

# 氯化钠对鲢鱼糜体系 3D 打印性能 及凝胶特性的影响

## Effect of sodium chloride on 3D printing performance and gel properties of silver carp surimi system

张志超<sup>1,2</sup> 陈旭<sup>2</sup> 汪少芸<sup>2</sup> 蔡茜茜<sup>1,2</sup>

ZHANG Zhichao<sup>1,2</sup> CHEN Xu<sup>2</sup> WANG Shaoyun<sup>2</sup> CAI Xiqi<sup>1,2</sup>

(1. 福州海洋研究院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学生物科学与工程学院, 福建 福州 350108)

(1. Fuzhou Institute of Oceanography, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**摘要:**目的:提高鲢鱼糜体系 3D 打印性能及凝胶特性。方法:通过优化 3D 打印参数,将 3D 打印过程与材料流变性质及 3D 打印性能关联起来。探究氯化钠添加量对鲢鱼糜的流变性能、3D 打印性能、凝胶强度、水分特性以及微观结构的影响。结果:氯化钠的加入以剂量依赖的方式降低了鲢鱼糜的耗散模量,但能显著提高材料的剪切恢复性能,还可以降低鱼糜体系的蒸煮损失,提高鱼糜体系的持水性。当氯化钠添加量为 2.5% 时,鲢鱼糜具有最佳凝胶强度和最为致密的微观结构。结论:添加适量氯化钠可提高鱼糜产品的 3D 打印性能和凝胶特性。

**关键词:**鱼糜;流变;氯化钠;3D 打印;凝胶

**Abstract:** Objective: Improve 3D printing performance and gel properties of silver carp surimi system. Methods: By optimizing 3D printing parameters, the 3D printing process is associated with material rheological properties and 3D printing performance. The effects of sodium chloride addition on rheological properties, 3D printing properties, gel strength, moisture properties and microstructure of silver carp surimi were investigated. Results: The addition of sodium chloride decreased the loss modulus of surimi in a dose-dependent manner, but significantly improved the shear recovery performance, reduced the cooking loss of surimi system and increased the water retention of surimi system. The best gel strength and the densest microstructure of silver carp were obtained when the sodium chloride content was 2.5%.

**Conclusion:** Adding proper amount of sodium chloride can improve the 3D printing performance and gel properties of surimi products.

**Keywords:** surimi; rheology; sodium chloride; 3D printing; gel

增材制造(AM),通常被称为 3D 打印,与传统制造方法相比,其生产周期更短。此外,它可以通过使用有限质量的材料来增强机械性能,从而生成各种复杂的形状<sup>[1-2]</sup>。3D 打印可以设计出具有理想纹理、味道、形状和大小的分层定制食品,以满足老年人、吞咽困难患者、儿童、孕妇和运动员等特殊消费群体的营养需求<sup>[3-6]</sup>。3D 打印能够在预先设计的文件中创建一层一层的模式来制造产品<sup>[7]</sup>。

目前,用于 3D 打印的食品油墨的研究主要集中在巧克力、面团、土豆泥和肉制品中,这些胶体具有适当的流动特性,从喷嘴中能够顺利挤出,挤出后的产品自支撑性能也较好<sup>[5,8-10]</sup>。鱼糜是一种黏性食品凝胶系统,可以用于开发各种 3D 结构的可食用油墨<sup>[5,11]</sup>。目前,存在超范围、超标准过度使用食品添加剂的问题,消费者对于食品添加剂的过度使用较为排斥<sup>[12]</sup>。鱼糜制品若能形成较好的凝胶并保持特有风味,就需添加一定量的氯化钠。而人体摄入过多的氯化钠,容易引起高血压、高血糖、血管类疾病等病症<sup>[13-15]</sup>。

研究拟分析打印参数如喷嘴孔径、打印温度、打印速率对鱼糜体系 3D 打印性能的影响,优化出适宜的打印参数,考察氯化钠添加量对鱼糜体系 3D 打印性能及凝胶特性的影响,并以流变特性、3D 打印成型效果、蒸煮损失、持水性、质构特性、微观结构进行评估,优化出最佳氯化钠添加量,使得鱼糜具有较好 3D 打印性能的同时又能保持较好的凝胶特性,以期个性化制造鱼糜制品奠定理论基础。

**基金项目:**福州海洋研究院科技项目(编号:2021F03);宁波市科技计划项目(编号:2023Z122)

**作者简介:**张志超,男,福州大学在读硕士研究生。

**通信作者:**蔡茜茜(1989—),女,福州大学副研究员,博士。

E-mail: caixx@fzu.edu.cn

**收稿日期:**2024-02-11 **改回日期:**2024-03-24

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

白鲢鱼糜:安井食品集团股份有限公司;

试验所用试剂均为国产分析纯;

水浴恒温震荡摇床:YC-S30 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

胶体磨:JM-L80 型,温州佐佳机械科技有限公司;

调频式分散机:Q SJ-III 型,天津永利达材料试验机有限公司;

食品 3D 打印机:FOODBOT-D1 型,杭州时印科技有限公司;

流变仪:MCR302 型,奥地利安东帕股份有限公司;

落地高速离心机:LYNX600 型,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;

质构仪:TA.XT PLUS 型,英国 SMS 公司;

场发射扫描电子显微镜:Nova NanoSEM 230 型,美国 FEI CZECH REPUBLIC 公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 鱼糜 3D 打印油墨制备 将鱼糜流水解冻,采用胶体研磨两次,期间防止研磨过程中发热,加入碎冰降温。每次研磨 20 min。10 000×g 离心 10 min。离心后鱼糜水分含量为 81%左右。添加氯化钠,加水控制体系水分含量为 83%,用分散机分散两次,每次分散 2 min。

1.2.2 打印模型建立 用注射挤压式 3D 打印机打印鱼糜的一维和三维结构。一维结构用于评估样品 3D 打印连续性,三维结构用于评估样品 3D 打印稳定性。用 CAD 软件建立矩形模型一维(30 mm×30 mm),空心矩形三维(30 mm×30 mm×30 mm),输出 STL 文件。用 Repestrer-host 软件对 STL 文件进行识别和切片(模型底层厚度 1.0 mm,层高 0.8 mm,填充密度 70%)。将切片代码输出到 3D 打印机进行识别。3D 打印参数:喷嘴直径 1.0 mm、打印温度 25℃、打印速度 30.0 mm/s。

1.2.3 打印参数优化 在鱼糜复合材料基础上,考察打印参数即喷嘴孔径(0.8,1.0,1.5 mm)、打印温度(25,30,35℃)、打印速率(15,30,45 mm/s)对产品 3D 打印成型效果的影响。

1.2.4 流变测试 参照 Liu 等<sup>[16]</sup>的方法略作修改。使用流变仪表征鱼糜复合材料的流变行为,平板测量模式(直径 25.0 mm,板间距 1.0 mm)。仪器测试温度 25℃,样品平衡 1 min。剪切恢复测试,测试温度为 25℃,前阶段低速剪切阶段速率为 1 s<sup>-1</sup>,高速剪切阶段速率为 10 s<sup>-1</sup>,后阶段低速剪切阶段速率为 1 s<sup>-1</sup>。频率扫描范围 1.0~100.0 Hz,应变恒定为 1×10<sup>-2</sup>(线性黏弹区范围内)。

1.2.5 3D 打印性能测定 建立需要打印的一维 30 mm×30 mm 正方形线条、30 mm×30 mm×30 mm 三维空心矩形模型。用 Repetier-Host 软件进行软件切片,模型底层厚

度设定为 1.0 mm、层厚为 0.8 mm、壁厚为打印喷头孔径的 3 倍、填充密度为 70%,将填充有鱼糜复合材料的料管装入打印机中进行打印,打印温度为 25℃,室温为 25℃。将样品放入模具中制备成凝胶,即在 40℃条件下煮制 1 h,随后立即在 90℃条件下煮制 30 min,煮制完成后迅速将样品放入冰水混合物中 30 min。凝胶样品制备好后于 4℃贮藏备用。

### 1.2.6 蒸煮损失与持水性测定

(1) 蒸煮损失:参照文献<sup>[17]</sup>。按式(1)计算蒸煮损失。

$$Z = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Z——蒸煮损失,%;

m<sub>1</sub>——凝胶煮前质量,g;

m<sub>2</sub>——凝胶煮后质量,g。

(2) 持水性:参照文献<sup>[18]</sup>。按式(2)计算持水性。

$$C = m_4 / m_3 \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

C——持水性,%;

m<sub>3</sub>——凝胶初始质量,g;

m<sub>4</sub>——凝胶最终质量,g。

1.2.7 凝胶强度测定 参照 Duangmal 等<sup>[19]</sup>的方法略修改。取出凝胶样品,室温下切成 1.0 cm 高度的圆柱体,使用直径 5 mm 球形探头(P/5S)在质构仪上测定其凝胶特性,包括破断力和凹陷深度。

1.2.8 凝胶微观结构测定 采用扫描电子显微镜观察样品的微观结构<sup>[20]</sup>,将样品切至条形,随后用液氮速冻 30 min,速冻后将样品放入扎有小孔的 PE 管中,真空冷冻干燥 12 h。掰断样品,通过扫描电镜放大 5 000 倍观察断面。

### 1.3 数据处理

试验结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 22.0、ImageJ 1.8.0 和 Origin 8.5 软件用于后续数据分析、照片、图表以及线性拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 鲢鱼糜体系 3D 打印参数优化

2.1.1 喷嘴孔径 喷嘴直径直接决定着印刷品的精度和表面粗糙度<sup>[21]</sup>。较小喷嘴直径有利于提高产品精度,打印时间较长,易堵塞喷嘴;喷嘴直径较大则出料越顺畅,挤出线条较粗,样品精度较差<sup>[22]</sup>。由图 1 可知,0.8 mm 的喷嘴孔径一维打印效果较佳,但三维模型打印出现内测弯曲现象;1.0 mm 的喷嘴孔径一维和三维打印效果均较好;1.5 mm 的喷嘴孔径打印结果较差,一维样品均出现断裂现象,说明喷嘴孔径过大,打印过程连续性差,三维样品出现裂痕现象。喷嘴孔径过小,打印时间过长,从而容易导致样品弯曲现象。而喷嘴孔径过大,则不利于打印连续性。

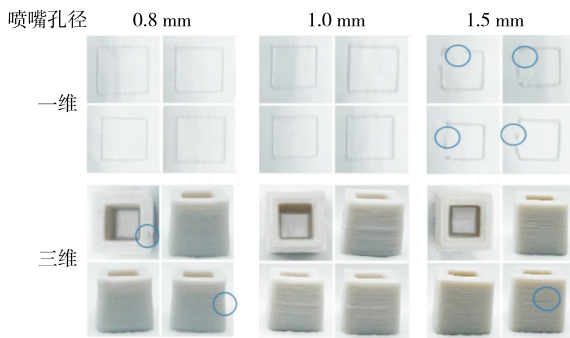


图1 喷嘴孔径对鱼糜材料打印成型的影响

Figure 1 Impact of nozzle aperture on printing molding of fish and chemicals

2.1.2 打印温度 由图 2 可知,最优的鱼糜体系材料打印温度为 25 °C。随着打印温度的升高,鱼糜蛋白交联过度,不利于挤出,影响材料连续性,此时鱼糜凝胶的表现黏度也降低。这可能是鱼糜凝胶中蛋白分子链热运动加强,使得鱼糜凝胶中蛋白双螺旋结构伸展。当打印温度为 30~35 °C 时,鱼糜凝胶劣化,不利于成型<sup>[23]</sup>,从而导致表面光滑度下降。当打印温度为 30 °C 时,一维样品出现 3 处断裂现象,而三维样品表面出现粗糙现象。当打印温度为 35 °C 时,一维样品均出现断裂现象,而三维样品则不能完整打印出来。说明打印温度过高,不利于鱼糜体系的 3D 打印。

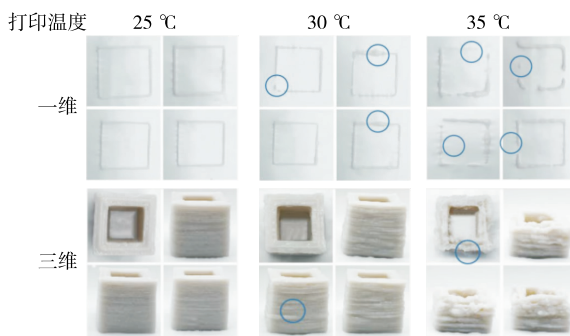


图2 打印温度对鱼糜材料打印成型的影响

Figure 2 Effect of printing temperature on surimi material printing

2.1.3 打印速率 由图 3 可知,当打印速率为 15 mm/s 时,一维样品出现两处断裂现象,而三维样品表面出现粗糙现象,同时由于打印速率过慢,打印时间也相应增长。当打印速率为 30 mm/s 时,一维和三维打印样品效果均较好。当打印速率为 45 mm/s 时,一维打印样品未出现断裂现象,表现出较好的连续性,而三维打印样品则出现下宽上窄的情况。这可能是打印速率过快导致打印过程中堆积不稳。因此,打印速率过慢或过快均不利于样品打样成型<sup>[21]</sup>。

## 2.2 氯化钠添加量对鲢鱼糜体系流变特性的影响

3D 打印产品的打印精度和稳定性与流变性有关<sup>[24]</sup>。

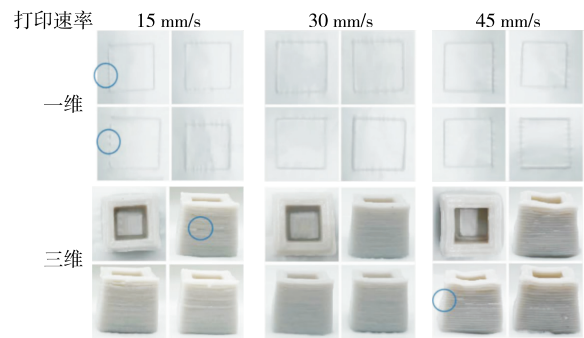


图3 打印速率对鱼糜材料打印成型的影响

Figure 3 Effect of printing rate on surimi material printing

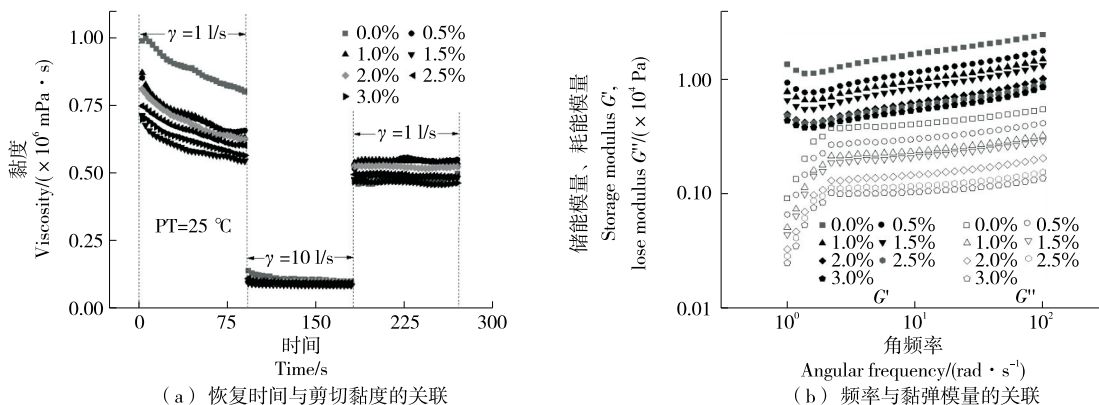
由图 4(a) 可知,鱼糜样品在高速剪切过程中,黏度迅速降低,在剪切力消失的情况下又会迅速上升<sup>[25]</sup>。样品挤出后黏度过低不利于每一层的黏合,从而影响样品成型效果<sup>[26]</sup>。随着氯化钠添加量的增加,剪切恢复率呈先上升后下降趋势。当氯化钠添加量为 1.5% 时,样品剪切恢复率达最大,为 81.89% (表 1)。较强的剪切恢复能力有利于样品的 3D 打印成型效果<sup>[24]</sup>,测试组剪切恢复率均高于对照组,说明添加氯化钠有利于提高鱼糜体系恢复性能。

由图 4(b) 可知,储能模量 ( $G'$ ) 和耗散模量 ( $G''$ ) 均呈下降趋势,这有利于油墨从喷嘴中挤出<sup>[11]</sup>。不同氯化钠添加量下,样品的  $G' > G''$ ,表现出一定的固态属性,这有利于样品打印成型后稳定。弱凝胶模型 ( $G^* = A_f \cdot \omega^{1/\xi}$ ) 被用于拟合分析<sup>[27]</sup>。样品的  $G'$  和  $G''$  具有平行的生长趋势,且在整个频率范围内,  $G'$  远大于  $G''$ ,表明所有样品都具有类固体行为,可用弱凝胶模型进行分析<sup>[28]</sup>。由表 2 可知,  $A_f$  随着氯化钠添加量的增加呈下降趋势,当氯化钠添加量为 3.0% 时,  $A_f$  最小。  $\xi$  值随着氯化钠添加量的增加略有降低。当氯化钠添加量为 0% 时,鱼糜的  $A_f$  最大,可能是因为鱼糜与纤维膜、细胞颗粒、脂肪和结缔组织颗粒混合,形成了一种“伪胶体”系统,其作用与真正胶体系统的分子聚集物相同。分子聚集物增加了蛋白质-蛋白质相互作用和粒子间相互作用,而氯化钠的加入则可能会破坏这种作用<sup>[27,29]</sup>。

## 2.3 氯化钠添加量对鲢鱼糜体系 3D 打印性能的影响

由图 5 可知,一维样品打印过程中,氯化钠添加量为 0% 时,样品具有较好的连续性,而氯化钠添加量为 0.5%~3.0% 时,随着氯化钠添加量的增加,断裂处减少。其中,氯化钠添加量为 0%, 2.5%, 3.0% 时具有较好的连续性。

三维样品打印过程中,氯化钠添加量为 0% 时,样品不能打印完整,当氯化钠添加量为 0.5%~2.0% 时,样品表面的粗糙程度逐渐变为光滑平整,但氯化钠添加量为 2.0% 的样品上宽下窄。氯化钠添加量为 2.5% 的样品表



(a) 恢复时间与剪切黏度的关联

(b) 频率与黏弹模量的关联

图 4 氯化钠添加量对鱼糜材料流变学性能的影响

Figure 4 Effects of different sodium chloride additions on rheological properties of surimi materials

表 1 不同氯化钠添加量下鱼糜复合凝胶材料的弱凝胶模型参数和剪切恢复率<sup>†</sup>

Table 1 Weak gel model parameters and shear recovery rate of surimi composite gel materials under different sodium chloride addition levels

氯化钠添加量/%	弱凝胶参数			恢复率/%
	$A_f / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$z$	$R^2$	
0.0	11 376.00 ± 12.72 <sup>a</sup>	6.08 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.973 9	53.56 ± 3.14 <sup>c</sup>
0.5	7 762.95 ± 22.98 <sup>b</sup>	5.70 ± 0.03 <sup>cd</sup>	0.971 6	76.43 ± 1.21 <sup>b</sup>
1.0	6 591.25 ± 98.64 <sup>c</sup>	5.84 ± 0.05 <sup>bc</sup>	0.976 2	76.51 ± 0.22 <sup>b</sup>
1.5	5 553.60 ± 142.13 <sup>d</sup>	5.48 ± 0.13 <sup>d</sup>	0.977 9	81.89 ± 0.39 <sup>a</sup>
2.0	4 191.25 ± 118.58 <sup>e</sup>	5.54 ± 0.06 <sup>d</sup>	0.976 4	75.93 ± 0.58 <sup>b</sup>
2.5	4 117.10 ± 43.13 <sup>e</sup>	6.24 ± 0.17 <sup>a</sup>	0.973 9	74.94 ± 2.42 <sup>b</sup>
3.0	3 756.85 ± 83.79 <sup>f</sup>	6.19 ± 0.17 <sup>a</sup>	0.973 4	74.83 ± 0.13 <sup>b</sup>

<sup>†</sup> 字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )； $A_f$  为分子间相互作用的强度； $z$  为分子间相互作用的数量。

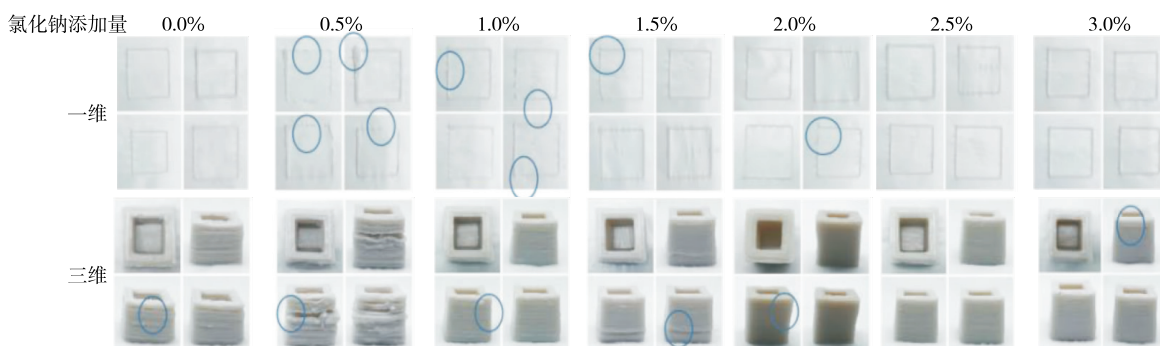


图 5 氯化钠添加量对鱼糜复合材料打印成型性能的影响

Figure 5 Effect of sodium chloride addition on the printing and molding properties of surimi composites

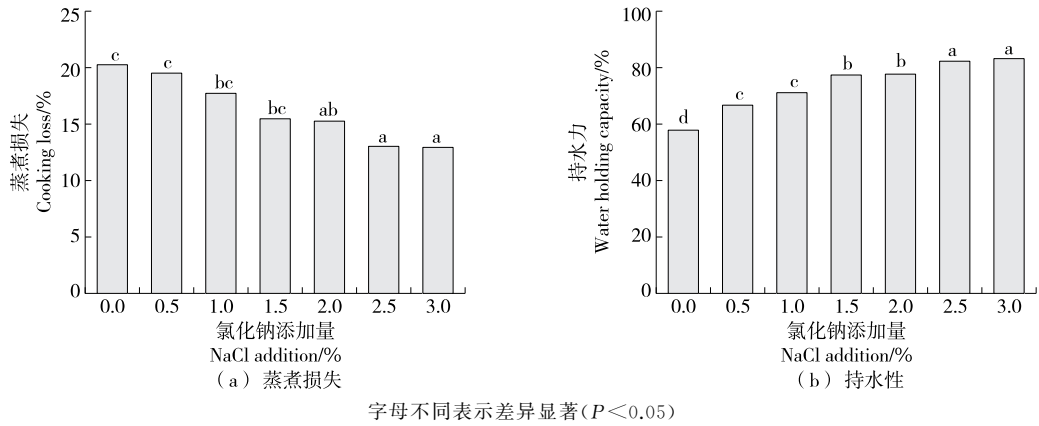
面平整光滑，而氯化钠添加量为 3.0% 的样品表面出现裂痕。因此，从一维连续性和三维稳定性来看，氯化钠添加量为 2.5% 的鱼糜样品表现出最佳的 3D 打印性能。

2.4 氯化钠添加量对鲢鱼糜凝胶蒸煮损失与持水性的影响

由图 6(a) 可知，随着氯化钠添加量的增加，鱼糜材料蒸煮损失呈下降趋势。蒸煮损失常用于评价肉制品在蒸

煮过程中水分、蛋白质等物质的损失<sup>[30]</sup>。蒸煮损失越小，越有利于样品营养成分的保留。未添加氯化钠的鱼糜材料蒸煮损失为 20.22%，氯化钠添加量为 2.5% 和 3.0% 的鱼糜组蒸煮损失无显著性差异，分别为 12.99% 和 12.86%，与对照组相比，蒸煮损失分别降低了 35.76% 和 36.40%。

由图 6(b) 可知，随着 NaCl 添加量的增加，鱼糜凝胶的持水性显著增加 ( $P < 0.05$ )，表明鱼糜凝胶内部三维网



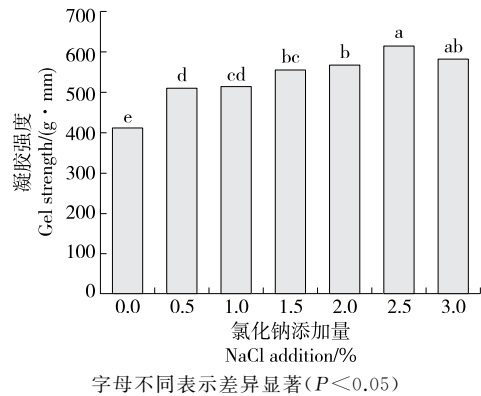
字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )

图 6 氯化钠添加量对鱼糜凝胶蒸煮损失与持水性的影响  
Figure 6 Effects of different sodium chloride addition levels on gel cooking loss and water holding capacity of surimi

络的持水能力增强。这与氯离子和肌原纤维蛋白结合并提高鱼糜肌原纤维蛋白间的静电斥力的结论一致,从而增加了蛋白质对水的亲和力。因此,随着氯化钠添加量的增加,鱼糜凝胶持水性增强<sup>[11]</sup>。氯化钠添加量为 2.5%,3.0%组,样品的持水性分别为 82.31%,82.87%,较对照组分别提高了 42.85%,43.82%。

### 2.5 氯化钠添加量对鲢鱼糜凝胶强度的影响

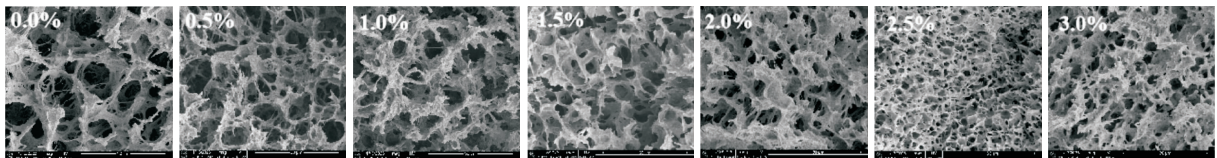
通常,较好品质的糜类产品具有较高的凝胶强度<sup>[31]</sup>。由图 7 可知,添加氯化钠可以提高鱼糜的凝胶强度。当氯化钠添加量为 0%~2.5%时,凝胶强度随氯化钠添加量的增加而增大;当氯化钠添加量为 2.5%~3.0%时,凝胶强度略微下降,但无显著性差异。对照组凝胶强度为 410.82 g·mm,氯化钠添加量为 2.5%的鱼糜凝胶表现出最强凝胶强度,为 613.29 g·mm,上升了 49.26%,说明添加适量的氯化钠可以显著增加鱼糜凝胶的凝胶强度<sup>[4]</sup>,主要是因为添加氯化钠可以促进肌原纤维蛋白膨胀、蛋白质分子之间的相互作用<sup>[32]</sup>。



字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )  
图 7 氯化钠添加量对鱼糜凝胶强度的影响  
Figure 7 Effect of different sodium chloride dosages on gel strength of surimi gel

### 2.6 氯化钠添加量对鲢鱼糜凝胶微观结构的影响

由图 8 可知,当氯化钠添加量为 0%~2.5%时,随着氯化钠添加量的增加,各样品微观结构由大孔洞逐渐收



字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )  
图 8 氯化钠添加量对鱼糜凝胶微观结构的影响  
Figure 8 Effect of sodium chloride addition on microstructure of surimi gel

缩致密,表面光滑平整。加入氯化钠后,鱼糜凝胶的显微结构更加聚集,与对照组相比更加规整有序,可能是由于氯化钠的添加使肌原纤维蛋白通过游离氨基酸与蛋白质的键合而交联,减少了空隙,一定程度上使聚合凝胶结构变成了细链凝胶网络<sup>[11]</sup>。与氯化钠添加量为 2.5%的鱼糜凝胶相比,氯化钠添加量为 3.0%的鱼糜凝胶空洞反而略有增大。

## 3 结论

以白鲢鱼糜为原料,优化出鱼糜体系最佳打印参数为喷嘴口径为 1.0 mm、打印速率为 30 mm/s、打印温度为 25 ℃。当氯化钠添加量为 2.5%时,鱼糜体系打印材料具备较好的 3D 打印性能,能够出色地打印出一维、三维样品,且此时的鱼糜样品具有较好的鱼糜凝胶特性。试验优化出的氯化钠最优添加量为 2.5%,相对较高,不

符合健康食品产业的低钠盐标准,后续可研究氯化钾、氯化钙部分替代对低钠盐鱼糜体系 3D 打印性能和凝胶特性的影响。

### 参考文献

- [1] FANG M X, XIONG S B, JIANG Y, et al. In vitro pepsin digestion characteristics of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels with different degrees of cross-linking induced by setting time and microbial transglutaminase[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(31): 8 413-8 430.
- [2] LIPTON J I, CUTLER M, NIGL F, et al. Additive manufacturing for the food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(1): 114-123.
- [3] FENG J Q, WANG J, ZHANG T, et al. Independent and combined effects of ultrasound and transglutaminase on the gel properties and in vitro digestion characteristics of bay scallop (*Argopecten irradians*) adductor muscle[J]. *Current Research in Food Science*, 2022, 5: 1 185-1 194.
- [4] 童强, 姜宇, 佟焱, 等. 食品 3D 打印中的食品材料特性与应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 1-5, 19.  
TONG Q, JIANG Y, TONG Y, et al. Research on the characteristics and application of food materials in food 3D printing[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(7): 1-5, 19.
- [5] DONG X P, PAN Y X, ZHAO W Y, et al. Impact of microbial transglutaminase on 3D printing quality of *Scomberomorus niphonius* surimi [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 124: 109123.
- [6] WANG W L, CHEN M S, WU J H, et al. Hypothermia protection effect of antifreeze peptides from pigskin collagen on freeze-dried *Streptococcus thermophilus* and its possible action mechanism[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 878-885.
- [7] MA F, CHEN C G, SUN G J, et al. Effects of high pressure and CaCl<sub>2</sub> on properties of salt-soluble meat protein gels containing locust bean gum [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 14: 31-37.
- [8] HAO L, MELLOR S, SEAMAN O, et al. Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2010, 5(2): 57-64.
- [9] QIU W J, CHEN X, TIAN Y Q, et al. Protection against oxidative stress and anti-aging effect in *Drosophila* of royal jelly-collagen peptide[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 135: 110881.
- [10] AZAM R S M, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Effect of different gums on features of 3D printed object based on vitamin-D enriched orange concentrate[J]. *Food Biophysics*, 2018, 13(3): 250-262.
- [11] LI L, CHEN X, WANG S. Quality protection and action mechanism of antifreeze peptide on frozen potato dough subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Food Science*, 2018, 39(10): 7-13.
- [12] 薛金侠. 关于《食品安全法》中食品添加剂滥用的法律规制研究[J]. *中国调味品*, 2018, 43(11): 191-195.
- XUE J X. Research on the legal regulation of the abuse of food additives in food safety law[J]. *Chinese Seasoning*, 2018, 43(11): 191-195.
- [13] WHELTON K P, HE J, CUTLER J A, et al. Effects of oral potassium on blood pressure. Meta-analysis of randomized controlled clinical trials [J]. *Journal of the American Medical Association*, 1997, 277(3): 1 624-1 632.
- [14] BORIHI L, SCHIANCHI T, MESCHI T, et al. Comparison of two diets for the prevention of recurrent stones in idiopathic hypercalciuria[J]. *Journal of the American Medical Association*, 1997, 277(3): 1 624-1 632.
- [15] HE F J, MARCINIAK M, VISAGIE E, et al. Effect of modest salt reduction on blood pressure, urinary albumin, and pulse wave velocity in white, black, and Asian mild hypertensives [J]. *Hypertension*, 2009, 54(3): 482-488.
- [16] LIU Z B, BHANDARI B, PRAKASH S, et al. Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 413-424.
- [17] CHAO C, HWANG J S, KIM I W, et al. Coaxial 3D printing of chicken surimi incorporated with mealworm protein isolate as texture-modified food for the elderly [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 333: 111151.
- [18] ZHANG L L, ZHANG F X, WANG X. Effects of hydrolyzed wheat gluten on the properties of high-temperature ( $\geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) treated surimi gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 45: 196-202.
- [19] DUANGMAL K, TALUENGPHOL A. Effect of protein additives, sodium ascorbate, and microbial transglutaminase on the texture and colour of red tilapia surimi gel [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2009, 45(1): 48-55.
- [20] YU W Y, WANG Z M, PAN Y X, et al. Effect of  $\kappa$ -carrageenan on quality improvement of 3D printed *Hypophthalmichthys molitrix*-sea cucumber compound surimi product[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112279.
- [21] YANG F L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 67-76.
- [22] WANG S Y, ZHAO J, CHEN L, et al. Preparation, isolation and hypothermia protection activity of antifreeze peptides from shark skin collagen[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 55(1): 210-217.
- [23] HE F J, MARCINIAK M, VISAGIE E, et al. Effect of modest salt reduction on blood pressure, urinary albumin, and pulse wave velocity in white, black, and asian mild hypertensives [J]. *Hypertension*, 2009, 54(3): 482-488.
- [24] SHI Y, TU L, YUAN C, et al. Regulatory mechanisms governing collagen peptides and their 3D printing application for frozen surimi[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(6): 2 692-2 706.

(下转第 46 页)

- 24(1): 189-196.
- YU W, GUI Y A, MAO X Q, et al. Evaluation of the calibration method on quantification of 78 pesticides in grape by gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24(1): 189-196.
- [12] SCHENCK F J, LEHOTAY S J. Does further clean-up reduce the matrix enhancement effect in gas chromatographic analysis of pesticide residues in food? [J]. Journal of Chromatography A, 2000, 868(1): 51-61.
- [13] TSUCHIYAMA T, KATSUHARA M, NAKAJIMA M. Compensation of matrix effects in gas chromatography-mass spectrometry analysis of pesticides using a combination of matrix matching and multiple isotopically labeled internal standards[J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1 524: 233-245.
- [14] 胡西洲, 彭西甜, 张仙, 等. QuEChERS-稀释标准添加校准法测定黄瓜中 19 种农药残留[J]. 分析试验室, 2022, 41(10): 1 174-1 179.
- HU X Z, PENG X T, ZHANG X, et al. Determination of 19 pesticide residues in cucumber by QuEChERS combined with dilution standard addition calibration method[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2022, 41(10): 1 174-1 179.
- [15] 刘素丽, 王宏伟, 赵梅, 等. 食品中基体标准物质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(1): 8-13.
- LIU S L, WANG H W, ZHAO M, et al. Research progress of matrix reference material for food[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(1): 8-13.
- [16] 郭玲玲, 徐慧, 匡华. 食品安全检测基体标准物质研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(7): 71-82.
- GUO L L, XU H, KUANG H. Research progress IN matrix reference material for food safety detection[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(7): 71-82.
- [17] 林涛, 李梦霞, 郭瑾, 等. 绿茶中毒死蜱和啉虫酰胺基体标准物质制备[J]. 化学分析计量, 2022, 31(9): 1-5.
- LIN T, LI M X, GUO J, et al. Preparation of matrix standard material of chlorpyrifos and tolfenpyrad in green tea[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2022, 31(9): 1-5.
- [18] 马维, 刘树兴, 陈琦, 等. 茶叶中啉虫脒残留基体标准样品的制备及测定[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 182-186.
- MA W, LIU S X, CHEN Q, et al. Preparation and characterization of matrix reference material for the determination of acetamidiprid residues in tea[J]. Food Science, 2016, 37(2): 182-186.
- [19] 余星, 常薇, 王咏麟, 等. 液相色谱-柱后衍生法测定苹果中 5 种氨基甲酸酯类农药残留量的不确定性评定[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 72-76.
- YU X, CHANG W, WANG Y L, et al. Evaluation of uncertainty in determination of five kinds of carbamate pesticide residues in apple by liquid chromatography-post-column derivatization [J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 72-76.
- [20] 袁圆, 曾辉, 肖艳, 等. 高效液相色谱法测定橙汁中酸性大红 GR 的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 88-92.
- YUAN Y, ZENG H, XIAO Y, et al. Evaluation of uncertainty in determination of acid scarlet GR in orange juice by high performance liquid chromatography[J]. Food & Machinery, 2022, 38(6): 88-92.
- [21] 霍思宇, 耿旭浩, 余丽波, 等. 山药粉中甲萘威残留分析基体标准物质研制[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 49-55.
- HUO S Y, GENG X H, YU L B, et al. Preparation of matrix reference material for carbaryl residues in Chinese yam flour[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 49-55.
- [22] 王新新, 封腾望, 王慧姣, 等. 草鱼粉中 4 种磺胺类药物残留基体标准物质的研制[J]. 淡水渔业, 2022, 52(5): 96-103.
- WANG X X, FENG T W, WANG H J, et al. Preparation of matrix reference materials for four sulfonamide residues in grass carp power[J]. Freshwater Fisheries, 2022, 52(5): 96-103.
- 
- (上接第 6 页)
- [25] LILLE M, NURMELA A, NORDLUND E, et al. Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 220: 20-27.
- [26] LIU Z B, BHANDARI B, PRAKASH S, et al. Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 413-424.
- [27] LIU Y, SUN Q X, WEI S, et al. Insight into the correlations among rheological behaviour, protein molecular structure and 3D printability during the processing of surimi from golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131046.
- [28] GABRIELE D, CINDIO B D, D'ANTONA P. A weak gel model for foods[J]. Rheologica Acta, 2001, 40: 120-127.
- [29] DU L H, BETTI M. Identification and evaluation of cryoprotective peptides from chicken collagen: Ice-growth inhibition activity compared to that of type I antifreeze proteins in sucrose model systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64 (25): 5 232-5 240.
- [30] MA X S, YI S M, YU Y M, et al. Changes in gel properties and water properties of *Nemipterus virgatus* surimi gel induced by high-pressure processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(2): 377-384.
- [31] WU J H, RONG Y Z, WANG Z W, et al. Isolation and characterisation of sericin antifreeze peptides and molecular dynamics modelling of their ice-binding interaction [J]. Food Chemistry, 2015, 174: 621-629.
- [32] TAHERGORABI R, JACZYNSKI J. Physicochemical changes in surimi with salt substitute [J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1 281-1 286.