

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240609002

肉类新鲜度检测方法研究进展

陈少淮, 张 甫, 杨宇祥*

(湖南师范大学工程与设计学院, 长沙 410081)

摘 要: 肉类因其富含蛋白质、维生素、矿物质和其他各类营养物质而深受消费者喜爱。然而近年来, 肉类食品安全问题日渐凸显, 因误食不新鲜的肉而造成危害公众健康的事件屡次出现。为了切实保障人民群众的肉类食用安全, 研究人员致力于开发并优化肉类新鲜度检测方法。为此, 本文对国内外肉类新鲜度检测方法的最新进展进行了系统综述, 主要包括传统检测方法(感官评价、理化检测、微生物检测方法), 以及现代检测方法(高光谱成像技术、近红外光谱技术、电子鼻、电子舌、计算机视觉技术、生物阻抗技术等)。通过对比各类方法的优缺点, 分析其实际应用的可行性和有效性。传统检测方法虽普及广泛, 但却存在有损性等缺点; 现代检测方法则在无损性和快速性上表现出色, 但仍旧存在局限性。本文最后对肉类新鲜度检测技术的发展趋势进行展望, 未来应注重多技术融合, 提高检测准确性和效率, 为保障肉类食品安全提供技术和理论参考。

关键词: 肉类; 新鲜度; 传统检测方法; 现代检测方法

Research progress on detection methods of meat freshness

CHEN Shao-Huai, ZHANG Fu, YANG Yu-Xiang*

(College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

ABSTRACT: Meat is popular among consumers because it is rich in protein, vitamins, minerals, and other nutrients. However, in recent years, meat food safety has become increasingly prominent, and incidents of public health being jeopardized due to the accidental consumption of unfresh meat have occurred repeatedly. In order to ensure the safety of meat consumption, researchers are committed to developing and optimizing meat freshness testing methods. This paper reviewed meat freshness detection methods both domestically and internationally, including traditional detection methods (sensory evaluation, physicochemical detection, and microbiological detection), as well as modern detection methods (hyperspectral imaging technology, near-infrared spectroscopy, electronic nose, electronic tongue, computer vision technology, and bioimpedance technology). By comparing the advantages and disadvantages of these methods, this paper analyzed their feasibility and effectiveness in practical applications. Although traditional detection methods are widely popular, they had disadvantages such as damage, modern detection methods excel in non-destructiveness and rapidity, but still had limitations. Finally, this paper provided an outlook on the development trends of meat freshness detection technologies, suggesting a focus on multi-technology integration to enhance accuracy and efficiency, thereby providing technical and theoretical references for safeguarding meat food safety.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171366、32201134)、湖南省自然科学基金项目(2024JJ5271)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32171366, 32201134), and the Hunan Natural Science Foundation Project (2024JJ5271)

***通信作者:** 杨宇祥, 教授, 主要研究方向为信号检测与处理。E-mail: yuxiang.yang@hunnu.edu.cn

***Corresponding author:** YANG Yu-Xiang, Professor, Hunan Normal University, No.36 Lushan Road, Yuelu District, Changsha 410081, China. E-mail: yuxiang.yang@hunnu.edu.cn

KEY WORDS: meat; freshness; traditional detection methods; modern detection methods

0 引言

肉类是人类赖以生存的蛋白质、维生素、矿物质和其他营养物质的重要来源,在膳食结构中占有非常重要的地位^[1-3]。肉类因其营养丰富,成为了微生物、细菌滋生的栖息地,肉类的屠宰、运输、售卖以及存储等关键环节中,若有环节操作不当,均极易导致腐败变质现象发生^[4-6]。而误食腐败的肉品不但会对健康造成威胁^[7],而且可能导致食源性疾病预防^[8-10],因此,如何确保肉类品质安全、保障人民健康,成了全社会需要面对的一个问题^[11]。

肉类的品质指标包括新鲜度、风味、嫩度、保水性和营养成分等^[12],其中新鲜度是最为关键的指标之一。对肉类新鲜度进行检测,可以有效地避免变质肉的流通和误食^[13-14],目前,肉类新鲜度的检测方法多种多样,有传统的感官评价、理化检测、微生物检测等。随着技术不断发展,出现了如高光谱成像技术、近红外光谱技术、电子鼻(electronic nose, EN)、电子舌(electronic tongue, ET)、计算机视觉技术、生物阻抗技术等利用现代技术的检测方法。而检测方法众多,如何选取合适的新鲜度检测方法是当今研究人员关注的重点。

本文以不同肉类新鲜度检测方法为视角,阐述了传统和现代检测方法及其优缺点,同时总结了不同检测方法的应用,旨在为肉类新鲜度检测方法的研究提供参考,进而为肉类新鲜度评价体系的完善提供潜在理论依据。

1 传统检测方法

1.1 感官评价

感官评价(sensory evaluation)是利用视觉、嗅觉、触觉等感官功能^[15],对肉品的色泽、气味、黏度、弹性等特征的变化进行辨别,并据此对肉的品质进行评判的一种方法^[16-17]。我国自 20 世纪 90 年代起开始对感官评价进行研究,并逐步建立起相应的感官评价体系^[18]。目前,国家颁布的 GB 2707—2016《食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品》中,已对感官评价的新鲜度指标做出明确规定。由于感官评价操作最为直接且易于实施,因此国内外众多肉类产品的企业以及研究人员在研究肉的新鲜度时,仍会将其作为重要参考,并结合其他检验方法对新鲜度进行综合判断^[16,19]。

感官评价具有以下优势:不需借助仪器,不需要固定检验场所,简便易行,具有快速性、综合性、全面性、成本低、实效性高等特点^[16-17,20]。然而,感官评价也存在一些不足。首先,评价过程需要保证周围的环境因素,如光线、温度以及其他气味等干扰得到有效控制^[21]。其次,感

官评价要求检验人员具备丰富的检验经验,且其评价结果不易量化,存在主观性和片面性。此外,对于深度腐败的肉品,感官评价相对容易察觉,但对于轻微变质的肉品则可能不够敏感^[17,22]。

1.2 理化检测

肉类新鲜度检测常用的理化检测方法是对挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)的测定^[18,23]。TVB-N 是动物性食品在存储过程中,由于酶和细菌的作用而产生的氨及胺类等碱性含氮物质,这些物质在碱性环境中具有挥发性,因此得名 TVB-N^[24-25]。TVB-N 值是衡量肉品鲜度的重要指标,已被国家标准所采纳^[24]。依据该标准,TVB-N 值低于 15 mg/100 g 的肉品被判定为鲜肉;介于 15 至 25 mg/100 g 为次鲜肉;超过 25 mg/100 g 则视为腐败肉。为了准确测定 TVB-N 含量,GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》规定了 TVB-N 含量的测定方法:半微量定氮法、自动凯氏定氮仪法、微量扩散法^[26]。研究人员利用不同方法对 TVB-N 含量进行测定。胡亚萍等^[27]使用半微量定氮法对不同储存温度下羊肉的 TVB-N 含量进行测定,从而确定在不同温度下羊肉 TVB-N 含量超过国家规定标准所需的时间。方靖等^[28]利用半自动凯氏定氮仪对不同温度条件存储下的猪肉中 TVB-N 含量进行测定,最终证明:随着贮存时间增长,猪肉中 TVB-N 含量不断增长并且速度加快。韩雨辰等^[29]对 4 °C 冷藏的鸡脯肉片的 TVB-N 含量进行测定,发现了其在 72 h 内的 TVB-N 含量低于 15 mg/100 g,表明肉品处于新鲜状态,而在保藏 96 h 后,肉品变质。除了 TVB-N 测定外,还可以通过 pH 测定、粗氮测定、硫化氢测定、球蛋白沉淀、茚三酮显色反应、过氧化物酶反应试纸等其他理化检测方法实现对肉类新鲜度的检测^[16,30]。这些方法提供了从多个角度评价肉类新鲜度的可能。孔晓慧等^[31]通过测量 4 °C 冷藏条件下黄羽鸡鸡胸肉的 pH,并据此将鸡胸肉的新鲜度划分为两个类别:当 pH 低于 6.7 为新鲜, pH 超过 6.7 为不新鲜,这一研究结果有效验证了 pH 在评估肉类新鲜度方面的潜在应用价值。杜娟等^[32]使用球蛋白沉淀法对 6 份猪肉样品进行测量,并依据溶液中是否出现絮状沉淀来准确判断猪肉的新鲜度。栗绍文等^[33]利用过氧化物酶反应试纸法检测猪肉的新鲜度,并在非新鲜肉检测中取得了 100% 的符合率,验证了利用该方法测定肉新鲜度的准确性。尽管理化检测方法具有高度的准确性^[34],但它们通常较为复杂,需要良好的实验条件和具备相关知识的实验人员^[35]。此外,这些方法还需要昂贵的实验仪器,检验周期长,且对肉品具有破坏性^[13,36]。

1.3 微生物检测

肉类发生腐败现象主要原因是微生物的生长繁殖,因此对被测样品进行微生物检测,能够作为评估肉品新鲜度的一项重要科学依据^[37]。微生物检测是指在保证测量环境的条件下,检测被测样品单位体积或质量中的细菌菌落等微生物数目^[7]。我国微生物检验指标涵盖菌落总数、大肠杆菌、致病菌等^[38]。微生物检测分析通常分为定量分析与定性分析两个方面,即确定微生物的种类和数量^[7]。一般来说,菌落总数为 1×10^4 CFU/g 以下被认为是新鲜肉, $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ CFU/g 则为次新鲜肉,而超过 1×10^6 CFU/g 则判定为变质肉^[18]。传统的微生物检测方法多采用培养基法^[37],如孙晓明等^[39]就采用传统培养基法对不同销售市场鸡肉的不同部位进行微生物检测,验证利用微生物检测结果判断肉类新鲜度的可行性。然而,随着技术的发展,新型的微生物检测技术不断涌现,如聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)技术、紫外-可见分光光度法、基因芯片法、免疫学方法等^[40]。这些方法相较于传统方法,在某些方面展现了各自的优势。沈华明^[41]应用 PCR 技术对 200 份不同的食品样本进行微生物检测,并同时与传统培养法进行对比,结果证明 PCR 技术的食源性致病菌检出率明显更高。虽然微生物检测方法准确度高、相对可靠且实验操作流程皆有标准可依^[42],但是由于其检测过程具有破坏性、耗时较长且技术要求高,因此在现场检验中的推广使用受到一定的限制^[37,43-44]。

2 现代检测方法

2.1 近红外光谱技术

近红外光谱(near-infrared spectrum, NIS)是波长范围在 750~2500 nm 之间的电磁波,介于可见光和中红外光之间^[45]。NIS 技术的原理是通过检测肉品中含氢基团(水中的 O-H 键、蛋白质中的 N-H 键、脂肪中的 C-H 键)的倍频和频率合并吸收,从而根据吸收光谱的位置和强度进行成分定性或定量分析^[11,46]。近年来, NIS 技术在肉品新鲜度检测中的应用引起了广泛关注。CHOU 等^[47]通过选择 4 个特征波长的光谱对猪里脊肉糜的新鲜度进行了预测,利用偏最小二乘回归法(partial least squares regression, PLSR)建模,结果准确率超过 90%,验证了本方法评价新鲜度的潜力。郭庆辉等^[48]设计一种肉品无损检测的光学传感器,并利用近红外光谱技术采集样品在不同冷藏时间和不同检测距离下的 TVB-N 的含量,建立了猪肉 TVB-N 含量的 PLSR 预测模型,最终预测集的相关系数达到了 0.97。赵松玮等^[49]利用多通道可见-近红外光谱系统,获取了猪肉表面 380~1080 nm 波长范围内的漫反射光谱数据,使用 PLSR 建立猪肉新鲜度预测模型,评定准确率可达 92.9%。此外, MOON 等^[50]借助便携式的可见-近红外光谱仪来获取 4 种

肉品的光谱信号,并使用卷积神经网络的机器学习算法构建新鲜度预测模型,最终的准确率最高可达到 92%。由此可见, NIS 技术在检测肉类新鲜度上具有可行性。

NIS 技术能够在不破坏被测肉品的情况下对其进行快速测量分析,并且操作过程较简单^[51]。然而,该方法也存在一些缺点:(1)被测肉类样品的不均匀及表面条件会影响光谱数据测量的精度^[52];(2)光谱测量仪器的价格一般比较昂贵^[53];(3)建立 NIS 模型需要消耗大量样品,并且模型不具有通用性,建模和预测必须在同一台仪器上进行^[45];(4)光谱与样品测量数据的联系完全依赖于化学计量法^[54]。

2.2 高光谱成像技术

高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)技术结合了光谱技术与成像技术^[55],能够同时捕获肉品的空间信息和光谱信息^[56]。HSI 系统主要由光源、光谱仪、镜头、高分辨率相机和电荷耦合探测器(charge-coupled device, CCD)、计算机等构成^[57]。其扫描方式包括点扫描、线扫描和面扫描^[58]。HSI 技术的基本原理是:将光源照射于待测样品,样本表面反射、散射或透射的光经过光谱分散装置成像在 CCD 上,最后通过计算机进行分析和处理^[59]。目前,已有研究人员证明了使用 HSI 技术检测肉类新鲜度的可行性。邹小波等^[60]通过对肴肉的 HSI 中光谱均值特征的研究,成功构建了 4 种预测模型,并对肉中的 TVB-N 进行预测,用联合区间偏最小二乘法构建的预测模型相关系数达到了 0.854。张雷蕾等^[59]成功运用 HSI 技术获取了冷却猪肉表面 470~1000 nm 范围内的高光谱散射图像,从散射图像中提取了反射光谱,分别采用了二次 Savitzky-Golay 平滑和多元散射校正 2 种方法对提取的反射光谱进行预处理,并采用偏最小二乘回归方法建立模型,最后利用该模型对猪肉新鲜度进行评定,准确率为 91%。同样,张钰等^[61]也通过 HSI 系统测定羊肉挥发性盐基氮含量,并划分样本新鲜度类别,使用分类回归决策树模型和反向传播的人工神经网络作为分类器,对预测集的平均分类准确率分别为 91.67% 和 83.33%。KHOJASTEHN AZHAND 等^[62]利用 HSI 系统对虹鳟鱼的不同保存阶段进行数据采集,并应用主成分分析提取关键光谱特征,建立偏最小二乘判别分析虹鳟鱼肉新鲜度模型,分类准确率达 100%。HSI 的优势在于非接触式测量、操作步骤简单、速度快且准确度高^[63-64]。然而,其不足之处在于系统成本高^[65],并且高光谱数据中存在大量冗余信息,影响处理速度和在线分析^[66]。

2.3 电子鼻

EN 是一种模仿人和动物的鼻子并且能够用来感知和识别气味的仿生电子系统^[67],其主要由气敏传感器阵列、信号处理子系统以及模式识别子系统等部分构成^[68-69]。在工作时,气敏传感器阵列首先会对气体成分进行吸附、解吸附或反应,从而产生相应的电信号,这些信号随后被信

号处理子系统放大、转换、采集并传输。类似于动物和人大脑皮层的模式识别子系统会对这些电信号进行模式识别并输出判断结果^[70-71]。EN 在食品质量评估领域, 特别是在肉类新鲜度检测方面, 已展现出显著的应用潜力。陈静茹等^[72]利用 EN 技术对北京油鸡肉存储过程中的品质变化的进行预测, 能够有效地区分存储前期和存储后期肉样品, 因此证明了 EN 的可行性。陈远涛^[73]通过 EN 系统测量了多种肉品在储存过程中释放的气味信息, 并结合感官评价数据, 建立了基于线性判别分析的新鲜度评估模型。该模型在猪肉和鸡肉的新鲜度识别上分别达到了 98.82% 和 91.90% 的高准确率。CHEN 等^[6]利用 EN 系统研究猪肉、牛肉、羊肉的新鲜度, 发现其能够区分 3 种不同样品并能够对它们的新鲜度作出较准确的判断, 其对猪肉、牛肉、羊肉的判断准确率分别为 89.5%、84.2%、94.7%。石志标等^[74]通过对牛肉和牛肉制品的研究建立了牛肉新鲜度检测的 EN 系统, 对贮藏 7 d 内牛肉新鲜度识别的准确度达到 99.25%。

EN 技术的具有客观、准确、快速和重复性好等优点^[75-76], 但在实际应用中也存在一些限制。首先, 针对不同类别的待测样本, 可能需要特定的气体传感器来确保检测效果^[67]。其次, EN 对环境条件的要求较高, 因此在测量过程中需要保证良好的环境控制^[67]。

2.4 电子舌

ET 作为仿生技术的产物, 是一种能够模拟人舌对样品进行味觉指标定性或定量分析的检测仪器^[77]。它由味觉传感器、数据采集系统以及模式识别与结果分析系统 3 大部分组成^[78]。ET 通过传感器获取相关的味觉物质信号, 经过数据处理后, 这些信号被传输至电脑, 由模式识别软件进行分析, 从而实现对不同肉品的区别辨识, 并得出各自的味觉信息^[22,79]。ET 有多种类型, 根据味觉传感器的工作原理, 可分为电位型、伏安型、阻抗型、光寻址型、声波型和生物传感器型等^[22]。在肉类新鲜度检测方面, ET 已被证明是可行的。例如, GIL 等^[80]构建了一个包含金、银、铜、铅、锌及碳电极, 并辅以参比电极的 ET 系统, 实现了对肉类新鲜度指标的量化。韩剑众等^[81]采用多频脉冲 ET 对不同品种、不同部位、不同储藏时间的肉进行测量, 证实了 ET 对肉类新鲜度的辨识评价是有效的。鲁伟^[82]则将理化指标测量与 ET 检测相结合, 通过主成分分析和判别分析, 发现 ET 能够有效区分不同保存时间和分组的冰鲜黄鸡, 这为冰鲜黄鸡的新鲜度评价和分级提供了依据。丛军等^[83]在研究荣昌猪肉及其制品时, 也利用 ET 技术结合总菌落数、TVB-N 和感官评价分析, 划分了 3 个新鲜度等级, 并证实了在贮藏过程中荣昌猪肉及其制品的新鲜度随贮藏时间的增加而下降, 进一步说明 ET 在新鲜度检测上的潜力。

ET 具有快速、准确和操作简单的特点^[84], 并且它能够反映检测对象的整体特性^[85]。但是 ET 也存在一些局限性: 一方面, 环境因素如 pH、温度和湿度等环境因素都会对 ET 的测量结果造成影响^[86]; 另一方面, ET 的设备成本及其维护成本相对较高^[77], 这在一定程度上限制了其广泛应用。

2.5 计算机视觉技术

计算机视觉(computer vision, CV)技术旨在通过计算机模拟人的视觉功能, 实现对图像中的信息进行提取和分析^[87]。一个典型的计算机视觉系统主要由 3 个部分构成: 相机、照明系统以及图像处理分析系统^[88], 首先, 通过相机捕获物体的数字图像; 随后, 核心步骤是利用计算机模拟人类的视觉处理机制对图像进行处理和分析; 最后, 基于这些分析得出相应结论^[89]。作为一种新兴的技术手段, CV 为研究人员在肉品新鲜度检测研究提供了新的思路。孙永海等^[90]通过 CV 技术对冷藏牛肉的新鲜度进行分析研究, 选取图像的原始颜色信息作为评价新鲜度的特征值, 构建特征向量, 通过色调-饱和度-强度(hue-saturation-intensity, HIS)、红绿蓝(red green blue, RGB)和青-洋红-黄-黑(cyan-magent-yellow-black, CMYK)这 3 种彩色模型来评价冷却牛肉的新鲜度, 其准确率分别为 82.1%、78.6%、75.0%, 验证了 CV 技术检测新鲜度的潜力。潘婧等^[91]运用 CV 技术提取猪肉通脊表面的颜色特征参数, 并提出一种猪肉新鲜度等级预测时颜色特征参数和神经网络优化选取的方法, 利用神经网络构建新鲜度预测模型, 其预测准确率最高为 95.56%。张茹^[92]利用 CV 技术对冷鲜牛肉采集图像采集, 通过神经网络对冷鲜牛肉的图像信息和质地特性进行融合, 实现了准确率为 97.00% 的冷鲜牛肉新鲜度识别。TAHERI-GARAVAND 等^[93]在 4 °C 的环境下对鸡肉进行图像采集, 并利用 CV 技术进行处理, 构建了基于人工神经网络的鸡肉新鲜度预测模型, 该模型的均方误差为 0.002045, 预测值与实际值的相关系数为 0.98734, 对 CV 技术检测的有效性得到了验证。

CV 技术能够连续且快速地定位、提取、评价目标的信息, 是一种效率更高、更经济的新型无损测量技术^[94]。然而, 值得注意的是, CV 技术的应用仍存在一定的局限性和挑战。在实际操作中, 需要依赖相机设备进行图像采集, 而这一过程往往容易受到周围光线的影响^[95], 因此必须确保良好的环境条件。此外, 一个不可忽视的问题是, CV 技术获取的图像数据往往依赖于专业人员的介入, 以及他们使用特定复杂软件的能力来进行后续处理^[92,96-97], 这可能成为提高分析效率与普及度的障碍。因此, 在应用 CV 技术进行肉品新鲜度检测时, 需要充分考虑到这些因素。

2.6 生物阻抗技术

生物阻抗(bioimpedance)是生物组织的基本生理参数,

反映了生物细胞、组织、器官乃至整个机体的电学特性^[98]。阻抗测量实际上是利用物理学上的欧姆定律,即阻抗(Z)等于电压(U)与电流(I)的比值^[99]。具体方法是通过电极向被测组织输入微小的交变电流(或电压)信号,同时通过电极获取组织的电压(或电流)信号,进而计算获得阻抗值 Z ^[100-102]。在肉类存储过程中,由于自溶腐败和微生物作用,细胞膜会被破坏,导致细胞液渗透到细胞间隙,进而改变生物组织的阻抗特性^[103-104],因此,利用生物阻抗技术测量得到肉类的阻抗参数,可以间接用于评估肉类的新鲜度^[105]。

目前,国内外的研究人员已将生物阻抗技术应用于肉类新鲜度检测领域,并且取得了不少研究成果。艳茹等^[106]研究了牛宰后肌肉的生物电阻抗特性变化后,发现宰后牛肉的阻抗会先迅速上升,随后逐渐下降。PÉREZ-ESTEVE 等^[107]通过生物阻抗测量和不同理化参数(水分、脂肪、pH 和 TVB-N)检测对鱼的新鲜度进行评估,结果显示生物阻

抗和 TVB-N 之间的判定系数(R^2)为 0.72,验证了生物阻抗技术在鱼肉新鲜度预测的潜力。石丽敏等^[99]也测量了冷鲜猪肉的阻抗特征,并结合 TVB-N 含量作为新鲜度指标,最终证明阻抗特性与 TVB-N 含量相关度高达 0.934,为该方法在新鲜度检测的应用提供了理论说明。NOURI 等^[108]利用阻抗分析仪 Agilent 4294A 进行 40 Hz 至 110 MHz 的生物阻抗谱测量,并应用模糊逻辑模型对 4 种牛肉肌肉的新鲜度进行分类,准确率在 60%至 100%之间,这一研究显著推动了生物阻抗技术在新鲜度检测领域的发展。本测量技术具有快速测量、非破坏性、低成本和操作简单等优点^[109-111]。然而,利用生物阻抗测量不同种类、来源的肉类,以及具有不同肌肉结构和组织各向异性的样本时,可能导致不同的测量结果,这意味着需要针对不同的应用专门设计预测模型和电极^[112-113]。

上述各类检测方法的优缺点比较如表 1 所示。

表 1 肉类新鲜度检测方法的优缺点比较
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of meat freshness testing methods

检测方法	优点	缺点
感官评价	快速性、综合性、全面性、成本低、实时性	经验要求高、环境敏感、主观性、片面性
理化检测	准确度高	破坏性、方法复杂、实验条件严格、专业性强、仪器昂贵、检验周期长
微生物检测	准确度高	破坏性、耗时长、技术要求高、实时性差
NIS 技术	无损性、快速性、操作简单	表面条件会对测量的精度造成影响、建模样品消耗大、成本高、模型通用性差、依赖化学计量法
HSI 技术	无损性、非接触、快速性、操作简单、准确度高	成本高、冗余信息影响
EN	无损性、客观性、快速性、准确度高、重复性好	环境敏感
ET	无损性、快速性、操作简单、反应整体特性	便携性差、设备成本高、维护成本高
CV 技术	无损性、非接触、快速性、实时性	便携性差、需专业人员操作
生物阻抗技术	无损性、快速性、低成本、操作简单	需要针对不同的应用专门设计预测模型和电极

3 总结与展望

肉类新鲜度检测是保障食品安全的关键环节。本文对现有的肉类新鲜度检测方法的研究现状进行综述。肉类新鲜度的检测的方法多种多样,传统的新鲜度检测方法与现代的新鲜度检测方法各有其优缺点。目前,感官评价、理化评价、微生物检测等传统方法因耗时、费力、昂贵等缺点,更多的是作为辅助手段使用。尽管传统的检测技术依然占据一席之地,但高光谱技术和生物阻抗技术等新兴方法因其快速、无损的特性而备受瞩目,成为当前科研领域的焦点。然而,在实际应用阶段仍面临诸多挑战,例如需克服重复性差的问题。

为开发出具有无损、便携、快速、准确等优点的肉类新鲜度测量方法,研究人员需进一步结合当前的技术对肉类的新鲜度进行探索。同时,跨学科的研究和技术融合也将为肉类新鲜度检测领域带来新的突破和发展。当前已涌现了不少多技术交叉的检测方法,例如 CV 技术与理化检测结合、HSI 技术与 EN 结合以及生物阻抗与 EN 结合等

方法,它们在一定程度上扩展新鲜度检测方式。然而,未来的研究中还有许多挑战需要解决,但这些努力将推动肉类新鲜度检测技术的不断进步。未来肉类新鲜度检测方法可以从以下方面去实现:

(1)构建肉类新鲜度的新标准化体系。当前,国内肉类新鲜度的检验方法尚显滞后,主要依赖于理化检测作为客观指标。尽管 TVB-N 等测量方法被誉为肉类新鲜度检测的“金标准”,但它们在实际应用中却忽视了无损检测的重要性。随着现代检测技术的更迭,在肉类新鲜度检测方面的无损检测技术也必将会在今后逐渐成为主流,因此有必要建立一套新的检测标准和评价体系,并推动相关技术向市场化方向发展。

(2)融入人工智能技术。在人工智能技术蓬勃发展的背景下,将其与检测方法相结合,不仅能够极大提升数据分析的便捷性,还能显著提升检测的准确性和稳定性、实现检测流程的自动化和智能化。更重要的是,这种融合将推动检测流程向自动化和智能化方向发展,从而极大地提高检测效率。

(3)多种检测技术相结合。目前,大多数研究局限于采用单一的检测技术来评估肉类的新鲜度。然而,鉴于肉类产品的复杂性,若能将多种检测技术融合,形成一套综合性的检测方案,可以从多个角度对肉类新鲜度进行评估,这将大大提高检测的可信度和全面性。这种综合性的检测方法将有望成为未来肉类新鲜度检测领域的重要发展方向。

参考文献

- [1] 程广燕, 刘珊珊, 杨祯妮, 等. 中国肉类消费特征及 2020 年预测分析[J]. 中国农村经济, 2015(2): 76–82.
CHENG GY, LIU SS, YANG ZN, *et al.* Characteristics of meat consumption in China and forecast analysis for 2020 [J]. Chin Rural Econ, 2015(2): 76–82.
- [2] 朱文博, 陈永福. 世界和中国肉类消费及展望[J]. 农业展望, 2018, 14(3): 98–109.
ZHU WB, CHEN YF. Meat consumption and outlook in the world and China [J]. Agric Outlook, 2018, 14(3): 98–109.
- [3] 周岩. 中国“肉盘子”基本端稳[N]. 2023-04-26(1).
ZHOU Y. China's "meat plate" basically stabilized [N]. 2023-04-26(1).
- [4] KIM DY, PARK SW, SHIN HS. Fish freshness indicator for sensing fish quality during storage [J]. Foods, 2023, 12(9): 1801–1812.
- [5] CHUKU A, ETIM LB, OBANDE GA, *et al.* Bacteriological quality of fresh raw beef and chevon retailed in Lafia Metropolis, Nigeria [J]. J Microbiol Res, 2016, 6(2): 29–34.
- [6] CHEN J, GU J, ZHANG R, *et al.* Freshness evaluation of three kinds of meats based on the electronic nose [J]. Sensors, 2019, 19(3): 605–616.
- [7] WU XH, LIANG XY, WANG YX, *et al.* Non-destructive techniques for the analysis and evaluation of meat quality and safety: A review [J]. Foods, 2022, 11(22): 3713–3743.
- [8] 许金凤, 陈曦, 张潇丹, 等. 2021—2022 年镇江市监测食品中食源性致病细菌污染状况[J]. 江苏卫生保健, 2024, 26(2): 134–137.
XU JF, CHEN X, ZHANG XD, *et al.* Monitoring of foodborne pathogen contamination in food in Zhenjiang from 2021 to 2022 [J]. Jiangsu J Health Care, 2024, 26(2): 134–137.
- [9] WARMATE D, ONARINDE A. Food safety incidents in the red meat industry: A review of foodborne disease outbreaks linked to the consumption of red meat and its products, 1991 to 2021 [J]. Int J Food Microbiol, 2023, 398: 110240.
- [10] 张秋, 肖平辉. 从“僵尸肉”事件谈肉制品安全风险管理[J]. 肉类研究, 2016, 30(10): 49–52.
ZHANG Q, XIAO PH. Reflection on meat product risk information and food safety regulation in the aftermath of “zombie meat” scandal [J]. Meat Res, 2016, 30(10): 49–52.
- [11] HUH S, KIM HJ, LEE S, *et al.* Utilization of electrical impedance spectroscopy and image classification for non-invasive early assessment of meat freshness [J]. Sensors, 2021, 21(3): 1001–1014.
- [12] 齐亮, 宋莹莹. 猪肉新鲜度评价指标的实测与比较[J]. 轻工科技, 2017, 33(10): 7–9.
QI L, SONG YY. Measurement and comparison of evaluation indexes of pork freshness [J]. Light Ind Sci Technol, 2017, 33(10): 7–9.
- [13] 潘晓倩, 赵燕, 张顺亮, 等. 新鲜牛肉冷藏过程中挥发性成分的变化[J]. 肉类研究, 2016, 30(3): 15–19.
PAN XQ, ZHAO Y, ZHANG SL, *et al.* Changes in volatile components of fresh beef during cold storage [J]. Meat Res, 2016, 30(3): 15–19.
- [14] 梁菡峪, 曹淑瑞, 郑小玲, 等. 肉类常规腐败评价指标研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(19): 4805–4808, 4811.
LIANG HY, CAO SR, ZHENG XL, *et al.* Study of routine corruption evaluation in meat [J]. Hubei Agric Sci, 2015, 54(19): 4805–4808, 4811.
- [15] MUNOZ M. Sensory evaluation in quality control: An overview, new developments and future opportunities [J]. Food Qual Prefer, 2002, 13(6): 329–339.
- [16] 蒋丽施. 肉品新鲜度的检测方法[J]. 肉类研究, 2011, 25(1): 46–49.
JIANG LS. Methods of meat freshness detection [J]. Meat Res, 2011, 25(1): 46–49.
- [17] 雷力. 肉的新鲜度检测方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
LEI L. Research on detection methods of meat freshness [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [18] 左晓佳, 再努热·吐尔孙. 肉品新鲜度评价及保鲜技术研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(12): 69–75.
ZUO XJ, ZAINURE TERS. Research progress in meat freshness evaluation and preservation technologies [J]. Meat Res, 2023, 37(12): 69–75.
- [19] 马荣安. 肉新鲜度检验的研究进展[J]. 肉品卫生, 2000(11): 27–28.
MA RAN. Research progress of meat freshness test [J]. Meat Hyg, 2000(11): 27–28.
- [20] 于英杰. 牛肉新鲜度检验指标的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
YU YJ. A research on the index signs of fresh degree of beef [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [21] 耿爱琴, 郑国锋, 钱和. 浅谈肉类新鲜度的检测方法[J]. 肉类工业, 2006(12): 37–39.
GENG AIQ, ZHENG GF, QIAN H. A review of methods for the determination of freshness of meat [J]. Meat Ind, 2006(12): 37–39.
- [22] 黄丽娟. 肉品品质的电子舌评价研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2008.
HUANG LJ. Assessment of meat quality based on the electronic tongue [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2008.
- [23] 黄丽娟, 韩剑众. 生肉新鲜度评定方法研究进展[J]. 肉类研究, 2007, 10(6): 37–39.
HUANG LJ, HAN JZ. Research progress on evaluation methods of raw meat freshness [J]. Meat Res, 2007, 10(6): 37–39.
- [24] 张越, 宫田娇. 食品中挥发性盐基氮检测技术研究[J]. 现代食品, 2019(24): 188–189.
ZHANG Y, GONG TJ. Study on the determination technology of volatile base nitrogen in food [J]. Mod Food, 2019(24): 188–189.
- [25] 邵家丽, 郑健琨. 牛肉不同储存条件下挥发性盐基氮变化的研究[J]. 现代食品, 2020(12): 217–219.
SHAO JL, ZHENG JK. Study on the change of volatile basic nitrogen in beef under different storage conditions [J]. Mod Food, 2020(12): 217–219.
- [26] 李江华. 肉与肉制品中挥发性盐基氮的测定[J]. 肉类研究, 2018, 32(1): 3–4.
LI JH. Determination of volatile base nitrogen in meat and meat products [J]. Meat Res, 2018, 32(1): 3–4.
- [27] 胡亚萍, 康立超, 朱荣光, 等. 羊肉在不同储存温度下挥发性盐基氮的变化研究[J]. 食品安全导刊, 2022(26): 98–100, 104.
HU YP, KANG LC, ZHU RG, *et al.* Study on the changes of total volatile

- base nitrogen in mutton at different storage temperatures [J]. *China Food Saf Magaz*, 2022(26): 98–100, 104.
- [28] 方靖, 徐清霞, 洗灿标. 半自动凯氏定氮仪法测定挥发性盐基氮含量[J]. *广州化工*, 2019, 47(7): 108–109, 156.
- FANG J, XU QX, XIAN CB. Determination of volatile base nitrogen in pork by semi-automatic Kjeldahl method [J]. *Guangzhou Chem Ind*, 2019, 47(7): 108–109, 156.
- [29] 韩雨辰, 蒋云升, 邓婷婷, 等. 鸡肉预上浆制品微生物菌群与卫生质量变化的研究[J]. *中国食物与营养*, 2012, 18(4): 10–13.
- HAN YC, JIANG YS, DANG TT, *et al.* Microflora and hygienic quality of chicken pre-starch products [J]. *Food Nutr China*, 2012, 18(4): 10–13.
- [30] 王选慧. 市场肉类新鲜度的快速检验方法探讨[J]. *中兽医学杂志*, 2018(7): 86.
- WANG XH. Discussion on the method of quick inspection of meat freshness in market [J]. *Chin J Tradit Vet Sci*, 2018(7): 86.
- [31] 孔晓慧, 王小明, 邓绍林, 等. 冷藏条件下宰后黄羽肉鸡新鲜度变化规律[J]. *肉类研究*, 2024, 38(2): 50–55.
- KONG XH, WANG XM, DANG SL, *et al.* Changes in freshness of yellow-feathered broilers after slaughter under refrigerated conditions [J]. *Meat Res*, 2024, 38(2): 50–55.
- [32] 杜娟, 高荣琨. 市售生肉的内品质检验[J]. *肉类工业*, 2007(7): 40–44.
- DU J, GAO RK. Meat quality inspection of commercially available raw meat [J]. *Meat Ind*, 2007(7): 40–44.
- [33] 栗绍文, 包华君, 孟宪荣, 等. 过氧化物酶反应试纸法检验肉新鲜度试验[J]. *中国兽医杂志*, 2003, 39(10): 46–47.
- LI SW, BAO HJ, MENG XR, *et al.* Meat freshness test by peroxidase reaction paper method [J]. *Chin J Tradit Vet Sci*, 2003, 39(10): 46–47.
- [34] BEKHIT A, HOLMAN WB, GITERU SG, *et al.* Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review [J]. *Trend Food Sci Technol*, 2021, 109: 280–302.
- [35] NAJAR-VILLARREAL F, BOYLE AE, VAHL CI, *et al.* Correlation of bioelectrical impedance with freshness quality attributes of beef longissimus lumborum steaks [J]. *Meat Muscl Biol*, 2021, 5(1): 1–11.
- [36] 许冠男, 郭培源, 袁芳. 猪肉新鲜度无损检测技术现状及发展方向[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(1): 14–17, 42.
- XU GN, GUO PY, YUAN F. Current status and development direction of nondestructive testing technology for pork freshness [J]. *J Beijing Technol Bus Univ (Nat Sci Ed)*, 2010, 28(1): 14–17, 42.
- [37] 胡三梅. 肉及肉制品微生物检测新技术研究进展[J]. *肉类研究*, 2022, 36(5): 62–67.
- HU SM. Progress in new techniques for microbial detection in meat and meat products [J]. *Meat Res*, 2022, 36(5): 62–67.
- [38] ÖZOGUL Y, ÖZYURT G, ÖZOGUL F, *et al.* Freshness assessment of European eel (*Anguilla anguilla*) by sensory, chemical and microbiological methods [J]. *Food Chem*, 2005, 92(4): 745–751.
- [39] 孙晓明, 张海妍, 张松山, 等. 市售鸡肉产品的食源性致病微生物检测的研究[J]. *肉类研究*, 2010, 19(7): 50–53.
- SUN XM, ZHANG HY, ZHANG SS, *et al.* Study on detection of foodborne pathogenic microorganisms in commercial chicken products [J]. *Meat Res*, 2010, 19(7): 50–53.
- [40] 李二鹏, 王顺芝, 文艺, 等. 快速检测方法在食品微生物检测中的应用[J]. *中国食品工业*, 2022(24): 70–72.
- LI ERP, WANG SZ, WEN Y, *et al.* Application of rapid detection method in food microbiological detection [J]. *China Food Ind*, 2022(24): 70–72.
- [41] 沈华明. 200 份食品微生物检测中 PCR 检测技术运用及结果分析[J]. *食品安全导刊*, 2023(29): 63–65.
- SHEN HM. Application and result analysis of PCR technique in 200 samples of food microbiological detection [J]. *China Food Saf Magaz*, 2023(29): 63–65.
- [42] 张欢. 食品微生物检验技术及未来发展趋势[J]. *食品安全导刊*, 2017(27): 124.
- ZHANG H. Food microbiological testing technology and future development trend[J]. *China Food Saf Magaz*, 2017(27): 124.
- [43] 王平, 王玉华, 吕娜. 鲜猪肉在室温贮藏过程中品质的变化研究[J]. *农产品加工*, 2014(20): 65–66.
- WANG P, WANG YH, LV N. Fresh pork's quality changes during its storage [J]. *Farm Prod Process*, 2014(20): 65–66.
- [44] 李汝春, 鞠雷, 葛爱民. 肉新鲜度的理化检验方法[J]. *肉类工业*, 2015(11): 45–47.
- LI RC, JU L, GE AIM. Method for biochemical test of meat freshness [J]. *Meat Ind*, 2015(11): 45–47.
- [45] 沈啸, 唐修君, 樊艳凤, 等. 近红外光谱技术在肉类品质评价中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(21): 7260–7264.
- SHEN X, TANG XJ, FAN YF, *et al.* Application of near infrared spectroscopy in meat quality evaluation [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(21): 7260–7264.
- [46] 王文秀, 彭彦昆, 刘媛媛. 基于近红外光谱的猪肉新鲜度无损检测方法的改进[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(8): 3007–3013.
- WANG WX, PENG YK, LIU YY. Quantitative evaluation of pork freshness based on near-infrared spectroscopy [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(8): 3007–3013.
- [47] CHOU C, CHYR C, CHEN L, *et al.* Evaluation of freshness of ground pork tenderloin by visible/near infrared spectroscopy [J]. *J Food Drug Anal*, 2010, 18(2): 2.
- [48] 郭庆辉, 彭彦昆, 李永玉, 等. 肉品无损检测光学传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 484–490.
- GUO QH, PENG YK, LI YY, *et al.* Design and testing of optical sensors for non-destructive testing of meat [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2020, 51(S2): 484–490.
- [49] 赵松玮, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于近红外光谱的生猪肉新鲜度实时评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2012, 3(6): 580–584.
- ZHAO SW, PENG YK, WANG W, *et al.* Real-time assessment of pork freshness based on visible/near infrared spectroscopy [J]. *J Food Saf Qual*, 2012, 3(6): 580–584.
- [50] MOON EJ, KIM Y, XU Y, *et al.* Evaluation of salmon, tuna, and beef freshness using a portable spectrometer [J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4299.
- [51] 许岩. 近红外光谱分析在食品检测中的主要应用[J]. *食品安全导刊*, 2024(12): 164–166.
- XU Y. Main applications of NIRS analysis in food detection [J]. *China Food Saf Magaz*, 2024(12): 164–166.
- [52] 徐霞, 成芳, 应义斌. 近红外光谱技术在肉品检测中的应用和研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(7): 1876–1880.
- XU X, CHENG F, YING YB. Application and research progress of near infrared spectroscopy in meat detection [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2009, 29(7): 1876–1880.
- [53] 王志龙. 基于 FPGA 的近红外小型光谱仪的硬件电路设计[D]. 成都:

- 电子科技大学, 2020.
- WANG ZL. Hardware circuit design of near infrared micro spectrometer based on FPGA [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [54] 张卉, 宋妍, 冷静, 等. 近红外光谱分析技术[J]. 光谱实验室, 2007, 24(3): 388–395.
- ZHANG H, SONG Y, LENG J, *et al.* Near-infrared spectroscopy analysis technology [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2007, 24(3): 388–395.
- [55] 马无锡. 基于高光谱成像的鱼肉新鲜度无损检测方法研究[J]. 信息系统工程, 2020(9): 125–126.
- MA WX. Study on non-destructive detection method of fish freshness based on hyperspectral imaging [J]. China Cio New, 2020(9): 125–126.
- [56] 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 Sci, 2018, 39(11): 276–283.
- [57] HE HJ, SUN DW. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products [J]. Trend Food Sci Technol, 2015, 46(1): 99–109.
- [58] 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 ZB, LIANG LM, YAN XJ, *et al.* Detection of freshness indexes of imported chilled beef using hyperspectral imaging technology [J]. Food Sci, 2020, 41(22): 315–323.
- [59] 张雷蕾, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 254–259.
- ZHANG LL, LI YY, PENG YK, *et al.* Determination of pork freshness attributes by hyperspectral imaging technique [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2012, 28(7): 254–259.
- [60] 邹小波, 李志华, 石吉勇, 等. 高光谱成像技术检测猪肉新鲜度[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 89–93.
- ZOU XB, LI ZH, SHI JY, *et al.* Detection of freshness of delicatessen meat by hyperspectral imaging [J]. Food Sci, 2014, 35(8): 89–93.
- [61] 张珏, 田海清, 王轲, 等. 基于高光谱成像技术的羊肉新鲜度预测[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(5): 94–103.
- ZHANG J, TIAN HQ, WANG K, *et al.* Nondestructive detection of lamb freshness based on hyperspectral imaging technology [J]. J China Agric Univ, 2020, 25(5): 94–103.
- [62] KHOJASTEHN AZHAND M, KHOSH TAGHAZA MH, MOJARADI B, *et al.* Comparison of visible-near infrared and short wave infrared hyperspectral imaging for the evaluation of rainbow trout freshness [J]. Food Res Int, 2014, (56): 25–34.
- [63] LI HH, CHEN QS, ZHAO JW, *et al.* Nondestructive detection of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in pork meat by integrating hyperspectral imaging and colorimetric sensor combined with a nonlinear data fusion [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 63(1): 268–274.
- [64] 邢素霞, 王睿, 郭培源, 等. 高光谱成像及近红外技术在鸡肉品质无损检测中的应用[J]. 肉类研究, 2017, 31(12): 30–35.
- XING SX, WANG R, GUO PY, *et al.* Comparative application of hyperspectral imaging and near infrared spectroscopy in nondestructive detection of chicken quality [J]. Meat Res, 2017, 31(12): 30–35.
- [65] 桂江生, 吴子娟, 顾敏, 等. 高光谱成像技术在农业中的应用概述[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(7): 1101–1105.
- GUI JS, WU ZX, GU M, *et al.* Application of hyperspectral imaging technology in agriculture [J]. J Zhejiang Agric Sci, 2017, 58(7): 1101–1105.
- [66] 李东泽, 吴桂芳, 刘汉涛, 等. 基于高光谱成像技术的红肉品质评定研究进展[J]. 肉类研究, 2018, 32(7): 59–63.
- LI DZ, WU GF, LIU HT, *et al.* Recent progress in evaluation of red meat quality using hyperspectral imaging technology [J]. Meat Res, 2018, 32(7): 59–63.
- [67] 余桂平, 朱建锡, 马晓钟, 等. 电子鼻技术在肉类品质检测中的应用[J]. 现代食品, 2020(5): 7–10.
- YU GP, ZHU JX, MA XZ, *et al.* Application of electronic nose technology in the identification of meat quality [J]. Mod Food, 2020(5): 7–10.
- [68] HONG XZ, WANG J, HAI Z. Discrimination and prediction of multiple beef freshness indexes based on electronic nose [J]. Sensor Actuat B: Chem, 2012, 161(1): 381–389.
- [69] 于勇, 王俊, 周鸣. 电子鼻技术的研究进展及其在农产品加工中的应用[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(5): 111–116.
- YU Y, WANG J, ZHOU M. Research developments of electronic nose and its application in processing of agriculture products [J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci), 2003, 29(5): 111–116.
- [70] 赵万. 面向食物品质评价的电子鼻研制[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- ZHAO W. Design of electronic nose for food quality evaluation [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [71] 周英, 杜杰. 电子鼻工作原理及在肉品检测中的应用[J]. 肉类工业, 2016(4): 42–45.
- ZHOU Y, DU J. Work principle of electronic nose and its application in meat products detection [J]. Meat Ind, 2016(4): 42–45.
- [72] 陈静茹, 王梁, 吕学泽, 等. 北京油鸡肉 4 °C 贮藏过程中的品质及风味变化[J]. 肉类研究, 2018, 32(8): 1–6.
- CHEN JR, WANG L, LU XZ, *et al.* Changes in quality and flavor of Beijing-You chicken meat during storage at 4 °C [J]. Meat Res, 2018, 32(8): 1–6.
- [73] 陈远涛. 电子鼻结合感官评价的食品新鲜度检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- CHEN YT. Research on food freshness detection based on electronic nose and sensory evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [74] 石志标, 佟月英, 陈东辉, 等. 牛肉新鲜度的电子鼻检测技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 184–188.
- SHI ZB, TONG YY, CHEN DH, *et al.* Identification of beef freshness with electronic nose [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2009, 40(11): 184–188.
- [75] 柴春祥, 杜利农, 范建伟, 等. 电子鼻检测猪肉新鲜度的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(9): 444–447.
- CHAI CX, DU LN, FAN JW, *et al.* Identification of pork freshness by electronic nose [J]. Food Sci, 2008, 29(9): 444–447.
- [76] 牟心泰, 杜险峰. 电子鼻与电子舌在食品行业的应用[J]. 现代食品, 2020(5): 118–119, 126.
- MOU XT, DU XF. Application of electronic nose and electronic tongue in food industry [J]. Mod Food, 2020(5): 118–119, 126.
- [77] 戚淑叶, 毛岳忠, 耿利华, 等. 现有电子舌设备的技术现状与发展趋势[J]. 药学报, 2023, 58(11): 3165–3172.
- QI SY, MAO YZ, GENG LH, *et al.* Technical status and development

- trends of electronic tongue [J]. *Acta Pharm Sin*, 2023, 58(11): 3165–3172.
- [78] 秦臻. 基于生物味觉的仿生电子舌及其在味觉检测与识别中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- QIN Z. Detection and identification of tastants using biomimetic electronic tongues based on biogustation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [79] 田晓静, 刘丽霞, 王俊. 电子舌技术在肉与肉制品检测中的应用[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(7): 397–400.
- TIAN XJ, LIU LX, WANG J. Application of electronic tongue in meat and meat products [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(7): 397–400.
- [80] 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 Chem*, 2011, 126(3): 1261–1268.
- [81] 韩剑众, 黄丽娟, 顾振宇, 等. 基于电子舌的肉品品质及新鲜度评价研究[J]. *中国食品学报*, 2008, 8(3): 125–132.
- HAN JZ, HUANG LJ, GU ZY, *et al*. Evaluation of meat quality and freshness based on electronic tongue [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2008, 8(3): 125–132.
- [82] 鲁伟. 冰鲜黄鸡肉品质评定与鲜度分级研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- LU W. Evaluation of meat quality and classification of freshness for chilled yellow chicken [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [83] 丛军, 李星. 基于电子鼻、电子舌技术的荣昌猪肉及其制品贮藏过程新鲜度检测研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(7): 192–201.
- CONG J, LI X. Detection of freshness of Rongchang pork and its products during storage based on electronic nose and electronic tongue technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(7): 192–201.
- [84] 贾哲, 陈晓婷, 潘南, 等. 基于电子舌快速检测冷藏双斑东方鲀的新鲜度[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(5): 220–229.
- JIA Z, CHEN XT, PAN N, *et al*. The freshness of frozen fugu bimaculatus detected by electronic tongue [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2021, 37(5): 220–229.
- [85] 易宇文, 范文教, 贾洪峰, 等. 基于电子舌的微冻鲢鱼新鲜度识别研究[J]. *食品与机械*, 2014, 30(2): 142–145.
- YI YW, FAN WJ, JIA HF, *et al*. Application of electronic tongue on discrimination of silver carp during frozen storage [J]. *Food Mach*, 2014, 30(2): 142–145.
- [86] 陈鹏羽, 李少博, 王卫, 等. 电子舌作用机理及其在肉品检测中的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(1): 184–190.
- CHEN PY, LI SB, WANG W, *et al*. Mechanism of electronic tongue and the application in meat quality detection: A review [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(1): 184–190.
- [87] WENG XH, LUAN XY, KONG C, *et al*. A comprehensive method for assessing meat freshness using fusing electronic nose, computer vision, and artificial tactile technologies [J]. *J Sensors*, 2020, 2020: 1–14.
- [88] SUN X, YOUNG J, LIU JH, *et al*. Prediction of pork loin quality using online computer vision system and artificial intelligence model [J]. *Meat Sci*, 2018, 140: 72–77.
- [89] 周炜. 基于多源信息融合技术的猪肉新鲜度无损检测方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- ZHOU W. Research on the non-destructive testing of pork freshness based on multi-information fusion [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [90] 孙永海, 赵锡维, 鲜于建川. 基于计算机视觉的冷却牛肉新鲜度评价方法[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(1): 104–107.
- SUN YH, ZHAO XW, XIANYU JC. Appraising method for freshness of chilled beef based on computer vision technique [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2004, 35(1): 104–107.
- [91] 潘婧, 钱建平, 刘寿春, 等. 计算机视觉用于猪肉新鲜度检测的颜色特征优化选取[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(6): 153–158.
- PAN J, QIAN JP, LIU SC, *et al*. Optimal selection of color features for computer vision for pork freshness detection [J]. *Food Ferment Ind*, 2016, 42(6): 153–158.
- [92] 张茹. 基于机器视觉与质构检测的冷鲜牛肉新鲜度判别[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- ZHANG R. Freshness discrimination of chilled beef based on machine vision and texture detection [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [93] TAHERI-GARAVAND A, FATAHI S, SHAHBASI F, *et al*. A nondestructive intelligent approach to real-time evaluation of chicken meat freshness based on computer vision technique [J]. *J Food Process Eng*, 2019, 42(4): e13039.
- [94] 陈涛. 计算机视觉技术在农产品品质检测中的应用[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(20): 110–113.
- CHEN T. The applications of computer vision technology for food quality inspection of agricultural products [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2019, 25(20): 110–113.
- [95] 贾渊, 姬长英, 汤晓艳. 基于计算机视觉的牛肉分级技术综述[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 47–50.
- JIA Y, JI CY, TANG XY. Review of beef grading technology based on computer vision [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2004, 20(5): 47–50.
- [96] 李文采, 李家鹏, 田寒友, 等. 基于 RGB 颜色空间的冷冻猪肉储藏时间机器视觉判定[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 294–300.
- LI WC, LI JP, TIAN HY, *et al*. Machine vision determination of frozen pork storage time based on RGB color space [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2019, 35(3): 294–300.
- [97] 张晋豪, 王浩东, 邵良婷, 等. 生鲜肉新鲜度新型快速表征技术研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(13): 210–217.
- ZHANG JH, WANG HD, SHAO LT, *et al*. Research progress on new rapid characterization technology for freshness of fresh meat [J]. *Food Sci*, 2022, 43(13): 210–217.
- [98] 丁强, 王忠义, 黄岚, 等. 便携式猪肉阻抗谱检测系统研制[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 138–144.
- DING Q, WANG ZY, HUANG L, *et al*. Development of portable bio-impedance spectroscopy system for measuring porcine meat quality [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2009, 25(12): 138–144.
- [99] 石丽敏, 黄岚, 梁志宏. 阻抗特性评价猪肉的新鲜度[J]. *食品科学*, 2013, 34(11): 13–18.
- SHI LM, HUANG L, LIANG ZH. Freshness evaluation of chilled pork by impedance characteristics [J]. *Food Sci*, 2013, 34(11): 13–18.
- [100] 彭见林, 李慧勤, 高瑞萍, 等. 电阻抗技术在肉品品质控制中的应用[J]. *食品科学*, 2011, 32(5): 326–330.
- PENG JL, LI HQ, GAO RP, *et al*. A review on applications of electrical impedance technology in quality control of meat [J]. *Food Sci*, 2011, 32(5): 326–330.
- [101] 钟晓航. 基于阻抗谱技术的猪肉新鲜度检测方法研究[D]. 杭州: 浙江

- 工商大学, 2019.
- ZHONG XH. Study on detection method of pork freshness based on impedance spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.
- [102] 陈天浩. 冷鲜鸡胸肉与解冻鸡胸肉的阻抗法判别研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- CHEN TH. Use of impedance measurements for the distinction between fresh and frozen-thawed chicken breasts [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [103] HASSOUN A, KAROUÏ R. Quality evaluation of fish and other seafood by traditional and nondestructive instrumental methods: Advantages and limitations [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2017, 57(9): 1976–1998.
- [104] 王政纲, 赵丽华, 苏琳, 等. 冰温贮藏羊肉电阻抗特性及肉品质相关性分析[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 249–255.
- WANG ZG, ZHAO LH, SU L, *et al.* Correlation analysis between electrical impedance and quality of mutton during controlled freezing-point storage [J]. Food Sci, 2019, 40(1): 249–255.
- [105] LIANG BW, WEI CH, LI XX, *et al.* Incorporating bioimpedance technique with ensemble learning algorithm for mutton tenderness detection [J]. Food Bioproc Technol, 2023, 16(12): 2761–2771.
- [106] 艳茹, 德力格尔桑. 宰后牛骨骼肌肉生物电阻抗特性初探[J]. 农产品加工, 2006, 2006(2): 31–33.
- YAN R, DELI GERS. Primary study on electrical impedance of postmortem bovine muscle [J]. Farm Prod Process, 2006, 2006(2): 31–33.
- [107] PÉREZ-ESTEVE E, FUENTES A, GRAU R, *et al.* Use of impedance spectroscopy for predicting freshness of sea bream (*Sparus aurata*) [J]. Food Control, 2014, 35(1): 360–365.
- [108] NOURI H, GUERMAZI M, KALLEL AY, *et al.* Meat freshness assessment based on impedance spectroscopy and distribution of relaxation times (DRT) [C]. IEEE Proceedings of the 2022 International Workshop on Impedance Spectroscopy (IWIS), 2022.
- [109] GROSSI M, RICCÒ B. Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: A review [J]. J Sens Syst, 2017, 6(2): 303–325.
- [110] 李鑫星, 张子怡, 梁步稳, 等. 基于生物阻抗的即配羊肉货架期无损检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 379–386.
- LI XX, ZHANG ZY, LIANG BW, *et al.* Bioimpedance-based nondestructive detection method for self-life of ready-to-prepare mutton [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2022, 53(7): 379–386.
- [111] MARTINSEN OG, HEISKANEN A. Bioimpedance and bioelectricity basics [Z]. 2023.
- [112] ZHANG ZY, LI XX, TIAN JJ, *et al.* A review: Application and research progress of bioimpedance in meat quality inspection [J]. J Food Proc Eng, 2022, 45(11): e14153.
- [113] ZHAO X, ZHUANG H, YOON SC, *et al.* Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: A review on basic principles, measurement methods, and recent advances [J]. J Food Qual, 2017(1): 6370739.

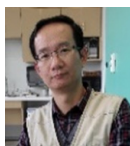
(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

作者简介



陈少淮, 硕士研究生, 主要研究方向为信号检测与处理。

E-mail: kayvie98@hunnu.edu.cn



杨宇祥, 教授, 主要研究方向为信号检测与处理。

E-mail: yuxiang.yang@hunnu.edu.cn