王婷婷, 吴孟钊, 谢家喜, 等. 磁场辅助冰水浸泡对黑斑蛙肉清洗效果和品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 119−128. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060295

WANG Tingting, WU Mengzhao, XIE Jiaxi, et al. Effect of Magnetic Field-assisted Ice-water Immersion on the Cleaning Effect and Quality of *Pelophylax nigromaculatus* Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 119−128. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060295

·研究与探讨·

磁场辅助冰水浸泡对黑斑蛙肉清洗效果和品质特性的影响

王婷婷[1], 吴孟钊[1], 谢家喜[1], 游海韵[1], 王　琦[1,2,3,*], 王海滨[1,2,3,*], 彭利娟[1,2,3], 王柳清[1,2,3], 杨文明[4], 史建荣[4], 史　佩[4]

（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023;
2.农产品加工与转化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430023;
3.武汉轻工大学肉类加工与安全研究所, 湖北武汉 430023;
4.湖北晓韵食品有限公司, 湖北黄冈 438000）

摘　要: 本研究旨在探讨不同磁感应强度的静磁场辅助清洗对黑斑蛙肉清洗效果和品质的影响。通过设置冰水浸泡作为对照组，实验组用磁场辅助冰水浸泡来研究不同磁感应强度（10、20、30、40、50 mT）的静磁场对黑斑蛙肉的影响。然后针对水分含量、色度、pH、质构、离心损失率、脂肪含量、蛋白质含量、肌肉肌红蛋白含量、菌落总数、大肠菌群、水分分布等指标进行检测。结果表明，30 mT 磁场综合效果最优，在清洗效率上，随磁场增强血水清除率显著提升，其中 30 mT 组红度值较清洗前降低 40.9%，显著优于对照组（仅降低了 11.0%）及低强度组（MF10 降低了 36.0%）；但 50 mT 组去血水效率回落（a^*值降幅 36.8%）；在品质特性上，30 mT 组离心损失率为 10.85%，较对照组（17.18%）降低了 36.85%（$P<0.05$），且显著低于 50 mT 组（18.47%）；其质构特性最优（硬度 56.21 gf、弹性 0.63），分别为对照组的 1.22 倍和 1.28 倍；在微生物安全上，所有组均未完全杀灭大肠菌群；在感官评价上，30 mT 组总分最高（42.8 分），显著优于对照组（30.8 分）及 50 mT 组（35.0 分）。表明 30 mT 静磁场辅助清洗可同步解决传统冰水浸泡法去血水效率低、质地劣化及微生物控制弱三大缺陷，为黑斑蛙肉高效清洁与品质提升提供优化工艺。

关键词: 黑斑蛙肉, 磁场, 清洗效果, 品质
中图分类号: TS254.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0119−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060295
本文网刊:

Effect of Magnetic Field-assisted Ice-water Immersion on the Cleaning Effect and Quality of *Pelophylax nigromaculatus* Meat

WANG Tingting[1], WU Mengzhao[1], XIE Jiaxi[1], YOU Haiyun[1], WANG Qi[1,2,3,*], WANG Haibin[1,2,3,*], PENG Lijuan[1,2,3], WANG Liuqing[1,2,3], YANG Wenming[4], SHI Jianrong[4], SHI Pei[4]

（1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2.Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan 430023, China;
3.Institute of Meat Processing and Safety, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
4.Hubei Xiao Yun Food Co., Ltd., Huanggang 438000, China）

Abstract: This study aimed to investigate the effects of static magnetic fields (MF) with different magnetic flux densities on

收稿日期: 2025−06−23
基金项目: 湖北晓韵食品有限公司委托技术开发课题（101-08021026）。
作者简介: 王婷婷（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏工程, E-mail: 2573571200@qq.com。
*** 通信作者:** 王琦（1981−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: wq311zb@whpu.edu.cn。
王海滨（1964−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜禽与水产品加工及贮藏工程, E-mail: whb6412@163.com。

the cleaning efficacy and quality of *Pelophylax nigromaculatus* meat during assisted washing. Using ice-water immersion as the control group, experimental groups were treated with MF-assisted ice-water immersion at magnetic flux densities of 10, 20, 30, 40, and 50 mT. Parameters including moisture content, color values, pH, texture profile, centrifugal loss, fat content, protein content, muscle myoglobin content, total viable count (TVC), coliform bacteria, and water distribution were analyzed. Results indicated that the 30 mT MF treatment yielded optimal comprehensive effects. Regarding cleaning efficiency, blood removal efficiency significantly improved with increasing magnetic field intensity. The 30 mT group showed a 40.9% reduction in redness (a^* value) compared to pre-washing levels, significantly surpassing the control group (11.0% reduction) and low-intensity groups (e.g., 36.0% reduction for 10 mT). However, the 50 mT group exhibited reduced efficiency (36.8% a^* value reduction). For quality attributes, the 30 mT group demonstrated a centrifugal loss of 10.85%, representing a 36.85% reduction compared to the control group (17.18%, $P<0.05$), and was significantly lower than the 50 mT group (18.47%). Its textural properties were optimal (hardness: 56.21 gf, elasticity: 0.63), being 1.22-fold and 1.28-fold higher than the control, respectively. In microbial safety, no group completely eliminated coliforms. For sensory evaluation, the 30 mT group achieved the highest total score (42.8 points), significantly exceeding both the control (30.8 points) and 50 mT groups (35.0 points). These findings demonstrate that 30 mT MF-assisted washing simultaneously addresses three limitations of traditional ice-water immersion—low blood removal efficiency, texture deterioration, and weak microbial control—providing an optimized process for efficient cleaning and quality enhancement of *Pelophylax nigromaculatus* meat.

Key words: *Pelophylax nigromaculatus* meat; magnetic field; cleaning efficiency; quality

黑斑蛙(*Pelophylax nigromaculatus*)作为常见的食用两栖动物,因其肉质细嫩且富含蛋白质、氨基酸等多种营养成分,深受消费者喜爱[1]。由于蛙皮和蛙肉之间有一层皮下膜,导致黑斑蛙在加工成白条的处理过程中体内常残留有血水,这不仅影响了其外观和口感,还可能携带病原菌,影响食品安全。传统的冰水浸泡法虽然能在一定程度上去除血水,但存在耗时长、效率低的缺点。因此,如何高效地去除黑斑蛙的血水并维持蛙肉品质,成为一个重要的研究课题。

近年来,在食品加工领域研究的磁场类型主要分为静磁场、交变磁场与脉冲磁场。静磁场是一种恒定磁场,由直流电通过固定磁场强度的线圈或永磁体产生,其磁场强度和方向保持不变[2]。磁场因具有穿透性强、作用温和且绿色安全的特点而逐渐被应用于食品加工领域,磁场的生物学效应是磁场应用于食品加工的依据。生物磁效应包括两方面:一是细胞内源性铁磁性分子自身产生的磁场,二是细胞内带电粒子迁移形成生物电流所诱发的微弱磁场。生物细胞中的蛋白质、酶、核酸、水等生物分子之间依靠氢键及其他化学键结合在一起,其化学键内部电子运动使生物大分子成为磁偶极子,即形成微弱的电流闭合回路,当其暴露于外磁场时,分子被磁化并产生感生磁场。在外磁场和内磁场的共同作用下,生物细胞、组织器官及整个生物体的新陈代谢发生改变,进而产生不同的生物学效应[3]。刘承灏[4] 以猪肉为研究对象,探究不同磁场强度(0~12 mT)对猪肉冷冻过程中冻结参数的影响,发现磁场处理对猪肉成核温度有显著影响,其中 8.00 mT 磁场强度的作用显著。王文欣等[5] 发现在适当的磁场强度下辅助冷冻,可节省冻结时间,提高肌肉持水力,减少蛋白质含量的降低,从而改善牛肉品质,其中 8 mT 处理效果最佳。基于磁场对生物体的物理调控效应,本文提出假设:采用特定强度(1~50 mT)的磁场处理黑斑蛙肉,可通过降低水分子簇尺寸、增强细胞膜通透性,显著促进体内残留血水的渗出效率。其可能的作用机制主要包括:磁场破坏水分子间氢键网络,形成更小且流动性增强的水簇,加速血水中血红蛋白等溶质的迁移[6];静磁场抑制红细胞叠连现象,降低血液黏度,减少毛细血管阻塞,提升微循环排液效率[7];磁场激活钙离子通道并改变膜磷脂排列,增加细胞膜对水和小分子溶质的通透性[8];磁化水表面张力下降 5%~10%,增强清洗液在蛙体组织间隙的润湿与渗透能力[9]。该技术有望在提高清洗效果的同时提升蛙肉品质。

本研究的目的在于通过对比传统的冰水浸泡清洗工艺,探究不同磁感应强度的磁场辅助冰水浸泡对黑斑蛙肉清洗效果的影响,以期找到一种高效的清洗方法;同时,本研究还将评估不同磁感应强度辅助冰水浸泡工艺对黑斑蛙肉品质的影响,为实际生产提供理论依据和技术支持。通过本研究,不仅可以明确磁场辅助清洗工艺对黑斑蛙的食用品质和安全性的影响,还能为磁场在相关食品加工行业的应用提供新的思路和方法,具有重要的理论研究意义和应用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜活黑斑蛙(60 只,每只约 55±5 g) 湖北武汉东西湖区常青花园菜市场;好易得双筋密封袋 秦州海达塑胶包装有限公司;氢氧化钠、硼酸、盐酸、浓硫酸、乙醇、无水乙醚、氯化钠、石油醚(沸程 30~60 ℃) 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;结晶紫中性红胆盐琼脂、平板计数琼脂(PCA) 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司;QB1001 磷酸盐缓冲液(pH7.2~7.4) 山东齐都生物医药有限公司。

MFH50 磁场恒温恒湿箱(0~50 mT) 无锡英都斯特感应科技有限公司;FC5718R 冷冻离心机 奥

豪斯国际贸易（上海）有限公司；HGZF-101-2 恒温干燥箱　上海跃进医疗器械有限公司；A360 型紫外分光光度计　翱艺仪器（上海）有限公司；UV-5100 紫外-可见光分光光度计　上海元析仪器有限公司；K9840 自动凯氏定氮仪　海能未来技术集团股份有限公司；MS204TS 精密电子天平　梅特勒-托利多仪器有限公司；STARTER 3100 pH 计　奥豪斯仪器（上海）有限公司；XHF-DY 高速分散器　宁波新芝生物科技股份有限公司；JZ-300 通用色差计　深圳市金准仪器设备有限公司；TA-XT plus 质构分析仪　上海保圣实业发展有限公司；NMI20-040V-I 核磁共振成像分析仪　苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理　新鲜黑斑蛙购置于水产市场，经宰杀后去除头、皮及内脏，所得蛙肉立即装入含冰袋的泡沫箱中转运至实验室。将样品随机分为 6 组（每组 10 只），按蛙肉与冰水（冰∶水=1∶1）重量体积比 1∶5 置于聚乙烯（PE）密封袋中。对照组在实验室环境温度（25±0.5 ℃）、相对湿度（70%±5%）下进行 30 min 冰水浸泡处理；实验组则将密封袋放入 MFH50 型磁场恒温恒湿箱中，根据当日实验室环境参数设定相同温湿度条件，并分别施加 10、20、30、40、50 mT 磁感应强度的磁场辅助浸泡 30 min，各组依次标记为 MF10、MF20、MF30、MF40 及 MF50。

从上述处理后的每组黑斑蛙中，选取质量在（19±3 g）范围内的个体。操作时，用无菌剪刀于黑斑蛙大腿根部横向剪一刀，再于大腿与小腿连接处横向剪一刀，随后轻柔分离肌肉与骨骼，拔出中间的股骨，得到完整的黑斑蛙后腿肉，备用，取部分黑斑蛙后腿肉放入小型绞肉机，绞碎 1 min 后取出得到黑斑蛙后腿肉糜，备用。

1.2.2　色差测定　利用色差仪对样品色度进行定量分析，将色差计用标准版进行校正，对黑斑蛙后腿肉在清洗前后的 L^*、a^*、b^*值进行测定[10]。

1.2.3　离心损失率测定　离心损失率测定参考何涓源等[11] 的方法稍作修改，取 5 g 黑斑蛙后腿肉糜用双层滤纸包裹好放入 50 mL 离心管中，离心管使用前需在底部垫一层脱脂棉吸水。在 7155×g 条件下离心 10 min，计算公式如下：

$$离心损失率(\%)=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100$$

式中：m_1 为离心前黑斑蛙肉质量，g；m_2 为去除渗出液后黑斑蛙肉质量，g。

1.2.4　pH 测定　参考 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》的方法测定[12]。

1.2.5　质构特性分析　参考 Xu 等[13] 的方法并稍作修改。将黑斑蛙后腿肉平放在质构仪上。测试条件如下：P/36R 平底柱形探头；测前速率 2 mm/s；测试速率 5 mm/s；测后速率 5 mm/s；压缩程度 50%；两次压缩之间停留时间 5 s；触发类型自动；触发力 10 g。选择硬度、弹性、胶着性、咀嚼性、回复性为评价指标。

1.2.6　水分含量测定　取黑斑蛙后腿肉糜 2~5 g，采用 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行检测[14]。

1.2.7　脂肪含量测定　将黑斑蛙后腿肉糜置于 105±2 ℃ 的电热鼓风干燥箱中烘干。4 h 后取出，置于干燥器中冷却至室温后称重。再放入烘箱 1 h，冷却称重，直至 2 次称量差小于 0.002 g 即为恒重，再研磨成粉末，取 2~5 g 干样，按照 GB 5009.6-2025《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中索氏抽提法测定粗脂肪含量[15]。

1.2.8　蛋白质含量　取黑斑蛙后腿肉糜 2~5 g，按照 GB 5009.5-2025《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法测定样品中的蛋白质含量[16]。

1.2.9　肌肉肌红蛋白含量　三种形式的肌肉肌红蛋白（Mb）含量（脱氧肌红蛋白、氧合肌红蛋白和高铁肌红蛋白）按照 Liu 等[17] 的方法进行测定，并进行了一些修改。2 g 研磨肉用 20 mL 0.04 mol/ L 磷酸盐缓冲液（pH7.2）处理，4 ℃，7155×g 离心 20 min。上清液用滤纸滤清，然后在 525、545、565 和 572 nm 处测定吸光度。三种肌红蛋白的计算公式如下：

$$脱氧肌红蛋白(\%)=\left(0.361\times\frac{A_{572}}{A_{525}}+1.140\times\frac{A_{565}}{A_{525}}-0.941\times\frac{A_{545}}{A_{525}}+0.015\right)\times 100$$

$$氧合肌红蛋白(\%)=\left(0.882\times\frac{A_{572}}{A_{525}}-1.267\times\frac{A_{565}}{A_{525}}+0.809\times\frac{A_{545}}{A_{525}}-0.361\right)\times 100$$

$$高铁肌红蛋白(\%)=\left(-2.541\times\frac{A_{572}}{A_{525}}+0.777\times\frac{A_{565}}{A_{525}}+0.8\times\frac{A_{545}}{A_{525}}+1.098\right)\times 100$$

1.2.10　菌落总数测定　用无菌天平称取 25 g 黑斑蛙后腿肉糜，参照 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验菌落总数测定》对黑斑蛙肉样品中的菌落总数进行测定[18]。

1.2.11　大肠菌群测定　用无菌天平称取 25 g 黑斑蛙后腿肉糜，参照 GB 4789.3-2025《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》对黑斑蛙肉样品中的大肠菌群进行测定[19]。

1.2.12　水分分布测定　黑斑蛙肉清洗后内部水分动态分布参考钱韻芳等[20] 的方法进行测定。将黑斑蛙后腿肉用滤纸擦干表面水分后置于干燥的核磁共振专用试管内，将试管放置于磁场内射频线圈的中心位置，用 CPMG 脉冲序列扫描对黑斑蛙后腿肉的自旋

横向弛豫时间进行测定，核磁共振参数设为：τ 值为 800 μs，质子共振频率为 20 MHz，测量温度保持在 32 ℃，采样频率为 200 kHz，累积自动扫描次数为 8。

1.2.13 感官评价 每组处理后的黑斑蛙后腿肉随机取 10 份，置于蒸锅中，水温达到 100 ℃ 后保持 3 min，将蛙肉取出编号，保持在 35 ℃ 条件下待用。选取 10 名左右的食品专业学生对样品进行感官评分，评分标准见表 1[21]。

表 1 蒸制黑蛙肉的感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of steamed *Pelophylax nigromaculatus* meat

评分指标	评分标准	分值(分)
气味(10分)	几乎没有腥味	8~10
	腥味淡	5~7
	腥味重	1~4
口感(10分)	肉质滑嫩多汁	8~10
	肉质较嫩	5~7
	肉质较干	1~4
色泽(10分)	颜色偏亮，较白	8~10
	颜色偏亮，较红	5~7
	颜色偏暗，很红	1~4
滋味(10分)	滋味鲜美，有蛙类特有的风味	8~10
	滋味一般，蛙类特有的风味较弱	5~7
	滋味较差，蛙类特有的风味弱	1~4
整体可接受度(10分)	非常喜欢	8~10
	较喜欢	5~7
	不可接受	1~4

1.3 数据处理

所有实验进行三次重复，结果以平均值±标准差表示，采用 SPSS 23.0 对数据进行处理分析，通过单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验组间差异，并进一步采用邓肯(Duncan)多重比较法进行事后检验，以明确各组均值在显著性水平 α=0.05 下的具体差异范围。使用 Origin 2017 作图。

2 结果与分析

2.1 辅助清洗方式对黑斑蛙肉色差的影响

色差是评估黑斑蛙肉外观品质的重要指标，肉制品的颜色直接决定了消费者的购买欲，诱人的色泽可以提高消费者的接受度[22]，清洗后的黑斑蛙白条肉颜色偏亮、偏白较好。从表 2 可见，在 L^*值变化方面，经磁场辅助冰水浸泡处理后样品亮度值均有所提升，而冰水浸泡组出现显著下降现象(P<0.05)。磁场处理组中，MF50 处理效果最为显著，L^*值提升至 57.1±3.40，较清洗前增加 7.13%，但各磁场强度组间差异未达显著水平(P>0.05)。磁场辅助清洗后的黑斑蛙 a^*值均小于冰水浸泡组，表明磁场处理对肉样红度值的调控作用显著优于冰水浸泡。其中 MF30 和 MF50 处理组 a^*值分别降至 3.9±0.81 和 4.3±0.35，较清洗前降低 40.9% 和 36.8%，30 mT 组红度值显著优于对照组(仅降低了 11.0%)及低强度组(MF10 降低了 36.0%)。值得注意的是，当磁场强度超过 30 mT 时，a^*值降低幅度趋于稳定，说明存在最佳磁场强度阈值。b^*值变化在各处理组间未呈现显著差异(P>0.05)，磁场处理组普遍表现出黄度值降低趋势。a^*值的显著降低与黑斑蛙残留体内血水的清除效率呈负相关，表明磁场处理特别是 30~50 mT 强度能有效促进残留血水排出。冰水浸泡组因低温导致的血管收缩效应[23]，反而阻碍了残留血水的排出，这与其 a^*值降幅最小的实验结果相一致，也是工厂在黑斑蛙清洗方面存在去血水困难的主要原因。

2.2 辅助清洗方式对黑斑蛙肉离心损失率的影响

离心损失率是肉类科学中评估保水性的关键指标之一，它直接反映了不同辅助清洗方式处理后黑斑蛙肉在受力(离心力)作用下保持内部水分的能力[24]。由图 1 的实验数据显示，对照组冰水浸泡的离心损失率为 17.18%，而磁场处理组离心损失率随磁场强度增加呈现先降后升趋势。其中 30 mT 磁场(MF30)处理效果最优，离心损失率为 10.85%，较冰水浸泡组降低了 36.85%(P<0.05)，Wu 等[25] 的研究表明，直流磁场处理是一种有效提升低盐肌原蛋白凝胶保水性的物理手段，能显著降低离心损失率，本文与其结论一致。值得注意的是，当磁场强度超过 30 mT 后，离心损失率出现显著上升，MF50 组(18.47%)较 MF30 组升高了 70.23%(P<0.05)，表明磁场强度对保水性能存在阈值效应。显著性分析显示，MF30 组的离心损失率均显著低于冰水浸泡组，而 MF40(13.20%)组虽高于 MF30 组，但仍优于冰水浸泡处理。从作用机制分析，适度磁场(≤30 mT)可能通过稳定肌原纤维蛋白结构[26] 和调控细胞膜通透性[27] 实现保水增效：一方面，磁化后液体有序度增加，分子间氢键作用增

表 2 不同辅助清洗方式处理前后黑斑蛙肉的色差

Table 2 Color difference of *Pelophylax nigromaculatus* meat before and after treatment with different auxiliary cleaning methods

色差	状态	冰水浸泡	MF10	MF20	MF30	MF40	MF50
L^*	清洗前	53.3±0.87^a	53.4±0.12^a	53.3±0.87^a	53.9±0.46^a	52.8±0.35^a	53.3±0.01^a
	清洗后	50.7±0.67^b	56.6±1.42^a	56.4±0.29^a	56.3±1.12^a	54.4±3.75^{ab}	57.1±3.40^a
a^*	清洗前	7.3±0.61^a	7.5±0.12^a	7.2±0.49^a	6.6±0.84^a	7.1±0.84^a	6.8±0.76^a
	清洗后	6.5±1.99^a	4.8±0.20^{ab}	5.7±0.38^{ab}	3.9±0.81^b	5.8±1.04^{ab}	4.3±0.35^b
b^*	清洗前	19.2±0.40^a	18.5±0.64^a	18.5±0.31^a	19.0±0.60^a	19.0±0.45^a	18.9±0.98^a
	清洗后	15.3±2.34^a	16.4±1.63^a	16.4±2.17^a	16.0±0.76^a	16.6±0.50^a	16.9±2.20^a

注：不同小写字母表示不同辅助清洗方式间差异显著(P<0.05)，表3~表7。

强，水分子团簇的平均尺寸减小[28]；另一方面，洛伦兹力诱导的离子通道活性变化[29] 可能促进细胞内水分保留。然而，50 mT 强磁场（MF50）引发的离心损失率上升，可能与其导致的肌纤维结构损伤有关。综合离心损失率与色差指标，MF30 处理在维持肉质含水量（10.85%）和促进血水清除（a^*值降低 40.9%）方面均表现最优，建议作为黑斑蛙清洗工艺的优选参数。

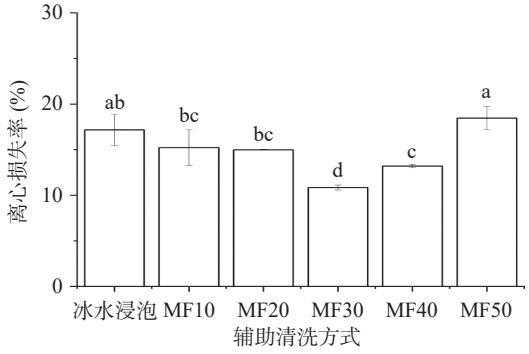


图 1　不同辅助清洗方式处理后黑斑蛙肉的离心损失率

Fig.1　Centrifugal loss of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

注：不同小写字母表示不同辅助清洗方式间差异显著（P<0.05），图 2~图 4 同。

2.3　辅助清洗方式对黑斑蛙肉 pH 的影响

不同辅助清洗方式对黑斑蛙肉 pH 的影响结果（图 2）显示，对照组冰水浸泡的 pH 为 7.00，而磁场处理组（MF10~MF50）的 pH 在 6.91~7.16 范围内波动。其中 MF30 组 pH 最低，MF50 组最高，但统计学分析表明各组间差异均未达显著水平（P>0.05）。这一现象提示，在实验设置的磁场强度范围（10~50 mT）内，磁场辅助清洗未对肌肉组织的酸碱平衡产生实质性影响，与张娟[30] 的研究结果一致（低频磁场辅助解冻后，猪肉的 pH 接近鲜肉水平）。值得注意的是，尽管 MF30 组在离心损失率（10.85%）和血水清除（a^*值降低 40.9%）方面表现最优，但其 pH（6.91）仍处于新鲜肉品正常范围（6.8~7.2），表明该处理在改善功能特性的同时能够维持肌肉酸碱系统的稳定性。结合色差与离心损失率数据，pH 的整体稳定可能源于磁场处理对肌细胞膜结构的非破坏性作用，其作用机制

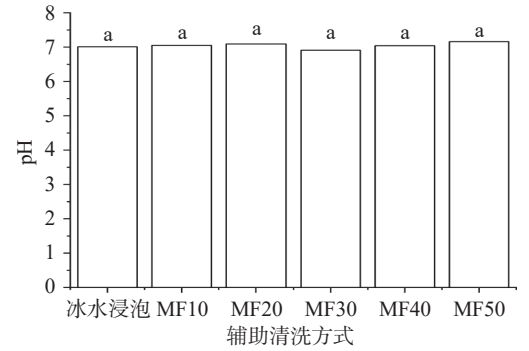


图 2　不同方式辅助清洗后黑斑蛙肉的 pH

Fig.2　pH of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

更倾向于物理性水分调控而非生物化学途径的干预，这为磁场清洗技术在实际应用中的安全性提供了重要依据。

2.4　辅助清洗方式对黑斑蛙肉质构的影响

表 3 为不同辅助清洗方式处理对黑斑蛙肉质构的影响，质构特性可以直观地反映黑斑蛙后腿肌肉经过辅助清洗处理后的品质特性变化[31]。相较于单纯冰水浸泡组，磁场处理可全面提升质构参数，其中 30 mT 磁场（MF30）表现最优：硬度（56.21±0.66 gf）较冰水浸泡组提高了 21.9%，弹性（0.63±0.10）和回复性（0.33±0.04）分别增加了 28.6% 和 26.9%，同时咀嚼性（34.22±4.02 gf）达到冰水浸泡组的 1.89 倍（P<0.05）。值得注意的是，磁场强度对质构改善存在阈值效应：当磁感应强度从 10 mT 增至 30 mT 时，咀嚼性持续增加；但 50 mT 处理（MF50）使硬度（43.02±1.10 gf）回落至冰水浸泡组水平，且回复性（0.24±0.02）较 MF30 组降低了 27.3%（P<0.05），这与该组离心损失率下降（18.47% vs MF30 组 10.85%）共同指向过度磁场处理可能使质地特性下降。综合发现，30 mT 磁场处理可以克服单纯冰水浸泡导致的弹性缺陷（MF30 弹性 0.63 vs 冰水组 0.49），为优化清洗工艺提供了关键参数依据。

表 3　不同辅助清洗方式处理后黑斑蛙肉的质构

Table 3　Texture of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

实验组	硬度（gf）	弹性	咀嚼性（gf）	胶着性（gf）	回复性
冰水浸泡	46.11±2.63^{bc}	0.49±0.03^{bcd}	18.09±2.69^{c}	37.69±3.33^{b}	0.26±0.01^{cde}
MF10	49.64±3.11^{ab}	0.46±0.01^{cd}	22.62±1.14^{bc}	45.44±3.60^{a}	0.28±0.01^{bc}
MF20	52.49±2.10^{ab}	0.56±0.04^{ab}	28.21±1.65^{ab}	47.46±3.99^{a}	0.30±0.01^{ab}
MF30	56.21±0.66^{a}	0.63±0.10^{a}	34.22±4.02^{a}	46.82±3.65^{a}	0.33±0.04^{a}
MF40	53.82±4.93^{ab}	0.54±0.04^{abc}	22.60±3.90^{bc}	41.75±4.26^{ab}	0.27±0.02^{cd}
MF50	43.02±1.10^{d}	0.46±0.01^{d}	18.80±4.15^{c}	37.99±3.15^{b}	0.24±0.02^{de}

2.5　辅助清洗方式对黑斑蛙肉基本营养成分的影响

不同辅助清洗方式对黑斑蛙肉基本营养成分的影响结果显示（表 4），水分含量在不同处理组间呈现显著差异（P<0.05），磁场辅助冰水浸泡在 MF10~MF40 时黑斑蛙肉的水分含量均高于冰水浸泡组，与 Yang 等[32] 发现低频磁场可以使肌原纤维蛋白凝胶呈现更有序的结构以捕获更多的水的结论一致，而脂肪和粗蛋白质含量均无统计学差异（P>0.05），与 Li 等[33] 研究结果一致。30 mT 磁场（MF30）处理组水分含量最高（78.28%），显著高于冰水浸泡组（73.63%）和 50 mT 磁场组（73.16%）。该结果与前期离心损失率数据结合一致，进一步证实 MF30 处理在维持肌肉水分平衡方面的优势。脂肪含量在 0.33%~0.38% 范围内波动，各组间未达显著差异（P>0.05），表明物理清洗过程未引发脂质溶出或氧化损耗。粗蛋白质含量稳定在 19.01%~19.25% 之间，处理间差异未超过 0.24 个百分点（P>0.05），说明清洗方式未改变蛋白质总量，这与质构分析中 MF30 组硬度、咀嚼性显

表 4 不同辅助清洗方式处理后黑斑蛙肉的基本营养成分

Table 4 Basic nutrient composition of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

基本营养成分(%)	冰水浸泡	MF10	MF20	MF30	MF40	MF50
水分	73.63±2.22^{c}	74.74±0.52^{bc}	74.64±1.19^{bc}	78.28±1.55^{a}	76.01±2.62^{abc}	73.16±1.82^{c}
脂肪	0.33±0.02^{a}	0.36±0.08^{a}	0.35±0.08^{a}	0.38±0.07^{a}	0.36±0.02^{a}	0.35±0.04^{a}
蛋白质	19.25±0.06^{a}	19.01±0.02^{a}	19.11±0.03^{a}	19.19±0.06^{a}	19.06±0.03^{a}	19.15±0.04^{a}

著提升的结果共同表明,磁场处理主要通过调控蛋白质-水分相互作用而非含量变化来改善功能特性。值得注意的是,MF50 组最低水分含量(73.16%)与其在质构指标(硬度 43.02 gf)和离心损失率(18.47%)上的劣势表现一致,50 mT 磁场可能通过物理作用破坏了肌肉持水结构。

2.6 辅助清洗方式对黑斑蛙肉肌红蛋白含量的影响

肌红蛋白作为肌肉中关键的色素蛋白,其含量和存在形式直接左右肉品的颜色、新鲜度等品质特性[34]。肌红蛋白主要包括脱氧肌红蛋白、氧合肌红蛋白和高铁肌红蛋白,它们各自具有不同的颜色特征,脱氧肌红蛋白呈紫红色,氧合肌红蛋白为鲜红色,高铁肌红蛋白则是褐色[35]。在磁场辅助清洗实验中,相较于冰水浸泡组,MF10、MF20、MF40 组的脱氧肌红蛋白含量增加,高铁肌红蛋白和氧合肌红蛋白含量降低。这可能是因为在相对较低的磁感应强度下,磁场对肌红蛋白的氧化反应起到一定的抑制作用,减缓了脱氧肌红蛋白向高铁肌红蛋白的转化,使得脱氧肌红蛋白含量相对升高。由于高铁肌红蛋白含量较高时肉品颜色偏深,其含量降低,且脱氧肌红蛋白含量增加,肉品颜色相对冰水浸泡组会有所变浅。MF30 组和 MF50 组的脱氧肌红蛋白含量达到最高水平,同时高铁肌红蛋白和氧合肌红蛋白含量下降。此时,肉品颜色进一步发生变化,高铁肌红蛋白含量的下降抑制了肉品颜色加深的趋势,而较高含量的脱氧肌红蛋白使肉品颜色更接近其自身的紫红色泽,即肉品颜色在此时表现出更接近新鲜肉的色泽,比 MF10、MF20、MF40 组的颜色更浅、更明亮。高铁肌红蛋白的大量生成会导致肉品颜色加深,使 L^{*}值下降、a^{*}值上升。肌红蛋白氧化状态的改变对肉品风味和营养品质也有深远影响。高铁肌红蛋白含量过高会引发脂质氧化,产生不良风味物质,降低肉品风味品质;同时,其氧化过程可能破坏肉中的营养成分,如维生素、不饱和脂肪酸等,降低肉品的营养价值[36]。Wu 等[37] 研究表明磁场介导的肌红蛋白氧化修饰是改善肌原纤维蛋白凝胶特性的有效方法之一,磁场可以进一步促进肌红蛋白结构的重排,导致其内部的活性基团转移到外部环境中,这有助于肌原纤维蛋白之间的水化和交联。由此可见,磁场辅助冰水浸泡虽对黑斑蛙“去血水”有一定作用,但需精准控制磁感应强度,以平衡清洗效果和肉品肌红蛋白相关品质,其中 MF30 组和 MF50 组表现最好。

2.7 辅助清洗方式对黑斑蛙肉菌落总数的影响

微生物指标是评估食品安全性的关键依据,菌落总数反映了食品在生产、加工、储存等过程中的卫生状况[38]。从图 4 可以明显看出,在所有处理组中冰水浸泡组菌落总数最多,为 2.24×10^{5} CFU/g。冰水浸泡虽然能在一定程度上降低微生物活性,但并不能有效杀灭微生物,随着浸泡时间延长,微生物可能会在适宜的水环境中重新生长繁殖。在 MF10~MF30 组,随着磁感应强度的增加,菌落总数呈现减少的趋势,其中 MF30 组的菌落总数最少,仅为 4.23×10^{4} CFU/g。这表明在这一磁感应强度范围内,磁场对微生物具有抑制作用。磁场可能通过干扰微生物细胞内的电子传递、离子平衡以及生物大分子的合成等生理过程,破坏微生物的正常代谢和生长,从而降低了菌落总数[39]。而在 MF40~MF50 组,菌落总数又出现增大的现象。这可能是因为当磁感应强度超过一定阈值(在本实验中约为 30 mT)后,磁场对黑斑蛙肌肉的影响发生了变化。过强的磁场可能在抑制部分微生物生长的同时,也破坏了肌肉组织的防御

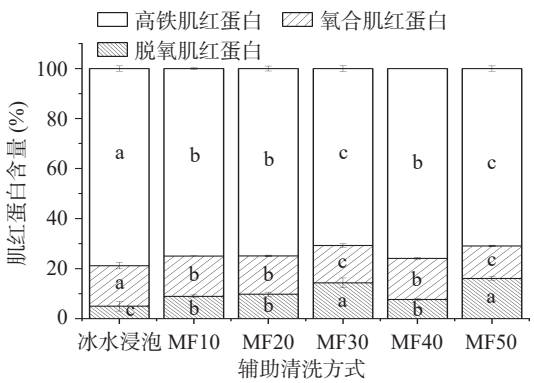


图 3 不同方式辅助清洗后黑斑蛙肉的肌红蛋白含量

Fig.3 Myoglobin content of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

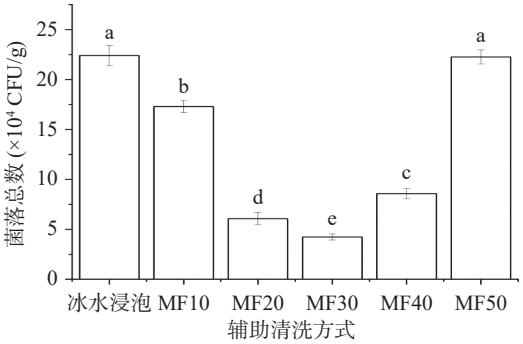


图 4 不同方式辅助清洗后黑斑蛙肉的菌落总数

Fig.4 Total colony counts of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

机制，使得一些原本受到抑制的微生物或环境中的微生物更容易滋生，导致菌落总数上升。综上所述，磁场辅助清洗在一定强度内对黑斑蛙肉菌落总数有积极影响，MF30 组可以确保黑斑蛙肉的微生物水平较低。

2.8　辅助清洗方式对黑斑蛙肉大肠菌群的影响

大肠菌群作为食品被污染的常用指示菌，其在动物食品中的存在情况对安全评估至关重要[40]。如表 5 所示，经超声波、冰水浸泡及不同强度磁场处理后的黑斑蛙肉样品中，所有实验组的大肠菌群检测结果均为阳性(+)。这表明在本实验条件下，上述物理辅助清洗手段均未能有效杀灭黑斑蛙肉中的大肠杆菌。冰水浸泡仅通过低温暂时抑制微生物代谢活性[41]，无法直接杀灭细菌。Mousavian 等[42] 研究表明，在不同暴露时间和磁场强度下，当磁场强度达到 18 mT 时，大肠杆菌的存活率均显著下降，Li 等[43] 研究表明，大肠杆菌长链脂肪酸降解产生的自由基是静磁场作用的主要靶点，它触发细菌氧化应激反应，最终导致生长抑制。实验结果显示，即使磁场强度提升至 50 mT，大肠菌群仍未被完全清除。这可能因为当前实验参数下的物理处理方式(冰水浸泡、磁场)对黑斑蛙肉中大肠菌群虽然有一定影响但清除效果有限。未来研究需进一步探索物理-化学协同减菌策略(如联合臭氧水或生物抑菌剂)，以突破单一物理处理的局限性，提升水产品加工环节的微生物安全控制水平。

表 5　不同方式辅助清洗后黑斑蛙肉的大肠菌群检测结果

Table 5　Coliform assay results of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

大肠菌群	冰水浸泡	MF10	MF20	MF30	MF40	MF50
检测结果	+	+	+	+	+	+

注：“+”表示检出大肠菌群。

2.9　辅助清洗方式对黑斑蛙肉水分分布的影响

不同辅助清洗方式对黑斑蛙肉水分分布的影响存在明显差异。由表 6、图 5 可知，磁场处理组的结合水比例随强度变化呈非线性趋势，其中 MF30 组结合水比例最高(7.44%±0.05%)，显著高于冰水浸泡组(6.82%±0.18%)(P<0.05)，表明适度磁场处理可能通过诱导水分子定向排列并增强其与蛋白质的氢键结合，从而提升结合水保留能力[44]，与 Wang 等[45] 的研究结果一致。然而，当磁场强度增至 50 mT 时，结合水比例骤降至最低值(7.23%±0.01%)，同时自由水占比达到峰值(0.31%±0.05%)，推测高强度磁场可能破坏肌纤维结构或细胞膜完整性，导致结合水向自由水转化。不易流动水比例方面，磁场处理组显著低于冰水浸泡组(93.03%±0.17%)，尤其是磁场处理组 MF30组为 92.28%±0.10%，说明磁场作为一种辅助手段，促进了水分向结合水和自由水转变。综合来看，30 mT 磁场处理在提升结合水比例(7.44%±0.05%)的同时维持较低自由水(0.27%±0.12%)和不易流动水(92.28%±0.10%)，展现出优化水分分布的潜力，但需避免高强度磁场(如 50 mT)对细胞结构的潜在破坏。未来需结合肌肉微观形态及蛋白质构象变化，进一步解析磁场调控水分迁移的分子机制，为磁场清洗技术的开发提供更广泛和深入的理论依据。

表 6　不同辅助清洗方式处理后黑斑蛙肉的水分分布

Table 6　Moisture partitioning of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

处理组	结合水比例(%)	不易流动水比例(%)	自由水比例(%)
冰水浸泡	6.82±0.18^{c}	93.03±0.17^{a}	0.15±0.08^{b}
MF10	7.20±0.02^{b}	92.56±0.09^{b}	0.24±0.06^{ab}
MF20	7.30±0.04^{ab}	92.43±0.03^{bc}	0.27±0.02^{ab}
MF30	7.44±0.05^{a}	92.28±0.10^{c}	0.27±0.12^{ab}
MF40	7.35±0.02^{ab}	92.47±0.04^{b}	0.18±0.04^{ab}
MF50	7.23±0.01^{b}	92.46±0.05^{b}	0.31±0.05^{a}

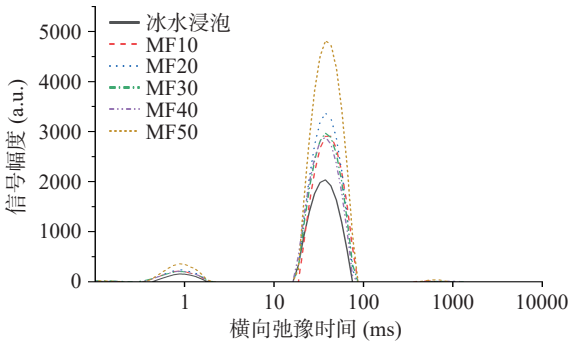


图 5　不同方式辅助清洗后黑斑蛙肉的 T_2 反演图谱

Fig.5　T_2 inversion profiles of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods

2.10　辅助清洗方式对黑斑蛙肉感官评价的影响

感官评价是衡量食品品质的重要环节，直接反映消费者对产品的接受程度[46]。从表 7 中可以看出，冰水浸泡组因短时间内血水去除不彻底，颜色偏暗偏红，鲜味不足，导致整体可接受度低，仅为 5.5 分。磁场处理组在气味、口味、颜色和整体可接受度四个方面均表现最佳，几乎没有腥味，颜色偏亮较白，肉质滑嫩多汁、鲜美，整体非常受评价人员喜欢。MF30 组的感官品质最优，可能与适度的磁场强

表 7　不同辅助清洗方式处理后黑斑蛙肉的感官评定结果(n=10)

Table 7　Sensory evaluation results of *Pelophylax nigromaculatus* meat after treatment with different auxiliary cleaning methods (n=10)

组别	得分				
	气味	口感	色泽	滋味	整体可接受度
冰水浸泡	6.3±1.9^{c}	7.1±1.1^{c}	5.6±1.8^{c}	6.3±1.7^{c}	5.5±1.1^{d}
MF10	7.6±1.7^{a}	7.4±1.6^{b}	7.9±1.4^{ab}	7.7±1.5^{ab}	7.6±1.6^{ab}
MF20	7.9±1.5^{a}	7.8±1.5^{ab}	8.3±0.6^{a}	8.0±0.4^{a}	7.9±1.4^{a}
MF30	8.4±1.3^{a}	8.6±0.4^{a}	8.7±0.3^{a}	8.5±0.8^{a}	8.6±1.0^{a}
MF40	7.5±1.6^{b}	7.3±1.7^{b}	7.8±1.5^{ab}	7.6±1.6^{ab}	7.5±1.5^{ab}
MF50	7.7±1.4^{a}	5.5±1.8^{d}	7.6±1.7^{ab}	7.2±1.5^{b}	7.0±1.6^{bc}

度(30 mT)对蛋白质结构的温和调控有关:磁场通过影响水分子排列,减少肌肉持水性损失,从而维持肉质嫩度与多汁性。而 MF50 组的感官评分下降,提示过高磁场强度可能加剧蛋白质变性或破坏细胞膜结构,导致质地松散或风味成分流失[47]。综上所述,磁场辅助清洗在提升黑斑蛙肉感官品质上优势显著,为黑斑蛙清洗工艺优化提供了更优选择,有望提升相关产品的市场竞争力,满足消费者对高品质黑斑蛙产品的需求。

3 结论

本研究系统评价了磁场辅助清洗对黑斑蛙肉清洗效率和品质的影响。结果表明,30 mT 磁场处理(MF30 组)综合效果最优,具体表现为:离心损失率为 10.85%,较冰水浸泡组显著降低 36.85%(P<0.05),并通过优化水分分布(结合水比例 7.44%)维持肉质多汁性;显著改善质构特性,硬度(56.21 gf)、弹性(0.63)及咀嚼性(34.22 gf)均优于传统方法;有效清除残留血水,肉样红度值(a^*值)较清洗前降低 40.9%,促进色泽优化(亮度 L^*值提升 4.5%);菌落总数最低仅为 4.23×10^4 CFU/g;感官评分最高(42.8 分),在气味、色泽、口感及整体接受度上均显著优于冰水浸泡组。综上,30 mT 磁场辅助冰水浸泡通过调控水分分布及抑制微生物活性,在高效清除血水的同时显著提升黑斑蛙肉品质,可作为传统冰水浸泡(去血水效率低、易损伤质地)的潜在替代方案。未来需进一步探索磁场与杀菌剂的协同作用以解决大肠菌群残留问题。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 何志刚, 王冬武, 徐永福, 等. 黑斑蛙肌肉营养成分分析及评价[J]. 中国饲料, 2018(17): 74−77. [HE Zhigang, WANG Dongwu, XU Yongfu, et al. Analysis and evaluation of nutritional components in dark-spotted frog muscle[J]. China Feed, 2018(17): 74−77.]

[2] ZHANG M, SONG Y, WANG J, et al. Enhancement effect of static magnetic field on bactericidal activity[J]. Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 2025, 21(18): e2412334.

[3] 姚黄兵, 金亚美, 张令涛, 等. 磁场技术在农产品加工中的应用及研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 306−316. [YAO Huangbing, JIN Yamei, ZHANG Lingtao, et al. Application and research progress of magnetic field technology in agricultural products processing[J]. Food Science, 2024, 45(6): 306−316.]

[4] 刘承灏. 冷鲜肉磁场辅助超冰温保鲜技术的研究及品质预测建模[D]. 天津: 天津商业大学, 2023. [LIU Chenghao. Research on magnetic field-assisted superchilling preservation technology and quality prediction modeling for chilled meat[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2023.]

[5] 王文欣, 关文强, 何兴兴, 等. 磁场辅助冷冻对牛肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(5): 44−51. [WANG Wenxin, GUAN Wenqiang, HE Xingxing, et al. Effect of magnetic field-assisted freezing on beef quality[J]. Meat Research, 2024, 38(5): 44−51.]

[6] TOLEDO E J L, RAMALHO T C, MAGRIOTIS Z M. Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models[J]. Journal of Molecular Structure, 2008, 888(1−3): 409−415.

[7] GMITROV J, CHIYOJI, et al. Effect of 0.25 T static magnetic field on microcirculation in rabbits[J]. Bioelectromagnetics, 2002, 23(3): 224−229.

[8] ROSEN A D. Membrane response to static magnetic fields: effect of exposure duration[J]. Biochim Biophys Acta, 1993, 1148(2): 317−320.

[9] ALIMI F. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation: A critical review[J]. Magnetochemistry, 2024, 10(11): 83.

[10] 郑静静, 林琳, 张艳凌, 等. 熟制小龙虾冷冻贮藏期间的品质变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(5): 1468-1474. [ZHENG Jingjing, LIN Lin, ZHANG Yanling, et al. Quality changes of cooked crayfish during frozen storage[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(5): 1468.]

[11] 何涓源, 余翔, 冯艳丽, 等. 德清青虾肌肉品质特性及其主成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 264−270. [HE Juanyuan, YU Xiang, FENG Yanli, et al. Muscle quality characteristics and principal component analysis of deqing freshwater shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 264−270.]

[12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品 pH 值的测定: GB 5009.237-2016[S].北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of food pH value: GB 5009.237-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[13] XU X, LIU H, SUN P, et al. Effect of lysine-assisted ultrasonic and vacuum tumbling treatment on the quality of chicken breast meat in canned foods[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 116: 107310.

[14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of moisture in foods: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[15] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6-2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025. [National Health and Family Planning Commission, China Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of fat in foods: GB 5009.6-2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.]

[16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025. [National Health Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of protein in foods: GB 5009.5-2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.]

[17] LIU Q, LONG Y, ZHANG Y F, et al. Phenotypic and genetic correlations of pork myoglobin content with meat colour and oth-

er traits in an eight breed-crossed heterogeneous population[J]. Animal, 2021, 15(11): 100364.
[18] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2-2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard Food microbiological examination enumeration of aerobic plate count: GB 4789.2-2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.]
[19] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数: GB 4789.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard Food microbiological examination enumeration of coliforms: GB 4789.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
[20] 钱韵芳, 郁佳怡, 汪敏晨, 等. 超声波辅助解冻对南极磷虾品质及其后续冷藏特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 63−69. [QIAN Yunfang, YU Jiayi, WANG Minchen, et al. Effects of ultrasonic-assisted thawing on the quality of antarctic krill and its subsequent refrigeration characteristics[J]. Food Science, 2023, 44(1): 63−69.]
[21] 白恒丽, 李来好, 吴燕燕, 等. 基于超声联合滚揉腌制改善低盐预制调理海鲈鱼品质特性[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 161−171. [BAI Hengli, LI Laihao, WU Yanyan, et al. Improvement of quality characteristics of low-salt preprocessed seasoned japanese seabass by ultrasound-assisted tumbling curing[J]. Food Science, 2024, 45(14): 161−171.]
[22] 任璐璐. 原料肉和宰后状态对酱牛肉食用品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. [REN Lulu. Effects of raw meat and postmortem status on eating quality of spiced beef[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013.]
[23] 王涛, 顾玉东, 沈忆文. 低温性血管收缩的机制及防治措施的研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2000, 14(3): 139−141. [WANG Tao, GU Yudong, SHEN Yiwen. Mechanism and preventive measures of cryogenic vasoconstriction[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2000, 14(3): 139−141.]
[24] 王新颖, 陈炼红, 杜荣胜, 等. 响应面法优化猪肉肠中食用胶复配配方研究[C]//第十八届中国肉类科技大会论文集. 2020: 789-804. [WANG Xinying, CHEN Lianhong, DU Rongsheng, et al. Optimization of compound edible gum formulation in pork sausage using response surface methodology[C]//Proceedings of the 18th China Meat Science and Technology Conference. 2020: 789-804.]
[25] WU D, GUO J J, WANG X, et al. The direct current magnetic field improved the water retention of low-salt myofibrillar protein gel under low temperature condition[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112034.
[26] WEI Q, SUN Q, HOU Q, et al. Effect of static magnetic field-assisted freezing at different temperatures on the structural and functional properties of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142836.
[27] YU B, LIU J. Parametric calculation of pulse transformer with open magnetic cores based on magnetostatic-field theory[J]. Physical Review Special Topics. Accelerators and Beams, 2013, 16(1): 401.
[28] ZHAO S M, LIU Y, YUAN X R, et al. Effect of low-frequency alternating magnetic field on the rheological properties, water distribution and microstructure of low-salt pork batters[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 159: 113164.
[29] 王海燕. 1Gs 恒磁场对共培养内皮细胞增殖活性和膜离子通道的影响[D]. 西安: 第四军医大学, 2004. [WANG Haiyan. Effect of 1Gs static magnetic field on proliferation activity and membrane ion channels of co-cultured endothelial cells[D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2004.]
[30] 张娟. 基于肌原纤维蛋白特性解析低频磁场辅助解冻对猪肉品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技学院, 2023. [ZHANG Juan. Analysis of the effect of low-frequency magnetic field-assisted thawing on pork quality based on myofibrillar protein characteristics[D]. Luoyang: Henan Institute of Science and Technology, 2023.]
[31] 吕春阳, 张玲, 杜明, 等. 超声处理对卤虾品质的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 64−69. [LU Chunyang, ZHANG Ling, DU Ming, et al. Effects of ultrasonic treatment on quality of marinated shrimp[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 64−69.]
[32] YANG K, ZHOU Y, GUO J, et al. Low frequency magnetic field plus high pH promote the quality of pork myofibrillar protein gel: A novel study combined with low field NMR and Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126896.
[33] LI C F, HU Z W, GAO Y, et al. Bioeffects of static magnetic fields on the growth and metabolites of *C. pyrenoidosa* and *T. obliquus*[J]. Journal of Biotechnology, 2022, 351: 1−8.
[34] 王文雅. L-抗坏血酸改善受压猪肉色泽有效性研究及相关机制分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020. [WANG Wenya. Study on the effectiveness of L-ascorbic acid in improving the color of compressed pork and analysis of related mechanisms[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.]
[35] 朱宏星, 孙冲, 王道营, 等. 肌红蛋白理化性质及肉色劣变影响因素研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(6): 9. [ZHU Hongxing, SUN Chong, WANG Daoying, et al. Research progress on physicochemical properties of myoglobin and factors affecting meat color deterioration[J]. Meat Research, 2019, 33(6): 9.]
[36] 顾赛麒, 王涣淇, 冯媛, 等. 高铁肌红蛋白对腌腊鱼脂质氧化与挥发性风味的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(4): 180−191. [GU Saiqi, WANG Huanqi, FENG Yuan, et al. Effect of metmyoglobin on lipid oxidation and volatile flavor of cured salted fish[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(4): 180−191.]
[37] WU X, FENG X, JIANG J, et al. Magnetic field-mediated oxidative modification of myoglobin: One effective method for improving the gel properties of myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2025, 472: 142899.
[38] 宋伟. 泰安市食品质量现状分析与对策研究[D]. 济南:山东大学, 2015. [SONG Wei. Analysis of the current status of food quality in Tai'an city and research on countermeasures[D]. Ji'nan: Shandong University, 2015.]
[39] GUO L, AZAM S M R, GUO Y, et al. Germicidal efficacy of the pulsed magnetic field against pathogens and spoilage microorganisms in food processing: An overview[J]. Food Control, 2021(1): 108496.
[40] 王世平, 张崇华, 聂秀敏, 等. 2 种方法检测食品中大肠菌群效果比较[J]. 中国初级卫生保健, 2008(5): 58−59. [WANG Shiping, ZHANG Chonghua, NIE Xiumin, et al. Comparison of two

methods for detecting coliform bacteria in food[J]. Chinese Primary Health Care, 2008(5): 58−59.]

[41] BADAWY E A, HAMZA D, AHMED Z, et al. Seasonal and environmental drivers of antibiotic resistance and virulence in *Escherichia coli* from aquaculture and their public health implications [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 16100.

[42] MOUSAVIAN S, MAKHDOUMI-KAKHKI A. The inhibitory effects of static magnetic field on escherichia coli from two different sources at short exposure time[J]. Reports of Biochemistry & Molecular Biology, 2017, 5(2): 112.

[43] LI H D, XIE R N, XU X, et al. Static magnetic field inhibits growth of escherichia coli colonies via restriction of carbon source utilization[J]. Cells, 2022, 11(5): 827.

[44] LIU S, ZHAO J, YUAN C, et al. Quality enhancement of shrimp surimi by static magnetic field treatment at 4 C[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(3): 2379.

[45] WANG J W, LU Q Y, GONG J M, et al. Magnetic field-assisted cascade effects of improving the quality of gels-based meat products: A mechanism from myofibrillar protein gelation[J]. Food Research International, 2023, 169, 112907.

[46] FIORENTINI M, KINCHLA A J, NOLDEN A A. Role of sensory evaluation in consumer acceptance of plant-based meat analogs and meat extenders: A scoping review[J]. Foods, 2020, 9(9): 1334.

[47] LU M, ZHANG C, MA L, et al. Cryoprotective effect of magnetic field-assisted freezing in combination with curdlan on myofibrillar protein of *Litopenaeus vannamei*: Oxidative aggregation, protein structure and thermal stability[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160(P1): 110730.