

祝志慧, 叶子凡, 杨凯, 等. 种蛋孵化信息的无损检测研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(4): 94-101.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.04.012

种蛋孵化信息的无损检测研究进展

祝志慧, 叶子凡, 杨凯, 华俊杰, 何昱廷

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 种蛋孵化信息检测对于提升孵化品质、合理利用种蛋资源、提高孵化效益具有重要意义。目前我国种蛋孵化信息检测技术应用落后、劳动强度大、自动化程度较低、禽蛋资源浪费严重, 迫切需要加强种蛋孵化信息无损检测技术研究创新, 确保孵化质量, 实现公母分养, 保护动物福利, 提高企业经济效益, 促进蛋鸡养殖产业健康发展。本文着重从家鸡种蛋的孵前受精检测、孵化期成活性检测及孵化期性别检测三个方面, 总结了近十多年来国内外种蛋孵化信息检测领域的新兴技术和研究进展, 指出了有待解决的问题和发展前景, 以期种蛋孵化信息无损检测提供综合性参考。

关键词 种蛋孵化; 孵化率; 无损检测; 受精检测; 成活性检测; 性别鉴定; 禽蛋生产; 家禽繁育

中图分类号 TS 253.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)04-0094-08

我国是鸡蛋生产与消费大国, 近几十年来随着我国农业自动化进程加速, 鸡蛋生产也从散户的小作坊生产模式逐渐转型为孵化工厂的车间流水化作业模式。据国家统计局相关报表统计, 2020年全国禽蛋产量达3 467.76万t^[1]。种蛋胚胎发育率为86%~95%^[2], 这意味着每年都有大量的种蛋不能孵化。无精蛋和死胚蛋混杂在活胚蛋中会对孵化率产生不利影响。如果在孵化早期检测并清除不能孵化的种蛋, 能够节省资源, 提高孵化质量及避免滋生细菌造成交叉感染。另外, 家禽繁育中雏禽的性别与经济效益密切相关, 鸡种蛋在孵化过程中, 雄性和雌性胚胎比例约为1:1, 大部分刚孵出的雄雏会被搅碎用于生产饲料, 这不仅增加了人工成本, 而且还造成了禽蛋资源高质低用及违反动物福利等问题^[3]。因此, 有必要在孵化期早期乃至孵化之前检测出鸡蛋内部的孵化信息, 包括受精检测、成活性检测、雌雄鉴别, 这不仅有利于孵化工厂有计划地进行孵化生产配置, 而且对于合理利用种蛋资源、提高我国禽蛋产业经济效益具有重大意义。

鸡蛋的孵化过程需要21 d, 分为早期(第1至7天)、中期(第8至14天)和后期(第15至21天)。目前国内的孵化工厂一般在孵化后期使用照蛋器人工识别受精蛋、无精蛋和死胚蛋, 这种检测方法效率

低、劳动强度大、成本高。而鸡蛋孵化期的雌雄性别鉴定尚为空白状态。自20世纪末起, 美国率先开始采用机器视觉检测技术进行蛋品的孵化信息检测和分级^[4]。近10多年来, 随着人工智能技术的快速发展, 国内外研究人员陆续提出了一系列基于生产实际的种蛋孵化信息无损检测方法, 主要包括光电检测方法、机器视觉法、光谱法等, 进一步推动了种蛋孵化信息检测技术向高精度和智能化方向发展。本文对国内外近十多年来的鸡种蛋孵化信息检测研究情况进行综述, 按照鸡种蛋孵化时间和检测目标将检测任务归为三类, 即孵前受精无损检测、孵化期成活性检测和孵化期性别检测。

1 孵前受精无损检测

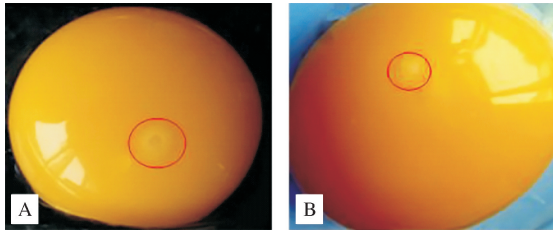
鸡种蛋受精后的卵子形成合子, 最后形成受精蛋, 未受精的次级卵母细胞则形成无精蛋^[5]。孵化前, 解剖受精蛋与未受精蛋后观察发现, 受精蛋的胚盘附着在卵黄上(图1)。图1A中受精蛋的红圈标记区域中的白色圆盘是受精蛋的胚盘, 呈同心圆状, 颜色浓、面积略大; 图1B中无精蛋的红圈标记区域中的白色小点是无精蛋的胚珠, 颜色相对较浅、面积略小, 为一个形状不规则的小白点。一般情况下, 受精蛋的胚盘大小是无精蛋胚珠的1.5~2倍^[6]。由

收稿日期: 2021-04-28

基金项目: 国家蛋鸡产业技术体系(CARS-40-K24)

祝志慧, E-mail: zzh@mail.hzau.edu.cn

于孵前种蛋发育程度较低以及蛋壳和鸡蛋内容物的阻挡,照蛋检测无法对受精蛋和无精蛋进行有效区分。近年来,随着检测技术的进步和人们对孵前检测关注的增加,有不少学者对种蛋孵前受精信息开展了无损检测研究。



A.受精蛋 Fertile egg; B.无精蛋 Infertile egg.

图1 孵化前受精蛋和无精蛋解剖对比图

Fig.1 Anatomical comparison between fertilized egg and infertile egg prior to incubation

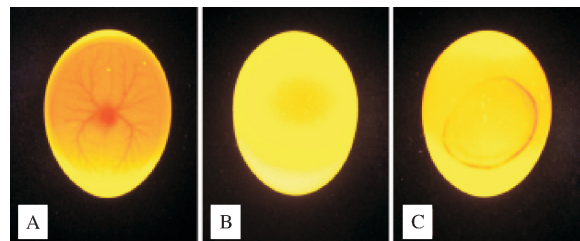
研究表明,受精蛋和无精蛋在外形特征上存在一定差异,一般来说,无精蛋外形短而粗,偏圆,受精蛋外形则细长^[7-8]。另一方面,黄鑫^[9]及樊银珍等^[10]提出受精蛋和无精蛋的气孔数及超微结构存在显著差异,可以利用透射光和反射光将这种差异反映在光谱图上。因而,现有鸡种蛋孵前无损检测方法研究主要围绕着种蛋的外形特征和光谱特征两方面展开。

祝志慧等^[11]基于近红外漫反射技术对孵前种蛋进行无损检测,通过对谱区范围进行筛选,比较不同预处理方法和主成分因子数的判别精度,最后获得基于马氏距离法的最佳判别模型,对孵前种蛋识别正确率达到91.67%。2015年,祝志慧等^[5]从种蛋孵前透射高光谱图像中提取图像外形特征(长短轴之比、伸长度、圆度、蛋黄面积与整蛋面积之比),并融合高光谱信息进行建模,通过对比发现,基于图像-光谱融合信息的相关向量机模型的分类精度表现最好(93%),检测时间最短。该研究为孵前无损检测受精蛋和无精蛋提供了一种可行的方案。李庆旭等^[12]提出了基于可见/近红外光谱和卷积神经网络模型的鸭蛋孵前受精检测方法,测试集精度为97.41%。深度学习是近年来的热门研究领域之一,它对部分经典机器学习模型无法解决的问题往往也能较好地解决。鉴于鸭蛋与鸡蛋具有类似的生理结构和发育特性,该研究给鸡蛋孵前受精检测提供了一种有益的思路。由于受精蛋和无精蛋在上孵前区别尚不明显,目前该阶段种蛋受精信息检测的研究成果仍以光谱技术为主,其他无损检测技术如机器

视觉、光电检测法的应用未见报道。

2 孵化期成活性检测

孵化期成活性的无损检测主要包括两部分,即孵化早期受精蛋和无精蛋检测,以及孵化期活胚蛋和死胚蛋检测。孵化开始后,受精蛋内部活性物质的新陈代谢加速并发生一系列生理变化,而无精蛋内部则相对较稳定,它们主要在两方面存在明显的差异,其一,受精蛋内部在孵化期第2天开始出现血液^[13],血液中的红细胞在卵黄囊处形成“血岛”,“血岛”经过发育形成最初的血管^[14](图2A);其二,受精蛋发育过程中,离子泵变得活跃并将钠离子从蛋清运输到卵囊内^[15],此时蛋白中的水分随之流动积累到卵黄囊,从而使得蛋白变黏稠、壳膜变干燥^[16-18]。从鸡蛋中血管的形成和种蛋内部生理结构变化两方面,能够检测到孵化早期种蛋的受精信息。另一方面,受精蛋中包含一部分弱精蛋,随着孵化时间延长会逐渐转化为死胚蛋。在照蛋检测中,无精蛋透光性较强且没有血线(图2B),死胚蛋则会形成血环(图2C),同时由于血管退化,蛋黄颜色会变成乳黄色^[19-20]。综上,对孵化期成活性的检测主要基于光学方法,包括但不限于光电检测法、机器视觉法、光谱方法等。



A.活胚蛋 Fertile egg; B.无精蛋 Infertile egg; C.死胚蛋 Dead egg.

图2 孵化期第4天照蛋示意图

Fig.2 Schematic diagram of egg candling on day 4 of incubation

鸡蛋内部结构发生变化时,最直观的表现之一就是内容物含量发生改变,因此可以采用感光元件(如光敏电阻等)与光源配合,根据透光量变化的差异对受精蛋、无精蛋和死胚蛋进行鉴别。朱垓^[21]研发出一种基于发光二极管(light-emitting diode, LED)和光敏元器件的检测装置与方法。研究人员采用相对吸收率指标反映鸡蛋的透光性,对LED的光色和光强进行优化,结果显示在种蛋孵化期第6天,暖白光LED的检测效果最好,该方法对“梅岭”品种粉壳蛋的无精蛋与死胚蛋的识别率达到

100%。张颖萍等^[22]提出的一种针对粉壳和绿壳蛋的成活性检测装置,在孵化期第5到第7天期间可以判断种蛋能否孵化,准确率达到93.3%~94.2%。光电检测法借助种蛋透射光量反映内部孵化信息,检测装置结构简单、成本低廉,是一种有效的无损检测技术。

可见/近红外光可以穿透种蛋,其透射光谱包含大量有用信息,相较于光电检测法,光谱方法往往具有更高的检测精度。张伟等^[23]基于高光谱透射图像,针对400~1 000 nm波段检测种蛋是否发育,在孵化期第1、2、3天的判别准确率分别达到78.8%、90.3%、98.6%。秦五昌等^[24]采集可见/近红外透射光谱并建立基于Fisher算法的无精蛋判别模型,该模型在孵化24 h时识别准确率达到87.18%,孵化120 h时识别准确率则达到了96.58%。由于能够在种蛋仍保持较好新鲜度(孵化24 h)时就可以及时检测出无精蛋,因此该方法具有一定商业推广价值。

孵化工厂一般采取机电一体化的流水线生产模式,这对种蛋检测精度和速度都提出了更高的要求。机器视觉方法通常直接获取、分析种蛋在光照下的机器视觉图像,通过机器学习方法建模,从而实现单个种蛋乃至群蛋的孵化信息检测。国外,Hashemzadeh等^[25]提出一种自动照蛋装置,在接收到待测蛋的图像后自动完成灰度化、特征增强等一系列图像处理流程,单次可完成6枚鸡蛋的受精信息检测,判别准确率在孵化期第4和第5天分别达到97.73%和98.25%。Koodtalang等^[26]训练的卷积神经网络将种蛋孵化期第7天的识别准确率提升到100%,能够实现单次48枚鸡蛋的受精信息检测。国内方面,吴林峰等^[27]研发的针对群蛋的孵化信息在线检测装置,在孵化期第7天对褐壳种蛋的受精信息判别率达到96.7%,可以满足孵化工厂一次性检测6行7列共42枚蛋的需求。颜廷玉^[28]针对孵化期第5天和第9天鸡种蛋设计了2种成活性检测模型,分别是双通道卷积神经网络(TB-CNN)以及结合联合监督与通道加权的卷积神经网络(SJ-CNN),试验结果表明这2种模型泛化能力较强,准确率均达到98%以上。李庆旭等^[29]基于Alexnet神经网络改进,搭建了种鸭蛋受精信息识别网络,对孵化3 d的种鸭蛋判别精度高达98.87%,平均每枚蛋检测耗时0.24 s。与传统机器视觉方法不同,深度学习将图像特征选取环节融入了训练过程,避免

了图像特征不明显、提取难度较大的问题,同时能更好地抵抗噪声。近年来,机器视觉技术与物联网、大数据以及深度学习结合,在种蛋检测方面展现出较高的准确率和稳定性,迎合了未来孵化工厂高通量、智能化的生产趋势。

作为一种应用广泛的无损检测技术,热成像技术在孵化期成活性检测领域也得到了应用。研究表明,受精蛋和无精蛋的表面温度存在差异,Danno等^[30]就曾指出,孵化期内受精蛋表面温度比无精蛋高0.3~1.3℃。2013年,Lin等^[31]提取孵化14 d种蛋的热成像信息,运用灰度共生矩阵计算种蛋特征值并建立种蛋成活性检测模型,该检测系统在2~3 s内可一次性完成36枚蛋的识别,准确率达到96%。在此基础上,国内相关研究成果将检测时间进一步提前。蔡健荣等^[32]将孵化4 d的种蛋从38.5℃的孵化箱转移到22℃恒温箱进行自然冷却,并基于热成像技术采集群蛋的时间序列图像。研究发现无精蛋热图像灰度值小于等于150的区域面积明显大于受精蛋,因此将该部分面积与整个感兴趣区域面积之比作为种蛋活性判别特征建模,模型在5 min内即可实现成活性判别,总体判别率达到90.7%。

此外,有研究人员通过理化方法检测种蛋的心跳信号和气味,也可以达到无损检测胚胎成活性的目的。动物体的心跳会引起微动脉内血液容积变化,造成动脉血液对光的吸收量发生变化。胡玉舟^[33]基于光电容积描记技术,采集第9天的鸡胚脉搏信号,建立基于卷积神经网络和深度神经网络成活性检测模型,准确率分别达到99.5%和99.6%。向小乐^[3]借助GC-MS和电子鼻等技术检测孵化早期种蛋的气味,发现不同受精状态鸡蛋的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)组成存在差异,建立了基于典型判别分析的受精蛋检测模,正确率达到100%。气味检测技术除了具备无损检测的优点,所获得的检测结果还为其机制研究提供了质谱定性信息,这有利于该方法的后续研究。然而本研究存在样本种类单一、数量较少等缺点,因而普适性尚待提高。

相较于孵前成活性检测,孵化期的成活性检测往往能够获得更高的准确率,且在一定时间范围内随孵化日龄增加,检测效果会越来越好,这是由种蛋自身发育特点决定的。光电检测法、可见/近红外光谱法、机器视觉法、热成像法等无损检测技术在该领

域均有所应用,其中一部分检测方案准确率高、检测速度快,已成功应用到生产实际。值得关注的是,由于种蛋在孵化 24 h 以内时其品质还属于新鲜状态,在孵化 72 h 后的种鸡蛋品质变为不可食用级别^[24],因此越早检测出无精蛋和死胚蛋并分拣出来,就越有利于提高蛋品利用率、减少浪费。在保证检测准确率的前提下,将无精蛋和死胚蛋识别时间尽可能提前是未来孵化期成活性检测研究的一个趋势。

3 孵化期性别检测

鸡胚的性别主要是由基因决定,但激素对其也有一定的作用。在鸡胚发育过程中,性腺的发育受到基因调控的酶作用和激素的共同作用^[34]。实验室中对种蛋的雌雄检测一般采用 PCR 扩增方法及鸡胚尿囊液雌激素含量鉴定法等分子生物学技术,尽管这些检测技术具备较高的准确率,但都需要进行破壳采样,并不适用于孵化工厂生产模式。现阶段我国禽蛋产业在孵化期的雌雄鉴别领域尚存在技术空白,孵化场对性别检测普遍是在幼稚阶段使用翻肛法^[35]、羽速法^[36]和羽色法^[37]。翻肛法依赖于专业人员人工检测,耗时耗力,易造成幼稚的损伤;而羽速法和羽色法,依赖于品种改良中的专有品种,推广性差。近十多年来,为解决种蛋孵化期的无损性别检测难题,研究人员主要采用机器视觉、光谱技术、气味法等检测方法。

3.1 机器视觉检测种蛋的雌雄性别

机器视觉检测种蛋主要是针对外形识别和血线识别。首先,蛋形指数是受到较多关注的一个雌雄鉴别因素。王家培等^[38]研究发现,黔东南小香鸡蛋形指数与性别具有显著相关性。进一步,王茗祎等^[39]提出一种基于蛋形特征参数的鸡胚性别鉴定方法及装置,通过提取鸡蛋轮廓图像的长短轴、蛋形面积和小头端距离进行建模来判别种蛋性别,准确率达到 80.21%。然而,曹智等^[40]研究表明,玫瑰冠鸡种蛋的蛋形指数对受精率和孵化率均有显著性影响,和性别比例则并无明显关系。目前,研究人员对蛋形指数与种蛋性别是否存在相关性尚有争议,但鉴于部分检测方法在实践中对特定品种的性别检测具有可观的准确度,蛋形指数方法仍不失为一种值得参考的检测思路。

相较于外形识别方法,血线纹理特征是对种蛋内部血管等组织发育状况的具体表征。一般地,种

蛋在孵化期第 3 天开始出现血线,通过照蛋可观察到蛋胚中血线呈蛛网状分布。研究表明,血线的形状分布与性别有一定关系,唐剑林等^[41]提出,雄胚主血管明显,血管较粗,分布均匀;雌胚血管纤细,粗细均匀,分支较多,呈不规则状。基于种蛋孵化早期血线特征和机器学习手段,汤勇等^[42]采集孵化期第 4 天的种蛋机器视觉图像,从种蛋图像提取 11 维特征用于构建反向传播神经网络模型(BPNN)以检测种蛋性别,模型通过遗传算法优化,对雌雄种蛋的识别率达到 82.80%。同年,祝志慧等^[43]通过对血线特征进行强化、提取、建模,构建基于全信息特征的深度置信网络模型,将模型准确率提升至 83.33%。由于在图像处理过程中,提取特征中的噪声对模型存在一定干扰,降低了鸡胚性别鉴定的准确率,因而,如果能够在保留血线特征信息的同时运用更有效的去噪方法,将有机会进一步提高模型性能。

3.2 光谱技术检测种蛋的雌雄性别

近年来,光谱和高光谱方法在鸡胚性别鉴定领域有较多应用。其中,以国外学者 Steiner 等^[44-45]、Galli 等^[46-48]团队研究成果较为显著,提出了一系列检测精度高的侵入式检测手段。Steiner 等^[44]从种蛋胚盘细胞中提取 DNA,用红外光谱方法成功检测出未孵化种蛋性别;2014 年,他们改用显微探针技术进行 DNA 采样,进一步减小蛋壳的创口,降低了对孵化的影响^[45]。Galli 等^[46-48]采集胚蛋的拉曼及荧光光谱并基于雌雄光谱的差异建模,在孵育期 84 h 对种蛋性别鉴定准确率达到 90% 以上。然而,这些方法均需要对种蛋破壳采样,一定程度上会影响鸡胚发育。Göhler 等^[49]利用无损检测技术采集孵化中后期种蛋的可见/近红外波段的高光谱图像并进行主成分分析和线性判别,综合准确率在孵化第 14 天达到了 97%。该方法为避免宰杀雄雏提供了一种可行的解决方案,但检测时间集中在孵化后期。

目前也有一些国内学者提出针对孵化期种蛋性别的光谱无损检测技术。由于光照能够透过鸡蛋外壳被内部物质部分吸收,进而将孵化信息反映到光谱图中,当前基于无损检测的鸡胚性别检测研究多采用透射光谱。潘磊庆等^[50]利用高光谱采集孵化期第 10 天鸡蛋中间部位的图像,建立了基于人工神经网络的检测模型,精度达到 82.86%,但是该方法容易受到种蛋个体差异,如蛋壳厚度、蛋壳颜色,以及鸡蛋摆放方向等因素的干扰。祝志慧等^[51]在探究基于紫外-可见-近红外透射光谱进行鸡胚性别鉴

定的过程中,利用极限学习机建模,比较了鸡蛋横放和竖放2种放置方式,试验结果表明,竖向放置且孵化期第7天的模型识别效果最好,预测集准确率达到87.14%,单个样本平均判别时间达到0.08 ms。上述光谱方法均已具备一定的识别精度和速度,后续研究中,可通过增加样本数量和降低光谱噪声等方法来提高模型的通用性。

另外,光电检测方法也应用到鸡胚性别检测领域中。Alin等^[52]基于发育期间种蛋透光性的差异对孵化期第16至18天雌雄种蛋进行鉴别。他们通过硅光电二极管测定光透过鸡蛋的平均输出电压,进而反映该鸡蛋的透光性。结果表明,随着孵化期胚胎发育,种蛋透光量减少,雄性种蛋较雌性种蛋表现出更高的不透明度($P < 0.05$),线性判别模型识别率达到84%。该方法装置成本低廉,结构简单,容易复现,但模型在孵化后期才能达到相对较高的准确率,因此还需要对系统进行优化以尽可能使检测时间提前。

3.3 气味检测种蛋的雌雄性别

气味能代表或反映物质的某些本质属性^[3],在时空上具有唯一性。近年来,关于气味所蕴含或传递生化信息的研究报道日益增长^[53-55],已有部分文献关注到禽蛋气味所反映的生化信息,如受精、发育和父代交流等^[56-57]。

Webster等^[56]发现孵化期第1天雌雄鹌鹑蛋的气味存在显著差异($P < 0.05$),推测可能是母体对雌性和雄性胚胎资源分配不同造成的。在此基础上,向小乐^[3]发现对于同一品种鸡蛋,孵化早期雌雄种蛋挥发性有机物的组成也存在差异。进一步,利用SPME-GC-MS和PTR-MS 2种气味检测技术采集京粉1号鸡种蛋样本VOCs并基于多层感知器神经网络建模,结果显示,这2种检测技术对雌雄判别精度在预测集表现不佳,分别为59.5%和67.6%。该研究说明气味检测的思路是可行的,但由于受品种、饮食差异、样本数较少等因素影响,检测精度有待提升。后续研究可以扩大样本容量,结合深度神经网络对模型进行优化。

4 展 望

经过几十年的研究探索,种蛋孵化信息检测任务逐渐从偏重实验室应用的有损检测向面向生产实际的无损检测方向转变。同时,随着人工智能技术的发展,经典无损检测技术如机器视觉法、光谱方

法、光电检测法等检测速度不断上升,检测精度和可靠性不断提高,而检测对象也从单一样本向生产线上的群蛋过渡。目前,孵化期种蛋成活性检测技术已有部分在实际生产中得到应用,效果较好,但也存在一些问题,如受精信息检测的研究多集中在孵化早期,对孵化前的受精检测研究仍然较少;部分受精蛋无法发育为活胚蛋,关于预测受精蛋能否存活的研究较少;孵化期的性别鉴定仍停留在实验室探索阶段,由于检测精度和装置成本与工业生产要求尚有距离,短期内无法在孵化工厂大规模普及。此外,由于已进行的孵化信息检测研究采用的家鸡品种参差不齐,部分研究成果可能存在普适性不强、推广性较差的问题,一定程度阻碍了将新技术应用到孵化工厂的生产中。我们认为,从适用性、经济性及可靠性角度出发,今后的研究可以从以下几方面着手:一是从遗传育种方面考虑,通过某种遗传改良技术增加孵化期间鸡胚雌雄特征差异,比如突出鸡胚的羽色、胫色的差异,从而使无损检测手段能够更有效地进行特异性识别,达到在孵化期快速准确鉴别鸡胚雌雄的目的。二是从人工智能方面考虑,融合光学、气味、图像学等多传感器综合检测技术,利用物理、化学与生物学多学科交叉检测手段,探讨与构建基于多学科交叉综合检测技术,基于大数据背景下整合种蛋信息无损检测数据库,构建智能检测系统,以提高种蛋孵化期信息检测的可行性与准确性。

参考文献 References

- [1] 国家统计局. 国家数据[DB/OL].[2020-06-17]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E7%A6%BD%E8%9B%8B>. National Bureau of Statistics. National data [DB/OL].[2020-06-17]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E7%A6%BD%E8%9B%8B>.
- [2] USDA, NASS. Chickens and eggs[R]. Agric. Stat. Board, Poultry. [S.l.:s.n.], 2006:2-4.
- [3] 向小乐. 鸡雌雄种蛋气味、多组学基质差异及无损鉴别研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2019. XIANG X L. Nondestructive sexing of chicken eggs based on odor and matrix differences analyzed by multi-omicmulti-omics[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019(in Chinese with English abstract).
- [4] 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.
- [5] 祝志慧, 刘婷, 马美湖. 基于高光谱信息融合和相关向量机的种蛋无损检测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 285-292. ZHU Z H, LIU T, MA M H. Hatching eggs nondestructive detection

- based on hyperspectral-imaging information and RVM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 285-292 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘婷. 基于高光谱成像技术的鸡种蛋孵前受精信息无损检测研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. LIU T. Study on non-destructive detection of the fertile information for chicken eggs prior to the incubation based on hyperspectral image technology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [7] 马秀莲, 衣淑娟. 基于嵌入式系统与机器视觉的上孵前无精蛋识别系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 187-192. MA X L, YI S J. Unfertilized eggs verification system before hatching based on embedded system and machine vision[J]. Transactions of the CSAM, 2011, 42(5): 187-192 (in Chinese with English abstract).
- [8] 谷口良辅. 用于确定受精的鸡蛋的性别的方法和装置: CN100397077C [P]. 2003-10-22. TANIGUCHI Ryosuke. Method and apparatus for determining the sex of fertilized eggs: China, CN100397077C [P]. 2003-10-22 (in Chinese).
- [9] 黄鑫. 鸡蛋孵化信息的比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012. HUANG X. Comparative studies on chicken egg hatch information[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [10] 樊银珍, 俸艳萍, 徐双贵, 等. 受精蛋和无精蛋、死胚及正常发育胚的种蛋品质差异研究[J]. 中国家禽, 2008, 30(11): 15-19. FAN Y Z, FENG Y P, XU S G, et al. Quality difference on hatching eggs of fertile eggs, aspermatism eggs, dead embryos and normal development embryos of chicken[J]. China poultry, 2008, 30(11): 15-19 (in Chinese with English abstract).
- [11] 祝志慧, 王巧华, 王树才, 等. 基于近红外光谱的孵前种蛋检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(4): 962-965. ZHU Z H, WANG Q H, WANG S C, et al. The detection of hatching eggs prior to incubation by the near infrared spectrum[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2012, 32(4): 962-965 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李庆旭, 王巧华, 顾伟, 等. 基于卷积神经网络和光谱特征的孵前种鸭蛋受精信息无损检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3847-3853. LI Q X, WANG Q H, GU W, et al. Non-destructive testing of fertilization information of pre-incubation duck eggs based on convolutional neural network and spectral features[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2020, 40(12): 3847-3853 (in Chinese with English abstract).
- [13] ROMANOFF A L. The avian embryo[M]. New York: Macmillan, 1960: 1305.
- [14] 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 X R, PAN L Q, TU K, et al. Research progresses in non-destructive measurements on incubation quality of eggs[J]. Science and technology of food industry, 2010, 31(2): 342-344, 347 (in Chinese with English abstract).
- [15] BABIKER E M, BAGGOTT G K. The role of ion transport in the formation of sub-embryonic fluid by the embryo of the Japanese quail[J]. British poultry science, 1995, 36(3): 371-383.
- [16] GIESINK G H, VANLAACK R L M J, BARNIER U M H, et al. Does electrical stimulation effect the speed of ageing or ageing response[J]. Science aliment, 1994, 14: 409-422.
- [17] BARNIER V M H. Determinants and predictors of beef tenderness[D]. Utrecht: Utrecht University, 1995.
- [18] 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.
- [19] 顾敏清. 如何辨别无精蛋和早期死胚[J]. 中国家禽, 2011, 33(9): 52-53. GU M Q. How to distinguish infertile eggs and early dead embryos[J]. China poultry, 2011, 33(9): 52-53 (in Chinese).
- [20] 吴林峰. 基于机器视觉的群体种蛋孵化成活性网络在线检测[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. WU L F. Online network detection of fertility of group hatched eggs based on machine vision[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [21] 朱垓. 种蛋孵化期间无精蛋与死胚蛋的光电检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. ZHU G. Study on the photoelectric detection of infertile eggs and dead embryos during the incubation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张颖萍, 朱亥, 吴霞. 种蛋孵化性能的光学检测方法[J]. 农业工程, 2019, 9(9): 33-36. ZHANG Y P, ZHU H, WU X. Optical detection method for hatching ability of eggs[J]. Agricultural engineering, 2019, 9(9): 33-36 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张伟, 潘磊庆, 屠康. 利用高光谱透射图像检测鸡种蛋早期孵化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 149-155. ZHANG W, PAN L Q, TU K. Detecting early embryo development of chicken hatching eggs by hyperspectral transmittance imaging [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 149-155 (in Chinese with English abstract).
- [24] 秦五昌, 汤修映, 彭彦昆, 等. 基于可见/近红外透射光谱的孵化早期受精鸡蛋的判别[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1): 200-204. QIN W C, TANG X Y, PENG Y K, et al. Identification of fertilized chicken eggs based on visible/near-infrared spectrum during early stage of incubation[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2017, 37(1): 200-204 (in Chinese with English abstract).
- [25] 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.
- [26] KOODTALANG W, SANGSUWAN T, RERKRATN A. Non-destructive fertility detection of multiple chicken eggs using image processing and convolutional neural network [J/OL]. IOP conference series: materials science and engineering, 2020, 895(1): 012013 [2021-04-28]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/895/1/012013>.

- [27] 吴林峰,余怀鑫,祝志慧.基于机器视觉的孵化早期群体受精蛋鉴别[J].食品与机械,2019,35(4):152-156.WU L F, YU H X, ZHU Z H. Identification group of fertilized eggs and infertile eggs in early hatching stage based on machine vision[J]. Food & machinery, 2019, 35(4): 152-156 (in Chinese with English abstract).
- [28] 颜廷玉.基于深度学习的鸡蛋胚胎分类方法研究[D].天津:天津工业大学,2018.YAN T Y. Study on egg embryo classification based on deep learning[J]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李庆旭,王巧华,顾伟,等.基于深度学习的种鸭蛋孵化早期受精信息无损检测[J].农业机械学报,2020,51(1):188-194.LI Q X, WANG Q H, GU W, et al. Non-destructive testing of early fertilization information in duck egg laying based on deep learning[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(1): 188-194 (in Chinese with English abstract).
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 蔡健荣,刘海凌,孙力,等.基于热成像技术的种蛋活性判别[J].食品工业,2016,37(1):201-204. CAI J R, LIU H L, SUN L, et al. Discrimination of hatching eggs activity based on thermal imaging[J]. The food industry, 2016, 37(1): 201-204 (in Chinese with English abstract).
- [33] 胡玉舟.基于CNN与心跳信号的胚蛋成活性检测方法研究[D].天津:天津工业大学,2019.HU Y Z. Research on detection method of egg embryo activity based on CNN and heartbeat signal[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王亚兰.鸡雌雄胚蛋孵化期间甾体激素的变化及差异研究[D].武汉:华中农业大学,2019. WANG Y L. The change rule and sex difference of steroid hormones in male and female hatched hen eggs[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [35] 魏晓冉,王志强,姜国松.雏鸡雌雄翻肛鉴别技术要点[J].家禽科学,2016(7):30-32.WEI X R, WANG Z Q, JIANG G S. Key points of identification of male and female chicks using anal method[J]. Poultry science, 2016(7): 30-32 (in Chinese).
- [36] NAKAMURA A, NAGAO K, TSUNEKAWA T, et al. Accuracy of feather sexing in newly hatched Nagoya breed chicks[J]. Research bulletin of the aichi agricultural research center, 2010(42): 107-112.
- [37] 翟广华.鉴别雏鸡雌雄技法[J].养禽与禽病防治,2010(7):33. ZHAI G H. Technique for identifying male and female chicks [J]. Poultry husbandry and disease control, 2010(7): 33 (in Chinese).
- [38] 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 J P, XU H Q. 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 with English abstract).
- [39] 王茗祎,吴淋昌,曾亚光,等.一种基于蛋形特征参数的鸡蛋胚胎性别鉴定的方法及装置:CN110751178A[P].2020-02-04. WANG M Y, WU L C, ZENG Y G, et al. Egg embryo sex determination method and device based on egg shape characteristic parameters: CN110751178A[P]. 2020-02-04 (in Chinese).
- [40] 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. CAO Z, ZHANG Z D, JIA B. Study on the relationship between egg shape index and sex [J]. Shanghai journal of animal husbandry and veterinary medicine, 2018(5): 16-17 (in Chinese).
- [41] 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. TANG J L, ZHOU Y L. Identification of male and female in early stage of chicken embryo[J]. Guizhou animal science and veterinary medicine, 2001, 25(5): 29 (in Chinese).
- [42] 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 Y, HONG Q, WANG Q H, 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 with English abstract).
- [43] 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 Z H, TANG Y, HONG Q, 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 with English abstract).
- [44] 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(9): 2775-2782.
- [45] STEINER G, KOCH E, KRAUTWALD-JUNGHANNS M E, et al. Method and device for determining the sex of fertilized, non-incubated bird eggs; US8624190[P]. 2014-01-07.
- [46] 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.
- [47] GALLI R, PREUSSE G, UCKERMANN O, et al. In-ovo sexing of chicken eggs by fluorescence spectroscopy[J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2017, 409(5): 1185-1194.
- [48] GALLI R, PREUSSE G, SCHNABEL C, et al. Sexing of chicken eggs by fluorescence and Raman spectroscopy through the shell membrane[J/OL]. PLoS One, 2018, 13(2): e0192554 [2021-04-28]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192554>.
- [49] 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]. *Poult Sci*, 2017, 96(1):1-4.
- [50] 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 L Q,ZHANG W,YU L M, 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 with English abstract).
- [51] 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 Z H,HONG Q,WU L F, 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 with English abstract).
- [52] 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.
- [53] CUMERAS R,AKSENOV A A,PASAMONTES A, et al.Identification of fungal metabolites from inside *Gallus domesticus* eggshells by non-invasively detecting volatile organic compounds (VOCs)[J]. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2016,408:6649-6658.
- [54] LECLAIRE S,BOURRET V,BONADONNA F.Blue petrels recognize the odor of their egg[J]. *Journal of experimental biology*,2017,220(17):3022-3025.
- [55] MCGLASHAN J K,SPENCER R J,OLD J M.Embryonic communication in the nest:metabolic responses of reptilian embryos to developmental rates of siblings[J]. *Proceedings of the Royal Society B: biological sciences*, 2012, 279(1734): 1709-1715.
- [56] WEBSTER B,HAYES W,PIKE T W. Avian egg odour encodes information on embryo sex,fertility and development[J/OL]. *PLoS One*,2015,10:e0116345[2021-04-28].<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116345>.
- [57] COSTANZO A,PANSERI S,GIORGI A, et al.The odour of sex: sex-related differences in volatile compound composition among barn swallow eggs carrying embryos of either sex[J/OL].*PLoS One*,2016,11(11):e0165055[2021-04-28].<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165055>.

Progress of nondestructive detection of hatching information of breeding eggs

ZHU Zhihui, YE Zifan, YANG Kai, HUA Junjie, HE Yuting

College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The detection of hatching information of breeding eggs is of great significance for improving the quality of hatching, rational use of breeding egg resources, and improving efficiency of hatching. At present, application of the detection of hatching information of breeding egg is backward in China due to the high labor intensity, the low degree of automation, and the serious waste of poultry egg resources. It is urgent to strengthen the study and innovation of nondestructive detection technology of hatching information of breeding egg to ensure the quality of hatching, realize the breeding of male and female separately, protect animal welfare, improve the benefits of the enterprises, and promote the healthy development of the laying hen breeding industry. The emerging technologies and progress of detecting hatching information of breeding egg at home and abroad during the last decade were summarized mainly from three aspects including fertilization test before hatching, viability detection and sex identification during hatching of breeding eggs from domestic chicken. The problems to be solved and prospects of development are pointed out to provide a comprehensive reference for the nondestructive detection of hatching information of breeding eggs.

Keywords hatching of breeding eggs; hatchability; nondestructive detection; fertilization test; viability detection; sex identification; egg production; poultry breeding

(责任编辑:陆文昌)