

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250224001

引用格式: 王磊, 盛清凯, 孙洪帅, 等. 基于人工智能的无损检测技术在猪肉品质评价中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 79–88.

WANG L, SHENG QK, SUN HS, *et al.* Research progress on pork quality evaluation methods based on non-destructive artificial intelligence technologies [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 79–88. (in Chinese with English abstract).

基于人工智能的无损检测技术在猪肉品质评价中的应用研究进展

王磊¹, 盛清凯², 孙洪帅³, 陈振⁴, 董燕婕¹, 蔡达¹, 赵善仓^{1*}

(1. 山东省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 济南 250100; 2. 山东省农业科学院畜牧兽医研究所, 济南 250100; 3. 潍坊海润华辰检测技术有限公司, 潍坊 261071; 4. 山东福藤食品有限公司, 枣庄 277100)

摘要: 猪肉品质是猪的重要经济性状, 快速准确开展猪肉品质评价, 对于猪肉加工和贸易至关重要。近年来, 随着人工智能算法与传感器技术的协同突破, 基于人工智能的猪肉品质无损检测技术已成为近年来的研究热点, 并在肉类行业得到了广泛应用。开展数字图像处理技术与人工智能学习算法相结合, 多传感器数据融合技术研究, 实现猪肉产品加工全程质量的自动化、实时检测, 是未来肉品质量安全无损检测的重要研究方向。本文综述了当前主要的猪肉品质无损检测关键技术, 包括近红外光谱、高光谱成像、拉曼光谱、荧光光谱、太赫兹光谱、电子鼻/电子舌技术和计算机视觉系统, 阐述了不同技术的原理、特点和应用现状, 并对不同技术存在的不足和未来的发展方向进行了讨论和展望, 旨在为无损检测技术在猪肉品质评价中的应用提供参考。

关键词: 猪肉品质; 人工智能; 无损检测; 品质评价

Research progress on pork quality evaluation methods based on non-destructive artificial intelligence technologies

WANG Lei¹, SHENG Qing-Kai², SUN Hong-Shuai³, CHEN Zhen⁴, DONG Yan-Jie¹,
CAI Da¹, ZHAO Shan-Cang^{1*}

(1. Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-Products, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China; 2. Institute of Animal Science and Veterinary Medicine, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China; 3. Weifang Hairuihuachen Testing Technology Co., Ltd., Weifang 261071, China; 4. Shandong Futeng Food Co., Ltd., Zaozhuang 277100, China)

ABSTRACT: Pork quality is an economically critical trait in swine production, necessitating rapid and accurate evaluation methods to optimize processing efficiency and ensure trade compliance. Recent advancements in artificial

收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 枣庄市自主创新及成果转化计划项目(2024GH03); 山东省重点研发计划项目(乡村振兴科技创新提振行动计划)(2023TZXD036)

第一作者: 王磊(1977—), 男, 副研究员, 主要研究方向为农产品风险预警与控制。E-mail: w85767679@163.com

*通信作者: 赵善仓(1972—), 男, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及营养。E-mail: shancangzhao@126.com

intelligence algorithms and sensor technologies have driven the development of non-destructive detection methods based on artificial intelligence, which are now widely applied in the meat industry. Integrating digital image processing with artificial intelligence learning algorithms and multi-sensor data fusion to achieve automated, real-time monitoring of pork quality throughout processing chains represents a pivotal research direction for ensuring meat safety and quality. This article summarized the current key technologies for non-destructive testing of pork quality, including near-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging, Raman spectroscopy, fluorescence spectroscopy, terahertz spectroscopy, electronic nose/tongue technology and computer vision systems, elaborated the principles, characteristics and application status of different technologies, and discussed and forecasted the shortcomings and future development directions of different technologies, aiming to provide reference for the application of non-destructive testing technology in pork quality evaluation.

KEY WORDS: pork quality; artificial intelligence; non-destructive testing; quality evaluation

0 引言

我国是猪肉生产与消费大国, 2024 年我国生猪存栏 42743 万头, 猪肉产量 5706 万 t, 生猪产业已成为我国农业的支柱产业。随着人们对食品安全及营养健康关注的日益增强, 对猪肉品质提出了更高的要求。畜禽肉类产品品质概念最早由英国诺丁汉大学 LAWRIE 博士于 1966 年在《Meat Science》专著中首次提出, 以后经过多次发展演变。关于肉品品质指标分类问题, 丹麦学者 ANDERSON 将肉品品质分为 5 类, 包括食用品质、营养品质、技术品质(加工品质)、卫生品质、人文品质^[1], 南京农业大学周光宏等^[2]也沿用上述肉品品质指标分类体系。目前, 我国已经形成强制性标准(食品安全国家标准)为核心, 推荐性标准(行业标准、地方标准、团体标准、企业标准)为主体的肉与肉制品的标准体系。其中, 肉与肉制品原料标准 13 项, 产品标准 21 项, 工艺规范 13 项^[3]。国际国内猪肉市场的激烈竞争极大地促进了猪肉品质评价技术的发展, 肉品品质检测与评价技术成已为肉品领域的研究热点。

猪肉品质评价主要有感官评价和仪器分析检测两种方法。感官分析是通过人的感觉器官对产品感官特性进行评价的科学, 存在主观性强、一致性差、难以量化等缺点。成分检测分析主要通过一系列指标检测对猪肉品质进行判定。目前常用的检测方法主要有高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)、气相色谱法(gas chromatography, GC)、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、酶联免疫吸附法(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)、胶体金免疫层析法(gold immunochromatographic assay, GICA)、生物传感器法(biosensor)等。采用先进的检测技术对猪肉不同的品质指标进行检测, 相较于感官评价更加客观、准确, 但肉品会受到损伤或破坏, 存在检测成本

高, 费时费力, 难以满足现代肉类生产企业自动化加工的需求。因此迫切需要一系列快速、准确、无损的检测技术对猪肉品质进行一致性评价, 以促进猪肉产品安全和质量的健康发展。

人工智能(artificial intelligence, AI)技术的应用已延伸至食品产业链的每一个环节, 在肉类品质无损检测的应用中变得越来越重要, 为肉类在线分级和评价提供了重要的技术支持^[4-5]。AI 技术是结合传感器、处理器(计算机)和其他组件, 利用被测物的力学、光学、声学、电学等相关信息, 对其物理特性、化学成分、结构特性等数据进行评价, 从而实现了对食品质量的无损、准确评价^[6-7]。多传感器数据融合(multisensor information fusion, MSIF)技术是一种将不同来源的多个传感器的数据结合起来判断或检测目标属性的方法。它旨在整合来自待测物多个来源信息, 以获得比单一技术更准确的结果。近年来, MSIF 技术已广泛应用于农产品和食品质量的评价与识别^[8-9]。

本文综述了当前猪肉品质无损检测的主要关键技术, 包括近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIRS)技术、高光谱成像(hyperspectral imaging technique, HSI)技术、拉曼光谱(Raman spectroscopy, RS)技术、荧光光谱技术、太赫兹光谱(Terahertz spectroscopy, THz)技术、电子鼻/电子舌(electronic nose/electronic tongue, EN/ET)技术和计算机视觉系统(computer vision technology, CVs), 阐述了不同技术的原理、特点和应用现状, 以及面临的挑战和未来的发展方向, 以期 AI 技术用于改善肉品质量安全检测提供必要的理论和技术参考。

1 基于光谱学的无损检测技术

1.1 NIRS 技术

NIRS (780~2526 nm), 介于可见光和中红外光之间, 该谱区内的光谱信息主要反映了物质中含氢(C-H、O-H、N-H)等基团的振动情况, 能够揭示物质的结构和组成信息。在猪肉新鲜度检测方面, 刘瑜明等^[10]研究猪肉 NIRS

信息和总挥发性碱性氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、pH 和含水率的关系, 建立了猪肉 TVB-N、pH 和含水率的竞争性自适应重加权算法(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)结合偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)模型, 发现近红外波段区域与猪肉 TVB-N、pH、含水率存在显著相关性, 其中训练集相关系数(R_C)分别为 0.9471、0.9988、0.9971, 均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)分别为 1.2088、0.087、0.0015; 测试集相关系数(R_P)分别为 0.9275、0.9630、0.9459, RMSEP 分别为 1.6836、0.0517、0.0056。QU 等^[11]应用 MSIF 技术, 以 TVB-N 和 pH 为新鲜度评价指标对猪肉新鲜度进行评价, TVB-N 相关系数(R)和 RMSEP 分别为 0.8618 和 3.910, pH 相关系数(R)和 RMSEP 为 0.9379 和 0.1046。两项研究结果表明, NIRS 结合 MSIF 方法有望实现猪肉新鲜度的快速无损检测, 为肉类品质监控提供新方法; 在猪肉品质分类识别方面, 张保霞^[12]应用主成分分析(principal component analysis, PCA)对猪肉光谱数据处理, 筛选出猪肉光谱特征波长, 运用樽海鞘群算法支持向量机(salp swarm algorithm-support vector machine, SSA-SVM)模型进行参数优化, 在训练集和测试集上, SSA-SVM 模型的猪肉品质识别正确率最高。训练集上, 白肌肉(pale, soft and exudative, PSE)、正常肉(reddish-pink, firm and non-exudative, RFN)和黑干肉(dark, firm and dry, DFD)识别的正确率分别为 96.15%、97.06%、96.15%; 测试集上, PSE、RFN 和 DFD 识别的正确率分别为 100.00%、94.11%、92.31%, 实现了不同品质猪肉高效鉴别。刘媛媛等^[13]将粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)引入 SVM 进行参数优化, 分类器对训练集中 PSE、REN 和 DFD 的回判识别率分别为 88.46%、94.11%和 92.31%; 测试集中 PSE、RFN 和 DFD 预测正确率分别为 84.62%、94.11%和 84.62%。该分类器简单、预测准确率高, 为生鲜猪肉综合品质在线分级提供技术参考。

NIRS 技术近年来在肉类品质快速无损检测领域的应用见表 1。NIRS 技术需通过化学计量学模型建立样本光谱与待测指标之间的关联。尽管具有快速无损等优势, 但其存在建模周期长, 检测的精准度往往受限于模型的质量。在未来研究中需要加强创新模型构建方法、研究同一模型在不同光谱设备之间的应用转化以增强模型的适用性、研发便携带手持式的 NIRS 专用设备, 加强 NIRS 技术与其他技术相融合, 进一步完善 NIRS 技术的应用效果。

1.2 HSI 技术

HSI 是光谱技术与二维成像技术相融合, 获取目标物的一维光谱信息和二维空间信息, 应用化学计量学方法对获得的数据进行分析, 具有“图谱合一”的特性, 在营养成分(水分、蛋白、脂肪)、食用品质(色泽、嫩度、新鲜度)以及安全品质(微生物、掺假)检测方面应用较为广泛^[14-15]。

表 1 基于 NIRS 技术检测肉类品质的研究进展
Table 1 Research progress on meat quality detection based on NIRS technology

| 指标 | 化学计量学模型 | 性能 | 参考文献 |
|-------|-----------------|---|------|
| TVB-N | PLSR | 训练集: 0.9471; 测试集: 0.9275 | [10] |
| TVB-N | MSIF | 相关系数: 0.8618 | [11] |
| pH | PLSR; CARS-PLSR | 训练集: 0.9988; 测试集: 0.9630 | [10] |
| pH | MSIF | 相关系数: 0.9379 | [11] |
| 含水率 | PLSR; CARS-PLSR | 训练集: 0.9971; 测试集: 0.9459 | [10] |
| 猪肉品质 | PCSSA-SVM | 训练集: PSE 96.15%、REN 97.06%、DFD 96.15% 测试集: PSE 100.00%、REN 94.11%、DFD 92.31% | [12] |
| 猪肉品质 | PSO 引入 SVM | 训练集: PSE 88.46%、REN 94.11%、DFD 92.31% 测试集: PSE 84.62%、REN 94.11%、DFD 84.62% | [13] |

MA 等^[16]采用了一种新型的单次拍摄 HSI 传感器, 结合反向传播神经网络(back propagation neural network, BP-NN)和 PLSR 预测模型, 对多种加工猪肉的蛋白质含量进行了评估。结合吸光度光谱 BP-NN 模型评估各种加工猪肉的蛋白质含量, 其交叉验证集的决定系数(R^2)为 0.8318, RMSEP 为 8.38 mg/g。研究表明, 利用单次拍摄 HSI 技术可有效测定加工猪肉蛋白质含量。KAMRUZZAMAN 等^[17]研究了 400~1000 nm 光谱范围内的高光谱实时成像系统, 用于监测红肉(牛肉、羊肉和猪肉)中水分含量的变化, 多元线性回归(multiple linear regression, MLR)模型简单, 易于理解, 在预测含水量方面表现良好, $R^2_p=0.97$, RMSEP=2.19%, RPD=4.04, HSI 与多元分析相结合, 在肉类行业实时测定水分含量方面具有巨大潜力。CHENG 等^[18]开展了荧光高光谱成像(fluorescence hyperspectral imaging technique, F-HSI)与 EN 相结合的猪肉新鲜度无损检测技术研究, 应用混合融合网络模型(hybrid fusion attention network, HFA-Net)获得了最佳的预测结果($R^2=0.9373$, RMSE=0.4897 mg/100 g), 建立了基于 HFA-Net 的 F-his 和 EN 数据融合的一种无损检测猪肉新鲜度的新方法。BONAH 等^[19]运用可见-近红外(visible-near infrared, Vis-NIR) HSI 和 PLSR, 对新鲜猪背最长肌中细菌类食源性病原体(大肠杆菌 O157 和金黄色葡萄球菌)的污染情况进行快速监测, 基于遗传算法的变量组合群体分析(variable combination population analysis with genetic algorithm, VCPA-GA)混合策略的大肠杆菌预测模型, 预测

集决定系数(R^2_p)=0.9977、RMSEP=0.1532、性能偏差比(ratio of performance residual prediction deviation, RPD)=13.5910; 金黄色葡萄球菌预测模型: R^2_p =0.9960、RMSEP=0.1225、RPD=16.8032, 实现猪肉样本上食源性病原体分布的可视化, 为细菌污染评估提供了一种新方法。BARBIN 等^[20]开发了一种推扫 NIR-HIS (900~1700 nm)检测冷藏猪肉在储存期间的菌落总数(total viable-bacteria count, TVC)和嗜冷菌数(psychrotrophic plate count, PPC), TVC 和 PPC 的 r^2 分别为 0.86 和 0.89, 获得了最佳回归。ZHAO 等^[21]建立了肉品高光谱图像高斯回归系数分布模型(gaussian process regression, GPR)对肉类样品的掺假水平开展评估, 实现肉类掺假可视化检测, 最佳方法的平均误差(average relative error, ARE)、相关系数(r)和 RMSEP 分别为 2.8%、0.9831 和 0.0319。AL-SARAYREH 等^[22]应用 HSI 系统结合 NIR 和 VIS, 建立了三维卷积神经网络(3D convolutional neural networks, 3D-CNN)模型, 最终建立的高光谱 HIS-NIR 和 HIS-VIS 分类模型分类精度分别达 96.9%和 97.1%。

HSI 技术近年来在肉类品质快速无损检测领域的应用见表 2。HSI 技术是一项新兴且发展迅速的光电探测融合技术, LI 等^[23]将 NIR 与 CVs 相结合, 促进了光谱和图像融合。HSI 技术被认为是近年来发展最快、应用最广泛的肉类质量和安全无损检测技术之一, 但是 HSI 数据的解析高度依赖于化学计量学模型, 如 PLSR、SVM 和深度学习模型(如 CNN)等。小型化、工业化的高光谱设备开发不仅是技术发展的必然趋势, 也是推动高光谱技术从实验室走向实际应用的关键一步。

表 2 基于 HSI 技术检测肉类品质的研究进展

Table 2 Research progress on meat quality detection based on HSI technology

| 指标 | 化学计量学模型 | 性能 | 参考文献 |
|-----------|------------------|---|------|
| 蛋白质 | BP-NN、PLSR | $R^2_p=0.8318$, RMSECV=8.38 mg/g | [16] |
| 大肠杆菌 | VCPA-GA+ PLSR | $R^2_p=0.9977$, RMSEP=0.1532, RPD=13.5910 | [17] |
| 金黄色葡萄球菌 | VCPA-GA+ PLSR | $R^2_p=0.9960$, RMSEP=0.1225, RPD=16.8032 | [17] |
| TVC 与 PPC | NIR_HSI | TVC: $R^2=0.86$, PPC: $R^2=0.89$ | [18] |
| 猪肉新鲜度 | HFA-Net | $R^2=0.9373$, RMSE=0.4897 mg/100 g | [20] |
| 肉类掺假水平 | GPR | ARE=2.8%, $r=0.9831$, RMSEP=0.0319 | [21] |
| 肉品分类 | 3D-CNN | 分类精度: NIR=96.9%, VIS=97.1% | [22] |

1.3 RS 技术

RS 是一种基于拉曼散射效应的光谱分析技术, 可以提供样品的振动和转动信息, 从而揭示样品的结构和成分^[24],

具有无损、适宜水相分析、分子特异性、多组分同步分析、实时监测等特点, 在肉品的 pH、嫩度、颜色、保水性、营养成分、兽药残留、致病菌、掺假识别等方面有不同程度的应用^[25]。目前 RS 已发展为表面增强拉曼光谱(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS)、空间偏移拉曼光谱(spatially offset Raman spectroscopy, SORS)和拉曼化学成像(Raman chemical imaging, RCI)技术。SERS 是通过金纳米颗粒等基底的等离子体共振效应, 使吸附分子的拉曼信号增强 $10^5\sim 10^{14}$ 倍, 从而显著降低痕量成分的检出限(limit of detection, LOD); SORS 是通过分离激光照射区和信号采集区的空间位置, 通过空间偏移来获取样品表层及深层组织的梯度信息, 适用于分层结构的分析; RCI 通过大范围扫描获得包含二维空间坐标(X, Y)与光谱维度(V)的三维数据集, 可实现化学成分分布的可视化表征^[26]。

翟晨等^[27]基于 SERS 技术建立了动物组织中沙丁胺醇和盐酸克伦特罗的快速检测方法, 检测范围分别为 0.01~5 mg/kg 和 0.02~5 mg/kg, LOD 分别为 0.01 mg/kg 和 0.02 mg/kg, 其含量与实测值决定系数(R)分别为 0.912 和 0.921。YUAN 等^[28]开发了多壁碳纳米管氧化锌及纳米银复合材料(multi-walled carbon nanotubes@zinc oxide/silver nanocomposite, MWCNTs@ZnO/Ag)复合 SERS 基底, 通过 ZnO 的化学增强效应和 MWCNTs 的电磁协同作用使恩诺沙星的 LOD 降至 0.43 nmol/L。WANG 等^[29]采用 RCI 技术实现了猪肉中氧氟沙星、氯霉素和磺胺二甲嘧啶的同时测定, 预测模型相关系数(R)分别为 0.978、0.986 和 0.984。结合“像素比”法, 该技术可直观实现兽药残留空间分布特征, 为多组分无损定量提供新策略。KANG 等^[30]通过 SERS 结合光纤探头分析猪肉皮下脂肪, 发现拉曼强度比脂肪层厚度呈非线性相关, 基于 POLS 回归模型可定量评估脂肪层厚度。此外 RS 通过 PLSR 模型预测肉类 TVC、乳酸菌、肠杆菌、假单胞菌、热杀索丝菌、酵母菌和霉菌数等微生物含量, 快速鉴定肉类腐败程度^[31-32]。RS 技术可有效用于定性鉴别猪肉掺假及定量分析猪肉中掺入鸡肉的比例, 为猪肉掺假的快速、无损检测的应用提供技术支持^[33]。当前 SERS 与 RCI 技术在生物医学领域已趋成熟, 但在肉品检测中仍需解决基底稳定性、标准数据库构建等问题以推动产业化应用。

便携式手持 RS 技术在肉品工业生产应用成为研究的热点。SCHEIER 等^[34]应用便携式手持 RS 结合全谱 PLSR 模型($R^2=0.78$ 和 RMSECV=0.2)预测猪肉早期 pH 变化, RS 在肉类加工过程中具有在线检测 pH 和肉品质潜力的潜力。NACHE 等^[35]利用 RS 与蚁群优化相结合, 明确 $pH_{45 \text{ min}}$ 和 $pH_{24 \text{ hr}}$ 可作为猪肉品质的关键评价指标, 为肉类质量快速无损检测提供技术有效的技术手段。SCHEIER 等^[36]使用便携式拉曼系统, 通过 PLSR 将其与 RS 进行关联。研究表明 RS 与以下指标呈现出强相关性: $pH_{45 \text{ min}}$ ($R^2_{cv}=0.65$,

RMSECV=0.17)、 $\text{pH}_{24 \text{ hr}}$ ($R^2_{\text{cv}}=0.68$, RMSECV=0.09)、 L ($R^2_{\text{cv}}=0.64$, RMSECV=1.9)、 b ($R^2_{\text{cv}}=0.73$, RMSECV=0.6)、滴水损失 ($R^2_{\text{cv}}=0.73$, RMSECV=1.0%) 以及宰后 72 h 的剪切力 ($R^2_{\text{cv}}=0.7$, RMSECV=4 N)。赵芳等^[37]基于 RS 技术对猪肉皮下脂肪样本中脂肪酸不饱和程度(碘值)进行了定量分析。采用区间 PLSR 方法筛选最优特征波段, 在此技术上建立碘值预测模型。结果表明该模型预测性能优异, 其预测集相关系数 R_p 达到 0.9463、RMSEP 达到 2.5391×10^{-2} 。白京等^[38]进一步将 RS 技术化学计量学方法结合, 实现了冷冻猪肉的脂质氧化程度的快速检测。通过便携式 RS 系统采集光谱数据, 采用 CARS-PLSR 建模方法, 建立了酸价和过氧化值的定量预测模型。其中酸价模型的 R^2_{cv} 为 0.88、RMSECV 分别为 0.31; 过氧化值的 R^2_{cv} 为 0.84、RMSECV 为 2.33。在独立验证集上, 两个模型的预测性能保持稳定, 范围误差比分别为 2.59 和 1.90。董鑫鑫等^[39]通过回归系数法(regression coefficient, RC)筛选特征波长, 优化了 PLSR 模型的波段选择。研究发现仅需 20% 的特征波段就可获得理想的预测效果, TVB-N 模型相关系数(R)为 0.933、pH 模型的相关系数(R)为 0.880。该模型证实便携式 RS 在猪瘦肉新鲜度快速检测中具有显著的优势, 特别是在 TVB-N 含量预测方面展现出良好的应用前景, 为肉类新鲜度的现场快速无损检测提供了新的技术手段。

RS 技术近年来在肉类品质快速无损检测领域的应用见表 3。RS 可对食品中的重金属、病原体、环境污染物、微塑料、农药、食品添加剂等进行快速准确的鉴别, 且具

有样品前处理简便、重现性好的优点^[40]。目前 RS 技术在肉类检测领域得到广泛的应用, 探测肉类加工过程中的质量变化规律及肉类安全评价机制依然是 RS 在肉类科学研究和工业生产应用中的重点和方向。

1.4 荧光光谱技术

荧光光谱技术是基于物质的荧光特性进行定性、定量分析的方法。由于不同物质的分子结构和电子能级分布不同, 其荧光发射光谱在峰形特征、峰位位移及强度分布存在差异, 通过分析待测物的荧光光谱, 可以获取定性和定量信息。目前, 该技术在分析领域主要采用两种典型方法: 荧光激发发射矩阵光谱(fluorescence excitation-emission matrix, EEM)和同步荧光光谱(synchronized fluorescence spectrum, SFS)。其中, EEM 是一种三维荧光光谱技术, 它通过对荧光激发光谱和发射光谱的综合分析, 获取物质的光谱信息, 从而表征物质的性质和组成; SFS 是一种特殊的荧光技术, 同时扫描激发和发射两个波长, 由荧光信号与对应的激发波长(或发射波长)构成光谱图。

荧光光谱技术因其灵敏度高、快速和无损检测的特点, 已在肉类产品的质量检测领域得到广泛的应用^[41]。LIU 等^[42]创新性采用 SFS 技术实现冷藏牛肉新鲜度指标 TVB-N、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)和 TVC 的无损检测, 通过 PLS 算法构建了多指标预测模型, TVB-N 和 TBA 值的标准相关系数(R_c^2)和预测相关系数(R_p^2)均大于 0.900, TVC 值的 R_c^2 和 R_p^2 分别为 0.912 和 0.871。LEE 等^[43]将高

表 3 基于 RS 技术检测肉类品质的研究进展
Table 3 Research progress on meat quality detection based on RS technology

| 指标 | 化学计量学模型 | 性能 | 参考文献 |
|--|-----------|--|------|
| 瘦肉精 | - | 检测范围: 肌肉 0.01~5 mg/kg、肝脏 0.02~5 mg/kg; LOD: 肌肉 0.01 mg/kg、肝脏 0.02 mg/kg; R : 肌肉 0.912、肝脏 0.921 | [27] |
| 恩诺沙星 | - | LOD: 0.43 nmol/L; 5.87 nmol/L | [28] |
| 氧氟沙星、氯霉素、磺胺二甲嘧啶 | - | R : 0.978、0.986 和 0.984 | [29] |
| pH | PLSR | $R^2=0.78$; RMSECV=0.2 | [34] |
| $\text{pH}_{45 \text{ min}}$ 、 $\text{pH}_{24 \text{ hr}}$ 、 L 、 b 、滴水损失、宰后 72 h 剪切力 | PLSR | pH_{45} : $R^2_{\text{cv}}=0.65$, RMSECV=0.17 pH pH_{24} : $R^2_{\text{cv}}=0.68$, RMSECV=0.09 pH L : $R^2_{\text{cv}}=0.64$, RMSECV=1.9 b : $R^2_{\text{cv}}=0.73$, RMSECV=0.6 pH 滴水损失: $R^2_{\text{cv}}=0.73$, RMSECV=1.0% 宰后 72 h 剪切力: $R^2_{\text{cv}}=0.7$, RMSECV=4 N | [36] |
| 碘值 | PLSR | 预测集 $R_p=0.9463$, RMSEP= 2.5391×10^{-2} | [37] |
| 酸价和过氧化值 | CARS-PLSR | 酸价: $R^2_{\text{cv}}=0.88$ (建模集)、0.76(验证集); RMSECV=0.31(建模集)、0.17(验证集), 范围误差比 2.59; 过氧化值: $R^2_{\text{cv}}=0.84$ (建模集)、0.75(验证集), RMSECV=2.33(建模集)、1.87(验证集), 范围误差比 1.90 | [38] |
| TVB-N、pH | RC-PLSR | TVB-N 模型 $R=0.933$; pH 模型 $R=0.880$ | [39] |

注: -表示无此项, 表 4、5 同。

光谱荧光成像技术与最小二乘支持向量机 (least squares-support vector machine, LS-SVM) 结合, 建立猪肉 TVB-N 预测模型, LS-SVM 模型预测数据集的决定系数 (R_p^2) 和预测标准误差 (square error of prediction, SEP) 分别为 0.967 和 1.902%。LIU 等^[44]基于荧光探针结合智能手机建立一种便携式、可视化监测肉类新鲜度的新型荧光平台, 制备的基于萘的荧光化合物对腐胺和尸胺表现出卓越的传感性能, 包括高对比度的荧光颜色转变(从红色变为蓝色)、响应时间快速(约 30 s)、选择性和灵敏度高(腐胺 LOD: 2.69 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 尸胺 LOD: 6.11 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 可用于实时、便携且可视化地监测猪肉新鲜度。DENG 等^[45]合成了基于香豆素的荧光探针, 用于检测肉和虾的新鲜度。532 nm 发射波长下, 探针溶液的荧光强度与氨浓度呈线性相关, 随着氨浓度的增加, 探针显示出从绿色到蓝色的荧光发射转变, 线性范围为 0~1.00 mmol/L, $R^2=0.9957$, 对氨的 LOD 为 0.652 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 。HASHEMIAN 等^[46]发明了一种基于水凝胶的高灵敏度荧光氨传感器, 用于测量肉类中的氨水平。该传感器以黄芩胶结合金属有机框架和从黄芩中提取的天然染料构建的水凝胶, 化学和物理性质稳定, 该传感器在氨检测方面呈现出两个线性范围: 0~5.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 5.42~0.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$, LOD 为 49.6 ng/kg, 并实现了基于智能手机的荧光检测分析和信号实施传输的现场实时检测。

荧光光谱技术近年来在肉类品质快速无损检测领域的应用见表 4。荧光光谱技术在肉品质量安全检测中得到了较大的发展, 但仍存在一些局限性。还需要开展更多研究, 以确定在这类复杂体系中, 究竟是哪些荧光团决定了荧光特性, 以及哪些因素会影响荧光现象, 还需在检测的智能化、设备便携式、化学计量学方法和荧光传感器相结合开展进一步研究, 以提高荧光光谱技术在肉品质量安全领域的应用。

表 4 基于荧光光谱技术检测肉类品质的研究进展
Table 4 Recent studies on meat quality detection using fluorescence spectroscopy

| 指标 | 化学计量学模型 | 性能 | 参考文献 |
|---------------|---------|---|------|
| TVB-N、TBA、TVC | PLS | TVB-N 和 TBA 的 R_c^2 、 R_p^2 均大于 0.900 TVC 值的 R_c^2 : 0.912, R_p^2 : 0.871 | [42] |
| TVB-N | LS-SVM | 预测数据集 R_p^2 : 0.967, SEP: 1.902% | [43] |
| 腐胺、尸胺 | - | 腐胺 LOD: 2.69 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 尸胺 LOD 为: 6.11 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | [44] |
| 氨浓度 | - | 线性范围: 0~1.00 mmol/L, $R^2=0.9957$ LOD: 0.652 $\mu\text{mol}/\text{L}$ | [45] |
| 氨浓度 | - | LOD: 49.6 ppb, 线性范围: 0~5.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 线性范围: 5.42~0.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | [46] |

1.5 THz 技术

THz 是指频率在 0.1 THz 到 10 THz 范围的电磁波, 位于中红外和微波范围之间, 不同材料对太赫兹波的吸收与反射不同, 形成特定光谱, 这个光谱被称之为材料特有的“指纹谱”。太赫兹波光子能量小, 不会对实验人员和样品造成电离危害, 是一种安全的食品检测手段^[47]。太赫兹在食品行业的主要应用包括水分检测、异物检测等^[48]。齐亮等^[49]采用衰减全反射模式采集不同猪肉组织的 THz, 通过建立不同种猪肉组织的 THz 与猪肉品质的相关模型, 实现猪肉品质的快速无损检测。太赫兹时域光谱技术(Terahertz time domain spectrum, THz-TDS)是通过分析携带介质信息(如振幅和相位等)的宽频带太赫兹脉冲, 从而对材料内部信息进行提取的一种光谱检测方法。由于水分强烈吸收 THz 波影响其对肉的检测, 齐亮等^[50]进一步采用一阶微分预处理, 基于 BP-NN, 建立 THz 预测模型, 能够有效快速检测猪肉的新鲜度。HU 等^[51]率先将 THz 应用于鱼类产品质量安全检测, 系统研究了鱼骨等内源性异物和金属、塑料、牙签等外源性异物的检测。ZHANG 等^[52]采用电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy EIS)和 THz-TDS 技术对三文鱼腐败过程进行监测, 研究结果表明基于反射模式的 THz-TDS 可以实现鲑鱼新鲜度的非侵入性无损检测。

THz 技术近年来在肉类品质快速无损检测领域的应用见表 5。尽管 THz 技术在食品领域的应用已取得显著进展, 但仍存在灵敏度较低的问题。需要应用复杂的数学方法提取更多的参数, 应用化学计量学与太赫兹光谱技术相结合开展研究, 以提高 THz 检测的精度和灵敏度^[53]。

表 5 基于 THz 技术检测肉类品质的研究进展
Table 5 Research progress on meat quality detection based on THz technology

| 指标 | 化学计量学模型 | 性能 | 参考文献 |
|-------|---------|-----------|------|
| 品质 | - | 快速无损 | [49] |
| 猪新鲜度 | BP-NN | 猪肉新鲜度 | [50] |
| 内源性异物 | - | 异物 | [51] |
| 腐败 | THz-TDS | 非侵入性和非破坏性 | [52] |

2 基于计算机的仿生技术

2.1 EN/ET 技术

EN 技术是一种模拟生物嗅觉系统的电子传感技术, 通过传感器阵列对挥发性成分的反应生成“指纹”数据, 实现气味的识别与分析, 近年来, EN 在肉类新鲜度、挥发性成分及掺假检测方面展现出良好的应用潜力。蒙万隆等^[54]通过建立 EN 传感器特征信号与 TVB-N 含量相关性模型实

现对肉类新鲜度的有效评估, 所构建的 2 个模型训练组相关系数达 0.994、0.985 ($P<0.01$), 预测组的相关系数达到 0.984、0.979 ($P<0.01$), 表明该方法的预测性能良好。王丹凤等^[55]利用 GC-EN, 结合 PCA 和 PLSR, 对在 4 °C 和 20 °C 条件下保存不同天数的猪肉的挥发性气味的成分进行检测, 通过 PLS 建立 EN 输出信号与 TVC 之间的对应关系, 4 °C 时 $R=0.9003$, 20 °C 时 $R=0.9940$, 线性关系均良好, PCA 可以区分不同储藏天数的猪肉样品。周慧敏等^[56]利用 EN 结合线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA), 对市售坨坨猪肉样品中风味物质进行快速检测, 可有效辨别猪肉中挥发性成分的差异。王永瑞等^[57]应用 EN 开展不同掺入比例(0%、25%、50%、75%、100%)鸭肉的烤羊肉鉴定, 研究表明 1-辛醇、1-戊醇、己醛、乙酸、十二烷等主要化合物含量在掺假样品中存在显著差异, 为肉品的质量鉴别与品质评价提供有效的鉴定方法。

ET 技术是一种基于交叉敏感传感器阵列识别样品的特征成分的味觉分析系统, 通过采集样品电化学信号, 结合化学计量学方法实现样品的定性、定量分析^[58]。ET 模拟人类味觉系统实现样品检测, 具有操作简单, 分析快速、高效等特点, 在保质期、质量控制、安全检测、掺假和真实性、原产地识别等方面已广泛应用^[59]。GIL 等^[60]应用 ET 监测冷藏条件下新鲜猪肉的理化和微生物变化, 结果表明 pH 与电位测量数据之间存在显著的相关性。郭金英等^[61]应用 ET 结合色谱技术分析蒸煮猪肉滋味物质。范文教等^[62]将 ET 应用于川味香肠品质评价, 通过对获得的 ET 数据进行 PCA 和判别因子分析, 可以有效区别不同发酵时间的川味香肠。TIAN 等^[63]采用 ET 检测羊肉产品中掺杂的猪肉成分, 基于 LDA 模型可以对掺入不同比例猪肉(0%、20%、40%、60%、80%和 100%)的羊肉混合样品进行有效鉴定。

EN/ET 近年来在肉类品质快速无损检测领域的应用见表 6。相较于传统方法, EN/ET 传感技术能够快速、无损地检测出食品成分的细微差异。传感器技术、数据处理算法以及机器学习技术的持续改进, 将进一步提升 EN/ET 的性能。然而, 单一 EN 或 ET 技术在选择性、灵敏度或动态范围方面存在一定局限性。未来的研究可以通过数据融合、传感器优化及机器学习算法改进提升性能。此外 EN 和 ET 联合有望在全球范围内彻底改变食品真伪鉴别的方式^[64]。

2.2 计算机视觉系统

CVs 是一种基于摄像机和电脑对目标进行感知、识别、跟踪和测量, 结合 AI 等技术对数据进行分析的自动化检测技术^[65-66]。该系统主要由计算机、工业相机、照明系统和图像处理软件等核心组件构成, 目前在猪肉品质评价领域已形成较为成熟的应用体系, 可实现对肉品的色泽、质地、大理石纹、嫩度、新鲜度等关键指标的精准检测^[67-68]。王

笑丹等^[69]应用多元线性回归、非线性回归和神经网络等 3 种不同的数学方法, 对肌内脂肪含量进行检测, 其中, 非线性回归模型表现优异, 预测准确率达 85%以上。SUN 等^[70-71]利用 CVs 提取猪背最长肌图像的特征信息作为预测因子, 分别构建了逐步回归模型和 SVM 模型对肌内脂肪含量预测, 准确率分别为 92.5%和 75.0%。LIU 等^[72]的研究进一步验证了 CVs 技术的可靠性, 逐步回归模型的准确率为 0.63, SVM 的准确率为 0.75, 结果表明 CVs 可以作为有效预测猪肉肌内脂肪的工具。CHMIEL 等^[73]应用 CVs 确定的猪肉颜色参数以检测腰最长肌肉缺陷的有效性, 结果表明 CVs 在检测 PSE 和 DFD 以及将肉类质量评价方面具有很强的应用前景。

表 6 基于 EN/ET 检测肉类品质的研究进展
Table 6 Research progress on meat quality detection based on EN/ET

| 指标 | 化学计量学模型 | 性能 | 参考文献 |
|-------------|------------|--|------|
| TVB-N | 相关性模型 | 训练组 $R: 0.994, 0.985$ ($P<0.01$) 预测组 $R: 0.984, 0.979$ ($P<0.01$) | [54] |
| 挥发性气味成分、TVC | PCA PLS | 4 °C 时 $R=0.9003$, 20 °C 时 $R=0.9940$ | [55] |
| 风味物质 | LDA | 挥发性成分差异 | [56] |
| 川味香肠品质 | PCA | 发酵时间 | [62] |
| 掺假比例 | LDA | 有效鉴定 | [63] |

CVs 近年来在肉类品质快速无损检测领域的应用见表 7。但是, 化学计量学模型的选择对提高 CVs 预测准确度非常重要, 目前 CVs 在肉类质量检测中的应用主要是利用可见光谱获取的图像中提取的外部特征, 如基于颜色或纹理的特征, 并结合化学计量学方法进行定性或定量分析。

表 7 基于计算机视觉技术检测肉类品质的研究进展
Table 7 Research progress on detecting meat quality based on computer vision technology

| 指标 | 化学计量学模型 | 性能 | 参考文献 |
|------|---------------|--------------------------|---------|
| 肌内脂肪 | 非线性回归 | 正确率: 85% | [69] |
| 肌内脂肪 | 逐步回归模型 SVM | 准确率: 92.5% 准确率: 75.0% | [70-71] |
| 肌内脂肪 | 逐步回归模型 SVM | 准确率: 63% 准确率: 75% | [72] |

3 结束语

AI 技术的进步加速了肉类无损检测技术发展, NIRS、HIS、RS 等技术通过融合机器学习算法, 实现肉品质量安全的非破坏性精准检测, 为构建智能化质量监测系统提供

关键技术支撑。可视化检测技术因为其快速、准确、直观可见而备受欢迎,但在实际应用仍面临诸多挑战,包括检测设备价格昂贵、传感器灵敏度不足、改进化学计量学方法、MSIF 策略亟待创新等。

随着科技的进步,猪肉品质评价技术及设备将会向着快速、便捷、无损、多指标的方向发展,如何优化现有检测技术的组合方案,优化改进化学计量方法,并通过多元数据信息实现检测效能的提升是需要解决的关键科学问题。此外,利用数字图像处理技术与 AI 学习算法相结合,构建了肉质定量预测模型和定性判别方法,从感官特性、内部成分和外部因素对鲜肉进行全面的评价,并将所开发的高性能质量检测系统应用于实际肉类加工生产线,是肉类品质无损检测的研究重点和发展方向。

参考文献

- [1] 张伟力. 现代猪肉品质概念与检测手段进展[J]. 养猪, 2004(5): 45–47.
ZHANG WL. The modern pork quality concept and progress on detection methods [J]. Swine Production, 2004(5): 45–47.
- [2] 周光宏, 李春保, 徐幸莲. 肉类食用品质评价方法研究进展[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(2): 75–82.
ZHOU GH, LI CB, XU XL. Advances in methods for evaluating meat palatability [J]. Sciencepaper Online, 2007, 2(2): 75–82.
- [3] 车明秀, 泮秋立, 吴裕健, 等. 我国肉与肉制品标准体系存在的问题及建议[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(7): 62–68.
CHE MX, PAN QL, WU YJ, *et al.* Existing problems and suggestions of meat and meat products standard, system in China [J]. Storage and Process, 2023, 23(7): 62–68.
- [4] SHI YY, WANG XC, SAIDUL B, *et al.* A review on meat quality evaluation methods based on non-destructive computer vision and artificial intelligence technologies [J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(4): 563–568.
- [5] CHENG L, SUN DW, ZHU ZW, *et al.* Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: A review of recent research progresses [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(4): 769–781.
- [6] 王文秀, 彭彦昆, 郑晓春, 等. 便携式猪肉营养组分无损实时检测装置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 303–311.
WANG WX, PENG YK, ZHENG XC, *et al.* Portable nondestructive detection device for nutrient components of pork [J]. Transactions of the Chinese society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 303–311.
- [7] SU WH, HE HJ, SUN DW. Non-destructive and rapid evaluation of staple foods quality by using spectroscopic techniques: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(4): 1039–1051.
- [8] CHENG JH, SUN JU, YAO KH, *et al.* A decision fusion method based on hyperspectral imaging and electronic nose techniques for moisture content prediction in frozen-thawed pork [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113778.
- [9] ZHOU QY, DAI ZH, SONG FH, *et al.* Monitoring black tea fermentation quality by intelligent sensors: Comparison of image, E-nose and data fusion [J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102454.
- [10] 刘瑜明, 王巧华, 陈远哲, 等. 猪肉理化指标的近红外光谱无损检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(5): 1346–1353.
LIU YM, WANG QH, CHEN YZ, *et al.* Non-destructive near-infrared spectroscopy of physical and chemical indicator of pork meat [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(5): 1346–1353.
- [11] QU FF, REN D, HE Y, *et al.* Predicting pork freshness using multi-index statistical information fusion method based on near infrared spectroscopy [J]. Meat Science, 2018, 12(146): 59–67.
- [12] 张保霞. 基于主成分分析和改进支持向量机的猪肉品质识别[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 146–151.
ZHANG BX. Pork quality identification based on principal component analysis and improved support vector machine [J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 146–151.
- [13] 刘媛媛, 彭彦昆, 王文秀, 等. 基于偏最小二乘投影的可见/近红外光谱猪肉综合品质分类[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 306–313.
LIU YY, PENG YK, WANG WX, *et al.* Classification of pork comprehensive quality based on partial least squares projection and Vis/NIR spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 306–313.
- [14] FENG CH, MAKINO Y, OSHITA S, *et al.* Hyperspectral imaging and multispectral imaging as the novel techniques for detecting defects in raw and processed meat products: Current state-of-the-art research advances [J]. Food Control, 2018, 84: 165–176.
- [15] 刘海, 郑福平, 熊振海, 等. 高光谱成像技术在肉品品质评价中的应用[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 276–283.
LIU H, ZHENG FP, XIONG ZH, *et al.* Application of hyperspectral imaging technology in meat quality evaluation [J]. Food Science, 2018, 39(11): 276–283.
- [16] MA J, SUN DW, PU HB, *et al.* Protein content evaluation of processed pork meats based on a novel single shot (snapshot) hyperspectral imaging sensor [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 240: 207–213.
- [17] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Parsimonious model development for real-time monitoring of moisture in red meat using hyperspectral imaging [J]. Food Chemistry, 2016, 196(APR.1): 1084–1091.
- [18] CHENG JIH, SUN J, SHI L, *et al.* An effective method fusing electronic nose and fluorescence hyperspectral imaging for the detection of pork freshness [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103880.
- [19] BONAHE E, HUANG XY, AHETO JH, *et al.* Comparison of variable selection algorithms on VIS-NIR hyperspectral imaging spectra for quantitative monitoring and visualization of bacterial foodborne pathogens in fresh pork muscles [J]. Infrared Physics and Technology, 2020, 107: 103327.
- [20] BARBIN D, ELMASRY G, SUN DW, *et al.* Non-destructive assessment of microbial contamination in porcine meat using NIR hyperspectral imaging [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 17: 180–191.
- [21] ZHAO ZF, YU HY, ZHANG SY, *et al.* Visualization accuracy improvement of spectral quantitative analysis for meat adulteration using Gaussian distribution of regression coefficients in hyperspectral imaging [J]. Optik, 2020(212): 212.
- [22] AL-SARAYREH M, REIS MM, YAN WQ, *et al.* Potential of deep learning and snapshot hyperspectral imaging for classification of species in meat [J]. Food Control, 2020(117): 117.

- [23] LI DZ, WU GF, LIU HT, *et al.* Recent progress in evaluation of red meat quality using hyperspectral imaging technology [J]. *Meat Research*, 2018, 32: 59–63.
- [24] 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.* Research progress on application of Raman spectroscopy on meat processing and quality control [J]. *Food Science*, 40(23): 298–304.
- [25] 王新怡, 董鹏程, 罗欣, 等. 拉曼光谱在肉品质预测与控制中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(24): 294–302.
WANG XY, DONG PC, LUO X, *et al.* Application of Raman spectroscopy in meat quality prediction and control [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(24): 294–302.
- [26] QU C, LI YZ, DU HS, *et al.* Raman spectroscopy for rapid fingerprint analysis of meat quality and security: Principles, progress and prospects [J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111805.
- [27] 翟晨, 李永玉, 彭彦昆, 等. 表面增强拉曼光谱快速检测生鲜肉中的瘦肉精[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 275–280.
ZHAI C, LI YY, PENG YK, *et al.* Rapid detection of salbutamol in fresh muscle tissues based on surface enhanced Raman spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 275–280.
- [28] YUAN YH, PENG XS, WANG CW, *et al.* Surface-enhanced Raman scattering sensor based on MWCNTs@ZnO/Ag to detect the enrofloxacin in pork [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025, 332: 125818.
- [29] WANG WX, ZHAI C, PENG YK, *et al.* A nondestructive detection method for mixed veterinary drugs in pork using line-scan Raman chemical imaging technology [J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(3): 658–667.
- [30] KANG JW, LIM SY, GALINDO LH, *et al.* Analysis of subcutaneous swine fat via deep Raman spectroscopy using a fiber-optic probe [J]. *The Analyst*, 2020: 145(13): 4421–4426.
- [31] YANG HB, HOPKINS DL, ZHANG YM, *et al.* Preliminary investigation of the use of Raman spectroscopy to predict beef spoilage in different types of packaging [J]. *Meat Science*, 2020, 165: 108136.
- [32] ARGYRI AA, JARVIS RM, WEDGE D, *et al.* A comparison of Raman and FT-IR spectroscopy for the prediction of meat spoilage [J]. *Food Control*, 2013, 29(2): 461–470.
- [33] 杨佳硕, 邵怡璐, 曾佐凤, 等. 拉曼光谱法快速检测猪肉脯中的掺伪鸡肉[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(23): 9–15.
YANG JS, SHAO YL, ZENG ZF, *et al.* Rapid detection of adulterated chicken meat in dried pork slice by Raman spectroscopy [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(23): 9–15.
- [34] SCHEIER RO, SCHMIDT H. Measurement of the pH value in pork meat early postmortem by Raman spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(2): 289–297.
- [35] NACHE M, HINRICHS J, SCHEIER R, *et al.* Prediction of the pH as indicator of porcine meat quality using Raman spectroscopy and metaheuristics [J]. *Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems*, 2016, 154: 45–51.
- [36] SCHEIER R, BAUER A, SCHMIDT H. Early postmortem prediction of meat quality traits of porcine semimembranosus muscles using a portable Raman system [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(9): 2732–2741.
- [37] 赵芳, 彭彦昆. 区间偏最小二乘法结合拉曼光谱测定猪肉皮下脂肪的碘值[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 243–249.
ZHAO F, PENG YK. Measurement of iodine value of pork's subcutaneous adipose tissue by interval least square and Raman spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 243–249.
- [38] 白京, 臧明伍, 乔晓玲, 等. 拉曼光谱快速测定冷冻猪肉酸价和过氧化值[J]. *食品科学*, 2023, 44(8): 301–306.
BAI J, ZANG MW, QIAO XL, *et al.* Rapid determination of acid and peroxide values in frozen pork by using Raman spectroscopy [J]. *Food Science*, 2023, 44(8): 301–306.
- [39] 董鑫鑫, 杨方威, 于航, 等. 基于拉曼光谱技术的猪瘦肉新鲜度快速无损检测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(2): 484–488.
DONG XX, YANG FW, YU H, *et al.* Study on rapid nondestructive detection of pork lean freshness based on Raman spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(2): 484–488.
- [40] 黄雅轩, 蔡依含, 何婉霞, 等. 表面增强拉曼光谱在食品安全检测中的应用研究[J]. *现代食品*, 2023, 29(13): 93–98.
HUANG YX, CAI YH, HE WX, *et al.* Application of surface-enhanced Raman spectroscopy in food safety detection [J]. *Food Science and Technology*, 2023, 29(13): 93–98.
- [41] HASSOUN A, SAHAR AA, LAKHAL LS, *et al.* Fluorescence spectroscopy as a rapid and non-destructive method for monitoring quality and authenticity of fish and meat products: Impact of different preservation conditions [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 103: 279–292.
- [42] LIU H, JI ZT, LIU XL, *et al.* Non-destructive determination of chemical and microbial spoilage indicators of beef for freshness evaluation using front-face synchronous fluorescence spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2020, 321: 126628.
- [43] LEE H, KIM MS, LEE WL, *et al.* Determination of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in pork meat using hyperspectral fluorescence imaging [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2018, 259(4): 532–539.
- [44] LIU ZY, ZHOU ST, YUAN FP, *et al.* A novel fluorescence platform for portable and visual monitoring of meat freshness [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2025, 267: 116746.
- [45] DENG B, JIANG HJ, DING LY, *et al.* A coumarin-based small molecular fluorescent probe for detection of the freshness of meat and shrimp [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 118: 105231.
- [46] HASHEMIAN H, GHAEDI M, DASHTIAN K, *et al.* Highly sensitive fluorometric ammonia detection utilizing *Solenostemon scutellarioides* (L.) extracts in MOF-tragacanth gum hydrogel for meat spoilage monitoring [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2024, 1: 406.
- [47] CONG M, ZHANG ZQ, SONG W, *et al.* Food safety application of Terahertz spectroscopy based on metamaterials: A review [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, 139: 107034.
- [48] LEILI-AFSAH L, HAJEB P, ARA P, *et al.* A comprehensive review on food applications of Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019. DOI: 10.1111/1541-4337.12490
- [49] 齐亮, 赵茂程, 赵婕, 等. 不同猪肉组织在太赫兹衰减全反射光谱中的特性差异[J]. *食品与机械*, 2018, 34(2): 11–14, 61.

- QI L, ZHAO MC, ZHAO J, *et al.* Characteristic difference of porcine tissues by Terahertz attenuated total reflectance spectroscopy [J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(2): 11–14, 61.
- [50] 齐亮, 赵茂程, 赵婕, 等. 光谱预处理对太赫兹光谱预测猪肉K值的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 319–325.
- QI L, ZHAO MC, ZHAO J, *et al.* Effects of spectral pretreatment on the prediction of pork K value with Terahertz spectroscopy [J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 319–325.
- [51] HU J, ZHAN CH, SHI HY, *et al.* Rapid non-destructive detection of foreign bodies in fish based on Terahertz imaging and spectroscopy [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2023, 131: 104448.
- [52] ZHANG N, LIM SJ, TOH JM, *et al.* Investigation of spoilage in salmon by electrochemical impedance spectroscopy and time-domain Terahertz spectroscopy [J]. *Journal of Chemical Physics Materials*, 2022(1): 148–154.
- [53] FU Y, REN YQ, SUN DW. Novel analysis of food processes by Terahertz spectral imaging: A review of recent research findings [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104463
- [54] 蒙万隆, 郑丽敏, 杨璐, 等. 电子鼻技术对猪肉挥发性盐基氮的预测研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(7): 243–248.
- MENG WL, ZHENG LM, YANG L, *et al.* Research on prediction of the total volatile basic nitrogen in pork by electronic nose technique [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(7): 243–248.
- [55] 王丹凤, 王锡昌, 刘源, 等. 电子鼻分析猪肉中负载的微生物数量研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(6): 148–150.
- WANG DF, WANG XC, LIU Y, *et al.* Study on the number of microorganisms loaded in pork by electronic nose analysis [J]. *Food Science*, 2010, 31(6): 148–150.
- [56] 周慧敏, 张顺亮, 郝艳芳, 等. HS-SPME-GC-MS-O 结合电子鼻对坨坨猪肉主体风味评价分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(2): 218–226.
- ZHOU HM, ZHANG SL, HAO YF, *et al.* Analysis of major flavor components of Tuotuo pork, a traditional meat product in Liangshan, southwest China's Sichuan, by HS-SPME-GC-MS-O combined with electronic nose [J]. *Food Science*, 2021, 42(2): 218–226.
- [57] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 基于电子鼻、GC-MS 结合化学计量学方法鉴别烤羊肉掺假[J]. *食品科学*, 2022, 43(4): 291–298.
- WANG YR, BAI S, LUO RM, *et al.* Identification of adulteration of roast mutton using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometric methods [J]. *Food Science*, 2022, 43(4): 291–298.
- [58] IMAM M, NAGPAL K. The electronic tongue: An advanced taste-sensing multichannel sensory tool with global selectivity for application in the pharmaceutical and food industry [J]. *Pharmaceutical Development and Technology*, 2023, 28 (3/4): 318–332.
- [59] LU L, HU ZQ, HU XQ, *et al.* Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety [J]. *Food Research International*, 2022, 162(Pt B): 112214.
- [60] GIL L, BARAT JM, BAIGTS D, *et al.* Monitoring of physical-chemical and microbiological changes in fresh pork meat under cold storage by means of a potentiometric electronic tongue [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126: 1261–1268.
- [61] 郭金英, 李杰, 吴影, 等. 基于电子舌和色谱技术分析蒸煮猪肉滋味物质[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 32–36.
- GUO JY, LI J, WU Y, *et al.* Analysis of taste substances of cooked pork based on electronic tongue and chromatographic techniques [J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(8): 32–36.
- [62] 范文教, 易宇文, 贾洪锋, 等. 川味发酵香肠的电子舌识别研究[J]. *中国酿造*, 2021, 32(2): 144–147.
- FAN WJ, YI YW, JIA HF, *et al.* Application of electronic tongue in the discrimination of Sichuan type sausage with different fermentation time [J]. *China Brewing*, 2021, 32(2): 144–147.
- [63] TIAN XJ, WANG J, CUI S. Analysis of pork adulteration in minced mutton using electronic nose of metal oxide sensors [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(4): 744–749.
- [64] MAHANTI NK, SHIVASHANKAR S, CHHETRI KB, *et al.* Enhancing food authentication through E-nose and E-tongue technologies: Current trends and future directions [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024. DOI: 10.1016/j.tifs.104574
- [65] AMIN TG, SOODABEH F, MAHMOUD O, *et al.* Meat quality evaluation based on computer vision technique: A review [J]. *Meat Science*, 2019, 156: 183–195.
- [66] MENEZES GL, JUNIOR DTV, FERREIRA REP, *et al.* Empowering informed choices: How computer vision can assist consumers in making decisions about meat quality [J]. *Meat Science*, 2025. DOI: 10.1016/j.meatsci.109675
- [67] RUEDT C, GIBIS M, WEISS J. Quantification of surface iridescence in meat products by digital image analysis [J]. *Meat Science*, 2020, 163(5): 108064.
- [68] TRINDERUP CH, KIM YHB. Fresh meat color evaluation using a structured light imaging system [J]. *Food Research International*, 2015, 71(5): 100–107.
- [69] 王笑丹, 孙永海, 胡铁军, 等. 基于计算机图像分析的肌内脂肪含量测定[J]. *食品科学*, 2005(7): 200–204.
- WANG XD, SUN YH, HU TJ, *et al.* Mensurating intramuscular fat content based on computer image analysis [J]. *Food Science*, 2005(7): 200–204.
- [70] SUN X, YOUNG JM, LIU JH, *et al.* Prediction of pork color attributes using computer vision system [J]. *Meat Science*, 2016, 113: 62–64.
- [71] SUN X, YOUNG JM, LIU JH, *et al.* Prediction of pork loin quality using online computer vision system and artificial intelligence model [J]. *Meat Science*, 2018B, 140: 72–77.
- [72] LIU JHU, SUN X, YOUNG JM, *et al.* Predicting pork loin intramuscular fat using computer vision system [J]. *Meat Science*, 2018, 143: 18–23.
- [73] CHMIEL M, SLOWINSKI M, DASIEWICZ K, *et al.* Use of computer vision system (CVS) for detection of PSE pork meat obtained from m. semimembranosus [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 532–536.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)