

拉曼光谱法快速检测猪肉脯中的掺伪鸡肉

杨佳硕¹, 邵怡璐¹, 曾佐凤¹, 何福萍¹, 段 烁^{1,2}, 毕 洁^{1,3},
戴 煌^{1,3*}, 王加华^{1,3}, 刘小丹^{1,3}, 舒在习^{1,3*}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 湖北省高校人文社会科学重点研究基地武汉轻工大学
食品安全研究中心, 武汉 430023; 3. 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 武汉 430023)

摘要: **目的** 建立拉曼光谱法快速、准确、无损地检测猪肉脯样品中掺假鸡肉的方法。**方法** 制备 33 份猪肉中掺入不同比例鸡肉的肉脯样品, 采集拉曼光谱数据, 分别采用标准正态变换、多元散射校正、卷积平滑、归一化、一阶导数等 5 种不同预处理方法, 对原始光谱数据进行预处理, 采用连续投影算法、竞争性自适应重加权算法及随机蛙跳算法对光谱数据进行特征波长筛选, 建立偏最小二乘法(partial least squares, PLS)模型对猪肉脯进行定性定量判别。**结果** 拉曼光谱数据经过多元散射校正处理的效果最佳, 竞争性自适应重加权算法竞筛选效果更佳, 构建猪肉脯中猪肉含量的 PLS 定量模型, 其预测集决定系数和预测均方根误差分别为 0.9762、7.2998。建立的 PLS 判别模型的校正集和预测集总判别正确率分别为 100.00%和 98.33%。**结论** 拉曼光谱分析技术可有效用于定性鉴别猪肉脯是否掺伪及定量分析猪肉肉脯中掺入鸡肉的比例, 为肉脯掺假的快速无破坏性检测的应用提供支持。

关键词: 拉曼光谱; 猪肉脯; 掺假; 变量筛选; 定量检测; 定性鉴别

Rapid detection of adulterated chicken meat in dried pork slice by Raman spectroscopy

YANG Jia-Shuo¹, SHAO Yi-Lu¹, ZENG Zuo-Feng¹, HE Fu-Ping¹, DUAN Shuo^{1,2},
BI Jie^{1,3}, DAI Huang^{1,3*}, WANG Jia-Hua^{1,3}, LIU Xiao-Dan^{1,3}, SHU Zai-Xi^{1,3*}

[1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. Food Safety Research Center, Key Research Institute of Humanities and Social Sciences of Hubei Province, Wuhan 430023, China; 3. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil of Ministry of Education in China, Wuhan 430023, China]

ABSTRACT: Objective To establish a rapid, accurate and non-destructive method for the detection of adulterated chicken in dried pork slice samples by Raman spectroscopy. **Methods** The 33 samples of dried pork slice mixed with different proportions of chicken meat were prepared, and the Raman spectral data were collected. Five kinds of different pretreatment methods, including standard normal transformation, multivariate scattering correction, convolutional smoothing, normalization and first derivative, were used to preprocess the original spectral data. The

基金项目: 湖北省教育厅中青年人才项目(Q20211602)

Fund: Supported by the Science and Technology Project of the Department of Education, Hubei Province (Q20211602)

*通信作者: 戴 煌, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品、农产品品质检测研究。E-mail: huangdai9@126.com

舒在习, 硕士, 教授, 主要研究方向为农产品加工与储藏工程。E-mail: shuzaixi@163.com

*Corresponding author: DAI Huang, Ph.D, Lecturer, College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China. E-mail: huangdai9@126.com

SHU Zai-Xi, Master, Professor, College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China. E-mail: shuzaixi@163.com

successive projections algorithm, competitive adaptive reweighted sampling algorithm and random frog algorithm were used to screen the characteristic wavelength of spectral data. A partial least squares (PLS) model was established for the qualitative and quantitative discrimination of dried pork slice. **Results** The results of Raman spectral data were best after multivariate scattering correction, and the competitive adaptive reweighted sampling algorithm was more effective in screening. The PLS quantitative model of pork content in dried pork slice was constructed, and the predictive set determination coefficient and predictive root-mean-square error were 0.9762 and 7.2998, respectively. The correct rate of calibration set and prediction lumped of the established PLS model was 100.00% and 98.33%, respectively. **Conclusion** Raman spectral analysis technology can be used to qualitatively identify the adulteration of dried pork slice and quantitatively analyze the proportion of dried pork slice mixed with chicken, which provides support for the application of rapid and non-destructive detection of adulteration of dried pork slice.

KEY WORDS: Raman spectroscopy; dried pork slice; adulteration; variables screening; quantitative detection; qualitative identification

0 引言

随着经济的发展,我国居民的消费能力不断升级,人们对休闲零食的需求日益增长。肉脯作为一类便捷易携带的传统休闲食品,具有味美、香气浓郁、高蛋白等优点深受广大消费者的喜爱。然而,部分不法商家在经济利益驱使下,用鸡肉、鸭肉等廉价肉代替价格较高的猪肉、牛肉来制作肉脯进行销售,以次充好,或者虚假标示肉脯中纯肉含量^[1-2],普通消费者难以辨别肉脯中的成分。鉴于近年来肉脯掺假事件层出不穷,315 国际消费者权益日中也曝光出许多肉品掺假掺伪事件^[3],严重损害消费者权益。因此,开发快速、准确且无损的检测方法来保证肉脯成品的品质,对维护市场秩序,保护消费者权益具有重要意义。

肉制品品质检测方法中,传统方法为聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)检测肉脯中猪肉基因,其操作复杂、检测速度慢并且会损坏样品,难以满足快速、简便的检测需求。新型快速无损检测技术,具有简单、快速、准确,又不损坏产品本身的优点,被广泛用于肉制品品质检测。光谱检测技术可以做到快速无损检测,其中拉曼光谱技术对水等极性物质极不敏感,肉品表面的水对其光谱信息影响极小,使得拉曼光谱技术在肉品掺假检测方面具有独特优势^[4]。拉曼光谱技术是基于非弹性散射原理分子结构表征光学测量技术^[4-6]。拉曼光谱可以在几秒钟内被捕获和分析,应用前景广泛^[7],相比于其他光谱技术,拉曼谱峰的位置和强度直接反映了物质的结构与含量信息,还具有快速、无损、“指纹”识别等优点^[8-10]。拉曼光谱检测技术可通过拉曼位移确定特征官能团结构,利用散射强度对比相应物质含量,从而鉴定肉类种类。

随着科学技术的不断进步,目前拉曼光谱检测技术已经成熟运用于肉类检测,包括检测肉类质量:测定牛肉、羊肉的感官品质^[11],通过测定鲜肉中肌红蛋白、血红蛋白的含量来确定肉色的变化^[12];测定肌肉品质(准确测

定猪肉、羊肉中各种脂肪酸的含量^[13-14]、肉的持水能力^[15]、检测肉类和鱼类的蛋白质含量^[16]、肉品新鲜度评价^[17])等。目前的大部分研究是针对不同动物肉的物质组成、含量及其蛋白质二级结构变化^[18-19],样本间特征峰差异明显,易于区别,例如区分白肉和红肉^[20]。拉曼光谱技术在肉类掺假检测方面的应用起步较晚,目前文献报道多集中在牛肉的掺假检测,其他肉类掺假检测较少^[21],且还未发现针对将廉价鸡肉掺入到猪肉中的研究。我国作为猪肉、鸡肉的生产 and 消费大国,研究利用拉曼光谱技术快速鉴别猪肉制品掺假鸡肉对保障食品质量,维护消费者权益具有现实意义。

本研究选用高品质的猪肉为掺假对象,以相对较低价位的鸡胸肉进行掺假,利用拉曼光谱技术对猪肉脯中掺入不同比例鸡肉的光谱特征信息进行检测。比较猪肉脯、鸡肉脯、掺伪肉脯拉曼光谱,分析光谱差异,结合化学计量学方法建立肉脯样品定性定量分析模型,结合连续投影算法、竞争自适应重加权采样算法和随机蛙跳算法提取光谱的特征变量,简化预测模型,实现掺鸡肉猪肉脯的快速鉴别,为猪肉脯品质快速检测提供技术支持。

1 材料与方法

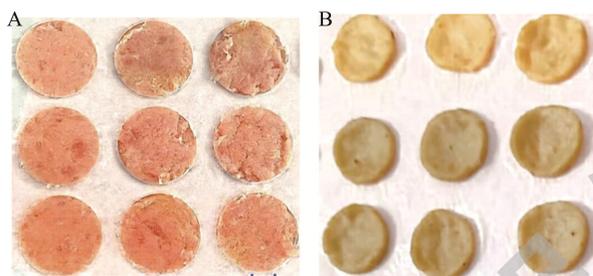
1.1 材料与仪器

新鲜猪里脊肉、鸡胸肉,均购自武汉市东西湖区当地商贸市场,用冰块低温运送至实验室,冷藏于 4℃冰箱中备用;白砂糖(食品级,广州福正东海食品有限公司);食盐(食品级,湖北盐业集团有限公司);抗坏血酸钠(分析纯,上海国药试剂有限公司);玉米淀粉(食品级,武汉味福调味料食品有限公司)。

MMF-DC33 型便携式多功能料理机(额定功率 37 W,美菱集团股份有限公司);MG33CB-三代烤箱(额定功率 1650 W,美的集团股份有限公司);InVia™ Qontor®雷尼绍共焦显微拉曼光谱成像系统(英国 Renishaw 公司)。

1.2 样品制备

将采购的猪肉、鸡肉分别洗净、切块, 鸡肉剔除可见脂肪后, 使用绞肉机分别使用小型绞肉机将鸡肉和猪肉搅碎, 搅碎 2 min, 重复 3 次(间隔 30 s 左右手动混匀), 分别搅成糜状。用电子天平准确称量肉糜, 将鸡肉糜按照不同比例混合到猪肉中, 所设梯度猪肉含量分别为 100%、90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%、0%, 混合肉糜样品采用绞肉机混合均匀。参考 GB/T 31406—2015《肉脯》规定, 并进行调整: 每 100 g 肉糜中加入 4 g 白砂糖(加水 3 mL, 溶解为蔗糖溶液)、0.6 g 食用盐、0.06 g 抗坏血酸钠、12.5 g 淀粉, 继续搅拌均匀。将混匀后的样本放入模具中, 压实并刮去多余的肉糜, 均匀完整脱模。将制作好的生肉脯置于烤箱内 150°C 左右烘烤 7 min, 取出刷蜂蜜水, 再放入烤箱内 150°C 烘烤 8 min, 制备完成的肉脯样品如图 1 所示。



注: A 烘烤前; B 烘烤后。

图 1 肉脯样本

Fig.1 Dried meat slice samples

1.3 实验方法

1.3.1 拉曼光谱数据的采集

提前将拉曼光谱仪打开 30 min 预热使设备稳定。拉曼光谱仪检测过程中, 选择 785 nm 激光作为激发光, 采用 50×镜头, 设定曝光时间为 10 s, 线激光光源的有效功率为 50%, 在室温 26°C, 湿度 30% 下进行, 扫描范围为 100~3200 cm^{-1} , 光栅 1200 L/mm。每个梯度的肉脯制备 3 个样品, 共制备样品 33 个, 单个平行样品切取 5 个薄片作为检测样本。将样品用小刀以合适的压力和滑动方式切取肉脯薄片(30 mm×30 mm×3 mm), 保证薄片的厚薄均匀透光度好, 大小合适且完整进行检测。每次拉曼测试时进行 3 次扫描, 取其平均光谱, 共采集 165 组数据用于后续分析。

1.3.2 数据处理的方法

对获得的拉曼光谱数据去除基线后进行预处理, 采取的预处理方法有: 卷积平滑(Savitzky Golay smoothing, SG)、多元散射校正(multiplication scatter correction, MSC)、标准正态变量变换(standard normal variate, SNV)、归一化(normalization, NZ)和一阶导数。将预处理之后样本数据按照 2:1 比例随机划分成校正集和预测集。采用偏最小二乘回归

(partial least squares regression, PLSR)建立定量分析模型分析掺假猪肉脯中猪肉实际含量, 采用偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)建立定性分析模型^[22], 判别猪肉脯是否掺假。采用校正集决定系数(R_c^2)、验证集决定系数(R_p^2)、交叉验证均方根误差(root mean square error of cross-validation, RMSECV)、预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)和预测偏差比(ratio prediction deviation, RPD)评价指标评价模型性能^[23]。

采集的原始拉曼光谱有 3193 个变量, 这些变量存在大量冗余信息, 相互干扰, 全波段建模会影响模型精确度, 降低运算速度。为了降低原始拉曼光谱数据的共线性以及提高模型的运算速度, 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)、随机蛙跳算法(random frog, RF)提取特征波长^[24], 优化模型性能。

1.4 数据处理

得到的拉曼光谱数据采用 Excel 2010 进行整理, 使用 Unscrambler 10.1 软件进行数据预处理, 在 MATLAB®R2020b 软件中利用 SPA、CARS 和 RF 筛选特征拉曼位移, 并建立 PLS-DA 和 PLSR 定性定量模型, 使用 Origin 2021 绘图。SPA 根据投影分析, 前向迭代搜索, 使光谱特征变量的共线性最小, 初始光谱特征变量数最小设置为 1, 最大设置为 1000, 结合 PLSR 模型效果筛选拉曼位移。CARS 采用自适应重加权采样技术搜寻最优变量组合, 蒙特卡罗抽样运行次数设置为 50, 交互验证次数为 5, 光谱特征变量数设置为 1000, 建立 PLSR 筛选拉曼位移。RF 结合强局部和全局搜索优点, 交叉验证潜在变量数量设置为 10, 模拟次数 20000, 初始模型中跳转变量数 2, 找出选入概率>0.01 的变量, 建立 PLSR 模型。

2 结果与分析

2.1 纯猪肉脯和掺鸡肉肉脯样品拉曼光谱特征分析

所有肉脯样本的拉曼光谱如图 2A 所示, 纯猪肉肉脯、不同比例的掺伪肉脯、纯鸡肉肉脯特征峰相似, 难以用观察到拉曼峰之间的区别。将 3 类肉脯的拉曼光谱求平均光谱进行对比, 分析特征峰, 如图 2B 所示。由图 2B 发现, 猪肉肉脯和鸡肉肉脯拉曼光谱显著共有特征峰在 479、520、623、723、758、856、941、1003、1052、1082、1128、1213、1263、1342、1401、1454、1558、1669、2773、2930、3070 cm^{-1} 波数的拉曼位移处。由于动物组织中脂肪含量在 90%以上, 其拉曼光谱数据主要来源于脂肪。动物脂肪和猪肉肌原纤维蛋白组织在 500~3100 cm^{-1} 范围内拉曼谱带的大致分布如表 1 所示^[25-28]。猪肉脂肪组织中最突出的特征峰值为 802、1296、1438 和 1655 cm^{-1} , 但有些区域也接近蛋白质二级结构区域(如酰胺 I)^[29]。与蛋白质二级结构变化有关的重要区

域是酰胺 I 和酰胺 III 区域, 其中 1635 、 1269 和 942 cm^{-1} 的条带归属于 α -螺旋结构, 1685 和 1237 cm^{-1} 的条带归属于 β -片状结构^[30-31]。在 $228\sim 356$ 、 $412\sim 440$ 、 $1053\sim 1058$ 、 $1373\sim 1396$ 、 $1790\sim 2000\text{ cm}^{-1}$ 波数的拉曼位移处, 两种肉脯样品的特征峰强度存在差异。肉脯样品的拉曼光谱差异主要是由于蛋白质和脂肪含量不同造成的。通过这些区间拉曼特征峰的强度差异, 可以较好地地区分猪肉脯和鸡肉脯。

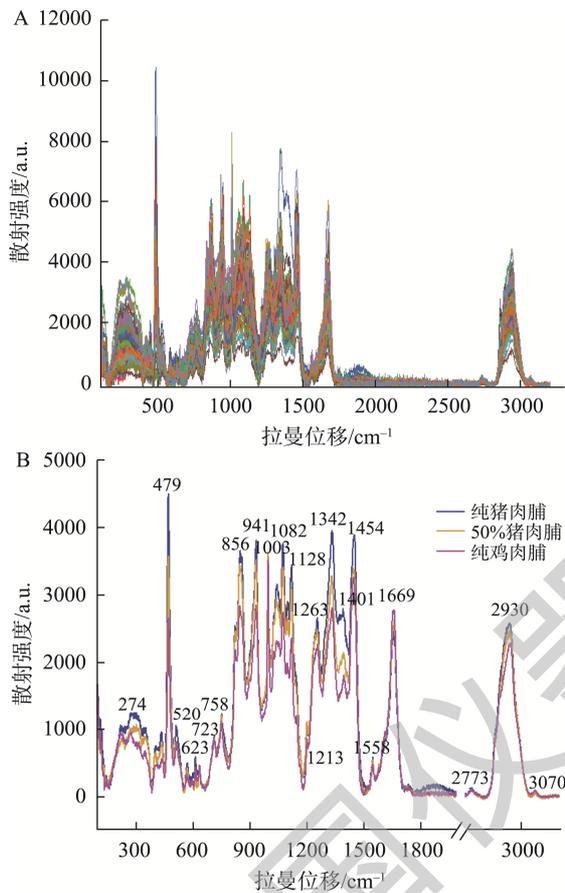


图 2 肉脯样本的拉曼光谱(A)和猪肉脯、50%猪肉脯和鸡肉脯拉曼光谱(B)

Fig.2 Raman spectra of dried meat slice (A) and dried pork, half pork and chicken slice (B)

表 1 部分基团拉曼位移与类型
Table 1 Raman shift and type of some groups

序号	拉曼位移/ cm^{-1}	基团类型
1	510~550	半胱氨酸中 C-C-S-S-C-C 基团振动
2	825, 852	酪氨酸苯环振动
3	758, 882	色氨酸苯环振动
4	1003	苯丙氨酸苯环呼吸振动
5	1032	$-(\text{CH}_2)_n-$ 中的 C-C 键
6	1080	脂肪中的 C-C 键拉伸
7	1125	脂肪中的 C-C 键同相拉伸
8	1213	磷脂和脂肪酸的反式对称磷酸基
9	1215	R-HC-CH-R 中的 C-H 键
10	1310~1330	酰胺III
11	1620~1640	酰胺I
12	1655	脂肪中的 C=C 键
13	1745	脂肪中的 C=O 键
14	2858	脂肪族分子的甲基 CH_3 的 C-H 键
15	2898	脂肪族分子亚甲基 CH_2 的 C-H 键

2.2 拉曼光谱数据预处理

猪肉和鸡肉组织成分不同, 其对应拉曼光谱在拉曼位移和强度上存在显著差异。猪肉和鸡肉在加工制成肉脯样本会受黏度、肉糜碎度、调味料的影响, 同时肉类蛋白产生的荧光噪声会使得拉曼光谱发生显著偏移。基于此, 需要选择合适的预处理方式对拉曼光谱数据进行预处理来有效地消除光谱荧光噪声以及其他物理因素的干扰, 从而建立良好稳定的模型, 提高模型的准确度。5 种光谱预处理方法对原始拉曼光谱进行预处理, 以全波段拉曼光谱为自变量, 猪肉脯中猪肉含量百分比为因变量, 建立鸡肉掺假肉脯的 PLSR 定量预测模型, 建模结果如表 2 所示。

由表 2 可得, 在掺伪肉脯样本进行定量时, 经 MSC 预处理后的 PLSR 定量模型, 具有较低的 RMSECV 和 RMSEP、较高的 R^2 值和 RPD 值, 表明所建立的 PLS 模型的精度最高, 定量效果最好。当因子数 $f=11$ 时, 得到最优定量模型, R_c^2 为 0.9918, R_p^2 为 0.8434, RMSECV 值为

表 2 不同预处理方法的 PLS 模型结果
Table 2 Results of PLS model with different pretreatment methods

预处理方法	f (因子数)	建模集			验证集	
		R_c^2	RMSECV	R_p^2	RMSEP	RPD
NONE	12	0.9861	5.4322	0.8027	19.4400	1.6545
SG	12	0.9649	8.6008	0.8271	18.3393	1.7538
MSC	11	0.9918	4.1874	0.8434	17.6111	1.8263
SNV	12	0.9954	3.1533	0.8414	17.6257	1.8248
NZ	14	0.9939	3.6177	0.8194	18.5891	1.7302
一阶导数	9	0.9696	8.0112	0.8253	19.5058	1.6489

4.1874, RMSEP 值为 17.6111, RPD 值达 1.8263, 可以较好地定量掺入猪肉脯中的鸡肉比例。结果表明, 拉曼光谱中干扰因素经预处理后得到了一定的消除, 为后续建立良好模型提供支持。

2.3 特征波长的选择及猪肉脯中掺伪鸡肉定量检测

从表 2 中可以看出, 经过 MSC 预处理后的 PLSR 定量模型经过预测集的 RMSEP 为 17.6111, 且 RPD 为 $1.8263 < 3^{[31-32]}$, 说明预处理后的拉曼光谱结合 PLSR 法对掺伪肉脯检测不够稳定, 还需要进一步优化。

为消除光谱中的冗余信息, 提高模型精确度, 对全波段拉曼光谱进行特征位移选取及建立 PLSR 定量模型。先对全波段的光谱数据进行 MSC 预处理, 然后采用 3 种变量筛选方法(SPA、CARS、RF)对掺鸡肉的猪肉脯 PLSR 定量模型进行优化, 结果如表 3 所示。经过 CARS 筛选后建猪肉脯定量模型效果最好, 从 3193 个拉曼位移中, 筛选出 247 个特征拉曼位移, 有效剔除了 92.26%的拉曼位移, CARS 特征筛选后的 PLS 定量模型预测集 R_p^2 和 RMSEP 分别为 0.9762、7.2998。对比表 2 中, CARS 特征

筛选后比未经过特征筛选建立的 PLSR 定量模型预测集的 R_p^2 明显增大, 对应的 RMSEP 由 17.6111 降低至 7.2998, 且 RPD 值达 $4.4060 > 3$, 模型性能明显提升。表明经 CARS 特征筛选后拉曼光谱结合 PLSR 法对掺假肉脯检测可行, 效果良好。

从图 3 可以看出, SPA 方法筛选出来的特征拉曼位移太少, 信息不够全, 导致构建的 PLSR 定量模型效果差。RF 方法筛选出来的特征拉曼位移主要为差异性特征拉曼位移, 其差异性大, 但拉曼强度变化小, 信息不足。从图 2 可以看出, 在猪肉中掺入鸡肉制成的肉脯, 其拉曼光谱显著共有特征峰的强度变化大。而 RF 方法未筛选出共有特征峰, 导致构建的 PLSR 定量模型效果差。经 CARS 方法筛选后特征拉曼位移不仅包括猪肉肉脯和鸡肉肉脯拉曼光谱显著共有特征峰, 还包括猪肉脯和鸡肉肉脯拉曼位移中差异性特征拉曼位移(228~356、412~440、1053~1058、1373~1396、1790~2000 cm^{-1})。因此, 利用经 CARS 方法筛选后特征拉曼位移所构建的 PLSR 定量模型预测效果更优。

表 3 不同特征拉曼位移筛选方法的 PLSR 模型结果
Tabel 3 Results of PLSR model with different characteristic wavelength screening methods

变量筛选方法	特征拉曼位移数	f (因子数)	校正集		预测集		RPD
			R_c^2	RMSECV	R_p^2	RMSEP	
SPA	14	5	0.5661	26.9940	0.5330	27.2346	1.1810
CARS	247	9	0.9914	4.2873	0.9762	7.2998	4.4060
RF	285	9	0.9831	5.9876	0.9195	12.6701	2.5385

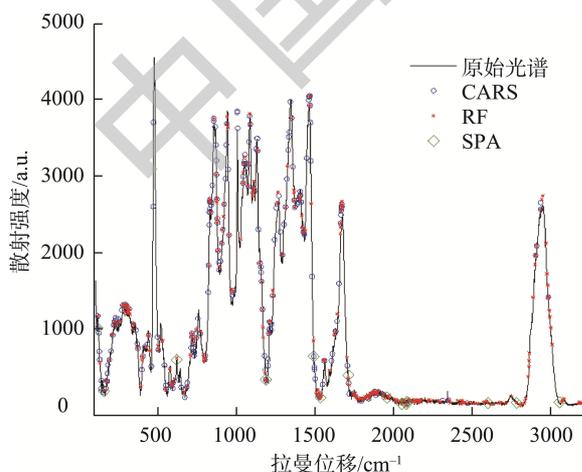


图 3 MSC 处理后筛选的特征拉曼位移

Fig.3 Selection of characteristic raman shifts after MSC

2.4 定性判别结果

根据前面研究结果, 采用 MSC+CARS 处理筛选拉曼光谱数据, 将纯猪肉肉脯、掺伪肉脯、纯鸡肉肉脯分别赋值 1、2、3, 建立掺伪 PLS-DA 定性判别模型, 结果如表 4 所示。由表 4 可以看出, 基于 MSC 预处理后的 CARS 筛选后的拉曼光谱建立的 PLSR 模型可以准确地识别出校正集和预测集的绝大部分样本, 由于肉脯中不相关成分的干扰问题, 使得预测集有 1 个样本被误判。在校正集的样品鉴定中, 有 3 类肉脯样本均判别正确; 在预测集的样品鉴定中, 有 1 个纯猪肉肉脯被误判为掺伪肉脯, 掺伪肉脯和纯鸡肉肉脯样本判别正确。校正集和预测集 PLS-DA 模型的总判别正确率分别为 100.00%和 98.33%。由此可见, MSC 预处理后的 CARS 筛选后拉曼光谱建立的 PLS-DA 模型可以成功定性判别掺伪肉脯。

表 4 PLS-DA 模型定性判别结果
 Tabel 4 Qualitatively discriminating results of PLS-DA model

类别	样本数	校正集		总判别正确率 /%	预测集		总判别 正确率/%
		正确判别样本数 /总数	正确判别率 /%		正确判别样本数 /总数	正确判别率 /%	
纯猪肉肉脯	15	10/10	100.00	100.00	4/5	80.00	98.33
掺伪肉脯	135	85/85	100.00		50/50	100.00	
纯鸡肉肉脯	15	10/10	100.00		5/5	100.00	

4 结 论

本研究针对猪肉脯中掺假鸡肉制成肉脯样品,运用拉曼光谱技术进行检测,通过特征峰强度分析,发现两种肉脯拉曼光谱差异主要来自蛋白质引起的拉曼位移。比较不同预处理方法,发现经 MSC 预处理后的 PLSR 定量模型最佳,具有较低的 RMSECV 和 RMSEP 和较高 R^2 值 RPD 值。采用 3 种不同特征波长处理方法,发现经过 CARS 筛选后建猪肉脯定量 PLSR 模型效果最好,有效剔除了 92.26% 的拉曼位移波段。对比采用全光谱波段,经 CARS 筛选后的 PLSR 模型性能明显提升,预测集的 R_p^2 由 0.8434 增大为 0.9762,对应的 RMSEP 由 17.6111 降低至 7.2998,且 RPD 值达 4.4060。建立的 PLS-DA 模型的校正集和预测集总判别正确率分别为 100.00% 和 98.33%,表明模型对猪肉脯掺伪的定性、定量分析检测性能均良好。本研究为肉脯品质的无损、定性和定量检测提供了理论依据,为肉脯品质的快速无损检测提供新方法,具有一定实际价值。实际猪肉脯品牌、类型众多,制作过程中添加掺伪物料复杂,为了使建立的模型的适用范围广,后续研究可以选择更多不同区域和加工方式的肉脯样本,提高模型的适应性和准确度。

参考文献

- 陈少江. 添加了鸡肉的肉脯能不能叫猪肉脯[N]. 中国市场监管报, 2021-9-14(3).
CHEN SJ. Can a dried meat with added chicken be called dried pork? [N]. China Market Regulation News, 2021-9-14(3).
- 刘兴义. 淘汰蛋鸡肉脯、肉松加工品质及适宜性研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
LIU XY. Study on processing quality and suitability of dried chicken slice and floss of spent laying hens [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.
- “315 观察”: 直播电商成为消费维权重灾区[J]. 中国眼镜科技杂志, 2023, 362(4): 19.
“315 Observations”: Live e-commerce becomes the hardest hit area of consumer rights [J]. Chin J Opt Sci Technol, 2023, 362(4): 91.
- WANG WX, PENG YK, SUN HW, *et al.* Spectral detection techniques for non-destructively monitoring the quality, safety, and classification of fresh red meat [J]. Food Anal Method, 2018, 11(10): 2707–2730.
- RYGULA A, MAJZNER K, MARZEC KM, *et al.* Raman spectroscopy of proteins: A review [J]. J. Raman Spectrosc, 2013, 44(8): 1061–1076.
- TALARI ACS, MOVASAGHI Z, REHMAN S, *et al.* Raman spectroscopy of biological tissues [J]. Appl Spectrosc Rev, 2015, 50(1): 46–111.
- HAOQUAN J, HAO L, ZHIKANG Y, *et al.* Application of Raman spectroscopy in the rapid detection of waste cooking oil [J]. Food Chem, 2021, 362: 130191.
- 李可, 闫路辉, 赵颖颖, 等. 拉曼光谱技术在肉品加工与品质控制中的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 298–304.
LI K, YAN LH, ZHAO YY, *et al.* Recent progress in application of Raman spectroscopy in meat processing and quality control [J]. Food Sci, 2019, 40(23): 298–304.
- JONES RR, HOOPER DC, ZHANG LW, *et al.* Raman techniques: Fundamentals and frontiers [J]. Nanoscale Res Lett, 2019, 14: 231.
- SHIPP DW, SINJAB F, NOTINGER I. Raman spectroscopy: Techniques and applications in the life sciences [J]. Adv Opt Phot, 2017, 9(2): 315–428.
- 张同刚, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 基于拉曼光谱法测定冷鲜牛肉中肌红蛋白相对含量[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 210–214.
ZHANG TG, LUO RM, LI YL, *et al.* Determination of myoglobin in chilled beef based on raman spectroscopy [J]. Food Sci, 2018, 39(2): 210–214.
- 卢明子. 拉曼光谱应用于高铁血红蛋白检测的探索研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
LU MZ. The application of Raman spectroscopy in methemoglobin [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- BERHE DT, ESKILDSEN CE, LAMETSCH R, *et al.* Prediction of total fatty acid parameters and individual fatty acids in pork backfat using Raman spectroscopy and chemometrics: Understanding the cage of covariance between highly correlated fat parameters [J]. Meat Sci, 2016, 111: 18–26.
- FOWLER SM, PONNAMPALAM EN, SCHMIDT H, *et al.* Prediction of intramuscular fat content and major fatty acid groups of lamb *M. longissimus lumborum* using Raman spectroscopy [J]. Meat Sci, 2015, 110: 70–75.
- PEDERSEN DK, MOREL S, ANDERSEN HJ, *et al.* Early prediction of water-holding capacity in meat by multivariate vibrational spectroscopy [J]. Meat Sci, 2003, 65(1): 581–592.
- TUMA R. Raman spectroscopy of proteins: From peptides to large assemblies [J]. J Raman Spectrosc, 2005, 36(4): 307–319.
- SOWOJDNICH K, SCHMIDT, *et al.* Application of diode-laser Raman spectroscopy for in situ investigation of meat spoilage. (CIGR symposium

- special issue.) [J]. Food Bioprocess Technol, 2010, 3(6): 878–882.
- [18] ZAJAĆ A, HANUZA J, DYMIŃSKA L. Raman spectroscopy in determination of horse meat content in the mixture with other meats [J]. Food Chem, 2014, 156: 333–338.
- [19] POUR SO, FOWLER SM, HOPKINS DL, *et al.* Differentiating various beef cuts using spatially offset Raman spectroscopy [J]. J Raman Spectrosc, 2020, 51(4): 711–716.
- [20] CHIMA RJ, FRASER MST, JESSEP W, *et al.* Rapid discrimination of intact beef, venison and lamb meat using Raman spectroscopy [J]. Food Chem, 2021, 343: 128441.
- [21] 韩爱云, 张振冉, 解立斌, 等. 拉曼光谱技术在肉类掺假检测方面的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(7): 50–54.
HAN AIY, ZHANG ZR, XIE LB, *et al.* Progress on the application of raman spectroscopy in meat adulteration detection [J]. Meat Res, 2021, 35(7): 50–54.
- [22] 陈喆, 云永欢, 马飞, 等. 基于特征脂肪酸的食用油中棉籽油掺假鉴别技术[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 122–127.
CHEN Z, YUN YH, MA F, *et al.* Adulteration detection of edible oil with cottonseed oil based on characteristic fatty acid [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(9): 122–127.
- [23] BIN J, AI FF, FAN W, *et al.* Rapid determination of unsaturated fatty acids in vegetable oil by raman spectroscopy and chemometrics [J]. Anal Lett, 2016, 49(6): 831–842.
- [24] 杨凯, 何昱廷, 李沃霖, 等. 基于近红外光谱技术检测全蛋粉掺假[J/OL]. 华中农业大学学报: 1–9. [2023-12-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1181.S.20230519.1234.006.html>
YANG K, HE YT, LI WL, *et al.* Detection of adulteration in whole egg powder based on near-infrared spectroscopy [J/OL]. J Huazhong Agric Univ: 1–9. [2023-12-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1181.S.20230519.1234.006.html>
- [25] EL-ABASSY RM, DONFACK P, MATERNY A. Visible Raman spectroscopy for the discrimination of olive oils from different vegetable oils and the detection of adulteration [J]. J Raman Spectrosc, 2009, 40(9): 1284–1289.
- [26] PHILIPPIDIS A, POULAKIS E, PAPADAKI A, *et al.* Comparative study using raman and visible spectroscopy of cretan extra virgin olive oil adulteration with sunflower oil [J]. Anal Lett, 2017, 50(7): 1182–1195.
- [27] LYNDGAARD LB, SORENSEN KM, VANDEN-BERG F, *et al.* Depth profiling of porcine adipose tissue by Raman spectroscopy [J]. J Raman Spectrosc, 2012, 43(4): 482–489.
- [28] XU XL, HAN MY, FEI Y, *et al.* Raman spectroscopic study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with textural characteristic [J]. Meat Sci, 2011, 87(3): 159–164.
- [29] BEATTIE JR, BELL SEJ, BORGAARD C, *et al.* Prediction of adipose tissue composition using Raman spectroscopy: Average properties and individual fatty acids [J]. Lipids, 2006, 41(3): 287–294.
- [30] KATHURIA C, MEHROTRA DM, NAVNIT K. Determining protein conformation using vibrational frequencies: An ensemble approach [J]. Int J Data Min Bioinf, 2020, 23(2): 142–159.
- [31] ANDERSEN PV, WOLD JP, GJERLAUG-ENGER E, *et al.* Predicting post-mortem meat quality in porcine longissimus lumborum using Raman, near infrared and fluorescence spectroscopy [J]. Meat Sci, 2018, 145: 94–100.
- [32] NICOLAI BM, BEULLENS K, BOBELYN E, *et al.* Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review [J]. Postharvest Biol Technol, 2007, 46(2): 99–118.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



杨佳硕, 主要研究方向为食品品质检测研究。

E-mail: shaoyilu_syl@163.com



戴煌, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品、农产品品质检测研究。

E-mail: huangdai9@126.com



舒在习, 硕士, 教授, 主要研究方向为农产品加工与储藏工程。

E-mail: shuzaixi@163.com