付慧鑫, 张婷, 乔雪, 等. 变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻效果及蛋白氧化的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 375−382. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010225
FU Huixin, ZHANG Ting, QIAO Xue, et al. Effects of Variable Temperature and High Humidity Combined with Low Voltage Electrostatic Field Treatment on Thawing Effect and Protein Oxidation of Beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 375−382. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010225

·贮运保鲜·

变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻效果及蛋白氧化的影响

付慧鑫[1,2], 张　婷[1,2,*], 乔　雪[1,2], 乔雅洁[1,2], 孟新涛[1,2]
（1.新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;
2.新疆农副产品精深加工工程技术中心, 新疆乌鲁木齐 830091）

摘　要: 为优化高效、安全的冷冻牛肉新型解冻方法，维持其解冻后感官和食用品质，本研究以冷冻牛肉为试材，以传统低温解冻（4 ℃，相对湿度（Relative humidity，RH）65%~73%）为对照（CK），以变温高湿（2~6~2 ℃，RH 90%）协同四个不同低压静电场（板间距分别为 0、25、30、35 cm）解冻为处理组，分析变温高湿协同不同低压静电场解冻对牛肉解冻效果的影响，在筛选适宜的变温高湿协同低压静电场（Variable temperature and high humidity synergistic low voltage electrostatic field thawing，V-L）处理条件基础上，解析变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻后蛋白氧化的影响。结果表明，变温高湿协同不同低压静电场处理对牛肉解冻均有一定的效果，其中变温高湿协同 V-L 30 静电场解冻效果最好，与 CK 相比，其解冻时间缩短了 27.30%，汁液流失率降低了 25.21%，a^*值提高了 7.75%，丙二醛含量降低了 36.17%；变温高湿协同低压静电场解冻处理有利于维持牛肉的肌原纤维结构，显著减缓其蛋白交联降解程度，使羰基含量降低 50%，巯基含量增加 38.40%，同时抑制了牛肉蛋白氧化变性，使其保持较高的变性温度和变性热焓。该结果为生产中牛肉解冻技术的优化升级提供了新思路，为其应用推广提供了科学依据。

关键词: 牛肉, 变温高湿协同低压静电场, 解冻效果, 微观结构, 蛋白氧化
中图分类号: TS251.52　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0375−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010225
本文网刊:

Effects of Variable Temperature and High Humidity Combined with Low Voltage Electrostatic Field Treatment on Thawing Effect and Protein Oxidation of Beef

FU Huixin[1,2], ZHANG Ting[1,2,*], QIAO Xue[1,2], QIAO Yajie[1,2], MENG Xintao[1,2]
（1.Institute of Processing of Agricultural Products, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;
2.Xinjiang Agricultural and Sideline Products Deep Processing Engineering Technology Center, Urumqi 830091, China）

Abstract: This study aimed to optimize a new efficient and safe thawing method for frozen beef, and maintain its sensory and edible quality. The frozen beef was used for the test material, the traditional low-temperature thawing (4 ℃, RH 65%~73%) treatment was set as the control (CK). The treatments were the variable temperature and high humidity (2~6~2 ℃, RH 90%) combined with four different low-voltage electrostatic fields (the distances between the partition plates were 0, 25, 30, and 35 cm, respectively). The thawing effects of variable temperature and high humidity combined with low voltage electrostatic field (V-L) of the beef were investigated. The influence on the protein oxidation were analyzed on the basis of screening the appropriate treatment. The results showed that the variable temperature and high humidity combined

收稿日期: 2025−01−23
基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项“肉牛精准饲喂及贮运保鲜与综合利用关键技术集成与示范”项目（2021A02003-4）。
作者简介: 付慧鑫（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮运保鲜, E-mail: 251483675@qq.com。
*** 通信作者:** 张婷（1980−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮运与加工, E-mail: zhangtingkikie@163.com。

with different low-voltage electrostatic fields had a certain thawing effect, the treatment of 2~6~2 ℃, RH 90% combined with V-L 30 was the best. Compared with CK, the thawing time was shortened by 27.30%, the juice loss rate was reduced by 25.21%, a^* value was increased by 7.75%, and the malondialdehyde content was decreased by 36.17%. It was conducive to maintain the myofibril structure, significantly slowed down the degree of the protein cross-linking degradation of the beef, the carbony content was reduced by 50%, the sulfhydryl content was increased by 38.40%, and at the same time, it inhibited the oxidative denaturation of the beef proteins, enabled it keep a relatively high denaturation temperature and denaturation enthalpy. The result provides a new idea for the optimization and upgrading of the beef thawing technology in production, and offers a scientific basis for its application and promotion.

Key words: beef; variable temperature and high humidity combined with low voltage electrostatic field; thawing effect; microstructure; protein oxidation

牛肉肉质鲜嫩，营养丰富，作为一种高蛋白、低脂的健康食品，备受消费者的青睐。冷冻为生产中最为常见且高效的牛肉储存方式，肉品在冷冻条件下，其内部的绝大部分水会发生冻结，微生物活动及生化反应受到抑制，从而保持肉品品质[1]。冷冻肉品在加工或食用前都需要进行解冻处理，由于在冷冻过程中，肉品内部水分子在冰点以下经历相变变为冰晶，使细胞结构受到破坏，对肌细胞造成机械损伤，导致肉品在解冻后出现汁液损失、蛋白和脂肪氧化等品质劣变问题[2]，严重影响其食用品质和质量安全。因此，研发牛肉高效、安全和实用的新型解冻技术具有重要的生产实践意义。

变温高湿解冻技术是一种新型解冻技术，其主要原理为通过改变肉品内部水的密度加快传热，结合高湿环境最大限度减少其重量损失，且低变温可以有效抑制微生物繁殖和酶活性，从而抑制脂肪蛋白氧化，该技术已在猪肉[3]、羊肉[4]、牛肉[5] 等肉品中被初步研究。低压静电场解冻作为一种新型解冻技术，具有易操作、安全、节能的优点，主要通过在电极板间产生电晕风，形成湍流和旋涡，加快热量交换，从而提高物料的解冻速率，已在羊肉[6]、猪肉[7] 等中应用。目前，国内外也有学者将上述两项解冻技术进行有机结合，协同发挥其在肉品解冻过程中的作用，如杨川等[8] 利用低压静电场结合高湿技术解冻羊肉，不仅可以缩短解冻时间，并且可以稳定蛋白结构，从而有效减缓蛋白氧化变性并维持肉品的保水性；胡斐斐[7] 利用低压静电场结合高湿处理对猪肉进行解冻处理，发现其有利于缩短猪肉解冻时间，有效维持其保水性，从而维持肉样色泽。本团队前期研究发现，单一的高湿处理[9]、变温高湿[4] 和低压静电场[10] 均可一定程度改善解冻后牛肉品质，但对其汁液流失率、色泽、嫩度等维持有限。可见，如何充分利用牛肉不同解冻技术特点与优势，开展其之间的协同作用效果及内在品质影响研究是本文研究的重点。

为此，本研究以新疆西门塔尔牛背最长肌为试材，以传统低温解冻作为对照组（CK），以变温高湿分别协同四个低压静电场（板间距分别为 0、25、30、35 cm）条件为处理组，分析变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉解冻效果的影响，筛选出变温高湿条件下适宜的低压静电场间距，在此基础上，进一步探讨变温高湿协同低压静电场解冻处理对牛肉蛋白结构及蛋白氧化的影响，以期研发牛肉新型解冻技术，为生产中牛肉解冻技术的优化升级提供新思路，为其应用推广提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新疆西门塔尔牛　2 岁龄，于 2024 年 9 月 12 日购于新疆小巴依牧业有限公司，企业常规屠宰和排酸 24 h 后送至实验室，立即切分取得牛背最长肌；氧化镁、硼酸、乙醇、氯化钠、磷酸钠、氯化镁、EGTA、磷酸二氢钾、溴酚蓝、碘化钾、磷酸钾　分析纯，天津市致远化学试剂有限公司；甲基红、溴甲酚绿　上海源叶生物科技有限公司；盐酸　四川西陇科学有限公司；丙二醛含量检测试剂盒、BCA 蛋白浓度测定试剂盒、蛋白质羰基含量检测试剂盒、总巯基含量检测试剂盒　北京索莱宝科技有限公司。

DW-60W321EU1 型低温冷冻柜　青岛海尔特种电冰柜有限公司；KSE16A0R 型多路数据测试仪　宁波科顺仪器仪表有限公司；QSJ-B02X5 型切碎机　小熊电器股份有限公司；testo 205-pH 型酸碱度/温度测量仪　德图仪器国际贸易（上海）有限公司；YS6060 型台式分光测色仪　深圳市三恩时科技有限公司；DZKW-S-4 型电热恒温水浴锅　北京市永光明医疗仪器有限公司；C-LM3B 型数显式肌肉嫩度仪　南农畜牧技术（北京）有限公司；SCI-VS 型可调式混匀仪　美国 Scilogex 公司；K9840 型自动凯氏定氮仪　海能未来技术集团股份有限公司；TGL-20bR 型高速冷冻离心机　上海安亭科学仪器厂；UV-2600 型紫外分光光度计　日本岛津公司；ICTHI-150T 型恒温恒湿箱　施都凯仪器设备（上海）有限公司；自制低压静电场装置　北京艾德创机器人科技有限公司；Synergy H1 型多功能微孔板检测仪　美国伯腾仪器有限公司；DZKW-S-4 型电热恒温水浴锅　北京市永光明医疗仪器有限公司；DSC2-00674 型差示扫描量热仪　美国 TA 仪器；J-1500 型圆二色谱仪　日本分光株式会社（JASCO）；Tecnai G2 Spirit 型透射电子显微镜　FEI 公司。

1.2 实验方法

1.2.1　牛肉解冻处理　选取宰后排酸 24 h 的牛背最

长肌，去除脂肪、筋膜等，切分成同等大小（5.00 cm×5.00 cm×3.50 cm）的肉块，每块质量为 90±5 g，随机分为 7 组，每组 9 份肉样，经聚乙烯自封袋包装后置于−20 ℃ 冰箱冷冻，备用。

取冷冻牛肉，采用恒温恒湿箱进行解冻实验，以传统低温解冻条件（4 ℃，RH 65%~73%）为对照组（CK），在预实验基础上，参考付慧鑫等[9] 方法设置变温高湿解冻条件为 2~6~2 ℃，RH 90%（先将解冻环境温度设定为 2 ℃，低于 2 ℃ 时设备蒸汽加热系统启动直至温度达到 6 ℃ 时停机，高于 6 ℃ 时设备制冷风机启动直至温度达到 2 ℃ 时停机，如此循环），协同四种不同的低压静电场板间距为 0、25、30 和 35 cm（V-L 0、V-L 25、V-L 30 和 V-L 35）分别进行解冻处理，至肉样中心温度达到 2±0.5 ℃ 时为解冻终点。解冻结束后，在 30 min 内进行不同处理组牛肉解冻效果的取样测定。每组实验重复 3 次。

在上述实验基础上，以传统低温解冻条件（4 ℃，RH 65%~73%）为对照组（CK），基于本团队前期已完成的单一变温高湿处理[9] 和低压静电场处理[10] 对牛肉的解冻效果研究，本文主要以优选的变温高湿协同低压静电场解冻（2~6~2 ℃，RH 90%，30 cm）为处理组（V-L 30），分别对其进行解冻处理，至肉样中心温度达到 2±0.5 ℃ 时为解冻终点。解冻结束后，在 30 min 内进行取样进行对照组和处理组蛋白氧化相关指标的取样测定。每组实验重复 3 次。

1.2.2　指标测定

1.2.2.1　牛肉解冻效果相关指标测定　牛肉解冻时间采用多路数据测试仪进行测定。将热电偶插入样品中心部位，测定肉样中心温度随解冻时间的变化，以肉样中心温度达到 2±0.5 ℃ 为解冻终点，记录解冻时间。

汁液流失率参照 Zhao 等[11] 的方法，用吸水纸吸干表面水分后准确称量解冻前后肉样的质量，解冻汁液流失率计算公式如下：

$$\text{汁液流失率}(\%)=\frac{\text{解冻前肉的质量}-\text{解冻后肉的质量}}{\text{解冻前肉的质量}}\times 100$$

蒸煮损失率测定参考 Zhao[11] 的方法，稍作修改。准确称重的肉样置于聚乙烯袋中，并将其放入 72 ℃ 恒温水浴锅中，使肉样完全浸没于水浴锅中，加热至肉样的中心温度达到 70 ℃，之后用流动水冷却至室温，用吸水纸吸干表面水分并称重。蒸煮损失率计算公式如下：

$$\text{蒸煮损失率}(\%)=\frac{\text{蒸煮前肉的质量}-\text{蒸煮后肉的质量}}{\text{蒸煮前肉的质量}}\times 100$$

解冻后牛肉色泽根据 CIE-$L^*a^*b^*$ 颜色系统，使用台式分光测色仪在光源 D65（日光）照明条件下，从 10°视角采集反射光谱。对每个样品的 6 个位点进行检测，并加以标记，尽量使得样品之间测定位点一致，减小误差。取 6 个位点的平均值，记录该肉样的亮度值 L^*、红绿值 a^*、黄蓝值 b^*。测定前对色差计进行黑白校准。

剪切力使用嫩度仪进行测定，将解冻后的牛肉和煮制（72 ℃ 加热至肉样的中心温度达到 70 ℃）后冷却至室温的熟肉样品沿肌纤维方向分切成多个厚 1.0 cm、长 2.5 cm、宽 1.0 cm 的肉柱，沿垂直肌纤维方向剪切肉柱，记录剪切力，每组产品重复测定 8 次，计算平均值。

挥发性盐基氮参考 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》[12] 测定。

丙二醛（Malondialdehyde，MDA）采用丙二醛含量检测试剂盒（分光光度法）进行测定。利用丙二醛在酸性和高温条件下，与硫代巴比妥酸缩合生成棕红色 3,5,5-三甲基恶唑-2,4-二酮，分别在 532 nm 和 600 nm 处测定吸光度值，计算 MDA 含量。

1.2.2.2　牛肉解冻蛋白氧化相关指标测定　解冻后牛肉微观结构 TEM 透射电镜参考 Kim 等[13] 的方法进行测定，稍作修改。用手术刀将牛肉切成 1 mm×1 mm×2 mm 的肉柱，立即放入预冷的 2.5% 的戊二醛固定液中，并于 4 ℃ 固定过夜。用 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液（pH7.0）漂洗样品三次，1% 锇酸溶液固定 1~2 h，然后再用磷酸缓冲液漂洗样品三次。使用梯度浓度的乙醇溶液（30%、50%、70%、80%、90%、100%）对样品进行脱水处理各 15 min，最后使用纯丙酮处理 20 min。使用丙酮和树脂的混合液（3∶1）处理样品 2 h，丙酮和树脂的混合液（1∶1）处理样品 3 h，丙酮和树脂的混合液（1∶3）处理样品 3 h，最后使样品在纯树脂中过夜。将渗透处理后的样品放入模具中进行梯度加热（35、60、80 ℃），各处理 5 h 后得到包埋好的样品。样品在经过粗修后放入超薄切片机中切片，然后使用醋酸双氧铀染液（15 min）和柠檬酸铅（5 min）染色，晾干后上镜观察。

肌原纤维蛋白（Myofibrillar protein，MP）的分离提取参考 Xu 等[14] 的方法，用切碎机将肉绞成碎肉，与 4 倍体积的分离缓冲液（0.1 mol/L NaCl，10 mmol/L Na_3PO_4，2 mmol/L $MgCl_2$，1 mmol/L EGTA，pH7.0）混匀后离心（4 ℃，2000×g，15 min），再重复洗涤一次。所得沉淀用 4 倍体积 0.1 mol/L NaCl 溶液洗涤两次，在最后一次离心前用三层纱布过滤，并使用 0.1 mol/L HCl 溶液将 pH 调为 6.0。蛋白质浓度使用 BCA 蛋白浓度测定试剂盒进行测定。

羰基和巯基含量采用蛋白质羰基含量检测试剂盒、总巯基含量检测试剂盒（分光光度法）进行测定。

蛋白溶解度的测定参考李彩云[15] 的方法并略作修改。总蛋白溶解度：将 1 g 碎肉与 20 mL 的磷酸钾缓冲液（0.1 mol/L，含 1.1 mol/L 碘化钾，4 ℃，pH7.2）充分混匀，4 ℃ 条件下振荡提取 24 h，结束后离心（4 ℃，10000×g，20 min）取上清液测定蛋白浓度。肌浆蛋白溶解度：将 1 g 碎肉与 20 mL 的磷酸钾缓冲液（0.025 mol/L，4 ℃，pH7.2）充分混匀，4 ℃ 条件下振荡提取 24 h，结束后离心（4 ℃，10000×g，20 min）

取上清液测定蛋白浓度。肌原纤维蛋白溶解度为总蛋白溶解度与肌浆蛋白溶解度之差。

差示扫描量热法(DSC)的测定参考 Chian 等[16]的方法,取 1 g 肉样放入密封铝盒中,以空铝盒为对照,将铝盒放入 DSC 仪中,在氮气气体氛围下,样品于 20 ℃ 平衡 0.5 min,并以 3 ℃/min 的速率升温至 100 ℃。

圆二色(CD)光谱的测定参考 Cheng 等[17]的方法,采用 260~180 nm 远紫外圆二色性光谱法测定蛋白二级结构。肌原纤维蛋白溶于 3 mmol/L 磷酸盐缓冲液中,蛋白浓度为 0.2 mg/mL。在室温条件下,扫描速度为 50 nm/min 测定。

1.3 数据处理

运用 Microsoft Excel 2021 软件进行数据整理,使用 SPSS 26.0 对数据进行显著性分析(P<0.05),使用 Origin 2022 进行作图,每组实验最少重复三次。

2 结果与分析

2.1 变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉解冻效果的影响

2.1.1 变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉解冻时间、汁液流失率、蒸煮损失率、色泽和剪切力的影响 肉品解冻后的品质优劣,是衡量其商品价值的关键因素。其中,色泽直接影响消费者的购买意愿;而多汁性品质则常通过评估解冻后的汁液流失率和蒸煮损失率来衡量;剪切力能够反映肉品的质地与口感特性。如表 1 可知,变温高湿协同不同低压静电场解冻牛肉的时间不同,其中 CK 组解冻时间为 6.08 h,V-L 0、V-L 25、V-L 30 和 V-L 35 处理组的解冻时间分别为 4.63、4.54、4.42 和 4.58 h,V-L 30 处理组解冻时间最短,较 CK 处理组解冻时间缩短 27.30%,表明变温高湿协同适宜低压静电场处理可提高牛肉的解冻速率。

表 1 变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉解冻时间、汁液流失率、蒸煮损失率、色泽和剪切力的影响

Table 1 Effect of variable temperature and high humidity combined with different low-pressure electrostatic field treatments on thawing time, juice loss rate, cooking loss rate, color and shear force of beef

测定指标		解冻处理				
		CK	V-L 0	V-L 25	V-L 30	V-L 35
解冻时间(h)		6.08±0.29^{a}	4.63±0.33^{b}	4.54±0.24^{b}	4.42±0.10^{b}	4.58±0.15^{b}
汁液流失率(%)		9.56±0.77^{a}	8.89±2.20^{a}	7.52±0.11^{b}	7.15±0.17^{b}	8.67±1.44^{a}
蒸煮损失率(%)		32.70±0.08^{a}	28.96±0.43^{b}	25.07±0.96^{c}	24.89±1.72^{c}	27.71±0.26^{b}
色泽	L^*	32.84±0.65^{d}	36.93±1.08^{a}	35.51±0.54^{b}	35.28±0.37^{b}	34.42±0.31^{c}
	a^*	14.20±0.96^{bc}	14.11±0.75^{c}	15.03±0.40^{abc}	15.30±0.58^{a}	15.09±0.85^{ab}
	b^*	13.83±0.61^{a}	11.47±0.76^{b}	12.03±0.59^{b}	11.83±0.64^{b}	11.48±0.60^{b}
剪切力(N)	生	32.56±1.61^{a}	28.09±1.16^{b}	20.62±2.36^{d}	20.54±2.46^{d}	23.10±1.67^{c}
	熟	133.91±6.54^{a}	120.19±8.76^{b}	98.59±10.91^{c}	96.23±11.92^{c}	114.39±9.37^{b}

注:同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异(P<0.05)。

经变温高湿协同不同低压静电场解冻牛肉后,各处理组之间汁液流失率维持在 7.15%~9.56%,其中 V-L 25 和 V-L 30 汁液流失率较低,分别为 7.52% 和 7.15%,显著低于其他各处理组(P<0.05),表明变温高湿协同一定强度的低压静电场对减缓汁液流失有积极影响;蒸煮损失率表现出与汁液流失率类似的结果。

牛肉在 2~6~2 ℃、RH 90% 变温高湿条件下,经不同低压静电场条件解冻后,L^*值均显著优于 CK 处理组(P<0.05),但随着板间距的增加 L^*值逐渐降低。V-L 25、V-L 30 和 V-L 35 的 a^*值均高于其他两组处理,其中 V-L 30 的 a^*值较 CK 处理组显著升高了 7.75%(P<0.05),变温高湿协同低压静电场处理的各组之间 b^*值差异不显著(P>0.05),但均显著低于 CK 处理组(P<0.05)。可见,低压静电场解冻可提高肉品的红度并降低其黄度值。

变温高湿协同不同低压静电场解冻后生、熟肉剪切力值均小于 CK 组,说明其可有效改善肉品解冻后的嫩度。其中 V-L 25 和 V-L 30 的熟肉剪切力值显著低于其他三组处理(P<0.05),但二者之间差异不显著(P>0.05),综合来看,V-L 30 的嫩度较好。

2.1.2 变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉挥发性盐基氮的影响 动物性食品在腐败过程中会生成氨和胺类等碱性含氮物质,通过测定 TVB-N 含量可判断肉品的新鲜程度[18]。由图 1 可以看出,牛肉解冻后,CK 处理组的 TVB-N 含量为 10.53 mg/100 g,变温高湿协同不同低压静电场解冻处理组的 TVB-N 含量维持在 9.62~10.01 mg/100 g 之间,其值均低于国家安全标准(≤15 mg/100 g)[19],且均显著低于 CK 处理组(P<0.05),其中 V-L 25 和 V-L 30 的 TVB-N 含量较低,分别为 9.62 和 9.69 mg/100 g,表明变温高湿协同适宜的低压静电场处理显著抑制牛肉 TVB-N 含量。

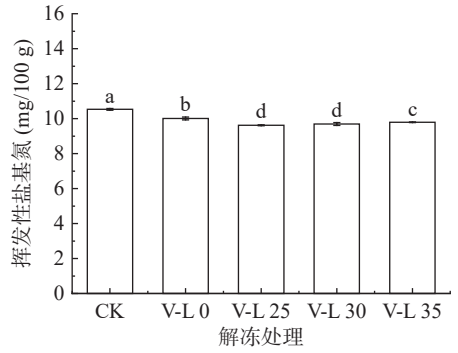


图 1 变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉挥发性盐基氮的影响

Fig.1 Effect of variable temperature and high humidity combined with different low-pressure electrostatic field treatments on total volatile basic nitrogen of beef

注:不同的小写字母表示具有显著差异(P<0.05),图 2 同。

2.1.3　变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉丙二醛的影响　肉类在贮藏、加工过程中，脂质由于与氧气接触会发生一定程度的氧化，从而产生不良气味，严重影响其质量和口感，丙二醛是脂肪氧化过程中的次级产物，其含量可反映肉品脂质氧化的水平[20]。如图 2 所示，牛肉解冻后，CK 处理组 MDA 含量为 3.76 nmol/g，V-L 0、V-L 25、V-L 30 和 V-L 35 处理组 MDA 含量分别为 3.24、2.64、2.40 和 2.82 nmol/g，其中 V-L 25 和 V-L 30 处理组 MDA 含量较低，显著低于 CK 和 V-L 0 处理组（P<0.05），但其两者之间无显著差异（P>0.05），与 CK 处理组相比，V-L 30 处理组 MDA 含量降低了 36.17%。可见，V-L 30 处理可以有效降低牛肉解冻过程中丙二醛含量，抑制牛肉脂肪氧化。

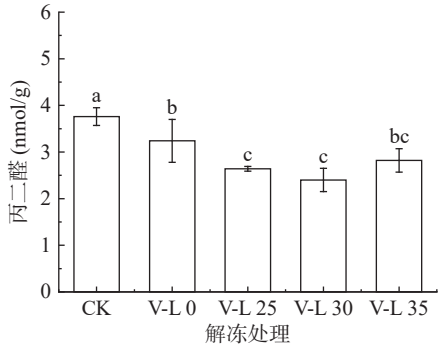


图 2　变温高湿协同不同低压静电场解冻处理对牛肉丙二醛含量的影响

Fig.2　Effect of variable temperature and high humidity combined with different low-pressure electrostatic field treatments on malondialdehyde content in beef

综上所述，V-L 0、V-L 25、V-L 30 和 V-L 35 处理均对牛肉解冻有一定的效果，其中 V-L 30 解冻处理效果最为明显，可将牛肉的解冻时间显著缩短至 4.42 h，汁液流失率和蒸煮损失率分别减少至 7.15% 和 24.89%，显著低于 CK 处理（P<0.05），同时抑制了牛肉 TVB-N 和 MDA 的生成，使其保持较好的色泽和保水性，改善了解冻后牛肉的嫩度。这与 Hu 等[21]研究结果基本一致。该结果为下一步解析变温高湿协同低压静电场处理对牛肉蛋白氧化的影响研究奠定了基础。

2.2　变温高湿协同低压静电场解冻处理对牛肉蛋白氧化的影响

2.2.1　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻微观组织结构的影响　牛肉解冻过程中，不同解冻方法均对肌肉微观结构有一定的影响。如图 3 所示，规律的横向条纹为众多肌原纤维组成的肌纤维，两条 Z 线之间为一个肌节，肌动蛋白的一端固定在 Z 线上，另一端与处于肌节中心的肌球蛋白相连，只有肌动蛋白的部分称为 I 带，包含肌动蛋白与肌球蛋白的部分称为 A 带。当肌动蛋白与肌球蛋白相互作用时，会使肌原纤维、肌纤维缩短，并最终使肌肉产生收缩[22]。由图 3 中可以看出，CK 解冻后，肌纤维严重扭曲，排列松散，并且细胞骨架形状紊乱，Z 线断裂，严重破坏肌纤维结构；相对而言，V-L 30 对肌纤维束破坏程度较轻，肌原纤维结构排列较为整齐。透射电镜结果显示，解冻会破坏肌束膜的完整性，导致肌纤维束间空隙增大，为水分流出提供有利条件，导致肌肉保水性下降，汁液流失严重。可能是因为在冻结时肌纤维间形成冰晶，将其分隔开，解冻后肌纤维的结构并不能完全复原。而 V-L 30 处理所产生的负离子可使肌丝间的负电荷增加，肌原纤维溶胀，使纤维间的缝隙缩小，维持了肌肉保水性[23]。可见，V-L 30 解冻处理可有效维持肌肉蛋白结构的完整性。

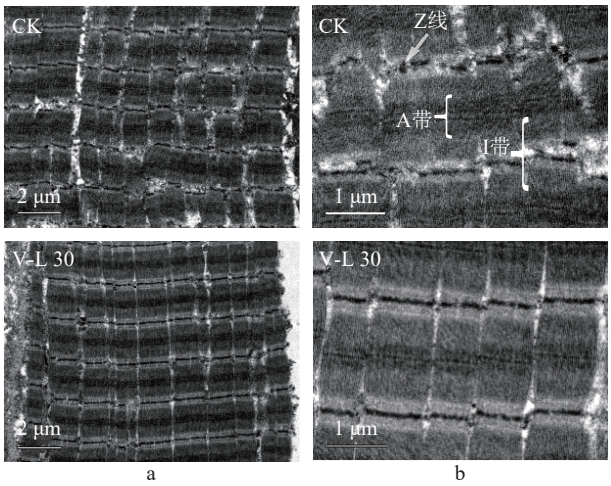


图 3　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻微观组织结构的影响

Fig.3　Effect of variable temperature and high humidity combined with low pressure electrostatic field treatment on the microstructure of beef thawing

注：透射电镜照片，a：放大倍数 4800×；b：放大倍数 13000×。

2.2.2　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻羰基和巯基含量的影响　肌肉蛋白发生氧化时，氨基酸侧链和肽链会断裂产生羰基衍生物[24]，并且蛋白氧化使其结构伸展导致蛋白交联，相邻的巯基会形成二硫化物。因此可以通过测定羰基和巯基的含量，来判断蛋白氧化程度，羰基含量越高，巯基含量越低，蛋白的氧化程度越高[25]。解冻后牛肉的羰基和巯基的含量如图 4 所示，可以看出，两种解冻方法对蛋白氧化的影响程度不同，V-L 30 的羰基含量为 0.02 μmol/g，显著低于 CK（P<0.05）；CK 和 V-L 30 的巯基含量分别为 1.25 μmol/g 和 1.73 μmol/g，二者之间具有极其显著差异（P<0.001）。这与 Zhu 等[26]研究发现提高解冻速率可减少蛋白氧化和二硫键形成的结果一致。可见，V-L 30 处理可有效减缓牛肉蛋白氧化变性。

2.2.3　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻蛋白溶解度的影响　蛋白溶解度是指蛋白质在溶液中的分散水平，蛋白质处于高度溶解状态下可以较好地表达其功能特性[27]。如图 5 所示，V-L 30 的总蛋白

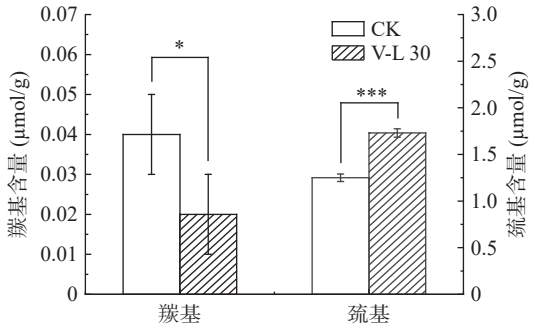


图 4　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻羰基和巯基含量的影响

Fig.4　Effect of variable temperature and high humidity combined with low pressure electrostatic field treatment on thawing carbonyl and mercapto content of beef

注: *表示差异显著(P<0.05), **表示差异高度显著(P<0.01); ***表示差异极其显著(P<0.001), 图 5、图 7 同。

溶解度、肌浆蛋白溶解度和肌原纤维蛋白溶解度均显著高于 CK(P<0.01), 说明 V-L 30 可有效减缓蛋白质交联变性, 可能是因为解冻时间相对较短, 蛋白结构较为完整, 蛋白交联聚集程度较低, 长时间解冻时蛋白质通过分子间二硫键形成蛋白交联聚集, 最终导致蛋白溶解度降低[28]。

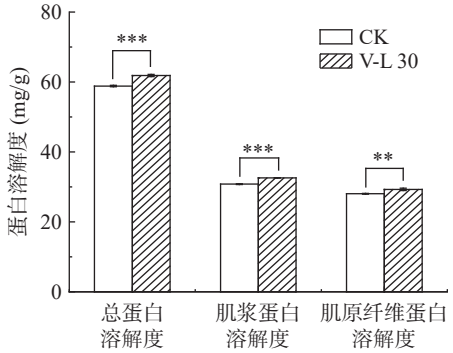


图 5　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻蛋白溶解度的影响

Fig.5　Effect of variable temperature and high humidity combined with low pressure electrostatic field treatment on beef thawing protein solubility

2.2.4　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻蛋白变性的影响　图 6 为不同解冻方法下牛肉肌原纤维蛋白的 DSC 图谱, 通常情况下, DSC 图谱有 3 个热转变区域, 峰 1 是由肌球蛋白头部变性引起的, 峰 2 是由肌球蛋白尾部和肌浆蛋白变性引起的, 峰 3 是由肌动蛋白变性引起的[29]。峰的顶点温度为蛋白变性温度(Tm), 峰的面积为蛋白的变性热焓(ΔH)。变性温度代表蛋白的热稳定性, 温度越高说明其蛋白越稳定, 变性热焓代表蛋白的变性程度, 变性热焓越大, 说明蛋白变性程度越小, 抗变性能力越强[30]。由图 6 可知, 不同解冻处理对蛋白变性有一定的影响, 与 CK 处理相比, V-L 30 处理组峰 1、峰 2 和峰 3 向右偏移且变性温度均较其有不同程度的升高, 其值显著高于 CK 处理组(P<0.05), 变性温度的升高说明 V-L 30 处理组具有更好的蛋白稳定性, 变性程度更小。

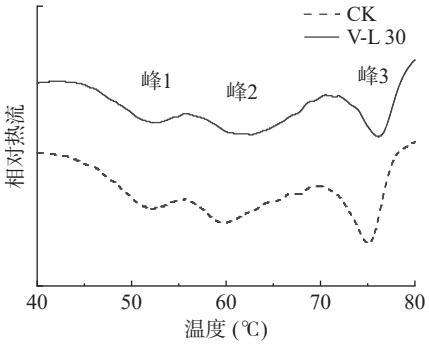


图 6　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻蛋白变性的影响

Fig.6　Effect of variable temperature and high humidity combined with low-pressure electrostatic field treatment on protein denaturation of beef thawing

表 2 为不同解冻处理的牛肉蛋白变性温度和变性热焓, 由表 2 可知, V-L 30 各峰的变性温度、变性热焓均显著高于 CK(P<0.05), 说明不同解冻方式对蛋白的稳定性和变性程度均有影响。其中, V-L 30 峰 2 的变性温度和变性热焓更高, 说明 V-L 30 解冻可使肌球蛋白尾部和肌浆蛋白更稳定。综合比较, V-L 30 解冻的蛋白热稳定性更好, 变性程度更小, 说明 V-L 30 解冻有助于维持蛋白的抗变性能力。

表 2　变温高湿协同低压静电场处理后蛋白的变性温度 Tm 和变性热焓ΔH

Table 2　Denaturation temperature Tm and denaturation enthalpy ΔH of proteins treated with variable temperature and high humidity combined with low pressure electrostatic field

组别	峰1		峰2		峰3	
	Tm(℃)	ΔH(J/g)	Tm(℃)	ΔH(J/g)	Tm(℃)	ΔH(J/g)
CK	51.81±0.35^{b}	0.76±0.04^{b}	59.08±0.70^{b}	1.11±0.02^{b}	74.21±0.88^{b}	0.79±0.02^{b}
V-L 30	52.55±0.20^{a}	0.84±0.03^{a}	62.88±0.45^{a}	1.58±0.02^{a}	76.64±0.48^{a}	0.86±0.02^{a}

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异(P<0.05)。

2.2.5　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻蛋白二级结构的影响　蛋白二级结构是蛋白质内部部分肽段骨架结构, 主要包含 α-螺旋、β-折叠、β-转角以及无规则卷曲等结构。解冻过程会破坏蛋白结构, 使肌球蛋白发生解旋, 分子内部维持蛋白结构稳定的氢键断裂, 从而导致 α-螺旋比重下降, α-螺旋向 β-折叠转变, 使蛋白稳定性减弱[31]。图 7 为变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻蛋白二级结构的影响, 可以看出, V-L 30 解冻后牛肉的 α-螺旋结构相对占比较大, 为 8.02%, 显著高于 CK 组相对占比(P<0.01), β-转角、β-折叠结构及无规则卷曲相对占比显著低于 CK 组(P<0.05), 分别为 21.26%、37.70% 和 33.02%, 较 CK 组相对占比分别低 1.74%、1.73% 和 0.85%, 可能是变温高湿协同低压静电场处理在解冻过程中破坏了蛋白的结构, 从而使其肌球蛋白发生裂解, 或是诱导了肌球蛋白尾部的 α-螺旋, 使其比重增加, 同时抑制其 β-转角、β-折叠和无规则卷曲结构的

增加，从而减缓蛋白变性程度，维持肌肉蛋白的稳定性，该结果与 Wu 等[32] 和 Li 等[33] 的研究报道基本一致。也与变温高湿协同低压静电场诱导肌球蛋白尾部和肌浆蛋白变性的峰 2 变性温度和变性热焓增加较为吻合。可见，V-L 30 解冻可使解冻后牛肉肌球蛋白更稳定，有效减缓其蛋白变性。

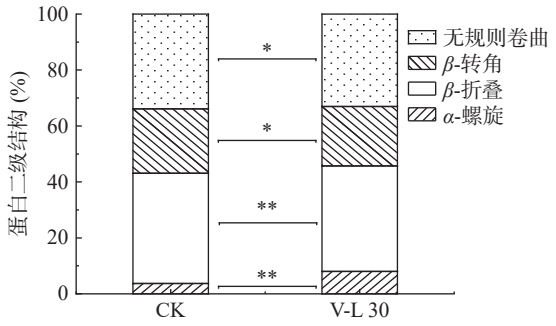


图 7　变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻蛋白二级结构的影响

Fig.7　Effect of variable temperature and high humidity combined with low pressure electrostatic field treatment on the secondary structure of beef thawed protein

3　结论

本研究采用变温高湿协同不同低压静电场技术对牛肉进行解冻，结果发现，变温高湿协同低压静电场处理均可缩短牛肉解冻时间，降低其汁液流失率和蒸煮损失率，较好地维持其色泽、持水性和嫩度，其中 V-L 30 处理解冻后牛肉效果最为显著，可使牛肉解冻时间缩短至 4.42 h，与 CK 处理组相比，缩短了 27.30%；同时 V-L 30 处理解冻后汁液流失率和蒸煮损失率仅为 7.15% 和 24.89%，分别较 CK 降低了 25.21% 和 23.88%，使其保持较好的 L^*、a^*和 b^*，剪切力仅为 20.54 N(生)和 96.23 N(熟)；V-L 30 处理解冻显著抑制了牛肉 TVB-N 和 MDA 含量，使其维持在较低的水平，可能由于解冻时间的缩短，使得微生物作用以及氧化反应时间相应减少。进一步解析其对牛肉蛋白氧化的影响发现，V-L 30 解冻处理可有效维持肌肉蛋白结构完整性，降低蛋白交联降解程度，抑制蛋白氧化变性，使其保持较好的品质，然而变温高湿协同低压静电场对牛肉蛋白凝胶特性和对水分子的影响机制尚不清楚，后续需进一步研究。该结果为现有牛肉解冻技术的优化升级提供新思路，为其在生产中应用推广提供技术支撑。

© 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] RINWI T G, SUN D W, MA J, et al. Enhancing frozen chicken meat quality by isochoric storage as compared with conventional frozen storage[J]. LWT, 2024, 208: 116608.

[2] JIANG Ling, LIU Donghong, WANG Wenjun, et al. Advancements and perspectives of novel freezing and thawing technologies effects on meat: A review[J]. Food Research International, 2025, 204: 115942.

[3] 朱明明, 彭泽宇, 赵贺开, 等. 低变温高湿解冻对猪肉理化特性、蛋白热变性及流变特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 131−138. [ZHU M M, PENG Z Y, ZHAO H K, et al. Effect of variable low temperature combined with high-humidity thawing on physicochemical characteristics, thermal denaturation and rheological properties of pork[J]. Food Science, 2019, 40(11): 131−138.]

[4] 张春晖, 李侠, 李银, 等. 低温高湿变温解冻提高羊肉的品质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 267−273. [ZHANG Chunhui, LI Xia, LI Yin, et al. Low-variable temperature and high humidity thawing improves lamb quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 267−273.]

[5] 李银, 孙红梅, 张春晖, 等. 牛肉解冻过程中蛋白质氧化效应分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1426−1433. [LI Yin, SUN Hongmei, ZHANG Chunhui, et al. Analysis of frozen beef protein oxidation effect during thawing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(7): 1426−1433.]

[6] YANG Chuan, WU Guangyu, LI Yingbiao, et al. Effect of low-voltage electrostatic field on oxidative denaturation of myofibrillar protein from lamb-subjected freeze-thaw cycles[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16(9): 2070−2081.

[7] 胡斐斐. 低压静电场辅助冻藏及解冻对猪肉品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [HU Feifei. Effect of low voltage electrostatic field-assisted frozen storage/thawing on quality of pork[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]

[8] 杨川, 武广玉, 李应彪, 等. 低压静电场结合高湿解冻对羊肉保水性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 86−94. [YANG Chuan, WU Guangyu, LI Yingbiao, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with high humidity thawing on water holding capacity of frozen lamb meat[J]. Food Science, 2023, 44(11): 86−94.]

[9] 付慧鑫, 乔雪, 乔雅洁, 等. 不同相对湿度处理对牛肉解冻效果的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(4): 133−142. [FU Huixin, QIAO Xue, QIAO Yajie, et al. Effect of different relative humidity treatments on thawing efficiency of frozen beef[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(4): 133−142.]

[10] 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. [QIAO X, QIAO Y J, FU H X, et al. Effect of low voltage electrostatic field assisted thawing on beef quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 48−56.]

[11] ZHAO Gaiming, BAI Xueyuan, TIAN Wei, et al. Effects of post-transport rest and electrical stimulation on meat quality of longissimus thoracis muscle of long-distance transported Simmental bulls[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(9): e16029.

[12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.228-2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.228-2016 National standards for food safety-Determination of volatile base nitrogen in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[13] KIM H, LEE J, JEONG S, et al. Effect of high pressure pretreatment on the inhibition of ice nucleation and biochemical changes in pork loins during supercooling preservation[J]. Meat

Science, 2024, 208: 109393.
[14] XU Shijie, LI Ping, HAN Fei, et al. Myofibrillar protein interacting with trehalose elevated the quality of frozen meat[J]. Foods, 2022, 11(7): 1041.
[15] 李彩云. 超高压联合乳酸钙处理对牦牛肉品质及微观结构的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023. [LI C Y. Effects of ultra-high pressure combined with calcium lactate treatment on the quality and microstructure of yak meat[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.]
[16] CHIAN F M, KAUR L, ASTRUC T, et al. Shockwave processing of beef brisket in conjunction with sous vide cooking: Effects on protein structural characteristics and muscle microstructure [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128500.
[17] CHENG Yan, ZHENG Yuanrong, CAI Xintong, et al. Effect of pre-acidification induction on the physicochemical features, myofibrillar protein microstructure, and headspace volatiles of ready-to-cook goose meat[J]. Food Research International, 2024, 197: 115166.
[18] CAI Mingrui, LI Xiaoxin, LIANG Juntao, et al. An effective deep learning fusion method for predicting the TVB-N and TVC contents of chicken breasts using dual hyperspectral imaging systems[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 139847.
[19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2707-2016 食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. GB 2707-2016 National food safety standards for fresh (frozen) livestock and poultry products [S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
[20] KLUPSAITE D, BUCKIUNIENE V, BLIZNIKAS S, et al. Impact of Romanov breed lamb gender on carcass traits and meat quality parameters including biogenic amines and malondialdehyde changes during storage[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(6): 1745−1755.
[21] HU Feifei, QIAN Shuyi, HUANG Feng, et al. Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks[J]. LWT, 2021, 150: 111987.
[22] HUFF-LONERGAN E, LONERGAN S M. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes[J]. Meat Science, 2005, 71(1): 194−204.
[23] 路立立. 阻隔性包装和低压静电场对猪肉品质影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. [LU L L. Effects of barrier packaging and low-voltage static electric field technology on pork meat quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.]
[24] STADTMAN E R. Protein oxidation and aging[J]. Science, 1992, 257(5074): 1220−1224.
[25] SUN Weizheng, ZHOU Feibai, ZHAO Mouming, et al. Physicochemical changes of myofibrillar proteins during processing of Cantonese sausage in relation to their aggregation behaviour and *in vitro* digestibility[J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 472−478.
[26] ZHU Mingming, ZHANG Juan, PENG Zeyu, et al. Fluctuated low temperature combined with high-humidity thawing to retain the physicochemical properties and structure of myofibrillar proteins from porcine longissimus dorsi[J]. LWT, 2021, 142: 111001.
[27] 姜晴晴, 刘文娟, 鲁珺, 等. 冻结与解冻处理对肉类品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 384−389. [JIANG Q Q, LIU W J, LU J, et al. Research progress of the impact of freezing and thawing on meat quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(8): 384−389.]
[28] ZHANG Xin, GAO Tian, SONG Lei, et al. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(9): 2097−2105.
[29] DENG Y, ROSENVOLD K, KARLSSON A H, et al. Relationship between thermal denaturation of porcine muscle proteins and water-holding capacity[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(5): 1642−1647.
[30] 李侠, 孙圳, 杨方威, 等. 适宜冻结温度保持牛肉蛋白稳定性抑制水分态变[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 238−245. [LI Xia, SUN Zhen, YANG Fangwei, et al. Appropriate freezing temperature to maintain beef protein stability and inhibit myowater state changes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 238−245.]
[31] 李侠, 杨方威, 王航, 等. 静电场辅助冻结-解冻对牛肉肌原纤维蛋白二级结构的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(9): 1750−1756. [LI Xia, YANG Fangwei, WANG Hang, et al. The effects of electrostatic field assisted freezing and thawing on myofibrillar protein secondary structure[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(9): 1750−1756.]
[32] WU Z Y, BERTRAM H C, BÖCKER U, et al. Myowater dynamics and protein secondary structural changes as affected by heating rate in three pork qualities: A combined FT-IR microspectroscopic and 1H NMR relaxometry study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(10): 3990−3997.
[33] LI Fangfei, WANG Bo, LIU Qian, et al. Changes in myofibrillar protein gel quality of porcine longissimus muscle induced by its stuctural modification under different thawing methods[J]. Meat Science, 2019, 147: 108−115.