黄原胶对热杀菌牛肉糜凝胶特性及吞咽适应性的影响

刘钊彬，代壮，胡文清，滕建文，王勤志，黄丽，夏宁*

（广西大学轻工与食品学院，广西南宁 530000）

摘要：为探究黄原胶（Xanthan Gum，XG）添加量对经热杀菌处理的牛肉糜凝胶特性及其吞咽适应性的影响，本研究比较了牛肉糜凝胶的色差、持水性、蒸煮损失、质构特性、流变特性、水分分布与微观结构，并依据国际吞咽困难饮食标准化倡议（International Dysphagia Diet Standardisation Initiative，IDDSI）框架进行吞咽适应性等级评定。研究表明，持水性随 XG 添加量增加呈先升后降趋势，在 1.2% XG 添加量下，蒸煮损失率显著降至 8.36%，且硬度、弹性和咀嚼性分别从 61.02 N、4.49 mm 与 174.52 mJ 下降到 1.81 N、0.60 mm 与 0.87 mJ，内聚性在较高添加量下得到恢复。XG 的添加降低了体系的弹性模量 *G'*与黏性模量 *G''*，促进了弱凝胶网络的形成。当 XG 添加量为 0.8%~1.2%时，样品符合 IDDSI 6 级食品（软质及一口量）标准。XG 通过填充肌纤维间隙、与蛋白质相互作用形成弱凝胶，增强了水分束缚能力，但热杀菌促使部分不易流动水向自由水转化。综上，适量添加黄原胶可有效优化热杀菌后牛肉糜凝胶的质构特性，显著提升其吞咽适应性，为开发以动物蛋白为基础的易吞咽食品提供了理论依据。

关键词：黄原胶；牛肉糜凝胶；IDDSI；凝胶特性；吞咽适应

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.1.1745

Effect of Xanthan Gum on the Gel Properties and Swallowing Adaptability of Thermally Sterilized Beef Mince

LIU Zhaobin, DAI Zhuang, HU Wenqing, TENG Jianwen, WANG Qinzhi, HUANG Li, XIA Ning*

(College of Light Industry and Food Sciences, Guangxi University, Nanning 530000, China)

Abstract: To investigate the influence of Xanthan Gum (XG) addition on the properties and swallowing adaptability of beef paste gels treated by thermal sterilization, samples with varying XG levels were systematically compared in terms of color difference, water-holding capacity, cooking loss, textural characteristics, rheological properties, moisture distribution, and microstructure. Swallowing adaptability was evaluated in accordance with the International Dysphagia Diet Standardisation Initiative (IDDSI) framework. The results indicated that water-holding capacity increased initially and then decreased with increasing XG concentration. At an XG level of 1.2%, the cooking loss rate was significantly reduced to 8.36%, while hardness, springiness, and chewiness were decreased from 61.02 N, 4.49 mm, and 174.52 mJ to 1.81 N, 0.60 mm, and 0.87 mJ, respectively. Cohesiveness was restored at higher XG concentrations. The incorporation of XG resulted in reductions in the elastic modulus (*G'*) and viscous modulus (*G''*), thereby promoting the formation of a weak gel network. When the XG concentration ranged from 0.8% to 1.2%, the samples met the IDDSI Level 6 standard for soft and bite-sized foods. XG enhanced water-binding capacity by filling gaps between muscle fibers and interacting with proteins to form a weak gel structure, whereas thermal sterilization facilitated the conversion of part of the immobilized water into free water. In conclusion, the appropriate addition of XG effectively optimized the textural characteristics of heat-sterilized beef paste gels, significantly improved their swallowing adaptability, and provided a theoretical basis for the development of easily swallowed foods based on animal protein.

Key words: xanthan gum; beef mince gels; IDDSI; gel properties; swallowing adaptability

人口老龄化是当今全球面临的重大社会挑战，并伴随着日益凸显的老年人健康问题。其中，吞咽困难在老年

收稿日期：2025-12-06；修回日期：2026-01-13；接受日期：2026-01-15

基金项目：广西重点研发计划项目（桂科农 AB2506910026）

作者简介：刘钊彬（2000-），男，硕士研究生，研究方向：蛋白质结构与功能，E-mail：2582578898@qq.com

通讯作者：夏宁（1977-），女，博士，副教授，研究方向：蛋白质结构与功能，E-mail：xianing@gxu.edu.cn

群体中尤为普遍，其成因包括牙齿缺失、口腔咀嚼功能减退、食管括约肌功能退化等生理机能的衰退，导致食物难以安全有效地由口腔输送至胃部。此外，神经系统疾病如帕金森病、阿尔茨海默病及脑卒中等也进一步加剧了吞咽障碍的发生风险[1]。因此，吞咽困难不仅限制老年人对食物的摄入与营养的吸收，还可能引发营养不良、脱水、吸入性肺炎，甚至窒息等严重并发症[2]。

目前，针对吞咽困难患者的饮食干预，主要依赖泥状食物和增稠液体。然而，此类食品主要采用植物性淀粉与蛋白为主要原料，虽然得到符合 IDDSI 的 5 级食品（细碎及湿软）和 6 级食品（软质及一口量）[3,4]，但营养均衡性不足，缺乏人体所需由动物性原料带来微量元素与更合理的氨基酸效价，且感官特性也难以有效激发消费者的食欲。动物性原料具有人体所需微量元素以及丰富的蛋白质，这些蛋白质具备天然的运输钙和铁等重要营养素的特点，能够保障人体身体健康，尤其对婴儿成长及老年人补充营养需求起重要作用[5]，但是由于其在热处理过程中的肉类蛋白质受热发生变性，其中肌原纤维蛋白凝聚、胶原蛋白收缩，导致质地硬化[6]，进一步限制了其在老年吞咽障碍人群中的应用。为改善以肌肉蛋白为主要原料的易吞咽食物的质构，研究者已开发出多种质构改良技术，如酶处理[7]、高压加工处理[8]、3D 打印[9]及添加亲水胶体[10]等。然而，现有的研究依然集中在基于未改善质构的原辅料配方优化设计上，忽略了预包装易吞咽食品必须经历的终端热杀菌对产品最终吞咽特性产生的影响。热杀菌在确保食品安全和延长货架期的同时，也会引起蛋白质变性、水分迁移等变化，甚至可能完全改变乃至破坏为吞咽适应性而设计的凝胶结构。因此，在模拟实际加工的杀菌条件，评估产品的吞咽适应性，是将实验室配方转化为商业化产品的必须考虑的因数。

黄原胶作为一种微生物胞外多糖，具有良好的增稠、乳化和稳定性，在食品工业中应用广泛。尽管其本身不形成凝胶，但在特定离子或多糖/蛋白质共存条件下可形成凝胶。此外，黄原胶溶液具有较好的剪切稀化特性与酸碱稳定性，有助于降低误吸风险[11]。研究表明，黄原胶能增强植物蛋白凝胶及肉制品的内聚性[12,13]，改善其结构完整性，并在热处理过程中有效稳定蛋白质的空间构象与功能。此外，黄原胶具有热稳定与酸碱稳定性好、几乎不提供热量等优点，使其成为吞咽困难饮食中一种高效且安全的质构改良剂。然而，目前黄原胶在吞咽障碍食品中的应用多集中于液态食品的增稠，而在肉制品体系中的研究仍较为有限。

在前期使用食品胶体作为肉制品的质构改良剂的实验中发现，添加适量黄原胶并经热杀菌处理（121 ℃，0.1 MPa，15 min）可形成质地适宜的牛肉糜凝胶。因此，本研究系统探讨不同黄原胶添加量对牛肉糜凝胶特性及吞咽适应性的影响，通过色差测定、持水性、蒸煮损失、质构分析、流变特性、IDDSI 等级评定、水分分布与微观结构等指标，旨在阐明黄原胶在热杀菌后的肉糜凝胶中的作用机制，为开发适用于吞咽障碍人群的牛肉制品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜牛肉，市售；黄原胶，购于阜丰集团有限公司；其他化学试剂均为分析纯；实验用水为去离子水。

1.2 仪器与设备

MJ-MC60M6-200 绞肉机，广东美的生活电器制造有限公司；RW16 顶置式电子搅拌器，德国 IKA 公司；YXQ-LS-24SⅡ手提式压力蒸汽灭菌锅，上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；CM-3600A 分光测色计，日本柯尼卡美能达集团；Eppendorf 5430 高速离心机，上海医用分析仪器厂；TA.XTplus 质构仪，英国 Stable Micro System 公司；HAAKE MARS 40 模块化流变仪工作站，美国赛默飞公司；MicroMR20-025V-Ⅰ低场核磁共振成像分析仪，苏州纽迈电子科技有限公司；F16502 扫描电镜（表面微观测试仪），荷兰 PHENOM 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 牛肉肉糜的制备

称取一定质量的牛后腿肉，经清洗并剔除可见筋膜，使用绞肉机绞碎，制得肉糜。将黄原胶配制成一定浓度的溶液，按肉糜质量分数 0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%和 1.2%分别添加到肉糜中，混合均匀，分装于铝盒（Φ30×20 mm）中，经 121 ℃、0.1 MPa 热杀菌处理 15 min。处理后的样品经冷却，置于 4 ℃冰箱贮藏备用。

样品分别标记为 Control、XG-1、XG-2、XG-3、XG-4、XG-5 和 XG-6。

1.3.2 色差分析

样品的色差参照 Pematilleke 等[14]的方法并稍作修改进行分析。色差仪经校准后，对不同黄原胶添加量经过热杀菌得到的肉糜样品截面进行 *L**值、*a**值和 *b**值的分析，其中，色差值（*E*）采用如下公式计算：

$$E = 100 - \sqrt{(100 - \Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

式中:

E——色差值;

*L**——亮度值;

*a**——红度值;

*b**——黄度值。

1.3.3 持水性（WHC）

样品持水性的测定参照 Du 等[15]的方法并略作修改。称取 5 g（M_1）经滤纸拭干表面水分的热杀菌后样品，用滤纸包裹后置于 50 mL 离心管中，于 4 ℃、6 000×*g* 下离心 15 min。取出后，迅速吸干包裹滤纸表面的渗出水分，称取样品的质量（M_2）。并按以下公式计算：

$$D = \frac{M_2}{M_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

D——持水性，%

M_1——离心前样品重量，g;

M_2——离心后样品重量，g。

1.3.4 蒸煮损失率

通过测定热杀菌前后样品的质量变化来评估。称取热杀菌前铝盒内的样品质量（W_1），用纸巾吸干经过热杀菌处理下样品的表面汁液，称取其质量（W_2），蒸煮损失率（C）按以下公式计算：

$$C = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

C——蒸煮损失率，%

W_1——热杀菌前样品重量，g;

W_2——热杀菌后样品重量，g。

1.3.5 质构特性分析（TPA）

采用质构分析仪，参照 Biyikli 等[16]的方法并稍作修改，测定热杀菌处理后样品的硬度、内聚性、弹性和咀嚼性。测定条件为：P36 探头，以 1.0 mm/s 的速度进行两次压缩，压缩形变 30%，间隔 5 s，触发力为 0.05 N，测后速度为 2.0 mm/s。

1.3.6 流变特性检测

将热杀菌处理前的肉糜样品置于流变仪测试台，进行温度扫描，使用 P35TiL 探头，平板与操作台间距为 1 mm，擦去多余的肉糜。温度扫描参数是，应变 1%（线性范围内），频率 1 Hz，以 5 ℃/min 的升温速度从 25 ℃升温至 95 ℃，记录测试过程中的储能模量（*G′*）和损耗模量（*G″*）[17]。

1.3.7 国际吞咽困难饮食标准化倡议（IDDSI）测试

热杀菌后样品的吞咽适应性参照 IDDSI 框架及 Wu 等[18]的方法进行评估。在勺子倾斜测试中，将热杀菌后的牛肉糜凝胶样品放入勺子凹面上，缓慢倾斜观察其行为，以勺子凹面无残留物作为通过依据；在叉子滴漏测试中，将牛肉糜凝胶样品放置于叉子上，观察其形状及通过叉齿间隙流动的行为，以无水滴或样品通过叉齿间隙滴漏作为通过依据；将样品切为立方体（1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm），进行叉压与勺倾试验。以汤匙侧面即可将食物切断或

切成较小块；拇指在叉上按压时指甲不变白作为叉压试验的依据；以样品在勺倾后不能恢复原状作为勺倾试验的通过依据。

1.3.8 低场核磁共振分析（LF-NMR）

采用低场核磁共振波谱仪分析样品的水分状态。称取约 5.0 g 热杀菌后的牛肉糜凝胶样品置于 LF-NMR 检测管中，使用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列模式测定各样品的横向弛豫时间（T2）及其分布。参数设置如下：共振频率（SF）22 MHz，采样点数（TD）240 000，回波个数（NECH）4 000，回波时间（TE）0.30 ms，采样宽度（SW）200 kHz，重复采样时间间隔 5 000 ms。选用反演软件连续谱迭代分析拟合得到各样品的波谱图[19]。

1.3.9 扫描电子显微镜分析（SEM）

采用扫描电子显微镜观察牛肉糜凝胶的微观结构。将热杀菌后的样品经液氮速冻后，进行真空冷冻干燥固定。将干燥后的样品断面进行喷金处理，在 15 kV 的加速电压下，以 1 000×和 3 000×的放大倍数观察样品的微观结构[20]。

1.4 数据分析

所有实验重复三次，实验结果以“平均值±标准差”表示。使用 IMB SPSS Statistics 27 统计分析软件进行显著性分析（P<0.05），用 Origin 2024 软件进行图表绘制。

2 材料与方法

2.1 不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的色差影响

不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶色差的影响如表 1 所示，其中，L*表示明亮度，a*表示红绿值，b*表示黄蓝值。与对照组相比，亲水胶体的添加对牛肉糜凝胶的 L*值和 a*值无显著变化，对 b*值有显著的增加（P<0.05），但黄原胶浓度的增加对 b*值的影响无显著差异。对 ΔE 值而言，少量的 XG 因为自身的胶黏性可以与肉糜相互结合，导致色差值下降，但是更高浓度的黄原胶会稀释部分肉糜的连续性，而肉糜重叠和分散产生的空隙可能是导致色差变化的主要原因[21]。

表 1 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的 L^*值、a^*值、b^*值和色差值（ΔE）

Table 1 L^*, a^*, b^* Color Parameters and Total Color Difference (ΔE) of Beef Mince Gels with Different Levels of Xanthan Gum Addition

样品	L*值	a*值	b*值	ΔE
Control	60.49±1.28^{ab}	5.74±0.15^{b}	13.41±1.38^{c}	57.86±0.72^{ab}
XG-1	60.69±1.31^{ab}	6.91±0.68^{a}	15.98±0.79^{a}	56.99±0.83^{b}
XG-2	58.80±0.82^{b}	5.84±0.48^{b}	15.41±0.48^{ab}	55.62±0.61^{c}
XG-3	60.06±0.67^{ab}	5.72±0.26^{b}	15.53±0.68^{ab}	56.77±0.35^{bc}
XG-4	61.08±0.66^{a}	6.01±0.19^{b}	15.23±0.39^{ab}	57.77±0.46^{ab}
XG-5	61.59±0.62^{a}	5.91±0.45^{b}	14.38±0.80^{bc}	58.56±0.63^{a}
XG-6	60.98±1.34^{a}	6.30±0.30^{ab}	15.38±0.44^{ab}	57.58±1.12^{ab}

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（P<0.05），下同。

2.2 不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的持水性影响

持水性是指牛肉糜凝胶在外力作用下保持水分的能力。图 1 反映了不同 XG 添加量对热杀菌后牛肉糜凝胶持水性的影响。低含量的黄原胶的加入能改善牛肉糜凝胶的持水性，但随着 XG 添加量的增加，牛肉糜的持水性反而降低，随后趋于稳定。其中，添加 0.1% XG 的牛肉糜凝胶持水性最高，为 68.86%，而添加 1% XG 的样品持水性最低，为 60.90%，且与对照组存在显著差异。适量添加 XG 能够提升持水性，主要在于凝胶网络对水分的截留作用，此外，由于 XG 是阴离子多糖，其分子中强极性的-COO-与-OH 等基团能促进了双螺旋结构的形成，增强了体系的持水能力[22]。但是，当 XG 添加量进一步增加时，黄原胶自身吸水形成持水性较差、硬度较低的弱凝胶

结构，反而导致整体持水性下降[23]。

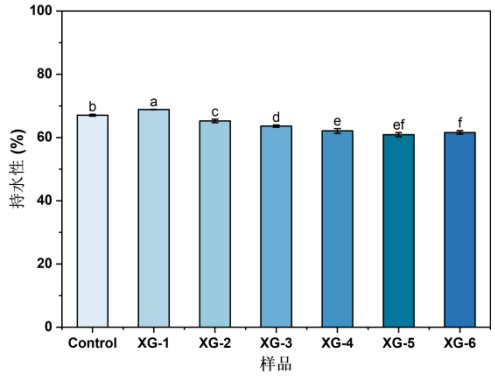

图 1 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的持水性

Fig.1 Water-holding capacity of beef mince gels prepared with different levels of xanthan gum addition

注：不同样品按黄原胶添加量分组：Control（0%）；XG-1（0.2%）；XG-2（0.4%）；XG-3（0.6%）；XG-4（0.8%）；XG-5（1.0%）；XG-6（1.2%）。不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

2.3 不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的蒸煮损失率影响

蒸煮损失率是指食品在蒸煮过程中因水分和可溶性物质流失而导致重量减少的比例。不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的蒸煮损失率如图 2 所示，与对照组相比，随着 XG 添加量的增大，蒸煮损失率显著降低（P<0.05），当添加量达到 1.2%时，可以将对照组的蒸煮损失率 42.86%下降到最低的 8.36%。这说明 XG 的添加在一定浓度范围内，可以显著降低牛肉糜凝胶杀菌后的蒸煮损失率，这与 XG 能有效提高肉糜中蛋白形成的凝胶的保水性，增加凝胶网络对水的束缚，将更多的水分保留在体系内，从而降低杀菌后的蒸煮损失率[24]。

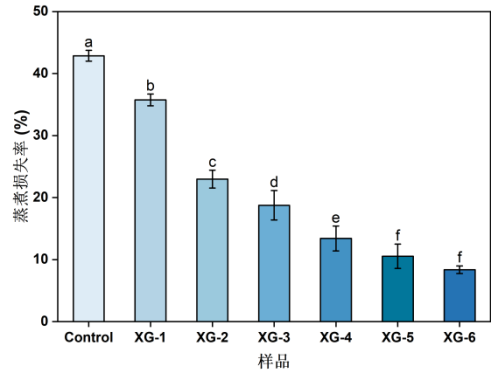

图 2 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的蒸煮损失率

Fig.2 Cooking loss of beef mince gels prepared with different levels of xanthan gum addition

2.4 不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的质构特性影响

质构分析（TPA）通过二次挤压模拟人体口腔的咀嚼来获得肉制品人类感官评价的对应参数。不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的硬度、内聚性、弹性和咀嚼性如表 2 所示。与对照组相比，随着 XG 添加量的增加，牛肉糜凝胶的硬度、弹性、咀嚼性均呈现显著降低的趋势（P<0.05），当添加量达到 0.8%，肉糜凝胶的硬度、弹性和咀嚼性与对照组相比，分别从 61.02 N、4.49 mm 与 174.52 mJ 下降到 1.81 N、0.60 mm 与 0.87 mJ，随后随着添加量的增加，质构变化趋于稳定。一般而言，肉糜中的肌原纤维蛋白受热诱导收缩形成凝胶化，会挤出的水分，导致硬度会增加[25]。但是 XG 的加入，一方面能够与肉糜中的肌原纤维蛋白竞争性结合水分子，束缚大量的自由水，即使在加热过程中，被黄原胶束缚的水分也很难流失；另一方面，黄原胶的粘稠特性可以“润滑”和“软化”蛋白质形成的刚性网络，使凝胶的质地更柔软，减少凝胶的硬度、弹性及咀嚼性[26]。此外，牛肉糜凝胶的内聚性则是随着 XG 添加量增大先降低后增大，XG-4、XG-5 和 XG-6 的内聚性均显著大于对照组，这表明添加 XG 可以改良牛肉糜凝胶的质地，提高了牛肉糜凝胶食品的吞咽适应性[27]。

表 2 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的硬度、内聚性、弹性和咀嚼性

Table 2 Hardness, cohesiveness, springiness, and chewiness of beef mince gels prepared with different levels of xanthan gum addition

样品	硬度/N	内聚性	弹性/mm	咀嚼性/mJ
Control	61.02±4.26^{a}	0.64±0.01^{c}	4.49±0.08^{a}	174.52±11.89^{a}
XG-1	20.90±2.49^{b}	0.44±0.01^{de}	3.58±0.15^{b}	33.42±5.09^{b}
XG-2	9.68±1.95^{c}	0.39±0.02^{e}	2.48±0.30^{c}	9.52±2.97^{c}
XG-3	3.20±0.43^{d}	0.51±0.04^{d}	1.28±0.27^{d}	2.09±0.53^{c}
XG-4	1.80±0.13^{d}	0.81±0.08^{b}	0.60±0.11^{e}	0.87±0.14^{c}
XG-5	1.65±0.11^{d}	0.86±0.05^{ab}	0.61±0.10^{e}	0.86±0.15^{c}
XG-6	1.51±0.12^{d}	0.94±0.09^{a}	0.55±0.05^{e}	0.73±0.03^{c}

2.5 不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的流变特性影响

弹性模量（*G'*）表示样品储存能量和抵抗形变的能力，*G''*越高，说明形成的凝胶的刚性与弹性越强，反映了样品的固体特性。从图 3 可知，当样品处于 25~60 ℃，*G'*值缓慢下降后趋于平缓，此时肌球蛋白等蛋白开始变性，分子展开，暴露出内部的疏水区和巯基，从而导致凝胶中蛋白质分子的流动性增强[28]，当温度到达 60 ℃时，*G'*值迅速增加，肌原纤维蛋白因为热变性聚集形成弹性凝胶网络[29]。添加黄原胶后，样品的 *G'*值发生急剧变化的温度没有发生变化，但 *G'*值普遍降低，上升的曲线变得更平缓。这主要是由于黄原胶分子与蛋白质竞争水分子，在一定程度上阻碍了蛋白质分子之间的交联，起到了“稀释”和“空间位阻”的作用，从而降低了样品的弹性模量[30]。

黏性模量（*G''*）代表样品的流动和耗散能量的能力，*G''*越高，说明样品的粘性与流动性越强，反映了样品的液体特性。从图 3 可知，*G''*与 *G'*的变化趋势相似，在在 25~60 ℃缓慢下降后趋于平缓，当温度到达 60 ℃时则逐渐上升，但处于缓慢上升阶段，并在保持稳定后轻微下降。与对照组相比，添加 XG 的样品 *G''*值均小于对照组，表明添加 XG 增加了牛肉糜凝胶的黏性。但由于样品的 *G'*值均大于 *G''*值，表明所有样品均能形成不同弹性的凝胶，其中低弹性凝胶有助于减少咀嚼力，更适合吞咽障碍人群的食用[31]。

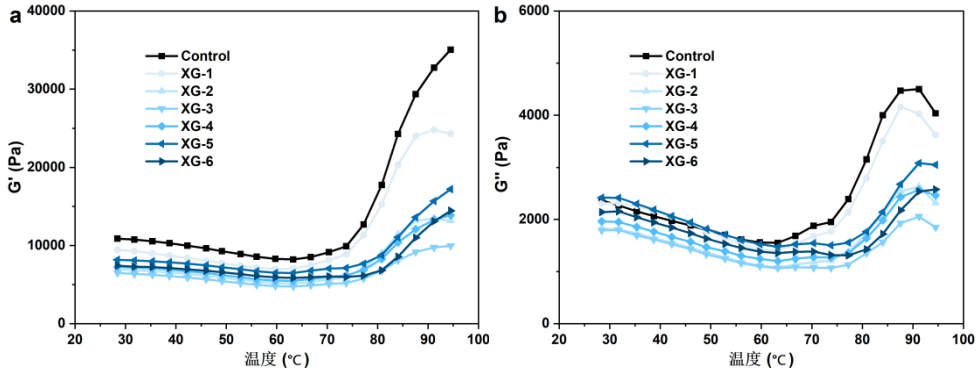

图 3 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的 *G'*（a）和 *G''*（b）

Fig.3 Rheological behavior of beef mince gels prepared with different levels of xanthan gum addition: G'(a) and G'' (b)

2.6 IDDSI 测试

IDDSI 框架为评估专为吞咽困难设计的食品提供了国际公认的术语和定义。因此，采用勺倾、叉滴、勺压和叉压测试方法来评估添加 XG 的牛肉糜凝胶作为适合吞咽困难患者的饮食的可行性。

勺倾测试结果如图 4 所示，所有样品表面光滑，在勺子内保持形状，倾斜后除了 XG-6 样品在勺子上有少量残留物，其他凝胶的勺子表面光滑无残留，该测试表明样品均满足吞咽困难患者对食物附着力和内聚力的要求[32]。易吞咽食物的安全粒径通常为 2~4 mm，叉齿间隙为 4 mm，可作为测量易吞咽食品粒径的有效工具[33]。在叉滴测试中，所有样品都可以稳定在叉子上，且叉齿之间没有泄漏，表明它们粒径满足安全范围要求。

牛肉糜凝胶被切为立方体（1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm），并在压力测试中进一步评估。这种接近成人拇指甲尺寸的尺寸被认为降低了窒息风险[34]。如图 5 中的勺压测试和叉压测试结果显示，对照样即使按压力度至拇指泛白仍不能使样品发生明显形变，随着 XG 添加量的增加，按压后的样品形变程度越来越大，且拇指泛白程度越来越不

明显，说明样品随 XG 添加量增大越容易被压平和破碎，释放压力后没有恢复形状。综上结果表明，添加黄原胶可以改良牛肉糜凝胶的质地，且 XG-4、XG-5 和 XG-6 在 IDDSI 框架上可以被识别为 6 级，即软质及一口量食品[35]。质构分析和 IDDSI 测试的结果相结合，添加 XG 能够显著降低牛肉糜凝胶的硬度，压力测试也表现出需要少的压力去按压凝胶样品，弹性的降低使凝胶被按压后释放压力不能恢复原来形状，咀嚼性的降低也让吞咽变得容易，样品测试结果表明 XG-4、XG-5 和 XG-6 在 IDDSI 的 6 级食品（软质及一口量）的安全范围内，因此添加 XG 可以改良牛肉糜凝胶的质地且可以作为老年人吞咽障碍的潜在桥梁食品。

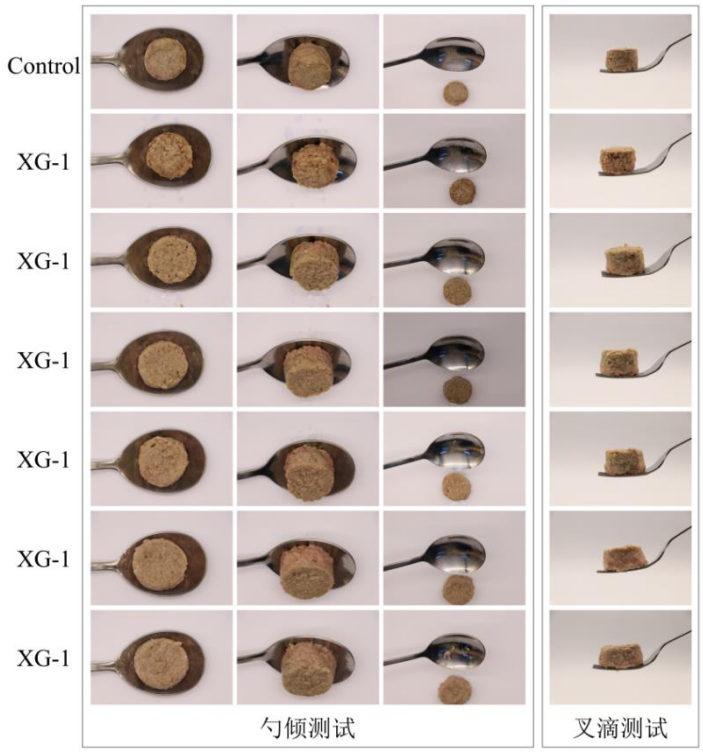

图 4 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的勺倾测试和叉滴测试

Fig.4 Spoon tilt test and fork drip test results of beef mince gels containing different levels of xanthan gum

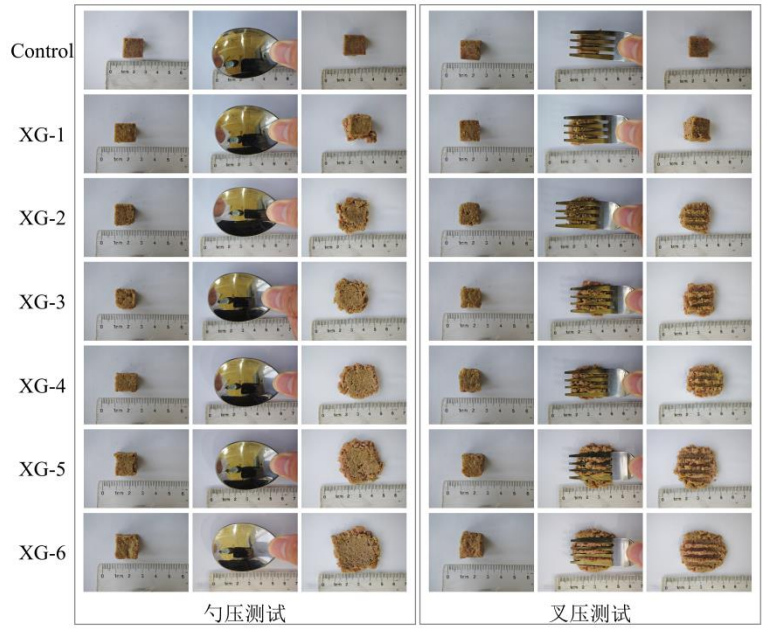

图 5 不同 XG 添加量的牛肉糜凝胶的勺压测试和叉压测试

Fig.5 Spoon pressure test and fork pressure test results of beef mince gels with different levels of xanthan gum addition

2.7 不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的水分分布影响

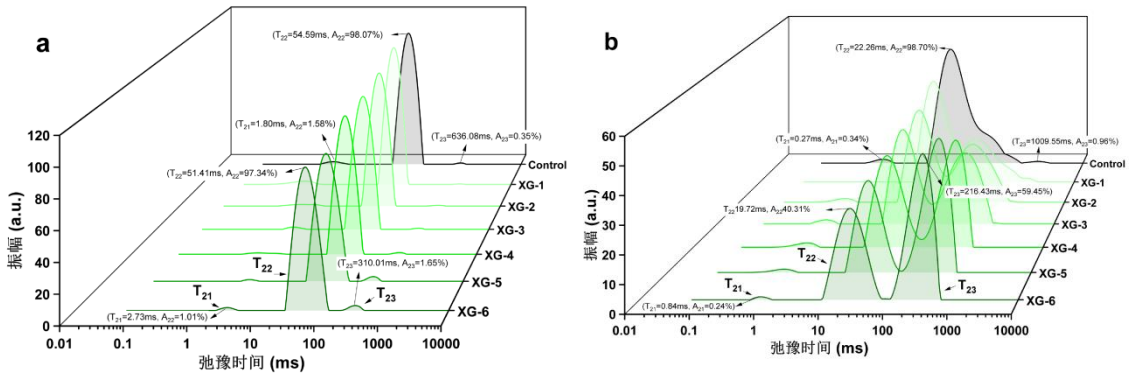

图 6 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的低场核磁共振图像

Fig.6 Low-field nuclear magnetic resonance images of beef mince gels with different levels of xanthan gum addition

注：a: 肉糜水分分布图；b: 肉糜凝胶水分分布图。

从 LF-NMR 的测试中获得的弛豫时间和峰面积信息已广泛用于研究凝胶样品的水分分布特性。从热杀菌前的肉糜水分分布图 6a 可知，添加黄原胶前后，样品的光谱图中均出现 3 个峰，0~10 ms 间的峰 T_{21} 代表与大分子紧密结合的结合水；10~100 ms 间的峰 T_{22} 代表包裹在三维凝胶结构中的水，即不易流动水；100~1 000 ms 间的峰 T_{23} 代表凝胶结构外的水，又称自由水[36]。随着添加量的增加，T_{22} 与 T_{23} 呈现出更明显的峰形，说明牛肉糜凝胶的水分发生明显转变。

当经过热杀菌后，肉糜凝胶的水分分布图发生明显的变化，如图 6b 所示。与对照组相比，黄原胶的添加没有显著改变 T_{21}（0.27 ms）弛豫时间，也没有改变该弛豫时间对应下的峰面积 A_{21}。但当黄原胶添加量增加到 1.2%时，T_{22} 与 T_{23} 的信号峰从对照组的 22.26 ms 与 1 009.55 ms 均左移到 19.72ms 与 216.43 ms，说明肉糜对水的束缚能力得到提升[37]。与此同时，T_{22} 弛豫时间对应的峰面积占比 A_{22} 分别从对照组的 98.70%降低到最低的 40.31%，而 T_{23} 弛豫时间对应的峰面积占比 A_{23} 从则相应地从对照组的 0.96%增加到 59.45%。由于 A_{21}、A_{22} 和 A_{23} 是每种水分的峰面积与总面积的比值，表示每种成分的相对含量，说明 XG 的加入，在加热后，肉糜凝胶部分不易流动水转变成自由水，这与热杀菌处理使肌肉蛋白发生变性收缩，导致蛋白质与水结合的能力变差密切[38]，导致持水性降低。由于目前在研究黄原胶添加对肉糜凝胶的持水影响，主要采用的是低于 100 ℃的低温慢煮热处理工序，黄原胶与肌肉蛋白更容易发生共凝胶作用，更好地束缚肌肉凝胶体系内的结合水，降低水分活度[39]。但热杀菌处理则会改变这种现象，有研究表明[40]，低温（<100 ℃）处理可以减少水分流失，而 120 ℃热杀菌会使肉制品中肌原纤维收缩，肌球蛋白变性，导致水分从肌原纤维流出。

2.8 不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的微观结构影响

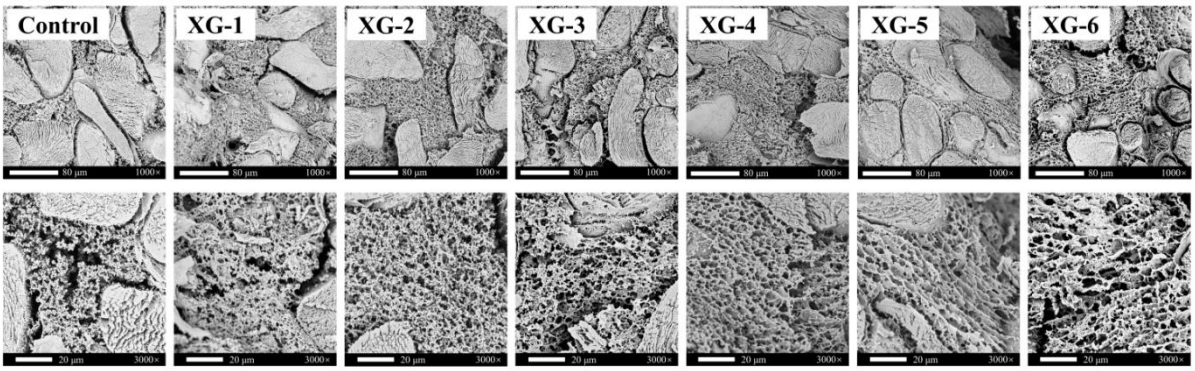

图 7 不同 XG 添加量下牛肉糜凝胶的微观结构变化（上：1000×；下：3000×）

Fig.7 Scanning electron microscopy micrographs of beef mince gels with different levels of xanthan gum addition (top: 1000×; bottom: 3000×)

图 7 显示了黄原胶的添加热杀菌后牛肉糜凝胶微观结构的影响。未添加黄原胶的对照组样品显示出较大的肌纤维孔隙率，且肌内膜出现较大程度的颗粒化[38]，这主要与热杀菌中的高温引起的肌原纤维蛋白降解有关，形成肌球蛋白复合物、肌钙蛋白复合物和胞浆等组织的聚集体[41]。随着 XG 添加量的增加，凝胶中较大颗粒逐渐减少，内部孔洞尺寸减小，孔隙率相应降低，微观结构趋于均匀。这与 XG 在肌纤维间隙中的填充作用及其与蛋白质结合形成的弱凝胶结构[23]。随着 XG 添加量的提高，弱凝胶内部也能形成更多空腔结构，有助于增强水分的截留能力，从而降低蒸煮损失率。

3 结论

本研究为改良牛肉糜凝胶的质地，以 XG 和牛肉为主要原料结合热杀菌工艺，探究了添加 XG 的牛肉糜凝胶在 IDDSI 框架中的质构分级和不同 XG 添加量对牛肉糜凝胶的特性影响及其吞咽适应性。研究表明不同添加量的黄原胶对牛肉糜凝胶色差值无显著影响（$P>0.05$），但对持水性、蒸煮损失率、硬度、内聚性、弹性和咀嚼性均有显著性影响（$P<0.05$）。持水性从 68.86%降低至 60.90%，蒸煮损失率从 42.86%降低至 8.36%，硬度、弹性和咀嚼性分别从 61.02 N、4.49 mm 与 174.52 mJ 下降到 1.81 N、0.60 mm 与 0.87 mJ，同时内聚性在较高添加量下得到恢复。流变分析结果表明，所有样品均形成凝胶结构，但 XG 的添加降低了体系的弹性模量 G'与黏性模量 G''，促进了弱凝胶网络的形成。通过 IDDSI 框架测试方法，可以认为添加了 0.8%~1.2%黄原胶的牛肉糜凝胶符合 IDDSI 框架中的 6 级食品（软质及一口量）标准，适于吞咽障碍人群食用，本研究在热杀菌条件下系统分析了肉类蛋白凝胶结构与质构特性的变化规律，模拟了工业化易吞咽食品加工过程中的热处理环节。低场核磁共振与微观结构分析进一步说明 XG 通过填充肌纤维间隙、与蛋白质相互作用形成弱凝胶，增强了肉糜凝胶体系的水分束缚能力，但热杀菌促使部分不易流动水向自由水转化。因此，在热杀菌工业生产条件下，适量添加黄原胶可有效优化热杀菌后牛肉糜凝胶的质构特性，显著提升其吞咽适应性，为开发以动物蛋白为基础的易吞咽食品提供了理论依据与技术参考。

参考文献

[1] GALLEGO M, MANUEL BARAT J, GRAU R, et al. Compositional, structural design and nutritional aspects of texture-modified foods for the elderly [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 152-163.

[2] LIU S, QIAO D, CHENG Z, et al. Towards designing dysphagia foods: Recent advances in influencing factors and computer modeling for the swallowing of thickened fluids [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 137: 17-30.

[3] MIN C, YANG Q, PU H, et al. Textural characterization of calcium salts-induced mung bean starch-flaxseed protein composite gels as dysphagia food [J]. Food Research International, 2023, 164: 112355.

[4] WANG Z, ZENG J, DENG Y, et al. Regulating heat-induced fibrous whey protein-wheat starch composite emulsion gels as dysphagia food by preheating temperature: Insights from protein-starch interactions [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110621.

[5] DAY L, CAKEBREAD J A, LOVEDAY S M. Food proteins from animals and plants: Differences in the nutritional and functional properties [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 428-442.

[6] PEMATILLEKE N, KAUR M, ADHIKARI B, et al. Meat texture modification for dysphagia management and application of hydrocolloids: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(6): 1764-1779.

[7] RIBEIRO W O, OZAKI M M, DOS SANTOS M, et al. Interaction between papain and transglutaminase enzymes on the textural softening of burgers [J]. Meat Science, 2021, 174: 108421.

[8] LIU S, LI J, QIN Y, et al. High-pressure homogenization transformed salmon protein filament into micelle structure: Improvement on the stability and swallowing rheology of dysphagia-oriented salmon emulsion gels [J]. Food Chemistry, 2025, 468: 142460.

[9] HOU J, LIU M, LIU Y, et al. Strategy to kill two birds with one stone: High internal phase Pickering emulsions to modulate 3D printed pork texture as a dysphagia diet [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141319.

[10] LIN Y, WANG Z, SHI C, et al. Potentially texture-modified food for dysphagia: Impact of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide addition on gelling properties, microstructure and digestibility of bovine tendon collagen-cassava starch composite gels [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 164: 111164.

[11] NISHINARI K, TAKEMASA M, SU L, et al. Effect of shear thinning on aspiration - Toward making solutions for judging the risk of

aspiration [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(7): 1737-1743.

[12] CORTEZ-TREJO M C, LOARCA-PINA G, FIGUEROA-CARDENAS J D, et al. Gel properties of acid-induced gels obtained at room temperature and based on common bean proteins and xanthan gum [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107873.

[13] DICK A, BHANDARI B, PRAKASH S. Printability and textural assessment of modified-texture cooked beef pastes for dysphagia patients [J]. Future Foods, 2021, 3: 100006.

[14] PEMATILLEKE N, KAUR M, WAI C T R, et al. Effect of the addition of hydrocolloids on beef texture: Targeted to the needs of people with dysphagia [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106413.

[15] DU Y, LAN J, ZHONG R, et al. Insight into the effect of large yellow croaker roe phospholipids on the physical properties of surimi gel and their interaction mechanism with myofibrillar protein [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(3): 1347-1356.

[16] BIYIKLI M, AKOGLU A, KURHAN S, et al. Effect of different Sous Vide cooking temperature-time combinations on the physicochemical, microbiological, and sensory properties of turkey cutlet [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2020, 20: 100204.

[17] JIANG S, ZHAO S, JIA X, et al. Thermal gelling properties and structural properties of myofibrillar protein including thermo-reversible and thermo-irreversible curdlan gels [J]. Food Chemistry, 2020, 311: 126018.

[18] WU X S, MILES A, BRAAKHUIS A. The effectiveness of International Dysphagia Diet Standardization Initiative-Tailored interventions on staff knowledge and texture-modified diet compliance in aged care facilities: A pre-post study [J]. Current Developments in Nutrition, 2022, 6(4): nzac032.

[19] ZENG X, ZHONG W, HE F, et al. Tailoring structural and mechanical properties of konjac glucomannan/ curdlan composite hydrogels by freeze-thaw treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 137116.

[20] WANG Y, WANG S, LI R, et al. Synergistic effect of corn fiber gum and chitosan in stabilization of oil in water emulsion [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2022, 154: 112592.

[21] ZHAO L, PAN F, MEHMOOD A, et al. Protective effect and mechanism of action of xanthan gum on the color stability of black rice anthocyanins in model beverage systems [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 3800-3807.

[22] WANG Z, DU Y, ZHANG S, et al. Mechanism of xanthan gum in inhibiting aggregation in soy protein isolate gels after commercial sterilization: Implications for texture-modified food for dysphagia [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111481.

[23] 樊睿.卡拉胶和黄原胶对蛋清凝胶硬度和持水力的影响及高凝胶特性蛋清粉的应用研究[J].四川:四川农业大学,2023.

[24] CICHERO J A Y. Adjustment of food textural properties for elderly patients [J]. Journal of Texture Studies, 2016, 47(4): 277-283.

[25] WU Z-W, SHANG X-Y, HOU Q, et al. Using ultrasonic-assisted sodium bicarbonate treatment to improve the gel and rheological properties of reduced-salt pork myofibrillar protein [J]. Meat Science, 2024, 212: 109465.

[26] YANG H, YANG L, LI Y, et al. Reinforced swallowing and anti-digestive performance of lotus root starch-whey isolate protein gel via weakening effect of xanthan gum [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 370: 124427.

[27] 张雨萌.基于亲水胶体的牛肉基老年食品的开发研究[J].天津:天津科技大学,2023.

[28] JIA N, SUN J, LIU D, et al. Effect of quercetin on the structure and gel properties of pork myofibrillar protein under oxidative conditions [J]. Food Science, 2021, 42(10): 45-51.

[29] JIANG S, MA Y, WANG Y, et al. Effect of k-carrageenan on the gelation properties of oyster protein [J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132329.

[30] KIM S, JO K, WOO M, et al. Interaction mechanisms of κ-carrageenan, gum Arabic, xanthan gum, and sodium alginate with pork myofibrillar proteins: Impacts on heat-induced aggregation and *in vitro* digestive behaviors of proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 167: 111450.

[31] XING X, CHITRAKAR B, HATI S, et al. Development of black fungus-based 3D printed foods as dysphagia diet: Effect of gums incorporation [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107173.

[32] FEI S, LI Y, LIU K, et al. Salmon protein gel enhancement for dysphagia diets: Konjac glucomannan and composite emulsions as texture modifiers [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258: 128805.

[33] RIVERO-RAMOS P, VALDEZ M I, SANZ T, et al. Rice starch-alginate systems gelatinised by high hydrostatic pressure (HHP) as dysphagia-oriented matrices [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109793.

[34] XU B, WANG X, CHITRAKAR B, et al. Effect of various physical modifications of pea protein isolate (PPI) on 3D printing behavior and dysphagia properties of strawberry-PPI gels [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110498.

[35] MIN C, ZHANG C, CAO Y, et al. Rheological, textural, and water-immobilizing properties of mung bean starch and flaxseed protein composite gels as potential dysphagia food: The effect of *Astragalus* polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124236.

[36] TASONIERO G, BERTRAM H C, YOUNG J F, et al. Relationship between hardness and myowater properties in Wooden Breast affected chicken meat: A nuclear magnetic resonance study [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2017, 86: 20-24.

[37] SHEN H, ELMORE J S, ZHAO M, et al. Effect of oxidation on the gel properties of porcine myofibrillar proteins and their binding abilities with selected flavour compounds [J]. Food Chemistry, 2020, 329: 127032.

[38] 张根生,徐桂杨,苏文文,等.杀菌强度对高温肉糜火腿肠蛋白质变化及结构的影响[J].肉类研究,2024,38(6):27-33.

[39] 刘树萍,张佳美,李乐桐,等.黄原胶对黑豆豆腐牛肉丸的品质影响研究[J].中国调味品,2023,48(1):64-68.

[40] JIANG Q, HAN J, GAO P, et al. Effect of heating temperature and duration on the texture and protein composition of Bighead Carp (*Aristichthys nobilis*) muscle [J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 2110-2120.

[41] 郑金月.热杀菌导致猪肉糜乳化凝胶质构劣变的机制及其调控技术研究[J].沈阳:沈阳农业大学,2024.