

# 脉冲电场处理对猪肉中N-羟乙酰神经氨酸含量及猪肉食用品质的影响

刘楚鑫, 娄爱华, 吴艳阳, 何恩祺, 郑婉婷, 何荣鑫, 沈清武\*  
(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 414000)

**摘要:** 为探究如何降低猪肉中N-羟乙酰神经氨酸 (*N*-glycolylneuraminic acid, Neu5Gc) 含量, 本实验以Neu5Gc标准品水溶液、猪颌下腺黏蛋白 (porcine submaxillary gland mucin, PSM) 水溶液、猪肉块和猪肉糜为研究对象, 采用高效液相色谱-荧光光谱定量检测方法, 探讨脉冲电场 (pulsed electric field, PEF) 处理 (1~4 kV/cm、各电击50次) 对猪肉中Neu5Gc含量 (总和游离态Neu5Gc含量) 及食用品质 (pH值、色泽和质构特性) 的影响。结果表明: 随着电场强度的增加, Neu5Gc标准品水溶液中游离态Neu5Gc含量呈下降趋势, 在3 kV/cm和4 kV/cm条件下游离态Neu5Gc含量显著降低 ( $P < 0.05$ )。PSM水溶液中总Neu5Gc、游离态Neu5Gc和结合态Neu5Gc含量均显著降低 ( $P < 0.05$ )。肉块中总Neu5Gc和结合态Neu5Gc含量呈下降趋势, 游离态Neu5Gc含量呈上升趋势, 在4 kV/cm时总Neu5Gc和结合态Neu5Gc含量显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。肉糜中总Neu5Gc和结合态Neu5Gc含量呈下降趋势, 各处理组的总Neu5Gc和结合态Neu5Gc含量均显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。与对照组相比, 肉块的pH值在2 kV/cm和4 kV/cm电场强度处理后存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。肉块和肉糜的亮度 ( $L^*$ ) 值随着电场强度的增加呈先升高后降低的趋势, 在3 kV/cm时达到最大值。PEF处理后肉块的咀嚼性和弹性均显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。肉糜的硬度和咀嚼性呈下降趋势, 但弹性变化不显著 ( $P > 0.05$ )。综上, PEF技术能一定程度降低猪肉中Neu5Gc含量和猪肉块的咀嚼性和弹性, 但对猪肉的pH值和色泽有一定影响。

**关键词:** 脉冲电场; 猪肉; N-羟乙酰神经氨酸; 食用品质

Effect of Pulsed Electric Field Treatment on *N*-Hydroxyacetylneuraminic Acid Content and Eating Quality of Pork

LIU Chuxin, LOU Aihua, WU Yanyang, HE Enqi, ZHENG Wanting, HE Rongxin, SHEN Qingwu\*  
(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 414000, China)

**Abstract:** This study investigated how to reduce the content of *N*-hydroxyacetylneuraminic acid (Neu5Gc) in pork. By using Neu5Gc standard solution, porcine submandibular gland mucin (PSM) solution, meat pieces and minced meat as experimental subjects, and high performance liquid chromatography with fluorescence detection (HPLC-FLD) for quantitative analysis, the effect of pulsed electric field (PEF) treatment (with 50 cycles of electric shock at 1–4 kV/cm) on the content of total and free Neu5Gc and eating quality attributes (pH, color difference and texture quality) in pork was explored. The results showed that the content of free Neu5Gc in Neu5Gc standard solution showed a decreasing trend as PEF intensity increased, and significantly decreased at PEF intensity of 3 and 4 kV/cm ( $P < 0.05$ ). The contents of total, free and bound Neu5Gc in PSM solution also decreased significantly ( $P < 0.05$ ) with increasing intensity of PEF. The contents of total and bound Neu5Gc in meat pieces showed a decreasing trend while the content of free Neu5Gc increased, and the contents of total and bound Neu5Gc were significantly lower than those in the control group at 4 kV/cm ( $P < 0.05$ ). The contents of total and bound Neu5Gc in minced meat showed a decreasing trend, and were significantly lower in all treatment groups than in the control group ( $P < 0.05$ ). Compared with the control group, there was a significant difference ( $P < 0.05$ ) in the pH of meat pieces treated at PEF intensity of 2 and 4 kV/cm. The brightness  $L^*$  value of meat pieces and minced meat first increased and then decreased, reaching a maximum level at 3 kV/cm. The chewiness and elasticity of PEF-treated

收稿日期: 2022-08-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31771992)

第一作者简介: 刘楚鑫 (1998—) (ORCID: 0000-0002-8842-4486), 男, 硕士研究生, 研究方向为动物性食品。

E-mail: 63265324@qq.com

\*通信作者简介: 沈清武 (1973—) (ORCID: 0000-0001-6144-1305), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉品科学。

E-mail: yaoyao3153@aliyun.com

meat pieces were significantly lower than those of the control group ( $P < 0.05$ ). The hardness and chewiness of minced meat tended to decrease, but there was no significant change in the elasticity ( $P > 0.05$ ). Therefore, PEF can effectively reduce the content of Neu5Gc in pork and the chewiness and elasticity of pork pieces, but it also shows an adverse effect on the pH and color of pork.

**Keywords:** pulsed electric field; pork; *N*-hydroxyacetylneuraminic acid; eating quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220803-038

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)13-0016-07

引文格式:

刘楚鑫, 娄爱华, 吴艳阳, 等. 脉冲电场处理对猪肉中*N*-羟乙酰神经氨酸含量及猪肉食用品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 16-22. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220803-038. <http://www.spkx.net.cn>

LIU Chuxin, LOU Aihua, WU Yanyang, et al. Effect of pulsed electric field treatment on *N*-hydroxyacetylneuraminic acid content and eating quality of pork[J]. Food Science, 2023, 44(13): 16-22. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220803-038. <http://www.spkx.net.cn>

脉冲电场(pulsed electric fields, PEF)作为一种利用高强度(0.1~40 kV/cm)、窄脉冲宽(0~100  $\mu$ s)和高频率(0~2 000 Hz)高压脉冲电的新型食品非热加工技术<sup>[1-2]</sup>, 具有快速、高效、低功耗和低污染等优点, 在食品保鲜以及辅助发酵、提取、干燥、冷冻和解冻等领域已取得大量研究成果<sup>[3]</sup>。在肉制品领域, PEF技术最大的优点是能改善肉类(牛肉、鸡肉、羊肉和猪肉等)嫩度, 但在一定电场强度内也会间接影响肉的pH值和色泽, 其能破坏动物细胞膜并在处理过程中会产生热量。除了提高嫩度, PEF技术还会降低冷冻羊肉中脂肪酸含量和增加氨基酸含量, 以及提高猪肉腌制时食盐扩散速率等<sup>[4-7]</sup>。Kantono等<sup>[8]</sup>研究发现, PEF处理提高了牛肱二头肌和半膜肌的嫩度, 改善了牛肉色泽, 但PEF处理会增加脂肪氧化和饱和脂肪酸含量。在猪肉的生产加工中, PEF技术主要用于提高腌制速率, McDonnell等<sup>[9]</sup>研究证明PEF处理后猪肉中食盐含量显著增加, 但是腌制过程中猪肉的pH值和质构特性没有显著变化。虽然PEF技术对肉类的嫩化和加速腌制等有一定促进作用, 但若将PEF技术在肉类加工领域中普及还需对PEF技术进行更深入的研究。

*N*-羟乙酰神经氨酸(*N*-glycolylneuraminic acid, Neu5Gc)属于一种唾液酸, 是一种含有11个碳原子的酸性氨基糖, 常存在于糖蛋白和糖脂分子中聚糖链的非还原末端<sup>[10-11]</sup>。Neu5Gc主要以结合态的形式存在于糖蛋白和神经节苷脂中, 在哺乳动物中普遍存在。红肉为人类提供了高质量的蛋白质、多种脂肪酸、维生素和矿物质等营养成分, 大量流行病学研究得出结论, 食用红肉会加重动脉粥样硬化和心血管等疾病甚至癌症<sup>[12-13]</sup>。红肉中Neu5Gc引起的慢性炎症是与红肉相关的多种疾病的共同发病机制<sup>[14]</sup>。Kawanishi等<sup>[15]</sup>采用*Cmah*<sup>-/-</sup>小鼠模拟人类摄入Neu5Gc后对动脉粥样硬化的影响, 结果证明动脉粥样硬化的发病率显著增加。Martin等<sup>[11]</sup>也证明了携带抗Neu5Gc抗体的杜氏肌肉营养不良症患者

在摄入富含Neu5Gc的食物后会加剧该病症。我国是猪肉生产和消费大国, 近年来我国各种心血管疾病、2型糖尿病和各种癌症等疾病发病率的增加可能与我国肉类消费量的增加有关。因此, 降低长期食用红肉而带来的健康风险成为红肉及其制品研究中的重要课题。红肉中Neu5Gc的含量直接决定了进入人体胃肠道可被消化吸收Neu5Gc的含量, 是决定其生物危害大小的关键因素。有研究表明, 电刺激能降低牛肉糜中Neu5Gc含量, 牛肉糜经120 V、50 s电刺激后其中Neu5Gc含量可降低(74.24 $\pm$ 0.69)%, 电刺激可以通过电荷转移和诱导极化效应直接影响Neu5Gc分子<sup>[16]</sup>。郑婉婷等<sup>[17]</sup>研究加工方式对猪肉块中Neu5Gc含量的影响, 经过蒸煮、油炸和腌制处理后, 猪肉中Neu5Gc含量显著降低, 其中油炸后Neu5Gc含量可降低53.10%。梁美莲等<sup>[18]</sup>也证明了油炸能降低牛肉块中Neu5Gc含量, 具有解离效果。在对降低红肉中Neu5Gc的报道中, 大部分是红肉加工对其含量影响的研究, 对加工前新鲜红肉的研究较少。

本研究首先分析PEF处理对Neu5Gc标准品水溶液和猪颌下腺黏蛋白(porcine submaxillary gland mucin, PSM)水溶液中Neu5Gc的影响, 在发现PEF技术对结合态Neu5Gc有显著降低效果后, 进而探究PEF处理对猪肉块和猪肉糜中Neu5Gc的影响, 最后研究PEF处理对猪肉块和肉糜pH值、色泽和质构特性的影响, 旨在为降低猪肉中Neu5Gc含量提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜猪里脊肉 长沙滨湖东之源超市; 新鲜猪颌下腺 长沙广联猪场。

连二亚硫酸钠、三氟乙酸(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;  $\beta$ -巯基乙醇(色谱纯) 美国

Amresco公司；Neu5Gc标准品、1,2-二氨基-4,5-亚甲基二氧苯盐酸盐（1,2-diamino-4,5-methylenedioxybenzene dihydrochloride, DMB） 美国Sigma公司。

## 1.2 仪器与设备

PEF仪由华南理工大学自制；MJ-LZ225绞肉机广东美的生活电器制造有限公司；LC-20A荧光高效液相色谱仪 岛津企业管理（中国）有限公司；T渗透205便携式pH计 德图仪表（深圳）有限公司；CS-580 A分光测色仪 杭州彩谱科技有限公司；食品物性测试仪英国Stable Micro Systems公司；T 10 basic S25匀浆机艾卡（广州）仪器设备有限公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 猪肉块和肉糜制备

新鲜猪里脊肉切成半径4 cm、高1 cm、质量70 g的圆柱形肉块，备用。

新鲜猪里脊肉切碎，用绞肉机绞成肉糜，压成半径4 cm、高度1 cm、质量70 g的圆柱形肉糜，备用。

### 1.3.2 PSM制备

参照Banda等<sup>[19]</sup>的方法提取PSM。称取猪颌下腺肉样50 g，洗净、去除表面脂肪、筋膜等杂质。将处理好的肉样切碎，加入5倍体积水，匀浆，8 000 r/min、4℃冷冻离心15 min。离心完成后上清液用玻璃棉过滤。调节滤液pH值至3.5，4℃摇晃12 h，再放入4℃冰箱静置12 h。去除样品中静置后的上清液，沉淀用4℃超纯水清洗后400 r/min、4℃离心10 min，去除上清液，再重复离心。去除上清液，将沉淀pH值调至8.0，装入截留分子质量为10 kDa的透析袋，加入20倍体积的水，4℃透析24 h，每隔12 h换一次透析液，直至透析袋中样品体积膨胀5倍以上。溶液冷冻干燥24 h以上备用。

### 1.3.3 PEF处理

将Neu5Gc标准品与PSM溶于水，0.33 mg/mL Neu5Gc标准品水溶液和1 mg/mL PSM水溶液各取3 mL，置于半径为1 cm的圆柱形处理室中，液体高度为1 cm，进行PEF处理。

将制备好的猪肉块和肉糜分别置于半径为4 cm的圆柱形处理室中，肉块和肉糜高度为1 cm，进行PEF处理。

PEF处理参数为1、2、3、4 kV/cm，各电击50次。以未经PEF处理的样品为对照组。

### 1.3.4 Neu5Gc定量分析

参考Samraj等<sup>[14]</sup>的方法，采用高效液相色谱法对样品中Neu5Gc进行定量分析。Neu5Gc标准品水溶液和PSM水溶液与0.11 mmol/L氢氧化钠溶液混匀后备用。肉样在液氮中研磨，加入0.1 mmol/L氢氧化钠溶液，用匀浆机匀浆后37℃水浴30 min并用盐酸中和。然后取适量样品于80℃水解，将结合态Neu5Gc水解为游离态Neu5Gc，

用于测定样品中总Neu5Gc。另取适量样品在室温放置，用以测定样品中游离态Neu5Gc。

总Neu5Gc含量的测定：将水解后的样品与含14 mmol/L DMB、18 mmol/L连二亚硫酸钠、0.75 mol/L β-巯基乙醇、1.6 mol/L冰醋酸的溶液混合进行衍生，于50℃避光衍生2.5 h。用超纯水稀释5倍后过滤备用。

游离态Neu5Gc含量的测定：将水解后的样品与含14 mmol/L DMB、18 mmol/L连二亚硫酸钠、1 mol/L β-巯基乙醇、40 mmol/L三氟乙酸的溶液混合进行衍生，于4℃避光衍生48 h。用超纯水稀释5倍后过滤备用。

检测条件：色谱柱：Waters Symmetry C<sub>18</sub>柱（250 mm×4.6 mm，5 μm）；柱温30℃；荧光检测器激发波长373 nm，发射波长448 nm；流动相为甲醇-乙腈-超纯水（7:5:88，V/V）；流速0.9 mL/min；进样体积10 μL。

通过比较标准品溶液及样品中游离态Neu5Gc保留时间进行定性，用标准品溶液所得色谱峰响应值绘制标准曲线，根据待测组分的峰面积，利用外标法计算样品中游离态Neu5Gc含量。结合态Neu5Gc含量按下式计算。

$$C_0 = C_2 - C_1$$

式中： $C_0$ 为结合态Neu5Gc含量/（μg/g）； $C_1$ 为游离态Neu5Gc含量/（μg/g）； $C_2$ 为总Neu5Gc含量/（μg/g）。

### 1.3.5 猪肉块和肉糜pH值测定

将pH计与猪肉块和肉糜充分接触，待数值稳定后，读取并记录数据。每组重复测定3次，计算平均值。

### 1.3.6 猪肉块和肉糜色泽测定

PEF处理后的猪肉块和肉糜放入培养皿中，随机选取5点测定亮度（ $L^*$ ）、红度（ $a^*$ ）、黄度（ $b^*$ ）值。

### 1.3.7 猪肉块和肉糜质构特性测定

将猪肉块和肉糜切成2 cm×2 cm×1 cm的小块，使用食品物性测试仪对其质构特性进行测定，每组5个平行。检测参数：P/36R探头、测前速率1 mm/s、测中速率2 mm/s、测后速率2 mm/s、触发力5.0 g、应变50.0%、时间5.00 s。

## 1.4 数据处理与分析

使用SPSS Statistics 25软件对实验数据进行方差分析（以 $P < 0.05$ 表示差异显著），每组实验3个平行。采用GraphPad Prism 8.0软件作图。

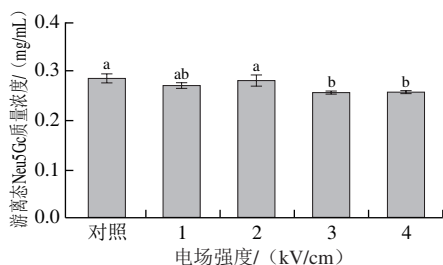
## 2 结果与分析

### 2.1 PEF对Neu5Gc标准品水溶液和PSM溶液中游离态Neu5Gc和结合态Neu5Gc含量的影响

由图1可知，在Neu5Gc标准品水溶液中，与对照组相比，在1 kV/cm和2 kV/cm电场强度下，PEF处理后游离态Neu5Gc质量浓度无显著变化（ $P > 0.05$ ），当电场强度



增加到3 kV/cm以上时, 游离态Neu5Gc质量浓度显著下降 ( $P<0.05$ ), 从对照组的0.29 mg/mL下降至0.26 mg/mL。



小写字母不同表示组间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

图1 PEF处理对Neu5Gc标准品水溶液中游离态Neu5Gc质量浓度的影响

Fig. 1 Effect of PEF treatment on the content of free Neu5Gc in Neu5Gc standard solution

由图2可知, PSM中含有大量结合态Neu5Gc, PEF处理后, 随着电场强度的增加, PSM溶液中总Neu5Gc质量浓度显著下降 ( $P<0.05$ ), 从49.66  $\mu\text{g/mL}$ 下降至4.55  $\mu\text{g/mL}$ , 游离态Neu5Gc质量浓度从3.36  $\mu\text{g/mL}$ 下降至0.45  $\mu\text{g/mL}$ 。PSM中结合态Neu5Gc质量浓度显著下降 ( $P<0.05$ ), 从46.30  $\mu\text{g/mL}$ 下降至1.19  $\mu\text{g/mL}$ 。

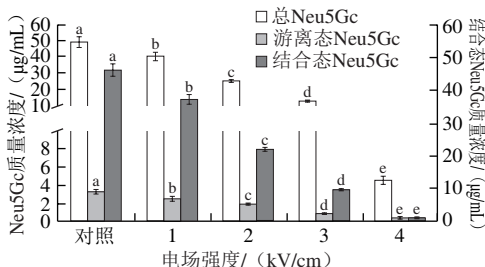


图2 PEF处理对PSM水溶液中Neu5Gc质量浓度的影响

Fig. 2 Effect of PEF treatment on the content of Neu5Gc in PSM solution

在红肉中, Neu5Gc主要以结合态的形式存在, 游离态Neu5Gc含量很少。根据Banda等<sup>[19]</sup>的报道, 结合态Neu5Gc会在人体内沉积, 而游离态Neu5Gc则随着人体代谢排出, 因此对人体健康产生危害的主要为结合态Neu5Gc。由于Neu5Gc主要存在于糖蛋白上, 目前尚未有成熟的结合态Neu5Gc定量检测方法, 最常见的方法是将结合态Neu5Gc解离成游离态Neu5Gc, 采用液相色谱法测定总Neu5Gc含量和游离态Neu5Gc含量, 通过这种间接的方法分析结合态Neu5Gc含量的变化。

游离态Neu5Gc属于氨基糖, 具有较强的稳定性, 在分子内可形成3个较强的氢键, 这可能是其稳定的原因, 破坏其结构可能需要更高的电场强度<sup>[20-21]</sup>。在PSM中, 大部分Neu5Gc存在于蛋白质寡糖链上, 两者以共价键相连。据报道, PEF能诱导蛋白质的某些修饰, 如折叠、聚集, 从而改变蛋白结构和功能特性, 这可能是PSM中结合态Neu5Gc含量降低的原因<sup>[22-23]</sup>。研究表明, 当电场强度

超过35 kV/cm时, 大豆分离蛋白二级结构中的氨基酸侧链、反平行 $\beta$ -折叠、 $\beta$ -折叠和 $\beta$ -转角相对含量发生显著改变<sup>[24]</sup>。这也证明了PEF具有改变蛋白质结构的能力, 但是PEF处理后PSM中结合态Neu5Gc结构变化情况仍然未知, 其解离机制还需进一步研究。

## 2.2 PEF对猪肉中Neu5Gc含量的影响

由图3可知, 与对照组相比, 肉块中总Neu5Gc含量呈下降趋势, 在4 kV/cm时显著下降 ( $P<0.05$ ), 从对照组的6.41  $\mu\text{g/g}$ 下降到4.46  $\mu\text{g/g}$ 。肉块中结合态Neu5Gc含量整体呈下降趋势, 在4 kV/cm时其含量低于其他处理组, 从对照组的4.16  $\mu\text{g/g}$ 下降到2.21  $\mu\text{g/g}$ 。

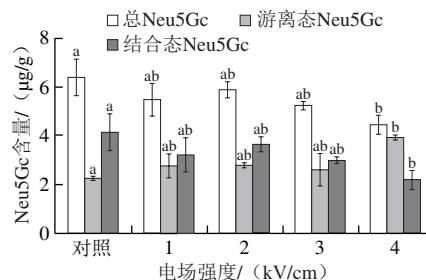


图3 PEF处理对猪肉块中Neu5Gc含量的影响

Fig. 3 Effect of PEF treatment on the content of Neu5Gc in meat pieces

为探究将猪肉块结构破坏后再进行PEF处理对Neu5Gc含量的影响与肉块是否不同, 将猪肉块绞成肉糜再进行PEF处理。由图4可知, 与对照组相比, PEF处理后肉糜中总Neu5Gc含量显著降低 ( $P<0.05$ ), 从对照组的10.39  $\mu\text{g/g}$ 下降到4 kV/cm时的5.63  $\mu\text{g/g}$ 。肉糜中游离态Neu5Gc含量仅1 kV/cm PEF处理组与对照组相比有显著差异 ( $P<0.05$ ), 其他电场强度组与对照组相比无显著差异 ( $P>0.05$ )。PEF处理后肉糜中结合态Neu5Gc含量显著下降 ( $P<0.05$ ), 从8.87  $\mu\text{g/g}$ 下降到了4.11  $\mu\text{g/g}$ 。在4 kV/cm时, 猪肉块和肉糜中结合态Neu5Gc含量均较对照组显著下降 ( $P<0.05$ ), 但是PEF处理对肉糜中结合态Neu5Gc解离的效果较肉块好。从猪肉块和肉糜中Neu5Gc含量变化情况可知, PEF处理能一定程度降低猪肉中Neu5Gc含量, 但是其降低程度低于PSM溶液中结合态Neu5Gc降低程度。

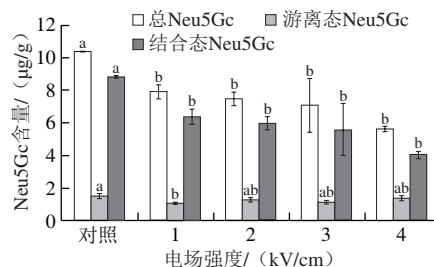


图4 PEF处理对猪肉糜中Neu5Gc含量的影响

Fig. 4 Effect of PEF treatment on the content of Neu5Gc in minced meat

相比于水溶液,猪肉含有结缔组织、脂肪组织和肌肉组织等,PEF在猪肉中产生的影响也更复杂。PEF处理猪肉时,由于细胞膜电阻比细胞内和细胞外液中的电解质高,因此电场主要作用于细胞膜,导致细胞膜磷脂双层被击穿并破坏细胞膜上的蛋白质,存在于猪肉细胞膜蛋白聚糖链末端的Neu5Gc也受到破坏,这可能是PEF处理使猪肉中结合态Neu5Gc解离的主要原因<sup>[25-26]</sup>。PEF在猪肉糜中的作用情况较肉块更复杂,PEF技术降低肉糜中结合态Neu5Gc含量的效果要比肉块好的原因、猪肉中Neu5Gc和与其相连的蛋白在PEF作用下结构的变化规律以及是否还存在影响Neu5Gc含量的其他因素,还有待进一步研究。

### 2.3 PEF对猪肉pH值的影响

由图5可知,1 kV/cm PEF处理后猪肉块的pH值与对照组相比无显著变化( $P>0.05$ )。Chian等<sup>[27]</sup>使用1.00~1.25 kV/cm的电场强度对牛胸最长肌进行PEF处理,发现pH值无显著改变,与本实验中1 kV/cm PEF处理猪肉的结果一致。经2 kV/cm和4 kV/cm PEF处理后,猪肉块的pH值与对照组相比差异显著( $P<0.05$ )。PEF处理肉糜后,1 kV/cm以上电场强度组的pH值与对照组相比均有显著差异( $P<0.05$ )。猪肉pH值的改变可能是由于PEF处理引起肉块和肉糜中蛋白质水解导致肽的释放<sup>[28]</sup>。

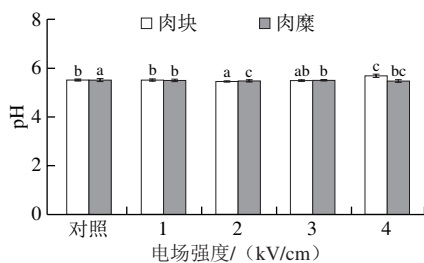


图5 PEF处理对猪肉块和肉糜pH值的影响

Fig. 5 Effect of PEF treatment on pH of meat pieces and minced meat

### 2.4 PEF对猪肉色泽的影响

由图6可知,随着电场强度增加,猪肉块的 $L^*$ 值呈上升趋势,在2 kV/cm以上的电场强度组的 $L^*$ 值与对照组相比均有显著差异( $P<0.05$ )。1 kV/cm PEF处理后猪肉块的 $a^*$ 值与对照组相比差异显著( $P<0.05$ ),其他电场强度组与对照组相比无显著差异( $P>0.05$ ),但随着电场强度增加呈上升趋势。与对照组相比,PEF处理后猪肉块的 $b^*$ 值均无显著性差异( $P>0.05$ )。3 kV/cm PEF处理后猪肉糜的 $L^*$ 值与对照组相比显著增加( $P<0.05$ )。猪肉糜 $a^*$ 值仅在1 kV/cm和2 kV/cm PEF处理后与对照组相比显著升高( $P<0.05$ )。在3 kV/cm PEF处理后猪肉糜的 $b^*$ 值较对照组显著降低( $P<0.05$ )。

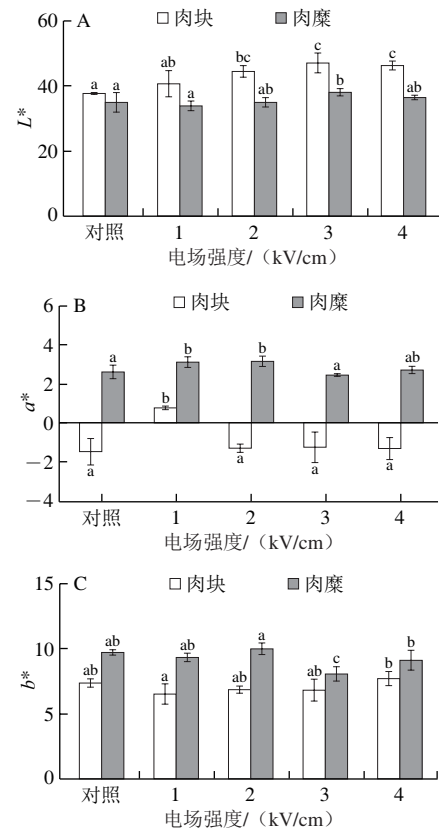


图6 PEF处理对猪肉块和肉糜 $L^*$  (A)、 $a^*$  (B) 和 $b^*$  (C) 值的影响  
Fig. 6 Effect of PEF treatment on the  $L^*$  (A),  $a^*$  (B) and  $b^*$  (C) values of meat pieces and minced meat

肉色是决定肉类感官品质的主要因素,PEF技术对肉色的影响主要取决于处理过程中温度升高的幅度,低脉冲电场(2.5 kV、200 Hz)处理后鸡肉的平均温度升高3.1 °C,高脉冲电场(10 kV、200 Hz)处理后鸡肉的平均温度升高17.1 °C,肉中的电阻和电导率越高、处理时间越长,升温越高,产生欧姆加热效应越强,导致色泽改变<sup>[29-30]</sup>。研究证明低电场强度(0.66、1.38、2.00 kV/cm)的PEF处理对鲜肉的 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 值没有显著影响<sup>[31-32]</sup>。本研究用低于2 kV/cm的电场强度处理猪肉,对猪肉 $L^*$ 和 $b^*$ 值无显著影响。

### 2.5 PEF对猪肉质构特性的影响

由图7可知,在0~4 kV/cm电场强度范围内,猪肉块的硬度、咀嚼性、弹性和黏聚性均呈先下降再上升的趋势。PEF处理后猪肉块的硬度较对照组低,并在2 kV/cm时显著低于对照组( $P<0.05$ )。猪肉块的咀嚼性、弹性和黏聚性在1~3 kV/cm PEF处理后均显著低于对照组( $P<0.05$ )。随着电场强度增加,猪肉糜的硬度和咀嚼性呈下降趋势,分别在4 kV/cm和3 kV/cm PEF处理后显著低于对照组( $P<0.05$ )。不同电场强度PEF处理后肉糜的弹性无显著变化( $P>0.05$ )。仅在1 kV/cm PEF处理后猪肉糜的黏聚性显著高于对照组( $P<0.05$ )。Jeong等<sup>[33]</sup>

用PEF处理新鲜牛肉,发现牛肉的嫩化与电场强度的增加成正比,表明PEF能够改善肉的质构,提高肉品质。

### 3 结论

本实验研究PEF技术对猪肉中Neu5Gc和对猪肉pH值、色泽和质构特性的影响。猪肉中Neu5Gc分为结合态和游离态,其在肉中主要以结合态形式存在,且结合态Neu5Gc会危害人体健康,因此主要观察结合态Neu5Gc的含量变化规律。用PEF技术处理富含结合态Neu5Gc的PSM溶液和游离态Neu5Gc标准品溶液的结果表明,处理后PSM中结合态Neu5Gc质量浓度显著下降,从对照组的46.30 μg/mL下降到4 kV/cm的1.19 μg/mL,两者游离态Neu5Gc质量浓度都呈下降趋势。在PEF处理猪肉后,结合态Neu5Gc的降低程度没有PSM的明显。猪肉块中结合态Neu5Gc含量仅在4 kV/cm PEF处理后显著降低,PEF处理后猪肉糜中结合态Neu5Gc含量均显著比对照组低,且随电场强度增加呈下降趋势。肉类结构复杂,结合态Neu5Gc在PEF作用下的变化机制还需进一步研究,这有助于更有效地降低肉中结合态Neu5Gc,降低红肉生物危害性。此外,虽然在一定电场强度下PEF技术对猪肉的pH值和色泽有影响,但其能显著降低猪肉块的咀嚼性和弹性,在肉类加工中具有较大的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(10): 1660-1674. DOI:10.1080/10408398.2018.1425825.
- [2] ZHANG S M, SUN L Z, JU H P, et al. Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food[J]. *Food Research International*, 2021, 139: 109914. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109914.
- [3] 熊强,董智勤,朱芳州.脉冲电场技术在食品工业上的应用进展[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(2): 326-339; 255. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.2.0428.
- [4] ARROYO C, ESLAMI S, BRUNTON N P, et al. An assessment of the impact of pulsed electric fields processing factors on oxidation, color, texture, and sensory attributes of turkey breast meat[J]. *Poultry Science*, 2015, 94(5): 1088-1095. DOI:10.3382/ps/pev097.
- [5] KANTONO K, HAMID N, MA Q L, et al. Changes in physicochemical properties of chilled and frozen-thawed lamb cuts treated subjected to pulsed electric field processing[J]. *Food Research International*, 2021, 141: 110092. DOI:10.1016/j.foodres.2020.110092.
- [6] ASTRAIN-REDIN L, RASO J, CEBRIAN G, et al. Potential of pulsed electric fields for the preparation of Spanish dry-cured sausages[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16042. DOI:10.1038/s41598-019-52464-3.
- [7] 陈星,沈清武,王燕,等.新型腌制技术在肉制品中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(2): 345-351. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.055.
- [8] KANTONO K, HAMID N, OEY I, et al. Physicochemical and sensory properties of beef muscles after pulsed electric field processing[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 1-11. DOI:10.1016/j.foodres.2019.03.020.

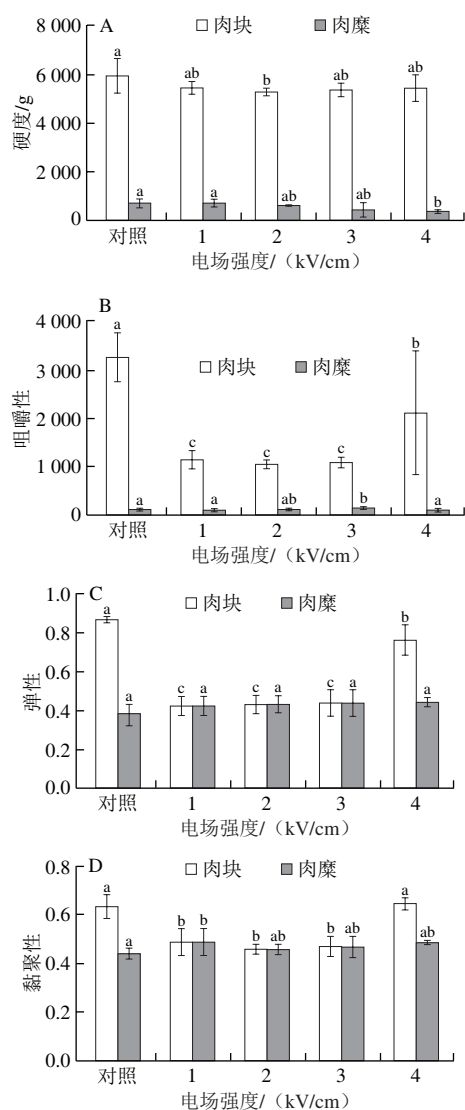


图7 PEF处理对肉块和肉糜硬度(A)、咀嚼性(B)、弹性(C)和黏聚性(D)的影响

Fig. 7 Effect of PEF treatment on the hardness (A), chewiness (B), elasticity (C) and cohesiveness (D) of meat pieces and minced meat

PEF改善猪肉品质可能是因为在处理过程中,猪肉细胞中的钙离子被释放并激活钙蛋白酶,促进了钙蛋白酶活性,导致猪肉的肌纤维和结缔组织破坏和蛋白质降解<sup>[34-36]</sup>。然而,其他因素如溶酶体释放的组织蛋白酶、钙释放引起的糖酵解加速和肌肉的物理损伤均有可能影响嫩度<sup>[1]</sup>。Bhat等<sup>[31]</sup>研究发现,PEF处理后牛肉中钙蛋白酶2活性增加,结蛋白和肌钙蛋白-T的蛋白水解增加。Chian等<sup>[27]</sup>研究PEF对牛肉肌肉超微结构的影响,发现PEF处理后牛肉的Z盘和I带减弱,导致其肌节比对照长25%~38%,这表明PEF处理导致肌肉纤维的物理破坏。总之,PEF能够提高肉的嫩度,改善肉的品质。

- [9] MCDONNELL C K, ALLEN P, CHARDONNEREAU F S, et al. The use of pulsed electric fields for accelerating the salting of pork[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1054-1060. DOI:10.1016/j.lwt.2014.05.053.
- [10] SEO N, KO J, LEE D, et al. In-depth characterization of non-human sialic acid (Neu5Gc) in human serum using label-free ZIC-HILIC/MRM-MS[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2021, 413(20): 1-11. DOI:10.1007/S00216-021-03495-1.
- [11] MARTIN P T, KAWANISHI K, ASHBROOK A, et al. Serum antibodies to *N*-glycolylneuraminic acid are elevated in duchenne muscular dystrophy and correlate with increased disease pathology in *Cmah*<sup>-/-</sup> mdx mice[J]. The American Journal of Pathology, 2021, 191(8): 1474-1486. DOI:10.1016/j.ajpath.2021.04.015.
- [12] PAN An, SUN Qi, BERNSTEIN A M, et al. Red meat consumption and risk of type 2 diabetes: 3 cohorts of US adults and an updated meta-analysis[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2011, 94(4): 1088-1096. DOI:10.3945/ajcn.111.018978.
- [13] MICHA R, WALLACE S K, MOZAFFARIAN D. Red and processed meat consumption and risk of incident coronary heart disease, stroke, and diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis[J]. Circulation, 2010, 121(21): 2271-2283. DOI:10.1161/CIRCULATIONAHA.109.924977.
- [14] SAMRAJ A N, PEARCE O M T, LAUBLI H, et al. A red meat-derived glycan promotes inflammation and cancer progression[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(2): 542-547. DOI:10.1073/pnas.1417508112.
- [15] KAWANISHI K, DHAR C, DO R, et al. Human species-specific loss of CMP-*N*-acetylneuraminic acid hydroxylase enhances atherosclerosis via intrinsic and extrinsic mechanisms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(32): 16036-16045. DOI:10.1073/pnas.1902902116.
- [16] XU A Q, CHANG R, ZHU Q J. Effect of electrical stimulation on red meat Neu5Gc content reduction: a combined experimental and DFT study[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(4): 982-991. DOI:10.1016/j.fshw.2022.03.023.
- [17] 郑婉婷, 何恩祺, 何荣鑫, 等. 肉制品中唾液酸含量和形态分析及在加工中的变化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 100-107. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.10.0520.
- [18] 梁美莲, 朱秋劲, 刘春丽, 等. 不同加工处理方式对牛肉中Neu5Gc解离的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 28-34. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201810005.
- [19] BANDA K, GREGG C J, CHOW R, et al. Metabolism of vertebrate amino sugars with *N*-glycolyl groups: mechanisms underlying gastrointestinal incorporation of the non-human sialic acid xeno-autoantigen *N*-glycolylneuraminic acid[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2012, 287(34): 28852-28864. DOI:10.1074/jbc.M112.364182.
- [20] 常瑞, 梁美莲, 周樱子, 等. *N*-羟乙酰神经氨酸分子的结构性质[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 7-15. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201823002.
- [21] 蓝丽, 陈昱锟, 谭立清, 等. 氨基糖的性质、应用及市场前景[J]. 大众科技, 2022, 24(1): 44-47.
- [22] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Pulsed electric field: role in protein digestion of beef Biceps femoris[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 50: 132-138. DOI:10.1016/j.ifset.2018.09.006.
- [23] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Pulsed electric field improved protein digestion of beef during *in-vitro* gastrointestinal simulation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 102: 45-51. DOI:10.1016/j.lwt.2018.12.013.
- [24] LIU Yanyan, ZENG Xinan, DENG Zhiping, et al. Effect of pulsed electric field on the secondary structure and thermal properties of soy protein isolate[J]. European Food Research and Technology, 2011, 233(5): 841-850. DOI:10.1007/s00217-011-1580-z.
- [25] GOMEZ B, MUNEKATA P E S, GAVAHIAN M, et al. Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: an overview[J]. Food Research International, 2019, 123: 95-105. DOI:10.1016/j.foodres.2019.04.047.
- [26] HUANG Feiran, FANG Zhihui, MAST J, et al. Comparison of membrane electroporation and protein denature in response to pulsed electric field with different durations[J]. Bioelectromagnetics, 2013, 34(4): 253-263. DOI:10.1002/bem.21773.
- [27] CHIAN F M, KAUR L, OEY I, et al. Effect of pulsed electric fields (PEF) on the ultrastructure and *in vitro* protein digestibility of bovine longissimus thoracis[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 103: 253-259. DOI:10.1016/j.lwt.2019.01.005.
- [28] KHAN A H, RANDHAWA M A, CARNE A, et al. Quality and nutritional minerals in chicken breast muscle treated with low and high pulsed electric fields[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(1): 122-131. DOI:10.1007/s11947-017-1997-x.
- [29] BALDI G, DELIA F, SOGLIA F, et al. Exploring the effect of pulsed electric fields on the technological properties of chicken meat[J]. Foods, 2021, 10(2): 241. DOI:10.3390/FOODS10020241.
- [30] KHAN A K, RANDHAWA M A, CARNE A, et al. Effect of low and high pulsed electric field processing on macro and micro minerals in beef and chicken[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 45: 273-279. DOI:10.1016/j.ifset.2017.11.012.
- [31] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Pulsed electric field operates enzymatically by causing early activation of calpains in beef during ageing[J]. Meat Science, 2019, 153: 144-151. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.03.018.
- [32] LUO Qian, HAMID N, OEY I, et al. Physicochemical changes in New Zealand abalone (*Haliotis iris*) with pulsed electric field (PEF) processing and heat treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 115: 108438. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108438.
- [33] JEONG S H, KIM E C, LEE D U. The impact of a consecutive process of pulsed electric field, sous-vide cooking, and reheating on the properties of beef semitendinosus muscle[J]. Foods, 2020, 9(11): 1674. DOI:10.3390/foods9111674.
- [34] ALAHAKOON A U, OEY I, BREMER P, et al. Optimisation of sous vide processing parameters for pulsed electric fields treated beef briskets[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(11): 2055-2066. DOI:10.1007/s11947-018-2155-9.
- [35] BEKHIT A E D A, VEN R, SUWANDY V, et al. Effect of pulsed electric field treatment on cold-boned muscles of different potential tenderness[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(11): 3136-3146. DOI:10.1007/s11947-014-1324-8.
- [36] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Effect of pulsed electric field on calpain activity and proteolysis of venison[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 52: 131-135. DOI:10.1016/j.ifset.2018.11.006.