授, 主要研究方向为智能测量技术与数据处理、系统建模与仿真方法、智能控制方法研究。

E-mail: sxrchy@sohu.com



张晨光, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测技术。

E-mail: 1102622879@qq.com