

潘燕墨, 黄煜钦, 刘阳, 等. 蛋白粉对虾肉糜3D打印成型效果的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(4): 129-137.

蛋白粉对虾肉糜3D打印成型效果的影响

潘燕墨¹, 黄煜钦¹, 刘阳¹, 黄端颖¹, 孙钦秀¹, 魏帅¹, 韩宗元¹,
王泽富¹, 夏秋瑜¹, 刘书成^{1,2}

(1. 广东海洋大学食品科技学院 / 广东省水产品加工与安全重点实验室 / 广东省海洋食品工程技术研发中心 / 广东省海洋生物制品工程重点实验室 / 水产品深加工广东普通高等学校重点实验室, 广东 湛江 524088; 2. 大连工业大学海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁 大连 116034)

摘要:【目的】选择合适的蛋白粉种类及添加量,改善纯虾肉糜3D打印过程中断丝、产品沉积塌陷、出料不均匀等情况。【方法】制备凡纳滨对虾肉糜,分别添加质量分数3%、6%和9%的大豆分离蛋白粉(SPI)、乳清分离蛋白粉(WPI)和蛋清粉(EPI),分析虾肉糜的弹性模量、黏性模量、表观黏度、弹性、硬度、黏附性以及持水性等指标,研究不同添加量大豆分离蛋白粉、乳清分离蛋白粉、蛋清粉对虾肉糜3D打印适应性的影响,通过主成分分析剖析虾肉糜3D打印效果与物料特性之间的关系。【结果】随着添加量的增加,添加不同种类蛋白粉虾肉糜的弹性、硬度、黏附性以及持水性都显著增加($P < 0.05$),样品打印精确性先升后降,打印稳定性呈上升趋势($P < 0.05$);添加量相同时,SPI组样品表观黏度、黏性模量、硬度和黏附性最高,WPI组弹性模量、弹性、持水性和结合水峰面积振幅最大;添加质量分数6%蛋白粉打印成型效果最佳,其中添加质量分数6% SPI的虾肉糜打印精确性和打印稳定性分别高达97.86%和98.16%;对各指标变量进行相关性分析和添加不同种类及添加量蛋白粉的样品组进行主成分分析,6% SPI组在所有组中最接近打印精确性和稳定性。【结论】3种非肌肉蛋白均可提高虾肉糜的流变特性、质构特性、水分分布特性以及持水性,但只有添加适量的蛋白粉使虾肉糜从喷嘴中顺利挤出,3D打印成型效果更佳。

关键词: 虾肉糜; 3D打印; 蛋白粉; 打印精确性; 打印稳定性

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159(2022)04-0129-09

doi: 10.3969/j.issn.1673-9159.2022.04.015

Effects of Protein Powder on 3D Printing Properties of Shrimp Surimi

PAN Yan-mo¹, HUANG Yu-qin¹, LIU Yang¹, HUANG Duan-ying¹, SUN Qin-xiu¹, WEI Shuai¹, HAN Zong-yuan¹, WANG Ze-fu¹, XIA Qiu-yu¹, LIU Shu-cheng^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University / Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety / Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Food / Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products / Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution, Zhanjiang 524088, China; 2. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

收稿日期: 2022-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0902003); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202110566006); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-48); 广东省普通高校青年创新人才类项目(KQNCX028); 广东普通高等学校海洋食品绿色加工技术研究团队(2019KCXTD011)

第一作者: 潘燕墨(1995—),女,博士研究生,研究方向海洋食品加工新技术。E-mail: Panyanmo950523@163.com

通信作者: 孙钦秀(1986—),女,博士,讲师,研究方向海洋食品加工新技术。E-mail: sunqinxiugo@163.com

Abstract: 【Objective】 Appropriate protein powder type and addition amount were selected to improve the defects such as wire breakage, product sedimentation collapse and uneven discharge occurred in the 3D printing process of pure shrimp surimi. 【Method】 To characterize the indicators of the elastic modulus (G'), viscosity modulus (G''), apparent viscosity, elasticity, hardness, adhesion and water holding capacity of shrimp surimi, different additive amounts (3%, 6% and 9%, respectively, mass fraction) of soybean protein isolate powder (SPI), whey protein isolate powder (WPI), egg white protein isolate powder (EPI) were used respectively, and the relationship between 3D printing effect and material properties was further analyzed by principal component analysis. 【Results】 With the increase of additive amounts of different kinds of protein powder, the elasticity, hardness, adhesion and water holding capacity of shrimp surimi were significantly increased ($P < 0.05$), the printing accuracy of samples increased first and then decreased, and the printing stability of samples showed an increasing trend ($P < 0.05$). With the same additive amount, the SPI group had the highest apparent viscosity, viscosity modulus, hardness and adhesion, while the WPI group had the most fluctuating elastic modulus, elasticity, water holding capacity and binding water peak area. 6% protein powder had the best printing effect, and the printing accuracy and stability of shrimp surimi with 6% SPI were up to 97.86% and 98.16%, respectively. Correlation analysis of each indicator variable and principal component analysis of the sample groups with different kinds and amounts of protein powder were carried out. The 6% SPI group was the most close to printing accuracy and stability among all the groups. 【Conclusion】 Three kinds of non-muscle proteins can improve the rheological properties, texture properties, water distribution properties and water holding capacity of shrimp surimi, but only adding an appropriate amount of protein powder can make shrimp surimi extruded smoothly from the nozzle and the 3D printing effect is better.

Key words: shrimp surimi; 3D printing; protein powder; printing accuracy; printing stability

3D 打印 (Three-dimensional printing) 技术通过逐层叠加构建三维结构^[1], 可提高生产效率, 减少生产成本^[2], 在材料科学、工程学、医学、农业和食品科学等领域的潜在应用广受关注^[3]。目前应用于食品 3D 打印的配料包括淀粉、蛋白粉、油脂和食用胶等^[4-5], 如王石^[6]将鸡胸肉糜与豌豆蛋白、谷氨酰胺转氨酶混合后进行 3D 打印, 开发出一种打印精确度高、不易塌陷、适合 3D 打印的双蛋白鸡肉糜体系; Tian 等^[7]证明, 蜂蜡、卡拉胶和黄原胶的混合凝胶体系在提高 3D 打印产品的稳定性、精度和成型性方面起指导作用; Bi 等^[8]用风味油与酪蛋白和果胶混合颗粒制备水包油高内相乳液应用于 3D 打印, 使 3D 打印的产品可充分保持设计的形状和结构。因此可通过添加食品配料改善物料特性, 进而提高其 3D 打印适应性。

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 是一种营养均衡的高蛋白虾种, 具有产量高、加工出肉率高、抗病能力强等优点^[9-10], 将其制成虾肉糜对虾产品高

值化, 促进对虾产业的发展。虾肉糜制品因其营养价值高和食用方便等特点广受欢迎, 但其产品形式单一和创新不足等问题限制了其进一步发展。虾肉糜是一种适合打印的溶胶体^[11], 可利用 3D 打印技术实现产品创新。

本课题组前期对纯虾肉糜进行打印, 发现在打印过程中会存在沉积塌陷、打印线条粗糙等问题。因此, 需要添加合适配料改善其打印适应性。蛋白粉是虾肉糜加工中常用配料, 添加蛋白粉可改善物料的黏弹性, 进而改善其物料特性, 同时还可提高产品营养价值。不同添加种类及添加量影响非肌肉蛋白对虾肉糜的物料特性^[12-15]。本研究分析大豆分离蛋白粉、乳清分离蛋白粉、蛋清粉及其添加量对虾肉糜 3D 打印特性、流变学特性、质构特性以及持水性的影响, 探究其对 3D 打印成型效果的作用机理, 并分析这些指标与打印精确性和打印稳定性的相关性, 为探究适宜蛋白粉种类及添加量, 优化虾肉糜 3D 打印配方提供依据。

1 材料与方 法

1.1 主要材料与试剂

同一批次新鲜凡纳滨对虾(30~40尾/kg)购自广东省湛江市霞山区欢乐海洋海鲜市场,低温保活运送到实验室。大豆分离蛋白粉购于山东省临沂山松生物有限公司,乳清分离蛋白粉购于辽宁省沈阳奥派奇食品有限公司,蛋清粉购于安徽省亳州众意蛋业有限责任公司。

1.2 主要仪器与设备

GZB20型高速斩拌机,广州市汕宝食品厂机械部;FOODBOT E13D型食品3D打印机,杭州时印科技有限公司;F60型LED拍摄灯箱,深圳旅行家科技有限公司;M200(15-45)型高清数码相机,佳能有限公司;HAAKE MARS III型模块化高级旋转流变仪,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;TMS-Pro 型食品物性分析仪,美国 FTC 公司;NMI20 系列低频核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 虾肉糜样品的制备 新鲜凡纳滨对虾去头、脱壳、去虾线等,用冰水清洗。将虾肉放进斩拌机绞碎处理5 min,处理后虾肉糜转移到容器中与冰水以质量比1:5充分混合漂洗3次,利用多层纯棉纱布进行人工脱水,添加质量分数3%食盐(以虾肉糜质量计),擂溃2 min,依次添加质量分数3%料酒、质量分数1%白砂糖以及质量分数1%味精(以虾肉糜质量计)继续擂溃2 min,将处理完成的样品均分为10等份,其中9份以虾肉糜质量为基准分别添加质量分数3%、6%和9%的大豆分离蛋白粉(SPI)、乳清分离蛋白粉(WPI)和蛋清粉(EPI),再次擂溃2 min,另1份不添加任何蛋白粉的虾肉糜作为对照组。整个制备过程保持在2~5℃条件下。

1.3.2 虾肉糜3D打印精确性及稳定性分析 参照Pan等^[11]方法。喷头直径1.20 mm,设计打印模型边长(L_m)20 mm。打印完成后,测量其高度 H 和边长 L ,所得测量尺寸与预设打印模型的理想数值进行对比,数值越接近则打印成型效果越佳。打印后通过LED摄影棚灯箱中的数码相机拍照记录样品打印效果。打印精确性(%)、打印稳定性(%)计算:

$$\text{打印精确性} = 1 - \left| (L_s - L_m) / L_m \right|,$$

$$\text{打印稳定性} = H_{60} / H_0,$$

式中, L_s (mm)为样品边长, L_m (mm)为预设边长, H_0 (mm)为打印结束后静置0 min时样品高度, H_{60} (mm)为打印结束后静置60 min时样品高度。

1.3.3 虾肉糜流变特性的测定 参考潘燕墨等^[16]方法测定。在0.1~100 s⁻¹的剪切速率范围内分析静态表观黏度的变化规律。在0.1~10 Hz的频率范围内通过扫描振荡频率测量其动态黏弹性。所有测量均在确定的黏弹性线性区域内进行,应变扫描为0.1%,记录弹性模量(G' ,Pa)和黏性模量(G'' ,Pa)随振荡频率的变化情况。

1.3.4 虾肉糜质构特性的测定 质构剖面分析(Texture profile analysis, TPA)参照潘燕墨等^[17]方法,采用TMS-Pro质构仪测定。取20 g生虾肉糜于烧杯中,在温度25℃和湿度40%~50%的条件下,测定样品的硬度、黏附性、弹性等质构特性。质构仪选择FTC 38.1 mm Steel圆柱重型金属探头,测试参数:探头上升到样品表面的高度为30 mm,测试速度60 mm/min,压缩变形50%,起始力为0.5 N。

1.3.5 虾肉糜水分分布的测定 参考Liu等^[18]方法测定。设置低场核磁共振仪(Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)共振频率22.6 MHz,磁场强度0.47 A/m。将约10 g虾肉糜小心放置于直径为35 mm的洁净培养皿中,根据Caar-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列的测定方法扫描样品,测得样品横向弛豫时间 T_2 。

1.3.6 虾肉糜持水性的测定 采用离心法测定虾肉糜的持水性(Water holding capacity, WHC,%),样品称取后(m_1 ,g)在4℃温度下离心(10 000 g, 10 min),用滤纸吸去虾肉糜表面水分,再次称质量(m_2 ,g)。

$$\text{WHC} = m_1 / m_2。$$

1.4 数据分析

本实验共处理3批虾肉糜,每一批样品质构分析实验平行测定5次,其他实验平行测定3次,数据测量值以平均值±标准差表示,使用JMP Pro 13统计软件对数据进行方差分析和Tukey多重比较,置信度为95%($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 蛋白粉对虾肉糜3D打印成型效果的影响

如图1所示,对照组样品在打印过程中出现出料不均、结构坍塌等现象,其打印效果较差,可能是

虾肉糜的高水分含量和低黏弹性导致的^[19]。对比图1、2发现,样品在添加合适比例不同种类蛋白粉并静置0 min和静置60 min后,均可保持良好的外观形态且比对照组有所提高。这可能是因为这三种非肌肉蛋白有一定吸水性,填充在虾肉糜肌原纤维蛋白质网络结构中,将水分束缚在虾肉糜的网状结构内^[13,20],改善了虾肉糜的物料特性,可在提高体系的黏弹性同时提高承载力,保证了良好的挤出特性和稳定性。添加质量分数6%蛋白粉打印成型效果最佳,当添加过多(质量分数9%)的蛋白粉时,样品成型效果较其他蛋白粉添加组最差,这可能是因为蛋白粉添加过量,导致样品缺乏良好流动性,无法顺利挤出。这一结果与石蕊^[21]在大豆分离蛋白对猪肉

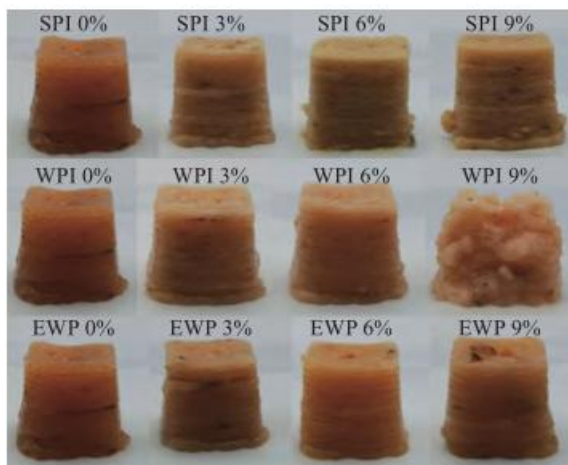


图1 添加不同种类及添加量蛋白粉的3D打印虾肉糜图片(0 min)

Fig. 1 Photos of 3D printing shrimp surimi with different types and additive amounts of protein powder at 0 min

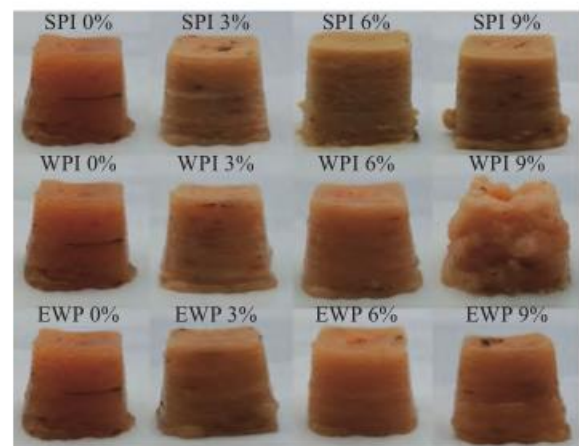


图2 添加不同种类及添加量蛋白粉的3D打印虾肉糜图片(60 min)

Fig. 2 Photos of 3D printing shrimp surimi with different types and additive amounts of protein powder at 60 min

糜打印特性影响的研究一致。因此,添加适量的非肌肉蛋白于打印油墨中可改善其从喷嘴中挤出困难和黏附性不佳等情况,但过量则会导致更差的效果。

如表1所示,添加同种蛋白粉时,添加量增加,样品(除添加质量分数9% WPI外)的打印精确性均先上升后下降,打印稳定性呈上升趋势($P < 0.05$),这可能是由于添加的蛋白粉质量增加,虾肉糜的持水性、硬度和黏弹性逐渐增加,获得更好的支撑性和稳定性。对于蛋白粉添加量相同的样品,SPI样品的打印精确性最高,其次是EWP和WPI样品($P < 0.05$);SPI样品的打印稳定性最高,其次是WPI和EWP样品($P < 0.05$),其中添加6% SPI具有较好的打印精确性和稳定性。这可能是因为SPI含较高球蛋白,具有更好的乳化性和较高的黏弹性^[22],从而

表1 蛋白粉种类及添加量对虾肉糜3D打印产品精确性及稳定性的影响

Table 1 Effects of type and addition dosage of protein powder on printing accuracy and stability of three-dimensional shrimp surimi

指标 Index	添加量 Addition / %	大豆分离蛋白粉 SPI	乳清分离蛋白粉 WPI	蛋清粉 EWP
打印精确性 Printing accuracy / %	0	87.11 ± 0.21 ^f	87.11 ± 0.21 ^f	87.11 ± 0.21 ^f
	3	90.55 ± 0.29 ^d	89.42 ± 0.16 ^e	89.92 ± 0.30 ^{de}
	6	97.86 ± 0.39 ^a	94.10 ± 0.27 ^e	96.54 ± 0.33 ^b
	9	95.98 ± 0.25 ^b	83.33 ± 0.29 ^d	93.52 ± 0.20 ^e
打印稳定性 Printing stability / %	0	90.99 ± 0.03 ^e	90.99 ± 0.03 ^e	90.99 ± 0.03 ^e
	3	95.48 ± 0.50 ^d	94.50 ± 0.37 ^d	93.74 ± 0.27 ^d
	6	98.16 ± 0.10 ^{ab}	96.78 ± 0.16 ^{bc}	96.32 ± 0.37 ^e
	9	98.82 ± 0.22 ^a	90.64 ± 0.19 ^e	97.61 ± 0.24 ^{abc}

注:同一指标中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same indicator indicate significant difference ($P < 0.05$).

使物料顺利地通过喷头进行打印并增加层与层之间的融合性。总之,6% SPI的添加有助于提高虾肉糜的3D打印特性。

2.2 蛋白粉对虾肉糜流变特性的影响

图3可知,随着剪切速率的增加,虾肉糜表观黏度降低,在剪切速率较低时表观黏度较高,说明虾肉糜是一种剪切变稀的假塑性流体。同时,随着添加的蛋白粉质量增加,表观黏度逐渐上升,可能是因为蛋白粉颗粒与盐溶性蛋白及不溶性蛋白随着揉溃的进行不断混合,最终形成了致密稳定的三维网状结构^[23]。Liu等^[14]发现,随着牛奶浓缩蛋白添加量的增加,其制备的酪蛋白酸钠溶液的表观黏度也逐渐增加,与本研究结果一致。对于蛋白粉添加量

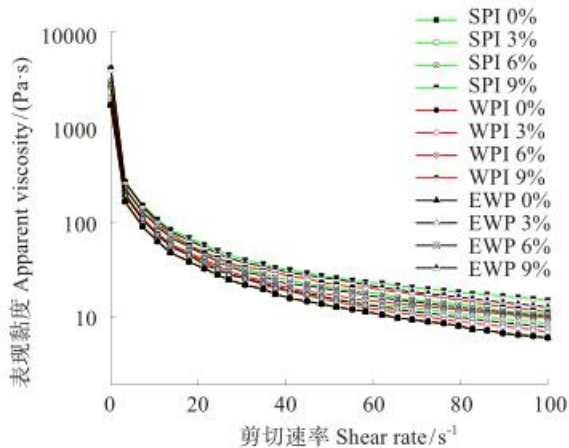
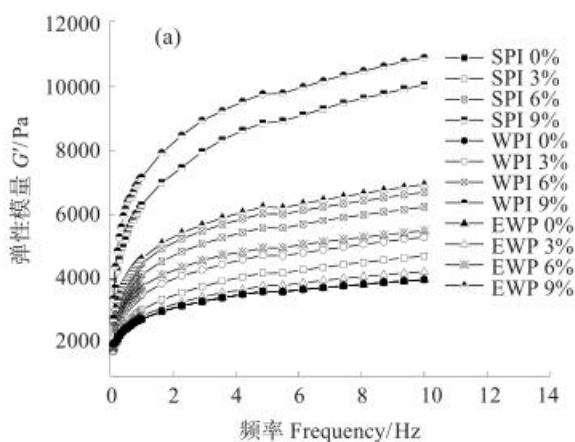


图3 蛋白粉种类及添加量对虾肉糜表观黏度的影响

Fig. 3 Effect of type and addition dosage of protein powder on apparent viscosity of shrimp surimi



相同的样品,SPI组的表观黏度最高,其次是EWP和WPI组,这可能是因为添加SPI的虾肉糜在揉溃过程中会与盐溶性蛋白及不溶性蛋白充分混合,进而增加黏度。对于3D打印物料而言,其表观黏度应足够低以使物料易于从喷头中挤出,而对于表层之间的黏合则应足够高^[23],适宜的表观黏度有助于物料的顺利挤出和打印层之间的融合,添加6% SPI能够很好地达到这一目的以获得更好的打印效果。

如图4(a)和图4(b)所示,虾肉糜在线性黏弹性区域的弹性模量(G')远大于黏性模量(G''),说明样品具有更多的弹性性质和类似固体的特征,且流动性较差。在任意振荡频率下,随着蛋白粉添加量增加, G' 和 G'' 呈增加趋势,说明虾肉糜具有剪切稀化特征。本实验中,在低振荡频率下,分子间的相互作用处于动态平衡状态,凝胶网络依然为黏弹性固体的状态。随着频率的增加,其弹性特征减少,系统表现出黏性流体的特征^[24]。本研究发现,WPI组的 G' 最高,其次是SPI和EWP组;SPI组的 G'' 最高,其次是EWP和WPI组。这一结果与表观黏度的结果相对应。造成3D打印纯虾肉糜容易断丝和堆叠性差的原因是 G' 和 G'' 过小,蛋白粉的添加增加了样品的 G' 和 G'' ,而适当的 G' 和 G'' 能促进物料的流动性并增加打印物料层之间的融合性^[5],从而改善3D打印适应性。

2.3 蛋白粉对虾肉糜质构特性的影响

由表2可知,随着添加的蛋白质粉质量增加,样品硬度显著增加($P < 0.05$)。在蛋白粉添加量相同

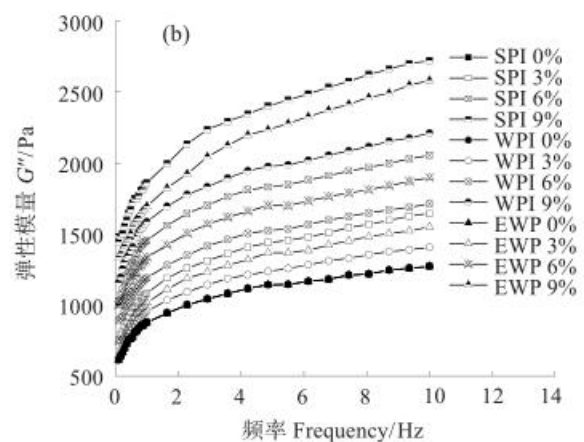


图4 不同蛋白粉种类及添加量的虾肉糜弹性模量(G')和黏性模量(G'')

Fig. 4 Elastic modulus (G') and viscosity modulus (G'') of shrimp surimi with different types and addition of protein powder during frequency sweep

的样品中, SPI组的硬度最高, 其次是WPI和EWP组 ($P < 0.05$), 这可能是因为SPI结合水的能力很强, 通过与虾肉糜本身的蛋白质、糖类等相互作用, 将水分锁在网络结构内, 增强样品内部结构的稳定性^[25], 进而增加虾肉糜的硬度。样品的持水性较高促进样品硬度的增加^[26], 高硬度有利于保持打印产品的原始形状, 有助于产品稳定成型。添加9%蛋白粉样品的硬度最高, 但在实际打印过程中会堵塞打印机的喷头, 导致物料流出不均, 并突然挤出大量物料。

随着蛋白粉添加量增加, 样品的黏附性也增加。添加量一致的情况下, SPI组的黏附性最高, 其次是EWP和WPI组 ($P < 0.05$)。9%SPI组的黏附性为3.79 N·mm, 是对照组(1.88 N·mm)的2倍, 这可能是因为SPI中球蛋白含量较高, 具有更好的乳化性和较高的黏弹性^[22], 进而使虾肉糜具有很高的黏度。

蛋白粉添加量增加, 样品的弹性逐渐增加。添加9%SPI、WPI和EWP组的弹性分别为5.99、7.11和5.74 mm, 是对照组(2.11 mm)的1.5倍多, 可能是因为, 在插溃过程中, 分子相互作用和肌球蛋白持续交联, 从而增强样品的弹性^[27]。因此, 结合3D打印成型效果, 适宜的物料硬度、黏附性和弹性有助于物料挤出和稳定成型, 以获得更好的3D打印产品。

2.4 蛋白粉对虾肉糜水分分布的影响

如表3所示, 样品的LF-NMR曲线上有两个峰, 表明虾肉糜蛋白已不同程度限制了水的流动性。

表3展示了蛋白粉对弛豫时间(T_2)和振幅峰面积比(A_2)的影响, T_2 越短, 说明样品中的水不易流动; 而弛豫峰面积 A_2 表示不同类型的水的含量, 从而影响虾肉糜的流变特性。 T_{2b} 表示与凝胶网络结构紧密结合的结合水, T_{21} 代表不易流动水, 与凝胶网络的结合程度较低。如表3所示, 添加种类一致的蛋白粉, 随着添加量增加, 样品的 T_2 向左移动, 不易流动水峰面积比(A_{21})逐渐减小, 而结合水峰面积比(A_{2b})逐渐增大。这些结果表明, 虾肉糜中的结合水和不易流动水变得更加稳定^[28], 蛋白粉的添加增加了虾肉糜结合水的能力。对于蛋白粉添加量相同的样品, WPI组的 A_{2b} 增幅最大, 其次是添加SPI和EWP的组 ($P < 0.05$)。陈海华等^[29]研究发现, 在鱼糜中添加乳清浓缩蛋白, 其结合水的能力增强, 表明蛋白粉能在一定程度上截留和吸收水分。结合持水性结果, 说明添加蛋白粉可以提高虾肉糜结合水的能力从而增加其持水性。

2.5 蛋白粉对虾肉糜持水性的影响

表4可知, 添加相同种类的蛋白粉, 样品持水性随添加量的增加显著增加 ($P < 0.05$)。当添加6%蛋白粉时, 样品持水性超过89%, 显著高于其他添加量组(84.66%) ($P < 0.05$)。蛋白粉添加量相同的样品组, WPI组、SPI组和EWP组的持水性相比于对照组均有所提高, 这可能与三种非肌肉蛋白的吸水性有关, 在插溃时与虾肉糜中的蛋白质等大分子物质形成更加稳定紧密的结构, 保留更多的水分^[30]。

表2 不同种类及添加量蛋白粉对虾肉糜质构的影响

Table 2 Effects of type and addition of protein powder on the texture profile of shrimp surimi

指标 Index	添加量 Addition / %	大豆分离蛋白粉 SPI	乳清分离蛋白粉 WPI	蛋清粉 EWP
硬度 Hardness / N	0	0.70 ± 0.02 ^a	0.70 ± 0.02 ^a	0.70 ± 0.02 ^a
	3	0.96 ± 0.05 ^d	0.92 ± 0.04 ^d	0.87 ± 0.03 ^d
	6	1.24 ± 0.08 ^b	1.08 ± 0.08 ^c	0.94 ± 0.05 ^d
	9	1.64 ± 0.05 ^a	1.59 ± 0.06 ^a	1.16 ± 0.05 ^{bc}
黏附性 Adhesion / (N·mm)	0	1.88 ± 0.12 ^{fg}	1.88 ± 0.12 ^{fg}	1.88 ± 0.12 ^{fg}
	3	2.37 ± 0.20 ^e	2.10 ± 0.16 ^{efg}	2.16 ± 0.14 ^{ef}
	6	3.17 ± 0.04 ^{bc}	2.69 ± 0.14 ^d	2.95 ± 0.19 ^{cd}
	9	3.79 ± 0.17 ^a	1.81 ± 0.14 ^g	3.35 ± 0.17 ^b
弹性 Elasticity / mm	0	2.11 ± 0.17 ^g	2.11 ± 0.17 ^g	2.11 ± 0.17 ^g
	3	3.61 ± 0.15 ^e	3.86 ± 0.14 ^{de}	3.03 ± 0.13 ^f
	6	4.14 ± 0.10 ^d	4.72 ± 0.20 ^c	3.90 ± 0.17 ^{de}
	9	5.99 ± 0.16 ^b	7.11 ± 0.13 ^a	5.74 ± 0.10 ^b

注: 同一指标中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same indicator indicate significant difference ($P < 0.05$).

表3 蛋白粉种类及添加量对虾肉糜水分状态分布的影响
Table 3 Effects of type and addition of protein powder on water state distributions of shrimp surimi

指标 Index	添加量 Addition / %	大豆分离蛋白粉 SPI	乳清分离蛋白粉 WPI	蛋清粉 EWP
驰豫时间 T_{2b} / ms	0	2.30 ± 0.01 ^a	2.30 ± 0.01 ^a	2.30 ± 0.01 ^a
	3	2.03 ± 0.03 ^c	2.23 ± 0.02 ^b	2.25 ± 0.02 ^b
	6	1.19 ± 0.02 ^{dc}	1.22 ± 0.01 ^d	2.01 ± 0.01 ^c
	9	1.16 ± 0.01 ^c	1.16 ± 0.02 ^c	1.16 ± 0.02 ^c
驰豫时间 T_{21} / ms	0	75.64 ± 0.01 ^a	75.64 ± 0.01 ^a	75.64 ± 0.01 ^a
	3	74.61 ± 0.06 ^b	75.49 ± 0.05 ^a	75.61 ± 0.06 ^a
	6	65.73 ± 0.12 ^c	65.86 ± 0.12 ^c	74.54 ± 0.11 ^b
	9	52.74 ± 0.06 ^c	52.88 ± 0.04 ^c	54.26 ± 0.06 ^d
振幅峰面积比 A_{2b} / %	0	2.93 ± 0.13 ^c	2.93 ± 0.13 ^c	2.93 ± 0.13 ^c
	3	3.11 ± 0.21 ^c	3.38 ± 0.13 ^{dc}	2.94 ± 0.10 ^c
	6	3.69 ± 0.32 ^d	4.37 ± 0.11 ^b	3.27 ± 0.17 ^{dc}
	9	4.27 ± 0.16 ^{bc}	6.46 ± 0.21 ^a	3.77 ± 0.22 ^{cd}
振幅峰面积比 A_{21} / %	0	97.07 ± 0.13 ^a	97.07 ± 0.13 ^a	97.07 ± 0.13 ^a
	3	96.89 ± 0.21 ^a	96.62 ± 0.13 ^{ab}	97.06 ± 0.10 ^a
	6	96.31 ± 0.32 ^b	95.64 ± 0.11 ^d	96.73 ± 0.17 ^{ab}
	9	95.73 ± 0.16 ^{cd}	93.54 ± 0.21 ^e	96.23 ± 0.22 ^{bc}

注:同一指标中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same indicator indicate significant difference ($P < 0.05$).

表4 蛋白粉种类及添加量对虾肉糜持水性的影响
Table 4 Effects of type and addition of protein powder on the WHC of shrimp surimi

添加量 Addition / %	大豆分离蛋白粉 (SPI)	乳清分离蛋白粉 (WPI)	蛋清粉 (EWP)
0	84.66 ± 0.05 ^e	84.66 ± 0.05 ^e	84.66 ± 0.05 ^e
3	86.41 ± 0.08 ^f	87.86 ± 0.16 ^c	86.03 ± 0.35 ^f
6	89.56 ± 0.29 ^d	91.49 ± 0.15 ^c	89.08 ± 0.28 ^d
9	92.17 ± 0.20 ^b	94.64 ± 0.13 ^a	91.81 ± 0.11 ^{bc}

注:不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

崔旭海等^[31]的研究发现,不同种类蛋白的添加均有助于鲤(*Cyprinus carpio*)鱼糜持水性的提高,其中乳清分离蛋白(WPI)的持水效果最好,大豆分离蛋白(SPI)次之,花生分离蛋白(PPI)的持水效果相对较差。结合3D打印特性,蛋白粉的添加使虾肉糜中的持水性有效增加,样品打印精确性和稳定性提高。

2.6 各指标变量间的相关性及主成分分析

从表5可见,虾肉糜的流变特性、质构特性、水分特性与打印精确性和打印稳定性等指标之间均呈很显著的正相关性($P < 0.05$)。

从图5可以看出,主成分1(PC1)的贡献率为72.72%,主成分2(PC2)的贡献率为21.89%,累计贡

献率达94.61%。图5(a)为主成分分析的载荷图,样品的打印精确性和打印稳定性与持水性、硬度、黏附性、弹性、 G' 、 G'' 、 A_{2b} 和表观黏度在主成分1的同侧,具有正相关性;样品的打印精确性和打印稳定性与 T_{2b} 、 T_{21} 和 A_{21} 在主成分1坐标轴的两侧,呈负相关性。

图5(b)显示了在二维空间中PC1和PC2作为载荷因子的不同处理组样品的投影得分图。推断位于第1、2、3和4象限的样品与相应象限中的变量有关。将得分图(图5(b))与载荷图(图5(a))进行比较,可以看出,未添加蛋白粉的对照组和添加3%蛋白粉的样品组与打印精确性和稳定性分别位于主成分1坐标轴的两侧且距离较远,这同样证明不添

表5 添加不同种类及添加量蛋白粉各指标变量的相关性
Table 5 Correlation of various index variables with different type and addition of protein powder

指标 Index	打印精确性 Printing accuracy	打印稳定性 Printing stability	弹性模量 Elasticity modulus	黏性模量 Viscous modulus	表观黏度 Apparent viscosity	硬度 Hardness	黏附性 Adhesiveness	弹性 Elasticity	持水性 WHC
打印精确性 Printing accuracy	1.00								
打印稳定性 Printing stability	0.92***	1.00							
弹性模量 Elasticity modulus	0.73*	0.84**	1.00						
黏性模量 Viscous modulus	0.78**	0.87***	0.89***	1.00					
表观黏度 Apparent viscosity	0.83**	0.91***	0.93***	0.99***	1.00				
硬度 Hardness	0.79**	0.90***	0.96***	0.91***	0.94***	1.00			
黏附性 Adhesiveness	0.89***	0.93***	0.91***	0.97***	0.99***	0.93***	1.00		
弹性 Elasticity	0.77**	0.93***	0.91***	0.92***	0.94***	0.90***	0.91***	1.00	
持水性 WHC	0.84**	0.92***	0.90***	0.87**	0.91***	0.86**	0.91***	0.97***	1.00

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$, 影响显著。
Note: * represents $P < 0.05$, ** represents $P < 0.01$, *** represents $P < 0.001$, significant effect.

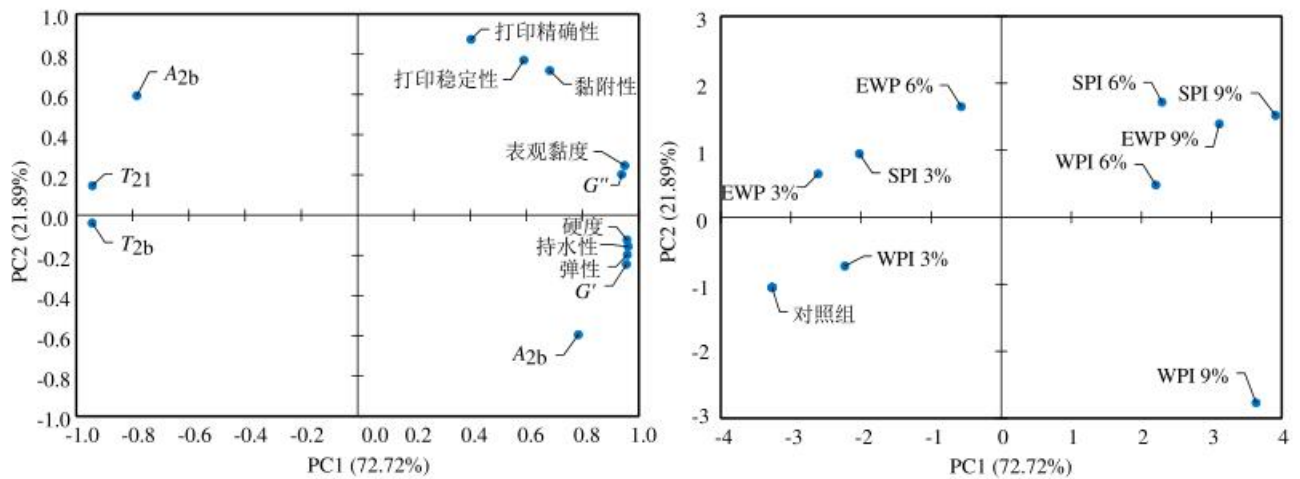


图5 添加不同种类及添加量蛋白粉的虾肉糜主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis for shrimp surimi with different types and additive amounts of protein powder

加蛋白粉或添加少量(3%)蛋白粉的虾肉糜的打印适应性相对较差。添加6%和9%(除9% WPI)蛋白粉样品组与打印精确性和稳定性在主成分2的正方向,表明这些样品具有更高的打印精确性和稳定性,9% WPI组距离打印精确性和稳定性较远,同时也说明9% WPI组的打印精确性和打印稳定性相对较差。此外,添加6%蛋白粉的样品组与打印精确性和稳定性都在主成分2的正方向,这表明向虾肉糜中添加适量(6%)蛋白粉可以提高3D打印产品的打印适应性。此外,6% SPI组在所有组中最接近打印精确性和稳定性,进一步证明6% SPI添加于虾肉糜中有助于提高虾肉糜的打印适应性。

3 结论

研究表明,添加一定量的不同种类蛋白粉

均能提高虾肉糜3D打印适应性,其中添加适宜(6%)蛋白粉效果最为显著($P < 0.05$);而对于相同蛋白粉添加量,添加大豆分离蛋白粉(SPI)的样品具有较高的打印精确性和稳定性。结合 G' 、 G'' 、表观黏度、硬度、黏附性、弹性、持水性这些指标综合分析,添加6% SPI的样品评价指标都显著增加($P < 0.05$),样品能够顺利挤出喷嘴,层与层完美融合并具有良好稳定性,添加6% SPI在提高虾肉糜的打印精确性以及稳定性方面的显著作用。因此,添加6%大豆分离蛋白粉于虾肉糜中可以提高其3D打印适应性。

参考文献

[1] GUÉNARD-LAMPRON V, MASSON M, LEICHTNAM O, et al. Impact of 3D printing and post-processing parameters on shape, texture and microstructure of carrot appetizer

- cake[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 72: 102738.
- [2] PIYUSH, KUMAR R, KUMAR R. 3D printing of food materials: a state of art review and future applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33: 1463-1467.
- [3] PULATSU E, LIN M S. A review on customizing edible food materials into 3D printable inks: approaches and strategies [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 107: 68-77.
- [4] CHEN Y Y, ZHANG M, SUN Y N, et al. Improving 3D/4D printing characteristics of natural food gels by novel additives: a review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123: 107160.
- [5] DU Y W, ZHANG M, CHEN H Z. Effect of whey protein on the 3D printing performance of konjac hybrid gel[J]. *LWT*, 2021, 140: 110716.
- [6] 王石. 双蛋白鸡肉糜3D打印特性及产品品质的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [7] TIAN H, WANG K, LAN H B, et al. Effect of hybrid gelator systems of beeswax-carrageenan-xanthan on rheological properties and printability of *Litchi* inks for 3D food printing [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106482.
- [8] BI A Q, XU X B, GUO Y, et al. Fabrication of flavour oil high internal phase emulsions by casein/pectin hybrid particles: 3D printing performance[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131349.
- [9] 刘蒙娜, 刘媛, 刘书成, 等. 3种巯基化合物对凡纳滨对虾多酚氧化酶的抑制效果和动力学[J]. *广东海洋大学学报*, 2017, 37(3): 67-72.
- [10] 蓝蔚青, 张炳杰, 张溪, 等. 微酸性电解水结合复合保鲜剂对凡纳滨对虾冷藏期间蛋白特性影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(1): 98-105.
- [11] PAN Y M, SUN Q X, LIU Y, et al. The relationship between rheological and textural properties of shrimp surimi adding starch and 3D printability based on principal component analysis[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9 (6): 2985-2999.
- [12] 沈晓蕾, 李向红, 俞健, 等. 大豆分离蛋白、木薯淀粉与转谷氨酰胺酶组合对鲢鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(9): 26-31.
- [13] 王冬妮, 范馨茹, 祁立波, 等. 淀粉和蛋白类添加物对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(4): 65-71.
- [14] LIU Y W, YU Y, LIU C S, et al. Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing[J]. *LWT*, 2019, 102: 338-346.
- [15] 陈海华, 薛长湖. 3种非肌肉蛋白对竹荚鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2010, 31(13): 31-35.
- [16] 潘燕墨, 刘阳, 孙钦秀, 等. 采用主成分分析抗冻剂对冷冻虾肉糜3D可打印性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(17): 266-275.
- [17] 潘燕墨, 孙钦秀, 刘书成, 等. 小麦淀粉改善虾肉糜物料特性及其3D打印适应性[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47 (12): 63-69.
- [18] LIU Y, SUN Q X, WEI S, et al. LF-NMR as a tool for predicting the 3D printability of surimi-starch systems[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131727.
- [19] DICK A, DONG X P, BHANDARI B, et al. The role of hydrocolloids on the 3D printability of meat products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106879.
- [20] 计红芳, 李莎莎, 张令文, 等. 豌豆蛋白对鸡肉糜热诱导凝胶品质特性与微观结构的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41 (4): 74-79.
- [21] 石蕊. 双蛋白猪肉糜3D打印特性及产品品质的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [22] CHEN L, CHEN J S, YU L, et al. Improved emulsifying capabilities of hydrolysates of soy protein isolate pretreated with high pressure microfluidization[J]. *LWT*, 2016, 69: 1-8.
- [23] LIU Z B, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 76-82.
- [24] SHAHBAZI M, JÄGER H, CHEN J S, et al. Construction of 3D printed reduced-fat meat analogue by emulsion gels. Part II: printing performance, thermal, tribological, and dynamic sensory characterization of printed objects[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107054.
- [25] 陈康, 戴志远, 王宏海, 等. 添加非肌肉蛋白对鱼糜制品品质影响的初步研究[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(7): 214-219.
- [26] ZHANG F H, FANG L, WANG C J, et al. Effects of starches on the textural, rheological, and color properties of surimi-beef gels with microbial transglutaminase[J]. *Meat Science*, 2013, 93(3): 533-537.
- [27] WALAYAT N, XIONG Z Y, XIONG H G, et al. The effect of egg white protein and β -cyclodextrin mixture on structural and functional properties of silver carp myofibrillar proteins during frozen storage[J]. *LWT*, 2021, 135: 109975.
- [28] 叶丽红, 许艳顺, 夏文水, 等. K-卡拉胶、复合磷酸盐和蛋清粉对高水分鱼丸水分和质构特性的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(4): 291-297.
- [29] 陈海华, 薛长湖. 乳清浓缩蛋白对竹荚鱼鱼糜凝胶化和凝胶劣化的影响[J]. *食品科学*, 2010, 31(11): 25-30.
- [30] 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*, 2010, 45(1): 48-55.
- [31] 崔旭海, 毕海丹, 崔晓莹, 等. 不同食用蛋白的添加对鲤鱼鱼糜流变和凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(16): 195-200.

(责任编辑:刘肫,刘庆颖)