

种蛋受精与性别信息无损检测技术与装备研究进展

刘成康¹ 刘勇¹ 王巧华^{1,2} 刘世伟¹ 李世军^{1,2} 祝志慧^{1,3}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 湖北洪山实验室, 武汉 430070;

3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 种蛋受精及性别鉴别关系到家禽孵化、养殖的经济效益和动物福利伦理等,种蛋受精与性别信息的检测是禽、蛋产业发展的难题,特别是种蛋性别的无损鉴定是世界难题。合适有效的无损检测技术,不仅应获得相关未知信息且不会对种蛋造成任何损伤,因此无损检测种蛋成为研究热点。然而,由于蛋壳厚度和颜色等外部品质形状差异、内部流体形态变化和胚胎发育等因素的影响,难以实现准确检测。本文对比了现有种蛋无损检测研究中的相关方法与技术,包括机器视觉技术、光谱技术、声共振频率分析、生物电信号分析、敲击振动法、介电常数分析、气味特征分析等;分析了种蛋受精和性别信息无损检测仍存在的技术限制、发育阶段检测限制、蛋壳干扰和种蛋个体差异性等方面挑战,并针对未来的研究及发展探讨了高光谱成像、X射线成像、超声波成像和磁共振成像等新兴技术应用种于种蛋受精与性别无损检测的可行性。

关键词: 种蛋; 无精蛋; 卵内性别鉴定; 无损检测; 综述

中图分类号: S-1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)05-0001-20

OSID:



Progress and Prospect in Non-destructive Assessment Technologies and Equipment of Fertilization and Gender Determination in Hatching Eggs

LIU Chengkang¹ LIU Yong¹ WANG Qiaohua^{1,2} LIU Shiwei¹ LI Shijun^{1,2} ZHU Zhihui^{1,3}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China

3. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: The process of fertilization and gender determination in avian eggs directly impacts the economic efficiency and ethical considerations within poultry incubation and breeding operations. Historically, the detection of fertilization status and gender information in eggs has represented a significant bottleneck in the advancement of the poultry and egg sectors. The non-destructive identification of egg sex stands as a particularly formidable challenge on a global scale. Non-destructive detection methodologies that are both suitable and efficacious promise not only to unveil pertinent, previously inaccessible information but also to do so without inflicting any harm upon the eggs, hence the surge in research interest in recent times. Nevertheless, the quest for precise detection is complicated by factors, including but not limited to the variability in eggshell thickness and coloration, the dynamic nature of the internal fluids, and the intricacies of embryonic development. A comprehensive comparative analysis of the array of non-destructive detection techniques show cased in extant literature was conducted, encompassing machine vision, spectroscopic technologies, acoustic resonance frequency analysis, bioelectrical signal analysis, percussive vibration methods, dielectric constant analysis, and olfactory signature analysis. Moreover, it delineated the persistent challenges faced in the non-destructive assay of fertilization and sex data in avian eggs and articulated a forward-looking discussion on the potential integration of nascent technological applications in forthcoming investigative endeavors.

Key words: hatching eggs; infertile eggs; intra-egg gender identification; non-destructive detection; review

收稿日期: 2023-12-17 修回日期: 2024-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072302, 32372426)和湖北洪山实验室重大项目(2022hszd006)

作者简介: 刘成康(1993—),男,博士生,主要从事机器视觉与光谱检测研究, E-mail: ys7lck@163.com

通信作者: 王巧华(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事农畜产品无损检测技术与装备研究, E-mail: wqh@mail.hzau.edu.cn

0 引言

禽肉和禽蛋是全球范围内重要动物源食品。鉴于禽肉和禽蛋在全球的巨大产量和消费量,孵化行业迫切需要在孵化前快速筛选出无精蛋,以及在孵化期间鉴别出种蛋的性别。因为种蛋的无精筛选可避免禽蛋和孵化资源浪费,带来巨大的经济效益;家禽的性别对生产和经济有相当大的影响,公禽不能产蛋,且其相较于肉禽的肉料低,通常在孵化后即被宰杀,每年约70亿只^[1]幼小公禽的宰杀已成为严重的伦理和动物福利问题。若能在种蛋孵化期或孵化前就能确定性别,不仅可以避免此类问题,而且可以减少孵化空间和能源消耗^[2]。

目前国内外种蛋受精信息的检测方法主要分为传统方法和无损检测技术,传统方法包括破坏性肉眼查看、人工照蛋、显微镜技术、外卵周层的精子计数及精子穿透测定技术等^[3]。传统方法既繁琐又有破坏性,不仅速度慢而且劳动强度大,且多是抽样检测,孵化中的禽蛋还有被污染的风险,存在诸多弊端。现有用于种蛋的无损检测方法包括热成像法、计算机视觉法、光学检测法、敲击振动法、高光谱图像检测法、超声和介电测量法等^[4-5]。性别检测方法主要分为侵入性检测、卵内性别鉴定技术和非侵入式卵内性别鉴定技术(无损检测技术),侵入性检测是针对破壳后的幼禽性别鉴定,包括翻肛鉴别法和伴性遗传鉴别法等,劳动密集度大且浪费孵化成本^[4];卵内性别鉴定技术包括DNA含量检测、尿囊液硫酸雌酮检测、聚合酶链式反应(Polymerase chain reaction, PCR)等,该技术虽然具有良好的准确性和灵敏度,但是提取样本的过程具有破坏性,可能严重影响胚胎发育,多用于实验室研究;非侵入式卵内性别鉴定技术包括傅里叶变换近红外光谱技术(Fourier transform near infrared spectroscopy, FT-NIR)、拉曼光谱技术(Raman spectroscopy, RS)、高光谱图像检测技术(Hyperspectral imaging, HSI)、三维X射线微计算机断层扫描技术(3D X-ray microcomputed tomography)、光学相干断层扫描(Optical coherence tomography, OCT)、磁共振成像技术(Magnetic resonance imaging, MRI)、声学技术、机器视觉(形态学特征和血线特征)、挥发性有机化合物检测技术和多传感器技术等^[2,6]。无损检测技术要求在不破坏种蛋外壳或内部物质的情况下,检测种蛋的受精和性别信息^[7-8],利用种蛋无精、受精、雌雄的生理差异对应的光、电、热、磁、形变化的外在表征,并结合机器学习、光谱分析等手段完成检测任务。

尽管种蛋信息的无损检测已取得了一些进展,但是由于种蛋胚胎发育和性别分化的特殊性,检测过程中存在易破损、易死胚、技术限制和孵化时期局限等挑战,因此,高效检测与保障种蛋正常孵化同等重要。本文总结并梳理种蛋受精和性别信息无损检测的相关文献,以供研究人员快速、系统地了解该领域的相关研究成果。

1 种蛋检测技术研究现状

1.1 传统检测方法

在种禽蛋孵化早期发现无精蛋可以提高孵化率、节省孵化空间、降低孵化成本和防止交叉感染^[9]。人工照蛋被广泛应用于种禽蛋的受精与无精判别,该方法是在黑暗环境下,使用强光透射种蛋观察其内容物,若在蛋内部靠近中心处有一个黑点,且旁边有一些血管,则认为是受精卵,而未受精蛋的内部完全透明(图1),显然,人工照蛋劳动强度大、工作效率低,每天有成千上万的种蛋需要筛选,疲劳也会造成判断失误^[9-10]。市场上对于禽类的性别有偏向性,例如,在肉鸡中公鸡受欢迎,在蛋鸡中母鸡更受欢迎,而这种生产偏好会导致严重的伦理问题和经济损失^[11]。因此,需要对种禽性别进行鉴定,传统方法主要使用翻肛和伴性遗传(图2)^[6,12],都是在孵化出雏禽后才能进行判别,会导致大量雏禽遭受宰杀淘汰等动物福利等问题,且也浪费了巨大的孵化空间和能源^[2,13]。传统的种蛋受精和性别信息的人工鉴定技术主要存在以下局限:准确度和可靠性有限;检测范围有限(仅在胚胎发育的某些阶段才有效,限制了其在早期检测受精状态或性别信息的用途);效率低下;缺乏定量信息,多是提供定性的检测信息,无法给出标准化的结果;对工人经验要求高。

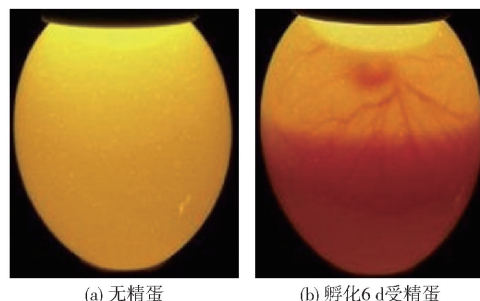


图1 无精蛋和孵化6 d受精蛋图像

Fig. 1 Unfertilized egg and fertilized egg after six days of incubation

针对以上问题,已有学者结合种蛋外部品质性状开展了受精和性别信息的研究。对于种禽蛋受精信息的判别,研究发现鸭蛋蛋重对受精率的影响不



图2 幼禽性别鉴定传统方法

Fig. 2 Traditional method of sex identification in juvenile birds

显著,但是随着蛋重增大,受精率有增大的趋势^[14]。相似的研究发现,鸡蛋大小与其受精率呈正相关,较重的鸡蛋具有较高的受精率^[15]。有人研究扬州鹅蛋发现,130~169 g的种蛋受精率较高^[16];144.10~158.02 g之间的三花鹅种蛋受精率最高,蛋形指数在1.31~1.47之间的三花鹅种蛋受精率和孵化率最高;中等大小的鸡蛋(50~60 g)比过大(>60 g)或过小(≤ 50 g)的种蛋具有更高的受精率^[17]。同样对于鸡种蛋的研究发现,山鸡种蛋在25~30 g,蛋形指数在1.2~1.3时,其受精率较高^[18],但是,还有研究发现,肉杂鸡种蛋蛋形指数对种蛋受精率无显著影响^[19],罗曼粉壳种鸡的蛋形指数对受精率没有影响,差异不显著^[20]。早在1992年,就有学者利用基于直方图性状参数区分受精与无精蛋,在孵化第4天、第3天和第2天的最优准确率分别为93.9%、93.5%、67.6%^[21-22];对于种禽性别信息的判别,有研究发现孵化前种蛋的蛋形指数、蛋长、蛋宽和体积对孵化雏鸡的性别有显著影响,蛋质量对种蛋的性别影响不显著^[12],但是有其他学者研究发现玫瑰冠鸡种蛋的蛋形指数对受精率和孵化率有显著影响,而蛋形指数与性别比例无明显关系^[13,23]。有学者结合种鸡蛋蛋壳密度、蛋形指数和蛋质量等指标,并利用模糊识别建立了种鸡蛋判别数学模型,且识别准确率在87%以上^[24]。

可以看出,针对种蛋外部品质性状的判别方法,仍存在实验可重复性差、判别准确率依赖孵化时长、无普适的检测模式、外部特征的交互影响等诸多问题,至今没有成功应用的报道。

1.2 无损检测方法

目前应用于种蛋的无损检测方法大致分为机器

视觉、光谱分析法、机械振动分析法、电信号分析法、化学分析法和不透明度检测法等6类。这些方法涉及到的仪器、模型、检测结果、特征、检测时间、优缺点如表1所示。其中,机器视觉是一种通过模拟人眼进行种蛋图像获取、处理和识别的技术;光谱分析法主要是通过分析种蛋对光的吸收、散射或发射特性来获取信息,包括可见/近红外光谱(Visible/near-infrared spectroscopy, VIS/NIRS)、拉曼光谱和高光谱等;机械振动分析法是通过分析种蛋的振动特性来获取相关参数,包括声共振频率分析和敲击振动法等;电信号分析法是分析种蛋的电信号来获取生物信息,包括生物电信号分析、介电常数分析和阻抗谱;化学分析法是利用种蛋的化学特性来分析生物信息,包括气味特征分析和尿囊液测定法;不透明度检测法是通过检测器测量种蛋传递光线的平均输出电压来获取信息的方法。

1.2.1 基于机器视觉的种蛋检测

1.2.1.1 受精信息检测

机器视觉方法因其成本低、精度较高、操作难度低等优点而被广泛用于区分无精蛋和受精蛋^[41-42]。有研究认为受精蛋的鉴定取决于蛋的形状、大小等外部特征,以及不同孵化阶段的内部特征^[43]。当种蛋暴露在透射光下时,可以看到其内部,对于无精蛋,蛋内观察不到斑点,并且在孵化期间无精蛋的光传输变化很小^[44]。目前,相关研究主要包括对孵化若干天种蛋的图像采集、图像预处理、图像特征提取、建立分类模型。其中,图像采集多是通过强光源和相机获得种蛋透射图像,图像预处理包括裁剪^[25]、灰度预处理^[45]、直方图均衡化^[45]、图像分割^[46-47]等;特征提取方法有图像统计特征(灰度均值、灰度方差、均值、熵、方差、偏度等)^[45,48-49]、颜色特征(色相、强度、饱和度等)^[50]、形状特征(蛋形指数、圆度、伸长率等)^[51]、纹理特征(灰度共生矩阵等)^[28,52]等;分类方法主要有模糊理论^[25,28]、朴素贝叶斯^[25]、线性判别分析^[25]、支持向量机^[49,53]、神经网络^[45,50-51]、K-means聚类算法^[45]等,使用传统的机器学习算法多是在孵化5 d后才能实现受精信息检测,且分类准确率在90%以下。近年来,已有学者结合卷积神经网络(Convolutional neural networks, CNN)在孵化5 d以上的种鸡蛋上达到较高的识别准确率^[54]。针对弱胚、溶血胚、裂胚、感染胚、不育胚和可育胚的相似度较高的分类要求,卷积神经网络也有很好表现,在孵化5~7 d的胚胎数据集上,平均分类准确率达98.4%^[55]。对于孵化早期的种蛋,何海燕等^[56]利用机器视觉获取孵化第3天的图像,通过YOLO v5算法完成了受精蛋的自动挑选和

定位,检测模型准确率达95%以上。

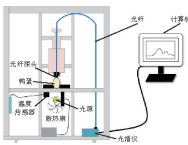
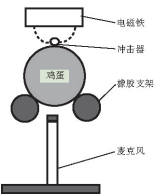
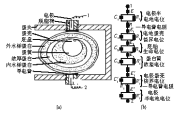
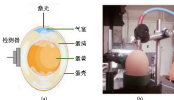
以上种蛋受精信息的识别研究仍停留在实验室阶段的单枚蛋上,在实验室理想条件下,逐个识别种蛋的算法复杂且耗时,在生产线上很难适应。因此,聚焦于探索孵化盘上多枚种蛋的受精信息检测更具

有应用价值,DONG等^[26]提出了一种基于机器视觉的无精神鸭蛋批量识别方法,孵化第5天的模型的准确率、灵敏度、特异性、阳性预测值和阴性预测值均达100%。

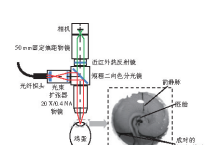
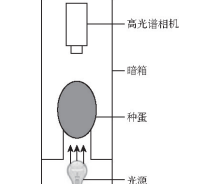
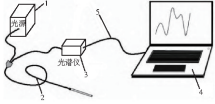
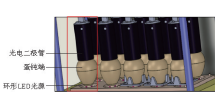
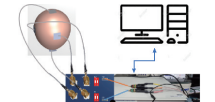
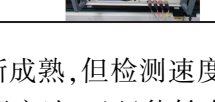
分析已有文献发现,利用机器视觉进行种蛋的

表1 基于无损检测技术的种蛋信息检测研究成果

Tab.1 Research achievements in hatching egg detection based on non-destructive identification technology

检测信息	技术手段	原理图	算法和模型	性能	检测特征	检测时间/d	优点	缺点
机器视觉 ^[25]		模糊C值与朴素贝叶斯分类器结合	测试集准确率为94%	RGB平均值、灰度、分布频率、均值和方差	5	操作简单,表现出较高的分类性能	模型性能受光源和蛋壳清洁程度影响较大	
视觉与声学传感器融合 ^[26-27]		线性判别分析、朴素贝叶斯和支持向量机	在孵化第5天的支持向量机模型在准确率、灵敏度、特异性、阳性预测值和阴性预测值均达100%	灰度平均值、最大灰度、最小灰度和灰度方差	1~5	操作简单,可整盘检测,高分类性能	对环境敏感;多传感器增加了成本和复杂性	
热成像 ^[28]		BP神经网络和LVQ神经网络	孵化第5天LVQ神经网络模型判别准确率达98%	RGB颜色分量的均值和标准偏差、各颜色分量的变异系数;敲击响应频率和频率差	1~8	多传感器融合性能更优;LVQ模型性能稳定	检测需要依赖种蛋的温度变化,只有在孵化一段时间后才能检测温度差异	
受精 可见/近红外透射光谱 ^[29]		模糊理论	检测精度可达96%	灰度共生矩阵	14	快速、无损;透射光谱信息携带有大量卵内信息	数据处理复杂;对光源等环境要求高	
高光谱技术 ^[30]		标准正态变量预处理,朴素贝叶斯建模	判别准确率为94.77%	特征波段500~940 nm	0	可以利用孵化蛋的光谱和形态信息检测受精信息	仪器成本高;数据处理复杂	
声频共振分析 ^[31]		学习向量量化神经网络	识别精度在第3天为97%,第4天为100%。对发育较弱的蛋,第3天和第4天的识别率分别为81%和92%	特征波长822 nm	3~4	高灵敏度;可以获取蛋壳或内部成分的振动模式	受环境影响大	
生物电信号 ^[32]		频率分析	受精蛋的共振频率降低,而无精蛋和早死胚的共振频率呈平稳连续增加	共振频率	5	检测结果直观,分析简便	检测时间较长	
介电常数法 ^[33]		电信号幅值分析	受精蛋直流电位波形呈现方波,无精蛋近似于直线,判别准确率为91.7%	电信号幅值阈值	2	经济、快速、灵敏度高;可以获取蛋白的介电效应	结果受温湿度影响	
气味特征分析法 ^[34]		支持向量机	对受精蛋、未受精蛋和死胚判别准确率为92.31%	介电因子和损耗因子	5	可直观检测受精蛋和无精蛋的氧吸收信号	检测周期长	

续表 1

检测信息	技术手段	原理图	算法和模型	性能	检测特征	检测时间/d	优点	缺点
机器视觉 ^[35]			模糊模式识别	检测精度可达 93%	均匀度、蛋形指数、质量	0	可在孵化前实现性别检测；特征获取简便	性能有待进一步验证
			多元线性判别	判别准确率为 76.7%	血线特征	3	特征获取简便	需要实验获取可适用的光源
拉曼光谱 ^[36-37]			非线性判别分析	判别准确率为 90%	特征波数 550、715、912、1 215、1 304、1 958、1 966、2 214 cm ⁻¹	4	不依赖于胚胎的性别分化；化学信息丰富	需要在蛋壳上开窗
性别别	高光谱技术 ^[38]		线性判别分析	判别总体准确率为 97%	特征波段 600 ~ 950 nm	14	判别准确率高	只针对羽绒颜色伴性遗传的鸡蛋适用；孵化后期实现检测，已失去经济价值
可见/近红外光谱 ^[39]			去趋势法预处理结合线性判别分析	判别准确率为 43.75%	特征波段 440.27 ~ 874.6 nm	12	检测快速、无损	数据处理分析复杂，需要探索更优的分类模型
不透明度检测法 ^[11]			线性判别分析	判别准确率为 84%	不透明度	16、17、18	检测简便、快速	检测基于性别分化造成的透明度变化，只适用于孵化中后期
阻抗谱 ^[40]			独立 T 检验	在特定位置的阻抗测量比值呈显著相关	300 kHz 至 10 MHz 频率范围内的阻抗	9	雌性卵和雄性卵的平均阻抗比有显著性差异	有待通过分类算法进一步验证

受精判别已逐渐成熟,但检测速度还有待提高。目前结合深度学习方法,已经能够在孵化 3 d 的种蛋上取得较好的识别效果,若能深入研究光源对受精信息检测的影响,明确何种颜色、强度、角度的光源能够充分显示受精蛋内部的细节^[57],将能进一步提升无精蛋的识别准确率,以在更短的孵化时间内实现无精蛋的检测。

1.2.1.2 性别信息检测

目前使用机器视觉进行种蛋性别检测主要通过血线特征和种蛋外部性状两类可视化特征进行研究。根据种蛋的血线做性别鉴定,来源于其含有性别信息的早期分化组织,以种鸡蛋为例,在孵化 48 h 后,生殖原细胞与生殖嵴处的细胞结合会启动生殖器官的发育和分化,其会再诱导生殖管道的演化和卵黄囊上血管的生长方向;在孵化 72 h 后,雄性输精管和雌性输卵管形成,在器官对称性上会产生明显差别,从而使血管分布形成不同的血线形态^[36]。而种蛋性状可用于性别鉴定的依据则是来源于长期从事孵化工作的操作员,凭经验发现种蛋的一些外部性状与雏鸡性别有一定的相关性^[35]。

使用血线特征进行种蛋性别鉴定研究,需要在种蛋孵化 3 d 后才能进行,研究发现孵化 3 d 后的雄胚主血管明显,血管较粗,分布均匀,而雌胚血管纤细,粗细均匀,分支较多,呈不规则状^[58]。李振钢等^[36]使用黄绿光照射种鸡蛋,依据血线特征判别的准确率为 76.7%,唐剑林等^[58]同样通过观察血线特征获得的性别鉴定准确率为 88.5%。而汤勇等^[59]和祝志慧等^[60]结合机器视觉技术与机器学习算法进行性别判定,获得了与肉眼观察血线特征相似的识别准确率,分别为 82.8% 和 83.3%。孵前种蛋的性别判定研究中,吕志南等^[35]利用模糊识别方法,建立了由鸡蛋性状判定其性别的数学模型,其中,使用的性状特征包括蛋壳的密质程度、蛋形指数和蛋质量,其模型准确率为 93%。此外,王家培等^[61]研究了黔东南小香鸡蛋形指数与性别的相关性,发现蛋形指数与性别具有显著相关性。

上述文献发现,明确种蛋孵化过程中的部分性别分化原理及过程,有助于获取种蛋的可视化性别特征与细节,甚至可能在孵化更早期实现种蛋的性别鉴定。若能够结合目前最先进的智能算法,有望进一步提升判别准确率。

1.2.2 基于光谱的种蛋检测

1.2.2.1 受精信息检测

近年来,研究人员主要通过机器视觉^[21-22]、声学传感器^[27]、热成像^[28]、温度传感器^[62]等方法无损检测种蛋的受精信息,这些方法几乎都集中在种蛋的孵化中期,拣出的无精蛋已经失去了经济价值,造成了很大的浪费。因此无精蛋需要越早越快筛选出来越好,光谱技术的优势开始显现。

目前, VIS/NIR 透射光谱作为一种快速、无损的检测方法被用于预测鸡蛋的新鲜度和蛋白质质量^[63]、检测含有血斑的未受精卵^[64]以及监测鸡蛋胚胎发育^[65]。研究表明,透射光可以穿透全卵,透射光谱测量比反射光谱测量更能获取内部质量信息,用于检测无精蛋^[66],所获得的光谱可能携带大量的卵内部信息。对此,DONG 等^[29]采用 VIS/NIR 透射光谱对入孵前未受精种鸭蛋实现了快速、无损的鉴别,检测准确率达 94% 以上,还采用 VIS/NIR 透射光谱无损检测技术对孵前无精鸡蛋进行了检测,所建立检测模型的总体准确率达 91.67%。此外,LIN 等^[67]使用 VIS/NIR 光谱技术检测无精种鸽蛋,结合组合预处理方法的模型效果总体上优于单独预处理方法的模型,其在测试集上的分类精度为 98.6%。

为了明确采集数据时的检测部位与内部信息之间的关系,张伏等^[68]利用 VIS/NIR 光谱采集了入孵后不同孵化时间种鸡蛋不同部位(锐端、钝端和赤道两相对位置)的光谱数据,结合种蛋的受精信息,确定 440.27 ~ 874.6 nm 波段的光谱数据可实现对种鸡蛋的判别,发现 S-G 平滑(Savitzky-Golay, S-G)和标准正态变量校正(Standard normalized variate, SNV)两种预处理结果对数据来源位置敏感,对判别准确率影响最大。此外,该研究还发现不同部位的变量标准化预处理后和 S-G 平滑预处理的验证集准确率随着孵化时间的推移存在一定范围波动,而 SNV 预处理的判别准确率随着孵化时间增加判别效果也增加,所有预处理方式在赤道采集的光谱数据判别准确率最高。

虽然上述研究建立了种禽蛋受精信息的检测模型,且获得了较好的效果,但是并没有探明能够检测到受精信息的本质依据。在孵化的受精卵中,血液从第 2 天开始形成^[69],因此,使用透射光谱检测种蛋中血液以判别其受精信息是可能的。而血红蛋白是血液中可检测的色素,有 415、539、577 nm 3 个吸收带,500 nm 以下,蛋壳本身吸收了大部分光,因此只有 577 nm 波长能够有效检测血液。由于蛋壳中原卟啉色素的影响,需要添加 610 nm 波长作为参考

(这个波长既不受蛋壳原卟啉的影响,也不受血红蛋白的影响)^[64,70]。BAMELIS 等^[71]利用 577 nm 和 610 nm 这两种波长的透射光谱组合,通过分光光度法,进行了种鸡蛋受精信息的检测。实验发现可以检测孵化 120 h 之后的种蛋受精信息,得出的结论是,检测到胚胎的发育与血液的形成没有关系,而是与孵化 72 h 之后亚胚胎液的形成有关。

综上所述,利用近红外光谱检测种禽蛋的受精信息,多是采用透射光的方式采集种蛋的光谱信息,再对光谱数据进行预处理,进而建立数学模型。在采集种蛋光谱信息时,有的采用种蛋横放透射,有的研究使用种蛋竖放透射。光谱预处理的方法包括均值集中、多元散射校正、二阶导数、S-G 平滑和标准正态变量校正等,分类方法则包括支持向量机、朴素贝叶斯等多种机器学习分类方法。而在解决早期受精蛋分类的问题上,光谱数据的采集位置和光谱数据预处理方法是关键,不同的预处理方法对采集位置的敏感度不同,进而造成不同的分类准确率,并且多种预处理方法的联合使用会得到更好的分类效果。

虽然目前关于近红外光谱的种蛋受精信息研究已经能够在孵化前实现未受精蛋的准确识别,但是对其判别原理的基础研究还是较少,即对种蛋孵化期间内部成分的变化过程研究不足,以及对受精蛋变化成分对应的光谱波段不够明确。因此,若能够进一步明确受精蛋组织成分对应的光谱敏感波段,探明其对应的检测位置,并结合预处理方法得到对该波段和位置信息的敏感程度,则有可能进一步提升孵化前种蛋受精信息的检测效果。

1.2.2.2 性别信息检测

目前使用的激素测量和 DNA 分析技术需要采集组织或液体样本,且需要消耗品,这可能会阻碍其工业开发^[72-76]。而内分泌方法需要在性别分化后(孵化第 9 天)才能进行检测^[77-78]。也有学者使用非破坏性技术检测孵化期间的胚胎,包括声共振分析和侧向可见光透射,但是声共振分析需要多次连续测量,费力又耗时,而侧向可见光透射技术无法在孵化 108 h 前检测到胚胎发育^[65,71]。由于胚胎血液的拉曼光谱分析不依赖于胚胎的性别分化,采用拉曼光谱可以在孵化第 3.5 天实现种鸡蛋的性别判定,准确率可达 90%,但是测量前需要在蛋壳上开一个去掉壳膜的孔,检测完成后,使用生物相容性胶带封口,如图 3 所示^[79]。虽然这种方法实现了较高的判别准确率,但是对蛋壳开孔还是会影响到孵化率(降低 11%),而去掉对光谱采集有影响的蛋壳,不破坏蛋壳膜,研究发现这样不会影响孵化率,且种蛋

的性别检测准确率仍然达到90%以上^[37]。还有研究在种蛋孵化3.5 d发现了与性别相关的荧光光谱差异,分析表明,雄性血液的特征位于800~910 nm的荧光带,且使用监督分类的准确率达93%^[80]。除了谱带差异外,雄性和雌性雏鸡之间的DNA含量也有差异,约为2%,且雄性囊胚细胞的DNA含量高于雌性,使用衰减全反射傅里叶变换红外光谱可以在几秒钟内完成判别,且判别结果与聚合酶链反应的分析结果一致^[74]。此外,还有学者探索了不同光谱采集方式对种蛋性别检测的影响,发现利用紫外-可见-近红外透射光谱(360~1 000 nm)采集的种蛋光谱信息,在竖向放置且孵化7 d时的识别效果最好,预测准确率达87.14%^[81];利用可见/近红外漫反射光谱采集的种蛋光谱信息,在钝端采集到的光谱信息获得最优的判别结果,但是判别准确率未达到50%^[39];而利用分光光度法测量种鸡蛋的光谱,发现种蛋纵向测量会获得更高信噪比的光谱,并且发现该方法在早期孵化阶段具有区分性别特异性胚胎发育率的敏感性,在孵化3 d时,雄性胚胎血红蛋白吸收率更高,在孵化7 d时,雌性胚胎血红蛋白吸收率更高^[82]。

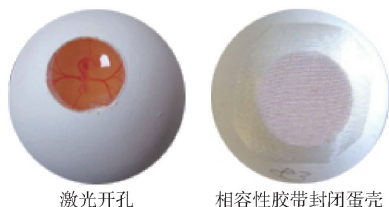


图3 激光开孔和相容性胶带封闭蛋壳

Fig. 3 Laser drilling and compatibility tape sealing of eggshells

针对种禽蛋的性别无损检测研究非常具有挑战性,在研究过程中也存在诸多问题,对于种蛋的VIS/NIR漫反射光谱,基本无法实现种蛋的性别检测,但是其判别准确率最高的检测位置位于钝端,这与MEHDIZADEH等^[83]的研究结果一致。而透射光谱的无损检测会有较好的效果,但是需要孵化至7 d时才能实现性别判定,结合GALLI等^[37,79-80]的研究发现,是由于蛋壳的干扰。使用微创技术,在不破坏蛋壳膜的情况下,使用拉曼光谱可以获得很好的性别判别效果,而且利用荧光光谱,学者们已经初步探明血红蛋白是荧光源,且明确了雄性的荧光带,进而在孵化3.5 d时就可以实现种蛋性别判定。因此,目前的光谱无损检测技术还无法在孵化早期实现种蛋的性别判定,还需要进一步研究,结合现有的研究可以发现,蛋壳的干扰是孵化早期难以实现无损性别检测的阻碍因素之一,若可以在光谱分析时去除蛋壳干扰,可能避免蛋壳开窗。而且若能够探

明更多的种蛋性别表征成分(例如已有的血红蛋白),则可以采集多个成分光谱作为联合特征,以在种蛋孵化早期进一步提高性别检测准确率。

1.2.3 其他种蛋检测技术

1.2.3.1 受精信息检测

除视觉和光谱以外,还有声波共振频率分析、生物信号分析、敲击振动法、介电常数分析以及气味特征分析等用于种蛋受精检测。声波共振频率分析是一种用于检测早期不可存活胚胎的方法。通过监测种蛋的共振频率过程,在孵化早期区分受精蛋和无精蛋或死胚蛋,然而这种方法在处理温度变化等环境因素时存在问题,需要更多的研究来提高准确性和可靠性^[31];生物电信号分析是根据种蛋在不同发育阶段的生命活动产生的不同生物电现象,在种蛋孵化2 d后提取生物电信号特征,识别准确率达91.7%^[32];敲击振动法是一种通过记录鸡蛋的敲击振动信号来检测孵化情况的方法,在孵化4~5 d后可以检测出无精蛋与死胚蛋,但容易受到外界噪声和蛋壳差异的影响^[71];介电常数和损耗因子分析是一种使用电容特性来鉴定死胚和无精蛋的方法,需要更多的研究来验证其可靠性^[33];气味特征分析根据挥发物气味特征来区分不同类型种蛋,这种方法在未孵化的种蛋中可鉴定多种挥发物,需要进一步提高无损鉴别受精蛋和无精蛋的准确性^[34,84]。

上述方法多是在孵化4~5 d才能检测,结合机器学习算法的分类准确率可达90%以上。这些研究为种蛋受精检测提供了思路,但每种方法都存在一定的局限性。未来研究可致力于组合不同方法,全面评估种蛋孵化情况,提高检测准确率。

1.2.3.2 性别信息检测

目前关于种蛋性别检测的方法还包括不透明度检测、阻抗谱和尿囊液测定等。使用不透明度检测种蛋的性别基于一个假设,即雄性比雌性重得多,雄性受精蛋比雌性受精蛋吸收更多的光,研究发现雄胚的不透明度高于雌性胚胎,识别准确率为84%^[11]。基于此,由于蛋壳和壳中胚胎分别在紫外和可见光区域具有较高的吸收度,故近红外光可能是研究种蛋较好的选择^[85-86]。通过阻抗谱监测种蛋性别信息的假设与不透明度检测的假设相似,与雌性胚胎相比,雄性胚胎的蛋黄更大,因此有理由相信不同性别的种蛋会有不同的电阻抗值。可以将蛋壳类比为细胞膜,蛋白质类比为细胞质,蛋黄类比为细胞核,因此阻抗谱理论在逻辑上也适用于种蛋性别检测。基于该假设的研究发现,采集到的阻抗数据与鸡蛋性别之间存在相关性^[40,87]。此外,还有研究发现,在种蛋孵化

9 d时用硫酸雌酮可以测定种蛋性别,但是该方法需要对蛋壳微创提取尿囊液^[77]。

通过这几项研究可以发现,不同性别的种蛋在物质含量上可能存在差异,具体表征是种蛋的不透明度、蛋质量和蛋黄尺寸等。基于这些研究,可以考虑综合利用不透明度、阻抗谱、红外光谱等多种方法探究种蛋性别信息检测的可能性。

2 现有种蛋无损检测难点

2.1 仍未解决的问题

虽然目前关于种蛋受精与性别信息的检测已经取得了一定的进展,但仍然面临着一些困难与挑战。

(1)技术限制。根据已有文献,即便是使用相同的检测技术,不同研究获得的检测效果也有很大差异,意味着现有的无损检测技术还不够灵敏或准确,无法可靠地检测种蛋的受精和性别信息。尤其对于种蛋的性别信息检测,已有研究几乎都需要微创才能实现检测,且对于早期性别无损检测的机理尚不明确,从而造成检测技术与结果的不可靠。

(2)发育阶段检测的限制。种蛋通常需要在一定的发育阶段进行检测。然而,检测过早可能导致信息不足,因为胚胎尚未充分发育,无法确定受精状态或性别。另一方面,如果检测时间过晚,可能会对正在发育的胚胎造成损害,甚至导致孵化失败。

(3)蛋壳干扰。种蛋的蛋壳会干扰机器视觉等技术的效果。蛋壳的透明度、颜色和纹理等特征可能会干扰图像采集和识别过程,降低检测的准确性和可靠性。

(4)种蛋个体之间的差异性。不同种蛋之间存在着大小、蛋壳厚度、蛋黄大小等方面的个体差异,这些差异会造成不同的响应和表现,最终影响检测准确性。

2.2 现有技术对比与分析

无损检测技术的研究与应用,不仅可以优化资源配置,节省不必要的孵化及饲养成本,而且可解决雏禽扑杀引起的重大伦理问题。因此,有必要从灵敏度、准确性、速度、成本、可操作性、多功能性等多个角度分析比较现有无损检测技术,以帮助研究人员明确何种方法可以在不同条件下提供最可靠的结果,从而优化检测方法的灵敏度和精度,提升检测技术的易用性和可扩展性。

(1)灵敏度和准确性

机器视觉技术在最佳条件下可以获得较高的准确性,但是可能受到照明或蛋壳颜色等因素的影响;光谱技术对种蛋内部成分的变化具有高灵敏度,准确性较高,也取决于设备的质量和解释结果的专业

知识;声共振频率分析方法从孵化早期阶段(第5天)起对胚胎发育的变化高度敏感;生物电信号分析方法,具有高灵敏度和高准确率的潜力;敲击振动法对影响其振动模式的种蛋内部变化敏感,但准确率取决于噪声等外部因素;介电常数分析方法具有高灵敏度和高准确率的潜力;气味特征分析需要进一步研究以提升其准确性。

(2)检测速度和成本

机器视觉检测速度相对较快,其成本也取决于所使用成像设备的质量,性价比相对较高;光谱技术及其设备的数据采集过程比较耗时,成本较高;声共振频率分析方法在相关设备设置好后检测速度相对较快,其成本取决于所使用监控系统的复杂程度;生物电信号分析方法在初始设置后检测时间相对较短,但是其需要专业的设备;敲击振动法通常是快速且低成本的方法,需要简单的工具或设备;介电常数与气味特征分析法涉及复杂的程序及设备,耗时长成本也高。

每种技术都有其优缺点,使其比其他技术更适用于某些应用场景,具体取决于可用的资源、特定目标与需求等因素。例如,通过种蛋内部性别分化成分的变化以分析判别其性别,光谱技术相比于机器视觉技术就更为适用。综合分析可以发现,在可操作性与多功能性方面,机器视觉技术通常具有较高的可操作性,可以轻松地集成到自动化系统中,实现高效的大规模检测。光谱技术在不同波长范围内具有多功能性,可以适用于种蛋检测的多类应用场景。其他技术可能具有一定的可操作性和多功能性,但需要更多的技术和设备支持。综上所述,机器视觉技术和光谱技术在种蛋受精信息和性别信息检测方面具有较高的灵敏度和准确性,较快的检测速度,以及较好的可操作性和多功能性。其他技术可能在某些特定应用场景中有所应用,但在综合考虑灵敏度、准确性、检测速度、成本、可操作性和多功能性等方面可能存在一定的限制。

3 种蛋无损检测技术发展探讨

新兴技术的探索和应用有望高效率高精度解决种蛋孵化检测难题。除了上述现有应用于种蛋的无损检测技术之外,本文将未来可能应用于禽蛋检测的技术进行总结和分析,并将涉及到的技术进行分类,主要包括光学成像、超声波成像、其他成像技术和电子传感器技术。

3.1 光学成像技术

光学成像技术是利用光来研究样品体内各种组织结构和功能的非侵入性方法。光学成像技术的研

究主要包括生物斑成像、X射线成像、高光谱成像、红外成像、拉曼光谱成像和太赫兹光谱成像等。每种分支技术都有其优点和局限性,具体取决于分辨率深度和对特定样品特征的敏感性等因素。

(1) 高光谱成像技术

高光谱成像技术最初应用于遥感领域,现在作为一项新兴技术应用于食品、医药和农业行业的各种定量检测中^[88-95]。其结合了光谱学和成像原理,能够同时评估各种样品的物理特性和化学成分并指定其空间分布,因此优于传统光谱学技术^[89,96]。近红外高光谱系统可以捕获从可见光到近红外电磁辐射区域的广泛光谱数据,其可以在不同的光学模式下操作,例如反射率、透射率、吸光度或荧光,高光谱图像中的像素具有大约100个波段的连续光谱^[89]。目前,已有学者将高光谱成像技术应用于鸡种蛋的性别检测,并结合支持向量机、偏最小二乘判别分析和人工神经网络等方法建立了判别模型,最优的判别准确率为85%左右,检测时间在孵化9~10 d时^[97-98]。因此,对于种蛋受精信息和性别信息,高光谱成像技术有望通过结合种蛋的图像特征和内部化学成分的光谱特征实现无损检测,但是高光谱系统的设备购买费用和维护成本相对较高,这会限制其推广及应用,并且高光谱数据量庞大,处理和数据分析需要专业的知识和技能,此外,根据已有研究,蛋壳对光谱信息的干扰,可能会导致检测灵敏度和准确度下降,尤其对种蛋的性别信息检测。

(2) 生物散斑成像技术

生物散斑成像技术是基于光学特性的非侵入性、非破坏性、低成本新型技术^[99-101]。生物斑点是当相干激光照射到物质上时,表现出各种类型的活性或非生物动态过程的现象^[102]。当这种相干光入射到生物样本表面时会散射回来,并与组织成分相互作用,形成散射的光斑图案。如果被检测样品没有生物组织,那么获得的图像是不变的。在生物样本中,斑点模式有静态模式和可变模式两种^[103]。这些光斑图案是由于生物组织的微小运动(细胞质流动/原生质流动、细胞的生长和分裂、细胞器时刻、生化反应和布朗运动等)而产生变化^[101]。由于生物散斑成像技术可以观察到生物组织的动态变化,因此理论上其可以监测孵化期间种蛋的内部组织变化,如监测种蛋孵化4 d左右的血液流动现象;此外,由于种蛋孵化3 d后,雌雄种蛋会形成不同的血管形态,所以该技术也具有判别种蛋性别的潜力。然而,已有的研究表明生物斑点技术不适合检测水果内部缺陷^[99],若是将该技术应用于种蛋检测,可以参照文献^[104]探讨近红外光透

射西瓜深度的研究,即在种蛋表面逐渐改变透射光源与探头之间的距离,以获取种蛋内部组织的生物斑图像。

(3) X射线成像

相对于生物斑点、高光谱成像和热成像方法,X射线成像具有较深的穿透能力,且已经应用于检测隐性虫害和水果内部腐败^[105-107]。波长在0.1~10 nm之间的X射线被称为软X射线,能量在0.12~12 keV之间,通常用于农产品内部缺陷检测^[108-109],其具有非接触式、非破坏性、快速且低成本的优势^[110-111]。软X射线方法快速,可在3~5 s内生成图像^[112]。X射线计算机断层扫描(CT)是一般X射线成像系统的下一个级别,可以获得二维和三维图像。在CT成像技术中,可以利用在物体不同投影处获得的2D图像,借助配套软件(计算机断层扫描)构建3D图像^[113]。此外,光谱X射线计算机断层扫描(SCT)是一种新兴的材料内部结构无损成像方法。与传统的X射线CT相比,该技术在有限的能量通道内提供了光谱光子能量分辨率,为重建的体积和图像增加了新的维度^[114]。对于种蛋内部信息采集过程中的蛋壳干扰,X射线成像技术提供了一种解决方案,已有学者将X射线成像技术应用于有壳坚果和厚皮水果^[115-117],可以克服外壳带来的限制,从内部获取图像信息。此外,已有文献利用X射线成像技术对不破茧情况下的雌雄茧进行了分类(分类准确率达95%以上)^[118],还有学者应用小角度X射线散射方法成功地区分了未经巴氏消毒冷冻鸡蛋中的蛋白质^[119]。这也为种蛋受精信息的检测提供了思路,可以使用X射线分析受精蛋与未受精蛋中蛋白质的含量差异,以实现未受精蛋的识别;此外,有学者利用X射线荧光技术检测了饲料中铬在鸡肉和鸡蛋中的传播,结果发现,该技术可以有效检测饲料、鸡蛋和鸡肉中的铬,且该方法简单、成本低^[120]。基于此,结合目前已有的利用激素诱导禽类胚胎和雏禽性反转的研究^[121-125],利用X射线或许可以探明影响禽类胚胎性别分化的蛋白质、激素或某种元素,以进一步明确禽类性别分化的机理,进而为禽类胚胎的性别检测提供探索方向及底层理论依据。

(4) 太赫兹成像技术

处于中红外和微波范围之间,0.1~10 THz的电磁波谱范围内的是太赫兹光谱,这是一个相对未开发的范围^[126]。无论是在透射模式还是反射模式下,太赫兹时域光谱都是研究化学成分结构和相互作用最常用的技术之一^[127-128],其具有良好的透射性和低能量,对水敏感,不会对样品造成电离辐射损

伤,新兴的太赫兹时域光谱与成像技术在生物医学、食品等领域具有巨大的应用潜力^[129-130];与近红外和中红外范围相比,其可用于区分食品中的低密度成分^[131],且可以深入到非极性和不透明成分的内部,从而成为食品检查和质量控制的重要工具^[132]。太赫兹光谱正在成为研究与生命科学相关的有机分子动态特性的合适方法,因为它可以检测生物分子的低频集体振动模式^[133]。研究人员已经应用太赫兹时域光谱来感知植物的水分变化,如利用太赫兹光谱和成像技术监测银杏种子的水分含量,并观察其壳与仁之间的间隙^[134]。目前,已有学者利用太赫兹成像技术,结合人工智能,实现了蚕卵发育阶段的准确识别(准确率达98%以上)^[135-136],此外,还有学者研究了太赫兹光谱测量蛋壳厚度,以及太赫兹时域光谱在蛋壳光学特性研究中的应用^[137-139]。由于蛋清对太赫兹光谱的强吸收^[139],可以考虑结合深度学习,将其应用于种蛋信息检测中;同样地,可以采集孵化各个时间段的种蛋太赫兹光谱数据,结合深度学习,建立种蛋性别判别模型。在建立模型后,可以根据判别结果,反演其中的深度特征,在太赫兹光谱与图像数据中,探索受精特征和性别特征信息。再进一步探明种蛋受精与性别分化的机理。

3.2 超声波成像技术

超声波是一种机械波,是频率超过20 000 Hz的声波,这种频率超出了人类听觉极限^[140],其是纵波的一种,纵波几乎可以在所有材料中传播^[141]。超声成像作为一种非侵入性、非破坏性和成本效益高的技术,能够在厘米到亚微米的尺度上对生物组织结构和功能进行纵向和定量监测,其不仅可以用于常见的组织结构和血流成像的临床应用,还可以定量评估声学、力学和其他组织特性^[142]。鉴于超声波成像高精度、穿透性好,存在检测到受精胚盘的可能性,其次,其可以对血流成像,有望在种蛋孵化3.5 d后检测出胚胎的性别。因此,利用超声波成像技术进行种蛋信息的无损检测具有重大潜力。近年来,超声检测越来越多与机器学习结合应用,促进了更高层次的自动化和决策的检测与分类,将超声成像与人工智能技术结合,探索种蛋的受精与性别信息,是一个具有前景的研究方向。

3.3 其它成像技术

(1) 热成像

温度在-273.15℃以上的物体会发出红外线^[143]。红外光谱范围为0.78~1 000 μm,红外区域分为近红外(0.75~3 μm)、MIR(3~6 μm)、FIR(6~15 μm)和极红外(15~1 000 μm)^[144]。热成像

是一种非接触、非破坏性的技术,它将电磁辐射转化为温度数据。在热成像技术中,热像仪将商品的不可见辐射转换为可见图像^[145]。近年来,热成像技术在农业和食品行业受到越来越多的关注。热成像主要分为主动和被动两类。主动热像仪需要外部热源对物体进行加热,被动热像仪测量的是在自然环境条件下被研究物体与周围环境之间的温差。在不与标本接触的情况下,通过测量动物表面发出的辐射量,将动物表面释放的辐射量转化为热图像^[146]。种蛋受精后,受精卵内部的热辐射会发生变化^[147],这种变化可以考虑使用热成像技术进行检测;在种蛋孵化过程中,雌性胚胎与雄性胚胎的代谢活动存在差异^[11],从而可能导致热辐射的差异,通过热成像可能检测到其温度差异。

(2) 气味成像

气味成像通常使用电子鼻或气味传感器阵列设备。这些传感器可以感知并识别气味物质,并将其转化为电信号^[148]。通过在空间中移动传感器阵列或将待测物体置于传感器阵列下方,可以获取不同位置的气味数据。收集到的气味数据可以进一步进行图像处理和分析,生成气味成像图。这些图像可以呈现出气味的浓度分布、来源定位以及气味的变化趋势。气味成像技术在农产品品质控制等领域具有广泛的应用潜力^[149]。如今气味成像技术仍处于发展阶段,其应用仍存在一些挑战,如传感器选择、数据处理和标准化等方面。

(3) 磁共振成像技术

磁共振成像(MRI)是一种非侵入性技术,通过测量位于交变磁场中的某些原子核的共振磁性来实现测量^[150-151]。该方法将磁场原理与射频系统相结合,传递观测对象的信号特征,从而显示物理和化学信息^[152]。由于MRI能够提供人体组织组成和结构的数字信息,在临床诊断和医疗程序方面作为一种非破坏性仪器在医学领域具有显著影响,MRI在食品监测中的应用主要集中在水分、油脂、碳水化合物、蛋白质等质量参数的检测方面^[153]。已有研究将MRI应用于种蛋的胚胎、尿囊和绒毛膜在孵化1~20 d期间的形态演变的成像,且其在孵化1 d就可清晰观察到受精胚盘,并且其成功研究了卵细胞中尿囊发育的解剖结构^[154],说明该方法不仅可以在孵化早期判别受精蛋,亦具有在孵化期间判别种蛋性别的潜力。此外,和MRI很相似的一项技术,电子顺磁共振(Electron paramagnetic resonance, EPR),也称为电子自旋共振(Electron spin resonance, ESR),也是一种非侵入性光谱技术,用于研究具有未配对电子的分子或原子,以收集顺磁

性物质的综合结构信息和键形成^[155-156]。EPR的原理在某种程度上类似核磁共振,这两种技术都使用磁偶极子与特定波长的磁场和电磁辐射的相互作用。只是EPR关注的是电子自旋态的分裂,而MRI更关注的是磁场中核自旋态的分裂。

3.4 电子传感器技术

(1) 比色传感器

比色法、荧光法和化学电阻传感器等技术是使用薄膜设备直接传达有价值信息的有效手段^[156-158]。其中,比色传感器因其通过视觉颜色变化直接提供食品质量信息的能力而备受关注^[159-161],其具有成本效益、可扩展性、非侵入性和非破坏性等优点^[162-165]。其中,比色传感器阵列基于多个交叉响应传感器元件模拟哺乳动物嗅觉系统,在食品质量评价等复杂场景应用中得到了越来越多的发展^[166-169]。比色传感器阵列的化学特异性取决于交叉反应传感和指纹模式识别的性能,而不是传统的特定受体-分析物相互作用的锁与钥匙模型^[158]。此外,比色传感器阵列由许多传感器元件组成,有利于嗅探更复杂的气味,而单个传感器的检测性能有限且不足^[170]。比色传感器阵列因为在传感器元件和分析物之间具有很强的分子间相互作用^[158,171],具有优越的固有灵敏度(通常低至十亿分之一的水平)和化学选择性。此外,许多研究人员提出,比色传感器阵列几乎不受湿度和温度波动的影响,并且固定化比色传感器阵列的化学活性可以保持较长时间^[172-173]。目前关于比色传感器的研究多是关于食品新鲜度的检测,肉类腐败的关键指标之一是总挥发性碱性含氮化合物,如三甲胺、二甲胺和氨等^[174]。已有学者利用比色传感器对牛肉、鱼和鸡肉的新鲜度加以检测,并结合机器学习方法证实了该传感器方法的可行性和适用性^[175-176]。基于比色传感器阵列对各种气味细微变化的敏感性,结合胚胎气味能够传递种蛋受精、性别信息和发育状态等生物信息的作用^[177-178],可以考虑使用比色传感器阵列进行种蛋受精和性别信息的判别,但是需要注意同一孵化条件下,不同种蛋气味之间的干扰。针对这个问题,可以考虑使用便携式传感器或在线检测传感器,以实现逐个种蛋的信息检测。

(2) 电化学阻抗谱

电化学阻抗谱(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)是一种测量电化学系统电阻和电容响应的技术,它通过在一定频率范围内施加交流电信号并测量相应的电流响应,来确定电极/电解质界面的特性,施加的交流电压通常很小(2~10 mV),因此可以获得线性响应^[179]。为了解释EIS

结果,需要将数据拟合到具有电阻和电容的等效电路模型中,然后从这些电路中绘制奈奎斯特图,从而可以直观地评估系统中的变化动态。在所有电化学生物传感器类型中,阻抗生物传感器被认为是进行无标签检测的最佳选择,EIS检测中,目标分析物分子与识别元件之间的相互作用可以直接在传感器表面测量,而无需使用诸如荧光团、活性酶或磁珠之类的标签^[180]。EIS生物传感器的另一个优点是它们对环境干扰不敏感,这使得它们在检测食物成分方面具有额外的优势^[181]。基于电化学阻抗谱传感器,BANERJEE等^[182]结合机器学习算法,实现了定量表征骨动态愈合的物理电化学特性,以无损响应骨中矿物质含量的变化。据此,结合种蛋在孵化过程中胚胎对蛋壳的溶解吸收现象,可以考虑使用电化学阻抗谱监测种蛋孵化过程中的蛋壳钙等矿物质含量的变化,探索蛋壳中矿物元素含量变化和种蛋信息(受精与性别)的相关性。

此外,还有涡流检测、微波全息技术、荧光光谱法、光声成像等技术和方法在改进和逐渐应用。其中,涡流无损检测具有响应快、非接触等优点,并且因为其可以提供高分辨率的图像和低成本检测,有可能取代X射线CT检测^[183];微波全息技术已广泛应用于包括生物医学、混凝土和土壤的介质物体成像,其与传统的微波成像相比,可以用标量测量来计算复杂的振幅和相位信息^[184-185];荧光光谱已被证明是一种有效的分析技术,荧光是在吸收紫外线或可见光后由荧光团发出的光,用于监测各种食品的特性。荧光团以特定波长的光吸收能量,并以更高波长的光释放能量。荧光检测通常具有较高的灵敏性和特异性,并且利用激光作为激发光源,可进一步提高检测灵敏度,检测黄曲霉毒素等微量成分^[186-187];光声成像是当代生物医学研究中发展最为迅速的技术之一,其已经成功应用于从细胞和组织到微观模式生物的各种样品中提供体内无标记成像^[188]。这几种方法从理论上都具有应用于种蛋受精和性别信息检测的潜力,需要大量的试验进行验证。

综上所述,各种新兴或改进的无损检测方法为种蛋信息的检测提供了新的解决思路。光学成像技术中X射线和太赫兹光谱成像对于种蛋信息的检测极具潜力,是值得探索的方法;超声波成像技术与X射线和太赫兹光谱成像相比,其信息维度较少,基本只能获取到图像信息,但是其高穿透性的特性可以使其用于检测结果验证;电子传感器技术在理论上可以通过气味、蛋壳中微量元素变化等间接特征实现种蛋信息的无损检测,同时需要明确其检

测机理,并依据机理确定气味等信息的一个可量化阈值;其他技术中,热成像技术和荧光光谱法同样需要确定一个可量化的温度阈值与元素含量阈值,气味成像则需要一些复杂的算法对其电信号图像分析,以寻求种蛋信息的关键特征,磁共振成像、微波全息成像与光声成像具有和超声波检测相似的功能。

4 种蛋受精与性别信息检测装备与技术

在现代禽业养殖中,提高孵化效率和降低不必要的资源消耗是关键。尤其在种蛋孵化过程中,如何精确快速地识别受精蛋、评估其发育状态以及预测种蛋性别,成为技术发展的重要方向。近年来,随着生物技术和光谱学的进步,一系列创新装备被开发和应用。

对于种蛋的受精信息检测,国内的百士立丰孵化技术有限公司开发了一款验蛋、筛除和传送系统(图4a),可以实现自动验蛋、移除无精蛋和将蛋从入孵机托盘半自动传送到出雏篮的功能。该系统是利用蛋的透光量来判断是否为不可育蛋,根据筛除类型,系统可以检验和传送36 000或50 000枚蛋;日本NABEL公司开发了孵化途中蛋检查装置,如图4b所示,能够在孵化过程中早期识别出发育中止蛋(腐败蛋)、无精蛋和正常蛋。该装置利用先进的生物检测技术检测孵化13 d后的鸡蛋心跳和胎动,无需考虑鸡种和蛋壳颜色的差异,达到99%以上的高精度检出率。这种技术的应用不仅可以有效避免资源浪费,同时也提高了孵化场的工作效率和经济效益。

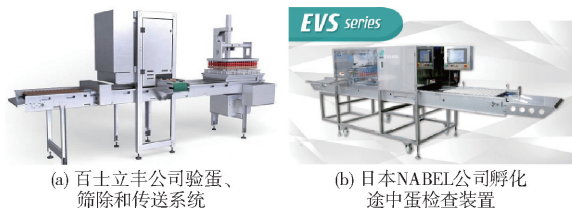


图4 种蛋受精信息检测装备

Fig. 4 Fertilized egg information detection equipment

在性别预测方面,荷兰-德国合资的Seleggt公司提供了一个解决方案。如图5a所示,该公司开发了一种技术,通过在受精9 d蛋壳上打一个微小孔来测量一种性别“生物标记”物质,该物质与受精卵液体混合后,雄性将显示蓝色,而雌性显示白色。这一方法的准确率高达98.5%,极大地减少了不必要的孵化以及随之而来的资源和经济损失。除了化学检测方法外,物理方法同样展示了巨大的潜力。德累斯顿理工大学和德国莱比锡大学的研究人员正在开发一种在鸡蛋孵化前使用光谱学确定鸡蛋性别的方法。

据报道,该技术将很快在商业上应用,可以替代在出生后不久杀死雄性雏鸡的常规孵化操作。近期的研究利用激光光谱技术来确定鸡蛋性别,研究人员首先使用激光束在鸡蛋顶部切出一个小的圆形孔,如图5b所示。接下来,使用近红外光谱法根据胚胎的DNA含量来确定胚胎的性别,雄性雏鸡的DNA含量高出约2%。利用特定波长的光线照射蛋壳并分析反射光谱,能够区分雄性和雌性鸡胚,为早期性别鉴定提供了一种新途径。

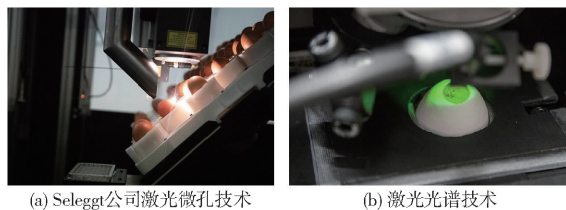


图5 种蛋性别检测技术

Fig. 5 Intra-egg gender identification technology

综上所述,种蛋孵化期间的受精信息检测技术相对成熟,且已有相关装备在商业上应用,但是关于种蛋孵化前的受精信息检测装备还未见报道。而种蛋性别信息的检测仍在研究探索中,还无法做到完全的无损检测。而且报道中提到的这两种技术无法保证检测效率和孵化率,Seleggt公司的微孔技术虽然可以获得98.5%的准确率,但是其速度非常慢,为了避免交叉污染,每次针刺后,都需要清洗针头。而德累斯顿理工大学和德国莱比锡大学合作的激光束切孔检测DNA含量的技术,与GALLI等^[37]使用拉曼光谱检测性别的技术相似,且所开孔大小相近,根据GALLI等学者的研究,这样大小的孔会导致孵化率降低(11%左右)。因此,仍需要探索和开发新的种蛋受精和性别无损检测技术,在保证孵化率的同时,提高检测效率。

5 展望

从技术角度来看,采用多种或新兴技术的多技术融合方法进行种蛋信息检测具有广阔的前景。然而,仍然存在一些问题,如不同物种的特殊要求、检测准确性和效率等方面的挑战。种蛋信息无损检测的复杂性需要综合考虑多个因素,包括技术、伦理和监管等方面。通过总结现有经验并指出未来需要解决的问题,为种蛋受精状态和性别无损检测的发展提供了方向和指导。对未来技术发展方向做出以下展望:

(1)将先进成像技术与人工智能相结合。随着成像技术的不断进步,如超声波、光学成像和核磁共振等,结合不断发展的人工智能算法,通过大量数据分析和模式识别,提高种蛋的受精和性别信息检测

准确性和效率。

(2)开发环境友好型检测设备。针对现场测试环境要求,开发耐高温高湿的种蛋孵化检测硬件设备,其中关键元器件的材质与性能均需得到有效保障。

(3)生物育种与无损检测技术相结合,跨学科合作将会加快研究与应用进展。生物学、工程学、计算机科学等领域之间的跨学科合作也至关重要,如在源头引入家禽育种的基因编辑等干预,后续种蛋的孵化信息检测将会更加高效。

(4)独特生物学特征的定制方法研究。不同物种(鸡、鸭、鹅、鹌鹑等)具有独特的生物学特征,可能需要量身定制的方法或调整来进行种蛋受精状态和性别信息的无损检测。未来需要更深入地探索不同物种的特征,并针对性地开发适用的检测方法。

(5)道德准则与监管标准的建立与制定。随着技术的进步和应用的普及,道德准则需要随之发展以确保负责任的技术应用。同时,监管机构需要为种蛋信息无损检测技术制定明确的标准和规范,以确保技术的安全性、可靠性和可持续性。

参 考 文 献

- [1] KRAUTWALD-JUNGHANNS M E, CRAMER K, FISCHER B, et al. Current approaches to avoid the culling of day-old male chicks in the layer industry, with special reference to spectroscopic methods[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(3): 749–757.
- [2] JIA N, LI B, ZHU J, et al. A review of key techniques for in ovo sexing of chicken eggs[J]. *Agriculture*, 2023, 13(3): 677–699.
- [3] MOTTE A, TEMPIO G. Global poultry production: current state and future outlook and challenges[J]. *World's Poultry Science Journal*, 2017, 73(2): 245–256.
- [4] 邹秀容,潘磊庆,屠康,等.鸡种蛋孵化品质无损检测的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(2): 342–344, 347. ZOU Xiurong, PAN Leiqing, TU Kang, et al. Research progress in non-destructive measurements on incubation quality of eggs[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(2): 342–344, 347. (in Chinese)
- [5] ADEGBENJO A O, LIU L, NGADI M O. Non-destructive assessment of chicken egg fertility[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5546.
- [6] 林金杏. 鸡和鸡胚性别鉴定技术的研究概况[C]//中国畜牧业协会禽业分会. 首届中国黄羽肉鸡行业发展大会会刊, 2008.
- [7] KHALIDUZZAMAN A, FUJITANI S, KASHIMORI A, et al. Non-invasive detection of chick embryo gender based on body motility and a near-infrared sensor[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2021, 14(2): 45–53.
- [8] DONG J, DONG X, LI Y, et al. Prediction of infertile chicken eggs before hatching by the Naïve-Bayes method combined with visible near infrared transmission spectroscopy[J]. *Spectroscopy Letters*, 2020, 53(5): 327–336.
- [9] KOODTALANG W, SANGSUWAN T, RERKRATN A. Non-destructive fertility detection of multiple chicken eggs using image processing and convolutional neural network[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 895(1): 012013.
- [10] LIU L, NGADI M O. Detecting fertility and early embryo development of chicken eggs using near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6: 2503–2513.
- [11] ALIN K, FUJITANI S, KASHIMORI A, et al. Non-invasive broiler chick embryo sexing based on opacity value of incubated eggs[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 158: 30–35.
- [12] YILMAZ-DIKMEN B, DIKMEN S. A morphometric method of sexing white layer eggs[J]. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 2013, 15: 203–210.
- [13] 曹智,张志东,贾斌.不同蛋形指数与鸡蛋性别关系的研究[J]. *上海畜牧兽医通讯*, 2018(5): 16–17.
- [14] 徐铁山,侯水生,刘小林,等.北京鸭蛋重与受精率、孵化率、蛋形指数及出雏重的关系[J]. *山东家禽*, 2003(8): 10–11. XU Tieshan, HOU Shuisheng, LIU Xiaolin, et al. Relationships of egg weight of Beijing duck with fertility, hatching rate, egg shape index and body weight of newly hatched offspring[J]. *Shandong Poultry*, 2003(8): 10–11. (in Chinese)
- [15] VERMA A K, PRAMANIK P S, SINGH K D, et al. Comparative assessment of fertility and hatchability of Kadaknath and Aseel fowls[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018, 7: 1238–1243.
- [16] 杨建生,叶彩芳,杨海明,等.蛋重、蛋形指数对鹅种蛋受精率、孵化率的影响[J]. *中国家禽*, 2013, 35(23): 52–53.
- [17] AHMAD M, SINGH B, CHAUHAN S S, et al. Effect of breed, egg size and shape on fertility, late embryonic mortality and hatchability[J]. *Indian Journal of Poultry Science*, 2000, 35(2): 207–210.
- [18] 郭洪杞,罗杰,王文强.山鸡的蛋重和蛋形指数对孵化效果的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2006(12): 102–103.
- [19] 高利肖,吴建华.蛋形指数对肉杂鸡种蛋孵化效果的影响[C]//北京畜牧兽医学会、天津畜牧兽医学会、河北畜牧兽医学会“首农杯”论坛, 2010.
- [20] 马力,彭清泉.不同日龄罗曼粉壳种鸡蛋蛋形指数与孵化效果的对比研究[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(2): 235–237. MA Li, PENG Qingquan. Comparison of effects of egg-shaped indexes on hatching results for Roman pink breeding hens with different ages[J]. *Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science Edition)*, 2011, 37(2): 235–237. (in

- Chinese)
- [21] DAS K, EVANS M D. Detecting fertility of hatching eggs using machine vision II: neural network classifiers[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(6): 2035–2041.
- [22] DAS K, EVANS M D. Detecting fertility of hatching eggs using machine vision I. Histogram characterization method[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(4): 1335–1341.
- [23] 彭秀丽, 邓干臻, 阮国庆. 蛋形指数对孵化率及性比例的影响[J]. 四川畜牧兽医, 2002(2): 23–24.
PENG Xiuli, DENG Ganzhen, RUAN Guoqing. Affection of egg shape index on hatchability sex ratio[J]. Sichuan Animal & Veterinary Sciences, 2002(2): 23–24. (in Chinese)
- [24] 赵宗胜, 李大全, 万雪飞, 等. 应用模糊评判鉴别种蛋性别的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2000, 4(3): 231–233.
ZHAO Zongsheng, LI Daquan, WAN Xuefei, et al. Studies on sexing pedigree eggs through fuzzy discrimination[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2000, 4(3): 231–233. (in Chinese)
- [25] DIANTORO A, SANTOSO I B. Eggs fertilities detection system on the image of kampung chicken egg using naive bayes classifier algorithm[J]. Journal of Computer Science and Information Technology, 2017, 9(2): 53–57.
- [26] DONG J, LU B, HE K, et al. Assessment of hatching properties for identifying multiple duck eggs on the hatching tray using machine vision technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 106076.
- [27] 张伟, 屠康, 刘鹏, 等. 基于机器视觉与敲击振动融合的鸭蛋孵化特性检测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 140–145.
ZHANG Wei, TU Kang, LIU Peng, et al. Early fertility detection of hatching duck egg based on fusion between computer vision and impact excitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 140–145. (in Chinese)
- [28] LIN C S, YEH P T, CHEN D C, et al. The identification and filtering of fertilized eggs with a thermal imaging system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 91: 94–105.
- [29] DONG J, DONG X, LI Y, et al. Identification of unfertilized duck eggs before hatching using visible/near infrared transmittance spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 471–478.
- [30] ZHANG W, PAN L, TU K, et al. Comparison of spectral and image morphological analysis for egg early hatching property detection based on hyperspectral imaging[J]. PLoS One, 2014, 9(2): e88659.
- [31] COUCKE P M, ROOM G M, DECUYPERE E M, et al. Monitoring embryo development in chicken eggs using acoustic resonance analysis[J]. Biotechnology Progress, 1997, 13(4): 474–478.
- [32] 沈林生, 陈宁, 王光亮. 用生物电鉴别受精蛋的检测装置的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 167–170.
SHEN Linsheng, CHEN Ning, WANG Guangliang. Study on test facility for evaluating fertilized eggs by bioelectricity[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(3): 167–170. (in Chinese)
- [33] GHADERI M, BANAKAR A, MASOUDI A A. Using dielectric properties and intelligent methods in separating of hatching eggs during incubation[J]. Measurement, 2018, 114: 191–194.
- [34] LI W, LIN H, ZHANG H, et al. Detection of free oxygen and water vapor in fertilized and unfertilized eggs by diode laser spectroscopy—exploration of diagnostics possibilities[J]. Journal of Biophotonics, 2018, 11(3): e201700154.
- [35] 吕志南, 冀飞, 冀一伦. 模糊模式识别方法在鉴别鸡蛋性别上的应用[J]. 畜牧兽医学报, 1997, 28(1): 49–51.
LÜ Zhinan, JI Fei, JI Yilun. Application of the fuzzy model differentiation method to judge the sex of hatching eggs[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 1997, 28(1): 49–51. (in Chinese)
- [36] 李振钢, 王涛宽, 李端仁, 等. 鸡胚蛋血线方向与性别关系的统计研究[J]. 天津大学学报(自然科学版), 2000, 20(2): 36–39.
LI Zhengang, WANG Taokuan, LI Duanren, et al. Statistics study on relation between the direction of the blood vessels on embryo in egg and the sex[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2000, 20(2): 36–39. (in Chinese)
- [37] GALLI R, PREUSSE G, SCHNABEL C, et al. Sexing of chicken eggs by fluorescence and Raman spectroscopy through the shell membrane[J]. PLoS One, 2018, 13(2): e0192554.
- [38] GÖHLER D, FISCHER B, MEISSNER S. In-ovo sexing of 14-day-old chicken embryos by pattern analysis in hyperspectral images (VIS/NIR spectra): a non-destructive method for layer lines with gender-specific down feather color[J]. Poultry Science, 2017, 96(1): 1–4.
- [39] 张伏, 崔夏华, 丁轲, 等. 不同预处理方法对多位置种蛋性别鉴定的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(2): 434–439.
ZHANG Fu, CUI Xiahua, DING Ke, et al. Study on the influence of different pretreatment methods on gender determination of multiposition[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(2): 434–439. (in Chinese)
- [40] CHING C T S, WANG C K, LI C, et al. A pioneer study on a non-invasive method for in ovo chicken egg sexing[J/OL]. Research Square. Preprint. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1047909/v1>.
- [41] DU C J, SUN D W. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(5): 230–249.
- [42] TEIMOURI N, OMID M, MOLLAZADE K, et al. On-line separation and sorting of chicken portions using a robust vision-based intelligent modelling approach[J]. Biosystems Engineering, 2018, 167: 8–20.

- [43] MENG Y, SUN H, QIU N, et al. Comparative proteomic analysis of hen egg yolk plasma proteins during embryonic development[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(12): e13045.
- [44] ROSE S P. Principles of poultry science[M]. Wallingford: CAB International, 1996.
- [45] SAIFULLAH S, SURYOTOMO A P. Chicken egg fertility identification using FOS and BP-neural networks on image processing [J]. *Journal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, 2021, 5(5): 919–926.
- [46] INDRA D, HASANUDDIN T, SATRA R, et al. Eggs detection using otsu thresholding method[C]// 2018 2nd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT). IEEE, 2018: 10–13.
- [47] XU Q L, CUI F Y. Non-destructive detection on the fertility of injected SPF eggs in vaccine manufacture[C]// The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC). IEEE, 2014: 1574–1579.
- [48] SAIFULLAH S, SURYOTOMO A P. Identification of chicken egg fertility using SVM classifier based on first-order statistical feature extraction[J]. *arXiv Preprint, arXiv:2201.04063*.
- [49] SAIFULLAH S, DREŻEWSKI R. Non-destructive egg fertility detection in incubation using SVM classifier based on GLCM parameters[J]. *Procedia Computer Science*, 2022, 207: 3254–3263.
- [50] FADCHAR N A, CRUZ J C D. Prediction model for chicken egg fertility using artificial neural network[C]// 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). IEEE, 2020: 916–920.
- [51] 张兢,杨超,王猛.应用BP神经网络的受精蛋自动识别方法[J].*重庆理工大学学报(自然科学)*,2013,27(7):80–83.
ZHANG Jing, YANG Chao, WANG Meng. Algorithm of automatic identification of fertilized eggs based on BP[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2013,27(7):80–83. (in Chinese)
- [52] SAIFULLAH S, PERMADI V A. Comparison of egg fertility identification based on GLCM feature extraction using backpropagation and K-means clustering algorithms [C]// 2019 5th International Conference on Science in Information Technology (ICSITech). IEEE, 2019: 140–145.
- [53] ZHU Z, MA M. The identification of white fertile eggs prior to incubation based on machine vision and least square support vector machine[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(12): 2699–2704.
- [54] GENG L, YAN T, XIAO Z, et al. Hatching eggs classification based on deep learning [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77: 22071–22082.
- [55] HUANG L, HE A, ZHAI M, et al. A multi-feature fusion based on transfer learning for chicken embryo eggs classification [J]. *Symmetry*, 2019, 11(5): 606.
- [56] 何海燕,邓国浩,胡鹏飞,等.基于图像处理技术的受精蛋挑选方法研究[J].*南方农机*,2022,53(10):79–82.
HE Haiyan, DENG Guohao, HU Pengfei, et al. The research on selection method of fertilized eggs based on image processing technology[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2022,53(10):79–82. (in Chinese)
- [57] HASHEMZADEH M, FARAJZADEH N. A machine vision system for detecting fertile eggs in the incubation industry[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2016, 9(5): 850–862.
- [58] 唐剑林,周玉兰.鸡胚早期雌雄鉴别[J].*贵州畜牧兽医*,2001,25(5):29.
- [59] 汤勇,洪琪,王巧华,等.基于血线纹理特征和GA-BP神经网络的鸡种蛋性别鉴定[J].*华中农业大学学报*,2018, 37(6):130–135.
TANG Yong, HONG Qi, WANG Qiaohua, et al. Sex identification of chicken eggs based on blood line texture features and GA-BP neural network[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018,37(6):130–135. (in Chinese)
- [60] 祝志慧,汤勇,洪琪,等.基于种蛋图像血线特征和深度置信网络的早期鸡胚雌雄识别[J].*农业工程学报*,2018,34(6): 197–203.
ZHU Zhihui, TANG Yong, HONG Qi, et al. Female and male identification of early chicken embryo based on blood line features of hatching egg image and deep belief networks[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018,34(6):197–203. (in Chinese)
- [61] 王家培,许厚强.利用蛋形指数对黔东南小香鸡种蛋进行性别鉴定初步研究[J].*贵州畜牧兽医*,2011,35(4):6–7.
WANG Jiawei, XU Houqiang. Pilot study on sex determination of Qian Dongnan small Xiang chicken[J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011,35(4):6–7. (in Chinese)
- [62] TONG Q, ROMANINI C E B, EXADAKTYLOS V, et al. Detection of embryo mortality and hatch using thermal differences among incubated chicken eggs[J]. *Livestock Science*, 2016, 183: 19–23.
- [63] ABDEL-NOUR N, NGADI M, PRASHER S, et al. Prediction of egg freshness and albumen quality using visible/near infrared spectroscopy[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4: 731–736.
- [64] BRANT A W, NORRIS K H, CHIN G. A spectrophotometric method for detecting blood in white-shell eggs[J]. *Poultry Science*, 1953, 32(2): 357–363.
- [65] KEMPS B J, BAMELIS F R, MERTENS K, et al. Assessment of embryonic growth in chicken eggs by means of visible transmission spectroscopy[J]. *Biotechnology Progress*, 2010, 26(2): 512–516.
- [66] KIMURA K, NAKANO K, OHASHI S, et al. LED measurement for development of a non-destructive detector of unsuitable chicken eggs in influenza vaccine production[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 134: 68–73.
- [67] LIN Q, FANG Q, FENG Y, et al. An optimization strategy for detection of fertile pigeon egg based on NIR spectroscopy

- analysis[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 132: 104733.
- [68] 张伏, 崔夏华, 张亚坤, 等. 多位置可见/近红外光谱检测与种鸡蛋受精信息的关系研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(10): 3064–3068.
ZHANG Fu, CUI Xiahua, ZHANG Yakun, et al. Relationship between visible/near infrared spectral data and fertilization information at different positions of hatching eggs[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(10): 3064–3068. (in Chinese)
- [69] NACE G W, ROMANOFF A L. The avian embryo: structural and functional development[J]. *AIBS Bulletin*, 1961, 11(2): 42–43.
- [70] GIELEN R M A M, DE JONG L P, KERKVLIT H M M. Electrooptical blood-spot detection in intact eggs[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1979, 28(3): 177–183.
- [71] BAMELIS F R, TONA K, DE BAERDEMAEKER J G, et al. Detection of early embryonic development in chicken eggs using visible light transmission[J]. *British Poultry Science*, 2002, 43(2): 204–212.
- [72] TRAN H T, FERRELL W, BUTT T R. An estrogen sensor for poultry sex sorting[J]. *Journal of Animal Science*, 2010, 88(4): 1358–1364.
- [73] STEINER G, PREUSSE G, ZIMMERER C, et al. Label free molecular sexing of monomorphic birds using infrared spectroscopic imaging[J]. *Talanta*, 2016, 150: 155–161.
- [74] STEINER G, BARTELS T, STELLING A, et al. Gender determination of fertilized unincubated chicken eggs by infrared spectroscopic imaging[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, 400: 2775–2782.
- [75] STEINER G, BARTELS T, KRAUTWALD-JUNGHANNS M E, et al. Sexing of turkey poult by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2010, 396: 465–470.
- [76] HARZ M, KRAUSE M, BARTELS T, et al. Minimal invasive gender determination of birds by means of UV-resonance Raman spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2008, 80(4): 1080–1086.
- [77] WEISSMANN A, REITEMEIER S, HAHN A, et al. Sexing domestic chicken before hatch: a new method for in ovo gender identification[J]. *Theriogenology*, 2013, 80(3): 199–205.
- [78] CLINTON M, HAINES L, BELLOIR B, et al. Sexing chick embryos: a rapid and simple protocol[J]. *British Poultry Science*, 2001, 42(1): 134–138.
- [79] GALLI R, PREUSSE G, UCKERMANN O, et al. In ovo sexing of domestic chicken eggs by Raman spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2016, 88(17): 8657–8663.
- [80] GALLI R, PREUSSE G, UCKERMANN O, et al. In ovo sexing of chicken eggs by fluorescence spectroscopy[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 409: 1185–1194.
- [81] 祝志慧, 洪琪, 吴林峰, 等. 基于紫外-可见透射光谱技术和极限学习机的早期鸡胚雌雄识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(9): 2780–2787.
ZHU Zhihui, HONG Qi, WU Linfeng, et al. Early identification of male and female embryos based on UV/Vis transmission spectroscopy and extreme learning machine[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(9): 2780–2787. (in Chinese)
- [82] RAHMAN A, SYDUZZAMAN M, KHALIDUZZAMAN A, et al. Nondestructive sex-specific monitoring of early embryonic development rate in white layer chicken eggs using visible light transmission[J]. *British Poultry Science*, 2020, 61(2): 209–216.
- [83] MEHDIZADEH S A, MINAEI S, HANCOCK N H, et al. An intelligent system for egg quality classification based on visible-infrared transmittance spectroscopy[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2014, 1(2): 105–114.
- [84] XIANG X, WANG Y, YU Z, et al. Non-destructive characterization of egg odor and fertilization status by SPME/GC–MS coupled with electronic nose[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(7): 3264–3275.
- [85] KHALIDUZZAMAN A, FUJITANI S, KONDO N, et al. Non-invasive characterization of chick embryo body and cardiac movements using near infrared light[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2019, 12(1): 32–39.
- [86] FUJITANI S, KONDO N, SYDUZZAMAN M, et al. Cardiac signal behavior of early and late hatch chick embryos during incubation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 188–196.
- [87] CHING C T S, WANG C K, TANG P C, et al. Bioimpedance-measurement-based non-invasive method for in ovo chicken egg sexing[J]. *Biosensors*, 2023, 13(4): 440–452.
- [88] ACOSTA M, RODRÍGUEZ-CARRETERO I, BLASCO J, et al. Non-destructive appraisal of macro-and micronutrients in persimmon leaves using VIS/NIR hyperspectral imaging[J]. *Agriculture*, 2023, 13(4): 916–928.
- [89] ADESOKAN M, ALAMU E O, OTEGBAYO B, et al. A review of the use of near-infrared hyperspectral imaging (NIR–HSI) techniques for the non-destructive quality assessment of root and tuber crops[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5226.
- [90] ALIMOHAMMADI F, RASEKH M, AFKARI SAYYAH A H, et al. Hyperspectral imaging coupled with multivariate analysis and artificial intelligence to the classification of maize kernels[J]. *International Agrophysics*, 2022, 36(2): 83–91.
- [91] JIN B, QI H, JIA L, et al. Determination of viability and vigor of naturally-aged rice seeds using hyperspectral imaging with machine learning[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 122: 104097.
- [92] KHALED A Y, EKRAMIRAD N, DONOHUE K D, et al. Non-destructive hyperspectral imaging and machine learning-based

- predictive models for physicochemical quality attributes of apples during storage as affected by codling moth infestation[J]. *Agriculture*, 2023, 13(5): 1086 – 1100.
- [93] K TENIOUDAKI A, ESQUERRE C A, NUNES C M D N, et al. A decision support tool for shelf-life determination of strawberries using hyperspectral imaging technology[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 221: 105 – 117.
- [94] SHARMA A, SINGH T, GARG N. Combining near-infrared hyperspectral imaging and ANN for varietal classification of wheat seeds [C] // 2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT). IEEE, 2022: 1103 – 1108.
- [95] SUN Z, PAN H, ZUO M, et al. Non-destructive assessment of equivalent umami concentrations in salmon using hyperspectral imaging technology combined with multivariate algorithms [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 285: 121890.
- [96] DONG K, GUAN Y, WANG Q, et al. Non-destructive prediction of yak meat freshness indicator by hyperspectral techniques in the oxidation process[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 17: 100541.
- [97] 宋科, 杨崇龙, 石永宏, 等. 基于可见-近红外高光谱技术对鸡种蛋性别鉴定的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(17): 5518 – 5525.
- SONG Ke, YANG Chonglong, SHI Yonghong, et al. Research on sex identification of chicken eggs based on visible-near infrared hyperspectral technology[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(17): 5518 – 5525. (in Chinese)
- [98] 潘磊庆, 张伟, 于敏莉, 等. 基于高光谱图像的鸡种蛋孵化早期胚胎性别鉴定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 181 – 186.
- PAN Leiqing, ZHANG Wei, YU Minli, et al. Gender determination of early chicken hatching eggs embryos by hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(1): 181 – 186. (in Chinese)
- [99] GAO Y, RAO X. Blackspot bruise in potatoes: susceptibility and biospeckle activity response analysis[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13: 444 – 453.
- [100] KUMARI S, NIRALA A K. Biospeckle technique for the non-destructive differentiation of bruised and fresh regions of an Indian apple using intensity-based algorithms[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(11): 115601.
- [101] PANDISELVAM R, MAYOOKHA V P, KOTHAKOTA A, et al. Biospeckle laser technique—a novel non-destructive approach for food quality and safety detection[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 1 – 13.
- [102] ANSARI M D Z, NIRALA A K. Biospeckle activity measurement of Indian fruits using the methods of cross-correlation and inertia moments[J]. *Optik*, 2013, 124(15): 2180 – 2186.
- [103] ANSARI M Z, MINZ P D, NIRALA A K. Fruit quality evaluation using biospeckle techniques [C] // 2012 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT). IEEE, 2012: 873 – 876.
- [104] VEGA-CASTELLOTE M, SÁNCHEZ M T, WOLD J P, et al. Near infrared light penetration in watermelon related to internal quality evaluation[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 204: 112477.
- [105] ANSAH F A, AMO-BOATENG M, SIABI E K, et al. Location of seed spoilage in mango fruit using X-ray imaging and convolutional neural networks[J]. *Scientific African*, 2023, 20: e01649.
- [106] HAFF R P, JACKSON E S, MOSCETTI R, et al. Detection of fruit-fly infestation in olives using X-ray imaging: algorithm development and prospects[J]. *American Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 4(1): 1 – 8.
- [107] MAHANTI N K, PANDISELVAM R, KOTHAKOTA A, et al. Emerging non-destructive imaging techniques for fruit damage detection: image processing and analysis[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 120: 418 – 438.
- [108] DONIS-GONZALEZ I R, GUYER D E, PEASE A, et al. Internal characterisation of fresh agricultural products using traditional and ultrafast electron beam X-ray computed tomography imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 117: 104 – 113.
- [109] CAI J, YUAN L, LIU B, et al. Nondestructive gender identification of silkworm cocoons using X-ray imaging with multivariate data analysis[J]. *Analytical Methods*, 2014, 6(18): 7224 – 7233.
- [110] AZADBAKHT M, VAHEDI TORSHIZI M, MAHMOODI M J. The use of CT scan imaging technique to determine pear bruise level due to external loads[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(1): 273 – 280.
- [111] DU Z, HU Y, ALI BUTTAR N, et al. X-ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: a review [J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(10): 3146 – 3160.
- [112] FENG X, ZHANG H, YU P. X-ray fluorescence application in food, feed, and agricultural science: a critical review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(14): 2340 – 2350.
- [113] MUZIRI T, THERON K I, CANTRE D, et al. Microstructure analysis and detection of mealiness in ‘Forelle’ pear (*Pyrus communis* L.) by means of X-ray computed tomography[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 120: 145 – 156.
- [114] BUSI M, KEHL C, FRISVAD J R, et al. Metal artifact reduction in spectral X-ray CT using spectral deep learning[J]. *Journal of Imaging*, 2022, 8(3): 77.
- [115] TEMPELAERE A, VAN DOORSELAER L, HE J, et al. Deep learning for apple fruit quality inspection using X-ray imaging [C] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2023: 552 – 560.
- [116] TEMPELAERE A, PHAN H M, VAN De LOOVERBOSCH T, et al. Non-destructive internal disorder segmentation in pear fruit by X-ray radiography and AI[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 212: 108142.
- [117] WANG J, LU Z, XIAO X, et al. Non-destructive determination of internal defects in chestnut (*Castanea mollissima*) during

- postharvest storage using X-ray computed tomography[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 196: 112185.
- [118] THOMAS S, THOMAS J. Non-destructive silkworm pupa gender classification with X-ray images using ensemble learning [J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2022, 6: 100 – 110.
- [119] OKA Y, YUKAWA H, KUDO H, et al. A comparative study of unpasteurized and pasteurized frozen whole hen eggs using size-exclusion chromatography and small-angle X-ray scattering[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 9218.
- [120] RAJIB A, SAIFULISLAM A T M, AHMED R, et al. Detection of chromium (Cr) using X-ray fluorescence technique and investigation of Cr propagation from poultry feeds to egg and chicken flesh[J]. *American Journal of Engineering Research*, 2016, 5(7): 243 – 247.
- [121] ELBRECHT A, SMITH R G. Aromatase enzyme activity and sex determination in chickens[J]. *Science*, 1992, 255(5043): 467 – 470.
- [122] KOBAYASHI N, MORI M, HA Y, et al. Effects of aromatase inhibitor (fadrozole)-induced sex-reversal on gonadal differentiation and mRNA expression of P450arom, AMH and ER α in embryos and growth in posthatching quail[J]. *The Journal of Poultry Science*, 2008, 45(2): 116 – 124.
- [123] 冯欣璐,姚守秀,米拉,等. Formestane 和 17- β estradiol 诱导鸡、鹌鹑胚胎性反转的研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(5): 569 – 571.
- FENG Xinlu, YAO Shouxiu, MI La, et al. A study of sex reversal of chicken embryo and quail embryo induced with Formestane and 17- β estradiol [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2010, 28(5): 569 – 571. (in Chinese)
- [124] BURKE W H, HENRY M H. Gonadal development and growth of chickens and turkeys hatched from eggs injected with an aromatase inhibitor[J]. *Poultry Science*, 1999, 78(7): 1019 – 1033.
- [125] 丛玮,王美青,张帆,等. 凤头鸭胚性反转建立及性别候选基因的表达[J]. *中国家禽*, 2019, 41(16): 10 – 17.
- CONG Wei, WANG Meiqing, ZHANG Fan, et al. Establishment of embryogenic inversion and expression of sex candidate genes in crested duck[J]. *China Poultry*, 2019, 41(16): 10 – 17. (in Chinese)
- [126] CATAPANO I, SOLDOVIERI F. THz imaging and data processing: state of the art and perspective[M]//PERICO R, PIRO S. *Innovation in near-surface geophysics*. Elsevier, 2019: 399 – 417.
- [127] WANG Y, ZHAO Z, QIN J, et al. Rapid in situ analysis of l-histidine and α -lactose in dietary supplements by fingerprint peaks using terahertz frequency-domain spectroscopy[J]. *Talanta*, 2020, 208: 120469.
- [128] ZHONG J, MORI T, KASHIWAGI T, et al. Characteristic terahertz absorption spectra of paramylon and paramylon-ester compounds[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 244: 118828.
- [129] AFSAH-HEJRI L, AKBARI E, TOUDESHPANAH A, et al. Terahertz spectroscopy and imaging: a review on agricultural applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 177: 105628.
- [130] REN A, ZAHID A, FAN D, et al. State-of-the-art in terahertz sensing for food and water security—a comprehensive review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 85: 241 – 251.
- [131] SHIN H J, CHOI S W, OK G. Qualitative identification of food materials by complex refractive index mapping in the terahertz range[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 282 – 288.
- [132] NGUYEN D T, PISSARD A, PIERNIA J A F, et al. A method for non-destructive determination of cocoa bean fermentation levels based on terahertz hyperspectral imaging[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2022, 365: 109537.
- [133] CRUZ J F O. Classification of chocolate according to its cocoa percentage by using Terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 43(7): 84 – 91.
- [134] GONG Z, DENG D, SUN X, et al. Non-destructive detection of moisture content for Ginkgo biloba fruit with terahertz spectrum and image: a preliminary study[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 120: 103997.
- [135] XIONG H, CAI J, ZHANG W, et al. Deep learning enhanced terahertz imaging of silkworm eggs development[J]. *Iscience*, 2021, 24(11): 103316.
- [136] XIONG H, CAI J, ZHANG W, et al. Silkworm egg development intelligent recognition by THz imaging[C]// 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW – THz). IEEE, 2021: 1 – 2.
- [137] KHALIDUZZAMAN A. Informatics in poultry production: a technical guidebook for egg and poultry education, research and industry[M]. Springer Nature, 2022.
- [138] KHALIDUZZAMAN A, KONAGAYA K, SUZUKI T, et al. A nondestructive eggshell thickness measurement technique using terahertz waves[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1052.
- [139] KHALIDUZZAMAN A, SHIRAGA K, KONDO N, et al. Estimation of refractive index of eggshell in intact egg using terahertz time-domain spectroscopy[C]//Fourth International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2020). SPIE, 2021, 11789: 95 – 100.
- [140] BUDIASTRA I W, JANNAH F R. Non destructive determination of soursop firmness and sweetness with ultrasonic method [J]. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 2022, 11(2): 253 – 265.
- [141] ZAREZADEH M R, ABOONAJMI M, GHASEMI-VARNAMKHAHASTI M. Applications of ultrasound techniques in tandem with non-destructive approaches for the quality evaluation of edible oils[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(8): 2940 – 2950.

- [142] SEBASTIAN J A, STROHM E M, BARANGER J, et al. Assessing engineered tissues and biomaterials using ultrasound imaging: in vitro and in vivo applications[J]. *Biomaterials*, 2023, 296: 122054.
- [143] VADIVAMBAL R, JAYAS D S. Thermal Imaging[M]//O'DONNELL C P, FAGAN C, CULLEN P J. Process analytical technology for food industry. Springer Science, New York, 2014: 183–198.
- [144] ZHU L, SUOMALAINEN J, LIU J, et al. A review: remote sensing sensors[M]//RUSTAM B R, SABINA H, MAHFUZA H Z. Multi-Purposeful Application of Geospatial Data. London: IntechOpen, 2018: 19–42.
- [145] JAYAS D S. Detection of *Callosobruchus maculatus* (F.) infestation in mung bean (*Vigna Radiata*) using thermal imaging technique[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2012, 57: 43–48.
- [146] HE Y, DENG B, WANG H, et al. Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: a review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103754.
- [147] DANNO A, MIYAZATO M, ISHIGURO E. Quality evaluation of agricultural products by infrared imaging method: II. Discrimination of fertilized and unfertilized eggs during the incubation period[J]. *Memoirs of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University*, 1979, 15: 145–158.
- [148] CHEN Q, LIU A, ZHAO J, et al. Classification of tea category using a portable electronic nose based on an odor imaging sensor array[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2013, 84: 77–83.
- [149] KANG W, LIN H, JIANG H, et al. Advanced applications of chemo-responsive dyes based odor imaging technology for fast sensing food quality and safety: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(5): 5145–5172.
- [150] NARSAIAH K, BISWAS A K, MANDAL P K. Nondestructive methods for carcass and meat quality evaluation[M]//BISWAS A K, MANDAL P K. Meat quality analysis. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2020: 37–49.
- [151] CHEN Q, ZHANG C, ZHAO J, et al. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2013, 52: 261–274.
- [152] SANCHEZ P D C, HASHIM N, SHAMSUDIN R, et al. Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 96: 208–221.
- [153] SANCHEZ P D C, AROGANCIA H B T, BOYLES K M, et al. Emerging nondestructive techniques for the quality and safety evaluation of pork and beef: recent advances, challenges, and future perspectives[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(2): 100147.
- [154] CHEN L, WANG Z, FU X, et al. Dynamic 3D morphology of chick embryos and allantois depicted nondestructively by 3.0 T clinical magnetic resonance imaging[J]. *Poultry Science*, 2023, 102(9): 102902.
- [155] IRAVANI S, SOUFI G J. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy: food, biomedical and pharmaceutical analysis[J]. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*, 2020, 9(3–4): 165–182.
- [156] ROESSLER M M, SALVADORI E. Principles and applications of EPR spectroscopy in the chemical sciences[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(8): 2534–2553.
- [157] MANNA S K, GANGOPADHYAY A, MAITI K, et al. Recent developments in fluorometric and colorimetric chemodosimeters targeted towards hydrazine sensing: present success and future possibilities[J]. *Chemistry Select*, 2019, 4(24): 7219–7245.
- [158] LI Z, ASKIM J R, SUSLICK K S. The optoelectronic nose: colorimetric and fluorometric sensor arrays[J]. *Chemical Reviews*, 2018, 119(1): 231–292.
- [159] SUN J, LU Y, HE L, et al. Colorimetric sensor array based on gold nanoparticles: design principles and recent advances [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 122: 115754.
- [160] KUSWANDI B, RESTYANA A, ABDULLAH A, et al. A novel colorimetric food package label for fish spoilage based on polyaniline film[J]. *Food Control*, 2012, 25(1): 184–189.
- [161] GUO Y, WEI X, GAO S, et al. Recent advances in carbon material-based multifunctional sensors and their applications in electronic skin systems[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(40): 2104288.
- [162] SHARIFNEZHAD A H, DASHTIAN K, AMOURIZI F, et al. Development of peptide impregnated V/Fe bimetal Prussian blue analogue as robust nanozyme for colorimetric fish freshness assessment [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023, 1237: 340555.
- [163] SHARIFNEZHAD A H, DASHTIAN K, ZARE-DORABEI R, et al. Visible light-responsive vanadium-based metal-organic framework supported pepsin with high oxidase mimic activity for food spoilage monitoring[J]. *Microchimica Acta*, 2022, 189(12): 448.
- [164] TALEBI M, DASHTIAN K, ZARE-DORABEI R, et al. Ruthenium-encapsulated porphyrinic organic polymer as a photoresponsive oxidoreductase mimetic nanozyme for colorimetric sensing[J]. *Langmuir*, 2023, 39(21): 7444–7455.
- [165] TALEBI M, DASHTIAN K, ZARE-DORABEI R, et al. Photo-responsive oxidase-like nanozyme based on a vanadium-docked porphyrinic covalent organic framework for colorimetric L-Arginine sensing [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023, 1247: 340924.

- [166] JIANG H, LIU T, HE P, et al. Quantitative analysis of fatty acid value during rice storage based on olfactory visualization sensor technology[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 309: 127816.
- [167] JIANG H, XU W, CHEN Q. Determination of tea polyphenols in green tea by homemade color sensitive sensor combined with multivariate analysis[J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 126584.
- [168] LI Z, PAUL R, BA TIS T, et al. Non-invasive plant disease diagnostics enabled by smartphone-based fingerprinting of leaf volatiles[J]. *Nature Plants*, 2019, 5(8): 856 – 866.
- [169] SHRIVAS K, KANT T, PATEL S, et al. Inkjet-printed paper-based colorimetric sensor coupled with smartphone for determination of mercury (Hg^{2+}) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125440.
- [170] LI Z, SUSLICK K S. The optoelectronic nose[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2020, 54(4): 950 – 960.
- [171] RAKOW N A, SUSLICK K S. A colorimetric sensor array for odour visualization[J]. *Nature*, 2000, 406(6797): 710 – 713.
- [172] LIM S H, FENG L, KEMLING J W, et al. An optoelectronic nose for the detection of toxic gases[J]. *Nature Chemistry*, 2009, 1(7): 562 – 567.
- [173] LIM S H, KEMLING J W, FENG L, et al. A colorimetric sensor array of porous pigments[J]. *Analyst*, 2009, 134(12): 2453 – 2457.
- [174] PEREIRA P F M, DE SOUSA PICCIANI P H, CALADO V, et al. Electrical gas sensors for meat freshness assessment and quality monitoring: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 36 – 44.
- [175] XU W, HE Y, LI J, et al. Non-destructive determination of beef freshness based on colorimetric sensor array and multivariate analysis[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 369: 132282.
- [176] HASHEMIAN H, GHAEDI M, DASHTIAN K, et al. Cellulose acetate/MOF film-based colorimetric ammonia sensor for non-destructive remote monitoring of meat product spoilage[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 249: 126065.
- [177] WEBSTER B, HAYES W, PIKE T W. Avian egg odour encodes information on embryo sex, fertility and development[J]. *PLoS One*, 2015, 10(1): e0116345.
- [178] LECLAIRE S, BOURRET V, BONADONNA F. Blue petrels recognize the odor of their egg[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2017, 220(17): 3022 – 3025.
- [179] TURASAN H, KOKINI J. Novel nondestructive biosensors for the food industry[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2021, 12: 539 – 566.
- [180] MALVANO F, PILLOTON R, ALBANESE D. Label-free impedimetric biosensors for the control of food safety-a review[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2020, 100(4): 468 – 491.
- [181] SUNI I I. Impedance methods for electrochemical sensors using nanomaterials[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2008, 27(7): 604 – 611.
- [182] BANERJEE A, TAI Y, MYUNG N V, et al. Non-destructive characterization of bone mineral content by machine learning-assisted electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 961108.
- [183] KASA T, SUN W, HATSUKADE Y, et al. Eddy current testing based non-destructive inspection for metal 3D additive manufacturing objects with hts-squid[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2023, 33(5): 1 – 4.
- [184] AHMED A, KUMARI V, SHEORAN G. Non-destructive dielectric measurement and mapping using microwave holography [C]//2022 2nd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON). *IEEE*, 2022: 1 – 4.
- [185] TAN S Y, AKBAR M F, SHRIFAN N H M M, et al. Assessment of defects under insulation using k-medoids clustering algorithm-based microwave nondestructive testing[J]. *Coatings*, 2022, 12(10): 1440.
- [186] XIE J Y, TAN J. Front-face synchronous fluorescence spectroscopy: a rapid and non-destructive authentication method for Arabica coffee adulterated with maize and soybean flours[J]. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 2022, 17(3): 209 – 219.
- [187] WANG B, SHEN F, HE X, et al. Simultaneous detection of Aspergillus moulds and aflatoxin B1 contamination in rice by laser induced fluorescence spectroscopy[J]. *Food Control*, 2023, 145: 109485.
- [188] FILIPPIDIS G, TSEREVELAKIS G J, MARI M, et al. Emerging photonic technologies for cultural heritage studies: the examples of non-linear optical microscopy and photoacoustic imaging[J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(11): 982.