

# 燕麦 $\beta$ -葡聚糖对低盐羊肉肉糜凝胶特性的影响

赵 谋<sup>1</sup>, 杨欢欢<sup>1</sup>, 杨 莉<sup>1</sup>, 安 宁<sup>1</sup>, 慕鸿雁<sup>2</sup>, 韩 平<sup>1</sup>, 董 娟<sup>1\*</sup>, 卢士玲<sup>1</sup>, 姬 华<sup>1</sup>  
(1.石河子大学食品学院, 新疆 石河子 832000; 2.青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109)

**摘 要:** 将燕麦 $\beta$ -葡聚糖 (oat  $\beta$ -glucan, OG) 作为替代物加入羊肉肉糜中等量替代食盐, 采用5个不同OG替代量0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%, 即对应肉糜中的盐含量为2.0%、1.6%、1.2%、0.8%、0.4%。通过对复合肉糜凝胶的蒸煮损失率、保水性、水分分布及含量、色泽、凝胶强度、质构、肌原纤维蛋白二级结构以及扫描电镜进行测定分析筛选出相对合适的OG替代添加量。结果表明: 随着OG替代量的增加, 复合肉糜凝胶的蒸煮损失率先下降后逐渐升高, 保水性则先升高后逐渐降低; 当添加1.6% OG时, 凝胶的持水能力显著下降 ( $P < 0.05$ ), 而低场磁共振分析表明高含量的OG会使凝胶中的弱结合水与自由水向不易流动水转移; 凝胶色泽亮度 $L^*$ 和白度逐渐增加 ( $P < 0.05$ ), 凝胶横切面呈现明显的白色; 凝胶的破裂力与破裂距离在0.4% OG替代量时达到较好效果, 改善了凝胶强度, 而较高替代量的OG则对凝胶强度不利; 凝胶硬度、内聚性、咀嚼性以及恢复性在OG替代量达到0.8%时显著降低 ( $P < 0.05$ ), 而凝胶弹性虽呈现与其他指标相同趋势但不同OG替代量之间差异并不显著 ( $P > 0.05$ ); 在微观结构的观察中, 凝胶在较高OG替代量 ( $> 0.8%$ ) 时, 肌原纤维蛋白二级结构接近对照组 ( $P > 0.05$ ), 扫描电镜图显示其结构更加松散, 孔隙增多。通过相关性分析与主成分分析判断出在0.4% OG替代量下肉糜凝胶特性综合得分要优于其他实验组, 在维持羊肉肉糜凝胶品质的同时保证了食盐摄入量的进一步减少。

**关键词:** 燕麦 $\beta$ -葡聚糖; 低盐; 肉糜凝胶; 凝胶特性; 主成分分析

## Effect of Oat $\beta$ -Glucan on Gel Properties of Low-Salt Mutton Mince

ZHAO Mou<sup>1</sup>, YANG Huanhuan<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, AN Ning<sup>1</sup>, MU Hongyan, HAN Ping<sup>1</sup>, DONG Juan<sup>1\*</sup>, LU Shiling<sup>1</sup>, JI Hua<sup>1</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** Oat  $\beta$ -glucan (OG) was used to replace salt in mutton mince at levels of 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% and 1.6%. To determine the appropriate level of OG replacement, the cooking loss, water-holding capacity (WHC), water distribution and content, color, gel strength, texture, secondary structure of myofibrillar protein, scanning electron micrograph (SEM) of mince samples with 2.0% salt, 0.4% OG + 1.6% salt, 0.8% OG + 1.2% salt, 1.2% OG + 0.8% salt and 1.6% OG + 0.4% salt were measured. The results showed that with increasing level of OG replacement, the cooking loss of mutton mince gels decreased first and then increased gradually, while the WHC showed the opposite trend. A significant decrease in the WHC was observed when 1.6% OG was added ( $P < 0.05$ ). Low-field nuclear magnetic resonance (NMR) analysis indicated that high levels of OG replacement caused the transformation of weakly bound and free water into immobilized water in the gels. The brightness ( $L^*$ ) and whiteness of the gels increased gradually ( $P < 0.05$ ), and the transverse cross-section showed an obvious white color. The rupture force and rupture distance of the gel with 0.4% OG replacement were good, indicating improved gel strength. High levels of OG replacement were unfavorable to the gel strength. The gel hardness, cohesiveness, chewiness and resilience significantly decreased at a substitution level of 0.8% ( $P < 0.05$ ), and the gel elasticity showed a similar trend but with no significant difference between them ( $P > 0.05$ ). The secondary structure of myofibrillar protein in the gel with high levels of OG replacement ( $> 0.8%$ ) was similar to that in the control ( $P > 0.05$ ), and the SEM image showed more loose structure with increased porosity. Through correlation analysis and principal component analysis (PCA),

收稿日期: 2022-08-07

第一作者简介: 赵谋 (2000—) (ORCID: 0000-0001-9339-1765), 男, 学士, 研究方向为畜产品加工与质量安全控制。

E-mail: zlk3310517124@163.com

\*通信作者简介: 董娟 (1981—) (ORCID: 0000-0002-3070-9972), 女, 教授, 博士, 研究方向为畜产品加工与质量安全控制。

E-mail: dongjuanv@126.com

it was found that the synthetic score of the gel with 0.4% OG was higher than that of the other groups, which could ensure further reduction of salt intake while maintaining the gel quality of mutton mince.

**Keywords:** oat  $\beta$ -glucan; low salt; mince gel; gel properties; principal component analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220807-081

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)16-0159-10

引文格式:

赵谋, 杨欢欢, 杨莉, 等. 燕麦 $\beta$ -葡聚糖对低盐羊肉肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 159-168.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220807-081. <http://www.spkx.net.cn>

ZHAO Mou, YANG Huanhuan, YANG Li, et al. Effect of oat  $\beta$ -glucan on gel properties of low-salt mutton mince[J]. Food Science, 2023, 44(16): 159-168. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220807-081. <http://www.spkx.net.cn>

肉糜制品是由脂肪液滴充当分散相, 水分作为连续相, 通过盐溶得到的蛋白质为乳化剂, 使瘦肉、脂肪、食盐、水和其他添加物形成的一个复杂分散体系<sup>[1]</sup>。凝胶特性是肉糜凝胶制品最重要的功能特性之一, 而凝胶强度则取决于肉糜凝胶中盐溶蛋白的含量以及溶解度。高浓度盐会促使肌原纤维蛋白发生溶解与溶胀, 使蛋白溶液呈现乳胶状, 促使肉糜凝胶形成<sup>[2]</sup>。但有研究表明, 长期过量摄入高钠的食物容易引起高血压和心血管疾病, 并提高肾病和胃癌的发病风险<sup>[3]</sup>。在《健康中国2030规划纲要》中明确指出: 到2030年, 全国人均每日食盐摄入量降低20%<sup>[4]</sup>。但2022年7月, 在上海市举办的“健康中国减盐行动”中, 上海市卫生健康委员会食品处明确表示: 上海市居民人均每日食盐摄入量为7.5 g, 虽然低于全国平均水平, 但离每日5 g的目标还有一定差距。因此在实际加工生产中, 食盐添加量会受到更严苛的限制, 然而肉糜凝胶制品中离子强度低, 将会导致肌原纤维蛋白析出量下降, 影响蛋白质凝胶网络的形成与结构, 最终导致肉糜制品凝胶性下降、成品率降低、出油、质地变差等问题<sup>[1]</sup>。吴菊清<sup>[5]</sup>减少肌原纤维蛋白中的离子强度发现, 离子强度的下降会造成蛋白乳化凝胶后的持水力降低, 影响凝胶品质; 陶硕等<sup>[6]</sup>研究指出, 火腿持水力与食盐添加量发生同步变化, 即随食盐添加量的减少, 持水力也会显著下降, 并且食盐水平在1.25%及以下时, 其质构特性发生极显著下降, 火腿品质大幅度降低。因此, 如何改善低盐条件下肉糜制品的凝胶品质成为近年来的研究热点。

目前, 研究者常使用外源添加剂改善肉糜制品的凝胶特性, 如酚类化合物能与肉糜中蛋白质分子相互作用进而形成更强的三维结构<sup>[7]</sup>, 提高凝胶强度; 添加水分结合能力高的淀粉可以填充网络并将水分锁在网络中<sup>[8]</sup>, 改善持水能力; 另外, 黄原胶、卡拉胶和魔芋葡甘聚糖等物质可以改变蛋白质体系的黏度, 从而在肉糜制品中发挥其增稠或胶凝作用<sup>[9]</sup>。如今, 众多学者将更加安全、营养的天然食品添加剂加入肉糜制品中以期增强其凝胶性能并赋予一定的膳食价值, 但由于天然食品添加剂较

高的加工成本以及潜在的食品安全问题仍有待进一步研究<sup>[10]</sup>。现有研究表明,  $\beta$ -葡聚糖具有良好的增稠效果和热稳定性, 且具有降低胆固醇、降血脂、增强免疫等生理功能, 而且在美国、瑞典、英国和芬兰等国家已经将 $\beta$ -葡聚糖列为安全食品添加剂<sup>[11]</sup>。在国内外研究中, 已有学者将 $\beta$ -葡聚糖加入肉制品中去尝试改善其品质, 方承虹等<sup>[12]</sup>将香肠中的肥肉用适量的 $\beta$ -葡聚糖替代后, 发现其保水性明显提高且可以有效减少脂肪的添加; Afshari等<sup>[13]</sup>在汉堡肉饼中加入适量 $\beta$ -葡聚糖后, 研究发现其保水性与可接受性显著提升( $P < 0.05$ )。而且在众多 $\beta$ -葡聚糖种类当中, 燕麦 $\beta$ -葡聚糖(oat  $\beta$ -glucan, OG)由于其广泛的来源、良好的水溶性以及特殊的凝胶性能和生理功能, 在食品行业领域具有着广阔的应用前景, 备受众多学者关注。

羊肉肉质细嫩, 蛋白质含量丰富, 胆固醇含量较猪肉和牛肉少, 富含丰富的微量元素, 是一种受消费者喜爱的优质畜肉<sup>[14]</sup>。目前, 通过利用淀粉、魔芋葡甘聚糖等天然添加剂独特的凝胶特性提高肉糜凝胶强度的研究相对较多, 但是对于尝试利用OG改善羊肉肉糜凝胶在低盐时的凝胶特性的研究鲜有报道。因此, 本实验预期通过不同添加量OG替代食盐, 并观察低盐羊肉肉糜凝胶特性的变化从而明确合适的OG替代量, 以期OG在低盐羊肉肉糜制品加工生产中的应用提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜羊后腿肉(7月龄绵羊)、食盐、淀粉 新疆西部牧业股份有限公司。

OG(食品级) 河南信阳沐凡生物科技有限公司; 焦磷酸钠 河北润步生物科技有限公司; 磷酸二氢钠、磷酸氢二钠 天津盛奥化学试剂有限公司; 氯化钠 天津永晟精细化工有限公司; 氯化镁 天津致远化学试剂有限公司; 乙二胺四乙酸 天津富宇精细化工有限公司; 戊二醛 湖北武汉吉业升化工有限公司; 无水乙醇 山东金生润化工有限公司; 所有试剂均为分析纯。

## 1.2 仪器与设备

Multifuge X1R高速冷冻离心机 上海土森视觉科技有限公司; HH-42恒温水浴锅 济南爱来宝仪器设备有限公司; WSC-S色差仪 上海坤权生物科技有限公司; TA-XT plus质构仪 山东盛泰仪器有限公司; Beta 2-8 LD plus冷冻干燥机 德国Christ公司; PQ001核磁共振含水含油率分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; VirTis BenchTop Pro冷冻干燥机 美国SP Scientific公司; IS10傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 仪 美国赛默飞世尔科技公司; SU8010扫描电子显微镜 日本Hitachi公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 复合肉糜凝胶的制备

#### 1.3.1.1 混合肉糜的制备

将新鲜羊后腿肉去除表面脂肪和结缔组织, 切块。将瘦肉与肥肉按照表1配比放入绞肉机绞碎30 s并加入1/3的冰水。依照配料表剂量将食盐、马铃薯淀粉、焦磷酸钠以及OG加入至碎肉中, 混匀, 搅碎30 s后, 缓慢加入剩余的2/3冰水, 间歇搅碎2 min。将每组50 g生肉糜放入4 °C冰箱进行冷藏用于后续色泽与蛋白二级结构的测定, 其余150 g肉糜制备成凝胶, 用于测定样品的蒸煮损失率、保水性、水分分布及含量、凝胶强度、质构以及微观结构的观察。

表1 肉糜配料  
Table 1 Ingredients of mutton mince gels

| 配料    | 添加量/g |         |         |         |         |
|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
|       | 0% OG | 0.4% OG | 0.8% OG | 1.2% OG | 1.6% OG |
| 羊瘦肉   | 125.4 | 125.4   | 125.4   | 125.4   | 125.4   |
| 羊肥肉   | 20    | 20      | 20      | 20      | 20      |
| 食盐    | 4     | 3.2     | 2.4     | 1.6     | 0.8     |
| OG    | 0     | 0.8     | 1.6     | 2.4     | 3.2     |
| 冰水    | 40    | 40      | 40      | 40      | 40      |
| 马铃薯淀粉 | 10    | 10      | 10      | 10      | 10      |
| 焦磷酸钠  | 0.6   | 0.6     | 0.6     | 0.6     | 0.6     |
| 总计    | 200   | 200     | 200     | 200     | 200     |

#### 1.3.1.2 复合凝胶的制备

将150 g羊肉肉糜分装入3个50 mL离心管中用作3次平行。为去除离心管中复合肉糜的气泡, 将其置于离心机中, 以1 000 r/min离心10 min, 使其填充紧凑。然后将复合肉糜离心管置于80 °C恒温水浴锅中加热25 min, 加热完成后取出自然冷却1 h, 并使用透明袋将复合肉糜凝胶密闭包装, 放入4 °C冰箱中冷藏12 h后待用。

### 1.3.2 复合凝胶的蒸煮损失率测定

在蒸煮前称复合肉糜样品质量, 记作 $m_1$ ; 将冷藏12 h的复合凝胶从4 °C的冰箱中取出, 室温下回温2 h, 用吸水纸擦干复合凝胶表面水渍后称其质量, 记作 $m_2$ , 按式(1)计算蒸煮损失率:

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

### 1.3.3 复合凝胶的保水性测定

参照李应兰等<sup>[15]</sup>的研究方法稍加改动。将复合凝胶从4 °C冰箱中取出并于室温下回温1 h, 用吸水纸吸干复合凝胶表面水渍后, 将其切成约2 mm的薄片, 并用两张长条滤纸将其包裹后置于离心管内, 在高速冷冻离心机4 °C、4 000 r/min离心10 min。离心结束后, 去除表面滤纸, 称薄片样品质量, 记作 $W_2$ ; 离心前薄片样品质量, 记作 $W_1$ 。将离心前后薄片的质量百分比视为复合凝胶的保水性, 按式(2)计算, 每组凝胶样品平行5次。

$$\text{保水性}/\% = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

### 1.3.4 复合凝胶的水分分布及含量测定

参考Liu Yini等<sup>[16]</sup>的方法, 通过低场核磁共振弛豫 (low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 测定凝胶的水分分布及含量 ( $T_2$ )。将2 g肉糜凝胶放入直径为25 mm的NMR玻璃管中并将其插入NMR探针中。 $T_2$ 通过Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 序列测定。测定的谱宽为250 kHz, 条件如下: 对应的谐振频率为20 MHz, 回波时间为0.200 ms, 等待时间为3 000 ms, 射频延迟时间为0.002 ms, 模拟增益为8.0 db, 数字增益为3。低场核磁共振仪器在32 °C下运行, 每个样品重复测试3次。

### 1.3.5 复合凝胶的色泽测定

将生肉糜与复合凝胶样品置于室温下回温约1 h后, 用WSC-S色差仪测定样品色泽, 记录其 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值, 按式(3)计算样品白度, 每个处理组设置5个平行。

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

式中:  $W$ 为样品的白度;  $L^*$ 为样品的亮度值;  $a^*$ 为样品的偏红值;  $b^*$ 为样品的偏黄值。

### 1.3.6 复合凝胶的凝胶强度测定

依据王希希等<sup>[17]</sup>的方法稍加修改。将复合凝胶样品用刀将其切成10 mm等高柱形, 置于质构仪测试平台。采用TPA程序模块, 以参数探头型号P/0.5、压缩程度80%、触发力5.0 g、间隔时间5 s、测前速率1.0 mm/s、测试速率2.0 mm/s、测后速率1.0 mm/s进行压缩测试。在测试前, 将样品置于室温下回温30 min后再进行测试, 每个处理组设置3个平行。

### 1.3.7 复合凝胶的质构测定

参照胡莹等<sup>[18]</sup>的方法并稍加修改。将复合凝胶样品切成10 mm等高柱形, 放置于质构仪测试平台。用质构仪TPA模式测定样品的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性以及回复性。测定参数: 探头型号P/50; 压缩程度40%; 触发力5.0 g; 间隔时间5 s; 测前速率2.0 mm/s; 测试速率

1.0 mm/s; 测后速率2.0 mm/s。在测试前, 将样品置于室温下回温30 min后再进行测定, 每个处理组设置3个平行。

### 1.3.8 复合凝胶的傅里叶变换红外光谱分析

#### 1.3.8.1 肌原纤维蛋白的提取

参考Park等<sup>[19]</sup>的方法稍加修改。各组取15 g肉糜加入4倍体积的冰提取液(0.1 mol/L NaCl、2 mmol/L MgCl<sub>2</sub>、1 mmol/L乙二胺四乙酸、10 mmol/L磷酸盐缓冲液, pH 7.0), 匀浆60 s, 5 000 r/min、4 °C离心20~22 min, 弃上清液重复匀浆离心2次, 得到粗纤维蛋白沉淀; 然后加入4倍体积的冰洗液(0.1 mol/L NaCl, pH 6.0)进行洗涤后用两层纱布过滤, 然后再5 000 r/min、4 °C冷冻离心20 min, 弃上清液, 所得沉淀为肌原纤维蛋白, 并于真空冷冻干燥机中冻干成粉, 4 °C冰箱放置备用。

#### 1.3.8.2 肌原纤维蛋白的红外光谱

参考Wang Xinwei等<sup>[20]</sup>的方法并稍加修改, 采用FTIR仪对复合肉糜蛋白质的二级结构进行测定。每组取适量的冻干肌原纤维蛋白粉与KBr(1:50, m/m)混合, 研磨均匀, 然后在高压下压制成片。样品的FTIR光谱是在波数为4 000~400 cm<sup>-1</sup>、分辨率为4 cm<sup>-1</sup>(室温)条件下使用32次扫描的单束模式间隔获得。

### 1.3.9 复合凝胶的扫描电镜观察

参照Zhao Shengming等<sup>[21]</sup>的方法并略加改动。将复合凝胶样品切片, 用2.5%戊二醛溶液浸泡固定, 并将其置于阴凉处避光放置48 h。室温下使用pH 7.4、0.01 mol/L的磷酸盐缓冲液对样品漂洗3次, 约10 min。然后分别用30%、50%、90%乙醇溶液逐级脱水, 每级浸泡10 min后用无水乙醇脱水3次, 共脱水60 min。随后将样品放入-80 °C的冷冻干燥机中进行冷冻干燥48 h。将干燥后的样品固定到样品台上, 在5.0 kV的加速电压下, 用扫描电镜在400×进行观察。

### 1.3.10 主成分分析(principal component analysis, PCA)

参照苏娅宁等<sup>[22]</sup>的方法, 选择所需指标以PC得分模型(4)计算出不同PC得分:

$$\begin{cases} Y_n = \sum_{i=1}^{13} A_{ni} X_{ni} \\ A_{ni} = \frac{U_{ni}}{\sqrt{\lambda_n}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Y_n$ 为PC $n$ 的得分;  $A_{ni}$ 为PC $n$ 、指标 $i$ 的系数;  $X_{ni}$ 为PC $n$ 、指标 $i$ 的标准化数据;  $U_{ni}$ 为PC $n$ 、指标 $i$ 的载荷;  $\lambda_n$ 为PC $n$ 的特征值。

并以PC $n$ 的特征值在所提取 $m$ 个PC总特征值中所占的比例作为权重, 按式(5)设计总得分综合模型:

$$Y = \sum_{n=1}^m \frac{\lambda_n}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \times Y_n \quad (5)$$

式中:  $Y$ 为综合得分;  $m$ 为提取的PC个数;  $\lambda_n$ 、 $\lambda_j$ 分别为第 $n$ 、 $j$ 个PC的特征值。

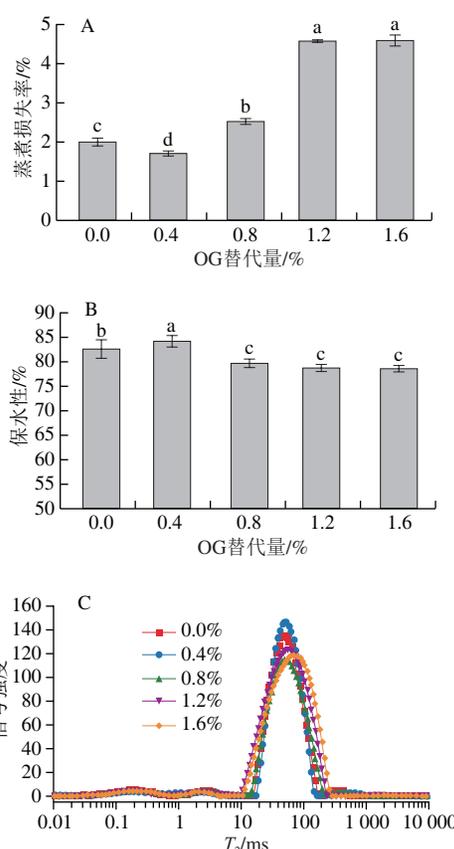
通过比较凝胶综合得分, 进而推断合适的OG替代量。

## 1.4 数据处理

本实验所有处理组均做2次重复。将所得数据利用软件SPSS (IBM SPSS Statistics 24)进行单因素方差分析(ANOVA)、相关性分析以及PCA并对其总结, 并采用Duncan多重极差检验进行多重比较, 以表示各组之间平均值差异,  $P < 0.05$ , 差异显著。实验结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 并使用Origin 2021对所得数据进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合凝胶束水能力分析



A、B、C分别表示凝胶的蒸煮损失率、保水性、水分分布。

图1 OG替代量对肉糜凝胶束水能力的影响

Fig. 1 Effects of different levels of OG replacement on water-binding capacity of minced meat gel

在肉糜制品中, 蒸煮损失率是评价生肉在加工制作成可食用熟肉的过程中质量损失的重要指标, 它从侧面体现出肉糜与水的结合能力强弱: 蒸煮损失率越小, 结合能力越强<sup>[23]</sup>。从图1A可知, 复合凝胶的蒸煮损失率总体呈现先下降后升高的趋势。在0.4% OG替代量时, 复合凝胶的蒸煮损失率最低, 质量损失为1.70%, 相比于对照组2.00%的损失有一定的改善效果( $P < 0.05$ )。这

可能是因为少量盐含量的下降对蛋白质溶解影响较小,并且加入的OG结构类似于可得然胶,由于其晶体结构中含有大量氢键,在加热过程中,推测OG颗粒吸水膨胀填充进蛋白质三维空间网络结构中,从而减少蛋白质热诱导凝胶形成过程中的水分损失<sup>[24]</sup>。因此,在较高加热温度下,低盐肉糜凝胶依旧能保持其热凝胶性能的特点,使其在热加工过程中能够有更好的持水能力<sup>[25]</sup>。但是随着OG替代量的逐渐增加,肉糜蒸煮损失率逐渐增大,在1.6% OG替代量时达到最大,但与1.2% OG凝胶组并无显著差异( $P>0.05$ )。其原因可能是与高盐相比大幅度降低盐含量后肌原纤维蛋白析出量急剧减少,导致乳化后形成的三维网状凝胶基质稳定性降低,水分流失过多。在1.2%食盐被替代时,凝胶的三维网状结构松散,束水能力大幅度减弱,已经无法有效降低凝胶的蒸煮损失,推测此时维持凝胶蒸煮损失的主要因素为OG的吸水性,所以当复合肉糜中食盐量进一步减少达到0.4%时,凝胶蒸煮损失虽然有轻微上升但并不显著( $P>0.05$ )。

保水性是影响凝胶品质好坏的重要指标,保水性越好,证明肉蛋白与水的交联能力越强,肉糜凝胶的三维网络结构越均匀致密,尤其凝胶制品的弹性与口感会变的更好<sup>[26]</sup>。由图1B可知,0% OG的复合肉糜凝胶保水性达到了82.61%,加入0.4% OG后,保水性显著提升( $P<0.05$ ),增加了1.66%。但随着OG替代量的增加,凝胶的保水性呈现下降的趋势,1.6% OG凝胶的保水性达到最低,约78.50%。这可能是因为少量盐含量的减少对蛋白的溶解影响较小,持水能力下降并不明显<sup>[27]</sup>。同时在加热过程中肌球蛋白适度变性展开并形成随机线性结构,分散在肉糜基质中的OG发生吸水溶胀,参与肌球蛋白头部聚集过程,形成致密的凝胶网络结构<sup>[24]</sup>,提高持水能力。Liu Rui等<sup>[28]</sup>向猪肉丸中添加OG后,同样发现肉丸表面更加光滑,孔洞减少,持水性有明显的增加。由图1C可以看出,随着OG替代量的上升,肉糜凝胶的水分发生明显变化。根据 $T_2$ 弛豫时间前后可以将水分分为3种类型 $T_{2b}$ (结合水,0.1~10 ms)、 $T_{21}$ (不易流动水,10~100 ms)、 $T_{22}$ (自由水,100~1 000 ms),即弛豫时间越长,水分越容易丢失<sup>[16]</sup>。在0.1~10 ms内出现2个峰,将其定义为强结合水( $T_{2b1}$ )以及弱结合水( $T_{2b2}$ )<sup>[29]</sup>。当肉糜凝胶中OG替代量增加时, $T_{2b2}$ 与 $T_{22}$ 会向 $T_{21}$ 发生偏移(表2),结合水含量下降,从而使高OG的凝胶中不易流动水含量发生显著提升( $P<0.05$ )。从图1C同样可以看出,在1.2%与1.6% OG的替代量下, $T_{21}$ 出峰时间发生提前且 $T_{22}$ 峰消失。有研究指出,肉糜体系中离子强度的大幅度降低,会使肌原纤维蛋白析出量急剧下降,水与蛋白之间交联减弱,同时OG晶体结构中含

有大量氢键,高替代量的OG会通过氢键与水结合,进而体系中的弱结合水与自由水逐渐转移为不易流动水<sup>[24]</sup>,进一步说明高OG含量下凝胶的保水性更加依赖于OG的吸水作用。但 $T_{21}$ 峰整体向弛豫时间长的方向发生偏移,说明复合凝胶中高OG组(>0.8%)的不易流动水较低OG组更容易损失。同时肌原纤维蛋白量的急剧下降,导致加热乳化后形成的三维网状凝胶基质稳定性显著降低,肉糜凝胶成型困难,间接导致肉糜凝胶受到外界作用更容易丢失水分,进而出现图1B的现象。

表2 不同OG替代量下低盐肉糜凝胶中不同水分含量变化

Table 2 Changes in proportions of different moisture states in low-salt minced meat gels at different levels of OG replacement %

| 盐含量 | OG替代量 | $P_{2b1}$                | $P_{2b2}$                | $P_{21}$                  | $P_{22}$                 |
|-----|-------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 2.0 | 0     | 2.856±0.250 <sup>a</sup> | 1.740±0.176 <sup>a</sup> | 94.178±0.298 <sup>b</sup> | 1.226±0.223 <sup>c</sup> |
| 1.6 | 0.4   | 2.886±0.017 <sup>a</sup> | 1.613±0.023 <sup>a</sup> | 94.293±0.086 <sup>b</sup> | 1.210±0.058 <sup>a</sup> |
| 1.2 | 0.8   | 2.891±0.098 <sup>a</sup> | 1.477±0.375 <sup>a</sup> | 94.450±0.531 <sup>b</sup> | 1.182±0.177 <sup>a</sup> |
| 0.8 | 1.2   | 2.943±0.131 <sup>a</sup> | 1.467±0.290 <sup>a</sup> | 95.589±0.159 <sup>a</sup> | /                        |
| 0.4 | 1.6   | 2.858±0.200 <sup>a</sup> | 0.969±0.141 <sup>a</sup> | 96.174±0.058 <sup>a</sup> | /                        |

注: $P_{2b1}$ 、 $P_{2b2}$ 、 $P_{21}$ 、 $P_{22}$ 分别为对应强结合水、弱结合水、不易流动水和游离水的相对含量; / 未出峰。不同字母表示组间差异显著( $P<0.05$ )。表3~5同。

## 2.2 复合凝胶色泽分析

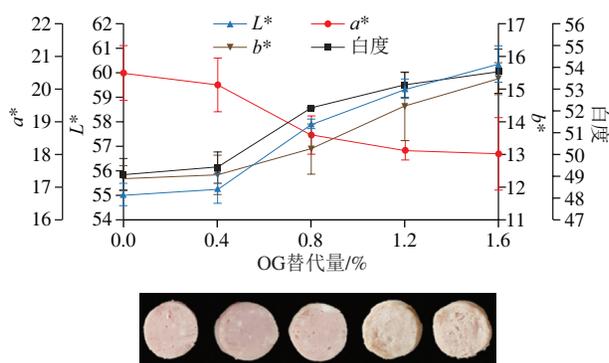
表3 OG替代量对低盐肉糜凝胶色泽的影响

Table 3 Effects of different levels of OG replacement on color of low-salt minced meat gel

| 肉糜      | OG替代量/% | $L^*$                   | $a^*$                   | $b^*$                   | 白度                      |
|---------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 生肉糜     | 0       | 45.75±1.21 <sup>d</sup> | 28.01±1.46 <sup>b</sup> | 16.74±0.46 <sup>b</sup> | 36.67±0.68 <sup>c</sup> |
|         | 0.4     | 46.01±0.18 <sup>d</sup> | 28.11±0.98 <sup>b</sup> | 17.23±0.63 <sup>b</sup> | 36.73±0.45 <sup>c</sup> |
|         | 0.8     | 48.39±0.65 <sup>c</sup> | 30.26±1.17 <sup>a</sup> | 18.13±0.40 <sup>b</sup> | 37.48±0.81 <sup>c</sup> |
|         | 1.2     | 49.41±0.41 <sup>b</sup> | 29.71±0.52 <sup>b</sup> | 18.25±0.76 <sup>b</sup> | 38.55±0.47 <sup>b</sup> |
|         | 1.6     | 50.64±0.94 <sup>a</sup> | 28.92±1.19 <sup>b</sup> | 18.37±0.33 <sup>b</sup> | 39.90±1.18 <sup>a</sup> |
| 熟肉糜(凝胶) | 0       | 55.03±0.45 <sup>d</sup> | 20.50±0.84 <sup>a</sup> | 12.23±0.42 <sup>b</sup> | 49.08±0.73 <sup>c</sup> |
|         | 0.4     | 55.28±0.60 <sup>d</sup> | 20.14±0.83 <sup>a</sup> | 12.38±0.59 <sup>b</sup> | 49.40±0.72 <sup>c</sup> |
|         | 0.8     | 57.91±0.20 <sup>c</sup> | 18.60±0.59 <sup>b</sup> | 13.18±0.78 <sup>b</sup> | 52.13±0.07 <sup>b</sup> |
|         | 1.2     | 59.36±0.40 <sup>b</sup> | 18.13±0.30 <sup>b</sup> | 14.48±1.05 <sup>b</sup> | 53.20±0.58 <sup>b</sup> |
|         | 1.6     | 60.37±0.75 <sup>a</sup> | 18.03±1.11 <sup>b</sup> | 15.34±0.49 <sup>b</sup> | 53.83±1.00 <sup>b</sup> |

肉制品良好的色泽可以大幅度提高人们的购买欲望以及食用欲望。本实验通过测定凝胶的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 和白度进行评估添加OG对低盐肉糜凝胶色泽的影响。从表3可知,无论是蒸煮前的生肉糜还是蒸煮后的熟肉糜凝胶,随着食盐含量降低、OG替代量增大,样品的 $L^*$ 和白度与0% OG的对照组相比都有显著差异( $P<0.05$ )并呈现总体上升的趋势。这或许是由于在肉中添加OG后,水分含量和肉糜基质发生变化,造成结构蛋白与肉类色素的稀释,光反射强度增强,随着OG替代量的增加,亮度和白度逐渐变大<sup>[22]</sup>。从熟化复合凝胶色泽图与凝胶横切面(图2)可以明显看出,随着OG替代量的增加,肉糜凝胶的颜色逐渐偏白,这与苏娅宁等<sup>[22]</sup>在肉糜中以甲基纤维素替代食盐的研究结果一致。而 $a^*$ 与 $b^*$ 总体来说相

较于生肉糜, 蒸煮后的低盐肉糜凝胶 $a^*$ 和 $b^*$ 有所降低, 可能是蒸煮后肉糜肌红蛋白发生变性导致。而且随着OG添加量的增大, 生肉糜和熟肉糜的 $b^*$ 均呈现增大的趋势, 这可能是由于OG溶于水之后呈现淡黄色, 进而导致肉糜的颜色偏黄。总之, 加入适量的OG能够提高低盐肉糜凝胶的亮度且使肉糜整体表现为理想的粉红色, Amini等<sup>[30]</sup>也表明添加OG可以显著改善香肠的感官特性。但是替代量过多就会导致产品的色泽过于苍白, 影响消费者的选择。



从左到右OG替代量依次为0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%。

图2 OG替代量对低盐复合肉糜凝胶色泽的影响

Fig. 2 Effects of different levels of OG replacement on color of low-salt minced meat gel

### 2.3 复合凝胶组织结构特性分析

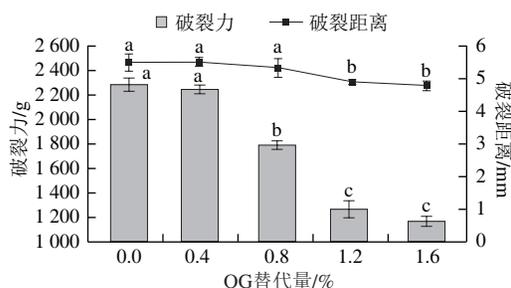


图3 不同OG替代量下肉糜凝胶的破裂力与破裂距离

Fig. 3 Rupture force and rupture distance of minced meat gels with different levels of OG replacement

破裂力是评估肉糜凝胶质量的关键参数<sup>[31]</sup>。通常, 破裂力代表凝胶强度和抗凝胶破断能力, 破裂距离与弹性呈正相关<sup>[32]</sup>。从图3可以看出, 随着OG替代量的增大, 凝胶的破裂力总体呈现降低的趋势, 但是0.4% OG组与对照组之间无显著差异 ( $P>0.05$ )。然而, 当OG含量从0.4%增加到1.6%时, 破裂力与破裂距离大幅度降低 ( $P<0.05$ )。质构特性与破裂距离表现出相似的趋势。质构是反映凝胶品质优劣的重要评判指标之一。近年来, 对食物质构变化进行评判的一种重要方法就是进行TPA测定, 包括凝胶的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性及回复性。

从表4可以看出, 在0.4% OG替代量时的低盐复合肉糜凝胶硬度显著高于对照组 ( $P<0.05$ )。当用0.8% OG进行替代时, 凝胶硬度逐渐下降, 在1.6% OG组达到最低, 显著低于对照组 ( $P<0.05$ )。除此之外, 凝胶的弹性、内聚性、咀嚼度与回复性表现出与硬度相同的增减趋势, 但是凝胶弹性没有随着OG替代量的改变而发生显著变化 ( $P>0.05$ )。这表明在肉糜中添加0.4%的OG可以有效维持凝胶强度, 但是随着盐含量的进一步减少, 添加更多的OG并不能阻止凝胶强度的下降。这可能是由于低含量的OG由于自身的凝胶特性, 与肉糜争夺水分, 导致肉糜中的有效蛋白浓度增加, 减弱蛋白质析出不足的影响, 维持凝胶强度。此外, OG作为孔隙填料可以更均匀地分散到整个凝胶基质中, 并有效地强化凝胶网络。但过量的OG阻碍肉糜中蛋白质的交联, 削弱甚至破坏了肉糜凝胶网络<sup>[33]</sup>。而且肉糜体系中离子强度的大幅度降低, 导致肌原纤维蛋白的溶解不足, 三维凝胶网络结构形成不完整, 而OG并不能填补结构导致凝胶强度与质构特性下降。因此, 相比于高盐组凝胶, 低盐高OG组的凝胶品质并未得到改善, 相反对凝胶质构特性产生了一定的负面影响。从图2可以看出, 对照组和添加0.4% OG组凝胶的横切面较为平整光滑, 纹理细致, 但当0.8%的盐被OG替代后, 凝胶表面的组织结构逐渐松散, 纹理变得粗糙, 这与质构特性数据相符。从总体上看, 0.4% OG可以有效改善凝胶的质构特性, 降低复合凝胶因盐减少而产生的不良影响, 维持凝胶品质, 这与Liu Rui等<sup>[28]</sup>在肉丸添加适量OG的研究结果相同。

表4 OG替代量对低盐肉糜凝胶质构的影响

Table 4 Effects of different levels of OG substitution on gel texture of low-salt meat mince

| OG替代量/% | 硬度/g                           | 弹性                       | 内聚性                      | 咀嚼性/g                          | 回复性                      |
|---------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 0       | 3 052.069±182.668 <sup>b</sup> | 0.912±0.023 <sup>b</sup> | 0.792±0.010 <sup>b</sup> | 2 201.370±112.891 <sup>c</sup> | 0.356±0.013 <sup>b</sup> |
| 0.4     | 3 749.768±94.800 <sup>a</sup>  | 0.923±0.034 <sup>a</sup> | 0.828±0.009 <sup>a</sup> | 2 868.287±151.312 <sup>a</sup> | 0.386±0.018 <sup>a</sup> |
| 0.8     | 3 729.257±132.316 <sup>a</sup> | 0.918±0.025 <sup>a</sup> | 0.772±0.015 <sup>b</sup> | 2 645.840±154.980 <sup>b</sup> | 0.344±0.017 <sup>b</sup> |
| 1.2     | 2 472.789±147.753 <sup>c</sup> | 0.886±0.021 <sup>b</sup> | 0.732±0.021 <sup>c</sup> | 1 602.021±82.457 <sup>d</sup>  | 0.308±0.021 <sup>c</sup> |
| 1.6     | 2 241.879±110.145 <sup>d</sup> | 0.860±0.054 <sup>c</sup> | 0.753±0.021 <sup>d</sup> | 1 357.397±64.401 <sup>e</sup>  | 0.274±0.018 <sup>d</sup> |

### 2.4 复合凝胶微观结构分析

#### 2.4.1 FTIR结果

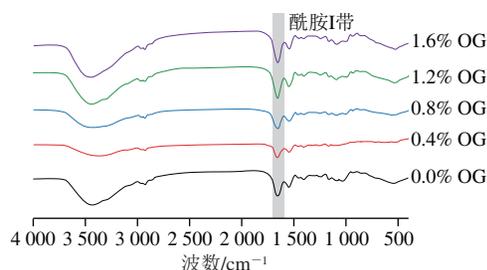


图4 不同OG替代量下复合肉糜肌原纤维蛋白的FTIR图

Fig. 4 Infrared spectra of myofibrillar protein in meat mince with different levels of OG replacement

FTIR被广泛用于探索各种形式的蛋白质网络的二级结构,在光谱4 000~400 cm<sup>-1</sup>区域内,常取酰胺I带(1 700~1 600 cm<sup>-1</sup>)用于分析蛋白质二级结构组成和构象变化(图4)<sup>[34]</sup>。参考Mao Junlong等<sup>[35]</sup>的分析方法,以PeakFit软件对酰胺I带进行分峰拟合预测出对应区域内 $\alpha$ -螺旋(1 650~1 660 cm<sup>-1</sup>)、 $\beta$ -折叠(1 600~1 640 cm<sup>-1</sup>)、 $\beta$ -转角(1 660~1 700 cm<sup>-1</sup>)和无规卷曲(1 640~1 650 cm<sup>-1</sup>)的相对含量,如表5所示。在0.4% OG替代量下,蛋白质的 $\alpha$ -螺旋占比略微上升, $\beta$ -折叠占比相对下降( $P>0.05$ )。但随着OG替代量的上升, $\alpha$ -螺旋与 $\beta$ -折叠占比却向对照组方向缓慢变化且各组间变化并不显著( $P>0.05$ )。这可能是因为盐含量的下降导致肉糜中胶原纤维蛋白的析出大量下降,不能与OG充分发生反应,使从1.6% OG组提取的胶原纤维蛋白二级结构与对照组相似,这间接说明了高OG组凝胶析出蛋白与水分交联的减弱。同时2.0%与0.4%盐含量的肉糜凝胶中提取出的胶原纤维蛋白具有相对较高的 $\alpha$ -螺旋与 $\beta$ -折叠结构,而高含量 $\alpha$ -螺旋与 $\beta$ -折叠代表高稳定性的胶原纤维蛋白二级结构<sup>[36]</sup>,但0.4%盐含量下形成的凝胶表现出相对较差的质构特性,这进一步说明过低的食盐添加量不利于胶原纤维蛋白的溶出,进而影响熟化后肉糜凝胶的质量。因此,维持适当的盐含量有益于肉糜凝胶的形成和稳定。

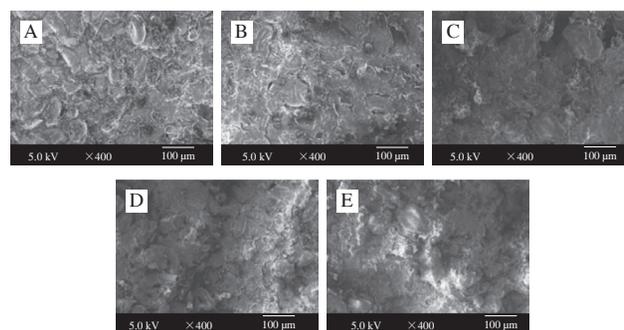
表5 OG替代量对复合肉糜肌原纤维蛋白二级结构的影响  
Table 5 Effects of different levels of OG replacement on secondary structure of myofibrillar protein in minced meat %

| OG替代量 | 盐含量 | $\alpha$ -螺旋            | $\beta$ -折叠             | $\beta$ -转角             | 无规卷曲                    |
|-------|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0     | 2.0 | 24.07±1.41 <sup>a</sup> | 27.43±1.08 <sup>a</sup> | 23.58±0.95 <sup>a</sup> | 24.91±1.93 <sup>a</sup> |
| 0.4   | 1.6 | 25.92±1.15 <sup>a</sup> | 23.65±1.67 <sup>a</sup> | 24.65±1.60 <sup>a</sup> | 25.78±2.40 <sup>a</sup> |
| 0.8   | 1.2 | 25.10±1.39 <sup>a</sup> | 23.84±1.06 <sup>a</sup> | 25.66±1.59 <sup>a</sup> | 25.40±1.50 <sup>a</sup> |
| 1.2   | 0.8 | 24.52±1.18 <sup>a</sup> | 25.97±1.21 <sup>a</sup> | 24.57±0.92 <sup>a</sup> | 24.94±0.92 <sup>a</sup> |
| 1.6   | 0.4 | 24.32±0.95 <sup>a</sup> | 27.26±1.09 <sup>a</sup> | 23.25±1.10 <sup>a</sup> | 25.17±1.05 <sup>a</sup> |

### 2.4.2 扫描电镜结果

凝胶的三维网络结构是影响凝胶强度和保水性的重要因素。从图5A可以看出,对照组的凝胶网络结构,孔洞较少,蛋白质交联也相对紧凑。通过图5B可以发现,0.4% OG替代量的凝胶网络结构更加致密均匀,蛋白质交联也更加密切,表面孔洞减少,表面形状更加规则平整,此时形成的网络结构在各组中显示最好,可以束缚更多的水分,增强凝胶的持水能力。这是因为少量盐的减少,对肉蛋白析出的影响较小,而且OG有良好的吸水性,可通过毛细作用将游离的水分束缚进凝胶结构中,形成更加致密的网络结构<sup>[37]</sup>。这与姜帅等<sup>[24]</sup>通过扫描电镜观察添加OG的复合猪肉肌原纤维蛋白微观结构的结果相同,OG的添加能够使疏松的蛋白质凝胶网络变得细致

均匀。但随着食盐添加量的不断降低,肉糜凝胶的网络结构趋于松散,蛋白质之间的交联减少,孔隙增多。当OG替代量达到1.6%时,过低的盐含量使肉蛋白析出量大幅度减少,而且由于OG本身具有较强的吸水性,过量OG会和肉蛋白争夺水分而造成蛋白质与水之间的相互作用大幅度减弱,导致形成的凝胶网络结构变得更加粗糙且不规则均匀,孔隙明显增多,导致凝胶品质远低于对照组(图5C~E)。这也与之前研究的复合凝胶的束水能力与组织结构结果一致。



A. 0% OG; B. 0.4% OG; C. 0.8% OG; D. 1.2% OG; E. 1.6% OG.

图5 不同OG替代量下低盐羊肉肉糜凝胶的扫描电镜图

Fig. 5 SEM images of low-salt minced mutton gels with different levels of OG replacement

### 2.5 不同OG替代量对复合肉糜凝胶特性指标的相关性分析

消费者在选择肉糜凝胶时,更加关注其色泽与质地。因此,为表明OG对复合肉糜凝胶的销售影响,选择蒸煮损失率、保水性、色泽、凝胶强度以及质构指标进行相关性分析。通过分析了解各指标之间的相关性以便于进一步通过PCA评价OG对低盐羊肉肉糜凝胶品质的影响。从表6可知,蒸煮损失率与凝胶强度、质构指标之间均表现为负相关,这表明低盐肉糜凝胶的蒸煮损失率越高,凝胶的组织结构越疏松,同时与保水性呈现极显著负相关( $P<0.01$ ),与蒸煮损失率和保水性的实验数据一致;白度与凝胶强度、质构指标呈现显著负相关( $P<0.05$ ),这说明凝胶的品质在随着凝胶白度的增大而降低,这与图3结果相同;肉糜凝胶的破裂力与破裂距离呈现显著正相关( $P<0.05$ ),而且在质构5个指标之间也具有相关性( $P<0.01$ )。添加OG的低盐羊肉肉糜凝胶水分、色泽、质构等凝胶特性指标随着添加量的增加而发生显著变化,并且当蒸煮损失率较低时,质构指标较高,白度较低,色泽更偏向于消费者选择的微粉色。

表6 影响低盐羊肉肉糜凝胶销售指标间的相关性分析  
Table 6 Correlation analysis among quality attributes of low-salt mutton mince gels

| 指标    | 蒸煮损失率    | 保水性      | $L^*$    | $a^*$    | $b^*$    | 白度       | 破裂力     | 破裂距离   | 硬度      | 弹性      | 内聚性     | 咀嚼性     |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 回复性   | -0.570*  | 0.777**  | -0.834** | 0.785**  | -0.717** | -0.822** | 0.478   | 0.050  | 0.801** | 0.651** | 0.928** | 0.869** |
| 咀嚼性   | -0.431   | 0.659**  | -0.771** | 0.701**  | -0.694** | -0.747** | 0.363   | 0.040  | 0.979** | 0.686** | 0.861** |         |
| 内聚性   | -0.776** | 0.793**  | -0.898** | 0.838**  | -0.745** | -0.887** | 0.669** | 0.254  | 0.769** | 0.629** |         |         |
| 弹性    | -0.391   | 0.295    | -0.547*  | 0.301    | -0.335   | -0.508*  | 0.370   | 0.417  | 0.574** |         |         |         |
| 硬度    | -0.286*  | 0.611**  | -0.698** | 0.666**  | -0.671** | -0.677** | 0.239   | -0.111 |         |         |         |         |
| 破裂距离  | -0.620*  | 0.242    | -0.302   | 0.077    | -0.054   | -0.267   | 0.585*  |        |         |         |         |         |
| 破裂力   | -0.963** | 0.731**  | -0.825** | 0.723**  | -0.564*  | -0.817** |         |        |         |         |         |         |
| 白度    | 0.834**  | -0.816** | 0.987**  | -0.900** | 0.762**  |          |         |        |         |         |         |         |
| $b^*$ | 0.590*   | -0.656** | 0.825**  | -0.751** |          |          |         |        |         |         |         |         |
| $a^*$ | -0.751** | 0.864**  | -0.851** |          |          |          |         |        |         |         |         |         |
| $L^*$ | 0.839**  | -0.786** |          |          |          |          |         |        |         |         |         |         |
| 保水性   | -0.756** |          |          |          |          |          |         |        |         |         |         |         |

注: \*显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\*极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

## 2.6 PCA评价不同OG替代量对低盐羊肉肉糜凝胶特性的影响

PCA结果中的因子载荷值可以反映出低盐OG羊肉肉糜凝胶的蒸煮损失率、保水性、色泽、质构等指标对PC载荷的相对大小和影响的方向,数值大小反映对因子的影响程度即指标的影响程度<sup>[22]</sup>,将各指标数据进行KMO和Bartlett检验,检验结果如表7所示。KMO取样适切性量数大于0.6且Bartlett球形度检验显著性小于0.05说明各指标之间有较高的关联程度<sup>[18]</sup>,与相关性分析结果相同。提取出3个特征值大于1的PC,即 $m=3$ ,结果如表8所示,特征值分别为7.547、2.173、1.449,累计贡献率达到85.91%,可以大部分反映出低盐羊肉肉糜的凝胶性质。

表7 KMO和Bartlett检验结果  
Table 7 KMO and Bartlett test results

| 指标            | 结果      |
|---------------|---------|
| KMO取样适切性量数    | 0.640   |
| 近似卡方          | 257.542 |
| Bartlett球形度检验 | 自由度 78  |
| 显著性           | 0.000   |

表8 提取载荷平方和结果  
Table 8 Sum of squares of extracted loadings

| PC | 提取载荷平方和 |         |           |
|----|---------|---------|-----------|
|    | 总计      | 方差百分比/% | 累计方差贡献率/% |
| 1  | 7.547   | 58.052  | 58.052    |
| 2  | 2.173   | 16.716  | 74.768    |
| 3  | 1.449   | 11.146  | 85.914    |

如表9所示,在PC1中质构特性指标所占权重较大。同时从图6可以看出,质构指标在3个PC中均有较高的占比,这充分说明质构指标在判断凝胶特性上起着重要作用,其中硬度、内聚性、咀嚼度和回复性载荷因子相对较高。

表9 指标成分载荷矩阵

Table 9 Loading matrix of first three principal components

| 变量       | 指标    | PC1    | PC2    | PC3    |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| $X_1$    | 蒸煮损失率 | -0.596 | 0.744  | -0.120 |
| $X_2$    | 保水性   | 0.876  | -0.152 | -0.183 |
| $X_3$    | $L^*$ | -0.868 | -0.024 | 0.362  |
| $X_4$    | $a^*$ | 0.868  | -0.020 | -0.400 |
| $X_5$    | $b^*$ | -0.725 | -0.157 | 0.467  |
| $X_6$    | 白度    | -0.891 | 0.015  | 0.341  |
| $X_7$    | 破裂力   | 0.563  | -0.757 | 0.084  |
| $X_8$    | 破裂距离  | 0.226  | -0.757 | 0.314  |
| $X_9$    | 硬度    | 0.772  | 0.430  | 0.283  |
| $X_{10}$ | 弹性    | 0.589  | 0.157  | 0.604  |
| $X_{11}$ | 内聚性   | 0.909  | 0.123  | 0.223  |
| $X_{12}$ | 咀嚼度   | 0.839  | 0.351  | 0.346  |
| $X_{13}$ | 回复性   | 0.869  | 0.276  | 0.238  |

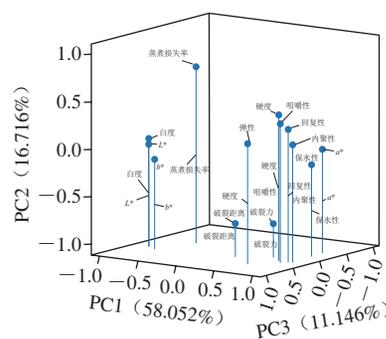


图6 不同OG替代量下样品指标与PC间相关因子三维载荷图  
Fig. 6 Three-dimensional loading plot of correlation factors between quality indexes and principal components at different levels of OG substitution

依据PC得分模型与综合得分模型得出表达式:

$$Y_1 = -0.217X_1 + 0.319X_2 - 0.316X_3 + 0.316X_4 - 0.264X_5 - 0.324X_6 + 0.205X_7 + 0.082X_8 + 0.281X_9 + 0.214X_{10} + 0.331X_{11} + 0.305X_{12} + 0.316X_{13}$$

$$Y_2 = 0.505X_1 - 0.103X_2 - 0.016X_3 - 0.014X_4 - 0.107X_5 + 0.010X_6 - 0.514X_7 - 0.514X_8 + 0.292X_9 + 0.107X_{10} + 0.083X_{11} + 0.238X_{12} + 0.187X_{13}$$

$$Y_3 = -0.100X_1 - 0.152X_2 + 0.301X_3 - 0.332X_4 + 0.388X_5 + 0.283X_6 + 0.070X_7 + 0.261X_8 + 0.235X_9 + 0.502X_{10} + 0.185X_{11} + 0.287X_{12} + 0.198X_{13}$$

$$Y = \frac{7.547}{7.547+2.173+1.449} \times Y_1 + \frac{2.173}{7.547+2.173+1.449} \times Y_2 + \frac{1.449}{7.547+2.173+1.449} \times Y_3$$

将各指标数值标准化后代入上述表达式, 得出综合PC值Y, 计算结果如表10所示。0.4% OG低盐羊肉肉糜凝胶组综合评价结果优于高盐对照组, 以此推测0.4%可作为合适的OG替代量被用于生产低盐羊肉肉糜凝胶类制品。

表10 不同OG替代量下的PCA评价结果  
Table 10 Results of PCA for different levels of OG substitution

| OG替代量/% | 盐含量/% | $Y_1$  | $Y_2$  | $Y_3$  | $Y$    | 排序 |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|----|
| 0       | 2     | 2.455  | -0.935 | -0.796 | 1.374  | 2  |
| 0.4     | 1.6   | 2.643  | -0.435 | 0.383  | 1.751  | 1  |
| 0.8     | 1.2   | 0.610  | 0.120  | 1.307  | 0.605  | 3  |
| 1.2     | 0.8   | -2.761 | 1.258  | -0.457 | -1.680 | 4  |
| 1.6     | 0.4   | -3.948 | -0.108 | -0.437 | -2.745 | 5  |

### 3 结论

通过测定低盐复合肉糜凝胶的蒸煮损失率、保水性、水分分布及含量、色泽、凝胶强度、质构以及对微观结构的观察, 发现复合肉糜凝胶在0.4% OG替代量时, 其束水能力更强、有着吸引消费者选择的微粉色泽、组织结构强度也优于其他实验组。而较高的OG替代量(>0.8%)对复合肉糜凝胶的品质有不利影响: 蒸煮损失率升高, 保水性下降、凝胶色泽变白、凝胶强度与质构显著下降( $P < 0.05$ ), 扫描电镜图也显示出高OG(>0.8%)替代量下肉糜凝胶的结构更加趋于松散。因此, 通过实验与数据分析综合考虑0.4% OG作为生产低盐羊肉肉糜凝胶合适的替代添加量。但本研究对羊肉肉糜凝胶体系中OG与蛋白质之间的具体作用机理尚未清楚, 在此基础上如何将其用于实际加工生产中还需进一步研究。同时随着科技的不断进步, 逐渐涌现出一些新的加工技术, 如超声波技术、超高压技术等。那么如何将OG与这些先进技术联合使用, 从而在维持甚至提高肉制品品质的同时, 做到低盐、高营养, 这也是值得我们进一步探讨的科学问题, 从而为OG在各类低盐肉制品生产中的应用提供更加充分的理论依据。

### 参考文献:

[1] 李立敏, 杨豫松, 高爱武, 等. 茶多酚对羊肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(8): 133-137; 145. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.08.022.

[2] 杨玲玲. 卵白蛋白-大豆分离蛋白对肉糜凝胶特性的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020. DOI:10.27177/d.cnki.gjxnu.2020.000134.

[3] 孟林. 大豆分离蛋白结合超高压对低钠猪肉糜凝胶特性的影响[D]. 新乡: 河南科技学院, 2020. DOI:10.27704/d.cnki.gnhkj.2020.000047.

[4] 余涛, 许倩, 牛希跃, 等. 低盐肉制品加工技术研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 208-214. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.038.

[5] 吴菊清. 猪肉肌原纤维蛋白乳化特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.

[6] 陶硕, 马仁超, 郭秀霞, 等. 氯化钠和三聚磷酸钠添加量对蒸煮火腿品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(12): 18-24.

[7] ZHAO Q, YU X J, ZHOU C S, et al. Effects of collagen and casein with phenolic compounds interactions on protein *in vitro* digestion and antioxidation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 124(C): 109192. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109192.

[8] BASHIR K M I, KIM J S, AN J H, et al. Natural food additives and preservatives for fish-paste products: a review of the past, present, and future states of research[J]. Journal of Food Quality, 2017, 2017: 1-31. DOI:10.1155/2017/9675469.

[9] GAO Y F, LUO C, ZHANG J Y, et al. Konjac glucomannan improves the gel properties of low salt myofibrillar protein through modifying protein conformation[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133400. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133400.

[10] 梁轶媛. 天然食品添加剂相关技术探讨[J]. 食品安全导刊, 2021(20): 174-175. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2021.20.108.

[11] 郑梅霞, 朱育菁, 刘波, 等.  $\beta$ -葡聚糖及其在食品工业中的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(16): 4333-4342.

[12] 方承虹, 王琼仪, 林欢, 等. 添加燕麦 $\beta$ -葡聚糖复合猪肉香肠的研制[J]. 肉类工业, 2015, 2015(4): 5-10.

[13] ASHARI R, HOSSEINI H, KHAKSAR R, et al. Investigation of the effects of inulin and  $\beta$ -glucan on the physical and sensory properties of low-fat beef burgers containing vegetable oils: timisation of the formulation using D-optimal mixture design[J]. Food Technology and Biotechnology, 2015, 53(4): 436-445. DOI:10.17113/ftb.53.04.15.3980.

[14] 张海璐, 黄翔, 杨燃, 等. 蛋白质氧化对羊肉糜流变与凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 8-13. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190618-211.

[15] 李应兰, 魏亚儒, 贺晓光. 黄花菜粉对牛肉糜凝胶特性和流变性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 38-45.

[16] LIU Y N, WANG R, WANG D B, et al. Development of a food packaging antibacterial hydrogel based on gelatin, chitosan, and 3-phenyllactic acid for the shelf-life extension of chilled chicken[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107546. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107546.

[17] 王希希, 李康, 黄群, 等. 刺麒麟菜对鸡胸肉糜凝胶特性和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 76-80. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210318-232.

[18] 胡莹, 江睿生, 霍金杰, 等. 茶多酚对大豆蛋白肉质构性质和结构特性的影响[J]. 农产品加工, 2022(4): 1-3; 9. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2022.04.001.

[19] PARK D, XIONG Y L, ALDERTON A L. Concentration effects of hydroxyl radical oxidizing systems on biochemical properties of porcine muscle myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1239-1246. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.03.028.

[20] WANG X W, ZHAO R Y, YUAN W Q. Composition and secondary structure of proteins isolated from six different quinoa varieties from China[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95.

[21] ZHAO S M, LIU Y, YUAN X R, et al. Effect of low-frequency alternating magnetic field on the rheological properties, water distribution and microstructure of low-salt pork batters[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 159: 113164. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113164.

[22] 苏娅宁, 杨慧娟, 陈韬. 甲基纤维素添加量对低盐肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 25-31. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210318-232.

- [23] QIN O Y, LIU L H, ZAREEF M, et al. Application of portable visible and near-infrared spectroscopy for rapid detection of cooking loss rate in pork: comparing spectra from frozen and thawed pork[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 160: 113304. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113304.
- [24] 姜帅, 曹传爱, 康辉, 等. 燕麦 $\beta$ -葡聚糖对肌原纤维蛋白乳化和凝胶特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(5): 32-41. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2019.05.005.
- [25] 白登荣, 温佳佳, 贺雪华, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 158-164. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715026.
- [26] 李宁宁, 李钊, 赵圣明, 等. 地皮菜添加量对鸡胸肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 53-59. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191031-348.
- [27] SHEN R L, LIU X Y, DONG J L, et al. The gel properties and microstructure of the mixture of oat  $\beta$ -glucan/soy protein isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 47: 108-114. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.01.017.
- [28] LIU R, WANG N, LI Q, et al. Comparative studies on physicochemical properties of raw and hydrolyzed oat  $\beta$ -glucan and their application in low-fat meatballs[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 424-431. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.04.027.
- [29] ZHUANG X, HAN M, BAI Y, et al. Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel improved by insoluble dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 74: 219-226. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.08.015.
- [30] AMINI S R, HOSSEINI H, BONDARIANZADEH D, et al. Optimization of prebiotic sausage formulation: effect of using  $\beta$ -glucan and resistant starch by D-optimal mixture design approach[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 704-710. DOI:10.1016/j.lwt.2014.05.014.
- [31] PETCHARAT T, BENJAKUL S. Effect of gellan and calcium chloride on properties of surimi gel with low and high setting phenomena[J]. RSC Advances, 2017, 83(7): 52423-52434. DOI:10.1039/c7ra10869a.
- [32] HU Y Q, LIU W J, YUAN C H, et al. Enhancement of the gelation properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) muscle protein with curdlan and transglutaminase[J]. Food Chemistry, 2015, 176(11): 115-122. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.12.006.
- [33] KAEWUDOM P, BENJAKUL S, KIJROONGROJANA K. Properties of surimi gel as influenced by fish gelatin and microbial transglutaminase[J]. Food Bioscience, 2013, 1: 39-47. DOI:10.1016/j.fbio.2013.03.001.
- [34] MEZIANI S, JASNIEWSKI J, RIBOTTA P, et al. Influence of yeast and frozen storage on rheological, structural and microbial quality of frozen sweet dough[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 538-544. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.10.026.
- [35] MAO J L, FU J, ZHU Z, et al. Impact of KCl and ultrasound on the structural properties of myofibrillar proteins in low sodium semi-dried large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 178: 114604. DOI:10.1016/j.lwt.2023.114604.
- [36] CHU Y, CHENG H, YU H, et al. Quality enhancement of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during frozen (-18 °C) storage by spiral freezing[J]. CyTA-Journal of Food, 19(1): 710-720. DOI:10.1080/19476337.2021.1960895.
- [37] 左淑荣. 燕麦 $\beta$ -glucan的理化特性及其与肌原纤维蛋白的相互作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.