

# 脱乙酰基葡甘聚糖对鳙鱼肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的影响<sup>①</sup>

何明祥<sup>1,2,3</sup>

1. 福建省福州市工业产品生产许可证审查技术中心, 福州 350003;

2. 福建省福州市食品药品审评中心, 福州 350003; 3. 福建农林大学 食品科学学院, 福州 350002

**摘要:** 为了改善鳙鱼肌原纤维蛋白的凝胶特性, 以脱乙酰基魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)为凝胶改良剂, 探讨了影响鳙鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的因素, 并以脱乙酰基 KGM 添加量、加热温度和 NaCl 浓度为自变量, 凝胶强度为响应值, 采用响应面设计和分析优化得到了最佳制备条件: 脱乙酰基 KGM 添加量 0.52%, 加热温度 79.5 °C, NaCl 浓度 0.10 mol/L; 在此条件下鳙鱼肌原纤维蛋白的凝胶强度可达 107.35 g/cm. 通过进一步扫描电镜观察发现, 添加脱乙酰基 KGM 的肌原纤维蛋白热凝胶结构更加致密, 空洞小而少, 进而提高复合肌原纤维蛋白凝胶的性质.

**关键词:** 鳙鱼肌原纤维蛋白; 脱乙酰基魔芋葡甘聚糖; 凝胶强度; 响应面优化

**中图分类号:** TS201.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2018)04-0001-09

肌原纤维蛋白是鱼糜凝胶制品形成的关键蛋白组分, 其凝胶特性对鱼糜制品独特质构、保水性等有着决定性的作用<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着优质海水鱼资源的日益锐减和人们对鱼糜制品需求量的快速增长, 如何合理开发利用以养殖的淡水鱼类为原料生产鱼糜制品, 已成为当今世界各鱼糜生产大国共同关注的热点<sup>[2]</sup>.

鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)又叫花鲢、黑鲢等, 是中国四大家鱼之一, 因其分布广泛、数量庞大以及相对低廉的价格, 是生产淡水鱼糜原浆的重要原材料<sup>[3]</sup>. 然而, 鳙鱼鱼糜的凝胶性差且极易凝胶劣化, 因此, 如何有效地改善鱼糜制品的凝胶强度是开发和利用鳙鱼鱼糜的关键点<sup>[4]</sup>.

为了提高鱼糜制品的凝胶特性, 以食品胶为代表的天然生物大分子是一类常用的鱼糜凝胶改良剂. 魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)是一种从魔芋块茎中提取出来的高分子量植物多糖, 其分子主链由甘露糖和葡萄糖以 1.6 : 1 比例通过  $\beta$ -1, 4 糖苷键连接而形成的<sup>[5-6]</sup>. KGM 主链上大约每 19 个糖残基 C-3 上有一个以酯键形式结合的乙酰基<sup>[7]</sup>. KGM 的凝胶性能与其分子链的乙酰基残基的数量密切相关. 研究表明, 通过适当的碱处理 KGM, 使其分子链上的乙酰基残基脱去, 是 KGM 形成稳定凝胶的重要途径<sup>[8]</sup>. KGM 具有很强的水结合能力、乳化性和凝胶性等, 是食品加工中常用的增稠剂、乳化剂以及凝胶改

① 收稿日期: 2017-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(3121837); 福州市科技计划项目(2011-N-44).

作者简介: 何明祥(1976-), 男, 福建福清人, 高级工程师, 硕士, 主要从事食品科学的研究.

良剂<sup>[9-10]</sup>. 此外, KGM 还具有改善人体胃肠道生态、调整脂类代谢、降低糖尿病和心血管疾病发生率等功效<sup>[11]</sup>. KGM 被广泛应用于鱼肉糜制品, 但目前有关脱乙酰基 KGM 对鳙鱼肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性影响的研究还未见报道. 因此, 本试验以鳙鱼肌原纤维蛋白为材料, 通过脱乙酰基 KGM 添加量、加热温度和 NaCl 浓度对其凝胶性质的影响及优化凝胶制备条件, 为开发高品质鳙鱼鱼糜制品提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

新鲜鳙鱼(平均质量 1.5 kg)购于农贸市场, 用两倍体积的碎冰保鲜后运到实验室, 放置于 4 ℃ 备用. KGM(纯度为 92%), 由云南三艾有机魔芋发展有限公司提供. 其他试剂均为分析纯.

TA-XT plus 质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; GB204 万分之一电子天平, 瑞士 Mettler Toledo 仪器有限公司.

### 1.2 方法

#### 1.2.1 脱乙酰基 KGM 的制备

参考 Zhang et al<sup>[12]</sup> 的方法并做一定的修改. 称取 30 g KGM 与 150 mL 50% 的乙醇混匀, 于 40 ℃ 下搅拌 30 min, 迅速加入 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (添加量为 KGM 量的 1/30), 40 ℃ 下反应 24 h. 将产物反复用 50% 的乙醇冲洗, 直到样品溶液的 pH 为中性为止. 然后用 95% 的乙醇将样品脱水, 于 40 ℃ 下烘干, 得脱乙酰度为 62.3% 的脱乙酰基 KGM.

#### 1.2.2 鳙鱼肌原纤维蛋白的提取

参考 Kobayashi et al<sup>[13]</sup> 的方法并做一定的修改. 新鲜鳙鱼宰杀后, 去头、去皮、去内脏后进行采肉. 将鱼肉捣碎, 加入 5 倍体积预冷过含 0.10 mol/L NaCl 的磷酸盐缓冲液(20 mmol/L, 4 ℃, pH 值为 7.5), 冰浴条件下高速均质 2 min 得匀浆液后, 将匀浆液低温离心 15 min, 弃除上清液, 收集沉淀物. 将沉淀物复溶于上述缓冲液中, 重复以上步骤 3 次; 将得到的沉淀加入 4 倍体积的冷 0.10 mol/L NaCl 溶液, 高速均质 30 s, 调整混合液的 pH 值为 6.25, 低温离心(4 ℃, 8 000 g, 15 min), 弃除上清液, 收集沉淀物, 重复 2 次, 收集的沉淀为肌原纤维蛋白, 并将其于 4 ℃ 下保存, 且 3 d 内使用.

#### 1.2.3 复合凝胶的制备

将提取的肌原纤维蛋白复溶于超净水中, 配成 30 mg/mL 的溶液. 将脱乙酰基 KGM 按 0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, 1.0% 加到肌原纤维蛋白分散液中, 并搅拌混匀. 将混合溶液置于水浴锅中加热形成凝胶. 之后冰水冷却, 然后贮存在 2~4 ℃ 的冰箱中备用. 制备好的凝胶在每次分析前要在室温(18~20 ℃)条件下放置 30 min.

#### 1.2.4 复合凝胶性质的测定

##### 1.2.4.1 凝胶强度测定

参考 Yin et al<sup>[14]</sup> 的方法, 采用英国 TA 公司的 TA-XT plus 质构仪来测定样品的凝胶强度. 采用直径为 5 mm 圆柱形探头, 测试前、测试时和测试后探头速度均为 60 mm/s, 测试距离为 20 mm. 每组样品分别进行 5 次的平行试验, 结果取平均值.

##### 1.2.4.2 持水性测定

根据纪蓉等<sup>[15]</sup> 的方法, 在肌原纤维蛋白凝胶中间部分切取厚 5 mm, 质量为  $m_1$  的薄片, 置于上、下各 3 层的定性滤纸中间, 在其上加 10 kg 的重物, 保持 2 min 后, 称质量为  $m_2$ . 持水性按以下公式计算:

$$\text{持水性} / \% = \left( 1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100$$

每组样品分别进行 3 次的平行试验, 结果取平均值.

1.2.4.3 电子显微镜扫描

将样品切成小块, 放于 2.5%戊二醛溶液中 4℃浸泡过夜, 用磷酸缓冲液(0.10 mol/L, pH 值为 7.0)漂洗样品 3 次, 每次 15 min; 接着用 1%锇酸溶液固定样品 2 h, 用磷酸缓冲液(0.10 mol/L, pH 值为 7.0)漂洗样品 3 次, 每次 15 min; 用 50%,70%,80%,90%和 100%的乙醇溶液对其进行梯度脱水处理, 再用纯醋酸异戊酯处理样品 2 h; 临界点干燥, 离子溅射仪镀膜, 扫描电子显微镜观察, 加速电压设定为 15 kV.

1.2.5 单因素试验

选择对试验影响较大的脱乙酰基 KGM 的添加量、加热温度、加热时间 3 个因素, 考察其对复合肌原纤维蛋白制品凝胶强度、持水性的影响. 每组试验重复 3 次.

1.2.6 优化设计及数据处理

在单因素的基础上, 以凝胶强度为响应值对复合凝胶特性进行响应面优化设计(表 1).

表 1 试验因素与水平设计

| 因 素              | 水 平  |      |      |
|------------------|------|------|------|
|                  | −1   | 0    | 1    |
| 脱乙酰基 KGM 添加量 A/% | 0.4  | 0.5  | 0.6  |
| 加热温度 B/℃         | 75   | 80   | 85   |
| NaCl 浓度 C/mol/L  | 0.09 | 0.10 | 0.11 |

所有试验重复 3 次, 数据以平均值及方差表示. 使用 Origin 8.5,SPSS 22.0,Design Expert V8.05 进行数据处理和显著性分析,  $p<0.05$  表示差异有统计学意义.

2 结果与分析

2.1 脱乙酰基 KGM 添加量对肌原纤维凝胶性质的影响

图 1 可以看出, 随着脱乙酰基 KGM 添加量的增加, 肌原纤维蛋白凝胶的凝胶强度逐渐增强, 在脱乙酰基 KGM 添加量为 0.5%时, 其凝胶强度由初始的 41.25 g/cm 增大到 95.39 g/cm, 提高了约 2.31 倍( $p<0.05$ ). 这可能是添加脱乙酰基 KGM 后, 脱乙酰基 KGM 与肌原纤维蛋白发生交联或者以填充物的形式包含于肌原纤维蛋白凝胶网络中, 从而使得复合凝胶的凝胶强度逐渐增强<sup>[16]</sup>; 而当脱乙酰基 KGM 继续增多时, 反而阻碍肌原纤维蛋白之间的交联作用<sup>[17]</sup>.

脱乙酰基 KGM 添加量对肌原纤维蛋白凝胶的持水性也呈现出类似的变化趋势. 在脱乙酰基 KGM 添加量为 0.5%时, 持水性达到 94.51%, 较空白组提高了 13%. 其原因可能是 KGM 本身吸水膨胀并填充于肌原纤维蛋白凝胶网络, 从而提高其持水性; 脱乙酰基 KGM 与肌原纤维蛋白发生交联, 增加复合凝胶的网络结构而提高复合凝胶的持水性<sup>[16]</sup>. 但是, 过多的脱乙酰基 KGM 能够阻碍肌原纤维蛋白之间的交联, 使得复合凝胶体系的持水性反而降低<sup>[7]</sup>. 这与 Zhang et al<sup>[12]</sup>结果相一致. 综合复合凝胶强度和持水性分析, 本试验选择脱乙酰基 KGM 添加量 0.5%为最佳添加量.

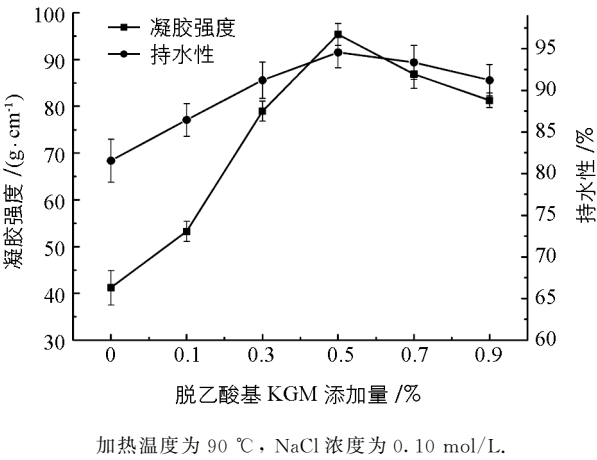


图 1 脱乙酰基 KGM 添加量对肌原纤维凝胶性质的影响

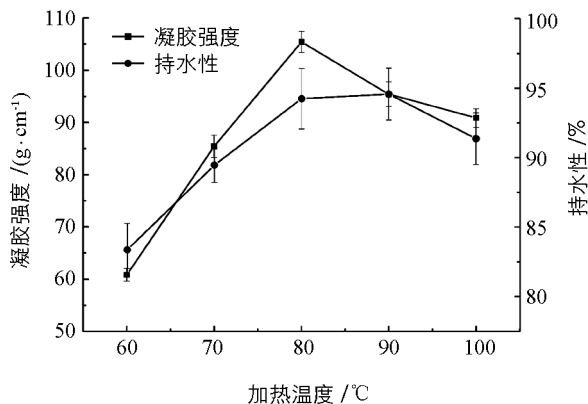
## 2.2 加热温度对肌原纤维凝胶性质的影响

从图 2 可以看出,肌原纤维蛋白凝胶的凝胶强度随着加热温度(60~80 ℃)的上升而提高,且添加脱乙酰基 KGM 的复合凝胶的凝胶强度明显高于空白组( $p < 0.05$ ).加热有利于肌原纤维蛋白变性,促进蛋白质重新聚集而形成凝胶网络结构<sup>[18]</sup>.然而,当加热温度超过 80 ℃,复合凝胶的凝胶强度则有所减弱.这可能是高温能加快肌原纤维蛋白的变性速率,较为迅速地促进其蛋白簇形成,且蛋白簇颗粒较大,不利于进一步形成有序的三维网络结构,降低凝胶网络的致密性,从而使得肌原纤维蛋白凝胶强度降低<sup>[19]</sup>.此外,不同的加热温度,脱乙酰基 KGM 自身的凝胶行为与肌原纤维蛋白发生的反应也有所不同,对肌原纤维蛋白空间结构的影响不同,从而导致其凝胶强度降低<sup>[16, 20]</sup>.

从图 2 还可以看出,肌原纤维蛋白凝胶的持水性随着加热温度呈现出上升的趋势,但在 80 ℃ 以后上升趋势较为缓慢,差异无统计学意义( $p > 0.05$ ).这现象可能与不同加热温度下肌原纤维蛋白与脱乙酰基 KGM 形成的凝胶差异有关<sup>[16]</sup>.综合复合凝胶强度和持水性分析,本试验中加热温度选择 80 ℃ 为宜.

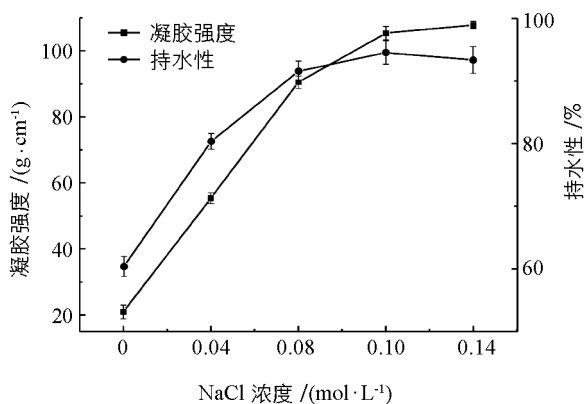
## 2.3 NaCl 浓度对肌原纤维凝胶性质的影响

由图 3 可知,随着体系中 NaCl 浓度的增大,肌原纤维蛋白凝胶的凝胶强度呈显著增大趋势( $p < 0.05$ ),在 NaCl 浓度为 0.10 mol/L 时,其凝胶强度为初始值的 3.5 倍.然而,当体系中 NaCl 浓度超过 0.10 mol/L 时,肌原纤维蛋白凝胶的凝胶强度变化则不显著( $p > 0.05$ ).对于复合凝胶的持水性,当加入 NaCl 浓度在 0.04~0.10 mol/L 时,持水性随浓度的增加而上升,比空白组提高了 34%;在浓度处于 0.14 mol/L 时,持水性达到最高;随后浓度继续增大,复合凝胶的持水性则逐渐趋于稳定( $p > 0.05$ ).这现象可能与 NaCl 有利于肌原纤维蛋白的溶解有关<sup>[21]</sup>.适当地添加 NaCl,能促进肌原纤维蛋白溶解度的提高,从而促进肌原纤维蛋白的凝胶化,形成稳定的网络凝胶结构<sup>[22]</sup>.同时, KGM 可能与肌原纤维蛋白在低离子浓度下存在协同作用,促进复合网络凝胶的形成,进而影响复合凝胶的性质.另一方面,高盐浓度条件下盐的水化能力强于蛋白和多糖,从而夺去了多糖分子和蛋白质外围的水膜,使复合凝胶的持水性下降<sup>[2, 23]</sup>.综上,本试验选择 NaCl 浓度 0.10 mol/L 为最佳浓度.



脱乙酰基 KGM 添加量为 0.5%, NaCl 浓度为 0.10 mol/L.

图 2 加热温度对肌原纤维蛋白凝胶性质的影响



脱乙酰基 KGM 添加量为 0.5%, 加热温度为 80 ℃.

图 3 NaCl 浓度对肌原纤维蛋白凝胶性质的影响

## 2.4 响应面试验优化

响应面试验结果如表 2, 回归方程方差分析见表 3. 经 Design-Expert 软件对表 2 数据进行多元回归拟合后, 得到试验因素对响应值的二次多项回归方程:

$$Y = -2\,346.64 + 1\,083.0A + 41.28B + 10\,365.75 - 2.12AB + 377.5AC - 16.45BC - 928.01A^2 - 0.24B^2 - 45\,333.8C^2$$

由表 3 可知，建立的模型差异有统计学意义( $p<0.01$ )，失拟项  $p=0.148\ 5>0.05$ (差异无统计学意义)，模型的决定系数  $R^2$  为 0.9986，校正决定系数  $R^2$  为 0.996 9，表明该模型的拟合良好。同时，脱乙酰基 KGM 添加量(A)和 NaCl 浓度(C)对肌原纤维蛋白凝胶强度的影响均有统计学意义( $p<0.01$ )，而加热温度对肌原纤维蛋白凝胶强度的影响无统计学意义( $p>0.05$ )。

表 2 响应面分析实验设计与结果

| 试验号 | A  | B  | C  | 凝胶强度/(g·cm <sup>-1</sup> ) | 试验号 | A  | B  | C  | 凝胶强度/(g·cm <sup>-1</sup> ) |
|-----|----|----|----|----------------------------|-----|----|----|----|----------------------------|
| 1   | 0  | −1 | 1  | 99.23                      | 10  | −1 | 0  | 1  | 92.58                      |
| 2   | 1  | 0  | 1  | 97.42                      | 11  | 0  | 0  | 0  | 107.47                     |
| 3   | 0  | 1  | −1 | 95.40                      | 12  | 0  | 0  | 0  | 106.82                     |
| 4   | 1  | 0  | −1 | 93.15                      | 13  | 0  | 0  | 0  | 107.19                     |
| 5   | 0  | 1  | 1  | 97.11                      | 14  | −1 | −1 | 0  | 88.09                      |
| 6   | 1  | −1 | 0  | 95.33                      | 15  | 1  | 1  | 0  | 93.28                      |
| 7   | 0  | 0  | 0  | 106.93                     | 16  | 0  | −1 | −1 | 94.23                      |
| 8   | −1 | 0  | −1 | 89.82                      | 17  | −1 | 1  | 0  | 90.28                      |
| 9   | 0  | 0  | 0  | 106.87                     |     |    |    |    |                            |

注：A 为脱乙酰基 KGM 添加量(%)，B 为加热温度(℃)，C 为 NaCl 浓度(mol/L)。

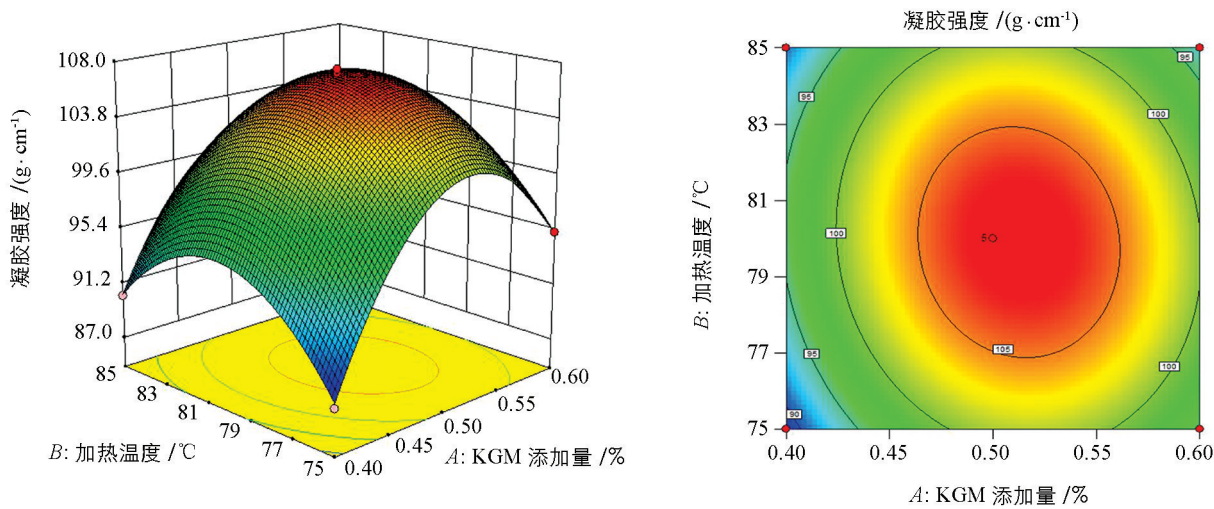
表 3 回归方程的方差分析表

| 来源             | 平方和    | 自由度 | 均方     | F 值      | p 值       | 显著性 |
|----------------|--------|-----|--------|----------|-----------|-----|
| 模型             | 738.63 | 9   | 82.07  | 578.43   | < 0.000 1 | * * |
| A              | 42.38  | 1   | 42.38  | 298.70   | < 0.000 1 | * * |
| B              | 0.08   | 1   | 0.08   | 0.58     | 0.470 3   |     |
| C              | 23.60  | 1   | 23.60  | 166.32   | < 0.000 1 | * * |
| AB             | 4.50   | 1   | 4.50   | 31.72    | 0.000 8   | * * |
| AC             | 0.57   | 1   | 0.57   | 4.02     | 0.085 1   |     |
| BC             | 2.71   | 1   | 2.71   | 19.07    | 0.003 3   | * * |
| A <sup>2</sup> | 362.61 | 1   | 362.61 | 2 555.72 | < 0.000 1 | * * |
| B <sup>2</sup> | 153.10 | 1   | 153.10 | 1 079.09 | < 0.000 1 | * * |
| C <sup>2</sup> | 86.53  | 1   | 86.53  | 609.89   | <0.000 1  | * * |
| 残差             | 0.99   | 7   | 0.14   |          |           |     |
| 失拟项            | 0.70   | 3   | 0.23   | 3.15     | 0.148 5   |     |
| 纯误差            | 0.30   | 4   | 0.07   |          |           |     |
| 总误差            | 739.62 | 16  |        |          |           |     |

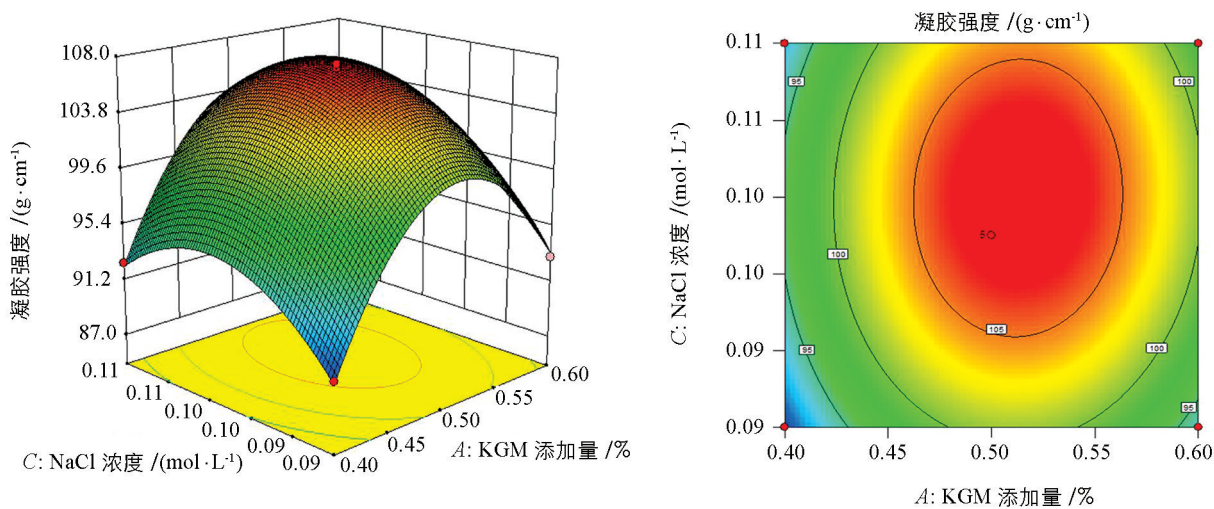
注：\* \* 表示  $p<0.01$ ，\* 表示  $p<0.05$ ，差异有统计学意义。

根据多元回归分析结果作相应的响应曲面图(图 4)，脱乙酰基 KGM 添加量与加热温度间交互作用，NaCl 浓度与加热温度间交互作用对凝胶强度的影响有统计学意义；而脱乙酰基 KGM 添加量和 NaCl 浓度间交互作用对凝胶强度的影响无统计学意义，这与表 3 的方差分析结果相一致。

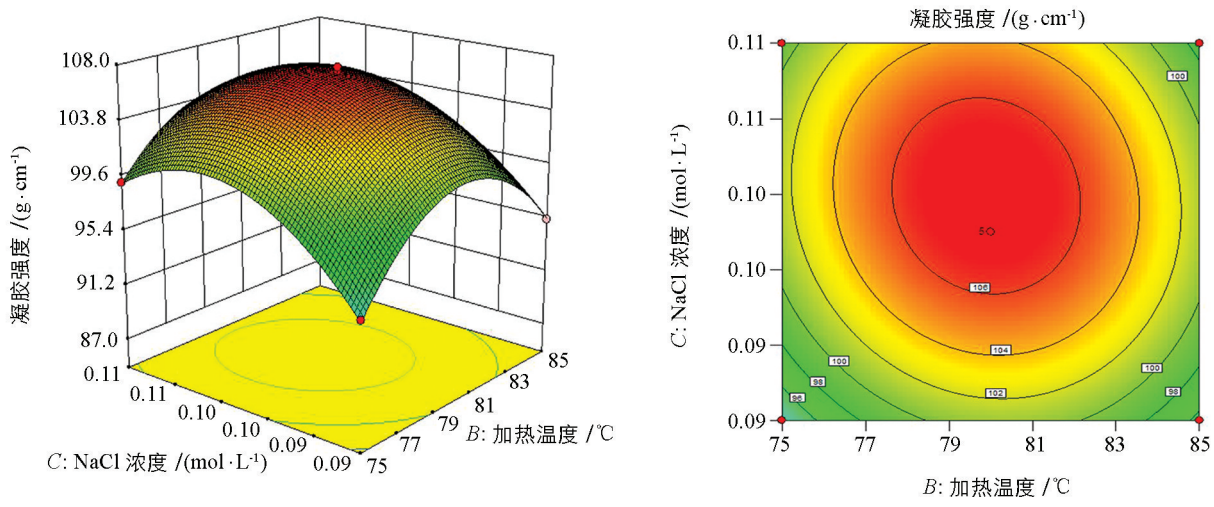
由 Design-Expert 软件对模型的各因素进行回归优化，得出改善鳙鱼肌原纤维蛋白凝胶强度的最佳条件：脱乙酰基 KGM 添加量 0.52%，加热温度 79.5℃，NaCl 浓度 0.10 mol/L。在此条件下，鳙鱼肌原纤维蛋白凝胶强度的预测值可达到 107.96 g/cm。



(a) 脱乙酰基 KGM 添加量与加热温度



(b) 脱乙酰基 KGM 添加量与 NaCl 浓度



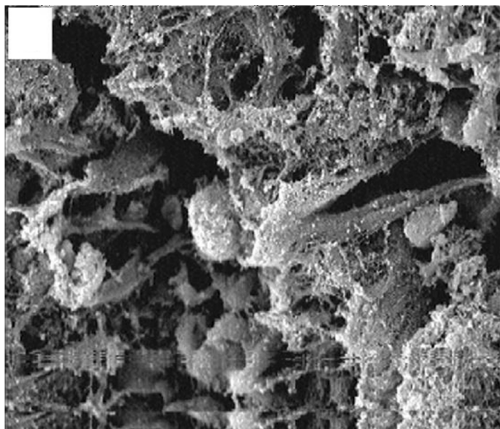
(c) 加热温度与 NaCl 浓度

图 4 各因素交互作用对鳙鱼肌原纤维蛋白热诱导凝胶强度的影响

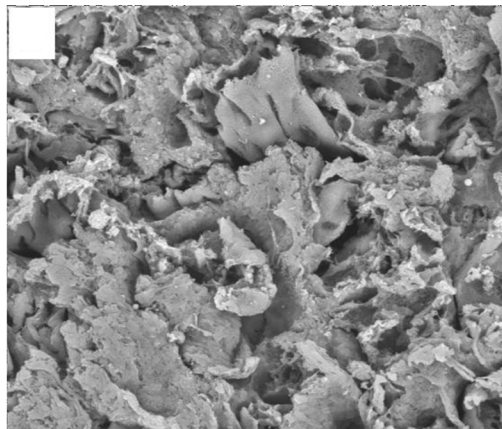
为检验 RSM 法的可靠性,采用上述优化条件进行鳙鱼肌原纤维蛋白凝胶热诱导凝胶强度的验证.结果 3 次平行试验测得的鳙鱼肌原纤维蛋白热诱导凝胶强度的平均值为 107.35 g/cm,与理论预测值相比相对误差在 1.0% 内.因此,采用 RSM 法优化得到的工艺条件准确可靠,具有实用价值.

### 2.5 鳙鱼肌原纤维蛋白热诱导凝胶微观结构分析

从图 5 的电镜扫描图像可以看出,未添加脱乙酰基 KGM 的肌原纤维蛋白热诱导凝胶的结构比较松散,空洞大而多,而添加 0.52% KGM 的肌原纤维蛋白热诱导凝胶结构更加紧致,空洞较少且小.凝胶的性质与其微观结构密切相关<sup>[24]</sup>.适当添加脱乙酰基 KGM 于肌原纤维蛋白体系中,KGM 部分能与肌原纤维蛋白之间部分形成相互交联作用<sup>[17, 23, 25]</sup>,另一部分以填充的形式包含于肌原纤维蛋白交联而形成的三维网状结构中,从而增加复合凝胶网络结构的致密性,提高其凝胶强度<sup>[16, 26]</sup>.同时,紧致凝胶微观结构能够更容易截留水分,提高其持水性<sup>[27]</sup>.因此,在其他相同的条件下,添加 0.52% KGM 的肌原纤维蛋白热诱导凝胶样品具有较高的凝胶强度和持水性,这与上述结果相一致.



(a) 未加 KGM 样品



(b) 添加 KGM 样品

图 5 脱乙酰基 KGM 对鳙鱼肌原纤维蛋白热诱导凝胶微观结构的影响

## 3 结 论

脱乙酰基 KGM 添加量、加热温度和 NaCl 浓度等对鳙鱼肌原纤维蛋白凝胶特性有影响,最优的制备条件:脱乙酰基 KGM 添加量 0.52%,加热温度 79.5℃,NaCl 浓度 0.10 mol/L;在此条件下混合凝胶强度可达 107.35 g/cm,与预测值相对误差在 1.0% 内.且 SEM 观察优化前后的鳙鱼肌原纤维蛋白凝胶发现,添加脱乙酰基 KGM 的肌原纤维蛋白热凝胶结构更加致密,空洞小而少,进而提高复合肌原纤维蛋白凝胶的性质.

### 参考文献:

- [1] FAN M, HU T, ZHAO S, et al. Gel Characteristics and Microstructure of Fish Myofibrillar Protein/Cassava Starch Composites [J]. Food Chemistry, 2017, 218: 221—230.
- [2] 杨 振,孔保华,夏秀芳,等.魔芋粉对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响 [J]. 食品科学, 2012, 33(11): 116—120.
- [3] 娄忠伟.鳙鱼中转谷氨酰胺酶性质的研究及其对鱼糜凝胶化的影响 [D]. 杭州:浙江工商大学, 2015.
- [4] 贾 丹,刘 茹,刘明菲,等.转谷氨酰胺酶对鳙鱼糜热诱导凝胶特性的影响 [J]. 食品科学, 2013, 34(9): 37—41.
- [5] ZHANG C, CHEN J D, YANG F Q. Konjac Glucomannan, a Promising Polysaccharide for OCDDS [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 104: 175—181.

- [6] 林 好, 赖明耀, 汪秀妹, 等. 魔芋葡甘聚糖-明胶复配维生素微胶囊的研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 164—170.
- [7] 宋儒坤. 脱乙酰进程对魔芋葡甘聚糖单相变及多相变耦合中组装行为的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [8] ZHOU Y, ZHAO D, FOSTER T J, et al. Konjac Glucomannan-Induced Changes in Thiol/Disulphide Exchange and Gluten Conformation Upon Dough Mixing [J]. Food Chemistry, 2014, 143: 163—169.
- [9] LI J, WANG Y, JIN W, et al. Application of Micronized Konjac Gel for Fat Analogue in Mayonnaise [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 375—382.
- [10] DA SILVA D F, DE SOUZA F S B, BRUSCHI M L, et al. Effect of Commercial Konjac Glucomannan and Konjac Flours on Textural, Rheological and Microstructural Properties of Low Fat Processed Cheese [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 308—316.
- [11] HO H V T, JOVANOVSKI E, ZURBAU A, et al. A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials of the Effect of Konjac Glucomannan, a Viscous Soluble Fiber, on LDL Cholesterol and the New Lipid Targets Non-HDL Cholesterol and Apolipoprotein B [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2017, 105(5): 1239—1247.
- [12] ZHANG T, XUE Y, LI Z, et al. Effects of Deacetylation of Konjac Glucomannan on Alaska Pollock Surimi Gels Subjected to High-Temperature (120 °C) Treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 125—131.
- [13] KOBAYASHI Y, MAYER S G, PARK J W. FT-IR and Raman Spectroscopies Determine Structural Changes of Tilapia Fish Protein Isolate and Surimi Under Different Comminution Conditions [J]. Food Chemistry, 2017, 226: 156—164.
- [14] YIN T, PARK J W. Effects of Nano-Scaled Fish Bone on the Gelation Properties of Alaska Pollock Surimi [J]. Food Chemistry, 2014, 150: 463—468.
- [15] 纪 蓉, 江 海, 胡亚芹, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对带鱼鱼糜凝胶特性的影响 [J]. 中国食品学报, 2012, 12(4): 90—99.
- [16] ZHANG T, LI Z, WANG Y, et al. Effects of Konjac Glucomannan on Heat-Induced Changes of Physicochemical and Structural Properties of Surimi Gels [J]. Food Research International, 2016, 83: 152—161.
- [17] LIU J, WANG X, DING Y. Optimization of Adding Konjac Glucomannan to Improve Gel Properties of Low-Quality Surimi [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(1): 484—489.
- [18] HU H, PEREIRA J, XING L, et al. Thermal Gelation and Microstructural Properties of Myofibrillar Protein Gel with the Incorporation of Regenerated Cellulose [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 14—19.
- [19] 盖 静. 不同加热温度对鲮鱼肌球蛋白聚集行为的影响及其机理研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [20] HAN M, WANG P, XU X, et al. Low-Field NMR Study of Heat-Induced Gelation of Pork Myofibrillar Proteins and Its Relationship with Microstructural Characteristics [J]. Food Research International, 2014, 62: 1175—1182.
- [21] FENG M, PAN L, YANG X, et al. Thermal Gelling Properties and Mechanism of Porcine Myofibrillar Protein Containing Flaxseed Gum at Different NaCl Concentrations [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 361—367.
- [22] 夏军军, 李洪军, 贺稚非, 等. 不同腌制方式对牛肉品质特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 12—19.
- [23] XIONG G, CHENG W, YE L, et al. Effects of Konjac Glucomannan on Physicochemical Properties of Myofibrillar Protein and Surimi Gels from Grass Carp (Ctenopharyngodon Idella) [J]. Food Chemistry, 2009, 116(2): 413—418.
- [24] SUN X D, HOLLEY R A. Factors Influencing Gel Formation by Myofibrillar Proteins in Muscle Foods [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(1): 33—51.
- [25] 贾丽娜. 魔芋葡甘聚糖和脂肪影响罗非鱼肌原纤维蛋白凝胶性能的研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [26] 王良玉, 何明祥, 庞 杰, 等. 魔芋葡甘聚糖凝胶体系对带鱼鱼糜流变及质构特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 88—94.

- [27] RAMÍREZ J A, URESTI R M, VELAZQUEZ G, et al. Food Hydrocolloids as Additives to Improve the Mechanical and Functional Properties of Fish Products: A Review [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(8): 1842—1852.

## Effect of Deacetylated KGM on Heat-Induced Gel Properties of Bighead Carp (*Aristichthys nobilis*) Myofibrillar Protein

HE Ming-xiang<sup>1,2,3</sup>

1. Fuzhou Industrial Products Production License Review Technology Center, Fuzhou 350003, China;

2. Fuzhou Food and Drugs Evaluation Center, Fuzhou 350003, China;

3. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

**Abstract:** To improve the gel properties of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) myofibrillar protein, deacetylated konjac glucomannan (KGM) was added to the myofibrillar protein system as the gel modifier. The influencing factors for the gel properties of bighead carp myofibrillar protein were investigated. Deacetylated konjac glucomannan content, heating temperature and NaCl concentration served as the independent variables and gel strength as the response. Optimization of formulation variables was realized, using the response surface methodology. The results showed that the optimum conditions for preparing the myofibrillar protein gel were as follows: deacetylation konjac glucomannan content 0.52%, heating temperature 79.5 °C and NaCl concentration 0.10 mol/L. Under these conditions, the gel strength of myofibrillar protein gels was experimentally 107.35 g/cm. Examination with scanning electron microscopy indicated that the addition of deacetylated KGM made the microstructures of the myofibrillar protein more compact, compared to the pure myofibrillar protein gel, which improved the properties of the composite myofibrillar protein gel.

**Key words:** bighead carp myofibrillar protein, deacetylated konjac glucomannan, gel strength, response surface optimization

责任编辑 周仁惠

