



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

## 《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：浓缩乳蛋白的制备及其应用于低钠盐重组肉的凝胶特性  
作者：袁延佩，王冠华，高娜娜，伍昌军，隋文杰  
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20240259  
收稿日期：2024-12-26  
网络首发日期：2025-05-06  
引用格式：袁延佩，王冠华，高娜娜，伍昌军，隋文杰. 浓缩乳蛋白的制备及其应用于低钠盐重组肉的凝胶特性[J/OL]. 天津科技大学学报.  
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240259>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



# 浓缩乳蛋白的制备及其应用于低钠盐重组肉的凝胶特性

袁延佩<sup>1</sup>, 王冠华<sup>2</sup>, 高娜娜<sup>1</sup>, 伍昌军<sup>3</sup>, 隋文杰<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学食品营养与安全国家重点实验室, 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;

2. 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 3. 内蒙古蒙特威生物科技有限公司, 包头 014000)

**摘要:** 为研究浓缩乳蛋白在低钠盐重组肉中的应用, 采用膜分离法对脱脂乳进行浓缩处理, 制备了不同超滤次数的浓缩乳蛋白, 利用浓缩乳蛋白的交联特性将其应用于重组肉制品中, 分析了不同蛋白含量对重组肉质构特性和蒸煮损失的影响, 研究了不同钠盐添加量对重组肉拉伸强度、持水力、蒸煮损失的影响, 并进行单因素实验, 得出了最佳低钠盐重组肉制作配方。结果表明, 超滤 4 次后浓缩乳蛋白的蛋白含量达到了 66.3%; 由浓缩乳蛋白制备不同钠盐添加量的重组肉, 低钠盐组拉伸强度、持水力、蒸煮损失的结果均优于高钠盐组; 低钠盐重组肉单因素实验中, 浓缩乳蛋白的最佳添加量为 3%、谷氨酰胺转氨酶的最佳添加量为 1%、最佳模具压制时间为 4h、复合磷酸盐的最佳添加量为 0.3%。综上, 与酪蛋白酸钠相比, 浓缩乳蛋白在低钠盐条件更适于重组肉加工, 为浓缩乳蛋白的后续应用提供理论依据。

**关键词:** 浓缩乳蛋白; 膜分离; 重组肉; 低钠盐; 质构

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510 (0000)00-0000-00

## Preparation of Milk Protein Concentrate and Its Application in Gelling Characteristics of Low Sodium Restructured Meat

YUAN Yanpei<sup>1</sup>, WANG Guanhua<sup>2</sup>, GAO Nana<sup>1</sup>, WU Changjun<sup>3</sup>, SUI Wenjie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

3. Inner Mongolia Mengtewei Biotechnology Co., Ltd., Baotou, 014000, China)

**Abstract:** To explore the rational application of milk protein concentrate in low sodium restructured meat, the membrane separation method was used to concentrate skim milk, and milk protein concentrate with different ultrafiltration times was prepared. The cross-linking characteristics of milk protein concentrate were applied to restructured meat products, and the effects of different protein contents on the texture characteristics and cooking loss of restructured meat were explored. Based on this, the effects of different sodium salt addition amounts on the tensile strength, muscle water holding capacity, and cooking loss of restructured meat were studied. Then single factor experiments were conducted on the milk protein concentrate after four ultrafiltration times to obtain the optimal formula for restructured meat production. The results showed after four rounds of ultrafiltration, the protein content of milk protein concentrate reached 66.3%. Restructured meat with different sodium salt addition levels prepared from milk protein concentrate showed better tensile strength, muscle water holding capacity, and cooking loss in the low sodium salt group compared to the high sodium salt group. In the experiment of adjusting restructured meat single factors, the optimal addition amount of milk protein concentrate is 3%, the optimal

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-02-28

基金项目: 天津市应用基础研究项目重点项目(22JCZDJC00360); 山东省博士后创新项目一等资助(SDCX-ZG-202301010)

作者简介: 袁延佩(2000—), 女(汉族), 山东菏泽人, 硕士研究生, pearyuan@163.com; 通信作者: 隋文杰, 副教授, wjsui@tust.edu.cn

addition amount of TGase is 1%, the optimal mold pressing time is 4 hours, and the optimal addition amount of composite phosphate is 0.3%. In summary, comparing with sodium caseinate, low sodium salt conditions are more conducive to crosslinking milk protein concentrate with muscle protein and TGase.

**Key words:** milk protein concentrate; membrane separation; restructured meat; low-sodium salt; texture

浓缩乳蛋白(Milk Protein Concentrate, MPC)是一种包含了乳清蛋白及酪蛋白的全乳蛋白配料,具有良好的功能特性和营养价值,可通过脱脂乳超滤制备<sup>[1]</sup>。相比于传统乳蛋白配料,如乳清浓缩/分离蛋白和酪蛋白酸钠,浓缩乳蛋白的制备工艺简单,可实现连续化生产,生产成本较低,生产方式绿色环保。重组肉(Restructured Meat, RM)是指将肉类和非肉类蛋白重新整合,形成具有肉类感官和质地特性的肉制品<sup>[2]</sup>。利用酶法重组技术可以将蛋白配料应用于重组肉制品生产中,常用的酶制剂为谷氨酰胺转氨酶(Transglutaminase, TGase),蛋白配料作为TGase的反应底物,与肉类蛋白之间发生共价交联反应,可提高蛋白质的凝胶能力和凝胶稳定性,从而粘结肉类蛋白形成重组肉<sup>[3]</sup>。在肉制品加工过程中,重组肉可由未充分利用的肉块制成,且由于粘合剂的添加使得重组肉的嫩度、保水性和风味增加,这大大提升了原料肉的利用率,降低了生产成本,满足人们的消费需求,大大推动了肉制品深加工发展<sup>[4]</sup>。在重组肉制品加工过程中食盐是常见且必需的调味料,且食盐对肉制品的持水性具有积极作用。但是从饮食健康角度考虑,钠盐的过量摄入会危害健康。《中国居民营养与慢性病状况报告》(2020年)显示,我国民众每日钠盐摄入量远超建议标准<sup>[5]</sup>。因此,开发低钠盐重组肉制品已成为一种趋势,对满足低钠盐健康饮食需求,提供健康饮食策略具有重要意义。

目前,作为重组肉的蛋白交联剂主要是酪蛋白酸钠,酪蛋白酸钠的制备一般通过酸沉碱溶,过程相对繁琐、引入酸沉淀工艺进而产生酸性乳清废水,而制备浓缩乳蛋白的膜分离法工艺条件简单温和,可以最大程度保持牛乳中蛋白质的结构和性质<sup>[6]</sup>,为其在重组肉制品中的应用提供了新思路。目前,国内外有很多TGase和酪蛋白酸钠提高重组肉品质的研究,但直接将浓缩乳蛋白和TGase应用在低钠盐重组肉中的研究较少<sup>[7]</sup>。本文研究了浓缩乳蛋白替代酪蛋白酸钠应用于重组肉制品,考察了不同超滤次数对浓缩乳蛋白交联特性以及重组肉制品理化性质的影响,研究不同钠盐添加量对浓缩乳蛋白所制备重组肉品质的影响,开发低钠盐重组肉,为后续的重组肉制品加工及工业化提供理论指导和技术支

持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

脱脂纯牛奶 新希望乳业股份有限公司;猪肉 天津滨海新区大润发生活超市有限公司;酪蛋白酸钠 湖北百特威生物科技有限公司;谷氨酰胺转氨酶 江苏一鸣生物股份有限公司;复合磷酸盐 徐州添安食品添加剂有限公司;十二烷基硫酸钠(sodium laurylsulfate, SDS)、邻苯二甲醛 北京索莱宝科技有限公司;氢氧化钠(分析纯)、盐酸(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司。

BONA-GM-18 型有机膜分离实验机,济南博纳生物技术有限公司;Scientz-10N/A 型冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;K9840 型凯氏定氮仪,山东海能科学仪器有限公司;TA. TOUCH 型质构仪,上海保圣实业发展有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 浓缩乳蛋白的制备

参考刘大松<sup>[8]</sup>的方法并稍作修改。脱脂乳采用截留相对分子质量 10000 的聚醚砜滤膜进行超滤,待流出的截流液为原体积的一半后,记为超滤一次,继续在浓缩液中补加水至原脱脂乳体积,再在相同条件下重复上述超滤步骤 2、3、4 次,收集最终所得的浓缩液,加 0.5 mol/L 的 NaOH 将截流液调 pH 至 6.9,并进行冷冻干燥。

#### 1.2.2 浓缩乳蛋白的蛋白质和乳糖含量测定

蛋白质含量按《GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》进行测定<sup>[9]</sup>。乳糖含量按《GB 5009.8-2023 食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》进行测定<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.3 交联度的测定

参考许涌捷等<sup>[11]</sup>的方法并稍作修改。称量 5 g TGase 于烧杯中,加水溶解,于 100 mL 容量瓶中定容,在 37 °C 水浴锅中保温 30 min。配制浓度为 5 mg/mL 的待测样品溶液,并量取 20 mL,添加 2.5 mL TGase 溶液之后,在 47 °C 水浴锅中反应两个小时。反应结束后,于 85 °C 的水浴锅中灭活 5 min,样品溶液降至室温后稀释至 0.5 mg/mL。反应前后的样品溶

液分别取 2 mL, 各加入 2 mL 邻苯二甲醛溶液, 振荡静置 2 min 后, 在 336 nm 下测定吸光度。分别依据公式(1)(2)计算样品中游离氨基的含量和交联度。

$$\text{游离氨基含量(ug/mg)} = \frac{A_i + 0.0071}{25.066C} \quad (1)$$

$$\text{交联度(\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

式中,  $A_i$ : 样品的吸光度;  $C$ : 蛋白的浓度;  $M_1$ : 交联反应前游离氨基的含量;  $M_2$ : 交联反应后的游离氨基含量。

#### 1.2.4 浓缩乳蛋白制备重组肉

参考迟晓光<sup>[12]</sup>的方法并稍作修改。原料为一定量的肉糜, 辅料: 浓缩乳蛋白, 复合磷酸盐, 谷氨酰胺转氨酶。辅料中加入 30 mL 水, 搅拌均匀→将肉糜和辅料混合→用模具压制 4 h→聚乙烯自封袋密封(重组肉成品为 14×6×1 cm 的长方体状)→在 4 °C 下储存 12 h→低温重组后置于 -18 °C 中保存备用。

#### 1.2.5 重组肉全质构分析

参考张建华<sup>[13]</sup>的方法并稍作修改。将肉块样品切成 1 cm×1 cm×3 cm 的长方体状, 在室温下用质构仪进行全质构测试(TPA), 每个样品重复 5 次。参数设定: 测前速度 1.0 mm/s, 测中速度 2.0 mm/s, 测后速度 5.0 mm/s, 测定参数: 硬度、弹性、胶着性、咀嚼性。

#### 1.2.6 重组肉的蒸煮损失

参考 ZHANG 等<sup>[14]</sup>的方法并稍作修改。将肉样切成长×宽×高约为 3cm×1cm×1 cm 的小块并称质量( $m_1$ , g); 置于自封袋中于 85 °C 水浴锅中加热至中心温度 72 °C; 随后取出于流动水下冷却至室温; 用滤纸吸干肉样表面水分并再次称质量( $m_2$ , g), 蒸煮损失率按照公式(3)计算。

$$\text{蒸煮损失率/\%} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

#### 1.2.7 不同钠盐添加量重组肉的制备

取猪肉块于绞肉机内, 打碎成肉糜; 4 个不同处理组的辅料添加量如表 1 所示, 添加的蛋白分别为浓缩乳蛋白、酪蛋白酸钠(Sodium Caseinate, SC); 将辅料与 30 mL 水搅拌均匀, 辅料与肉糜混合均匀, 在模具中压制 4 h 后, 取出置于聚乙烯自封袋中密封, 在 4 °C 冰箱中低温重组 12 h 后, 于 -18 °C 冰箱中冷冻备用。

表 1 不同钠盐处理组中辅料的添加量

Tab. 1 The amount of excipients added in different sodium salt treatment groups

	蛋白 添加量	TGase 添加量	复合磷酸盐添加量
MPC 低钠盐组	3% MPC	1%	0.3%
SC 低钠盐组	3% SC	1%	0.3%
	蛋白 添加量	TGase 添加量	食盐添加量
MPC 高钠盐组	3% MPC	1%	3%
SC 高钠盐组	3% SC	1%	3%

#### 1.2.8 拉伸强度的测定

参考苏博<sup>[15]</sup>的方法并稍作修改。将已制备好的重组肉煮制 10 min, 在室温下自然冷却。然后将肉块切成长宽高分别为 4cm×1cm×1cm 的肉片。将与纹理垂直的一头固定, 另一平拉伸至肉片断裂并记录拉断时的力。每组试验重复 3 次, 取其平均值为试验结果。

#### 1.2.9 持水力的测定

参考董轶群等<sup>[16]</sup>的方法并稍作修改。将处理后的肉样剁碎, 称量 5 g 放入离心管, 在 70 °C 下恒温水浴 20 min, 放置到室温后, 1500 r/min 离心 3 min, 倒置将离心管中水控出, 称量。

$$\text{WHC(\%)} = \frac{(GR - G + G_1)}{GR} \times 100 \quad (4)$$

式中,  $G$  为肉样重(5g),  $G_1$  为离心管控水后肉样重(g),  $R$  为肉含水率。

#### 1.2.10 低盐重组肉条件优化

复合磷酸盐添加量、浓缩乳蛋白添加量、TGase 添加量及模具压制时间单因素试验水平设计如下: 复合磷酸盐添加量(0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%); 浓缩乳蛋白添加量(1%、2%、3%、4%、5%); TGase 添加量(0.5%、0.75%、1%、1.25%、1.5%); 模具压制时间(2 h、3 h、4 h、5 h、6 h)。以重组肉的质构特性和蒸煮损失为评价指标, 对重组后的肉样进行分析。

#### 1.3 数据处理

各个指标测定平行进行 3 次, 数据采用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析( $P < 0.05$ ), 利用 Origin Pro 2018 进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 浓缩乳蛋白的制备及其基本组成和理化特性分析

图 1a 为超滤法制备浓缩乳蛋白工艺流程图。脱脂乳进入超滤机经截留相对分子质量 10000 的聚醚砜滤膜浓缩至原体积的一半后得到超滤 1 次的浓缩液，浓缩液加入清水至原体积，重复上述操作，可得到超滤 2 次、3 次和 4 次的浓缩乳蛋白。由图 1b 可知，超滤次数不同，浓缩乳蛋白的蛋白和乳糖含量不同，随着超滤次数的增加，浓缩乳蛋白的蛋白含量逐渐增加，由原来的 25.2% 提升到 66.3%，乳糖含量逐渐降低，由最初的 46.5% 下降到 22.1%。

为了进一步探究浓缩乳蛋白与 TGase 的交联反应，将超滤 4 次的浓缩乳蛋白进行复水，通过等电点沉淀法分离出酪蛋白，与市面酪蛋白酸钠的交联度进行对比，结果如图 1c 所示。浓缩乳蛋白的交联度为 20.96%，酪蛋白酸钠的交联度为 21.71%，沉淀酪蛋白的交联度为 21.23%，浓缩乳蛋白的交联度略低于市售酪蛋白酸钠，但是差异并不显著 ( $P > 0.05$ )。虽然浓缩乳蛋白中仍含有 22.1% 的乳糖，但由于浓缩乳蛋白中的乳清蛋白水溶性好，且富含支链氨基酸<sup>[17]</sup>，在交联反应中，能够与 TGase 发生酰基转移<sup>[18]</sup>，所以浓缩乳蛋白交联度与酪蛋白酸钠无显著差异。综上，浓缩乳蛋白可作为 TGase 的良好底物，在交联反应中产生蛋白质分子间共价交联，为浓缩乳蛋白在重组肉中的应用提供理论依据。

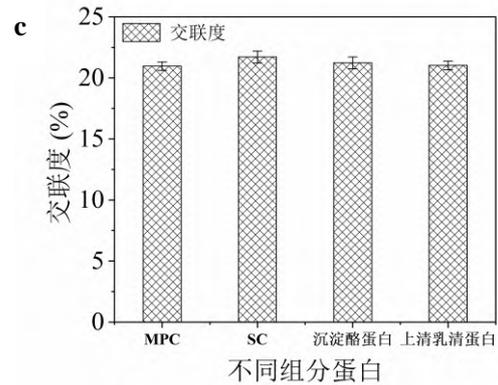
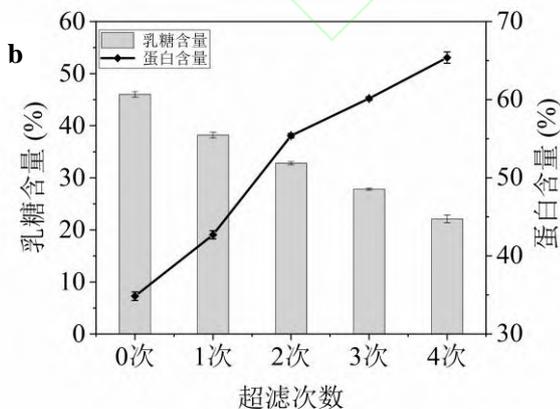
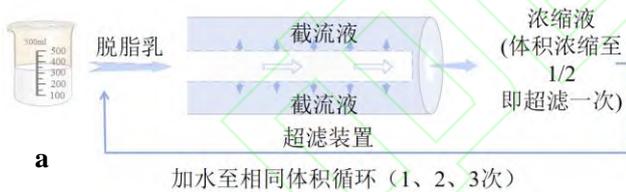


图 1 超滤工艺流程图 (a) 及浓缩乳蛋白基本组分 (b)，市售酪蛋白酸钠、超滤 4 次浓缩乳蛋白及其沉淀酪蛋白的交联度 (c)

Fig. 1 (a) Ultrafiltration process flowchart and (b) basic components of milk protein concentrate and (c) crosslinking degree of commercially available sodium caseinate, concentrated milk protein by ultrafiltration for 4 times, and precipitated casein

图 2a 为不同超滤次数浓缩乳蛋白所制备的重组肉制品。可以发现，超滤 4 次的浓缩乳蛋白所制备的重组肉，表面结构紧凑而坚硬，而超滤次数低于 4 次的浓缩乳蛋白制备的重组肉表面结构不够紧实，均有不同程度凸出和凹进的部分。这说明浓缩乳蛋白的蛋白含量较低时，TGase 作用底物较少，交联反应不彻底，重组肉机械强度不足，肉样重组效果不佳<sup>[19]</sup>。

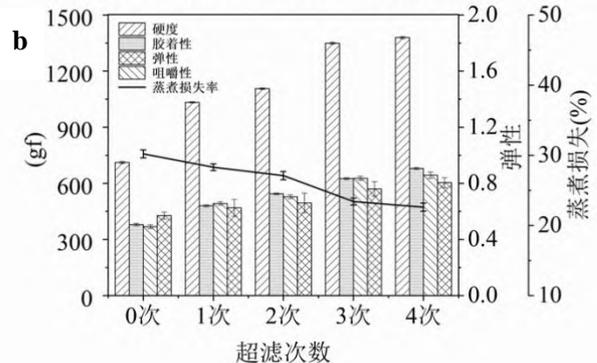
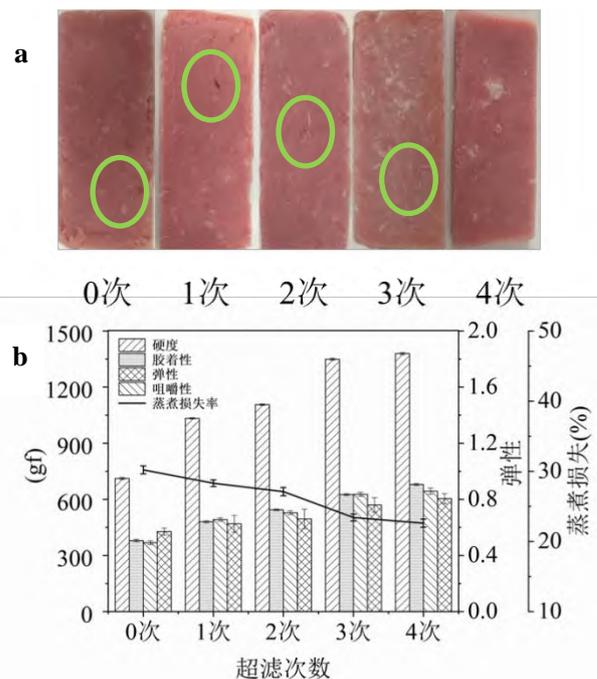


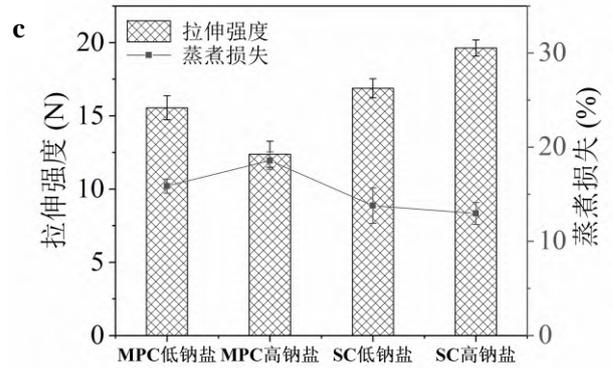
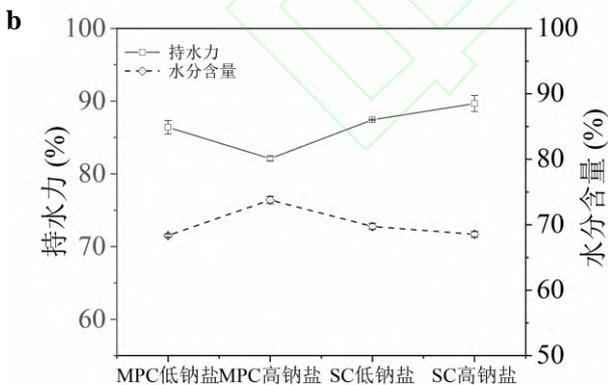
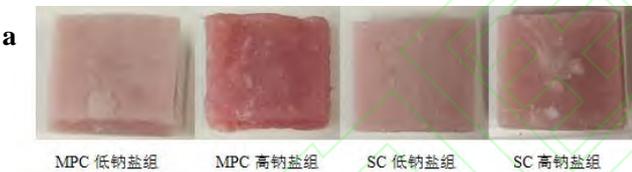
图 2 不同超滤次数浓缩乳蛋白制备重组肉的 (a) 实物图、

## (b) 质构和蒸煮损失

**Fig. 2** The (a) meat pictures, (b) texture and cooking loss of reconstituted meat prepared from milk protein concentrate with different ultrafiltration times

质构特性可用来表示肉制品的品质高低, 由图 2b 可知, 随着浓缩乳蛋白的蛋白含量增加, 由浓缩乳蛋白制备的重组肉的硬度、弹性、咀嚼性和胶着性数值均出现不同程度地增加, 说明在制备重组肉过程中, 蛋白含量的提高有利于交联反应的进行, 加强了重组肉制品的粘结性和机械强度, 进而提高重组肉制品的品质<sup>[20]</sup>。蒸煮损失是评价肉制品嫩度的一个重要指标<sup>[21]</sup>。随着超滤次数的增加, 浓缩乳蛋白的蛋白含量增加, 重组肉的蒸煮损失率出现先下降后逐渐平稳的趋势, 即肉的嫩度随着蛋白含量的增加逐渐上升, 这说明浓缩乳蛋白促进了肉与 TGase 的交联。综上, 超滤 4 次浓缩乳蛋白制备的重组肉的硬度和弹性达到了 1379.59 gf 和 0.81, 与刘丽宅等人<sup>[22]</sup>对鲜猪肉进行质构分析的结果 (硬度和弹性分别为 1058.02 gf 和 0.54) 相比, 满足了猪肉制品的品质要求, 而且从工艺操作和成本出发, 在此基础上继续进行超滤会增加工艺成本, 因此选用超滤 4 次的浓缩乳蛋白进行以下实验。

## 2.2 不同钠盐添加量对重组肉的影响



**图 3** 重组肉不同处理组的实物图 (a)、持水力 (b)、拉伸强度和蒸煮损失 (c)

**Fig. 3** Adjusting (a) the meat pictures, (b) muscle water holding capacity, (c) tensile strength, and cooking loss of different treatment groups of reconstituted meat

为了探究钠盐添加量对非肉类蛋白交联制备重组肉的影响, 选择超滤 4 次浓缩乳蛋白和酪蛋白酸钠进行重组肉制备和理化特性比较实验。不同钠盐添加量分别对 MPC 组和 SC 组重组肉品质的影响如图 3 所示。在蛋白添加量为 3%、TGase 添加量为 1%, 模具压制时间为 4 h 时, 低钠盐组复合磷酸盐添加量为 0.3%, 高钠盐组食盐添加量为 3%, 图 3a 为各组不同钠盐添加量的重组肉制品, 图中 MPC 低钠盐组、SC 低钠盐组和 SC 高钠盐组重组肉的结构紧实, 表面形成了致密且具有弹性的凝胶表层, 而 MPC 高钠盐组的重组肉组织松弛且颜色较深, 这可能是由于高钠盐的加入, 加上浓缩乳蛋白具有水合能力, 重组肉制品的水分含量进一步增大, 导致重组肉制品组织状态松软, 粘结性和机械强度降低<sup>[23]</sup>。

持水力是指当肉样受到外力作用, 肉样保持原有水分的能力, 是评价肉样品质的一个重要指标, 肉品持水性的好坏可影响加工产品的得率、肉质嫩度及多汁性<sup>[24]</sup>。图 3b 为不同处理组持水力和水分含量对比图。浓缩乳蛋白添加低钠盐和高钠盐组的水分含量分别为 68.35% 和 73.79%, 酪蛋白酸钠添加低钠盐和高钠盐组的水分含量分别为 69.74% 和 68.54%, 浓缩乳蛋白添加低钠盐和高钠盐组的持水力分别为 86.40% 和 82.10%, 酪蛋白酸钠添加低钠盐和高钠盐组的持水力分别为 87.44% 和 90.00%, 浓缩乳蛋白添加高钠盐组的水分含量显著高于其他三组, 这说明同时添加浓缩乳蛋白和高钠盐时, 会明显提高重组肉的水分含量, 导致重组肉块组织松软, 可能是因为浓缩乳蛋白中的乳清蛋白溶解性较好, 而完全溶解于水的蛋白质其结合水的能力小于溶解度低的蛋白质<sup>[25]</sup>, 同时加入高钠盐, 在重组过程中会使整个

体系水分含量较高,使得交联反应不彻底,整体重组效果较差<sup>[26]</sup>。而酪蛋白酸钠与水结合形成的体系粘度较高,在高钠盐情况下与肉类蛋白、TGase 形成的三维网络可以锁住水分,所制成重组肉具有较好的机械强度和粘结性。

图 3c 为不同处理组拉伸强度和蒸煮损失率对比图。浓缩乳蛋白添加低钠盐和高钠盐组的拉伸强度分别为 15.55 N 和 12.38 N,酪蛋白酸钠添加低钠盐和高钠盐组的拉伸强度分别为 16.88 N 和 19.63 N,浓缩乳蛋白添加低钠盐和高钠盐组的蒸煮损失分别为 15.11% 和 18.9%,酪蛋白酸钠添加低钠盐和高钠盐组的拉伸强度分别为 13.22% 和 12.19%,浓缩乳蛋白添加高钠盐组的拉伸强度明显低于其他三组,这表明添加浓缩乳蛋白在高钠盐情况下不利于肌肉蛋白和 TGase 的结合。可能是因为在重组过程中,体系水分含量较高,交联反应不彻底,所形成的重组肉制品黏结强度较低,进而导致重组肉制品的拉伸强度降低,蒸煮损失升高<sup>[27]</sup>。

### 2.3 低盐重组肉单因素实验

在重组肉制作过程中,重组肉的品质与非肉类蛋白即浓缩乳蛋白的添加量、TGase 的添加量、复合磷酸盐添加量和模具压制时间等因素密切相关<sup>[28]</sup>。由 2.2 可知浓缩乳蛋白在低钠盐条件下制备出的重组肉品质更高,因此将浓缩乳蛋白用于低钠盐条件下(0.1%~0.5%)的重组肉单因素实验,以得到最佳低钠盐重组肉配方。

#### 2.3.1 浓缩乳蛋白添加量对重组肉品质的影响

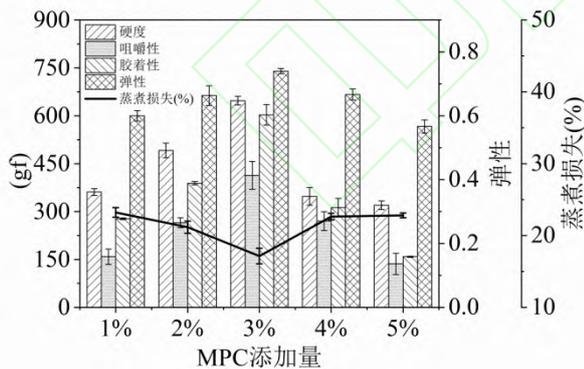


图 4 MPC 添加量对重组肉质构和蒸煮损失的影响

Fig. 4 The effect of MPC dosage on the texture and cooking loss of reconstituted meat during conditioning

在 TGase 添加量为 1%, 模具压制时间为 4 h, 复合磷酸盐添加量为 0.3% 时,按照 MPC 不同添加量制备重组肉,由图 4 可知,重组肉的硬度、胶着性、咀嚼性和弹性均随着浓缩乳蛋白添加量的增加先逐

渐上升后下降,当浓缩乳蛋白添加量为 3% 时,硬度、胶着性、咀嚼性和弹性分别为 647.45 gf、602.96 gf、413.14 gf、和 0.74,明显高于添加量 2% 和 4% 的结果 ( $P>0.05$ )。上述结果表明在重组肉的制备过程中,浓缩乳蛋白提供赖氨酸及谷氨酰胺残基,促进 TGase 与肌肉蛋白产生交联反应,蛋白质分子之间形成网状结构,提高了重组肉制品的黏结强度,进而提升了肉的重组效果,而当 TGase 的添加量一定时,酶与底物反应达到上限,浓缩乳蛋白含量增加不再促进交联反应,反而因为浓缩乳蛋白含量增加,影响 TGase 与肌肉蛋白反应,导致重组肉品质下降<sup>[29]</sup>。同时,重组肉的弹性随着浓缩乳蛋白的添加量逐渐上升后下降,这说明添加适量的浓缩乳蛋白可以促进蛋白质之间的水合反应,增强重组肉制品的弹性,提升重组肉制品的品质<sup>[30]</sup>。最后,在重组肉的蒸煮损失方面,随着浓缩乳蛋白添加量的不断增加,出现先下降后上升的趋势,在浓缩乳蛋白的添加量为 3% 时达到最小。这说明浓缩乳蛋白能够与肉制品中的蛋白质结合,形成稳定的化学键,促进交联反应,增强肉制品的保水性能和机械强度,从而减少蒸煮损失率<sup>[31]</sup>。综合重组肉的质构和蒸煮损失等品质特性,故选择 MPC 的最佳添加量为 3%。

#### 2.3.2 谷氨酰胺转氨酶添加量对重组肉品质的影响

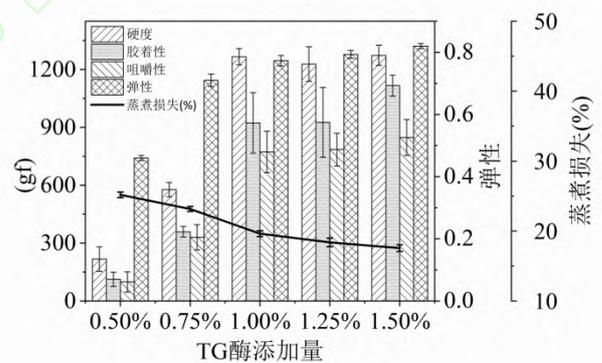


图 5 TGase 添加量对重组肉质构和蒸煮损失的影响

Fig. 5 The effect of TGase addition on the texture and cooking loss of reconstituted meat during conditioning

谷氨酰胺转氨酶在重组肉加工中具有重要作用,可使肉类与非肉类蛋白之间进行交联。在 MPC 添加量为 3%, 模具压制时间为 4 h, 复合磷酸盐添加量为 0.3% 时,按照 TGase 不同添加量制备重组肉,由图 5 可知重组肉的硬度、胶着性、咀嚼性和弹性均随着 TGase 添加量的增加有先上升后保持稳定的趋势,当 TGase 添加量达到 1% 时,硬度、胶着性、咀嚼性和弹性明显高于添加量 0.75% 的重组肉 ( $P>$

0.05)。上述结果表明在制备重组肉的过程中,添加 TGase 对交联反应有促进作用,当添加的浓缩乳蛋白和肉类蛋白的量一定时,继续增加 TGase,对交联反应的促进作用将不再明显<sup>[32]</sup>。最后,在重组肉的蒸煮损失方面,随着 TGase 添加量的上升,出现先下降后保持稳定的趋势,这说明在 TGase 与浓缩乳蛋白、肉类蛋白三者之间的交联反应中, TGase 与两种蛋白形成网状结构的同时,也将水分结合在一起,增加重组肉制品的水分含量和保水性。综合重组肉的质构和蒸煮损失等品质特性,故选择 TGase 的最佳添加量为 1%。

### 2.3.3 模具压制时间对重组肉品质的影响

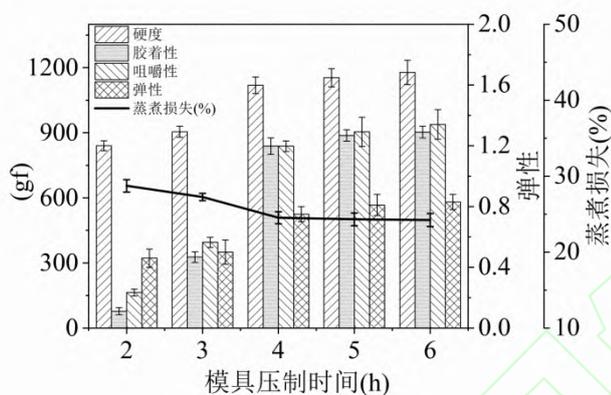


图6 模具压制时间对重组肉质构和蒸煮损失的影响

Fig. 6 The effect of pressing time on the texture and cooking loss of reconstituted meat during conditioning

模具压制时间即交联反应时间的长短,模具压力促进蛋白之间交联反应的进行,影响着重组肉制品的机械强度。在 MPC 添加量为 3%, TGase 添加量为 1%, 复合磷酸盐添加量为 0.3% 时,按照不同模具压制时间制备重组肉,由图 6 可知重组肉的硬度、胶着性、咀嚼性、弹性均随着模具压制时间的增加先逐渐增加后保持稳定。当模具压制时间达到 4 h 时,硬度、胶着性、咀嚼性和弹性的结果明显高于压制时间 3 h ( $P>0.05$ )。上述结果表明当模具压制时间较短时,浓缩乳蛋白、肌肉蛋白和 TGase 之间的凝胶网络形成不充分,重组肉制品机械强度、品质较低<sup>[33]</sup>。最后,在重组肉的蒸煮损失方面,随着模具压制时间增加,呈现先下降后保持稳定的趋势,当模具压制时间达到 4 h 时,蒸煮损失结果与压制时间 3 h 有显著性差异 ( $P>0.05$ )。这说明模具压制时间较短时,交联反应不充分,重组肉制品的粘结性差,保水性差,蒸煮损失较高。综合重组肉的质构和蒸煮损失等品质特性,故选择最佳模具压制时间为 4 h。

### 2.3.4 复合磷酸盐添加量对重组肉品质的影响

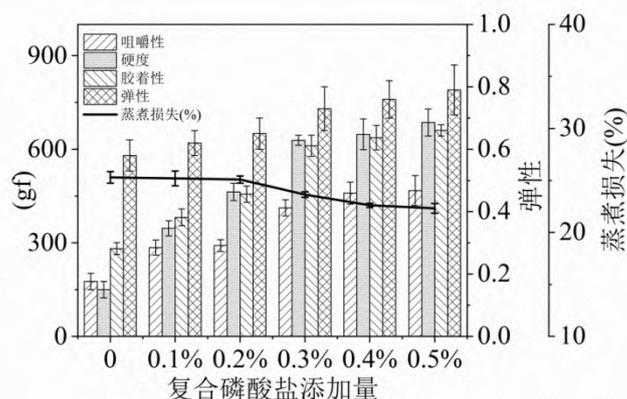


图7 复合磷酸盐添加量对重组肉质构和蒸煮损失的影响

Fig. 7 Experimental texture and cooking loss of reconstituted meat single factor for conditioning

复合磷酸盐可以整合蛋白中的金属离子,促进肉类蛋白溶出并发生交联反应,形成网状结构<sup>[34]</sup>。在 MPC 添加量为 3%, TGase 添加量为 1%, 模具压制时间为 4 h 时,按照复合磷酸盐不同添加量制备重组肉,由图 7 可知,重组肉的硬度、胶着性、咀嚼性、弹性均随着复合磷酸盐添加量的增加先上升后保持稳定趋势。当复合磷酸盐添加量达到 0.3% 时,质构测试结果明显高于 0.2% 的添加量 ( $P>0.05$ ),且添加量大于 0.3% 时,重组肉制品的质构特性增势趋于平稳。重组肉的硬度、胶着性、咀嚼性、弹性随着复合磷酸盐添加量的增加先上升后保持稳定,这表明添加适量的复合磷酸盐可促进肌肉蛋白溶出<sup>[35]</sup>,与 TGase、浓缩乳蛋白充分进行交联反应,形成网状结构,提升重组肉制品的机械强度,进而提升重组肉制品的品质。最后,在重组肉的蒸煮损失方面,随着复合磷酸盐添加量的增加,呈现先下降后保持稳定的趋势,在复合磷酸盐的添加量为 0.3% 时,重组肉制品的蒸煮损失出现明显下降,且添加量大于 0.3% 时,蒸煮损失不再明显下降。这说明添加适量的复合磷酸盐,可提高交联反应环境中的水分,使得肌肉蛋白溶出,促进蛋白和 TGase 形成凝胶网络,提升重组肉制品的保水性<sup>[36]</sup>,进而蒸煮损失下降。综合重组肉的质构和蒸煮损失等品质特性,故选择复合磷酸盐的最佳添加量为 0.3%。

## 3 结论

为了探究浓缩乳蛋白在低盐重组肉中的合理化应用,通过膜分离法从脱脂乳中制备浓缩乳蛋白,超滤次数增加,浓缩乳蛋白的蛋白含量增加,超滤 4 次后蛋白含量达到 66.3%。由不同钠盐添加量的重组肉拉伸强度、持水力和蒸煮损失结果可知,浓缩乳

蛋白在应用于重组肉制备时,更易在低钠盐情况下与肌肉蛋白、TGase进行交联反应。采用超滤4次的浓缩乳蛋白进行重组肉单因素实验,得到低盐重组肉配方,浓缩乳蛋白的最佳添加量为3%、TGase的最佳添加量为1%、最佳模具压制时间为4h、复合磷酸盐的最佳添加量为0.3%,制备出的重组肉蒸煮损失低、机械强度高、肉质紧实、弹性好,为浓缩乳蛋白在低钠盐肉制品中的合理化应用提供理论依据和工艺参考。

#### 参考文献:

- [1] ESHPARI H, JIMENEZ F R, TONG P S, et al. Thermal stability of reconstituted milk protein concentrates: Effect of partial calcium depletion during membrane filtration[J]. *Food Research International*, 2017, 102: 409-418.
- [2] SAMAD A, ALAM A N, KUMARI S, et al. Modern concepts of restructured meat production and market opportunities[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2024, 44(2): 284-298.
- [3] 寇德运,付香斌.碎肉重组加工技术的研究与应用[J].*河南农业*, 2013, (12): 49-50.
- [4] SAMAD A, KIM S H, KIM C J, et al. From farms to Labs: The new trend of sustainable meat alternatives[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2025, 45(1): 13-30.
- [5] 甄宗圆,陈旭,万双菊,等.肉制品低钠盐工艺研究进展[J].*肉类研究*, 2020, 34(04): 100-106.
- [6] 孙颜君,李红娟,吕加平.薄膜蒸发浓缩对乳蛋白浓缩物加工性质的影响[J].*食品研究与开发*, 2016, 37(07): 13-18.
- [7] REN Z Y, LI Z J, HU Z H, et al. Recent insights into bonding technologies in restructured meat production: A review[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101712.
- [8] 刘大松,余韵,李珺珂,等.脱钙程度对浓缩乳蛋白功能性质的影响[J].*食品与生物技术学报*, 2019, 38(01): 14-21.
- [9] 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.食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [10] 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.食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定:GB 5009.8-2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [11] 许涌捷,王冠华,伍昌军,等.奶渣酪蛋白特性及营养价值分析[J].*食品研究与开发*, 2022, 43(23): 24-33.
- [12] 迟晓光.重组牛肉加工技术研究[D].南京:南京农业大学,2011.
- [13] 张建华,夏杨毅,张维悦,等.L-赖氨酸、L-组氨酸部分替代NaCl对鸭肉食用品质的影响[J].*食品与发酵工业*, 2019, 45(11): 159-165.
- [14] ZHANG X W, ZHU L X, SONG L S, et al. Combined treatment of lactic acid-ultrasound-papain on yak meat and its tenderization mechanism[J]. *Meat Science*, 2023, 196: 109043.
- [15] 苏博.猪头肉重组制品研制[D].长沙:湖南农业大学,2016.
- [16] 董轶群,牛素敏,罗鑫,等.武昌鱼宰后4℃冷藏条件下品质变化规律[J].*肉类研究*, 2022, 36(03): 32-37.
- [17] 田志琴.乳清蛋白的特性及在乳制品生产中的应用[J].*中国食品工业*, 2022, (23): 86-88.
- [18] 张卫佳.转谷氨酰胺酶以及非肉蛋白在肉类加工中的应用研究[D].成都:西华大学,2008.
- [19] 梁文雨,杨玥,洪惠.添加谷朊粉和TG酶的低钠盐鲢鱼糜制品的冻融稳定性研究[J].*中国渔业质量与标准*, 2021, 11(06): 1-7.
- [20] 林莉莉,黄卉,马海霞,等.罗非鱼质构重组产品凝胶特性及加工品质优化研究[J].*渔业研究*, 2024, 46(05): 480-489.
- [21] 李明奇,贺稚非,李少博,等.氯化钙-无花果蛋白酶-猕猴桃蛋白酶复合嫩化剂体系改善兔肉嫩度和保水性的工艺优化[J].*食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 120-129.
- [22] 刘丽宅,张鑫,金香淑,等.响应面法优化猪肉TPA质构测试条件[J].*东北农业科学*, 2024, 49(05): 100-108.
- [23] GUDAPU R V B R, VIJAY K R S, PIDUGU A, et al. Influence of whey protein concentrates as a novel binder on physiochemical, textural and ultrastructural properties of restructured buffalo meat slices[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023; 58(12): 6362-6371.
- [24] SHEVCHENKO I, POLISHCHUK G, TOPCHII O, et al. Improving the technology of restructured ham-type products from turkey meat and PSE pork[J]. *Food Science & Technology*, 2021, 15(4): 106-115.
- [25] 《乳业科学与技术丛书》编委会,乳业生物技术国家重点实验室编.乳业科学与技术丛书 乳粉[M].北京:化学工业出版社,2016:233-234.
- [26] 陈韬,崔薇,邱燕,等.猪肉持水性与宰后肌肉组织结构变化的关系[J].*食品科技*, 2011, 36(04): 90-94.
- [27] REDDY G V B, REDDY K V N, AMARAVATHI P. Quality characteristics and ultra structural changes of restructured buffalo meat slices with flaxseed flour as binder: A novel value added technology[J]. *Emirates*

- Journal of Food & Agriculture, 2023; 35(4): 342–350.
- [28] KIM D H, KIM Y J, SHIN D M, et al. Drying characteristics and physicochemical properties of semi-dried restructured sausage depend on initial moisture content[J]. Food science of animal resources, 2022; 42(3): 411–425.
- [29] 于传龙, 徐明生, 王文君. 重组肉中常用黏合剂的研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(02): 1-10.
- [30] 雷娟, 姚兴海. 蕨麻猪肉重组肉脯配方优化研究[J]. 食品安全导刊, 2021, (19): 138-139.
- [31] WANESSA O R, MARISTELA M O, MIRIAN D S, et al. Improving the textural and nutritional properties in restructured meat loaf by adding fibers and papain designed for elderly[J]. Food research international, 2023, 165: 112539.
- [32] 潘红梅, 尹蓉学, 游敬刚, 等. 牛肉与豆腐 TG 重组肉的响应面优化条件研究[J]. 食品与发酵科技, 2011, 47(05): 10-14.
- [33] 刘勤华. 高压处理对含有 TG 酶的鸡胸肉凝胶理化性质的影响[J]. 肉类工业, 2022, (08): 29-33.
- [34] 王心诗, 刘琨, 王启宇, 等. 速冻调理猪肉丝抗冻保水配方优化[J]. 食品工业, 2021, 42(09): 120-124.
- [35] 胡坤, 何志波, 何国富. 复合多聚磷酸盐肉丸品质改良剂的研制[J]. 肉类工业, 2008, (03): 33-36.
- [36] LI Y, LI F F, LIU G M, et al. The characteristics of gelation of myofibrillar proteins combined with salt soluble *Rhodotorula glutinis* proteins by enzymatic crosslinking[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128505.