王江敏, 梁婉梅, 孙嘉格, 等. 鱼油微胶囊对椰蓉-虾干复合面团的理化特性及风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 105−113. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080053

WANG Jiangmin, LIANG Wanmei, SUN Jiage, et al. Effect of Fish Oil Microcapsule on the Physicochemical and Flavor Properties of Coconut-Dried Shrimp Composite Dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 105−113. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080053

· 研究与探讨 ·

鱼油微胶囊对椰蓉-虾干复合面团的理化特性及风味的影响

王江敏[1], 梁婉梅[1], 孙嘉格[1], 王泽富[1,2,3], 刘　阳[1,2,3], 夏秋瑜[1,2,3,*], 刘书成[1,2,3]

（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, 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东省水产预制食品加工与品质控制工程技术研究中心, 广东湛江 524088;
2.海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 大连工业大学, 辽宁大连 116034;
3.南方海洋科学与工程广东省实验室（湛江）, 广东湛江 524025）

摘　要: 以椰蓉-虾干为配料制备风味面团，以直接添加鱼油为对照，研究鱼油微胶囊对面团感官、煮制特性以及风味等特性的影响。采用质构仪、流变仪、核磁共振仪等分别测定面团的质构特性、流变学特性、水分分布，并运用电子鼻、气相色谱离子迁移谱联用仪测定面团风味特性。结果表明：在添加 5% 椰蓉-虾干增香产物基础下，10% 鱼油微胶囊添加组获得最高的感官评分（83.20 分），面团色呈现黄色，符合消费者端视觉偏好，其与空白组以及鱼油添加组相比，面条断条率以及烹煮损失率减少，煮制时间以及吸水率增加，与空白组相比，面团硬度与咀嚼性增加，回复性降低。流变特性结果与质构特性一致，添加 10% 鱼油微胶囊的面团粘弹特性显著提高，风味物质以酯类物质为主。因此，本研究制备的 Omega-3 营养强化椰蓉-虾干复合面团不仅营养丰富，也具有适宜的煮制特性和风味特征，为 Omega-3 营养强化主食产品的研发和应用提供参考依据。

关键词: 面团, 鱼油微胶囊, 理化特性, 风味特性
中图分类号: TS229　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0105−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080053
本文网刊:

Effect of Fish Oil Microcapsule on the Physicochemical and Flavor Properties of Coconut-Dried Shrimp Composite Dough

WANG Jiangmin[1], LIANG Wanmei[1], SUN Jiage[1], WANG Zefu[1,2,3], LIU Yang[1,2,3], XIA Qiuyu[1,2,3,*], LIU Shucheng[1,2,3]

（1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Prefabricated Seafood Processing and Quality Control, Zhanjiang 524088, China;
2.Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;
3.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524025, China）

Abstract: This study investigated the effect of fish oil microcapsule incorporation on the sensory characteristics, cooking performance, and flavor profile of coconut-dried shrimp composite dough. Formulations containing microencapsulated fish oil were compared with those incorporating unencapsulated oil to evaluate the functional benefits of microencapsulation.

收稿日期: 2025−08−11
基金项目: 国家自然科学基金面上项目（32172252）; 广东省普通高校重点领域专项（2022ZDZX2028）。
作者简介: 王江敏（1998−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 生物资源利用, E-mail: 18719420309@163.com。
*** 通信作者:** 夏秋瑜（1978−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 海洋功能脂质研究与应用, E-mail: qiuyuxia@163.com。

The dough samples were analyzed using a texture analyzer, rheometer, and low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) to assess texture, viscoelastic behavior, and water mobility, respectively. Flavor attributes were characterized through electronic nose analysis and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). Results demonstrated that the addition of 10% fish oil microcapsules to dough containing 5% coconut-dried shrimp achieved the highest overall sensory score (83.20) and exhibited a desirable yellow hue consistent with consumer preferences. Compared with both the control and unencapsulated fish oil groups, microcapsule-enriched doughs showed lower noodle breakage and cooking loss, alongside increased cooking time and water absorption. Textural analysis revealed enhanced hardness and chewiness, with reduced resilience, compared with the control group, while rheological data confirmed a significant improvement in viscoelastic properties. GC-IMS analysis identified esters as the dominant volatile compounds contributing to the characteristic flavor profile. Collectively, these findings demonstrate that microencapsulation of fish oil effectively enhances the physicochemical and sensory quality of coconut-dried shrimp composite dough, providing a promising approach for developing omega-3-fortified staple foods with improved palatability and functionality.

Key words: dough; fish oil microcapsules; physicochemical properties; flavor characteristics

面团的营养成分主要以碳水化合物(淀粉)为主,其次是蛋白质,脂肪含量较低,单纯的面条不足以提供人体所需的营养。此外,面条的风味相对单一,食用时往往还要添加其他配料提供风味。近年来各种风味食品不断推出,其中椰子风味[1] 和海鲜风味[2] 由于其独特的风味特性和鲜明的地区特色而备受关注,并且都有一定的消费群体。

鱼油富含 Omega-3 多不饱和脂肪酸,其中包括二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA)是必需脂肪酸,具有广泛的健康功效,特别是对眼睛[3]、大脑和神经系统[4−6]、心血管系统[7]、肝脏保护[8] 等都有积极的功效。营养调查表明,我国膳食中 Omega-3 摄入量不足,从而导致我国健康大数据不容乐观,因此有营养专家倡议大力研发、生产与推广富含 Omega-3 脂肪酸的食品,践行“健康中国”战略,通过优化必需脂肪酸的膳食结构,提升全民营养健康水平[9]。

鱼油极其不稳定,食品中直接添加鱼油可能存在氧化酸败、风味冲突以及感官劣化等问题。而微胶囊处理是保持鱼油营养成分和感官特性的有效方法[10]。微胶囊技术将液体油脂转换成粉末油脂,解决液体油脂在工业生产中的应用瓶颈,粉末油脂均匀分散到食物组分中,提高产品便利性以及稳定性[11]。此外,微胶囊技术还可有效延缓油脂氧化并减少异味物质溢出,显著提升食品的风味、营养以及质量,延长产品保质期。GONZáLEZ 等[12] 在面团中加入奇亚籽油微胶囊,制备面包,发现添加微胶囊并没有改变面包的工艺品质,并且较未添加的面包口感更好。LUO 等[13] 将岩豆蛋白/阿拉伯胶-(乳酸链球菌素、苦瓜提取物、植物乳杆菌)微胶囊添加到面粉中,制备出具有适当流变特性,最佳蒸煮特性,保质期长的面条。此外,COMUNIAN 等[14] 将亚麻籽油微胶囊添加入面包制备过程中,发现得到的微胶囊及其游离成分加入面包中对蛋白质和脂质消化无显著影响。

本实验在前期研发的椰蓉-虾干面条的基础上,以直接添加鱼油为对照,通过测定面团的色泽、煮制特性、质构特性、流变特性、水分分布等指标,结合电子鼻、气相色谱离子迁移谱联用仪分析不同组风味间的差异,探究不同添加量的微胶囊对面团理化特性和风味的影响,为 Omega-3 营养强化风味面条的研发及鱼油微胶囊在主食产品中推广应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金枪鱼油 澳大利亚 Nu-MEGA 公司,实验前于−35 ℃ 冰箱保存;面粉、虾干 湛江市霞山区东风市场;椰蓉 文昌纯椰食品有限公司;维生素 E、酶法水解猪皮明胶(99% 生物技术级,BTG)(~200 g bloom) 中国麦克林生化科技有限公司;六偏磷酸钠(食品级) 湛江科铭有限公司;其他试剂均为分析纯。

阔吉粉碎研磨机 永康市图恩工贸有限公司;和面机 小熊电器股份有限公司;M-YM6 手动压面机 九阳股份有限公司;TA.XT plus C 质构仪 英国 Stab. Micro System 公司;HAAKE MARS Ⅲ型流变仪 赛默飞世尔科技公司;NMI 20-060H-I NMR 分析仪 上海纽迈电子科技有限公司;Flavour Spec® 气相离子迁移谱仪 德国 G.A.S 公司;PEN3 电子鼻 德国 Airsense 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 工艺流程

1.2.1.1 微胶囊的制备 微胶囊采用复合凝聚法制备,参考 XUAN 等[15] 的方法。将 16 g 金枪鱼油与 120 g 质量分数为 8% 的猪皮明胶溶液混合,先使用搅拌器于 1200 r/min 预乳化 5 min,再使用高速均质机于 20000 r/min 均质 10 min,制得金枪鱼油 O/W 乳液。将 100 g 新鲜制备的乳液与 100 g 质量分数为 0.53% 六偏磷酸钠溶液混合,置于 50 ℃ 循环恒温水浴锅中,并以 750 r/min 搅拌,逐滴加入 1% 磷酸溶液调节混合液 pH 引发复合凝聚反应,使用光学显微镜监测复合凝聚过程。待复合凝聚反应完成后,以 12 ℃/h 的速度将样品冷却至 5 ℃ 并保持 30 min,然后升温至 25 ℃,使微胶囊充分形成,经真空冷冻

干燥得到粉末。经检测，所制备的微胶囊中含油量为 53.26%±4.79%，水分含量为 2.18%±0.05%。

1.2.1.2　配料制备及面条制备　a.虾干预处理：将虾干去头、去壳，切除虾青素变色的红色部分，剩余部分切成小块。处理好的虾干在 120 ℃ 下烘干 1 h，超微研磨机中研磨 5 min，密封待用。

b.椰蓉预处理：将椰蓉在 120 ℃ 下烘干 1 h，超微研磨机中研磨 5 min，再在 120 ℃ 下烘干 1 h 后再研磨 5 min，密封待用。

c.在前期研究的基础上，将质量比 4∶1 的椰蓉与虾干在超微研磨机中研磨 5 min，将混合好的椰蓉-虾干混合物放入烘箱中 120 ℃、1 h，在中途 30 min 时取出进行研磨 5 min，使其混合更为充分，得到更充分的增香产物。

d.和面：总干基为 200 g，2 g 食盐溶解于 80 mL 水中。将面粉、椰蓉-虾干、鱼油微胶囊（或鱼油）加入到和面机中，加入水后混合均匀并搅拌形成表面光滑的面团，和面时间 40 min，醒面时间 1 h。

e.压面：将醒发好的面团置于小型压面机中。先以 4.0 mm 辊距压延 4 次；随后调整辊距至 2.0 mm 再压延 4 次；切条，最终面条厚度 2.0 mm，宽度 4.0 mm，长度 25.0 cm。

f.基于 5% 椰蓉-虾干、1% 金枪鱼油或不同添加量（5%、10%、15%）金枪鱼油微胶囊作为辅料，经和面、醒面、压面制备面条。0% 微胶囊添加量即辅料中只含有 5% 椰蓉-虾干，作为空白组。

1.2.2　面片色泽的测定　根据王贝贝等[16]的方法并稍作修改，取 10 cm×10 cm 的面片，取对角及中心 3 个位置进行色差值的测定。用标准的黑板和白板进行校正，校正后测定样品，记录 L^*（亮度）、a^*（红度）、b^*（黄度）值。

1.2.3　感官评价　参考秦永萍等[17]的方法并稍作修改，10 名评价员各自根据设定的评分标准，对面条的色泽、表观状态、光滑性、韧性、粘附性、气味这六个方面进行感官评定。评分结束后取这 10 位评价员评分的平均值作为综合评定结果，评价标准如表 1 所示。

1.2.4　面条煮制特性的测定　最佳煮制时间、煮熟断条率、吸水率以及烹煮损失率的测定根据王媛媛等[18]的方法并稍作修改。

1.2.4.1　最佳煮制时间的测定　取 20 根面条，置于 1 L 水中，使用 1800 W 功率的电磁炉煮制，每隔 15 s 取出一根，用镊子小心夹断，观察其横截面，当面条白芯完全消失时，对应的煮制时间即为最佳煮制时间。

1.2.4.2　煮熟断条率测定　取 50 根面条，置于 2 L 水中，使用 1800 W 的电磁炉进行煮制，将面条与常温水一同下锅，持续煮制 10 min，捞出面条，统计断条数（N 为断条数），按公式（1）计算断条率（S）。

$$S(\%)=\frac{N}{50}\times 100 \qquad 式（1）$$

表 1　面条的感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for noodles

指标	评价标准	得分（分）
色泽（20分）	色泽均匀，呈淡黄色，有光泽	16~20
	色泽均匀，呈黄色，光泽一般	12~15
	色泽不均匀，呈棕黄色，无光泽	0~11
表观状态（20分）	表面结构细密	16~20
	表面结构一般	12~15
	表面粗糙、膨胀、变形严重或者不成型	0~11
韧性（10分）	没有断裂，有弹性	8~10
	稍有断裂，稍有弹性	6~7
	断裂严重，弹性较弱	0~5
光滑性（15分）	表面光滑、细腻	12~15
	表面较为光滑、细腻	9~11
	表面粗糙、不细腻	0~8
粘附性（10分）	爽口，黏附牙齿感觉较低	8~10
	稍微黏附牙齿	6~7
	不爽口，黏附牙齿	0~5
气味（25分）	气味协调，鱼腥味较弱，无异味	20~25
	气味较为协调，鱼腥味弱，无异味	15~19
	气味不协调，鱼腥味强，有明显异味	0~14

1.2.4.3　面条的吸水率以及烹调损失率的测定　称面条质量 100 g（记为 M_1），置于 1 L 水中，使用 1800 W 功率的电磁炉煮至最佳煮制时间，捞出面条，冷水浸泡 1 min 以停止加热，后置于滤纸上吸干水分，称其质量（记为 M_2），最后将熟面条放到 105 ℃ 烘箱内烘至恒重，称取其质量（记为 M_3）。通过 M_1、M_2、M_3 测定面条煮制过程的质量变化，并按公式（2）和（3）计算面条煮制过程中的吸水率以及烹调损失率。

$$吸水率(\%)=\frac{M_2-M_1}{M_1}\times 100 \qquad 式（2）$$

$$烹调损失率(\%)=\frac{M_1\times(1-w)-M_3}{M_1\times(1-w)}\times 100 \qquad 式（3）$$

式（3）中，w 为面条煮前的水分含量，%。

1.2.5　面条煮后质构特性的测定　根据 Gao 等[19]的方法并稍作修改，取 20 根面条，置于 1 L 水中，使用 1800 W 功率的电磁炉煮至最佳煮制时间，捞出面条，冷水中浸泡 1 min 置于滤纸上吸干水分。用质构仪测定煮后面条的质构特性。探头 P/25，应变 35%，测试前中后速度分别为 0.8、0.8、0.8 mm/s，触发力为 5 g，两次压缩之间的时间间隔是 3 s。

1.2.6　面团流变特性的测定　根据 Zhou 等[20]的方法并稍作修改，使用压面机将面团压延成 4 mm 厚的面片，然后切割成 15 mm×15 mm 的方形面片，测定前使用圆形模具将面片压制成直径 10 mm 的圆形面片。振荡频率扫描：采用动态应变扫描法在 0.01%~100% 应变范围内测定线性粘弹性区域，频率为 10 rad/s，最后应变值固定在 1%。采用 35 mm 平板，设定测定间隙为 2 mm，温度为 25 ℃，平衡 5 min 后，使用流变仪在振荡频率为 0.1~10 Hz 下测定面片的储能模量（G'）和损耗模量（G"）。

1.2.7 面团水分分布的测定 根据 Chen 等[21] 的方法并稍作修改，使用压面机将面团压延成 4 mm 厚的面片，然后切割成 50 mm×50 mm 的方形面片。使用低频核磁共振仪-CPMG 脉冲序列测定面条的横向弛豫时间(T_2)。参数设置如下：共振频率 SF=21 MHz，采样点数 TD=1400194，采样频率 SW=100 kHz，采样间隔时间 TW=2000.000 ms，回波数 NECH=2000，累加次数 NS=64 次。

1.2.8 面条挥发性成分 GC-IMS 的测定 根据 Pu 等[22] 的方法并稍作修改。

进样条件：称取 2 g 样品于 20 mL 顶空瓶中，在 80 ℃ 下以 500 r/min 孵育 30 min，通过 1 mL 气密加热注射器将 500 μL 顶空样品以不分流模式注入自动进样器中，进样温度：80 ℃。GC 条件：色谱柱：MTX-5，柱温：60 ℃，载气/漂移气为氮气(纯度>99.999%)。载气流速程序：0~2 min 为 2 mL/min，2~25 min 线性增加至 100 mL/min，并保持至 30 min。IMS 条件：IMS 在温度 45 ℃ 和流速 150 mL/min 条件下运行。GC-IMS 的数据利用仪器自带的数据库(NIST 和 IMS)进行定性分析。

1.2.9 面条挥发性成分电子鼻的测定 根据 Yao 等[23] 的方法并稍作修改，准确称取 2 g 样品于 20 mL 顶空瓶内，将密封好的顶空瓶置于 60 ℃ 的水浴锅内平衡 1 h，随后插入电子鼻探头测定风味。

电子鼻的相关参数如下：洁净干燥空气为载气，设置电子鼻测定仪采样时间为 60 s，气体流量为 0.3 L/min，等待时间为 5 s，清洗时间为 60 s。选取传感器信号稳定后的值，每个样品重复采集 3 次。电子鼻传感器性能描述见表 2。

表 2 电子鼻传感器性能描述

Table 2 Performance description of electronic nose sensors

阵列序号	传感器名称	性能描述
1号	W1C	芳香成分，苯类
2号	W5S	灵敏度大，对氮氧化物很敏感
3号	W3C	芳香成分灵敏，氨类
4号	W6S	主要对氢化合物有选择性
5号	W5C	短链烷烃芳香成分
6号	W1S	对甲基类灵敏
7号	W1W	对硫化物灵敏
8号	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9号	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏
10号	W3S	对长链烷烃类灵敏

1.3 数据处理

本实验中的除感官评价外，数据均为 3 次平行实验的平均值。采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计分析，显著性差异为 $P<0.05$，并利用 Origin 2025 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 鱼油及不同添加量的鱼油微胶囊对面团色泽的影响

面团色泽参数测定结果如表 3 所示。添加鱼油及鱼油微胶囊，面团的亮度都会有所降低，从空白组的 79.41 显著降低到 69.35($P<0.05$)，添加微胶囊组红度值(a^*)从 2.89 增加至 5.79，1% 鱼油添加组 a^*升高至 6.02，所有实验组黄度值(b^*)均显著增加($P<0.05$)，从 18.39 到 27.56。上述结果表明，鱼油与微胶囊的添加都会显著影响面团的色泽($P<0.05$)。

表 3 不同添加量鱼油微胶囊对面团色泽的影响

Table 3 Effect of fish oil microcapsules with different additives on the color of doughs

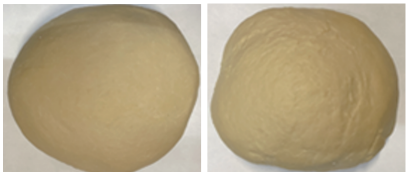
组别	色泽		
	L^*	a^*	b^*
空白组	79.41±0.50^a	2.89±0.16^d	18.39±0.77^d
1%鱼油	75.37±0.33^b	6.02±0.06^a	20.68±0.47^c
5%微胶囊	72.62±0.30^c	5.19±0.14^c	23.59±0.63^b
10%微胶囊	71.76±0.16^d	5.34±0.16^c	26.89±0.09^a
15%微胶囊	69.35±0.33^e	5.79±0.15^b	27.56±1.02^a

注：不同小写字母表示组间显著性差异，$P<0.05$，表4~表6同。

如图 1 所示，微胶囊的添加会使面团呈现明显的黄色，而 1% 鱼油添加则会使面团略微发红。消费者对面制品的黄色接受度普遍高于红色[24]。与直接添加油脂相比，微胶囊的添加产生的色泽的变化更符合消费者的偏好。



空白组 1% 鱼油 5% 微胶囊



10% 微胶囊 15% 微胶囊

图 1 不同面团外观

Fig.1 Appearance of different doughs

2.2 鱼油及不同添加量的鱼油微胶囊对面条感官特性的影响

依据表 1 的评分标准，对面条的色泽、表观状态、光滑性、韧性、粘附性、气味进行感官评定。结果如表 4 所示，鱼油添加组面条的感官得分总分最低，该组面条的光泽黯淡，且带有明显的鱼油腥味，并且其粘附性与韧性得分也较低，表明面条结构稳定性下降，更易断裂，弹性减弱，从而导致口感劣化，接受度较差。相比之下，添加 5% 与 10% 鱼油微胶囊的面条在色泽、气味、粘附性及韧性等指标的得分与空白组接近。但当微胶囊添加量增加至 15% 时，多项感官评分有所下降，因此应适当控制微胶囊的添加量。综上所述，以微胶囊形式添加鱼油，相较于直接添加，可更好维持面条原有感官品质。

表 4　不同面条的感官评分

Table 4　Sensory ratings of different noodles

组别	色泽	表观状态	韧性	光滑性	粘附性	气味	总分
空白组	15.30±0.48^{c}	17.10±0.88^{b}	5.40±0.52^{b}	14.60±0.52^{a}	7.00±0.67^{a}	21.00±0.82^{a}	80.40±0.84^{b}
1%鱼油	11.50±0.53^{e}	16.30±0.48^{b}	4.40±0.52^{c}	13.00±0.82^{b}	4.30±0.48^{d}	16.50±0.53^{c}	66.00±1.56^{d}
5%微胶囊	16.90±0.74^{b}	18.50±0.53^{a}	4.60±0.52^{c}	14.70±0.67^{a}	6.30±0.48^{b}	19.40±0.52^{b}	80.40±1.17^{b}
10%微胶囊	17.70±0.48^{a}	18.60±0.52^{a}	6.40±0.52^{a}	15.10±0.57^{a}	6.40±0.52^{ab}	19.00±0.82^{b}	83.20±1.48^{a}
15%微胶囊	14.30±0.48^{d}	17.00±0.67^{b}	5.70±0.67^{ab}	15.00±0.82^{a}	5.50±0.53^{c}	17.30±0.48^{c}	74.80±1.32^{c}

2.3　鱼油及不同添加量的鱼油微胶囊对面条煮制特性的影响

添加鱼油及系列微胶囊面条的煮制特性如表 5 所示，鱼油添加组面条与空白组相比，煮制时间无显著性差异（P>0.05），但显著低于微胶囊组面条（P<0.05），这可能是直接添加油脂会包裹面粉颗粒，内部水合不充分[25]，面条的结构变得更松散，缩短了煮制时间。在断条率方面，鱼油添加组面条的断条率显著高于各实验组（P<0.05），而不同微胶囊添加组面条间以及空白组无显著性差异（P>0.05），这表明相较于鱼油直接添加，微胶囊形式的添加更有利于维持面条结构的完整性。在吸水率以及烹调损失率方面，5% 与 10% 微胶囊组面条结果优于 15% 微胶囊组面条以及鱼油组面条，表现出更低的烹调损失率与更高的吸水率，说明淀粉糊化充分，固体物质流失少，面条口感品质更优。

2.4　鱼油及不同添加量的鱼油微胶囊对面条质构特性的影响

添加鱼油及系列微胶囊面条的质构特性如表 6 所示。从表 6 可知，微胶囊和鱼油的添加显著增加了面条硬度、粘性、咀嚼性（P<0.05）。硬度与咀嚼性之间呈正相关关系。油脂的添加会抑制面条在煮制过程中的吸水作用，引起面条硬度上升，从而提高其咀嚼性[26]；此外，鱼油中所含的甘油酯成分可作为乳化剂与淀粉、面筋蛋白发生相互作用[27]，从而使面团更加致密，进而导致面团硬度增加。在回复性方面，所有实验组的回复性均呈现下降趋势，由空白组的 0.14 降低到 0.11，降低了约 21.43%。弹性指标在各组间未呈现显著性差异（P>0.05），在 0.32~0.36 间。微胶囊添加量为 10% 时，弹性为组间最大值（0.36），粘性为−34.02 g·sec。综合各项质构参数可知，微胶囊添加量为 10% 时能够赋予面团较好的质构特性。

2.5　鱼油及不同添加量的鱼油微胶囊对面团流变特性的影响

动态流变是探究和评价面团流变特性分析的常用手段之一。如图 2 所示，在频率测定范围内，不同面团的储能模量（G'）和损耗模量（G"）的变化趋势一致，均表现为随着频率的增加而增大，且 G'始终高于 G"，表明符合面团的类固体性质且弹性特征明显。面团的黏弹性可以用 G'和 G"表示，与面筋蛋白的聚集密切相关[28]。5% 微胶囊组面团的 G'值在所有实验组中最低，10% 微胶囊添加组面团表现出最优的流变特性，其 G'和 G"值均为最高，说明适量微胶囊与面筋-淀粉基质之间形成相对稳定且连续的网络结构，增强面团抗形变能力，为面团提供良好的支撑，增强面团弹性。另外，鱼油添加组面团的 G'和 G"值均

表 5　不同面条的煮制特性

Table 5　Cooking characteristics of different noodles

组别	煮制特性			
	最佳煮制时间(s)	煮熟断条率(%)	吸水率(%)	烹调损失率(%)
空白组	409.67±3.06^{d}	9.33±1.15^{b}	36.58±0.23^{c}	12.14±0.18^{a}
1%鱼油	414.33±4.04^{d}	15.33±3.06^{a}	38.00±0.31^{b}	10.67±0.64^{b}
5%微胶囊	443.33±3.51^{a}	9.33±2.31^{b}	41.30±0.78^{a}	7.41±0.27^{c}
10%微胶囊	434.33±2.08^{b}	8.67±1.15^{b}	38.03±0.35^{b}	7.72±0.12^{c}
15%微胶囊	421.00±2.65^{c}	8.67±3.06^{b}	37.24±0.15^{bc}	8.23±0.28^{c}

表 6　不同面条的质构特性

Table 6　Textural properties of different noodles

组别	硬度(g)	粘性(g·sec)	弹性	咀嚼性	回复性
空白组	174.10±7.33^{d}	−16.15±0.82^{a}	0.34±0.04^{a}	24.25±1.77^{e}	0.14±0.01^{a}
1%鱼油	317.47±6.27^{b}	−20.28±0.37^{b}	0.34±0.01^{a}	74.68±3.48^{b}	0.12±0.004^{b}
5%微胶囊	176.50±9.57^{d}	−23.53±1.98^{b}	0.34±0.02^{a}	49.64±2.35^{d}	0.12±0.003^{bc}
10%微胶囊	287.99±4.85^{c}	−34.02±3.35^{c}	0.36±0.02^{a}	68.72±4.30^{c}	0.12±0.001^{bc}
15%微胶囊	378.05±16.81^{a}	−43.18±1.11^{d}	0.32±0.01^{a}	88.24±0.42^{a}	0.11±0.002^{c}

低于空白组，可能是直接添加油脂会包裹蛋白质和淀粉颗粒，阻碍面筋网络的发展[29]，导致面团弹性降低、流动性增加。因此，综合质构特性与流变特性分析可知，当微胶囊添加量为 10% 时，面团的弹性性能最佳。

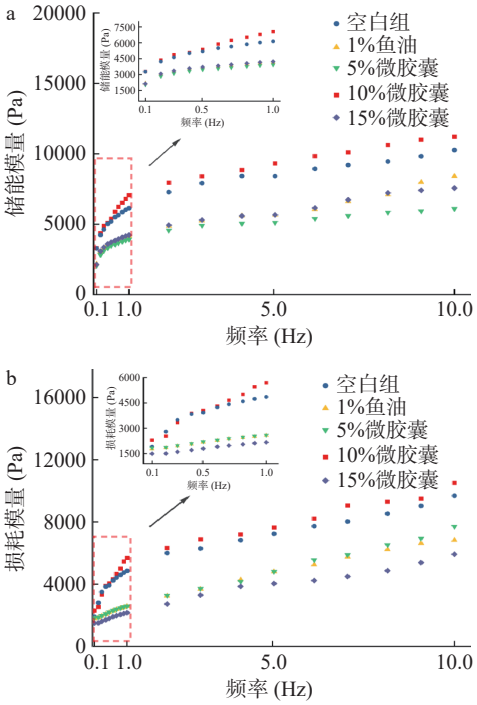


图 2 不同面团的储能模量 G'(a)和损耗模量 G"(b)

Fig.2 Modulus of elasticity G' (a) and modulus of loss G" (b) for different doughs

2.6 鱼油及不同添加量的鱼油微胶囊对面团水分分布的影响

面团的水分分布可影响面团成分的相互作用，从而影响其可塑性和结构特性[30]。利用低场核磁共振仪检测出新鲜面团样品中的水分状态主要有三类：强结合水 T_{21}、弱结合水 T_{22} 和自由水 T_{23}。如图 3 所示，面团中的水分主要以弱结合水(T_{22})形式存在，其在所有实验组中的比例(P2)均超过 91%(图 3b)，而强结合水(T_{21})所占比例(P1)均低于 0.1%。强结合水响应信号普遍较低，可能是椰蓉-虾干的添加破坏了面筋-淀粉体系的连续性，导致水分无法被紧密锁定。在弱结合水方面，微胶囊添加组面团中弱结合水(T_{22})信号强度大于鱼油组面团以及空白组，其中 10% 微胶囊添加组面团 T_{22} 信号强度最大，这也可能是由于微胶囊与面筋-淀粉基质形成了相对稳定且连续的网络结构，从而将水分更有效地束缚在体系中，降低其流动性，使面团质地更柔软且富有弹性。相比之下，鱼油面团组 T_{22} 与 T_{23} 响应值较小，说明直接添加油脂可能干扰了面团的水合过程[31]，保水性能降低，体系固定和稳定水分的能力下降，进而影响面团的品质。因此，添加鱼油微胶囊在改善面团水分分布方面更优。

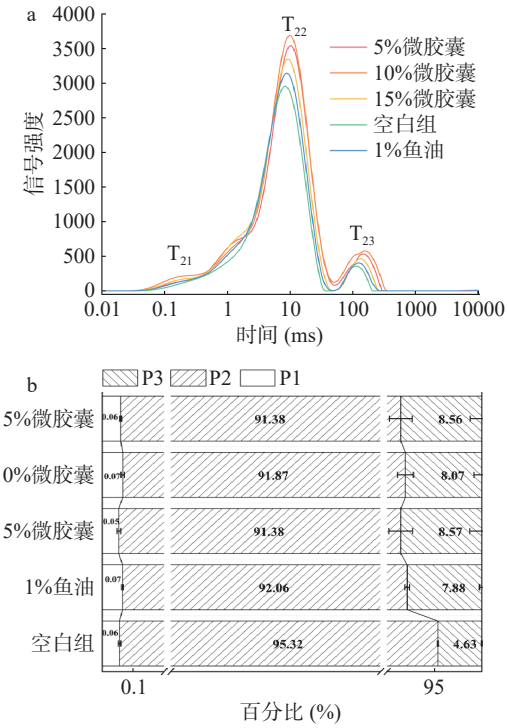


图 3 不同面团水分分布(a)和不同面团中 P1、P2 以及 P3 占比情况(b)

Fig.3 Moisture distribution of different doughs (a), and percentage of P1, P2 and P3 in different doughs (b)

2.7 不同面条挥发性成分的 GC-IMS 分析

通过 GC-IMS 分析(图 4)，在 5 组面条中共鉴别出 51 种单体或二聚体挥发性物质，其中酯类 14 种、醇类 7 种、酮类 7 种、醛类 5 种、酸类 4 种、烯类 4 种、吡嗪类 2 种、呋喃类 1 种、醚类 1 种、其他化合物 6 种。酯类物质具有果香、果香风味[32]；醇类的香味比较淡，但能够为食物提供一种绵长而柔和的口感[33]；酮类主要通过不饱和脂肪酸的热氧化或氨基酸的降解而产生，可赋予独特香气和果味[34]；呋喃是咖啡、焦糖、青草风味的重要来源[35]。

如图 5 所示，五组面条的指纹图谱在挥发性物质上存在明显差异，可将其主要差异区域划分为 A、B、C、D、E 五个区。其中，E 区为微胶囊组面条中未检出的挥发性物质，共包括 3 种物质，分别为乙醇、甲酸乙酯和丙醛。D 区为空白组与微胶囊组面条均未检出的挥发性物质，该区域共鉴定出 21 种化合物，包括反式-2-戊烯醛、2,3-丁二酮、顺-2-戊烯醇、3-庚烯-2-酮等，这些物质多属于不良风味物质，推测可能源于面条加工过程中脂质氧化所产生的挥发性代谢产物[36]。C 区为空白组未检出的挥发性物质，共鉴定出 4 种成分，分别为 1-戊烯-3-醇、2-甲基丙酸、苯甲醛及 N-亚硝基二乙胺。A 区为鱼油组面条未检出的挥发性物质，该区域共检出 7 种成分，其中包括 3 种酯类和 1 种呋喃类化合物，均属于优良挥发性物质。B 区为空白组与鱼油组面条均未检出(即微胶囊组面条特有的挥发性物质)，共鉴定出 8 种物质，包

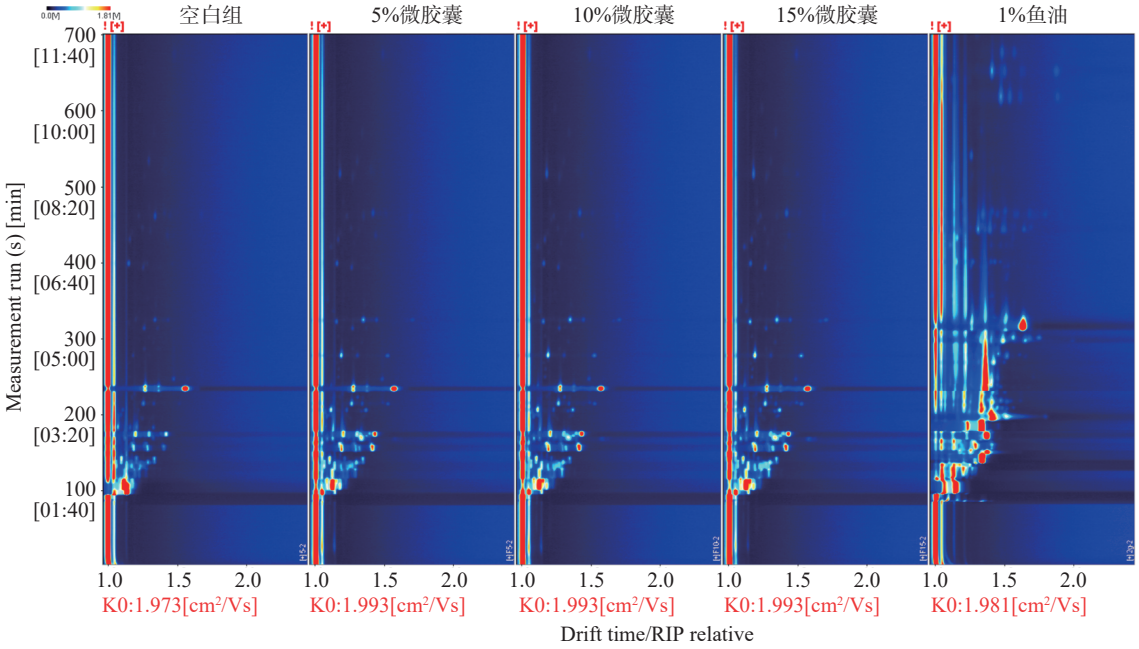


图 4　不同面团的挥发性物质的 GC-IMS（二维）谱图

Fig.4　GC-IMS (2D) spectra of volatiles from different doughs

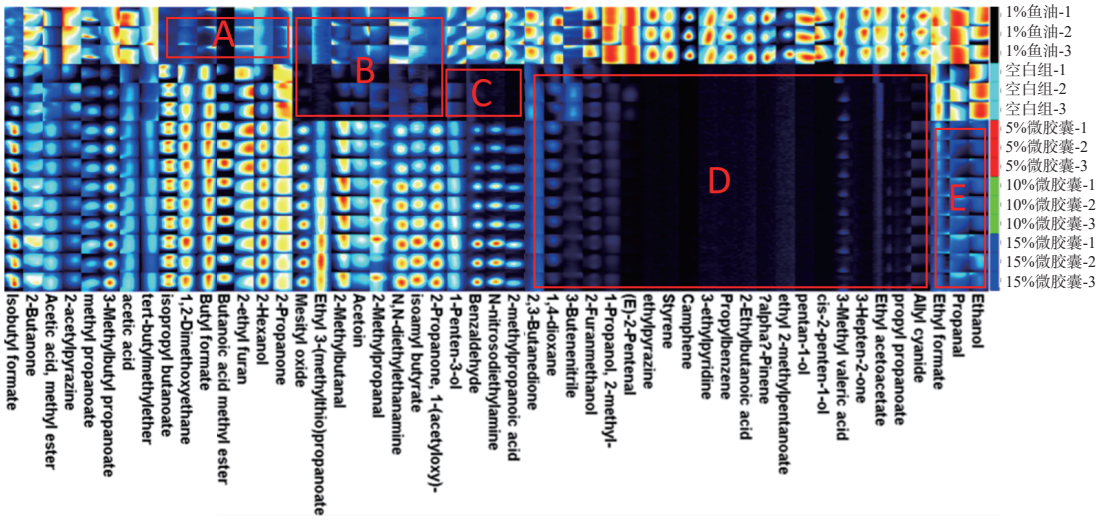


图 5　不同面团的指纹图谱

Fig.5　Fingerprinting of different doughs

括 4 种酯类和 1 种吡嗪类化合物，同样以酯类为主，说明微胶囊的添加引入了烘烤与果香类气味成分。

对比直接添加鱼油与添加鱼油微胶囊的面条发现：鱼油贡献了更丰富的风味物质，但其不饱和脂肪酸易发生氧化，易产生不良挥发性物质，导致整体风味失衡。鱼油微胶囊则因其技术上的缓释和保护作用，使其面条的整体风味更佳。

2.8　不同面条挥发性成分的电子鼻分析

电子鼻对面条风味特征分析的结果，如图 6(a)所示。在 10 个传感器中，W5S（对氮氧化合物敏感）和 W1W（对硫化物敏感）的响应信号最为显著。鱼油及微胶囊的添加均降低了硫化物类风味物质的响应，说明减少了硫化物类风味物质的产生。鱼油及微胶囊的添加增加了氮氧化合物风味物质的响应，且微胶囊组面条的氮氧化合物响应高于鱼油组面条，可能归因于微胶囊蛋白质壁材的贡献，增强了 W5S 的响应。但对于不同微胶囊添加量的实验组，其组间响应差异不大。

利用主成分分析法对鱼油及不同添加量的鱼油微胶囊面条进行分析，由图 6(b)可知：第一主成分（PC1）贡献率达 74.8%，第二主成分（PC2）贡献率为 10.7%，累计贡献率达到 85.5%，能够有效反映面条的整体风味特征。不同微胶囊添加量面条在 PCA 图中分布较为集中，表明组间风味差异较小，其气味有一定的相似性。这一结果与传感器响应模式相互印证不同微胶囊添加量面条响应相似。电子鼻结果说明微胶囊处理能够有效调控面条的风味特征，且产品具有良好的风味一致性。

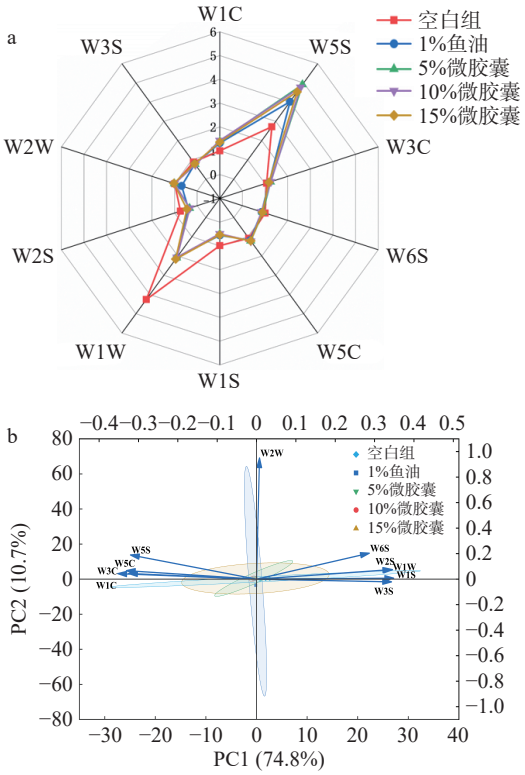


图 6 不同面团的电子鼻雷达图(a)和电子鼻 PCA(b)

Fig.6 E-nose radargrams (a), and E-nose principal component analysis for different doughs (b)

3 结论

本研究以椰蓉-虾干为配料制备风味面团，以 1% 鱼油为对照，研究了不同添加量(5%、10%、15%)鱼油微胶囊对面团感官、煮制特性以及风味等特性的影响。通过综合评价面团色泽、煮制特性、质构特性、流变特性、水分分布以及挥发性物质等指标，发现相较于直接添加鱼油，采用微胶囊形式添加鱼油可有效改善面条色泽、遮蔽不良气味，并提升气味协调性与整体可接受度。质构与流变学测试结果显示，微胶囊组面团具有更优的弹性表现；水分分布的结果也显示其表现出更优的水分分布特征。在风味方面，微胶囊化处理亦发挥了积极的修饰与提升作用，赋予面条烘烤类香气。综合比较得出，10% 鱼油微胶囊为最优添加量，该配比在维持面条原有感官品质与面筋网络结构完整性的同时，实现了营养强化与风味的综合提升。本研究为功能性面制品的开发提供了重要的理论依据和实践指导，为 Omega-3 营养强化风味面条的研发以及鱼油微胶囊在主食产品中推广应用提供参考依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 孟庆, 闫泽华, 孙亚楠. 响应面法优化芸豆椰香酥性饼干配方[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1271−1278. [MENG Qing, YAN Zehua, SUN Yanan. Optimization of formula of kidney bean and coconut short biscuit by response surface methodology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(4): 1271−1278.]

[2] 魏骊霖, 吕元萌, 刘春娥, 等. 海鲜风味基料的研究进展[J]. 中国水产, 2025(6): 54−56. [WEI Lilin, LÜ Yuanmeng, LIU Chune, et al. Research progress on seafood flavored basic materials[J]. China Fisheries, 2025(6): 54−56.]

[3] YE Huali, LIU Yunyi, XU Zhike, et al. Fish oil in glaucoma treatment: From biological functions to clinical potential[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2023, 67(11): 2200727.

[4] ARSECULARATNE A, KAPINI R, LIU Y, et al. Combination therapy for sustainable fish oil products: Improving cognitive function with n-3 PUFA and natural ingredients[J]. Biomedicines, 2024, 12(6): 1237.

[5] MORENO F, MÉNDEZ L, FERNÁNDEZ I, et al. Influence of the degree of unsaturation in fish oil supplements on oxidative stress and protein carbonylation in the cerebral cortex and cerebellum of healthy rats[J]. Antioxidants, 2024, 13(11): 1408.

[6] BASRA M, PATEL S, SHAH K, et al. Exploring the role of fatty acid supplementation in persons with Alzheimer's disease: A scoping review[J]. Alzheimer's & Dementia, 2024, 20(S4): e090004.

[7] KALKAN E, KESKIN ÇAVDAR H, MASKAN M. Health impacts and innovative extraction methods of fish oil: A review[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2025, 127(2): e202400171.

[8] LIN Hao, ZHOU Sishun, LI Xianyu, et al. Effects of oxidized fish oil diet supplemented with tea polyphenols on intestinal health and liver metabolism of spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*)[J]. Aquaculture Reports, 2024, 37: 102201.

[9] 康景轩. 研发生产富含 Omega-3 脂肪酸食品是改善民众营养健康状况的重要饮食策略[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(3): 41−45,18−19. [KANG Jingxuan. Development and production of omega-3 fatty acids-enriched foods is an important dietary strategy to improve people's nutritional and health status[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(3): 41−45,18−19.]

[10] BAŞYIĞIT B, SAĞLAM H, KANDEMIR Ş, et al. Microencapsulation of sour cherry oil by spray drying: Evaluation of physical morphology, thermal properties, storage stability, and antimicrobial activity[J]. Powder Technology, 2020, 364: 654−663.

[11] SULTANA M, CHAN E S, JANARTHANAN P, et al. Functional orange juice with *Lactobacillus casei* and tocotrienol-enriched flaxseed oil co-encapsulation: Physicochemical properties, probiotic viability, oxidative stability, and sensorial acceptability[J]. LWT, 2023, 188: 115388.

[12] GONZÁLEZ A, MARTÍNEZ M L, LEÓN A E, et al. Effects on bread and oil quality after functionalization with microencapsulated Chia oil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(13): 4903−4910.

[13] LUO Songming, CHEN Jundong, ZENG Yuanbo, et al. Effect of water-in-oil-in-water (W/O/W) double emulsions to encapsulate nisin on the quality and storage stability of fresh noodles[J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100378.

[14] COMUNIAN T A, FREITAS D, DROUIN G, et al. Semi-dynamic *in vitro* digestion of sourdough bread enriched with flaxseed oil coacervates[J]. Food Structure, 2024, 40: 100371.

[15] XUAN Junyong, XIA Qiuyu, LI Yanyang, et al. Enzymatically produced acylglycerol and glycerin monostearate additives improved the characteristics of gelatin-stabilized omega-3 emul-

sions and microcapsules[J]. Food Chemistry, 2024, 448: 139135.
[16] 王贝贝, 张永顺, 郭洪涛, 等. 亚麻籽粉对面条品质和消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 72−79. [WANG Beibei, ZHANG Yongshun, GUO Hongtao, et al. Effects of flaxseed powder on the quality and digestive characteristics of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 72−79.]
[17] 秦永萍, 曾鹏, 房丹丹, 等. 沙棘果渣添加量对面条品质及消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 112−121. [QIN Yongping, ZENG Peng, FANG Dandan, et al. Effect of sea buckthorn pomace addition on the quality and digestive attributes of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 112−121.]
[18] 王媛媛, 张建国, 王挥, 等. 脱脂椰蓉对面粉糊化特性及鲜湿面条品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(10): 110−114. [WANG Yuanyuan, ZHANG Jianguo, WANG Hui, et al. Effect of defatted desiccated coconut on the pasting properties of wheat flour and the quality of fresh wet noodles[J]. The Food Industry, 2020, 41(10): 110−114.]
[19] GAO Haiyan, WANG Zhaojun, DAI Yunfei, et al. Effects of Chia seed gum on the physicochemical properties of frozen dough and the quality of dumplings[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127280.
[20] ZHOU Tongtong, ZHANG Liang, ZHAO Ruixuan, et al. Effects of particle size distribution of potato starch granules on rheological properties of model dough underwent multiple freezing-thawing cycles[J]. Food Research International, 2022, 156: 111112.
[21] CHEN Yanyan, LI Xuqin, XU Fei, et al. Effects of inulin with different polymerisation degrees on dough rheology and water distribution in the fresh noodles[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(10): 5418−5429.
[22] PU Dandan, ZHANG Huiying, ZHANG Yuyu, et al. Characterization of the aroma release and perception of white bread during oral processing by gas chromatography-ion mobility spectrometry and temporal dominance of sensations analysis[J]. Food Research International, 2019, 123: 612−622.
[23] YAO Jianli, ZHANG Qingan, LIU Mengjia. Utilization of apricot kernel skins by ultrasonic treatment of the dough to produce a bread with better flavor and good shelf life[J]. LWT, 2021, 145: 111545.
[24] BARRAGÁN-MARTÍNEZ L P, ROMÁN-GUERRERO A, VERNON-CARTER E J, et al. Impact of fat replacement by a hybrid gel (canola oil/candelilla wax oleogel and gelatinized corn starch hydrogel) on dough viscoelasticity, color, texture, structure, and starch digestibility of sugar-snap cookies[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 29: 100563.
[25] OPALUWA C, LOTT T, KARBSTEIN H P, et al. Encapsulation of oil in the high moisture extrusion of wheat gluten: Interrelation between process parameters, matrix viscosity and oil droplet size[J]. Future Foods, 2023, 7: 100222.
[26] DEVI A, SINDHU R, KHATKAR B S. Effect of fats and oils on pasting and textural properties of wheat flour[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(10): 3836−3842.
[27] LEAHU A, GHINEA C, ROPCIUC S, et al. Textural, color, and sensory analysis of cookies prepared with hemp oil-based oleogels[J]. Gels, 2025, 11(1): 46.
[28] LIU Yixuan, LENG Yue, XIAO Shensheng, et al. Effect of inulin with different degrees of polymerization on dough rheology, gelatinization, texture and protein composition properties of extruded flour products[J]. LWT, 2022, 159: 113225.
[29] MA R, HAN Sihai, SONG Jingzheng, et al. Rheology, moisture distribution, and retrogradation characteristics of dough containing peony seed oil and quality of corresponding steamed bread [J]. Foods, 2025, 14(9): 1505.
[30] ZHAO Ahui, SHI Peiwen, YANG Runqiang, et al. Isolation of novel wheat bran antifreeze polysaccharides and the cryoprotective effect on frozen dough quality[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107446.
[31] ZHANG Yujin, CHAI Xiuhang, CHEN Rong, et al. Microstructural and crystallinity changes in starch-gluten model dough with varying palm oil solid fat content[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 368: 124103.
[32] SONG Xiaojuan, LIAO Dan, ZHOU Yan, et al. Correlation between physicochemical properties, flavor characteristics and microbial community structure in Dushan shrimp sour paste[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101543.
[33] JIANG Qixing, ZHANG Haifeng, GAO Pei, et al. Effects of different thermal methods and degrees on the flavor of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fillets: Fatty acids, volatile flavor and taste compounds[J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140887.
[34] YANG Tingting, LIU Yang, BAI Jing, et al. The formation pathway of flavor compounds in steamed Antarctic krill (*Euphausia superba*) based on untargeted metabolomics[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102075.
[35] LI Kexin, CHENG Kexin, LIU Huan, et al. Investigation of the interaction between collagen and furan derivatives during the heating process via multidimensional spectroscopy and GC-MS technology[J]. Food Chemistry, 2025, 468: 142484.
[36] ZHAO Tengfei, CAO Zhongqi, YU Jin, et al. Gas-phase ion migration spectrum analysis of the volatile flavors of large yellow croaker oil after different storage periods[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 813−822.