

引用格式:

周吉仙, 林颖, 李宗军, 戴奕杰, 扈麟, 侯爱香. 不同解冻方式的牛肉品质比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 104–110.

ZHOU J X, LIN Y, LI Z J, DAI Y J, HU L, HOU A X. Quality comparison of beef thawed by different methods[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(5): 104–110.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 不同解冻方式的牛肉品质比较

周吉仙<sup>1</sup>, 林颖<sup>1</sup>, 李宗军<sup>1</sup>, 戴奕杰<sup>2</sup>, 扈麟<sup>1</sup>, 侯爱香<sup>1\*</sup>

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 贵阳学院生物与环境工程学院, 贵州 贵阳 550005)

**摘要:** 以澳大利亚谷饲牛肉为研究对象, 采用低频电场解冻、常温解冻、流水解冻和冰箱解冻4种解冻方式解冻冷冻牛肉, 考察不同解冻方式对牛肉的pH、色差、持水力、质构特性以及挥发性盐基氮(TVB-N)、游离氨基酸和可溶性蛋白质质量分数的影响, 并通过扫描电镜观察肌肉微观结构的完整性, 从而对比4种解冻方法对牛肉品质的影响。结果表明: 相较于其他3种解冻方式, 电场解冻的牛肉pH接近鲜肉pH(6.00); 亮度L\*最大, 为48.46; 离心损失率和滴水损失率均最小, 分别为21.53%和1.93%; 硬度、弹性和咀嚼性皆最大, 分别为8 784.61 g、0.86 和2 704.82 g; TVB-N的质量分数最低, 为5.13 mg/100 g; 可溶性蛋白质质量分数最高, 为74.67 mg/g; 甜味氨基酸占比最高, 且苦味氨基酸占比最低。扫描电镜结果表明, 低频电场解冻后的牛肉肌肉原始组织结构完整。综上可知, 采用低频电场解冻的方式可以减少牛肉在解冻过程中的损失, 保持新鲜品质和原始风味。

**关键词:** 牛肉品质; 低频电场; 解冻方式; 扫描电镜

中图分类号: TS251.5<sup>+2</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)05-0104-07

## Quality comparison of beef thawed by different methods

ZHOU Jixian<sup>1</sup>, LIN Ying<sup>1</sup>, LI Zongjun<sup>1</sup>, DAI Yijie<sup>2</sup>, HU Lin<sup>1</sup>, HOU Aixiang<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. College of Biology and Environmental Engineering, Guiyang College, Guiyang, Guizhou 550005, China)

**Abstract:** Using Australian grain-fed beef as the subject of study, four thawing methods, i.e., low-frequency electric field thawing, room temperature thawing, running water thawing and refrigerator thawing were applied to frozen beef. The impact of these methods on pH, color difference, water-holding capacity, texture properties, total volatile basic nitrogen(TVB-N) mass fraction, free amino acids, and soluble protein content was examined. The integrity of the muscle microstructure was observed using scanning electron microscopy to compare the effects of the four thawing methods on beef quality. The results showed that, among the four methods, low-frequency electric field thawing resulted in a pH closest to that of fresh meat(6.00). The L\* was the highest at 48.46, while centrifugal loss and drip loss were the lowest, at 21.53% and 1.93%, respectively. Hardness, springiness, and chewiness were the highest, recorded at 8 784.61 g, 0.86, and 2 704.82 g, respectively. The TVB-N mass fraction was the lowest at 5.13 mg/100 g, and the soluble protein mass fraction was the highest at 74.67 mg/g. The proportion of sweet amino acids was the highest, while the proportion of bitter amino acids was the lowest. Scanning electron microscopy results revealed that the original muscle structure of beef thawed by low-frequency electric field remained intact. In conclusion, low-frequency electric field thawing can reduce quality loss during the thawing process and maintain the fresh quality and original flavor of beef.

**Keywords:** beef quality; low-frequency electric field; thawing method; scanning electron microscope

牛肉具有丰富的营养物质, 在贮存和加工过程中, 由于微生物和酶的存在, 牛肉易发生腐败变质。

收稿日期: 2024-11-16

修回日期: 2025-02-19

基金项目: 湖南省重点研发计划(2022NK2035); 贵阳市科技计划项目(筑科合同〔2024〕2-3号)

作者简介: 周吉仙(2001—), 女, 云南昭通人, 硕士研究生, 主要从事食品生物技术研究, 3148034686@qq.com; \*通信作者, 侯爱香, 博士, 副教授, 主要从事食品生物技术研究, aixianghou@163.com

冷冻对肉类保存至关重要, 它通过降低温度、抑制微生物的生长和酶的活性来减缓肉类的变质。解冻操作在肉类加工过程中必不可少, 不恰当的解冻技术会对牛肉产生较大危害, 导致营养成分流失、口感品质下降、风味特征改变, 并且为微生物的滋生创造有利条件, 从而对食品安全构成潜在威胁<sup>[1]</sup>。因此, 选择适宜的解冻方法尤为重要。

在肉类工业生产中, 流水解冻因操作简单、成本低而得到广泛应用, 但采用该方法解冻不仅会造成较大的汁液损失, 还会产生大量的工业废水<sup>[2]</sup>, 这与绿色加工技术的现实需求相悖。探索新的解冻技术是实现肉类加工高质量发展的重要途径。低频静电场解冻技术具有能耗低、效率高、设备成本低、操作简单、营养物质损失少等优势<sup>[3]</sup>。李侠等<sup>[4]</sup>发现低频静电场解冻能有效减少肉在解冻过程中的汁液流失情况, 同时提高嫩度。马坚<sup>[5]</sup>研究发现高压静电场明显缩短了牛肉里脊的解冻时间, 更好地保持了肉类的品质。王丽等<sup>[6]</sup>探究发现低频电场解冻后猪肉的pH、色泽和持水力等理化指标都优于传统解冻方式下的, 且解冻速率高, 微观结构较完整。LUNG等<sup>[7]</sup>通过研究脉冲电场解冻对鸭肉品质的影响, 发现解冻损失减少了19%, 且肉质新鲜, 肌肉组织的保水能力稳定。目前, 已有较多学者开展传统解冻方法对肉类品质影响的研究<sup>[8]</sup>, 但相关研究多集中在实验室阶段, 工业应用较少, 且以牛肉为解冻对象的研究不足。

本研究以牛肉为研究对象, 探究低频电场解冻、常温解冻、流水解冻、冰箱解冻4种解冻方式对牛肉pH、色差、持水力、质构特性以及挥发性盐基氮TVB-N、游离氨基酸和可溶性蛋白质质量分数的影响, 以期为工业生产中选择恰当的解冻技术提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要试验材料与试验设备

试验采用澳大利亚谷饲新鲜的牛背最长肌, 购自沃尔玛(湖南)商业零售有限公司。主要试剂包括浓硫酸、浓盐酸、氯化钠、戊二醛、甲基红、亚甲基蓝、乙醇、丙酮、氧化镁、硼酸、三氯乙酸, 均购自国药集团化学试剂有限公司, 所有试剂纯度均为分析纯。

主要的仪器包括酶标仪(Spectra Max® ABSPlu,

美谷分子仪器(上海)有限公司); 全自动氨基酸分析仪(L-8900型, 日立(中国)有限公司); 扫描电镜(JSM-6380LV, 日本电子株式会社); 食品物性测试仪(TA-XT plus, 英国Stable Micro Systems公司); 低频电场解冻设备(呼和浩特市绿碧电子科技有限公司)。

### 1.2 原料处理

除去原料肉表面的筋腱组织和脂肪, 将其分割成6 cm×8 cm×6 cm的块状, 置于标记的密封袋中, 在-18 ℃下冷冻48 h。从中随机抽取4组牛肉进行解冻, 4种解冻方式皆以肉块中心温度达到4 ℃为解冻终点。

### 1.3 样品解冻

常温解冻: 将冷冻牛肉放入25 ℃的培养箱中解冻, 解冻时间为360 min。

流水解冻: 将冻结肉样置于25 ℃、流速为3.6 L/min的流水中解冻, 解冻时间为50 min。

冰箱解冻: 将冻结的肉样放在0~4 ℃冰箱内进行解冻, 解冻时间为600 min。

低频电场解冻: 将肉样置于低频解冻设备中解冻, 解冻时间为420 min。

### 1.4 pH测定

参考GB 5009.237—2016中的方法<sup>[9]</sup>测定pH。

### 1.5 色度测定

参照张莉等<sup>[10]</sup>的方法测定色泽。擦干解冻牛肉表面的水分, 对色差仪进行校准后, 使肉与色差仪充分接触, 测定样品的亮度( $L^*$ )、红度( $a^*$ )及黄度( $b^*$ ), 每个样品测定6次, 结果取其平均值。

### 1.6 持水力测定

参考LI等<sup>[11]</sup>的方法, 将去掉表面水分后的解冻牛肉的质量记为 $m_1$ , 然后将牛肉放入离心管中, 在温度为4 ℃、转速为5 000 r/min的条件下离心25 min, 将离心后的牛肉质量记为 $m_2$ , 据此计算离心损失率:

$$L = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

参考雷露等<sup>[12]</sup>的方法, 计算滴水损失率:

$$D = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $m_3$ 为试验前的肉样质量, g;  $m_4$ 为24 h后的肉样质量, g。

### 1.7 挥发性盐基氮的测定

参考GB 5009.228—2016中的方法<sup>[13]</sup>测定挥发性盐基氮。

### 1.8 质构特性测定

将解冻后的牛肉切为2.0 cm×2.0 cm×1.0 cm的块状, 使用TA-XT plus食品物性测试仪测定其质构特性。

### 1.9 可溶性蛋白质质量分数的测定

参考GB/T 5009.5—2025, 采用双缩脲法测定牛肉中可溶性蛋白质质量分数。

### 1.10 游离氨基酸质量分数的测定

参考陈伟<sup>[14]</sup>的方法, 取5 g解冻后的牛肉与12 mL的去离子水, 混匀, 冷冻离心, 取上清液, 加入1 mL丙酮, 快速摇荡5 min, 使蛋白质变性, 再进行冷冻离心, 取上清液, 干燥后重悬于1 mL 0.02 mol/L的HCl溶液中。上机前过孔径为0.22 μm的滤膜, 以氨基酸混合物标准溶液作为外标, 采用L-8900全自动氨基酸分析仪检测上清液中游离氨基酸的质量分数。

### 1.11 扫描电镜试验

参考TAKEI等<sup>[15]</sup>的方法, 取解冻后的牛肉, 切成5 mm×5 mm×5 mm的立方块, 先用2.5%戊二醛固定液(电镜专用)固定, 再用戊二酸-锇酸进行双固定, 然后用乙醇溶液脱水, 最后用二氧化碳临界点干燥法进行干燥。

### 1.12 数据分析

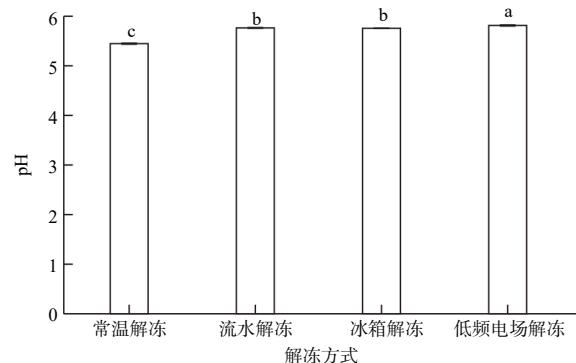
运用Origin 8.5进行数据处理, 运用SPSS 27.0进行显著性分析和差异比较, 采用Grapher绘图。各试验重复3次, 数据以均值±标准偏差的形式表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 对牛肉pH的影响

牛肉pH下降会导致牛肉品质降低, 肌肉松弛, 弹性小, 色泽差。生鲜牛肉pH在6.0左右, 解冻后牛肉的pH降低, 肉的保水性也会降低<sup>[16–17]</sup>。由图1可知, 使用4种解冻方式解冻后牛肉的pH均小于

6.00, 与常温解冻相比, 采用其余3种解冻方式解冻后牛肉的pH更接近鲜肉。而使用低频电场解冻后的牛肉的pH最高, 为5.84, 与鲜肉pH接近, 说明牛肉的新鲜度更好。本研究结果表明, 低频电场解冻对牛肉的蛋白质分解变性的影响较小, 这与赵瑞等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。使用低频电场解冻牛肉时, 改变电场强度, 各实验组的牛肉pH无差异, 说明电场强度对牛肉的pH影响较小。



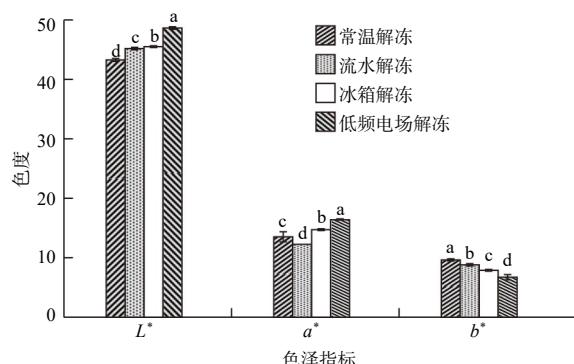
不同小写字母表示不同解冻方式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

图1 解冻方式对牛肉pH的影响

Fig. 1 Effects of thawing method on the pH of beef

### 2.2 对牛肉色泽的影响

牛肉的颜色在一定程度上反映了牛肉的品质, 牛肉色泽会给消费者留下直观印象<sup>[19]</sup>。由图2可知: 低频电场解冻后牛肉的亮度 $L^*$ 最大, 为48.46; 常温解冻后 $L^*$ 最小, 为42.90; 流水解冻与冰箱解冻后的 $L^*$ 分别为44.79、45.16; 与常温解冻相比, 电场解冻能阻止肌红蛋白与氧结合, 延缓高铁肌红蛋白的产生, 故肉的色泽更好。从红度 $a^*$ 和黄度 $b^*$ 来看, 低频电场解冻后牛肉的 $a^*$ 最高, 为16.31, 常温解冻后 $a^*$ 为13.14, 冰箱解冻后 $a^*$ 为14.58, 流水解冻后 $a^*$ 最低, 为12.08; 低频电场解冻后牛肉的 $b^*$ 最低, 为6.71, 冰箱解冻后的 $b^*$ 为7.91, 流水解冻和常温解冻后的 $b^*$ 分别为8.67和9.53。对4种解冻方式解冻后牛肉的色泽进行分析, 结果显示, 相较于传统解冻, 低频电场解冻后牛肉的色泽较好。乔雪等<sup>[20]</sup>研究发现, 低压静电场解冻后的牛肉与新鲜组的无显著差异, 说明低压静电场辅助解冻有利于维持牛肉的色泽。唐树培等<sup>[21]</sup>研究发现, 随着电场强度的增加, 实验组肉的色泽更新鲜。在解冻过程中, 肉的 $L^*$ 下降是因为解冻损失引起的微观结构发生变化以及光反射率下降。电场解冻的肉样含水率较高, 提高了光线的折射率, 从而使得肉样表面亮度增加<sup>[22]</sup>。



不同小写字母表示不同解冻方式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

图2 解冻方式对牛肉色泽的影响

Fig. 2 Effects of different thawing methods on the color of beef

### 2.3 对牛肉持水力的影响

持水力(离心损失率、滴水损失率)与肉类的质量密切相关,是评价牛肉制品中蛋白质变性程度的关键指标<sup>[23]</sup>。由表1可知,4种解冻方式下的牛肉持水力具有显著性差异,其中低频电场解冻后总损失率最小,为23.46%;常温解冻总损失率最高,为31.67%。这可能是因为:1)在低频电场解冻中,牛肉的肌原纤维结构会发生变化以维持牛肉的持水力;2)电场会使得肌肉中的蛋白质展开,暴露出更多亲水基团,增加蛋白质与水的结合能力,从而保持肉的持水能力<sup>[24]</sup>。此外,在解冻的过程中,随着冰晶的融化,细胞内亲水胶质体吸收水分,使得水分逐渐向细胞内渗透和扩散<sup>[6]</sup>。李侠等<sup>[4]</sup>采用电场解冻牛背最长肌,发现在电场中牛肉能更快通过冰晶生成带,显著提高了解冻速率,且肌束膜结构较完整,汁液损失率低。从经济效益上来看,以1t牛肉(市场价格为80元/kg)为例,相较于流水解冻,采用低频电场解冻可节约4 120元。

表1 解冻方式对牛肉持水力的影响

Table 1 Effects of different thawing methods on water holding capacity of beef

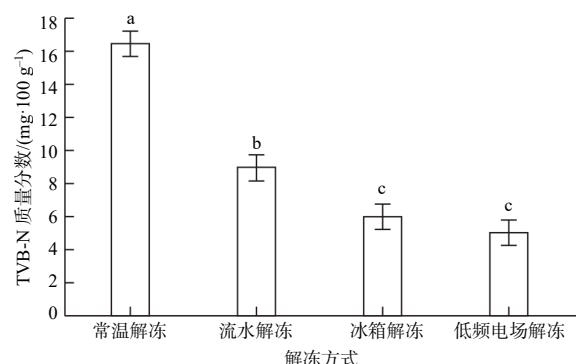
解冻方式	离心损失率/%	滴水损失率/%	总损失率/%
常温解冻	28.04±0.67 <sup>a</sup>	3.63±0.12 <sup>a</sup>	31.67±0.58 <sup>a</sup>
流水解冻	25.64±0.34 <sup>b</sup>	2.97±0.06 <sup>b</sup>	28.61±0.39 <sup>b</sup>
冰箱解冻	23.62±0.16 <sup>c</sup>	2.17±0.06 <sup>c</sup>	25.79±0.21 <sup>c</sup>
低频电场解冻	21.53±0.09 <sup>d</sup>	1.93±0.06 <sup>d</sup>	23.46±0.05 <sup>d</sup>

注:同列上标不同小写字母表示不同解冻方式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.4 对牛肉新鲜度的影响

挥发性盐基氮(TVB-N)是指食品中易挥发的碱性氮化合物的总称,其含量是评价肉类食品新鲜度

的关键指标<sup>[25]</sup>。国家标准规定牛肉中TVB-N质量分数应小于20 mg/100 g<sup>[26]</sup>。由图3可知,4种方式解冻后的牛肉的TVB-N质量分数皆小于20 mg/100 g,其中,低频电场解冻后TVB-N质量分数最低,为5.13 mg/100 g,这与王丽等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。冰箱解冻后TVB-N质量分数为7.47 mg/100 g,与低频电场解冻时相比无显著差异,而常温解冻后TVB-N质量分数最高,为16.33 mg/100 g。低频电场解冻后牛肉TVB-N质量分数最低,新鲜度最高,这可能是因为低频电场抑制牛肉中内源性蛋白酶的活性,从而抑制肌肉蛋白分解为氨、胺类等碱性含氮物,使其不再进一步分解成盐基态氮类物<sup>[26]</sup>。



不同小写字母表示不同解冻方式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

图3 解冻方式对牛肉新鲜度的影响

Fig. 3 Effects of different thawing methods on beef freshness

### 2.5 对牛肉质构特性的影响

选取硬度、弹性和咀嚼性3个具有代表性的质构指标来评价牛肉品质的变化。由表2可见:常温解冻后硬度最低,为4 930.94 g;低频电场解冻后硬度最高,为8 784.61 g,流水解冻和冰箱解冻后硬度分别为5 838.69 g和7 527.96 g。这可能是因为在解冻的过程中,在微生物和酶的作用下,影响牛肉质地的肌球蛋白、肌原蛋白和肌动蛋白等结构蛋白被分解<sup>[27]</sup>,使得肉品的硬度减小,而低频电场能够抑制微生物生长繁殖,改变酶的活性,从而保持肉的

表2 解冻方式对牛肉质构特性的影响

Table 2 Effects of different thawing methods on textural properties of beef

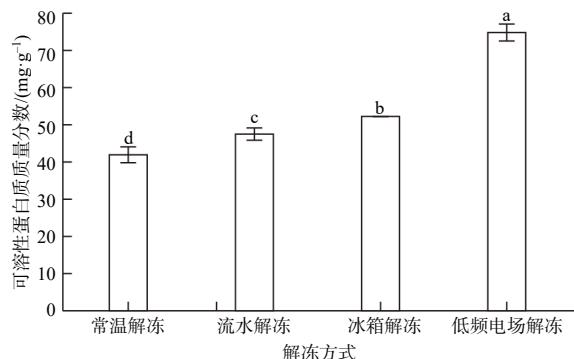
解冻方式	硬度/g	弹性	咀嚼性/g
常温解冻	4 930.94±80.14 <sup>d</sup>	0.64±0.04 <sup>d</sup>	1 290.00±43.26 <sup>d</sup>
流水解冻	5 838.69±126.90 <sup>c</sup>	0.71±0.01 <sup>b</sup>	1 620.88±99.01 <sup>c</sup>
冰箱解冻	7 527.96±217.23 <sup>b</sup>	0.74±0.01 <sup>b</sup>	2 140.17±132.49 <sup>b</sup>
低频电场解冻	8 784.61±449.19 <sup>a</sup>	0.86±0.01 <sup>a</sup>	2 704.82±101.52 <sup>a</sup>

注:同列上标不同小写字母表示不同解冻方式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

品质。在弹性方面,低频电场解冻后的牛肉弹性最大,说明结构蛋白变性少,肌肉间的结合力较大。在咀嚼性方面,常温解冻后咀嚼性最小,为1 290.00 g;低频电场解冻后咀嚼性最大,为2 704.82 g,表明低频电场解冻后牛肉蛋白质变性较少,非极性疏水基团暴露少,咀嚼性较好,这与李翰卿等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

## 2.6 对牛肉可溶性蛋白质质量分数的影响

由图4可知,低频电场解冻后的牛肉可溶性蛋白质质量分数最高,为74.67 mg/g,常温解冻后的为41.33 mg/g,流水解冻和冰箱解冻后的牛肉可溶性蛋白质质量分数分别为46.67 mg/g和52.00 mg/g,



不同小写字母表示不同解冻方式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

图4 解冻方式对牛肉可溶性蛋白质质量分数的影响

Fig. 4 Effect of thawing methods on the mass fraction of soluble proteins in beef

说明在低频电场解冻条件下,牛肉肌肉机械强度较高,肌肉纤维结构维持得较完整,在解冻过程中蛋白质的溶出少。JIA等<sup>[29]</sup>利用高压静电场解冻猪里脊肉,使得肌原纤维蛋白的变性比静止空气解冻时更少,同时降低了蛋白质的溶解度。常温解冻时,由于温度较高且解冻时间较长,牛肉中的肌肉纤维破坏严重,汁液流失多,蛋白质溶出多<sup>[30]</sup>。

## 2.7 对牛肉游离氨基酸质量分数的影响

游离氨基酸主要由蛋白质、多肽分解产生<sup>[31]</sup>。其中,天冬氨酸、谷氨酸呈现鲜味,甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸、脯氨酸、丙氨酸呈现甜味,亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、精氨酸、甲硫氨酸、缬氨酸、赖氨酸、酪氨酸、组氨酸呈现苦味<sup>[32]</sup>。由表3可知,4种解冻方式下的游离氨基酸总质量分数差异显著。低频电场解冻后牛肉游离氨基酸总质量分数最低,为49.10 mg/g;常温解冻后牛肉游离氨基酸总质量分数最高,为73.48 mg/g;而流水解冻和冰箱解冻后的分别为67.16 mg/g和56.32 mg/g。牛肉中游离氨基酸主要来源于蛋白质水解<sup>[33]</sup>,说明低频电场解冻技术能有效缓解牛肉中蛋白质的分解。在甜味氨基酸占比上,低频电场解冻的最高,且苦味氨基酸占比最低,这与ROOBAB等<sup>[34]</sup>的研究结果一致,说明低频电场解冻对牛肉风味的影响最小。

表3 解冻方式对牛肉游离氨基酸质量分数的影响

Table 3 Effects of different thawing methods on mass fraction of free amino acid of beef

氨基酸	游离氨基酸质量分数/(mg·g⁻¹)			
	常温解冻	流水解冻	冰箱解冻	低频电场解冻
天冬氨酸(Asp)	0.68±0.12 <sup>a</sup>	0.56±0.07 <sup>a</sup>	0.52±0.07 <sup>a</sup>	0.30±0.06 <sup>b</sup>
谷氨酸(Glu)	8.80±0.79 <sup>a</sup>	8.20±0.40 <sup>a</sup>	7.10±0.46 <sup>b</sup>	6.80±0.56 <sup>b</sup>
甘氨酸(Gly)	2.60±0.62 <sup>a</sup>	2.40±0.44 <sup>a</sup>	2.00±0.26 <sup>a</sup>	1.90±0.36 <sup>a</sup>
丝氨酸(Ser)	5.20±0.62 <sup>a</sup>	4.70±0.66 <sup>ab</sup>	3.70±0.36 <sup>b</sup>	3.60±0.56 <sup>b</sup>
苏氨酸(Thr)	6.60±1.04 <sup>b</sup>	5.60±0.40 <sup>b</sup>	6.00±0.36 <sup>b</sup>	7.90±0.50 <sup>a</sup>
脯氨酸(Pro)	3.10±0.26 <sup>a</sup>	2.50±0.36 <sup>ab</sup>	2.90±0.44 <sup>ab</sup>	2.20±0.26 <sup>b</sup>
丙氨酸(Ala)	9.20±0.89 <sup>a</sup>	8.20±0.70 <sup>ab</sup>	8.00±0.56 <sup>ab</sup>	7.10±0.62 <sup>b</sup>
亮氨酸(Leu)	6.60±0.66 <sup>a</sup>	6.40±0.82 <sup>ab</sup>	5.10±0.66 <sup>bc</sup>	4.30±0.56 <sup>c</sup>
异亮氨酸(Ile)	3.10±0.62 <sup>a</sup>	3.20±0.65 <sup>a</sup>	1.90±0.62 <sup>b</sup>	1.80±0.53 <sup>b</sup>
苯丙氨酸(Phe)	6.10±0.96 <sup>a</sup>	6.40±1.15 <sup>a</sup>	5.30±1.08 <sup>a</sup>	3.30±0.56 <sup>b</sup>
精氨酸(Arg)	4.50±0.96 <sup>a</sup>	3.70±0.85 <sup>a</sup>	3.20±0.66 <sup>ab</sup>	1.70±0.46 <sup>b</sup>
甲硫氨酸(Met)	2.70±0.44 <sup>a</sup>	2.50±0.60 <sup>a</sup>	1.50±0.56 <sup>b</sup>	1.50±0.26 <sup>b</sup>
缬氨酸(Val)	4.90±0.70 <sup>a</sup>	4.50±0.62 <sup>a</sup>	4.10±0.36 <sup>a</sup>	2.70±0.36 <sup>b</sup>
赖氨酸(Lys)	5.60±0.82 <sup>a</sup>	5.20±0.95 <sup>ab</sup>	3.80±0.60 <sup>bc</sup>	2.90±0.66 <sup>c</sup>
酪氨酸(Tyr)	1.80±0.53 <sup>a</sup>	1.30±0.36 <sup>a</sup>	—	—

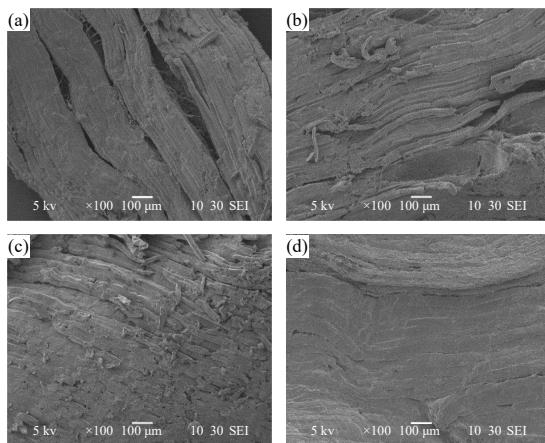
表3(续)

氨基酸	游离氨基酸质量分数/(mg·g <sup>-1</sup> )			
	常温解冻	流水解冻	冰箱解冻	低频电场解冻
组氨酸(His)	2.00±0.44 <sup>a</sup>	1.80±0.46 <sup>ab</sup>	1.20±0.26 <sup>ab</sup>	1.10±0.36 <sup>b</sup>
鲜味氨基酸	9.48±0.67 <sup>a</sup>	8.76±0.33 <sup>a</sup>	7.62±0.39 <sup>b</sup>	7.10±0.50 <sup>b</sup>
甜味氨基酸	26.70±1.57 <sup>a</sup>	23.40±0.55 <sup>b</sup>	22.60±0.60 <sup>b</sup>	22.70±0.70 <sup>b</sup>
苦味氨基酸	37.30±0.62 <sup>a</sup>	35.00±1.53 <sup>b</sup>	26.10±1.00 <sup>c</sup>	19.30±0.30 <sup>d</sup>
游离氨基酸总质量分数/(mg·g <sup>-1</sup> )	73.48±1.44 <sup>a</sup>	67.16±1.25 <sup>b</sup>	56.32±0.90 <sup>c</sup>	49.10±0.60 <sup>d</sup>
鲜味氨基酸占比/%	12.90±1.16 <sup>a</sup>	13.04±0.37 <sup>a</sup>	13.53±0.40 <sup>a</sup>	14.46±0.90 <sup>a</sup>
甜味氨基酸占比/%	36.34±1.44 <sup>c</sup>	34.84±1.46 <sup>c</sup>	40.13±2.40 <sup>b</sup>	46.23±1.50 <sup>a</sup>
苦味氨基酸占比/%	50.76±0.41 <sup>a</sup>	52.12±1.31 <sup>a</sup>	46.34±1.20 <sup>b</sup>	39.31±1.50 <sup>c</sup>

注：同行上标不同小写字母表示不同解冻方式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )；“—”表示未检出。

## 2.8 对牛肉肌纤维结构的影响

由图5可见：在100倍的放大倍数下，低频电场解冻后的牛肉肌纤维和肌束贴合紧凑，肌内膜结构排列完整；常温解冻和流水解冻后牛肉的肌肉结构遭到严重破坏，各肌纤维束之间连接松散，肌束之间缝隙增大甚至断裂；冰箱解冻后的牛肉小部分肌束之间的间隙增大，肌内膜部分被破坏。本研究结果与CHOI等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。由于电场解冻速率高，保证了冰晶的均匀融化，避免了冰晶对细胞造成太大损伤，牛肉的原始组织结构保持较好。



(a) 常温解冻；(b) 流水解冻；(c) 冰箱解冻；(d) 低频电场解冻  
图5 解冻方式对牛肉肌原纤维结构的影响

Fig. 5 Effects of different thawing methods on the structure of beef myofibrillar structure

## 3 结论

本研究分别采用低频电场、常温、流水和冰箱解冻冷冻牛肉，探究不同解冻方式对冷冻牛肉品质的影响。结果表明，低频电场解冻后牛肉的pH接近鲜肉(6.00)，相比于其他3种解冻方式，可溶性蛋白

质质量分数最高(74.67 mg/g)，离心损失率和滴水损失率最低(分别为21.53%和1.93%)，TVB-N质量分数最低(5.13 mg/100 g)，牛肉新鲜度高。鲜味和甜味氨基酸比例高，分别为14.46%和46.23%，苦味氨基酸比例最小(39.31%)，冰箱解冻对牛肉的新鲜度保持较好，其TVB-N质量分数与低频电场解冻下的无显著性差异。不同解冻方式对牛肉的持水力、pH、色泽、可溶性蛋白质质量分数以及质构特性等的影响差异显著。4种解冻方式中，从牛肉的持水力、色泽、硬度、弹性、咀嚼性、解冻速率和维持微观结构的完整性等方面综合考虑，低频电场解冻的牛肉品质最优，常温解冻的牛肉品质最差。针对生产中需要大批量解冻牛肉的情况，低频电场解冻是一种较理想的解冻方式。未来可以继续探究不同解冻方式对牛肉风味、水分分布等方面的影响，并研究低频电场解冻牛肉的加工特性。

## 参考文献：

- [1] BAO Y L, BOEREN S, ERTBJERG P. Myofibrillar protein oxidation affects filament charges, aggregation and water-holding[J]. Meat Science, 2018, 135: 102–108.
- [2] 孙聿尧, 谢晶, 王金锋. 超声波解冻与传统解冻方式的比较与竞争力评估[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 253–258.
- [3] 尚柯, 杨方威, 李侠, 等. 静电场辅助冻结-解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 157–162.
- [4] 李侠, 钱书意, 杨方威, 等. 低压静电场下不同隔距冻结-解冻对牛肉品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 278–285.
- [5] 马坚. 高压静电场对牛里脊肉冻结和解冻的保鲜研究[J]. 家电科技, 2018(7): 68–71.
- [6] 王丽, 陈伟, 王远亮, 等. 解冻方式对猪肉品质、理化性质与微观结构的影响[J]. 食品与机械, 2023,

- 39(10): 35–41.
- [7] LUNG C T, CHANG C K, CHENG F C, et al. Effects of pulsed electric field-assisted thawing on the characteristics and quality of Pekin duck meat[J]. Food Chemistry, 2022, 390: 133137.
- [8] LI D, ZHAO H, MUHAMMAD A I, et al. The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp *Aristichthys nobilis* fillets[J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126614.
- [9] GB 5009.237—2016. 食品pH值的测定[S].
- [10] 张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 解冻方式对羊肉品质及微观结构的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1607–1617.
- [11] LI L Q, YAN Q G, HA Y J, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of yak meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 123–130.
- [12] 雷露, 许浩翔, 周景瑞, 等. 贵州关岭黄牛不同部位肌肉中营养成分含量及品质分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023(20): 52–56.
- [13] GB 5009.228—2016. 食品中挥发性盐基氮的测定[S].
- [14] 陈伟. 解冻方式对猪肉及其制品品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [15] TAKEI R, HAYASHI M, UMENE S, et al. Texture and microstructure of enzyme-treated chicken breast meat for people with difficulties in mastication[J]. Journal of Texture Studies, 2016, 47(3): 231–238.
- [16] 胡鹏, 杜鹏飞, 马艳丽, 等. 不同速冻方式对牛肉品质的影响[J]. 食品工业, 2025, 46(2): 68–72.
- [17] 李晴晴. 低压静电场协同高湿解冻对牛肉品质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2024.
- [18] 赵瑞, 丁昌江, 王惠鑫, 等. 介质阻挡放电作用下牛肉解冻特性及机理研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 123–130.
- [19] 丁红艳, 院珍珍, 闫光瑾, 等. 不同解冻方式对藏羊肉品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(4): 142–149.
- [20] 乔雪, 乔雅洁, 付慧鑫, 等. 低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 48–56.
- [21] 唐树培, 李保国, 高志新. 高压静电场解冻羊胴体的实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 69–73.
- [22] KONO S, KON M, ARAKI T, et al. Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 158–165.
- [23] 李甜甜, 谭青玲, 卢家维, 等. 真空低温烹饪温度对肌原纤维蛋白凝胶特性和结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(18): 240–246.
- [24] 周荣梅, 苏伟, 母应春, 等. 电磁场保鲜和冷冻贮藏对贵州黄牛肉品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(4): 14–19.
- [25] 张诗琦, 杨尚霖, 王翔宇, 等. 不同间歇微波解冻方式对牦牛肉品质特性、脂质氧化的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 38–46.
- [26] 刘纯友, 付春婷, 许金蓉, 等. 低温贮藏过程中水牛肉品质变化研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 273–278.
- [27] LI X, QIAN S, HUANG F, et al. The investigation of protein profile and meat quality in bovine longissimus thoracis frozen under different temperatures by data-independent acquisition(DIA) strategy [J]. Foods, 2022, 11(12): 1791–1809.
- [28] 李翰卿, 马俪珍, 陈胜军, 等. 不同解冻方式对莺乌贼胴体肌肉品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 20–28.
- [29] JIA G, NIRASAWA S, JI X, et al. Physicochemical changes in myofibrillar proteins extracted from pork tenderloin thawed by a high-voltage electrostatic field[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 910–916.
- [30] 袁利娟. 不同加热程序对猪骨汤中蛋白质降解的影响[J]. 现代食品, 2023(13): 187–191, 197.
- [31] 龚小会. 酵母产香特性及其对发酵肉制品风味品质的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [32] 王海波, 符健慧, 钟金城, 等. 排酸方式和时间对高档育肥安格斯牛肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 79–85.
- [33] ZHANG R, ROSS A B, YOO M J Y, et al. Metabolic fingerprinting of in-bag dry- and wet-aged lamb with rapid evaporative ionization mass spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2021, 347(1): 1–10.
- [34] ROOBAB U, ZENG X A, AHMED W, et al. Effect of pulsed electric field on the chicken meat quality and taste-related amino acid stability: Flavor Simulation[J]. Foods, 2023, 12(4): 710–721.
- [35] CHOI Y S, KU S K, JEONG J Y, et al. Changes in ultrastructure and sensory characteristics on electromagnetic and air blast freezing of beef during frozen storage[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2015, 35(1): 27–34.

责任编辑: 伍锦花

英文编辑: 张承平