DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260410003
**引用格式**: 穆晓蕾, 朱瑞娟, 刘圆圆, 等. 白羽肉鸡肉品新鲜度多维快速测定方法的建立与有效性验证[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 60–68.
Mu Xiaolei, Zhu Ruijuan, Liu Yuanyuan, et al. Establishment and validity verification of a multidimensional rapid determination method for the freshness of white feather broiler meat [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 60–68. (in Chinese with English abstract).

# 白羽肉鸡肉品新鲜度多维快速测定方法的建立与有效性验证

穆晓蕾[1], 朱瑞娟[1], 刘圆圆[1], 陈延志[2], 邵星辰[2], 秦浩然[1*], 王成森[1*]
(1. 山东畜牧兽医职业学院, 潍坊 261061; 2. 山东新和盛飧食集团有限公司, 潍坊 261322)

**摘 要: 目的** 为了满足白羽肉鸡肉品新鲜度实时、批量检测的企业现实需求, 探索多维快速测定肉品新鲜度并进行有效性验证。**方法** 本研究以白羽肉鸡胸肉为对象, 以新鲜度检测为核心, 在 4 ℃冷藏条件下设置 0 h 至 144 h 不同贮藏时间梯度, 依据 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》和 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》分别对快速测定法测定的 pH 及水分含量指标进行验证, 分析其随新鲜度下降的变化规律; 同时利用高光谱成像技术采集样品的光谱数据, 采用 Savitzky-Golay (S-G)平滑结合一阶导数法进行光谱预处理, 提取理化指标的特征波长, 基于偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)算法构建鸡胸肉新鲜度判别模型。**结果** 快速测定法与 GB 5009.237—2016 和 GB 5009.3—2016 测定 pH 和水分含量的结果均无显著差异($P$>0.05), 其中 pH、水分含量的 $P$ 分别为 0.8141、0.2586; 同时, 基于 PLSR 构建的模型对各项理化指标的预测性能良好, 预测集相关系数($R^2$p)为 0.74~0.87, 预测均方根误差(predicted root mean square error, RMSEP)为 0.12~1.80。**结论** 光谱预处理可有效降低仪器噪声和外界干扰并凸显特征吸收峰, 新鲜肉与腐败肉的特征波长光谱响应差异显著; 所构建的 PLSR 模型能够实现新鲜肉与腐败肉的准确鉴别。本研究建立的多指标协同检测体系, 为鸡胸肉品质安全监控提供了有效可靠的技术支持, 丰富了鸡肉新鲜度无损检测的理论与实践研究。

**关键词:** 鸡胸肉; 新鲜度检测; 理化指标; 高光谱成像技术; 偏最小二乘回归
**中图分类号:** TS251.7 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0060–09

# Establishment and validity verification of a multidimensional rapid determination method for the freshness of white feather broiler meat

MU Xiao-Lei[1], ZHU Rui-Juan[1], LIU Yuan-Yuan[1], CHEN Yan-Zhi[2], SHAO Xing-Chen[2], QIN Hao-Ran[1*], WANG Cheng-Sen[1*]
(1. *Shandong Vocational Animal Science and Veterinary College*, *Weifang* 261061, *China*; 2. *Shandong Xinhesheng Agriculture and Animal Husbandry Group Co*., *Ltd*., *Weifang* 261322, *China*)

**收稿日期:** 2026-04-10
**基金项目:** 山东省重点研发计划项目(2024TZXD025)
**第一作者:** 穆晓蕾(2004—), 女, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 3065446983@qq.com
***通信作者:** 秦浩然(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为畜产品质量安全。E-mail: qinhaoran818@163.com
王成森(1975—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向畜为产品质量安全。E-mail: sdmykyk@163.com

**ABSTRACT: Objective**　To meet the practical industrial demand for real-time, batch detection of freshness in white feather broiler meat, this study explores a multidimensional rapid method for assessing meat freshness and validates its validity. **Methods**　This study focuses on the breast meat of white-feathered broilers, with freshness assessment as its central theme. Under refrigerated storage at 4 ℃, a gradient of storage durations from 0 to 144 hours was established. The pH and moisture content values obtained via rapid detection methods were validated in accordance with GB 5009.237—2016 *National food safety standard-Determination of pH in foods* and GB 5009.3—2016 *National food safety standard-Determination of moisture in foods*, respectively, to analyze their variation patterns as freshness deteriorates. Concurrently, hyperspectral imaging technology was employed to collect spectral data of the samples. Spectral preprocessing was conducted using Savitzky-Golay (S-G) smoothing combined with first-derivative transformation to extract characteristic wavelengths related to physicochemical indices. Subsequently, a freshness discriminant model for chicken breast meat was constructed based on the partial least squares regression (PLSR) algorithm. **Results**　The results of the rapid determination method showed no significant difference from those determined by GB 5009.237—2016 and GB 5009.3—2016 for pH and moisture content ($P$>0.05). Among them, the $P$ values of pH and moisture content were 0.8141 and 0.2586 respectively. At the same time, the model constructed based on PLSR had good predictive performance for various physicochemical indicators, with the correlation coefficient ($R^2$p) of the prediction set ranging from 0.74 to 0.87, and the predicted root mean square error (RMSEP) ranging from 0.12 to 1.80. **Conclusion**　Spectral pre-processing can effectively reduce instrument noise and external interference and highlight characteristic absorption peaks. There is a significant difference in the characteristic wavelength spectral responses between fresh meat and spoiled meat. The constructed PLSR model can achieve accurate discrimination between fresh meat and spoiled meat. The multi-index collaborative detection system established in this study provides effective and reliable technical support for the monitoring of chicken breast meat quality and safety, and enriches the theoretical and practical research on non-destructive detection of chicken freshness.

**KEY WORDS:** chicken breast meat; freshness detection; physicochemical indicators; hyperspectral imaging technology; partial least squares regression

## 0　引　言

在全球畜禽肉类消费市场中, 鸡肉凭借其高蛋白、低脂肪的优势[1–2], 成为居民膳食结构中的重要组成部分。鸡胸肉作为鸡肉中脂肪含量最低、肉质最细嫩的部位, 受到健康群体的青睐, 市场需求持续增长[3], 但其在屠宰后的加工流通环节容易滋生微生物[4–7]并发生酶解作用[8], 会导致新鲜度的快速下降[9]。目前, 肉类新鲜度检测方法主要分为传统检测方法与现代无损检测技术两大类。传统方法中, 感官评定法[10]、微生物检测法[11]、理化分析法[12]存在客观性不足、周期长、破坏性强、实时性差等问题。因此, 建立高效、准确、适配实际应用场景的鸡肉化学成分[13]及新鲜度检测技术, 对保障食品安全具有重要意义。

在现有的检测技术中, 色度、pH、水分含量及挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)是反映肉类新鲜度的关键理化指标[14–15]。色度指标($L^*$、$a^*$、$b^*$)反映了肉品的色泽变化[16–17], 并且与肌红蛋白氧化、肌纤维结构的完整性密切相关[18]; pH 的变化则与宰后肌糖原酵解、微生物代谢有关, 呈现“先降后升”的变化[19–20]; 水分含量值影响着肉品的嫩度和多汁性[21], 同时其流失量体现了新鲜度的下降程度[22–23]。目前, 现有快速测定法的准确性和可靠性仍需要方法验证, 与 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》和 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行结果比对, 才能为鸡胸肉的新鲜度评定提供可靠支撑。

高光谱成像技术作为一种结合光谱分析与图像识别的新型无损检测技术[24], 能够同步获取空间图像和光谱数据, 通过对比特征吸收峰, 实现对不同成分含量及新鲜度等指标的快速评估, 具有无损、快速、多指标同步检测等优势, 已经在猪肉、牛肉、羊肉等[25–30]肉类新鲜度检测中取得了一定成果, 但鸡胸肉在水分含量等方面和其他肉类存在差异, 现有检测技术难以直接使用。基于此, 本研究以白羽肉鸡鸡胸肉为对象, 采用“理化指标快检验证+各指标无损可快速检测+高光谱无损检测”相结合的技术路线。在 4 ℃的冷藏条件下, 首先, 根据 GB 5009.237—2016 和 GB 5009.3—2016 中的方法同步对 pH 及水分含量的快速测定法进行有效性确认。其次, 利用便携式的快检仪器对色度、pH、水分含量进行检测, 依据 TVB-N 含量判定新鲜

程度。同时，利用高光谱成像技术采集样品的光谱数据，通过卷积 Savitzky-Golay (S-G)平滑结合一阶导数进行光谱预处理，提取与蛋白质、脂肪、水分相关的特征波长进行分析，基于偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)算法构建判别模型[31]，实现对新鲜肉与腐败肉的精准区分。本研究旨在建立一套多指标共同检测且快速可靠的检测体系，为鸡胸肉质量安全控制提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

白羽肉鸡鸡胸肉：采集于山东新和盛飨食集团有限公司屠宰分割车间。

成套 pH 缓冲剂[邻苯二甲酸氢钾(pH=4.00)、混合磷酸盐(pH=6.86)、硼砂(pH=9.18)](湖南比克曼控股有限责任公司)；氧化镁(分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司)；硼酸(分析纯)、溴甲酚绿指示剂(1 g/L)(天津市鑫铂特化工有限公司)；盐酸标定溶液(0.1000 mol/L，烟台远东精细化工有限公司)；甲基红指示剂(1 g/L，天津博迪化工股份有限公司)；乙醇(纯度 95%，天津市富宇精细化工有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

ML-R1 肉类水分检测仪(海盐曼联仪器有限公司)；Testo 205 pH 计[德图仪器国际贸易(上海)有限公司]；DS-620 分光测色仪、FS-IQ-VISNIR 便携式高光谱相机[彩谱科技(浙江)有限公司]；PTX-JA210S 天平[感量为 1 mg，华志(福建)电子科技有限公司]；HR2095 搅拌机(荷兰皇家飞利浦公司)；k9840 自动凯氏定氮仪(济南海能仪器股份有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

取宰后新鲜鸡胸肉 90 块，每块质量约为 200 g，其中正式检测量为 84 块，6 块作为备用。将鸡胸肉去除筋膜、脂肪等杂质后，于 4 ℃条件下冷藏 144 h，并在 0、24、48、72、96、120、144 h 这 7 个不同时间点分别进行检测。每个时间点设置 6 个独立样本。所有操作过程注意避免交叉污染。

#### 1.3.2 色度测定

首先将色差仪进行黑白校正，设 D65 光源、10°观察者角，之后将仪器探头垂直紧贴样品，避开脂肪和筋膜，7 个不同时间下各取 6 个独立样本，取 $L^*$(亮度值)、$a^*$(红度值)、$b^*$(黄度值)重复测量 5 次的平均值。

#### 1.3.3 pH 测定

参照王正荣等[32]方法并加以改进，同时依据 GB 5009.237—2016 完成方法确认。使用 pH 4.00、6.86、9.18 的成套缓冲剂对便携式 pH 计进行校正。将电极刺入表面无筋膜的鸡胸肉样品中，取各时间点重复测量 3 次的平均值作为最终结果。

#### 1.3.4 水分含量测定

本研究利用水分快速测定仪对鸡胸肉样本进行检测，为了综合评估该快速测定方法的可靠性与准确性，将依据 GB 5009.3—2016 进行同步对比实验，具体操作可参考刘玉玲等[33]的方法。测量前，将仪器探头紧密垂直接触于鸡肉样品，避开脂肪与筋膜，在不同贮藏时间点分别对样本重复测量 2 次，取平均值为该时间点的水分含量。

#### 1.3.5 TVB-N 测定

TVB-N 含量依据 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的第二法自动凯氏定氮仪法进行测定。取不同贮藏时间下的鸡胸肉，准确称取绞碎均匀样本 10 g，精确至 0.001 g，于蒸馏管内，加入 75 mL 水，振摇，使试样在样液中分散均匀，浸渍 30 min。采用自动凯氏定氮仪进行测定，设定硼酸接受液(20 g/L)，混合指示剂(甲基红-溴甲酚绿)10 滴，蒸馏时间 180 s。向蒸馏管中加入 1 g 氯化镁，立即蒸馏。蒸馏完成后，用 0.1000 mol/L 盐酸标准溶液滴定至终点，同时做空白试验；重复测定 2 次后取平均值作为各时间点的检测结果。

### 1.4 高光谱成像技术测定鸡胸肉新鲜度

#### 1.4.1 实验前准备

参照肖纵纵等[34]的方法并根据 FS-IQ-VISNIR 仪器进行设备调试和参数设置，采集时在恒温(24 ℃)和恒湿(65% Rh)条件下进行，以确保数据采集时的准确性和可靠性。于 FigSpec Cam (V1.01)软件上设置高光谱相机曝光时间为 8000 μs，空间合并和通道合并调整为 4 通道，依次进行黑白校正，扣除暗电流，构建统一的光谱响应基准，为后续鸡胸肉样本的高光谱图像采集建立稳定的检测环境。

#### 1.4.2 光谱采集和图像预处理

在光谱采集阶段，参照闻萍等[35]的方法，使用 FigSpec Cam (V1.01)软件，按照预先设置的参数，实现对目标物体的自动扫描-并同步获取空间图像和光谱数据，扫描结束后导出原始图像与反射率图像两种不同类型的数据文件[36–37]。

光谱预处理环节借鉴已有的研究方法[38]，依托 FigSpec Studio 2.0 软件，首先在鸡胸肉样本的高光谱图像中选取无筋膜、无淤血的感兴趣区域(region of interest, ROIs)，可参考王振东等[39]的研究，以提取相应的原始光谱数据；随后选用 S-G 平滑法对光谱数据进行预处理，并且将预处理参数设置为一阶导数，通过该参数设置可有效抑制光谱噪声，突出特征吸收峰，为鸡胸肉的理化指标等提供检测依据。

#### 1.4.3 模型的构建

本研究以 PLSR 算法为基础，围绕数据关联、参数优化与性能验证 3 个层面，构建鸡胸肉新鲜度的判别模型。

首先, 对光谱数据进行 S-G 平滑处理, 并将处理后的高光谱数据作为自变量, 该预处理方法可以有效降低仪器噪声并凸显特征吸收峰; 同时以 GB 5009.237—2016 检验的 pH、水分含量值等理化指标为参考, 对新鲜肉与腐败肉进行精准分类, 构建光谱特性与新鲜度等级之间的对应关系。在特征波长的筛选环节, 着重研究与鸡胸肉成分有关的 540 nm(蛋白质)、720 nm(脂肪)及 970 nm(水分)特征吸收峰波长, 提取各个关键波长下的光谱数据[40], 去除多余光谱信息, 降低模型建立的难度, 并保留其核心的鉴别依据。通过交互验证法获得最佳潜在变量(latentvariables, LV)数目, 并调节模型参数, 使其达到最优的匹配效果。在此基础上, 把训练集决定系数($R^2$c)、预测集决定系数($R^2$p)、均方根误差(root mean squarederror, RMSE)作为评估指标[41], 对所建模型进行拟合和预测准确性分析, 最终构建一种能够准确区分不同新鲜度鸡胸肉的 PLSR 判别模型。

### 1.5　数据处理

本研究使用 The Unscrambler X 10.4 软件建立模型; 采用 Graphpad Prism 10.1.2 和 Excel 2016 作图; FigSpec Studio 2.0 软件提取 ROIs 和处理特征波长。

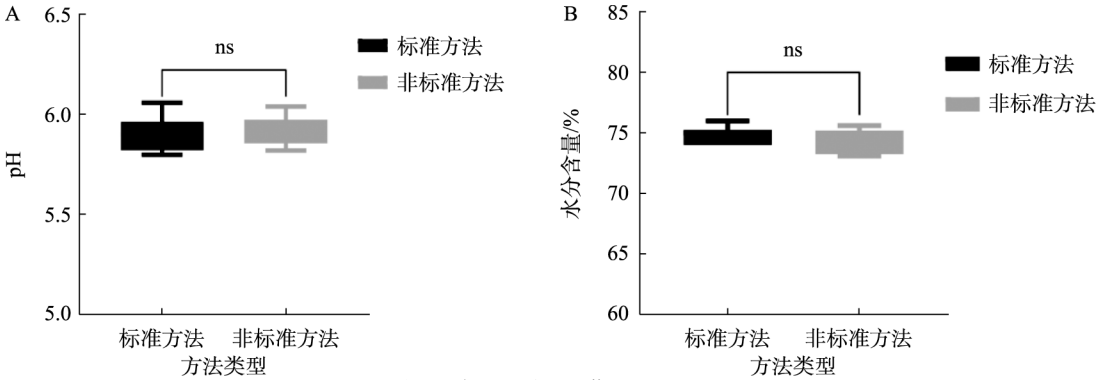
## 2　结果与分析

### 2.1　快速测定法有效性确认

本研究选取 72 h 这一时间点的 6 个样本进行检测, 为评估快速测定法其准确性与可靠性, 采用 $t$ 检验法对快速测定法和 GB 5009.237—2016 和 GB 5009.3—2016 中的方法测定的结果进行了统计学比较。在 pH 测定中, 参考师静睿等[42]仪器测定值和人工值对比分析的思路, 结果如图 1A 所示, 两种方法的测定结果无显著性差异($P$=0.8141, $P$>0.05), 表明该方法准确可靠, 符合实验检测要求。在水分含量测定中, 参照刘宏超等[43]的验证方法, 将快速水分测定法与 GB 5009.3—2016 中的直接干燥法进行平行比对验证, 由图 1B 可知, 水分含量的测定结果同样无显著统计学差异($P$=0.2586, $P$>0.05), 说明该快速测定法的可行性,可用于鸡胸肉样品水分含量的高效测定。上述结果共同表明, 本研究采用的 pH 与水分含量快速测定法均具有可靠的准确性, 为后续实验数据的有效性奠定了坚实基础。

### 2.2　贮藏期间鸡胸肉色度、pH、水分与 TVB-N 的变化规律

本研究通过单因素方差分析, 依据 TVB-N 及快速测定法测定的色度、水分、pH 理化指标, 将 0、72、120 h 3 个不同贮藏时间的 6 个独立样本分别判定为新鲜、次新鲜度和腐败 3 个级别, 旨在展示各指标随贮藏时间的连续变化过程。以 TVB-N 作为新鲜度的主要判别依据, 结合 pH, 协同完成新鲜肉和腐败肉的二级划分, 而色度和水分含量在贮藏过程中出现三级变化, 为后续二级判别模型提供数据基础。表 1 结果表明不同贮藏时间样本差异显著, 样本理化指标随贮藏时间的变化趋势如图 2 所示, 3 个贮藏时间点的鸡胸肉样本差异显著。色度指标方面, 新鲜样本 $L^*$的均值为 60.41±2.12, 次新鲜样本降至 56.67±1.57, 腐败样本则进一步下降至 54.52±1.42, $L^*$持续下降; $a^*$从新鲜样本的–0.17±1.46 升至次新鲜样本的 2.16±1.13, 腐败样本达到 3.20±1.37, $a^*$显著增加; $b^*$从 15.10±3.08 显著降至 9.57±1.76, 腐败样本仅为 6.39±1.32。上述变化表明肉色在贮藏过程中由鲜红转变为暗红并逐步失去光泽。采用快速测定法测定的 pH 呈现先降后升的趋势, 是由于微生物代谢产生氨及胺类碱性物质所致; 测定的水分含量总体呈现下降趋势, 与肌纤维结构降解、持水力减弱密切相关。然而, 在贮藏第 144 h 时水分含量出现异常回升 分析其原因可能与密封袋漏气, 导致样品从环境中吸收水分有关。TVB-N 作为判别新鲜度的关键指标, 以 GB 2707—2016《食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品》为依据, 从新鲜样本的(5.87±0.47) mg/100 g 显著上升至次新鲜样本的(13.07±1.01) mg/100 g, 而腐败样本则高达(18.27±1.14) mg/100 g, 超过了 15 mg/100 g, 结合 pH、色度等指标, 可判定样品已处于腐败等级。综上, 色度、水分、pH 及 TVB-N 含量指标的动态变化, 与鸡胸肉新鲜度下降过程中的理化反应有密切联系, 为鸡胸肉样品新鲜度的综合评价提供了数据支撑。




注: ns 表示差异不显著, $P$>0.05。

图 1　pH (A)、水分含量(B)的方法确认

Fig.1　Methods for confirming pH (A) and moisture content (B)

### 2.3 光谱预处理的特征吸收峰效果分析

原始光谱数据经过 S-G 平滑处理后，处理效果参考李孟辕等[44]的研究，特征吸收峰的峰高和峰形能较好的识别；同时将预处理参数设为一阶导数，以有效防止由于过度处理而造成的光谱信息丢失，从而保障了测定结果的可靠性与准确性。在此基础上，针对与鸡胸肉品质密切相关的蛋白质、脂肪以及水分含量 3 种指标，参考肖丹等[45]的对比分析方法，选取 540 nm(蛋白质)、720 nm(脂肪)及 970 nm(水分)3 个特征吸收峰进行比对，其原因在于 540 nm 附近主要是肌红蛋白及氧化产物的吸收位置，能够反映蛋白质降解及肉色的变化；720 nm 处可用于监测脂肪的氧化程度；970 nm 则是 O-H 键的吸收地带，与水分含量密切相关。采用 PLSR 算法构建判别模型，通过对比新鲜肉与腐败肉光谱特征吸收峰的不同表征，例如位置偏移度、峰高及峰形的对称性差异，深入探究鸡胸肉样品新鲜度下降时与光谱响应之间的联系。本研究中，新鲜肉因蛋白质、脂肪结构完整且水分含量稳定，在 540 nm 处呈现峰高适中、峰形尖锐的蛋白质特征吸收峰，720 nm 处脂肪特征吸收峰位置稳定，没有明显变宽，970 nm 处水分特征吸收峰峰值突出且峰形平滑、轮廓清晰；而腐败肉在 540 nm 处特征吸收峰峰高明显降低，720 nm 处特征吸收峰发生位置偏移且峰宽增加，970 nm 处特征吸收峰峰值降低、峰形逐渐平缓，如图 3 反映了蛋白质降解、脂肪氧化以及水分流失等变化过程。

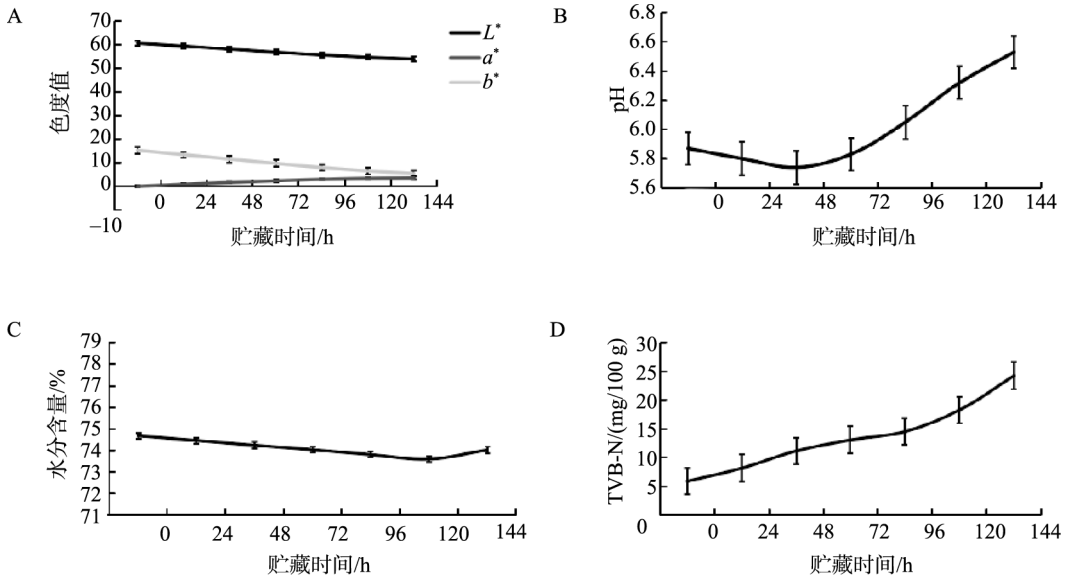
### 2.4 鸡胸肉样本的高光谱图像分析

鸡胸肉样本的高光谱成像如图 4 所示，在自然光下，鸡胸肉样本的色泽、纹理及脂肪的分布直观可见，相比之下，高光谱系统获取的三原色(red-green-blue, RGB)真彩图像与自然光下的外在形态特征高度一致，反映了高光谱成像系统采集时具有极高的稳定性。为提取光谱的有效信息，本研究基于 RGB 真彩图像，对样本进行 ROIs 感兴趣区的提取，同时注意规避脂肪、筋膜较多的部位，以保证光谱数据的稳定性。综上所述，本研究通过高光谱成像技术获取了稳定的光谱图像，完成了 ROIs 提取，为鸡胸肉新鲜度无损快速检测奠定了基础。

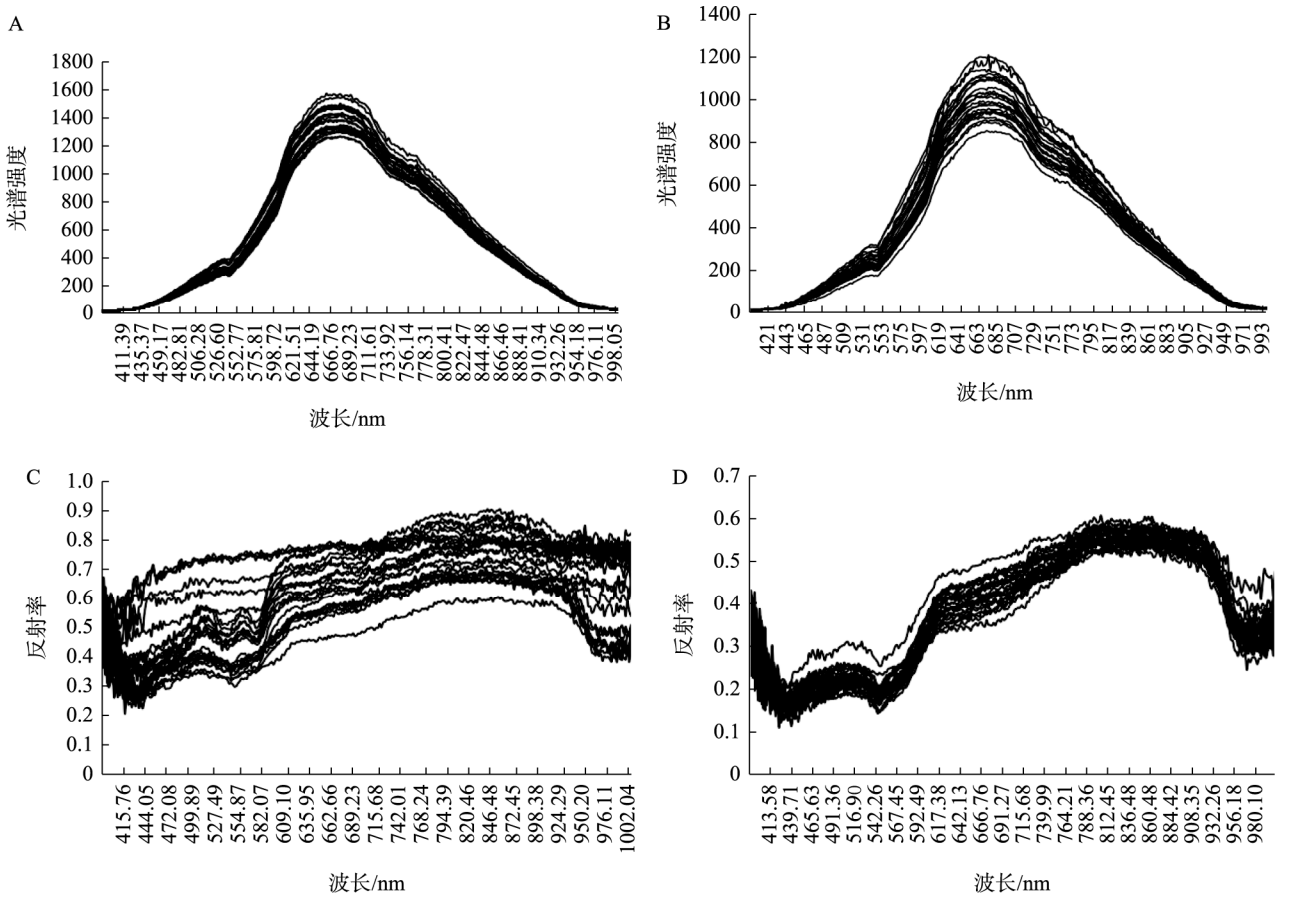
**表 1 不同贮藏时间鸡胸肉样本理化指标的对比分析表**
**Table 1 Comparative analysis table of physicochemical indicators of chicken breast samples with different storage durations**

| 贮藏时间 | 0 h | 72 h | 120 h |
|---|---|---|---|
| $L^*$ | 60.41±2.12$^a$ | 56.67±1.57$^b$ | 54.52±1.42$^c$ |
| $a^*$ | –0.17±1.46$^c$ | 2.16±1.13$^b$ | 3.20±1.37$^a$ |
| $b^*$ | 15.10±3.08$^a$ | 9.57±1.76$^b$ | 6.39±1.32$^c$ |
| pH | 5.87±0.09$^b$ | 5.83±0.09$^c$ | 6.32±0.08$^a$ |
| 水分含量/% | 74.68±0.72$^a$ | 74.03±0.66$^b$ | 73.59±0.69$^c$ |
| TVB-N/(mg/100 g) | 5.87±0.47$^c$ | 13.07±1.01$^b$ | 18.27±1.14$^a$ |

注：同一行中不同的小写字母标示差异显著($P$<0.05)。



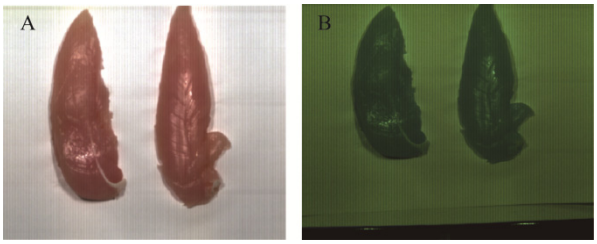

注：A. 色度变化曲线；B. pH 变化曲线；C. 水分含量变化曲线；D. TVB-N 含量变化曲线。
图 2 鸡胸肉冷藏过程中各理化指标随贮藏时间的变化
Fig.2 Changes in the physicochemical parameters of chicken breast during refrigerated storage




注：A. 新鲜鸡胸肉光谱强度曲线图; B. 腐败鸡胸肉光谱强度曲线图; C. 新鲜鸡胸肉反射率图像; D. 腐败鸡胸肉反射率图像。

图 3　光谱曲线图

Fig.3　Curve graph of spectral




注: A. 自然光图像; B. RGB 真彩图像。

图 4　鸡胸肉样本高光谱成像

Fig.4　Hyperspectral imaging of chicken breast samples

## 2.5　PLSR 模型的可行性及效果分析

将用于高光谱检测的不同时间点的鸡胸肉独立样本随机划分为训练集和预测集(其中训练集样本数 28 个, 占 2/3; 预测集样本数 14 个, 占 1/3), 训练集用于建立模型, 预测集用于验证模型, 各理化指标的 PLSR 建模结果如表 2 所示。本研究从数据支撑、特征响应及性能验证 3 个方面, 对基于 PLSR 算法构建的鸡胸肉新鲜度判别模型的可靠性进行验证。

在数据方面, 在贮藏期间水分含量值、pH 及色度等指标呈动态变化, 快速测定法根据 GB 5009.237—2016 和 GB 5009.3—2016 中的方法进行验证, 结果表明两者之间无明显差异($P$>0.05)。同时, 高光谱数据经 S-G 平滑结合一阶导数预处理后, 能够有效地抑制仪器噪声和外界干扰[46], 更好地突出光谱特征, 为模型提供了可靠的数据支持。

就特征响应而言, 新鲜肉与腐败肉在特征吸收峰处光谱响应有很大的差异。新鲜肉的结构组成比较稳定, 峰位置固定、峰突出、形状光滑; 腐败肉组分发生分解、氧化, 导致特征吸收峰的峰高度下降、位置偏移、峰形加宽, 这种相关性是模型准确判别的关键理论依据。

在性能验证上, 根据特征吸收峰的不同表现, 参考李明丽等[47]的方法, 结合交叉验证法优化 PLSR 模型参数, 去除多余的光谱变量, 以决定系数($r^2$)评估模型的拟合程度, 用预测均方根误差(predicted root mean square error, RMSEP)去判定模型预测能力的准确度, 最终实现了快速、精准区分新鲜肉和腐败肉的目的, 为鸡胸肉新鲜度的高光谱无损检测技术应用奠定基础。

对各指标预测性能的剖析如下: 水分含量的预测能力最优, 预测集相关系数($R^2$p)高达 0.87, $RMSE_P$ 为 0.95, 模型的

最接近 1, 原因在于冷藏过程中水分持续流失使光谱信号增强, 与 PLSR 线性模型高度适配; 色度指标的预测性能次之, $R^2$p 分别达到 0.83、0.77、0.81, 由于 $L^*$、$b^*$与表层水分及脂质氧化产物存在光谱关联, 而 $a^*$受肌红蛋白氧化过程中氧气浓度、酶活性等因素的非线性调控, 后期变化趋缓, 线性拟合难度显著提升, 导致 $L^*$、$b^*$的预测性能相较于 $a^*$更好; pH 的光谱信号微弱易受噪声干扰, 导致模型预测能力相对偏弱, $R^2$p 为 0.74, 但仍然在光谱定量检测的范围以内; 在冷藏过程中微生物持续分解蛋白质, TVB-N 随储藏时间稳步上升, $R^2$p 为 0.80, $RMSE_P$ 为 1.50 mg/100 g, 模型的预测性能良好。综上, $R^2$p 及 $RMSE_P$ 分别在 0.74~0.87 和 0.12~1.80 的范围内, 表明该模型可实现较为稳定的定量预测。

**表 2 基于 S-G 平滑的理化指标 PLSR 模型结果**

**Table 2 PLSR model results of physicochemical indicators based on S-G smoothing**

| 预处理 | 参数 | 特征波长个数 | 潜在变量 | 训练集 | | 预测集 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $R^2$c | $RMSE_c$ | $R^2$p | $RMSE_P$ |
| S-G 平滑 | $L^*$ | 10 | 5 | 0.90 | 1.38 | 0.83 | 1.80 |
| | $a^*$ | 8 | 4 | 0.86 | 0.46 | 0.77 | 0.60 |
| | $b^*$ | 10 | 6 | 0.89 | 1.18 | 0.81 | 1.52 |
| | pH | 11 | 4 | 0.83 | 0.09 | 0.74 | 0.12 |
| | 水分含量/% | 10 | 7 | 0.93 | 0.70 | 0.87 | 0.95 |
| | TVB-N/(mg/100 g) | 9 | 5 | 0.88 | 1.20 | 0.80 | 1.50 |

## 3 结 论

本研究采用“理化指标快检验证+各指标无损快速检测+高光谱无损检测”相结合的技术路线, 旨在构建多指标协同无损检测方法, 为鸡胸肉质量安全控制提供技术支持。本研究首先验证了 pH 与水分含量快检方法的可靠性, 其测定结果与 GB 5009.237—2016 和 GB 5009.3—2016 中的方法无显著差异($P$>0.05), 具备准确性和可行性。采用 S-G 平滑结合一阶导数进行数据处理, 可有效突出 540 nm(蛋白质)、720 nm(脂肪)及 970 nm(水分)处的特征吸收峰, 为模型判别提供了依据。基于 PLSR 构建的判别模型对各项理化指标 $R^2$p 介于 0.74~0.87 之间, 其中水分含量预测最优($R^2$p=0.87), pH 相对偏弱($R^2$p=0.74)但仍处于可接受范围, 整体预测结果较优。综上, 本研究构建的多指标协同无损检测方法实现了新鲜肉与腐败肉的准确区分, 可满足实时、批量检测需求, 为鸡胸肉新鲜度无损检测提供了可靠的技术方案。

## 参考文献


[1] 汪辰晨, 赵建伟, 陈龙, 等. 温度波动对冷鲜鸡贮藏品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(9): 10–20.
Wang Chenchen, Zhao Jianwei, Chen Long, et al. Effects of temperature fluctuation on storage quality of chilled chicken [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(9): 10–20.

[2] 姚磊, 李华. 5 款市售即食鸡胸肉的品质及风味分析[J]. 食品科技, 2025, 50(11): 133–141.
Yao Lei, Li Hua. Quality and flavor analysis of five commercially available ready-to-eat chicken breasts [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(11): 133–141.

[3] 李清筱. 复合益生菌对肉鸡肉品质、肌肉营养成分及挥发性风味物质的影响[J]. 中国饲料, 2025(24): 49–52.
Li Qingxiao. The effects of compound probiotics on the meat quality, muscle nutritional components and volatile flavor substances of broilers[J]. China Feed, 2025(24): 49–52.

[4] 王影, 王蕊, 何鸿举, 等. 冰鲜鸡肉腐败微生物检测技术研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(11): 60–66.
Wang Ying, Wang Rui, He Hongju, et al. Progress in detection techniques for spoilage organisms in chilled chicken meat [J]. Meat Research, 2022, 36(11): 60–66.

[5] 麦栩滔, 王文卓, 郑宇航, 等. 不同包装方式对冷鲜鸡肉微生物菌群多样性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 367–374.
Mai Xutao, Wang Wenzhuo, Zheng Yuhang, et al. Effects of different packaging methods on the microbial diversity in chilled chicken [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 367–374.

[6] 刘嫣嫣, 谢勇, 蔡克周, 等. 微冻贮藏对酱卤鸡肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2026(1): 67–73.
Liu Yanyan, Xie Yong, Cai Kezhou, et al. Effect of superchilled storage on the quality of soy sauce-braised chicken [J]. Meat Research, 2026(1): 67–73.

[7] 杨宇恒, 郑宇航, 王文卓, 等. 真空包装鸡肉肠产气微生物分离鉴定及胀袋原因探析[J]. 肉类研究, 2024, 38(4): 36–42.
Yang Yuheng, Zheng Yuhang, Wang Wenzhuo, et al. Isolation and identification of gas-producing microorganisms in vacuum-packed chicken sausage and analysis of reason for blown pack spoilage [J]. Meat Research, 2024, 38(4): 36–42.

[8] 马爱娟, 邓绍林, 李东岭, 等. 高压静电场结合不同贮藏温度对鸡肉货架期及品质的影响[J/OL]. 南京农业大学学报: 1-14. https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20250911.1100.002.
Ma Aijuan, Deng Shaolin, Li Dongling, et al. Effect of high voltage electrostatic field combined with different storage temperatures on shelf-life and quality of chicken meat [J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University: 1-14. https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20250911.1100.002.

[9] 梁薇薇, 卞春, 潘男, 等. 可视化智能标签监测冷却肉新鲜度研究进展

[J]. 肉类研究, 2026, 40(3): 91–103.
Liang Weiwei, Bian Chun, Pan Nan, et al. Research progress on visual intelligent labels for monitoring the freshness of chilled meat [J]. Meat Research, 2026, 40(3): 91–103.

[10] 张丽, 李志辉, 马明星. 基于近红外光谱和 FOA-RF 的猪肉新鲜度检测[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 51–58.
Zhang Li, Li Zhihui, Ma Mingxing. Pork freshness monitoring based on near-infrared spectroscopy and random forest improved by fruit fly optimization algorithm [J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 51–58.

[11] 张晋豪, 王浩东, 刘欣悦, 等. 基于LAMP技术快速检测冷鲜鸡新鲜度[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 351–359.
Zhang Jinhao, Wang Haodong, Liu Xinyue, et al. Loop-mediated isothermal amplification for rapid evaluation of the freshness of chilled chicken [J]. Food Science, 2023, 44(6): 351–359.

[12] 孟祥忍, 王恒鹏, 吴鹏, 等. 低温蒸煮牛肉品质评价模型的构建与分析[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(1): 88–96.
Meng Xiangren, Wang Hengpeng, Wu Peng, et al. Construction and analysis of quality evaluation modeling for beef with sous vide cooking [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(1): 88–96.

[13] Xiong Zhenjie, Sun Dawen, Xie Anguo, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of hydroxyproline content in chicken meat [J]. Food Chemistry, 2015, 175: 417–422.

[14] Shen Xingyu, Xing Lujuan, Pan Leiqing, et al. Prediction of chicken breast meat freshness based on hyperspectral imaging technique and high-throughput sequencing [J]. Poultry Science, 2025, 104(4): 104999.

[15] Jiang Peihong, Zhang Yuhua, Qian Naiyu et al. Research on method to freshness grading of meat based on machine vision technology [J]. Food Science and Technology International, 2015(40): 296–300.

[16] 白扬, 哈里亚, 孟宪奎, 等. 市售绵羊、猪和鸭生熟肉色度值特征解析[J]. 农畜产品加工学报, 2025, 45(2): 78–96.
Bai Yang, Ha Liya, Meng Xiankui, et al. Comparative chromatic profiling of commercial raw versus cooked mutton, pork, and duck meat [J]. Journal of Agricultural and Livestock Products Processing, 2025, 45(2): 78–96.

[17] 何鸿举, 朱亚东, 王慧, 等. 近红外光谱技术在生鲜禽肉质量检测中应用的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 317–323.
He Hongju, Zhu Yadong, Wang Hui, et al. Recent advances in application of near-infrared spectroscopy for quality detection in fresh poultry meat [J]. Food Science, 2019, 40(21): 317–323.

[18] Han Jun, Wang Yaru, Wang Yi, et al. Effect of changes in the structure of myoglobin on the color of meat products [J]. Food Materials Research, 2024, 4(1): 1.

[19] Yue Ke, Cao Qinqin, Aftab S, et al. Insights into the evaluation, influential factors and improvement strategies for poultry meat quality: a review [J]. NPJ science of food, 2024, 8(1): 62.

[20] 葛庆联, 马丽娜, 樊艳凤, 等. 冰鲜黄羽肉鸡贮存过程中肉品质指标的变化规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8817–8820.
Ge Qinglian, Ma Lina, Fan Yanfeng, et al. Changes of meat quality indexes of chilled yellow feather broilers during storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(22): 8817–8820.

[21] Mir N A, Rafiq A, Kumar F, et al. Determinants of broiler chicken meat quality and factors affecting them: a review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(10): 2997–3009.

[22] 孙路, 唐道邦, 黄群. 高氧气调包装鲜鸡肉的品质变化及相关性分析[J]. 食品工业, 2020, 41(3): 77–80.
Sun Lu, Tang Daobang, Huang Qun. Quality change and relevance analysis of fresh chicken in high oxygen modified atmosphere packaging [J]. The Food Industry, 2020, 41(3): 77–80.

[23] Peyvasteh M, Popov A, Bykov A, et al. Meat freshness revealed by visible to near-infrared spectroscopy and principal component analysis [J]. Journal of Physics Communications, 2020, 4(9): 95011.

[24] 张凡, 姜鑫, 张存存, 等. 近红外光谱结合灰色关联度分析快速综合评价猪肉新鲜度[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(1): 89–95.
Zhang Fan, Jiang Xin, Zhang Cuncun, et al. Rapid and comprehensive evaluation of pork freshness using near infrared spectroscopy combined with grey correlation analysis [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2020, 43(1): 89–95.

[25] 刘小花, 周彬静, 彭菁, 等. 基于电子鼻和高光谱成像技术的冷鲜牛肉微生物的生长模型构建[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(3): 595–605.
Liu Xiaohua, Zhou Binjing, Peng Jing, et al. Modeling of microbial growth in chilled beef based on the e-nose and hyperspectral imaging techniques [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(3): 595–605.

[26] 赵健. 高光谱成像技术检测延边黄牛肉的新鲜度[J]. 现代食品科技, 2020, 36(2): 271–276.
Zhao Jian. Detection of the freshness of yanbian yellow beef by hyperspectral imaging [J]. Modern Food Science & Technology, 2020, 36(2): 271–276.

[27] 于洋, 张珏, 田海清, 等. 基于高光谱成像技术的冷鲜羊肉嫩度检测方法研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(12): 101–108.
Yu Yang, Zhang Jue, Tian Haiqing, et al. Detection method for tenderness of chilled fresh lamb based on hyperspectral imaging technology [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(12): 101–108.

[28] Haughey S A, Montgomery H, Moser B, et al. Utilization of hyperspectral imaging with chemometrics to assess beef maturity [J]. Foods, 2023, 12(24): 4500.

[29] Fan Binbin, Zhu Rongguang, He Dongyu, et al. Evaluation of mutton adulteration under the effect of mutton flavour essence using hyperspectral imaging combined with machine learning and sparrow search algorithm [J]. Foods, 2022, 11(15): 2278.

[30] Xiong Zhenjie, Xie Anguo, Sun Dawen, et al. Applications of hyperspectral imaging in chicken meat safety and quality detection and evaluation: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 55(9): 1287–1301.

[31] 王雅雯, 贾晓蕾, 何佳欣, 等. 基于高光谱成像技术的冷鲜猪肉水分和脂肪含量同步快速检测[J]. 肉类研究, 2026, 40(5): 65–72.
Wang Yawen, Jia Xiaolei, He Jiaxin, et al. Simultaneous and rapid measurement of moisture and fat contents in chilled pork based on hyperspectral imaging technology [J]. Meat Research, 2026, 40(5): 65–72.

[32] 王正荣, 赵圣明, 李亚, 等. 冰温对鸡胸肉成熟过程中品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 298–301, 308.
Wang Zhengrong, Zhao Shengming, Li Ya, et al. Effect of controlled freezing point storage on chicken breast characteristic during aging after post-mortem [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 298–301, 308.

[33] 刘玉玲, 贾晓蕾, 王雅雯, 等. 高光谱成像技术快速检测新鲜猪肉物理特性[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(23): 85–95.

Liu Yuling, Jia Xiaolei, Wang Yawen, et al. Hyperspectral imaging for rapid detection of physical properties of fresh pork [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(23): 85–95.

[34] 肖纵纵, 蔡浩天, 王炼, 等. 基于高光谱技术的牛肉新鲜度无损检测方法[J]. 包装与食品机械, 2025(5): 25–33.
Xiao Zongzong, Cai Haotian, Wang Lian, et al. Non-destructive detection method for beef freshness based on hyperspectral technology [J]. Packaging and Food Machinery, 2025(5): 25–33.

[35] 闻萍, 李海军, 雷禾雨, 等. 注水羊肉的高光谱数据采集与预处理方法研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 79–84.
Wen Ping, Li Haijun, Lei Heyu, et al. High spectral data acquisition and pretreatment method of water-injected mutton [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 79–84.

[36] Cao Yiming, Zhang Yan, Yu Shuangting, et al. Rapid and non-invasive assessment of texture profile analysis of common carp (*Cyprinus carpio* L. ) using hyperspectral imaging and machine learning [J]. Foods, 2023, 12(17): 3154.

[37] Xue Liang, Zhang Li, Yang Zhuoyue, et al. Hyperspectral imaging for rapid impurity detection in power system liquids [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 144: 111607.

[38] Qi Xinghui, Zhang Shaohua, Wang Liyang, et al. Classification of different gluten wheat varieties based on hyperspectral preprocessing, feature screening, and machine learning [J]. Food Chemistry: X, 2025: 102329.

[39] 王振东, 唐磊, 茅云翔. 基于高光谱图像的细齿麒麟菜水分含量预测研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2025(6): 1495–1503.
Wang Zhendong, Tang Lei, Mao Yunxiang. Research on *Eucheuma denticulatum* moisture content prediction based on hyperspectral images [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2025(6): 1495–1503.

[40] 孙宗保, 梁黎明, 闫晓静, 等. 基于高光谱成像技术的进口冰鲜牛肉新鲜度指标检测[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 315–323.
Sun Zongbao, Liang Liming, Yan Xiaojing, et al. Detection of freshness indexes of imported chilled beef using hyperspectral imaging technology [J]. Food Science, 2020, 41(22): 315–323.

[41] 王冬, 栾云霞, 王欣然, 等. 近红外光谱无损分析肉类品质的研究进展[J]. 肉类研究, 2024, 38(5): 61–70.
Wang Dong, Luan Yunxia, Wang Xinran, et al. Progress in non-destructive analysis of meat quality by near-infrared spectroscopy [J]. Meat Research, 2024, 38(5): 61–70.

[42] 师静睿, 兰盛斌, 石恒, 等. 粮食快检仪器适用性验证及评价方法的现状与展望[J]. 粮油食品科技, 2025(4): 148–154.
Shi Jingrui, Lan Shengbin, Shi Heng, et al. Current status and future prospects of adaptability verification and evaluation methods for rapid grain testing instruments [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025(4): 148–154.

[43] 刘宏超, 杨莹, 王步军. 3 种不同检测方法测定大豆水分含量的差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(9): 2753–2757.
Liu Hongchao, Yang Ying, Wang Bujun. Difference analysis of the determination of moisture content in soybean by 3 kinds of different methods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(9): 2753–2757.

[44] 李孟辕, 张文广, 姜新华, 等. 基于高光谱成像技术的冷鲜羊肉 pH 值无损检测[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 128–134.
Li Mengyuan, Zhang Wenguang, Jiang Xinhua, et al. Nondestructive detection of chilled mutton pH value using hyperspectral imaging technique [J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 128–134.

[45] 肖丹, 于苹, 郭雪, 等. 基于高光谱成像技术的木姜叶柯产地识别及品质成分含量预测研究[J]. 分析测试学报, 2026, 45(3): 1–14.
Xiao Dan, Yu Ping, Guo Xue, et al. Geographical origin discrimination and quality component content prediction of lithocarpus litseifolius (hance) chun. based on hyperspectral imaging technology [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2026, 45(3): 1–14.

[46] 黎小清, 陈桂良, 许木果, 等. 品种和割龄对橡胶树叶片氮含量高光谱估算的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(11): 2497–2505.
Li Xiaoqing, Chen Guiliang, Xu Muguo, et al. Effects of variety and tapping age on estimation of rubber leaf nitrogen content based on hyper-spectral [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(11): 2497–2505.

[47] 李明丽, 温彩运, 马东豪, 等. 基于土壤高光谱特征波段优选的盐分预测模型构建[J]. 中国农业科学, 2025(20): 4054–4069.
Li Mingli, Wen Caiyun, Ma Donghao, et al. Construction of salinity prediction model based on optimal selection of soil hyperspectral characteristic bands [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025(20): 4054–4069.

(责任编辑: 曹岱琳 韩晓红)