蒋平, 郭永军, 李永仁, 等. 硬壳蛤超高压处理液冻干粉对山药蛤蜊酱减盐增鲜效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 167−174. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060163

JIANG Ping, GUO Yongjun, LI Yongren, et al. Effect of Salt Reduction and Umami Enhancement of the MFP_3-D on the Sauce with Yam and Clam[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 167−174. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060163

· 研究与探讨 ·

硬壳蛤超高压处理液冻干粉对山药蛤蜊酱减盐增鲜效果的影响

蒋　平[1,2], 郭永军[3], 李永仁[3], 周　纷[1,2], 任小青[1,2,*]

（1.天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300392;
2.国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心（天津）, 天津 300392;
3.天津农学院水产学院, 天津 300392）

摘　要: 本研究以硬壳蛤超高压处理液冻干粉（MFP_3-D）为原料，将其按不同比例（0∶2、1∶2、1∶3、1∶1、3∶1、2∶0）替代山药蛤蜊酱中的食用盐（分别编号为 S0、S1、S2、S3、S4、S5），探究其减盐增鲜的效果。结果表明，随着 MFP_3-D 替代量的增加，产品的盐分含量极显著下降（P<0.01），与对照组 S0 相比，S5 组的咸味值显著降低（P<0.05），S4 组的咸味值与对照组 S0 无显著差异（P>0.05），S2、S3、S4、S5 组的鲜味值均极显著高于对照组 S0（P<0.01），其中 S4、S5 组鲜味值最高。相比 S0，S4 中起增鲜作用的谷氨酸和天冬氨酸的含量极显著增加（P<0.001），呈良好香气和可增强咸鲜味感知的正丁醛、乙酸乙酯、2-丁酮等挥发性物质的浓度增加。综上结果表明，S4 组不仅能达到“减盐增鲜”的目的，还可以丰富山药蛤蜊酱的香气。

关键词: 硬壳蛤, 超高压处理液, 冻干粉, 减盐增鲜, 山药蛤蜊酱

中图分类号: S986.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0167−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060163

本文网刊:

Effect of Salt Reduction and Umami Enhancement of the MFP_3-D on the Sauce with Yam and Clam

JIANG Ping[1,2], GUO Yongjun[3], LI Yongren[3], ZHOU Fen[1,2], REN Xiaoqing[1,2,*]

（1.College of Food Science and Biological Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China;
2.National Bulk Freshwater Fish Processing Technology R & D Sub-center (Tianjin), Tianjin 300392, China;
3.College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China）

Abstract: In order to explore the effect of salt reduction and umami enhancement of the MFP_3-D (freeze-dried powder obtained with ultra-high pressure treatment liquid of *Mercenaria mercenaria*) on the sauce with yam and clam. The MFP_3-D was used to replace the edible salt in sauce with yam and clam in different ratios (0∶2, 1∶2, 1∶3, 1∶1, 3∶1, 2∶0) (numbered group S0, S1, S2, S3, S4, S5, respectively). The results showed that with the increasing of MFP_3-D, the salt content of the products showed a significant decreasing trend (P<0.01), compared with the control group S0, the saltiness of group S5 was significantly lower than that of S0 (P<0.05), while the saltiness of group S4 showed no significant difference with that of S0 (P>0.05), the umami of group S2, S3, S4, S5 was significantly higher than that of S0 (P<0.01), and the umami of group S4, S5 was the highest. Compared with control group S0, the contents of glutamic acid and aspartic acid of group S4 which play a role in enhancing umami were significantly increased (P<0.001), the contents of volatile substances such as butyralde-

收稿日期: 2025−06−16

基金项目: 2024 年中央引导地方科技发展资金优秀农业科技特派员项目（24ZYCGSN01190）; 天津市淡水养殖产业技术体系创新团队（水产品加工岗位）项目（ITTFRS2021000）; 国家重点研发计划（23YDTPJC00560）; 天津市科技计划项目（23YDTPJC00560, 24YDTPJC00820, 24ZYCGSN01210）。

作者简介: 蒋平（1996−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品精深加工技术, E-mail: 2869796206@qq.com。

*** 通信作者:** 任小青（1976−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品精深加工技术, E-mail: rrr76@sina.com。

hyde, ethyl acetate, and 2-butanone which play a role in presenting a good aroma and enhancing the perception of salty and umami flavors were increased. In conclusion, the group S4 can not only achieve the objective of reducing salt and enhancing umami, but also enrich the aroma of the sauce with yam and clam.

Key words: *Mercenaria mercenaria*; ultra-high pressure treatment liquid; freeze-dried powder; salt reduction and umami enhancement; sauce with yam and clam

食用盐在水产制品的加工及储存中起着不可或缺的作用,对产品的理化品质、感官品质及货架期具有重要影响,摄入过量的钠会增加高血压和心血管疾病、肾脏病等慢性疾病的患病风险[1−3]。根据《中国居民膳食指南(2022)》推荐,人均每日摄入盐少于 5 g,但中国成年人平均每日膳食盐摄入量仍高达 10.5 g[4]。所以水产制品的研究方向应向低盐化趋势发展,目前水产制品的减盐主要聚焦于替代食用盐、改善食用盐形态、应用新技术提高食用盐的使用效率、减少食用盐的使用量等方面[5]。

硬壳蛤(*Mercenaria mercenaria*)具有高营养和高经济价值,但其个大壳厚使得热加工开壳时间长,易造成品质改变,影响后续产品的深加工。因此非热技术逐渐走上舞台,其中超高压开壳技术能较好地保留产品的色泽和香气,保持产品原有的营养和感官品质[6],但脱壳取肉后遗留下的处理液,直接排放会给环境造成污染。硬壳蛤超高压处理液同其他水煮液/蒸煮液等液体副产物一样,经多批次重复利用后会富集许多风味和营养物质,目前关于贝类液体副产物相关研究和利用的报道多集中在水煮液和蒸煮液方面。比如,黄会等[7] 研究发现栉孔扇贝蒸煮开壳后遗留的蒸煮液中存在大量的多糖、蛋白质、牛磺酸、多肽和皂苷等营养成分;步营等[8] 采用酶解处理蓝蛤蒸煮液,并对比了蓝蛤蒸煮液和蓝蛤酶解液加入到花蛤酱后对酱的风味改善情况;魏婉露[9] 以扇贝废弃液多糖为原料,对扇贝废弃液多糖进行了分离纯化以及模拟消化实验。课题组前期对硬壳蛤超高压处理液经脱盐、浓缩、冻干等工序制成的冻干粉(MFP_3-D)进行了滋味特征研究,发现 MFP_3-D 咸鲜味浓郁,可开发为一种香气丰富、咸鲜味浓郁的海鲜调味料。

山药是一种营养丰富的药食同源的物质,含有多种生物活性成分,如多糖、多酚、皂苷等,这些生物活性物质具有抗糖尿病、抗氧化、调节免疫、缓解肠炎等功能特性[10],因其独特的价值深受消费者喜欢。近年来,山药和其他原材料联合应用的研究层出不穷,比如山药奶制品[11]、山药面制品[12]、山药调味品[13]、山药肉制品[14] 等,课题组前期用山药和蛤肉开发出含盐量 2% 的山药蛤蜊酱,但由于无法满足低盐的要求,本研究用 MFP_3-D 以 6 种不同比例(0∶2、1∶2、1∶3、1∶1、3∶1、2∶0)替代山药蛤蜊酱中的食用盐,通过电子舌技术探究最佳替代比,通过对比对照组和最佳替代比之间的挥发性风味、游离氨基酸、核苷酸指标,分析 MFP_3-D 添加对山药蛤蜊酱风味的影响,为 MFP_3-D 在减盐增鲜领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

硬壳蛤　天津农学院水产学院养殖基地天津恒仟水产养殖公司提供;山药、大葱、生姜、大蒜、白胡椒粉、小米椒、料酒(食品级)　天津市西青区大润发超市;大豆油(食品级)　金龙鱼粮油食品股份有限公司;硝酸银、基准氯化钠、浓硝酸　分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

SA402B 电子舌　日本 INSENT 公司;CM-5000 高效液相色谱仪　日本日立公司、SYKAM433D 氨基酸分析仪　德国曼默博尔公司;ACL-2007 电磁炉　江门市威多福电器有限公司;ML204T/02 电子天平　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;EDC-PB1 破壁机　宜盾普(广东)智能科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　MFP_3-D 制备　硬壳蛤从基地取回后进行清洗处理,在实验室暂养 2 d 后进行分选处理,剔除死亡的硬壳蛤,并将鲜活的硬壳蛤表面刷洗干净。按照水∶硬壳蛤为 1∶3 的比例装袋放入超高压设备,施加 300 MPa,保压 6 min,开袋分离蛤壳、蛤肉和处理液,处理液循环使用,留取最终超高压处理液用中速滤纸过滤,参考何成等[15] 的方法进行脱盐,再旋转浓缩,将浓缩液冻干处理,所得冻干粉命名为 MFP_3-D。

1.2.2　替代实验设计　根据 MFP_3-D 替代食用盐的不同比例将实验分为以下 6 组(以山药蛤蜊酱基础配方为基础):对照组 S0(0∶2),添加 2% 食用盐;实验组分别为 S1(1∶2):添加 0.05% MFP_3-D+1.95% 食用盐;S2(1∶3):添加 0.5% MFP_3-D+1.5% 食用盐;S3(1∶1):添加 1.0% MFP_3-D+1.0% NaCl;S4(3∶1):添加 1.5% MFP_3-D+0.5% 食用盐;S5(2∶0):2% MFP_3-D。每个组别只有食用盐和 MFP_3-D 的添加量不同,其他辅料及工艺均一致。

1.2.3　山药蛤蜊酱基础配方　通过前期预实验结果得出山药蛤蜊酱基础配方为:新鲜硬壳蛤蛤肉 51.5%、大豆油 22%、山药泥 18%、料酒 3.3%、大葱 1.6%、大蒜 1.53%、生姜 1.1%、小米椒 0.93%、白胡椒粉 0.08%、食用盐 2%。

1.2.4　工艺流程和操作要点

1.2.4.1　工艺流程　原料预处理→腌制→斩拌→炒制→混匀→包装→成品。

1.2.4.2　操作要点　新鲜硬壳蛤蛤肉预处理:将超高压处理好的硬壳蛤蛤肉清洗后,用厨房用纸吸干表面水分,备用。

山药泥预处理：将山药去皮后切成小段，隔水蒸熟后捣成泥状后备用。

腌制：将生姜切片、大葱斜切小段、大蒜拍碎后和白胡椒粉、料酒一起放入蛤肉中，抓拌均匀腌制 30 min。

斩拌：将腌制后的蛤肉放置于破壁机中打成肉泥，直到看不见蛤肉肉块。

炒制：小米辣切碎（0.2 mm 左右），将油温加热至 150 ℃，将小米椒下入锅中，炒至辣椒碎微微发白，倒入蛤肉泥，继续翻炒，炒至油色清亮。

混匀：加入山药泥，最后加入食用盐，搅拌均匀后关火起锅即可。炒制温度不可过高，炒制时要勤搅拌，不可糊锅。

包装：趁热装入瓶中，高温杀菌后得成品。

1.2.5　指标测定

1.2.5.1　盐分检测　按照 SC/T 3011-2001《水产品中盐分的测定》中直接滴定法测定。

1.2.5.2　感官评价　按照 GB/T 16291.2-2010《感官分析 选拔、培训和管理评价员一般导则 第 2 部分：专家评价员》，筛选 11 人（男 4 人、女 7 人）组成感官评价小组，参照马金魁等[16] 的方法，对山药蛤蜊酱的色泽、咸度、鲜度、总体喜好进行感官评价。采用百分制评分标准，具体见表 1。

1.2.5.3　电子舌检测　参考栾宏伟等[17] 的方法，称取 5.0 g 山药蛤蜊酱样品，溶于 100 mL 蒸馏水中均质，10000 r/min 离心 10 min，取上清液备用。按照 Insent 电子舌系统的预定检测程序进行，不同样品各检测 4 次，除去第 1 次结果（测定甜味时，不同样品各检测 5 次，除去前两次结果），以后三次结果为准。

1.2.5.4　游离氨基酸检测　按照 GB/T 22492-2008《大豆肽粉》的附录 B 中的 B.4.2 游离氨基酸含量的测定方法，用氨基酸自动分析仪以外标法测定。

1.2.5.5　核苷酸检测　按照 GB 5413.40-2016《食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品中核苷酸的测定》，采用液相色谱法测定样品中核苷酸组分次黄嘌呤核苷酸 IMP、鸟嘌呤核苷酸 GMP 和腺嘌呤核苷酸 AMP。

1.2.5.6　GC-IMS 检测　参考 Wu 等[18] 的方法稍有修改，称取 2 g 山药蛤蜊酱，置于 20 mL 顶空瓶中，孵育温度 60 ℃，孵育时间 20 min，载气高纯氮气（纯度≥99.999%），柱温 60 ℃，进样针温度 85 ℃，进样体积 500 μL，分析时间 20 min。采用 Laboratory Analytical Viewer（LAV）分析软件及 GC×IMS Library 对 GC-IMS 数据进行采集和定性，根据保留时间/迁移时间进行二维谱图物质定性分析，峰体积进行半定量分析。采用 Reporter 和 Gallery 插件程序构建挥发性有机物的差异图谱和指纹图谱，比较不同样品间挥发性有机物差异进行相对定量。

1.2.5.7　味觉活性值（TAV）分析　TAV 是用于评估某一化合物对滋味和香气的贡献值，一般认为 TAV>1 的化合物对滋味的贡献较大，其计算公式如下：

$$TAV = C/T$$

式中：C 为仪器测定出的呈味物质的浓度（mg/g）；T 为该呈味物质的呈味阈值（mg/g）。

1.3　数据处理

数据结果用平均值±标准偏差表示，采用 SPSS 27.0 软件进行 t 检验，单因素方差分析（ANOVA）和 Duncan 多重比较分析，$P<0.05$ 表示差异具有显著性。采用 Origin Pro 2021 软件进行可视化分析。

2　结果与分析

2.1　MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱盐分的影响

为探究 MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱盐分的影响，对 6 组产品进行了盐分测定，其结果见图 1。由图 1 可知，随着 MFP_3-D 的增加，山药蛤蜊酱的盐分呈现极显著下降趋势（$P<0.01$），说明 MFP_3-D 具有很好的减盐效果，这可能与 MFP_3-D 的风味有关系，与

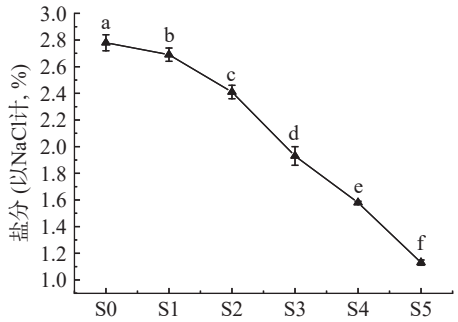


图 1　MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱盐分的影响

Fig.1　Effect of MFP_3-D on the salt content of sauce with yam and clam

注：不同字母表示差异极显著（$P<0.01$）。

表 1　山药蛤蜊酱感官品质评分标准

Table 1　Sensory quality scoring criteria of yam and clam sauce

项目	好（91~100分）	较好（81~90分）	一般（71~80分）	较差（61~70分）	差（60分及以下）
色泽	色泽微黄、油润有光泽、可引起食欲	颜色微微发暗黄或发白、但有光泽度	颜色发暗或发白、无光泽、无食欲	颜色微微发黑、无光泽、无食欲	颜色发黑、无食欲
咸度	咸度适中、滋味协调、无其他异常滋味	咸度微咸或微淡、但滋味协调且无其他异常滋味	咸度微咸或微淡、后味有淡淡的腥味回味	咸度较咸或较淡、后味的腥味回味较明显	咸度过咸或过淡、后味的腥味回味特别明显
鲜度	鲜度适中、滋味协调、无其他异常滋味	鲜味较淡、但滋味协调且无其他异常滋味	鲜味较淡、后味有淡淡的腥味回味	鲜味很淡、后味的腥味回味较明显	无鲜味、后味的腥味回味特别明显
总体喜好	喜欢	较喜欢	一般	不喜欢但能接受	不喜欢

MFP_3-D 中所含的呈鲜咸味的氨基酸等滋味物质有关，这与步营等[8] 关于蓝蛤蒸煮液的研究相一致。

2.2 MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱感官评价的影响

MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱感官评价的影响见图 2。由图 2 可知，除 S5 外，其他组山药蛤蜊酱的色泽、鲜度、咸度、总体喜好方面的评分都在 80 分及以上，说明 MFP_3-D 的适当添加不影响山药蛤蜊酱的整体喜好度，但各组山药蛤蜊酱的具体咸味和鲜味的差异还需要用电子舌进一步检测。

2.3 MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱电子舌结果的影响

通过感官评价可知，随着 MFP_3-D 添加量的增加，山药蛤蜊酱的咸味和鲜味发生变化，采用电子舌对 6 组山药蛤蜊酱的咸味和鲜味的强度值进行测定，其检测结果见表 2。由表 2 可知，S5 的咸味值显著低于 S0（P<0.05），S4 的咸味值与 S0 无显著差异（P>0.05）；S2、S3、S4 的鲜味值与 S0 具有极显著差异（P<0.01），其中 S4 鲜味值最高。这表明 S4 组为 MFP_3-D 最佳替代山药蛤蜊酱中食用盐的比例，能达到“减盐不减咸，减盐增鲜”的目的。

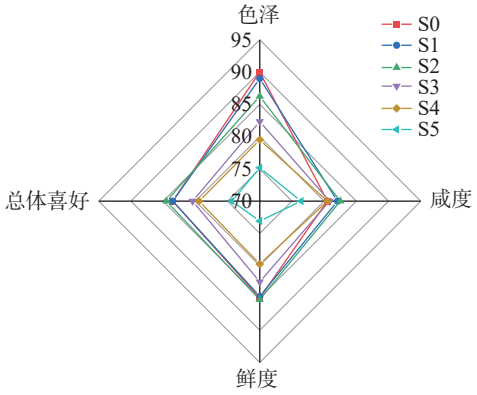


图 2 MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱感官品质的影响

Fig.2 Effect of MFP_3-D on sensory quality of sauce with yam and clam

2.4 S4 组与对照组游离氨基酸比较分析

游离氨基酸是一类重要的呈味活性成分，直接反映水产品食物的味道以及鲜美程度[19]，鲜味氨基酸是重要的鲜味剂；苦味氨基酸虽然呈苦味，但能与其他氨基酸协同作用以增加厚味；甜味氨基酸可丰富产品口感，协调鲜味[20]。

表 2 MFP_3-D 的添加对山药蛤蜊酱电子舌结果的影响

Table 2 Effect of MFP3-D addition on electronic tongue determination of the sauce with yam and clam

滋味	S0	S1	S2	S3	S4	S5
咸味	3.76±0.31^{a}	3.64±0.43^{a}	3.66±0.51^{a}	2.98±0.56^{ab}	2.97±0.68^{ab}	2.00±0.96^{b}
鲜味	10.54±0.13^{d}	11.01±0.27^{d}	12.07±0.14^{c}	12.51±0.28^{b}	13.68±0.24^{a}	13.70±0.36^{a}

注：同行不同肩标字母表示差异显著（P<0.05）。

表 3 S4 组与对照组山药蛤蜊酱的游离氨基酸含量及 TAV

Table 3 Content of free amino acids and TAV of sauce with yam and clam in S4 group and control group

氨基酸名称	呈味特征	味觉阈值(mg/g)	S0(mg/g)	TAV	S4(mg/g)	TAV
天冬氨酸Asp	鲜/甜(+)	1	0.44±0.01	0.44	0.64±0.01***	0.64
谷氨酸Glu	鲜味(+)	0.3	0.61±0.01	2.03	1.26±0.02***	4.20
#苏氨酸Thr	甜味(+)	2.6	0.54±0.00	0.21	0.42±0.00	0.16
丝氨酸Ser	甜味(+)	1.5	0.71±0.01	0.47	0.85±0.01**	0.57
甘氨酸Gly	甜味(+)	1.3	1.24±0.03	0.95	1.37±0.01*	1.05
丙氨酸Ala	甜味(+)	0.6	1.97±0.06	3.28	2.15±0.03	3.58
脯氨酸Pro	甜味(+)	3	0.15±0.00	0.05	0.20±0.00	0.07
精氨酸Arg	苦/甜(+)	0.5	1.48±0.01	2.96	1.54±0.01*	3.08
#赖氨酸Lys	苦/甜(−)	0.5	0.27±0.00	0.54	0.36±0.00	0.72
组氨酸His	苦/甜(−)	0.2	0.11±0.00	0.55	0.14±0.00	0.70
#缬氨酸Val	苦味(−)	0.4	0.23±0.00	0.58	0.35±0.00	0.88
#甲硫氨酸Met	苦/甜(−)	0.3	0.08±0.00	0.27	0.12±0.01*	0.40
#异亮氨酸Ile	苦味(−)	0.9	0.16±0.00	0.18	0.25±0.00	0.28
#亮氨酸Leu	苦味(−)	1.9	0.24±0.01	0.13	0.35±0.00**	0.18
酪氨酸Tyr	苦味(−)	2.6	0.34±0.01	0.17	0.34±0.01	0.13
#苯丙氨酸Phe	苦味(−)	0.9	0.15±0.01	0.17	0.22±0.00*	0.24
鲜味氨基酸			1.04±0.02		1.90±0.03***	
甜味氨基酸			4.61±0.09		4.98±0.06*	
苦味氨基酸			3.07±0.01		3.66±0.01***	
必需氨基酸			1.68±0.02		2.07±0.00***	
游离氨基酸总量			8.72±0.09		10.54±0.11**	

注：#表示必需氨基酸；*表示S4相比S0的t检验结果，其中“*”代表P<0.05，“**”代表P<0.01，“***”代表P<0.001；味觉阈值(mg/g)为化合物在水中对应的味觉识别阈值，阈值参考Yao等[24]的研究。

为探究 S4 组中“减盐增鲜”的滋味物质以及增鲜原理，测定了 S4 组和对照组山药蛤蜊酱的游离氨基酸含量，结果见表 3。由表 3 可知，S4 组和对照组均可鉴定出 16 种游离氨基酸（色氨酸除外），与对照组相比，S4 中的游离氨基酸总量由 8.72 mg/g 显著增加到 10.54 mg/g（P<0.01）；S4 中的鲜味氨基酸由 1.04 mg/g 显著增加到 1.90 mg/g（P<0.001），鲜味氨基酸中谷氨酸含量最高，由 0.61±0.01 mg/g 显著增加到 1.26 mg/g（P<0.001），且 TAV 大于 1，是主要的鲜味呈味物质；S4 中的甜味氨基酸总量由 4.61 mg/g 显著增加到 4.98 mg/g（P<0.05），丝氨酸和甘氨酸等甜味氨基酸可以协同鲜味氨基酸增加厚味[20]，其中丝氨酸和甘氨酸含量显著增加（P<0.05），苏氨酸略有下降（P>0.05），这可能与山药蛤蜊酱和冻干粉中的还原糖与氨基酸末端的 α-氨基发生的交联反应有关[21]；S4 中的苦味氨基酸总量由 3.07 mg/g 显著增加至 3.66 mg/g（P<0.001），这些苦味氨基酸与其他氨基酸具有协同增鲜的作用，比如精氨酸可与谷氨酸协同增鲜[22−23]，对 S4 的鲜味有较大的贡献。

2.5　S4 组与对照组核苷酸比较分析

核苷酸是决定水产品特征鲜味的关键物质之一，IMP、GMP 和 AMP 是主要呈鲜核苷酸，对某些鲜味氨基酸（谷氨酸和天冬氨酸）具有协同增鲜的效果[25]。为探究 S4 组中“减盐增鲜”的滋味物质以及增鲜原理，测定了山药蛤蜊酱的核苷酸含量，其结果见表 4。由表 4 可知，S0 组检测到 IMP 和 AMP 两种核苷酸，而 S4 组中三种核苷酸的检出值都低于该核苷酸的定量限。在适当的食盐浓度下可以有效缓解 IMP 的降解[26]，因此，MFP_3-D 替代山药蛤蜊酱中的食用盐后，导致 IMP 的降解含量降低，但并不代表 S4 组中没有呈鲜味的核苷酸，因为极低浓度的 IMP 和 AMP 同时存在时，鲜味和复杂性味觉仍然会被激发出来[27]。

表 4　S4 组与对照组山药蛤蜊酱的核苷酸含量及 TAV
Table 4　Nucleotide content and TAV of sauce with yam and clam in S4 group and control group

名称	呈味特征	阈值（mg/100 g）	S0（mg/100 g）	TAV	S4（mg/100 g）	TAV
IMP	鲜味	5	1.08±0.06	0.22	<0.67	−
GMP	鲜味	13	<0.5	−	<0.5	−
AMP	鲜/甜味	25	1.67±0.04	0.07	<0.5	−

注：味觉阈值（mg/100 g）为化合物在水中对应的味觉识别阈值，阈值参考 Yao等[24]的研究。

2.6　S4 组与对照组 S0 的 GC-IMS 比较分析

食品的风味不仅可以通过气味和滋味以独立的方式影响，还可通过跨膜肽感知交互作用增强和改善，谷氨酸钠和谷氨酸钾以及 NaCl，均能显著增强食品的香气感知，而某些气味也可以增强味觉的感知强度，即气味诱导的滋味增强[28]。为探究 MFP_3-D 替代食用盐对山药蛤蜊酱中挥发性化合物的影响，采用 GC-IMS 对 S0 组和 S4 组的山药蛤蜊酱进行了挥发性化合物的检测，绘制了二维图谱，如图 3 所示。图中红色峰为 RIP，其右侧的每一个点代表一种挥发性物质，同一种化合物可能会产生多个信号点，代表单体、二聚体或多聚体，具体取决于挥发性成分的浓度和性质[29]，颜色代表物质的峰强度，蓝色代表峰强度较低，红色表示峰强度较高，颜色越深表示峰强度越高[30]。由图 3 可以看出 S4 组的图中红色信号峰多于蓝色信号峰，表明 MFP_3-D 的添加使山药蛤蜊酱挥发性风味物质的种类和含量增加。

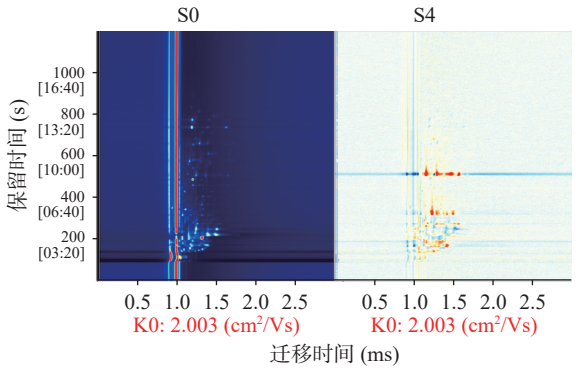


图 3　山药蛤蜊酱挥发性化合物的 GC-IMS 二维谱图
Fig.3　Two-dimensional GC-IMS spectra of volatile compounds in sauce with yam and clam

利用 NIST 数据库和 IMS 数据库对山药蛤蜊酱风味物质进行 GC-IMS 分析，结果如图 4 和表 5 所示。由图 4 可以看到，从两组山药蛤蜊酱中检测到了 16 种醇类、13 种醛类、6 种烷烃类、12 种酮类、6 种杂环类、8 种酯类共计 61 种挥发性风味物质。醛类化合物在高浓度时会闻到令人不愉快的腥味，但在低浓度时有坚果、青草香、果香的香气，酯类物质常为发酵或者脂类代谢生成的酸与醇经酯化反应而形成[31]，醇类物质由脂肪酸氧化和羰基化合物还原产生，阈值偏高，对食品的风味贡献较小，但高浓度和以不饱和形式存在的醇类物质，它们产生的气味比较柔和，类似于水果或植物的清香[32]，酮类挥发性化合物通常带有类似桉叶气味、花香、脂肪气味，但是对腥味有一定的叠加作用[31]，其他挥发性化合物包括酚类化合物、杂环类化合物、醚类化合物、呋喃类化合物等，具有很强的肉香味、果香、焦香味[33]。图 4 中红色框中的正丁醇、乙酸乙酯、2,3-丁二酮、2-丁酮、3-甲基-1-戊醇等 30 种挥发性成分在 S4 组中的含量明显高于 S0 组，这些化合物在表 5 中的峰体积数据也表明 S4 中这些物质的含量高于 S0 组，且这些挥发性物质多表现出青草味、花香、果香，说明 MFP_3-D 的添加有利于增强山药蛤蜊酱的良好香气。Ogasawara 等[34] 研究发现鲣鱼干的蒸汽馏出物中的硫化合物、吡嗪、醇和愈创木酚等挥发性化合物可显著增强低盐溶液（0.68%~0.83%）的咸味感知强度和整体口感；Niimi 等[35] 研究发现，不同浓度的 2-丁酮、2-庚酮、2-壬酮、丁酸等可显著增强切达奶酪的鲜味感知。

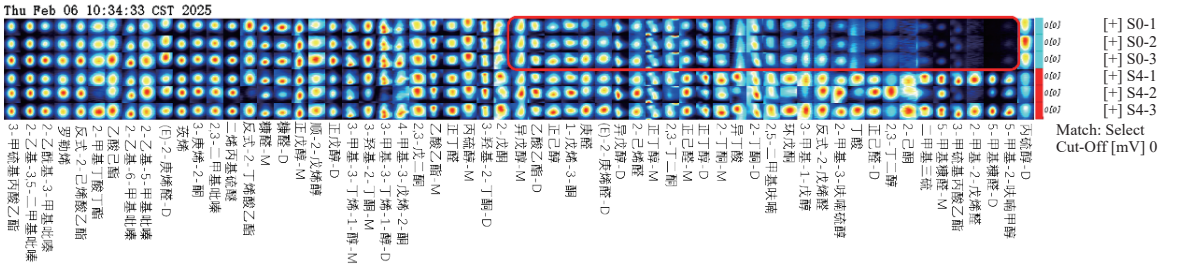


图 4　山药蛤蜊酱挥发性风味物质指纹图谱

Fig.4　Fingerprint of volatile compounds in sauce with yam and clam

表 5　山药蛤蜊酱鉴定出的风味物质

Table 5　Volatile compounds identified from sauce with yam and clam

序号	挥发性化合物	CAS	风味描述[a]	峰体积(a.u.)	
				S0	S4
1	5-甲基-2-呋喃甲醇	C3857258	特殊香气	128.53	1024.60
2	正己醇	C111273	果香和脂肪气息	393.71	577.78
3	正戊醇-M	C71410	杂醇油气味	2074.30	1728.84
4	正戊醇-D	C71410	杂醇油气味	3249.74	3053.63
5	异戊醇-M	C123513	苹果白兰地香气	6336.44	6470.62
6	异戊醇-D	C123513	苹果白兰地香气	1543.22	1512.04
7	3-甲基-3-丁烯-1-醇-M	C763326	甜果味	4331.95	4453.11
8	3-甲基-3-丁烯-1-醇-D	C763326	甜果味	6291.38	6170.77
9	正丁醇-M	C71363	酒精味	3303.70	3691.05
10	正丁醇-D	C71363	酒精味	3561.78	4185.79
11	丙硫醇-M	C107039	卷心菜味	283.84	166.67
12	丙硫醇-D	C107039	卷心菜味	1601.33	1385.56
13	顺-2-戊烯醇	C1576950	果香味	257.64	268.52
14	2,3-丁二醇	C513859	果味	87.27	164.49
15	2-甲基-3-呋喃硫醇	C28588741	肉香	73.42	142.85
16	3-甲基-1-戊醇	C589355	果味	93.36	157.26
			共16种醇类化合物		
17	5-甲基糠醛-M	C620020	香料味	168.07	4077.98
18	5-甲基糠醛-D	C620020	香料味	403.27	3071.82
19	(E)-2-庚烯醛-D	C18829555	脂肪味	705.06	622.78
20	(E)-2-庚烯醛-M	C18829555	脂肪味	177.08	339.19
21	庚醛	C111717	脂肪味	249.87	336.08
22	糠醛-M	C98011	甜木香杏仁香烤面包混合气味	326.50	404.05
23	糠醛-D	C98011	甜木香杏仁香烤面包混合气味	1209.82	1139.96
24	正己醛-M	C66251	油脂和青草气及苹果香味	133.07	342.29
25	正己醛-D	C66251	油脂和青草气及苹果香味	766.40	1092.41
26	正丁醛	C123728	刺激气味	764.61	916.35
27	2-己烯醛	C505577	甜杏仁味	179.82	188.70
28	2-甲基-2-戊烯醛	C623369	略带果味的气味	43.16	266.35
29	反式-2-戊烯醛	C1576870	辛辣味	115.44	190.39
			共13种醛类化合物		
30	二甲基三硫	C3658808	洋葱味、肉味	291.56	1106.38
31	茨烯	C79925	樟脑香气	2308.79	2593.82
32	二烯丙基硫醚	C592881	硫磺、洋葱、大蒜、辣根金属味	1205.21	1535.04
33	异丁酸	C79312	酸奶酪气味	306.47	453.45
34	丁酸	C107926	酸奶酪气味	93.64	216.90
35	罗勒烯	C13877913	柑橘味	392.18	446.76
			共6种烷烃类化合物		
36	3-庚烯-2-酮	C1119444	香菜味	591.79	640.59
37	4-甲基-3-戊烯-2-酮	C141797	薄荷味	784.88	1025.41
38	3-羟基-2-丁酮-M	C513860	黄油味	7044.91	5745.36

续表 5

序号	挥发性化合物	CAS	风味描述[a]	峰体积(a.u.)	
				S0	S4
39	3-羟基-2-丁酮-D	C513860	黄油味	2562.72	2636.87
40	2,3-戊二酮	C600146	辛辣味、黄油味、奶油味	734.27	780.81
41	2,3-丁二酮	C431038	浓黄油味	1070.93	1164.93
42	2-戊酮	C107879	甜果香、酒香、木质香	574.06	741.47
43	2-己酮	C591786	果味	14.57	57.89
44	环戊酮	C120923	令人愉快的薄荷气味	123.77	222.83
45	1-戊烯-3-酮	C1629589	辛辣的胡椒味	773.11	744.32
46	2-丁酮-M	C78933	飘逸的醚香、果香、青香	1421.49	1624.75
47	2-丁酮-D	C78933	飘逸的醚香、果香、青香	556.19	845.52
			共12种酮类化合物		
48	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	C13925070	炒可可和杏仁似香味	2317.10	2698.09
49	2-乙基-5-甲基吡嗪	C13360640	咖啡味	263.62	295.16
50	2,3-二甲基吡嗪	C5910894	坚果气味	499.87	549.95
51	2,5-二甲基呋喃	C625865	烤肉味	270.09	571.72
52	2-乙基-6-甲基吡嗪	C13925036	烤土豆的气味	904.34	1173.55
53	2-乙酰基-3-甲基吡嗪	C23787806	坚果，烤榛子、烤谷物味	563.69	795.83
			共6种杂环类化合物		
54	3-甲硫基丙酸乙酯	C13327565	洋葱、水果似香甜气味	1201.16	1562.84
55	反式-2-己烯酸乙酯	C27829727	果味，蔬菜味	736.08	888.53
56	2-甲基丁酸丁酯	C15706737	水果香气	204.48	273.22
57	乙酸己酯	C142927	果香气味	225.87	284.39
58	2-甲基丁酸乙酯	C7452791	强烈苹果皮、菠萝皮和未成熟李子皮香气	534.04	1853.08
59	乙酸乙酯-M	C141786	水果香味	1247.79	1309.20
60	乙酸乙酯-D	C141786	水果香味	1657.92	1474.76
61	反式-2-丁烯酸乙酯	C62a3701	辛辣，甜味，蒜味	404.58	469.29
			共8种酯类化合物		

注：D：表示该化合物二聚体，M：表示该化合物单体，a：风味描述，参考来源http://www.odour.org.uk。

MFP_3-D 的添加使得 S4 组中 2-丁酮、二甲基三硫、丁酸、2-甲基丁酸乙酯以及吡嗪类等挥发性化合物的含量增加，有利于增强山药蛤蜊酱的咸味和鲜味感知，可助力 MFP_3-D“减盐增鲜”效果。

3　结论

本研究探究了不同比例 MFP_3-D 替代山药蛤蜊酱中的食用盐的效果。S4 组即 MFP_3-D 按 3∶1 比例替代山药蛤蜊酱中的食用盐时，与对照组相比，山药蛤蜊酱虽盐分降低，但咸味值无显著差异（$P>0.05$），同时鲜味值得到极大提高（由 10.54±0.13 提高至 13.68±0.24），而且 MFP_3-D 的部分替代提高了谷氨酸和天冬氨酸的含量，改变了挥发性物质的种类和浓度，改善了山药蛤蜊酱的整体风味。综上所述，MFP_3-D 的部分替代可以起到“减盐增鲜”的作用。本研究不仅说明 MFP_3-D 有望成为一种很好的食盐替代品，而且也为减盐增鲜领域的发展提供了有价值的参考。

© 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] ANAÏS R, CARMEN S, MIGUEL Á, et al. Cured ham consumption and incidence of hypertension: The "Seguimiento Universidad de Navarra" (SUN) cohort[J]. Medicina Clínica, 2020, 155: 9−17.

[2] ANDREA G, LUCIA S, PAOLO C, et al. Sodium intake and hypertension[J]. Nutrients, 2019, 11: 1970.

[3] WANG Y J, YEH T L, SHIH M C, et al. Dietary sodium intake and risk of cardiovascular disease: A systematic review and dose-response meta-analysis[J]. Nutrients, 2020, 12: 29−34.

[4] 顾景范.《中国居民营养与慢性病状况报告(2015)》解读[J]. 营养学报, 2016(6): 525−529. [GU J F. Interpretation of the report on "Nutrition and chronic disease status of Chinese residents (2015)"[J]. Journal of Nutrition, 2016(6): 525−529.]

[5] 黄诗钰, 施文正, 王锡昌, 等. NaCl 对水产制品品质的影响及减盐调控技术研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 260−268. [HUANG S Y, SHI W Z, WANG X C, et al. Effects of NaCl on the quality of aquatic products and the progress of salt reduction and control technology[J]. Food Science, 2023, 44(11): 260−268.]

[6] 欧阳杰, 张军文, 谈佳玉, 等. 贝类开壳技术与装备研究现状及发展趋势[J]. 肉类研究, 2018, 32(5): 64−68. [OUYANG J, ZHANG J W, TAN J Y, et al. Research status and development trend of shellfish shelling technology and equipment[J]. Meat Research, 2018, 32(5): 64−68.]

[7] 黄会, 刘小静, 刘慧慧, 等. 栉孔扇贝蒸煮液营养成分分析与安全性评价[J]. 中国食品添加剂, 2023(3): 250−256. [HUANG H, LIU X J, LIU H H, et al. Nutrient analysis and safety evaluation of cooking liquid of pecten scallop[J]. China Food Additives, 2023(3): 250−256.]

[8] 步营, 祝伦伟, 何玮, 等. 蓝蛤蒸煮液与酶解液的风味改善作

用研究[J]. 现代食品科技, 2020(1): 253−261,234. [BU Y, ZHU L W, HE W, et al. Study on the flavour improvement effect of blue clam cooking liquid and enzymatic solution[J]. Modern Food Science and Technology, 2020(1): 253−261,234.]
[9] 魏婉露. 扇贝废弃液多糖的分离鉴定及消化吸收情况的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022. [WEI W L. Separation and identification of polysaccharides from scallop waste liquid and their digestion and absorption[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022.]
[10] 郭琪, 郭保党, 马燕, 等. 山药的活性成分与功能特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 1−9. [GUO Q, GUO B D, MA Y, et al. Research progress on active ingredients and functional properties of yam[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(19): 1−9.]
[11] 李郭浪, 刘静, 李霞, 等. 山药山楂酸奶的贮藏品质及胃肠液环境下的抗氧化性[J]. 中国酿造, 2021, 40(5): 124−128. [LI G L, LIU J, LI X, et al. Storage quality and antioxidant properties of yam and hawthorn yoghurt in gastrointestinal fluid environment[J]. China Brewing, 2021, 40(5): 124−128.]
[12] 任秀娟, 张剑, 岳琪, 等. 怀山药原浆挂面品质改良及工艺条件优化[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 165−171. [REN X J, ZHANG J, YUE Q, et al. Improvement of quality and optimisation of process conditions of Chinese yam pulp noodles[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 165−171.]
[13] 张文莉, 姚稳, 巫永华, 等. 红茶菌发酵山药枸杞果醋的工艺研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 119−123. [ZHANG W L, YAO W, WU Y H, et al. Research on the fermentation process of yam and wolfberry fruit vinegar by black tea bacteria[J]. China Seasoning, 2021, 46(4): 119−123.]
[14] AMADI G A, CHINA M A H, UJONG A E, et al. Effect of African yam bean flour as an extender on the physicochemical and sensory properties of cooked beef sausage[J]. European Journal of Nutrition & Food Safety, 2022: 13-23.
[15] 何成, 于文超, 蔡忠强, 等. 长牡蛎可溶性黑色素的脱盐研究[J]. 海洋科学, 2017, 41(11): 97−101. [HE C, YU W C, CAI Z Q, et al. Desalination study of soluble melanin in long oyster[J]. Marine Science, 2017, 41(11): 97−101.]
[16] 马金魁, 李浩纯, 黄婉瑜, 等. 基于响应面法优化低盐增鲜螺蛳粉汤料包配方工艺研究[J]. 肇庆学院学报, 2024, 45(5): 106−113. [MA J K, LI H C, HUANG W Y, et al. Optimisation of the formulation process of low-salt and freshness-enhancing snail powder soup packet based on response surface method[J]. Journal of Zhaoqing College, 2024, 45(5): 106−113.]
[17] 栾宏伟, 朱文慧, 祝伦伟, 等. 不同发酵时间对乌虾酱风味的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 75−81,87. [LUAN H W, ZHU W H, ZHU L W, et al. Effects of different fermentation time on the flavour of Wu shrimp paste[J]. Food Industry Science and Technology, 2020, 41(12): 75−81,87.]
[18] WU W Y, WANG X Y, HU P, et al. Research on flavor characteristics of beef cooked in tomato sour soup by gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose[J]. LWT, 2023, 179: 114646.
[19] SEBASTIAN D, RICHARD H, SEIJI K, et al. Identification and quantitation of taste-active compounds in dried scallops by combined application of the sensomics and a quantitative NMR approach[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(1): 247−259.
[20] TANJA C W M, DYLAN L C, ROY F, et al. Extraction and analysis of free amino acids and 5′-nucleotides, the key contributors to the umami taste of seaweed[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131352.
[21] 祝伦伟. 基于美拉德反应的蓝蛤酶解液风味品质提升及海鲜调味料的制备[D]. 锦州: 渤海大学, 2020. [ZHU L W. Flavour quality enhancement of blue clam enzymatic solution and preparation of seafood seasoning based on Maillard reaction[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.]
[22] LIU Z Y, WEI S, XIAO N Y, et al. Insight into the correlation of key taste substances and key volatile substances from shrimp heads at different temperatures[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139150.
[23] GAO J X, ZHANG Y Y, HUANG X H, et al. Comparison of amino acid, 5′-nucleotide and lipid metabolism of oysters (*Crassostrea gigas* Thunberg) captured in different seasons[J]. Food Research International, 2021, 147: 110560.
[24] YAO J Y, ZHAO W J, BAI X Y, et al. Non-volatile taste active compounds in the meat of river snail (*Sinotaia quadrata*) determined by 1H NMR, e-tongue and sensory analysis[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 34: 100803.
[25] BAI J, FAN Y, ZHU L L, et al. Characteristic flavor of Antarctic krill (*Euphausia superba*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) induced by thermal treatment[J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132074.
[26] 王薇, 刘楷升, 刘俊松, 等. 食盐腌渍对冷藏脱血许氏平鲉鱼片蛋白和呈味特性的影响[J]. 渔业研究, 2024, 46(6): 605−614. [WANG W, LIU K S, LIU J S, et al. Effects of salt curing on protein and flavour characteristics of refrigerated de-blooded Hsu's flatfish fillets[J]. Fisheries Research, 2024, 46(6): 605−614.]
[27] FUKE S, UEDA Y. Interactions between umami and other flavor characteristics[J]. Trends in Food Science & Technology, 1996, 7(12): 407−411.
[28] 田怀香, 郑国茂, 于海燕, 等. 气味与滋味间相互作用对食品风味感知影响研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 259−269. [TIAN H X, ZHENG G M, YU H Y, et al. Research progress on the influence of the interaction between odor and taste on food flavor perception[J]. Food Science, 2023, 44(9): 259−269.]
[29] LI M Q, YANG R W, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 32−39.
[30] YANG X B, CHEN Q H, LIU S C, et al. Characterization of the effect of different cooking methods on volatile compounds in fish cakes using a combination of GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101291.
[31] DENG S Y, LIU Y H, HUANG F, et al. Evaluation of volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time[J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129765.
[32] 葛孟甜, 李正荣, 赖年悦, 等. 两种杀菌方式对即食小龙虾理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. 渔业现代化, 2018, 45(3): 66−74. [GE M T, LI Z G, LAI N Y, et al. Effects of two sterilization methods on physicochemical properties and volatile flavour substances of ready-to-eat crayfish[J]. Fishery Modernisation, 2018, 45(3): 66−74.]
[33] 黄崇棱, 尹雪莲, 陆婷婷, 等. 即食贻贝加工过程中风味活性物质的分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 294−304. [HUANG C L, YIN X L, LU T T, et al. Analysis of flavour actives in ready-to-eat mussels[J]. Chinese Journal of Food Science, 2023, 23(10): 294−304.]
[34] OGASAWARA Y, MOCHIMARU S, UEDA R, et al. Preparation of an aroma fraction from dried bonito by steam distillation and its effect on modification of salty and umami taste qualities[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(2): 308−316.
[35] NIIMI J, EDDY A I, OVERINGTON R A, et al. Aroma-taste interactions between a model cheese aroma and five basic tastes in solution[J]. Food Quality and Preference, 2014, 31: 1−9.