

基于可见光-近红外高光谱信息与数据融合的木质化鸡胸肉的判别模型构建

张 娜, 李 震, 兰维杰, 屠 康, 武 杰, 王兆山, 赵 干, 潘磊庆

Development of Discriminant Models for Wooden Breast Based on Visible and Near Infrared Hyperspectral Information and Their Fused Data

ZHANG Na, LI Zhen, LAN Weijie, TU Kang, WU Jie, WANG Zhaoshan, ZHAO Gan, and PAN Leiqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高光谱快速预测冷鲜鸡胸肉中乳酸菌

Rapid Prediction of Lactic Acid Bacteria in Chilled Chicken Breast by Hyperspectral Imaging

食品工业科技. 2020, 41(12): 227–233 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.037>

在线近红外光谱系统快速检测整块鸡胸肉菌落总数含量

Rapid Detection of Total Viable Count in Whole Chicken Breast by An Online Near-infrared Spectroscopy System

食品工业科技. 2020, 41(16): 232–237 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.037>

基于近红外高光谱成像技术的宁夏羊肉产地鉴别

Identification of geographical origins of mutton in Ningxia based on the near infrared hyperspectral imaging technique

食品工业科技. 2018, 39(2): 250–254,260 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.047>

基于可见/近红外高光谱成像技术的牛肉品种鉴别

Identification of Beef Breeds Based on the Vis/NIR Hyperspectral Imaging Technique

食品工业科技. 2019, 40(12): 241–247 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.12.039>

基于可见-近红外光谱及随机森林的鸡蛋产地溯源

Discrimination of origin of eggs using visible–near-infrared spectroscopy and random forest

食品工业科技. 2017(24): 243–247 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.047>

近红外高光谱成像技术对鸡蛋种类的鉴别

The identification of egg varieties by near infrared hyperspectral imaging technology

食品工业科技. 2018, 39(5): 13–17 <https://doi.org/>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张娜, 李震, 兰维杰, 等. 基于可见光-近红外高光谱信息与数据融合的木质化鸡胸肉的判别模型构建 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 286–293. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060110

ZHANG Na, LI Zhen, LAN Weijie, et al. Development of Discriminant Models for Wooden Breast Based on Visible and Near Infrared Hyperspectral Information and Their Fused Data[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 286–293. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060110

· 分析检测 ·

基于可见光-近红外高光谱信息与数据融合的木质化鸡胸肉的判别模型构建

张 娜¹, 李 震¹, 兰维杰¹, 屠 康¹, 武 杰², 王兆山³, 赵 干³, 潘磊庆^{1,*}

(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095;

2.蚌埠学院食品与生物工程学院, 安徽蚌埠 233030;

3.江苏益客食品集团股份有限公司, 江苏宿迁 223800)

摘要: 木质化鸡胸肉 (wooden breast, WB) 制约肉鸡行业发展, 传统触诊检测方法耗时且效率低, 为提升高光谱成像 (hyperspectral imaging, HSI) 技术检测鸡胸肉木质化程度的效果, 本论文以白羽鸡鸡胸肉为研究对象, 将其划分 4 个木质化等级, 采集其在 400~1000 和 1000~2000 nm 内的 HSI 信息, 通过不同光谱预处理算法和特征波段筛选方法, 建立基于全波段、特征波段和 HSI 数据融合的偏最小二乘判别分析 (Partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA) 模型和支持向量机 (Support vector machine, SVM) 模型。结果显示, SVM 模型比 PLS-DA 模型更适于判别鸡胸肉木质化程度, 基于 1000~2000 nm 内全波段和特征波段的最佳模型预测集总体正确率均高于 400~1000 nm 内的模型, 基于两波段 HSI 数据融合的木质化判别模型优于基于单一波段 (包括全波段和特征波段) 的模型, 最佳模型预测集总体正确率为 96.7%, 能较好地区分出 4 个木质化等级, 且对 4 个等级的判别准确率均可达 90% 以上。研究结果为 HSI 实现木质化鸡胸肉的准确无损检测提供技术支持。

关键词: 木质化鸡胸肉, 可见-近红外高光谱, 短波红外高光谱, 光谱数据融合, 判别模型

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)07-0286-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060110

本文网刊:



Development of Discriminant Models for Wooden Breast Based on Visible and Near Infrared Hyperspectral Information and Their Fused Data

ZHANG Na¹, LI Zhen¹, LAN Weijie¹, TU Kang¹, WU Jie², WANG Zhaoshan³, ZHAO Gan³, PAN Leiqing^{1,*}

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. School of Food and Biological Engineering, Bengbu University, Bengbu 233030, China;

3. Jiangsu Yike Food Group Company Limited, Suqian 223800, China)

Abstract: Wooden breast barriers the development of broiler industry, and traditional detection methods are time-consuming and inefficient. To investigate the feasibility of the hyperspectral imaging (HSI) technique for the detection of wooden breasts, four different grades of white feather chicken breast were selected and their HSI information of 400~1000 and 1000~2000 nm was collected. After spectral preprocessing and spectral variable selection, partial least squares discriminant (PLS-DA) models and support vector machine (SVM) models were developed based on full wavelength and characteristic spectral variables, as well as their fused HSI data. The results showed that SVM models showed better results

收稿日期: 2023-06-12

基金项目: 江苏省苏北科技专项 (SZ-SQ2021006); 江苏省重点研发计划项目 (BE2020693); 安徽省科技重大专项 (201903a06020010); 安徽省长三角科技创新联合攻关专项 (202004g01020009)。

作者简介: 张娜 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与检测, E-mail: nnzhang11@163.com。

* 通信作者: 潘磊庆 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品无损检测、贮藏与加工, E-mail: pan_leiqing@njau.edu.cn。

than PLS-DA models to discriminate woody grades of chicken breasts. The overall discrimination rates based on the full HSI bands and selected spectral variables in 1000~2000 nm were higher than those of models in 400~1000 nm. Besides, the discrimination models based on fused HSI data of HSI bands and selected spectral variables provided the best results, with the overall discrimination rate of 96.7% for four different woody grades, and the accuracy of the four grades could reach more than 90%. The research results provided technical support for HSI to achieve rapid and non-destructive detection of wooden chicken breasts.

Key words: wooden breast; visible-near infrared hyperspectral; short-wave infrared hyperspectral; spectral data fusion; discriminant model

鸡胸肉蛋白质含量丰富, 价格低廉, 深受消费者喜爱, 需求量逐渐攀升, 是我国消费产量第二多的肉类食品^[1-2]。为提高鸡肉产量, 育种科学家致力于培养优质品种。然而, 在育种过程中由于氧化应激等引起的木质化鸡胸肉(wooden breast, WB)十分常见^[3], 导致鸡胸肉的蛋白质含量降低, 脂肪含量升高^[4], 且在食用时出现橡胶质地的口感^[5]。营养价值和口感及外观可接受度的下降, 降低了消费者的购买欲望, 导致肉鸡行业遭到不利影响, 制约了其进一步发展。在中国, 2019 年数据统计出轻微、中度和重度木质化的发生率分别为 31.1%、23.3% 和 7.6%^[6], 而巴西由 WB 造成的损失可达 70000 美元/天^[7]。WB 已经成为全球肉鸡企业共同面临的一大挑战之一。因此, 建立一种快速准确的方法检测 WB 和判别其木质化程度以减少 WB 在家禽业中造成的经济损失, 对于整个冷鲜肉鸡产业链意义重大。

目前, WB 的检测主要依靠视觉或触觉等外观特征, 即通过观察比较 WB 的颜色、大小以及表面是否有分泌物和淤血等判断 WB 的木质化等级^[8]。Sihvo 等^[9]于 2014 年提出采用触诊法进行 WB 木质化分级, 这种通过触摸鸡胸肉并根据触摸时的坚硬程度进行木质化分级的方法过于依赖个人主观感受, 而且易受到温度、湿度、光线等环境因素的影响。此外, 肌体宰后可能会发生僵直等导致鸡胸肉硬度增加, 从而影响 WB 木质化程度的判别准确性^[10]。

高光谱成像技术(hyperspectral imaging, HSI)是一种新兴的无损检测技术, 可同时获取样品的光谱和图像信息, 具有前处理简单、环保无污染、无破坏性、无损、“图谱合一”等特点^[11], 在食品检测方面具有独特优势, 已被广泛应用于鸡肉品质检测^[12]。如, 王慧等^[13]使用近红外 HSI 结合化学计量学方法成功建立了预测鸡胸肉嫩度的偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)模型, 预测集相关系数(correlation coefficient of prediction, Rp)大于 0.90, 实现了鸡肉嫩度的快速无损检测; 何鸿举等^[14]基于 HSI 信息构建了预测鸡肉滴水损失率的定量 PLSR 模型($R_p=0.97$), 表明 HSI 可潜在地实现鸡肉滴水损失率的快速预测。Yoon 等^[15]研究了光谱域光学断层扫描和 HSI 技术在快速无损检测和分选木质化鸡胸肉方面的潜力, 证明 400~1000 nm 内的 HSI 信息可判别正常和木质化两类鸡胸肉。HSI 在

鸡肉品质无损检测中的应用得到了广泛研究。

不同光谱技术与多元化学计量学和不同数据融合策略的结合已成为提高食品认证和质量评估鉴定可靠性的一种手段。多源数据融合技术通过将来源于不同传感器的物理信息数据拼接在一起, 扩大样本信息、获得综合信息特征数据, 提升对样本的检测速度, 发挥先进技术的优势。虽然高光谱技术已经独立用于鸡肉品质的检测, 但迄今为止联合应用两波段 HSI 检测鸡胸肉不同木质化程度的研究在国内鲜有报道。

鉴于 HSI 在鸡肉品质检测上展现出的简单、快速及无损等优势, 本研究尝试以白羽鸡鸡胸肉为研究对象, 利用高光谱成像系统采集不同等级木质化鸡胸肉在可见近红外(400~1000 nm)和短波红外(1000~2000 nm)内的 HSI 信息, 选择不同光谱预处理算法和特征波长筛选方法, 建立基于全波段、特征波段和两波段数据融合的鸡胸肉木质化的分级模型, 以期实现木质化鸡胸肉等级分类的无损检测, 为快速准确判别 WB 木质化程度提供理论参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白羽鸡鸡胸肉 购于江苏省宿迁市益客集团肉食鸡屠宰场。

可见-近红外高光谱成像系统(400~1000 nm): 包括 ImSpector V10E 成像光谱仪 芬兰 Specim; ICLB1620CCD 相机 美国 Imperx; IT3900ER 卤素光源 美国 Illumination Technologies。短波近红外高光谱系统(1000~2000 nm): 包括 ImSpector N25E 成像光谱仪 芬兰 Specim; Raptor EM285CL 相机

英国 Raptor Photonics; IRCP0076-ICOMB001 移动平台 台湾五铃光学股份有限公司。两个系统的图像采集软件和 HSI 分析软件 均购于台湾五铃光学股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鸡胸肉分级 从肉鸡(宰后 2~3 h)鸡胸肉分割生产线上挑选试验所需的鸡胸肉, 共计 240 个样本。参考 Tijare 等^[8]的分级标准, 由经验丰富的专业人员根据表 1, 通过肉眼和触诊法将 WB 样本划分为正常(normal breast, NB)、轻微木质化(mild wooden breast, MILD)、中度木质化(moderate wooden breast, MOD)和严重木质化(severe wooden breast,

表 1 鸡胸肉分级标准
Table 1 Grading standard of chicken breast

等级	描述
正常鸡胸肉(NB)	鸡胸肉整体十分柔软,外表平滑、细腻,掂在手中胸肉两端自然下垂。
轻微木质化(MILD)	硬度主要集中在顶端区域,掂在手中底部仍有一定的下垂感。
中度木质化(MOD)	硬度主要集中在顶端和中部区域,底部较顶端柔软,底部隐约可见凸起状。
严重木质化(SEV)	整体触感坚硬,无下垂感,底部可明显看见凸起部位。

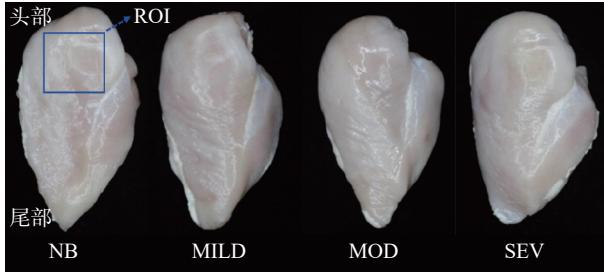


图 1 不同等级木质化鸡胸肉

Fig.1 Different grades of wooded chicken breast

注: NB: 正常鸡胸肉; MILD: 轻微木质化; MOD: 中度木质化; SEV: 严重木质化; ROI: 感兴趣区域。

SEV)4个等级(图1),每个等级60个样品。将样本表面肌膜剔除后,单独分装至一次性塑封袋内并贴上标签,储存在4±1℃。

1.2.2 高光谱数据采集与校正 采用线扫描模式获取每个鸡胸肉样品(皮侧)的高光谱图像。可见-近红外高光谱成像系统(图2a)成像光谱仪的分辨率为2.8 nm。为了避免阴影的干扰^[16],将两个光源在距离样品30 cm处以45°的投射角度固定于相机两侧,相机镜头与样品之间的距离为26 cm,光源强度为45 W,曝光时间为3 ms,移动平台的速度为7 mm/s。短波红外高光谱成像系统(图2b)使用光谱分辨率为6.2 nm的成像光谱仪,光源在距离样品31 cm处以

45°的投射角度固定于样品斜上方,相机镜头与样品之间的距离为26 cm,光源强度为255 W,曝光时间为3.5 ms,移动平台的速度为17 mm/s。

光谱采集前,高光谱成像系统需打开预热30 min,以稳定光源。擦净鸡胸肉表面水分后,将其放在移动平台上,进行图像采集。不均匀的光源强度、相机暗电流和光栅散射等均会影响光谱采集,因此需对采集的原始高光谱图像(R_0)进行黑白校正以消除冗余的信息^[17]。其中,白校正使用反射率为99.99%的白色聚四氟乙烯板获取标准白校正图像(W),暗校正是通过全部覆盖镜头获得标准黑校正图像(B),通过公式(1)可获得校正后的高光谱图像(R):

$$R = \frac{R_0 - B}{W - B} \quad \text{式 (1)}$$

式中: R 为高光谱校正图像; R_0 是原始高光谱图像; B 为标准黑校正图像; W 为标准白校正图像。

1.2.3 光谱信息提取 使用图像分割法提取鸡胸肉样品的典型光谱数据^[18]。为了更准确地获取与木质化相关的信息,将最先发生木质化的鸡胸肉头部位置作为感兴趣区域(region of interest, ROI),每个感兴趣区域的大小为900(30×30)像素(图1)。通过MATLAB R2016a软件(MathWorks公司,美国)进行ROI的识别和ROI内光谱数据的提取,获取并计算每个样品ROI区域内的平均光谱值,以平均值作为每个鸡胸肉样品的光谱。

1.3 数据处理

1.3.1 光谱预处理 采用自动标准化(Autoscale)、标准正态变量法(standard normal variate, SNV)、正交信号校正法(orthogonal signal correction, OSC)、平滑法(Smoothing)、一阶导数法(first derivative, 1-st)等算法进行光谱预处理,以减少光谱采集时由噪音、暗电流及基线漂移等外界环境因素造成的影响,降低光谱冗余度,提高模型精确度和鲁棒性^[19]。

1.3.2 特征波长筛选 HSI数据庞大,不可避免地包含部分与木质化肌病无关的信息,特征波长筛选可去除无用信息,挑选出与木质化特征最相关的特征波长,这在简化模型的同时可提高模型运行速度和模型准确率。本文采用连续投影算法(successive projections algorithm, SPA)、竞争性自适应重加权算法(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)以及无信息变量消除法(uninformative variable elimination, UVE)3种方法挑选特征波长。

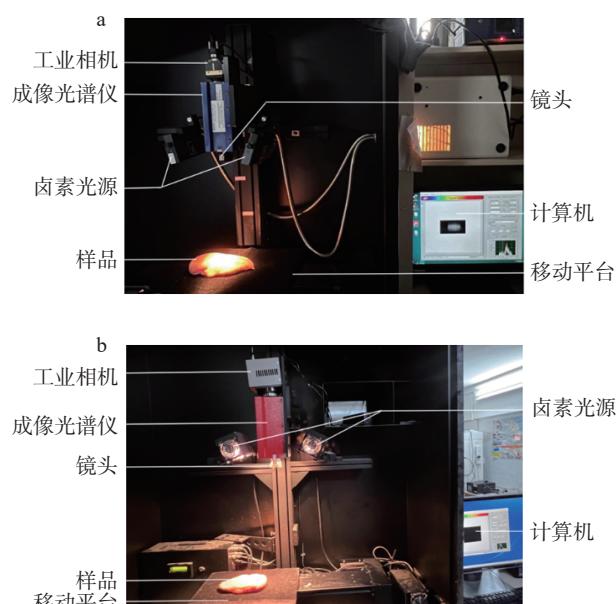


图2 可见-近红外(a)和短波红外(b)高光成像系统实物图

Fig.2 Physical images of visible-near (a) and short-wave infrared (b) hyperspectral imaging systems

1.3.3 模型建立与评估 利用多种算法对 HSI 数据进行预处理, 建立基于 400~1000 nm 和 1000~2500 nm 内的全波长、特征波长及两波段数据融合的木质化鸡胸肉分级的偏最小二乘判别分析 (partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA) 和支持向量机 (support vector machine, SVM) 判别模型, 并通过建模集和预测集的判别正确率对模型性能进行评估。

1.3.4 数据处理软件 使用 MATLAB R2016a 软件进行光谱数据处理; 使用 Origin 2020b 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 光谱分析

可见-近红外高光谱和短波红外高光谱的原始光谱范围分别为 383~1011 nm 和 982~2526 nm。为降低噪声影响, 去除前后部分波段, 最终选取 400~1000 nm 和 1000~2000 nm 波段进行光谱分析。图 3 为不同等级木质化鸡胸肉样品在两个波段下的反射光谱, 每条光谱代表每选取一个感兴趣区域内的信息。4 个等级木质化鸡胸肉平均光谱的变化趋势大致相似, 平均光谱的相对反射率随着木质化程度的增加而升高, 正常鸡胸肉样品的平均反射率最低。

在 400~1000 nm 内, 正常鸡胸肉的相对反射率低于木质化鸡胸肉(图 3a 和 b), 这可能是木质化鸡胸肉的组分变化导致光谱曲线的主要反射波段发生了变化, 如 420、550、760 和 970 nm 处出现了较明显的光谱吸收峰。420 和 550 nm 附近的光谱吸收峰主要与血红蛋白和肌红蛋白分子上的血红素吸收有关, 反映鸡胸肉的表面颜色信息^[20]。木质化鸡胸肉的肌纤维变性, 从而引起肌红蛋白的过度表达, 鸡胸肉原本的Ⅱ型纤维转为Ⅰ型纤维。760 nm 附近的吸收带是有机物中 C-H 键的四倍频吸收带^[21], 而 980 nm 附近的吸收带是水分子中 O-H 键的二级倍频的拉伸振动引起的反射率变化^[22]。

在 1000~2000 nm 内, 随着木质化等级的增加, 样品光谱反射强度梯度式从低到高逐渐变化(图 3c 和 d), 在 1190、1420 和 1940 nm 处出现了较明显的光谱吸收峰。研究发现, 1190 nm 处的吸收峰与脂质中 C-H 键的二级倍频有关^[23]; 1420 nm 处的吸收峰源于 N-H 键的振动^[24]; 1940 nm 处的吸收峰与鸡肉组分中结构官能团 C-H 键的一级倍频相关^[25]。由于木质化鸡胸肉的肌肉组织结构和组成发生改变, 使其结合水与蛋白质的结合能力降低, 自由水含量增多。由此可见, 不同木质化程度的鸡胸肉组分不同, 导致其在 400~1000 和 1000~2000 nm 内的光谱吸收存在差异, 这为基于 HSI 进行鸡胸肉木质化程度判别奠定了基础。

2.2 基于全波段的木质化鸡胸肉判别模型的建立

采用 Autoscale、SNV、Smoothing、1st、OSC 等算法进行光谱预处理, 构建基于 400~1000 和 1000~2000 nm 全波段的木质化鸡胸肉的 PLS-DA 和 SVM

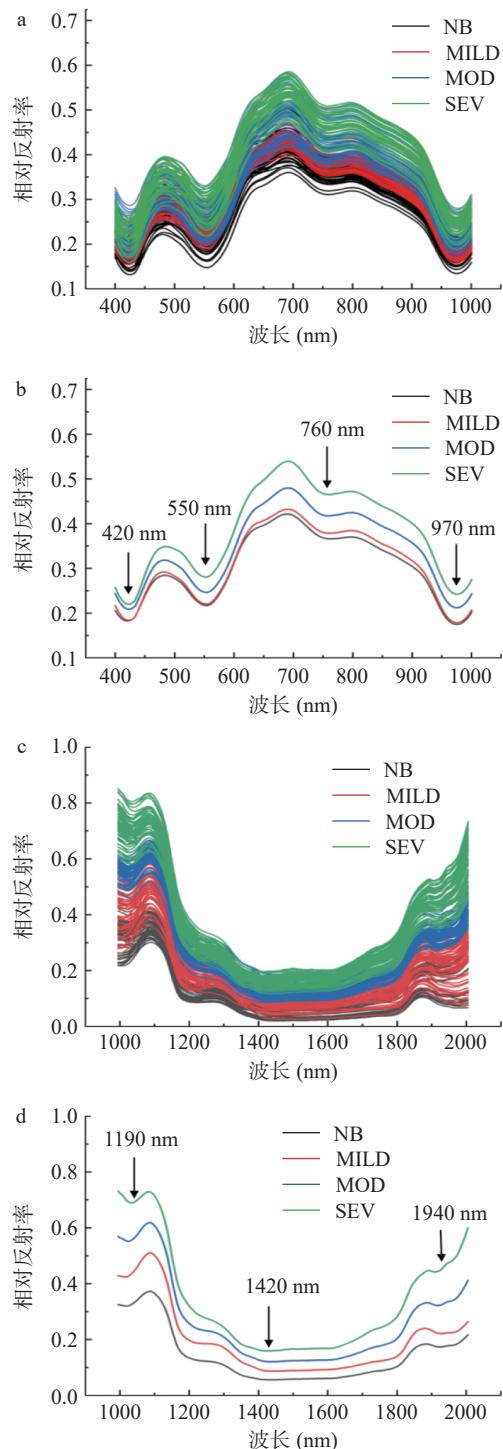


图 3 不同等级木质化鸡胸肉在 400~1000 nm(a, b)和 1000~2000 nm(c, d)内的原始光谱和平均光谱图

Fig.3 Original and mean spectra of different grades of wooden chicken breast in 400~1000 nm (a, b) and 1000~2000 nm (c, d)

判别模型, 结果如表 2 和表 3 所示。400~1000 nm 内, 经光谱预处理的 PLS-DA 分级模型的建模集正确率较原始光谱均有所提高, 其中经 SNV 预处理的 PLS-DA 模型的建模集和预测集正确率分别提高了 12.8% 和 5.0%, 判别效果最佳。对于 SVM 模型, 基于原始光谱建立的模型欠拟合, 这可能是因为所建模型过于简单, 无法较好地学习数据的特征^[26]。经 SNV 预处理后, SVM 模型欠拟合程度得到一定改善, 建模集和预测集的正确率分别为 98.3% 和 88.3%。

表 2 基于 400~1000 nm 波段的木质化鸡胸肉等级分类模型
Table 2 Classification models for the grades of wooden chicken breast in 400~1000 nm

建模方法	预处理	建模集正确率(%)					预测集正确率(%)				
		NB	MILD	MOD	SEV	总体	NB	MILD	MOD	SEV	总体
PLS-DA	Raw	86.7	75.6	51.1	91.1	76.1	86.7	73.3	53.3	86.7	75.0
	Autoscale	86.7	88.9	60.0	91.1	81.7	93.3	66.7	60.0	80.0	75.0
	SNV	93.3	82.2	84.4	95.6	88.9	93.3	73.3	60.0	93.3	80.0
	Smoothing	88.9	75.6	68.9	93.3	81.7	80.0	73.3	66.7	86.7	76.7
	1-st	91.1	73.3	62.2	93.3	80.0	80.0	73.3	53.3	93.3	75.0
	OSC	86.7	91.1	82.2	97.8	89.4	73.3	60.0	80.0	86.7	75.0
SVM	Raw	100	100	93.3	97.8	97.8	93.3	80.0	66.7	60.0	75.0
	Autoscale	100	100	95.6	97.8	98.3	93.3	80.0	66.7	80.0	80.0
	SNV	100	97.8	95.6	100	98.3	86.7	86.7	86.7	93.3	88.3
	Smoothing	84.4	91.1	86.7	93.3	88.9	80.0	73.3	80.0	60.0	73.3
	1-st	73.3	71.1	60.0	84.4	72.2	73.3	66.7	46.7	80.0	66.7
	OSC	97.8	97.8	95.6	91.1	95.6	93.3	80.0	66.7	66.7	76.7

表 3 基于 1000~2000 nm 波段的木质化鸡胸肉等级分类结果
Table 3 Classification models for the grades of wooden chicken breast in 1000~2000 nm

建模方法	预处理	建模集正确率(%)					预测集正确率(%)				
		NB	MILD	MOD	SEV	总体	NB	MILD	MOD	SEV	总体
PLS-DA	Raw	93.3	86.7	82.2	93.3	89.4	93.3	73.3	66.7	93.3	81.7
	Autoscale	97.8	88.9	91.1	95.6	93.3	100	86.7	80.0	93.3	90.0
	SNV	95.6	86.7	88.9	91.1	90.6	93.3	80.0	80.0	93.3	86.7
	Smoothing	84.4	77.8	82.2	95.6	85.0	86.7	80.0	73.3	100	85.0
	1-st	93.3	91.1	86.7	95.6	91.7	93.3	80.0	80.0	93.3	86.7
	OSC	93.3	93.3	93.3	91.1	92.8	86.7	80.0	86.7	93.3	86.7
SVM	Raw	97.8	93.3	93.3	91.1	93.9	100	80.0	93.3	100	93.3
	Autoscale	97.8	95.6	95.6	95.6	96.1	100	93.3	86.7	100	95.0
	SNV	97.8	100	100	100	99.4	93.3	80.0	100	86.7	90.0
	Smoothing	97.8	93.3	93.3	97.8	95.6	100	93.3	86.7	100	95.0
	1-st	97.8	82.2	97.8	93.3	92.8	100	86.7	93.3	100	95.0
	OSC	91.1	95.6	95.6	95.6	94.4	80.0	86.7	86.7	60.0	78.3

甚至高于 SNV-PLS-DA 模型的正确率, 分类效果较好。因此, 在 400~1000 nm 内 SNV-SVM 模型分类效果最佳。

1000~2000 nm 内, Autoscale、SNV、1-st、OSC 等光谱预处理算法提高了 PLS-DA 模型建模集和预测集的正确率, 其中经 Autoscale 预处理的 PLS-DA 模型对 4 个等级木质化鸡胸肉的正确率均达 85.0% 以上, 预测集达 80.0% 以上。对于 SVM 模型, OSC-SVM 模型效果最差, SNV-SVM 模型的建模集正确率(99.4%)最高, 但其预测集正确率(90.0%)低于 Raw-SVM 模型。经 Autoscale、Smoothing、1-st 预处理的 SVM 模型预测集正确率均为 95.0%, 其中 1-st-SVM 模型建模集正确率较低, Smoothing-SVM 模型略高, Autoscale-SVM 模型最高。Autoscale-SVM 模型建模集和预测集正确率分别为 96.1% 和 95.0%, 且对 4 个不同等级的建模集判别正确率均达到 95.0% 以上, 预测集达 85.0% 以上。由此可见, 基于 1000~2000 nm 波段的 Autoscale-SVM 模型效果最佳。

比较基于 400~1000 和 1000~2000 nm 内全波段的木质化鸡胸肉等级分类的最佳模型, 可以得出 1000~2000 nm 内全波段的分类模型正确率高于

400~1000 nm 内全波段模型, 这表明 1000~2000 nm 波段可能涵盖更多与木质化肌胸疾病相关的信息, 更适合用于鸡胸肉的木质化等级分类。同时, 由于基于 400~1000 和 1000~2000 nm 内全波段的木质化鸡胸肉的最佳分类模型均为 SVM 模型, 因此后续仅建立基于特征波段的 SVM 分类模型。

2.3 基于特征波段的木质化鸡胸肉判别模型的建立

HSI 数据经预处理后, 分别通过 SPA、CARS 和 UVE 算法挑选特征波段(图 4), 而后建立并比较基于特征波段的木质化鸡胸肉等级的 SVM 判别模型(表 4)。在 400~1000 nm 内, 基于 SPA 算法的判别模型正确率最低, 建模集和预测集的总体正确率分别为 84.4% 和 76.7%, 这可能是由于 SPA 算法仅筛选出 9 个特征变量, 使一些与木质化肌病相关的有效变量被剔除, 导致模型精度变低。CARS 算法保留了 25 个特征波长, 所建判别模型建模集和预测集比基于全波段的模型均有所下降, 分别降低 3.9% 和 6.6%, 且预测集正确率较低, 模型欠拟合。UVE 算法保留的特征波长数量最多(43 个), 所建模型建模集和预测集正确率较为接近, 分别为 87.8% 和 85.0%, 模型较为稳定。与基于 400~1000 nm 内全波段的建模结果相比, UVE-SVM 模型正确率略有下降, 可能

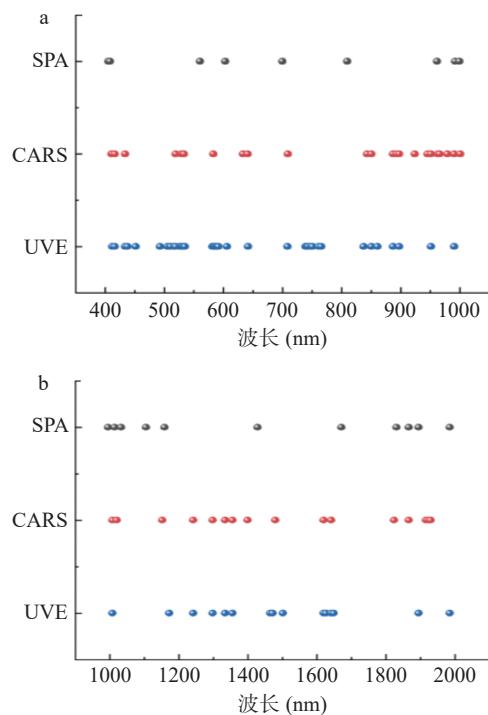


图 4 基于不同算法筛选的具体特征波长

Fig.4 Specific characteristic wavelengths filtered based on different algorithms

是在提取过程中部分有效信息缺失,或者提取的特征波长不在光谱的吸收峰附近,导致模型的精度降低。但提取特征波长可以减少变量数目,同时减少外界环

境的影响,提高模型的计算速度^[27]。因此,UVE-SVM 是 400~1000 nm 波段内的最佳模型。

在 1000~2000 nm 内,基于 SPA、CARS 和 UVE 算法提取的特征波长的判别模型预测集总体正确率与基于全波段的建模集相同,均为 95.0%。UVE-SVM 模型总体正确率与全波长模型一致,均为 96.1%;CARS 算法虽保留了最多波长,但 CARS-SVM 模型建模集正确率(95.6%)在 4 个模型中最低;SPA 算法保留了最少的特征波长,但其建模集正确率较 1000~2000 nm 内全波长提高了 0.6%,同时运行速度得到提升。因此,基于 SPA 算法筛选的 1000~2000 nm 的特征波段的 SVM 模型判别鸡胸肉木质化程度的效果最好,优于 400~1000 nm 波段内的 UVE-SVM 模型。由此可见,在判别鸡胸肉木质化程度时,1000~2000 nm 比 400~1000 nm 内的特征波段更具优越性,这与基于全波段的判别结果一致。

2.4 基于两波段数据融合的木质化鸡胸肉判别模型的建立

基于可见-近红外(400~1000 nm)和短波红外(1000~2000 nm)高光谱数据融合的木质化鸡胸肉等級的 SVM 判别模型如表 5 所示,基于数据融合的判别模型优于基于单一的可见-近红外或者短波红外高光谱信息的 SVM 模型,其建模集和预测集总体正确率分别为 98.9% 和 96.7%。基于单一的 HSI 信息的

表 4 基于 SVM 算法的木质化鸡胸肉等级全波长和特征波长判别模型

Table 4 Full wavelength range and characteristic wavelength prediction models for wooden chicken breast based on SVM algorithm

波长(nm)	特征波长选择方式	波长数量	建模集正确率(%)					预测集正确率(%)				
			NB	MILD	MOD	SEV	总体	NB	MILD	MOD	SEV	总体
400~1000	全波段	420	100	97.8	95.6	100	98.3	86.7	86.7	86.7	93.3	88.3
	SPA	9	88.9	82.2	80.0	86.7	84.4	86.7	66.7	80.0	73.3	76.7
	CARS	25	97.8	93.3	91.1	95.6	94.4	86.7	86.7	60.0	93.3	81.7
	UVE	43	91.1	88.9	75.6	95.6	87.8	93.3	86.7	66.7	93.3	85.0
1000~2000	全波段	144	97.8	95.6	95.6	95.6	96.1	100	93.3	86.7	100	95.0
	SPA	11	97.8	95.6	95.6	97.8	96.7	100	93.3	86.7	100	95.0
	CARS	16	95.6	93.3	95.6	97.8	95.6	100	86.7	93.3	100	95.0
	UVE	15	97.8	93.3	95.6	97.8	96.1	100	86.7	93.3	100	95.0

表 5 基于可见-近红外(400~1000 nm)和短波红外(1000~2000 nm)高光谱数据融合的木质化鸡胸肉 SVM 分类模型

Table 5 SVM model classification for wooden chicken breast based on fusion of visible-near infrared (400~1000 nm) hyperspectral and short-wave infrared (1000~2000 nm) hyperspectral data

变量数据(nm)	特征变量数	测量等级	建模集预测等级				总体正确率(%)	预测集预测等级				总体正确率(%)
			NB	MILD	MOD	SEV		NB	MILD	MOD	SEV	
400~1000	43	NB	41	3	2	0	87.8	14	1	0	0	85.0
		MILD	2	40	4	0		1	13	1	0	
		MOD	2	2	34	2		0	1	10	1	
		SEV	0	0	5	43		0	0	4	14	
1000~2000	11	NB	44	0	0	0	96.7	15	1	0	0	95.0
		MILD	1	43	2	0		0	14	2	0	
		MOD	0	2	43	1		0	0	13	0	
		SEV	0	0	0	44		0	0	0	15	
400~1000 和 1000~2000	54	NB	45	0	0	0	98.9	15	1	0	0	96.7
		MILD	0	44	1	0		0	14	0	0	
		MOD	0	1	44	0		0	0	15	1	
		SEV	0	0	0	45		0	0	0	14	

模型出现了较多样品误判,而基于两波段数据融合的模型建模集仅有 2 个样品误判,出现在轻微木质化和中度木质化两个等级之间的相互误判;在预测集中同样出现 2 个样品误判情况,分别是轻微木质化被误判为正常鸡胸肉和严重木质化被误判为中度木质化。数据融合模型对 4 个等级的判别效果俱佳,在建模集中对正常鸡胸肉和严重木质化鸡胸肉的总体判别正确率已经达到 100%。

究其原因,400~1000 nm 内的 HSI 光谱信息可以反映由于血红素等导致的鸡胸肉色泽变化^[28],1000~2000 nm 内的 HSI 信息可以很好地反映鸡胸肉内部成分含量的变化信息^[29]。基于数据融合的判别模型充分考虑了鸡胸肉内部成分的化学物质变化,又包含了外部色泽的变化信息,二者特征信息的综合可以更加全面、准确地对鸡胸肉木质化程度进行检测。因此,对比使用单一变量数据获取一种信息的预测模型,融合模型覆盖的信息更能反映鸡胸肉木质化的特征^[30]。

3 结论

现有研究已证明了光谱技术用于木质化鸡胸肉检测的可行性。Yoon 等^[15]发现光谱域光学断层扫描和 400~1000 nm 高光谱成像可用于检测木质化鸡胸肉;Li 等^[31]使用 1000~2500 nm 近红外光谱技术将鸡胸肉分为正常和木质化鸡胸肉两类。本文获取了 4 个木质化等级的鸡胸肉在可见-近红外(400~1000 nm)和短波红外(1000~2000 nm)两个波段内的 HSI 数据,通过不同的光谱预处理算法和特征波段筛选方法分别基于两波段内的全波段和特征波段建立了判别鸡胸肉木质化等级的 PLS-DA 模型和 SVM 模型,最后与基于 400~1000 和 1000~2000 nm 两波段内 HSI 数据融合的木质化判别模型进行对比,将鸡胸肉分为正常、轻微、中度和严重四个等级,实现了更精确的分类。结果表明,鸡胸肉样本的平均光谱反射率随木质化程度增加而升高,正常鸡胸肉样品的平均反射率最低。基于 400~1000 和 1000~2000 nm 内全波段的木质化最佳判别模型分别是 SNV-SVM 模型和 Autoscale-SVM 模型,预测集总体正确率分别为 88.3% 和 95.0%;对应的基于特征波段的木质化判别模型分别是 UVE-SVM 模型和 SPA-SVM 模型,预测集总体正确率分别为 85.0% 和 95.0%。基于 400~1000 和 1000~2000 nm 两波段融合的 HSI 信息的 SVM 分类模型预测集总体正确率为 96.7%,能较好地区分出 4 个木质化等级,且判别正常鸡胸肉的总体正确率可达到 100%。

综上所述,基于 HSI 信息判别鸡胸肉木质化程度时 SVM 模型优于 PLS-DA 模型,基于 1000~2000 nm 内全波段和特征波段的最佳模型预测集总体正确率均高于 400~1000 nm 内的模型,这表明 1000~2000 nm 可能涵盖更多与木质化肌胸疾病相关的信息,更适合于鸡胸肉的木质化等级分类。此

外,基于两波段 HSI 数据融合的木质化判别模型优于基于单一波段(包括全波段和特征波段)的模型,可实现鸡胸肉木质化程度的准确、快速、无损检测。

本文为鸡胸肉木质化程度的快速无损判别提供了新思路、新方法,同时为 HSI 技术在鸡胸肉木质化检测中的应用提供了理论参考。尽管如此,基于 400~1000 nm 内 HSI 信息的模型木质化判别效果相对较差的原因仍不明朗,如何进一步应用鸡胸肉样品的 HSI 图像信息仍需深入思考。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 鲁帆,浦华.肉鸡产业统计监测数据优化研究[J].中国畜牧杂志,2022,58(11):324~328. [LU F, PU H. Study on the optimization of statistical monitoring data for the broiler industry[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2022, 58(11): 324~328.]
- [2] PETRACCI M, MUDALAL S, BABINI E, et al. Effect of white striping on chemical composition and nutritional value of chicken breast meat[J]. Italian Journal of Animal Science, 2014, 13(1): 179~183.
- [3] SIHVO H K, LINDÉN J, AIRAS N, et al. Wooden breast myodegeneration of pectoralis major muscle over the growth period in broilers[J]. Veterinary Pathology, 2017, 54(1): 119~128.
- [4] CAI K, SHAO W, CHEN X, et al. Meat quality traits and proteome profile of woody broiler breast (pectoralis major) meat[J]. Poultry Science, 2018, 97(1): 337~346.
- [5] 谭权,孙得发.肉鸡木质肉和白纹肉问题及其解决方案[J].中国畜牧杂志,2019,55(9):33~37. [TAN Q, SUN D F. Solutions to alleviating white striping and wooden breast in broilers[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(9): 33~37.]
- [6] XING T, ZHAO X, ZHANG L, et al. Characteristics and incidence of broiler chicken wooden breast meat under commercial conditions in China[J]. Poultry Science, 2020, 99(1): 620~628.
- [7] ZANETTI M A, TEDESCO D C, SCHNEIDER T, et al. Economic losses associated with wooden breast and white striping in broilers[J]. Semina-Ciencias Agrarias, 2018, 39(2): 887~892.
- [8] TIJARE V V, YANG F L, KUTTAPPAN V A, et al. Meat quality of broiler breast fillets with white striping and woody breast muscle myopathies[J]. Poultry Science, 2016, 95(9): 2167~2173.
- [9] SIHVO H K, IMMONEN K, PUOLANNE E. Myodegeneration with fibrosis and regeneration in the pectoralis major muscle of broilers[J]. Veterinary Pathology, 2014, 51(3): 619~623.
- [10] BOWKER B, ZHUANG H, YOON S C, et al. Relationships between attributes of woody breast and white striping myopathies in commercially processed broiler breast meat[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2019, 28(2): 490~496.
- [11] 熊春晖,余永新,焦逊,等.高光谱成像技术在农产品无损检测中的应用[J].粮油食品科技,2023,31(1):109~122. [XIONG C H, SHE Y X, JIAO X, et al. Application of hyperspectral imaging technology in nondestructive testing of agricultural products[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 109~122.]
- [12] 曲佳欢,马骥,孙大文,等.高光谱成像在食品质量评估方面的研究进展与应用(一)[J].肉类研究,2012,26(4):40~45. [QU

- J H, Ma J, SUN D W, et al. Researches and application of hyperspectral imaging in food industry(I)[J]. *Meat Research*, 2012, 26(4): 40–45.]
- [13] 王慧, 何鸿举, 张海曼, 等. 高光谱成像技术快速预测冷鲜鸡胸肉的嫩度[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2018, 31(2): 164–170. [WANG H, HE H J, ZHANG H M, et al. Rapid prediction of chicken tenderness by hyperspectral imaging technique[J]. Journal of Hainan Normal University: Natural Science, 2018, 31(2): 164–170.]
- [14] 何鸿举, 王洋洋, 王魏, 等. 基于不同预处理高光谱信息的鸡肉滴水损失率快速预测研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 252–256, 279. [HE H J, WANG Y Y, WANG W, et al. Fast prediction of drip loss rate in chicken meat based on different pretreated hyperspectral information[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 252–256, 279.]
- [15] YOON S C, BOWKER B C, ZHUANG H. Toward a fusion of optical coherence tomography and hyperspectral imaging for poultry meat quality assessment[J]. *Society for Imaging Science and Technology*, 2016, 2016(14): 1–5.
- [16] YU K, ZHAO Y, LI X, et al. Identification of crack features in fresh jujube using Vis/NIR hyperspectral imaging combined with image processing[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2014, 103: 1–10.
- [17] SUN Y, WANG Y, XIAO H, et al. Hyperspectral imaging detection of decayed honey peaches based on their chlorophyll content[J]. *Food Chemistry*, 2017, 235: 194–202.
- [18] 张玉香, 高旭杨, 王挺, 等. 一种基于背景自学习的高光谱图像生物信息提取方法[J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 292–296.
- [ZHANG Y X, GAO X Y, WANG T, et al. Background self-learning framework for bio information extraction from hyperspectral images[J]. *Computer Science*, 2015, 42(4): 292–296.]
- [19] 杨小玲. 高光谱图像技术检测玉米种子品质研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. [YANG X L. Detection of maize seed quality using hyperspectral imaging[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.]
- [20] WESTAD F, SCHMIDT A, KERMIT M. Incorporating chemical band-assignment in near infrared spectroscopy regression models[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2008, 16(3): 265–273.
- [21] GAO Z, ZHAO Y, KHOT L R, et al. Optical sensing for early spring freeze related blueberry bud damage detection: Hyperspectral imaging for salient spectral wavelengths identification[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019(C), 167: 105025.
- [22] 程玮玮. 低温保藏猪肉有机生物大分子光谱成像规律与快速检测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [CHENG W W. Study on spectral imaging characteristics and rapid detection method of pork meat organic macromolecules preserved at low temperature[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.]
- [23] 王培培. 基于近红外光谱的不同品种绵羊肉鉴别及品质检测技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [WANG P P. Study on the breed discrimination and quality determination of lamb by near infrared spectroscopy[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2012.]
- [24] RITTHIRUANGDEJ P, RITTHIRON R, SHINZAWA H, et al. Non-destructive and rapid analysis of chemical compositions in Thai steamed pork sausages by near-infrared spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(2): 684–692.
- [25] 邱园园. 基于高光谱和近红外信息融合的羊肉新鲜度无损检测研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018. [QIU Y Y. Study on nondestructive detection of mutton freshness based on information fusion using hyperspectral image and near-infrared spectroscopy[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.]
- [26] 葛春靖. 基于光谱技术的梨内部品质无损检测及模型优化研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2021. [GE C J. Research of non-destructive detection for assessing internal quality attributes of pear based on spectroscopy technology and model optimization[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2021.]
- [27] 黄琪评. 基于光谱成像技术的猪肉品质检测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016. [HUANG Q P. Study of pork quality based on spectral imaging technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.]
- [28] PRIAMBODO D C, SAPUTRO D, PAHLAWAN M F R, et al. Determination of acid level (pH) and moisture content of cocoa beans at various fermentation level using visible near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 985(1). doi:10.1088/1755-1315/985/1/012045.
- [29] 王文秀. 生鲜猪肉品质的多参数同时实时光谱检测技术与装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. [WANG W X. Research on simultaneous and real-time spectroscopic detection technology and device for multi quality attributes of pork[D]. Beijing: Chinese Agricultural University, 2018.]
- [30] XU J C, QU F F, SHEN B, et al. Rapid detection of tea polyphenols in fresh tea leaves based on fusion of visible/short-wave and long-wave near infrared spectroscopy and its device development[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 17–39.
- [31] LI Z, LI Z, WU L, et al. Improved identification and classification accuracy of wooden breast by jointly using near-infrared spectroscopy and compression speed[J]. *Food Research International*, 2021, 161(11): 111795.