张建兰, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 三种药食同源物质复配对海鲈鱼风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 345−356. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040215

ZHANG Jianlan, ZHAO Tiantian, JIAO Wenjuan, et al. Impact of a Combination of Three Medicinal Food Homologous Substances on the Flavor Profile of Sea Bass[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 345−356. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040215

· 分析检测 ·

三种药食同源物质复配对海鲈鱼风味的影响

张建兰[1], 赵甜甜[2], 焦文娟[2], 刘　俊[2], 周　芳[2], 刘伟峰[2], 张业辉[2,*], 南海军[1,*], 黄　文[3], 王福坚[4], 苏志潜[4]

（1.广东药科大学中药学院, 广东广州 510006;
2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610;
3.广东省农业科学院动物科学研究所, 广东广州 510645;
4.佛山市顺德万汇美食工业研究有限公司, 广东佛山 528300）

摘　要: 为改善养殖海鲈鱼的腥味问题，本研究选取牛至、香茅、辣木三种药食同源物质及其复配物，通过电子鼻、电子舌、氨基酸及顶空固相微萃取-气质联用仪（HS-SPME-GC-MS）分析调味处理对海鲈鱼风味的影响。结果表明，在 0.3 g/100 mL 处理浓度下，各调味液均能有效改善鱼肉风味品质，其中复配组（牛至:香茅:辣木=1:1:1）呈现协同增效作用。经调味液处理后，鱼肉的 TBARS 值显著降低（$P<0.05$），表明有效延缓了鱼肉的脂质氧化，同时总色差（ΔE）值增大使鱼肉色泽显著加深。电子鼻分析显示调味处理显著降低了 W1W（硫化物）、W2W（有机硫化物）和 W1S（甲基类）传感器响应值，与腥味相关的含硫化合物及甲基类异味物质含量减少，且主成分分析能明显区分五组样品。电子舌检测表明各处理组的酸味和苦味值较对照组显著降低（$P<0.05$）。复配组使游离氨基酸总量由 357.94 mg/100 g 显著增加至 418.96 mg/100 g（$P<0.05$），其中鲜味氨基酸增长趋势明显，表明调味能有效促进氨基酸的释放从而提升营养价值。GC-MS 分析结果表明，添加调味液后鱼肉挥发性物质的种类显著增加，其中复配调味液处理组挥发性物质种类由对照组的 19 种增至 45 种，醇类和萜烯类物质增长明显。醛类含量则有所减少，主要腥味物质己醛含量从 3207.03 μg/kg 降低至 317.67 μg/kg。研究表明三种天然提取物可通过多途径协同作用减少腥味物质生成，为天然物质在水产品风味改良中的应用提供了理论支撑。

关键词: 海鲈鱼, 牛至, 香茅, 辣木, 复配, 风味

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0345−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040215　　本文网刊:

Impact of a Combination of Three Medicinal Food Homologous Substances on the Flavor Profile of Sea Bass

ZHANG Jianlan[1], ZHAO Tiantian[2], JIAO Wenjuan[2], LIU Jun[2], ZHOU Fang[2], LIU Weifeng[2], ZHANG Yehui[2,*], NAN Haijun[1,*], HUANG Wen[3], WANG Fujian[4], SU Zhiqian[4]

（1.College of Traditional Chinese Medicine, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China;
2.Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China;
3.Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510645, China;
4.Foshan Shunde Wanhui Food Industry Research Co., Ltd., Foshan 528300, China）

收稿日期: 2025−04−18

基金项目: 广东省农业科学院协同创新项目（XT202303）; 佛山市市院合作水产预制菜研发中心（202401）; 广东省农业科学院金颖之光（R2023PY-JG016）; 揭阳惠来鲍鱼产业链链长制项目（2024）; 揭阳市科技创新战略专项（2022DZX020）。

作者简介: 张建兰（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 中药学, E-mail: 1525059727@qq.com。

*** 通信作者:** 张业辉（1979−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 水产品加工, E-mail: zhangyhgx@163.com。
南海军（1974−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 中药学, E-mail: swunan@163.com。

Abstract: To address the issue of fishy odor in farmed sea bass, this study investigated the effects of seasoning treatments using extracts from three medicinal and edible plants—oregano, citronella, and moringa oleifera—and their compound mixture, on fish flavor profiles. Flavor characteristics were analyzed via electronic nose, electronic tongue, free amino acid analysis, and headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). Results demonstrated that all seasoning solutions applied at a concentration of 0.3 g/100 mL effectively improved the flavor quality of sea bass fillets. Notably, the compound treatment group (oregano∶citronella∶moringa oleifera=1∶1∶1) exhibited a synergistic effect. Seasoning treatments significantly reduced (P<0.05) thiobarbituric acid (TBARS) values in fish muscle, indicating effective retardation of lipid oxidation. Concurrently, increased total color difference (ΔE) values resulted in visibly darker coloration. E-nose analysis revealed that seasoning treatments significantly attenuated sensor response values for W1W (sulfides), W2W (organosulfides), and W1S (methyl groups), corresponding to reduced levels of sulfur-containing compounds and methyl-derived off-flavors associated with fishiness. Principal component analysis (PCA) effectively discriminated among the five sample groups. E-tongue detection indicated significantly reduced acidity and bitterness values in all treatment groups compared to the control (P<0.05). The compound treatment significantly increased the total free amino acid content from 357.94 mg/100 g to 418.96 mg/100 g (P<0.05), with a marked increase in umami-related amino acids. This suggested that the seasoning treatments effectively promote amino acid release, thereby enhancing nutritional value. GC-MS analysis demonstrated a significant increase in the diversity of volatile compounds in seasoned fish. Specifically, the number of volatile compounds in the compound seasoning treatment group increased from 19 (control) to 45 types, with notable increases in alcohols and terpenes. Aldehyde content decreased, and the primary fishy odor compound, hexanal, was substantially reduced from 3207.03 μg/kg to 317.67 μg/kg. The study demonstrates that these three natural extracts, particularly in combination, can reduce the generation of fishy odor substances through multi-pathway synergistic effects, providing theoretical support for the application of natural substances in flavor enhancement of aquatic products.

Key words: sea bass; origanum; citronella; moringa oleifera; combinations; flavour

海鲈鱼(Sea bass, *Lateolabrax japonicas*),又名花鲈,是海洋中最常见的经济鱼类之一,因其肉质细嫩、富含蛋白质和不饱和脂肪酸而受到消费者的喜爱[1]。然而,海鲈鱼在养殖过程中容易因摄食藻类及底泥有机物而蓄积土臭素等致腥物质,导致腥味问题突出,同时在流通环节中容易受到内源性酶和腐败微生物的影响,引发脂质氧化、蛋白质降解及三甲胺累积,从而使腥臭味进一步加剧并劣变品质[2]。这些问题不仅降低了消费者接受度,也制约了海鲈鱼产品的市场推广[3]。因此,如何有效改善海鲈鱼泥腥味与提升风味已成为水产品加工领域亟待解决的关键问题。

天然植物提取物因具有绿色安全、抑菌去腥及风味增效特性,逐渐成为水产品风味改良的研究热点。Wang 等[4] 研究表明,0.3% 的紫苏多酚通过其芳香特性和抑制脂肪酸氧化途径减弱了马面鱼的腥味;张海燕等[5] 通过在海鲈鱼里添加酵母和薄荷香精复合液,有效降低海鲈鱼的腥味并提升香味。此外,天然成分的复配应用还可通过抗氧化与抑菌活性延长产品货架期。Guan 等[6] 研究将葡萄籽、鼠尾草和牛至叶添加到带鱼加工中,既可以改善整体风味,还可利用抗氧化和抗菌特性延长保质期。在众多天然植物提取物中,牛至、香茅与辣木因其独特的化学组分备受关注。牛至富含香芹酚、百里香酚等酚类物质,具有抗氧化与抑菌活性,可作为天然抗菌剂应用于鱼肉的保鲜中[7];香茅中柠檬醛、香叶醇等挥发性成分能有效掩盖不良气味并赋予鱼肉清新果香[8]。Isra 等[9] 研究发现,将辣木叶作为天然抗氧化剂添加到鲶鱼鱼丸中,可以延长保质期并丰富营养价值,辣木中含有丰富的维生素、酚类、黄酮类成分,其独特的植物风味对掩盖腥味具有潜在价值[10−11]。然而,目前针对上述三种天然物质在水产品中的应用研究多聚焦于单一成分的保鲜或调味效果,其复配使用的协同作用机制尚不明晰,尤其在水产品中的风味调控规律仍需深入探讨。

本研究采用牛至、香茅、辣木三种药食同源物质及其复配物对海鲈鱼进行调味处理,通过检测其气味、色泽、滋味、腥味值等感官指标,结合 GC-MS 分析挥发性成分变化,探究三者对海鲈鱼腥味抑制与风味增益的协同作用,为改善水产品天然风味及提升品质提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜活海鲈鱼　购于广东省广州市盒马鲜生超市(质量 400~500 g/条),超市货源自广东珠海市;牛至叶、香茅叶　安徽亳州棓膳堂生物科技有限公司;辣木叶　云南德宏天佑生物技术有限公司;磺基水杨酸、石油醚、硫代巴比妥酸、三氯乙酸、氯化钠　分析纯,天津市富宇精细化学化工有限公司;2-甲基-3-庚酮(>95.0%)　上海阿拉丁生化科技股份有限公司;乙二胺四乙酸　分析纯,德国 Biofroxx 公司。

D-160 手持式均质机　大龙兴创实验仪器(北京)股份公司;6980N-5975B 气相色谱质谱联用仪　美国安捷伦公司;H2P-250 型恒温培养箱(控温精度±0.1 ℃)　上海精宏实验设备有限公司;PEN3 型电子鼻　德国 Airsense 公司;Alpha MOS 型电子舌

法国 ASTREE 公司；UV-1800 紫外-可见分光光度计　日本 Shimmadz 公司；CR-400 色差仪　柯尼卡美能达（日本）公司；L-8900 全自动氨基酸分析仪　日本日立公司。

1.2　实验方法

1.2.1　原材料预处理　将鲜活的海鲈鱼击晕，宰杀后刮去鱼鳞、鱼头和内脏，清水冲洗干净。沿脊背骨切到鱼的腹腔，将鱼身剖成两半后，切成大小一致（3 cm×2 cm×2 cm）的鱼块，为保证鱼肉新鲜，将切好的鱼块放入 4 ℃ 冰箱中，以待进行下一步的调味处理。

1.2.2　调味液的制备　将牛至叶、香茅叶、辣木叶分别制成粉末，按 0.1~0.5 g/100 mL 的固形物浓度在水中浸泡 60 min，复配液由三种粉末按 1∶1∶1 混合制备，浓度梯度相同，过滤后制成不同浓度的调味液（表 1）。

表 1　不同调味液的制备

Table 1　Preparation of different seasoning liquids

调味液类型	原料	浓度梯度（g/100 mL）	浸泡时间（min）
牛至调味液	牛至叶粉末	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	60
香茅调味液	香茅叶粉末	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	60
辣木调味液	辣木叶粉末	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	60
复配调味液	三种粉末（1∶1∶1）	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	60

1.2.3　不同调味液对海鲈鱼肉的调味效果　选取大小一致的海鲈鱼样品，随机分组后分别浸渍于不同质量浓度的牛至、香茅、辣木单一调味液及其复配液中，并以去离子水作为空白对照。浸渍处理采用固定料液比（鱼肉∶调味液=1∶3 g/mL），时间为 120 min。通过评估处理样品后的腥度值和感官评分，筛选出各调味液的最佳作用浓度，供后续研究使用。

1.2.4　腥度的判定　腥度是衡量水产品脱腥效果的关键指标[12]，综合评估腥气与腥味两方面的指标，最终得到的腥度值分数可以直观展示脱腥效果。根据现代食品感官评定方法，选择 10 名经过食品感官培训的人员对海鲈鱼肉进行评定，重复 3 次，采用 0~6 分制对腥度强度进行评分，取加权平均值作为最终腥度评定结果[13−14]。

1.2.5　感官评价　参考 GB/T 39625-2020《感官分析方法学建立感官剖面的导则》[15]，采用定量描述法对海鲈鱼肉进行评价。感官实验在室温下进行，评价小组由 10 名经过食品感官培训的成员组成（5 男 5 女，年龄 20~30 岁）。针对外观、色泽、气味、质地四个方面进行评分，总分为 100 分，3 次重复，感官评价标准如表 2 所示。

1.2.6　色差的测定　选取经上述最佳浓度调味液处理后的鱼肉样品，选择 5 个不同位置（包括四个边角及一个中心点）进行色差测定，取 5 点的平均值。其结果以亮度值（L^*）、红绿值（a^*）、黄蓝值（b^*）、总色差（ΔE）表示。

表 2　感官评价标准

Table 2　Sensory evaluation criteria

指标	权重（%）	标准	评分（分）
外观	20	外观饱满透亮，整体肌理清晰 外观轻微氧化泛黄，稍显灰暗 外观明显发黄，肌理模糊	81~100 61~80 0~60
气味	40	鱼香浓郁，有鱼固有的鲜香味 鱼香较弱，稍伴有鱼腥味 鱼香味不明显，鱼腥味较浓	81~100 61~80 0~60
色泽	30	色泽光亮，鱼肉嫩白 色泽较暗淡，鱼肉偏黄 颜色暗淡不均	81~100 61~80 0~60
质地	10	质地均匀，形态完整，鱼肉较嫩 质地较均匀，形态较完整，鱼肉稍粗糙 质地不均匀，鱼肉粗糙，失去弹性	81~100 61~80 0~60

1.2.7　硫代巴比妥酸值（TBARS 值）的测定　依据 GB 5009.181-2016 中的方法进行测定[16]，称取不同调味液处理后的鱼肉样品 3 g 置入 50 mL 离心管中，准确加入 30 mL 三氯乙酸混合液，摇匀，置于恒温振荡器上 50 ℃ 振摇 30 min，取出冷却至室温，过滤后取滤液备用。准确移取上述滤液和标准系列溶液各 5 mL 分别置于 25 mL 具塞比色管内，另取 5 mL 三氯乙酸混合液作为样品空白，分别加入 5 mL 硫代巴比妥酸水溶液，加塞混匀，置于 90 ℃ 水浴内反应 30 min，取出，冷却至室温，于 532 nm 处 1 cm 光径测定样品溶液的吸光度值。

1.2.8　电子鼻分析　参考刘琳等[17] 方法，将不同调味液处理后的鱼肉绞碎，准确称取 2.5 g 鱼肉样品于 50 mL 顶空瓶，用保鲜膜密封后静置 30 min。参数设定：气流流速 300 mL/min，数据采集时间为 120 s。PEN3 型电子鼻的 10 个传感器性能描述见表 3。

表 3　电子鼻不同传感器对应物质种类

Table 3　Corresponding substance types for different sensors in the electronic nose

传感器名称	阵列序号	响应物质类型
1	W1C	对苯类、芳香成分灵敏
2	W5S	对氮氧化合物灵敏
3	W3C	对氨类、芳香成分灵敏
4	W6S	对氢化物灵敏
5	W5C	对短链烷烃灵敏
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.9　电子舌分析　参考李亚俐等[18] 的方法，称取 20 g 不同调味液处理后的鱼肉，加入 100 mL 超纯水，均质 1 min 后，4 ℃、10000 r/min 离心 10 min，过滤，取 85 mL 滤液上机分析。

1.2.10　游离氨基酸的测定　参考 Hu 等[19] 的测定方法并稍作修改，称取约 2 g 不同调味液处理后的鱼肉样品，然后与 10 mL 磺基水杨酸混合，使用均质机于 7000 r/min 下均质 40 s，之后将混合液在 4 ℃、

10000 r/min 下离心 15 min, 上清液和石油醚各 4 mL 混合振荡, 去除有机层, 取 1 mL 样品溶液稀释 10 倍, 0.22 μm 水相滤膜过滤, 取滤液 1.5 mL 于进样瓶中, 用全自动氨基酸分析仪进行测定。

1.2.11 挥发性风味物质成分的测定 参考袁可怡等[20] 的方法, 略有修改。准确称取不同调味液浸泡后的海鲈鱼肉 2 g 于 20 mL 的顶空瓶中, 加入 5 g 的饱和 NaCl 溶液混合, 再加入 100 μL 内标物(0.816×10^{-3} mg/mL 的 2-甲基-3-庚酮)充分混合。将已老化的 DVB/CAR PMDS(50/30 μm)固相微萃取探头插入样品瓶中, 在 60 ℃ 顶空萃取 40 min, 250 ℃ 下解吸 10 min, 每个样品 2 个平行。

气相色谱条件: 进气温度为 250 ℃, 升温程序: 40 ℃ 保持 2 min, 6 ℃/min 升至 200 ℃, 保持 3 min, 再以 10 ℃/min 加热至 250 ℃, 保持 3 min。

质谱条件: 接口温度 280 ℃, 离子源温度 230 ℃, 四级杆温度 150 ℃, 电子能量 70 eV, 质量扫描范围 35~350 m/z。

定性和定量分析: 根据 NIST11 检索谱库筛选匹配度大于 80 的挥发性成分进行定性。根据公式计算出各挥发性风味物质的含量, 结果用 μg/kg 表示。

$$挥发性物质含量=\frac{化合物峰面积}{内标峰面积}\times\frac{内标质量}{样品质量}$$

1.3 数据处理

采用 Excel 进行数据整理, 采用 SPSS 软件进行显著性差异分析, 采用 GraphPadPrism 9、Origin2024 对数据进行可视化处理。挥发性化合物使用在线工具(https://www.chiplot.)对结果进行可视化。

2 结果与分析

2.1 不同调味液调味效果对比

基于感官评分与腥度值的综合评价结果显示, 不同调味液处理组对海鲈鱼均表现出显著风味改良作用, 其中复配组效果最为显著, 且当浓度为 0.3 g/100 mL 时呈现最优调味效果。如图 1 所示, 复配组感官评分达到峰值(93 分), 显著高于单一处理组, 且伴随调味液浓度提升, 各组腥度值呈梯度下降, 而感官评分在 0.1~0.3 g/100 mL 浓度范围内持续上升。但当浓度超过 0.3 g/100 mL 时, 感官评分趋于稳定甚至出现下降趋势, 推测可能由于过量植物提取物会引发原料特征气味的过度释放及色泽加深, 故选择 0.3 g/100 mL 为最佳作用浓度。复配组的协同增效源于三种天然植物活性成分的功能互补, 这主要归因于牛至中香芹酚与薄荷醇的强效抑菌特性可抑制腥味前体物质的生成[21]; 香茅所含芳樟醇、香叶醇[22] 通过芳香物质掩蔽作用直接中和己醛等腥味成分; 辣木异硫氰酸酯[23] 则通过阻断脂质氧化反应减少不良风味物质的产生。三者兼具香味掩盖、抑菌和抗氧化的多重作用, 能较好地抑制不良气味, 从而实现海鲈鱼风味的优化与改善。

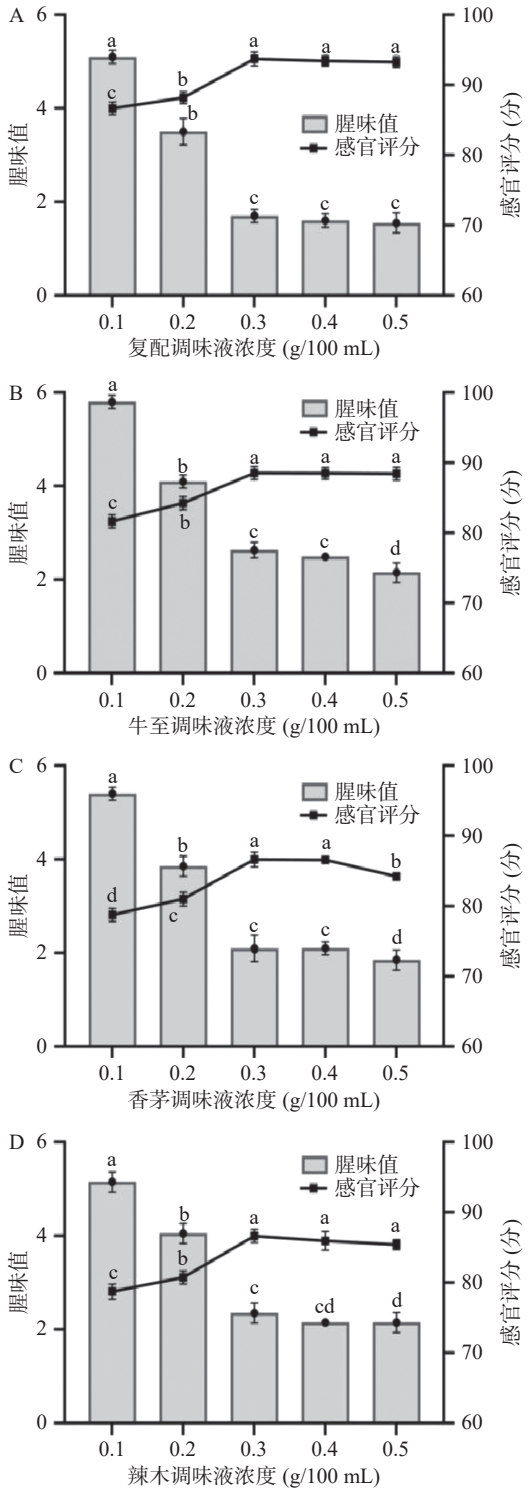


图 1 不同调味液对海鲈鱼调味效果对比

Fig.1 Comparison of seasoning effects of different treatments on sea bass

注: A: 复配调味液, B: 牛至调味液, C: 香茅调味液, D: 辣木调味液。不同小写字母表示不同处理方式之间差异显著($P<0.05$), 图 2 同。

2.2 不同调味液对海鲈鱼色差的影响

鱼肉生理结构、内部化学反应及微生物繁殖会引起颜色变化, 色泽是影响消费者选购意愿的关键感官指标[24]。亮度值(L^*)、红度值(a^*)、黄度值(b^*)和总色差(ΔE)可全面反映色泽的变化。

不同处理的海鲈鱼色泽表现出显著差异。由

表 4 可知，与对照组相比，不同处理的海鲈鱼肉 L^*值显著降低(P<0.05)，表明鱼肉表面亮度下降，可能与植物中多酚类、叶绿素等深色色素渗透有关，同时浸泡处理可能会引起鱼肉表面蛋白质氧化或变性，导致亮度降低。a^*值均为负值，表明鱼肉整体偏向绿色调(负值代表绿色，正值代表红色)，复配组(−3.79)、牛至组(−3.66)、香茅组(−3.16)与对照组(−3.8)接近，但辣木组显著降低(−6.41)(P<0.05)，可能是由于辣木本身颜色干扰及其提取物促氧化特性，导致颜色偏向绿色。b^*值分析显示，复配组(9.02)、香茅组(10.24)高于对照组(8.73)，可能是由于香茅含类胡萝卜素等黄色色素，溶解后吸附于鱼肉表面，导致黄度增加。辣木组的 b^*值(7.69)与对照组接近，牛至组的 b^*值下降可能与其抗氧化成分抑制了氧化反应有关，从而减少黄色物质的生成。各处理组与对照组相比 ΔE 值显著增加(P<0.05)，说明总体色差变大，处理后鱼肉色泽发生明显改变。

表 4　不同调味液对海鲈鱼色差的影响

Table 4　Impact of different seasoning liquids on the color difference of sea bass

处理组	色差指标			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
对照	60.46±0.89^{a}	−3.8±0.88^{a}	8.73±2.01^{b}	34.38±0.6^{c}
复配	56.62±1.06^{b}	−3.79±0.47^{a}	9.02±1.62^{a}	38±0.87^{b}
牛至	53.11±2.01^{c}	−3.66±2.18^{a}	3.45±3.9^{c}	40.97±0.8^{a}
香茅	56.25±0.07^{b}	−3.16±1.08^{a}	10.24±1.42^{a}	40.33±1.96^{a}
辣木	54.61±1.05^{bc}	−6.41±1.45^{b}	7.69±0.34^{b}	40.35±0.74^{a}

注：同列不同小写字母表示具有显著性差异(P<0.05)。

2.3　不同调味液对海鲈鱼 TBARS 的影响

硫代巴比妥酸(TBARS)值用于评估食品中脂肪的氧化程度。当脂肪发生氧化时会产生一系列的低分子量化合物，这些化合物与硫代巴比妥酸反应会形成有色物质，TBARS 值越高，说明脂肪氧化程度越高[17]。如图 2 所示，对照组 TBARS 值为 0.261 mg MDA/kg，当添加牛至、香茅和辣木三种天然物质复配处理后，TBARS 值降低至 0.233 mg MDA/kg，可能是由于调味料中有多种抗氧化成分，如多糖类、多酚类、维生素类等，这些成分能够帮助鱼肉结合氧自由基，从而有效抑制脂质的氧化分解，达到降低 TBARS 值的目的。单独添加辣木、牛至和香茅后，TBARS 值分别为 0.249、0.242 和 0.235 mg MDA/kg，结果表明，虽然三种调味料都具有一定的抗氧化能力，但辣木的抗氧化能力相对较弱，香茅的抗氧化能力较强，而三种调味料复配使用的效果最佳。

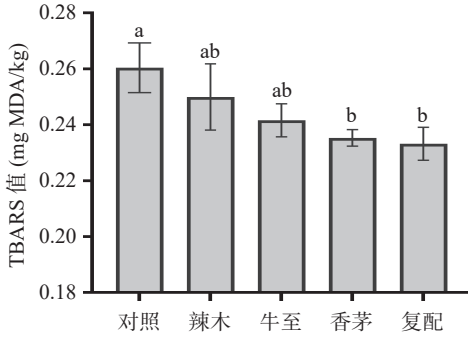


图 2　不同调味液对海鲈鱼 TBARS 值的影响

Fig.2　Impact of different seasoning liquids on the TBARS value of sea bass

2.4　电子鼻分析

电子鼻通过模拟人类鼻子的活动，在挥发性成分的客观辨别中发挥重要作用。主成分分析(Principal component analysis, PCA)是一种通过提取数据的主成分进行降维来评估样本之间总体差异的算法，横坐标和纵坐标分别代表第 1 主成分(PC1)和第 2 主成分(PC2)，当两个主成分的贡献率超过 80%，表明可以有效解释挥发性成分组间差异[25]。如图 3(a)所示，第 1 主成分和第 2 主成分的贡献率分别为 74.3% 和 15.3%，总贡献率为 89.6%，表明 PC1 和 PC2 能够有效表征样品间挥发性成分的差异性特征。五组样品分别落在图中的独立区域，说明五组样品的气味特征具有显著差异，辣木组与复配组距离较近，说明两组样品在挥发性成分特征上相似性较高。如图 3(b)所示，响应值较高的传感器主要为 W1W(硫化物)、W2W(有机硫化物)和 W1S(甲基类/短链烷烃)，表明鱼肉中硫醇、硫醚、二甲基硫醚及三甲胺等异味物质含量较高。其中 W1W 的响应值最高，说明硫化物在海鲈鱼整体风味中占主导地位。经植物提取物处理后，三个传感器的响应值均显著低于对照

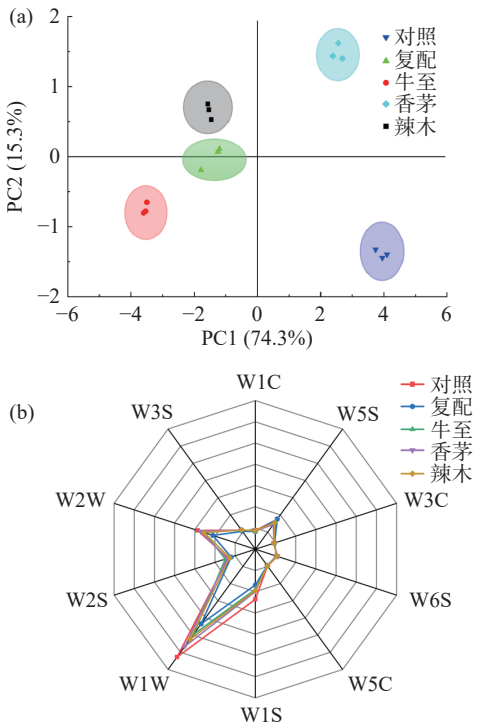


图 3　不同调味液对海鲈鱼气味特征的影响主成分分析图(a)及雷达图(b)

Fig.3　Principal component analysis (PCA) plot (a) and radar chart (b) of the impact of different seasoning liquids on the odor characteristics of sea bass

组(P<0.05)，这一现象与调味处理对异味生成路径的抑制有关，硫化物源于含硫氨基酸的氧化分解，有机硫化物由腐败菌代谢产生，而三甲胺则来自氧化三甲胺的细菌还原反应。植物提取物的活性成分会通过抗氧化和抗菌作用干预上述过程，如牛至中酚类物质抑制脂质氧化和硫前体释放，从而协同降低三类异味物质的积累。复配组的传感器响应值显著低于单一提取物处理组(P<0.05)，如 W1W 值较香茅组显著降低，可能归因于复配处理多方面协同作用，不同成分可能对传感器产生复合影响，达到增强去腥增香效果。这些结果表明了调味处理对关键腥味组分的抑制效果，也为进一步 GC-MS 检测样品具体风味物质的变化提供依据。

2.5 电子舌分析

电子舌作为食品滋味特征分析的灵敏工具，能检测包括酸味(AHS)、甜味(ANS)、苦味(SCS)、咸味(CTS)、鲜味(NMS)及综合滋味(PKS、CPS)等关键味觉指标[26−27]。如图 4(a)所示，不同处理的样品 PC1 和 PC2 贡献率分别为 57.3% 和 35.8%，累计贡献率达到 93.1%，大于 80%，说明 PC2 和 PC1 可以代表不同样品的整体滋味特性。雷达图可以反映出海鲈鱼基础滋味的特征分布，其中苦味传感器信号强度最大，鲜味传感器信号最弱。

不同处理对海鲈鱼的滋味特征具有显著影响。如表 5 所示，牛至、香茅、辣木以及三者复配使用均降低了海鲈鱼的酸味，其中辣木组酸味响应值最低，可能与抗氧化成分延缓脂质氧化酸败有关[28]。添加辣木的海鲈鱼展现出最高的鲜味响应值(2087.43)，这可能与辣木中含有谷氨酸、核苷酸等鲜味物质有关[29]。咸味响应值在各组之间变化较小，对照组略高于各个处理组，说明处理后的鱼肉通过风味协同减弱了咸味。香茅组综合滋味(CPS)响应值高于其余处理组，说明香茅对综合滋味有一定的提升作用。所有处理组甜味、苦味值均呈下降趋势。综上所述，辣木在提升鲜味方面效果最为显著，而香茅和牛至则在其他滋味方面表现出一定的优势。三种植物复配后，虽鲜味响应值有所降低，但整体仍能通过风味协同作用，在降低酸味、甜味和苦味的同时，实现较为均衡的滋味调配，有助于减少异味，改善整体风味接受度。

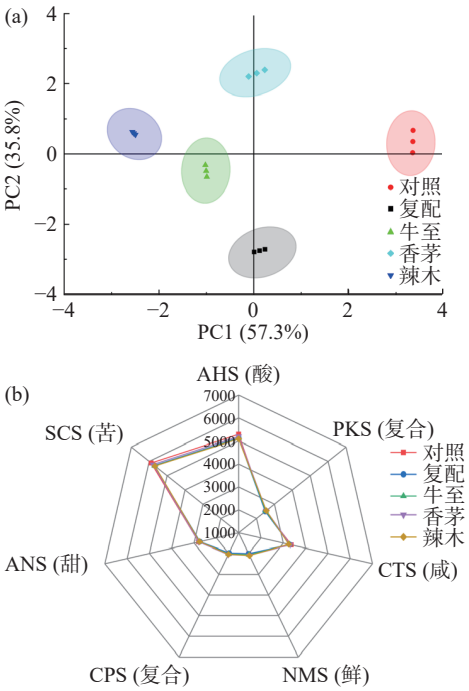


图 4 不同调味液对海鲈鱼滋味特征的影响主成分分析图(a)及雷达图(b)

Fig.4 Principal component analysis plot (a) and radar plot (b) of the effects of different seasoning liquids on the taste characteristics of sea bass

2.6 不同调味液对海鲈鱼游离氨基酸的影响

氨基酸作为蛋白质降解产物及风味前体物质，可与脂质和糖等互相作用生成香味物质，从而有效促进食物整体风味的提升[30−32]。各种游离氨基酸呈现不同的滋味，其中鲜味主要与天冬氨酸和谷氨酸有关，甜味主要与丝氨酸、甘氨酸、苏氨酸和精氨酸等有关[33]，而苦味则与组氨酸、酪氨酸、半胱氨酸和蛋氨酸等有关。

海鲈鱼经过不同处理后氨基酸含量的变化如表 6 所示。对照组总氨基酸含量 357.94 mg/100 g，包括 7 种必需氨基酸(38.44 mg/100 g)，16 种非必需氨基酸(319.5 mg/100 g)，辣木处理组与对照组相比总氨基酸含量显著提升至 488.29 mg/100 g(P<

表 5 不同调味液对海鲈鱼滋味特征响应值的影响

Table 5 Influence of different seasoning liquids on the response values of sea bass flavor characteristics

味觉指标	调味液处理组				
	对照	复配	牛至	香茅	辣木
酸(AHS)	5289.81±14.7^{a}	5130.72±11.93^{c}	5110.07±10.64^{cd}	5194.32±13.73^{b}	5091.11±13.39^{d}
复合(PKS)	2502.16±55^{ab}	2489.14±48.08^{b}	2516.7±43.44^{a}	2545.47±45.03^{a}	2546.02±44.01^{a}
咸(CTS)	3358.5±122.63^{a}	3286.15±107.47^{c}	3277.03±97.22^{c}	3310.89±95.04^{b}	3245.06±101.35^{d}
鲜(NMS)	2004.13±2.38^{c}	1996.64±2.64^{c}	2041.99±14.95^{b}	2081.81±3.79^{a}	2087.43±9.67^{a}
复合(CPS)	1997.5±61.35^{c}	1965.16±52.59^{d}	2006.78±47.4^{c}	2044.5±49.53^{a}	2027.85±52.92^{b}
甜(ANS)	2794.17±69.13^{a}	2734.56±67.57^{c}	2752.82±57.12^{b}	2789.64±56.95^{a}	2750.84±62.3^{b}
苦(SCS)	5890.38±13.18^{a}	5716.07±10.66^{c}	5693.81±7.81^{cd}	5784.58±12.37^{b}	5680.29±9.58^{d}

注：同一行不同小写字母表示具有显著性差异(P<0.05)，表6、表7同。

表 6　不同调味液对海鲈鱼游离氨基酸含量的影响

Table 6　Impact of different seasoning liquids on the free amino acid content of sea bass

种类	味感	含量(mg/100 g)				
		对照	复配	牛至	香茅	辣木
天冬氨酸 Asp	鲜	0.91±0.41^{a}	0.79±0.14^{ab}	0.42±0.07^{c}	0.65±0.07^{ab}	0.61±0.18^{ab}
谷氨酸 Glu	鲜	5.53±0.19^{c}	6.49±0.32^{b}	4.34±0.54^{d}	7.3±0.1^{a}	6.71±0.06^{b}
苏氨酸 Thr*	甜	8.65±0.92^{bc}	10.06±0.89^{ab}	6.97±1.53^{c}	7.77±1.36^{c}	11.2±0.19^{a}
丝氨酸 Ser	甜	15.68±2.27^{bc}	17.67±0.89^{ab}	13.38±2.73^{c}	15.01±2.29^{bc}	19.93±0.13^{a}
甘氨酸 Gly	甜	151.16±10.66^{bc}	184.76±12.82^{ab}	138.02±30.32^{c}	155.88±23.68^{bc}	214.95±7.5^{a}
丙氨酸 Ala	甜	20.71±1.74^{b}	24.26±1.9^{ab}	21.13±4.78^{b}	25.47±3.2^{ab}	28.45±0.71^{a}
羟脯氨酸 Hypro	甜	9.52±0.28^{c}	11.55±0.01^{b}	9.8±0.97^{c}	9.45±1.78^{c}	15.42±0.14^{a}
脯氨酸 Pro	甜	6.16±0.89^{b}	8.47±0.81^{a}	5.62±0.39^{b}	6.26±0.16^{b}	7.78±0.35^{a}
缬氨酸 Val*	苦	5.04±0.63^{b}	7.12±0.15^{a}	5.76±1.32^{ab}	5.38±0.44^{ab}	6.92±1.45^{ab}
蛋氨酸 Met*	苦	1.25±0.2^{b}	3.61±0.71^{a}	2.16±1.14^{ab}	1.52±0.23^{b}	3.11±1.62^{ab}
异亮氨酸 Ile*	苦	1.79±0.47^{b}	3.29±1.47^{ab}	1.75±0.34^{b}	2.2±0.45^{ab}	4.57±2.13^{a}
亮氨酸 Leu*	苦	3.42±0.75^{b}	4.3±0.66^{ab}	3.44±0.74^{b}	3.95±0.64^{b}	5.89±1.43^{a}
苯丙氨酸 Phe*	苦	1.67±0.15^{b}	1.91±0.16^{b}	1.54±0.3^{b}	1.98±0.25^{b}	5.43±3.17^{a}
赖氨酸 Lys*	苦	16.62±2.31^{ab}	18.53±2.32^{a}	13.32±2.57^{b}	14.17±2.34^{b}	19.12±0.17^{a}
半胱氨酸 Cys	苦	2.26±0.24^{bc}	6.33±2.66^{ab}	2.32±0.95^{abc}	1.54±0.29^{c}	6.62±3.99^{a}
酪氨酸 Tyr	苦	1.87±0.37^{b}	2.39±0.46^{ab}	1.7±0.29^{b}	1.96±0.22^{b}	4.86±2.76^{a}
组氨酸 His	苦	32.47±4.02^{c}	35.58±2.77^{bc}	33.99±7.37^{c}	39.15±4.97^{a}	41.42±0.06^{a}
精氨酸 Arg	苦	2.51±0.29^{bc}	2.96±0.41^{ab}	1.97±0.35^{c}	2.1±0.39^{c}	3.15±0.09^{a}
瓜氨酸 Cit	–	61.53±4.16^{b}	59.02±0.72^{b}	69.2±15.98^{b}	90.65±2.85^{a}	71.02±1.99^{b}
牛磺酸 Tau	–	0.6±0.08^{a}	0.61±0.05^{a}	0.24±0.24^{b}	0.21±0.21^{b}	0.64±0^{a}
羟赖氨酸 Hylys	–	0.61±0.05^{c}	0.8±0.05^{ab}	0.76±0.08^{b}	0.87±0.01^{a}	0.77±0.02^{b}
鸟氨酸 Orn	–	1.41±0.53^{ab}	1.55±0.07^{a}	0.79±0.2^{c}	0.91±0.2^{bc}	1.54±0.14^{a}
天冬酰胺 Ans	–	6.57±0.39^{bc}	6.91±0.7^{b}	6.09±0.09^{c}	6.3±0.3^{c}	8.18±0.2^{a}
必需氨基酸		38.44±5.43^{b}	48.82±6.36^{ab}	34.94±7.94^{b}	36.97±5.71^{b}	56.24±10.16^{a}
非必需氨基酸		319.5±26.57^{c}	370.14±24.78^{b}	309.77±64.81^{c}	363.71±40.72^{b}	432.05±18.32^{a}
总氨基酸		357.94±32^{bc}	418.96±31.14^{b}	344.71±72.75^{c}	400.68±46.43^{b}	488.29±28.48^{a}
甜味氨基酸		211.88±16.76^{b}	256.77±17.32^{ab}	194.92±40.72^{c}	219.84±32.47^{ab}	297.73±9.02^{a}
鲜味氨基酸		6.44±0.6^{b}	7.28±0.46^{a}	4.76±0.61^{c}	7.95±0.17^{a}	7.32±0.24^{a}
苦味氨基酸		68.9±9.43^{c}	86.02±11.77^{b}	67.95±15.37^{c}	73.95±10.22^{bc}	101.09±16.87^{a}

注：*表示必需氨基酸。

0.05)，复配组和香茅组各增加为 418.96 mg/100 g 和 400.68 mg/100 g，牛至组降低至 344.71 mg/100 g，可能的原因是辣木和香茅本身含有丰富的氨基酸，这些氨基酸可能溶解在水溶液中，被海鲈鱼吸收或与其自身的氨基酸混合，导致检测到的游离氨基酸含量增加[34]。牛至中的某些成分可能与鱼肉中的蛋白质相互作用，从而影响游离氨基酸的生成和含量[20]。

天冬氨酸和谷氨酸作为典型的鲜味氨基酸[35]，其协同作用已被证明可以增强鱼肉的鲜味强度，其中谷氨酸不仅是鲜味的主要贡献者，还是重要的营养物质，能起到促进蛋白质的合成和维持正常的代谢功能的作用。除牛至组外，其余三个处理组均提高了鱼肉的谷氨酸含量。丝氨酸、甘氨酸和羟脯氨酸是鱼肉中常见的甜味氨基酸，其中甘氨酸含量最高，具有提升甜味和中和苦味的作用，辣木处理组甘氨酸含量(214.95 mg/100 g)显著高于对照组(151.16 mg/100 g)(P<0.05)，牛至组无显著影响。苦味氨基酸如组氨酸、半胱氨酸和色氨酸会增加令人不悦的味道，但研究表明，它们对产品整体的鲜味效果和丰富性有一定的作用[36]，复配(86.02 mg/100 g)、香茅(73.95 mg/100 g)和辣木(101.09 mg/100 g)处理组的苦味氨基酸均高于对照组(68.9 mg/100 g)，而牛至组降低为 67.95 mg/100 g。综上所述，复配、香茅和辣木处理均可提高鱼肉的甜味与鲜味氨基酸含量，但苦味氨基酸的含量也会增加。牛至处理虽然降低了苦味氨基酸的含量，但对风味改善无明显贡献。

2.7　不同调味液对海鲈鱼片挥发性风味物质的影响

不同调味液对海鲈鱼挥发性风味物质的影响如图 5 所示，经 GC-MS 分析共检测出 63 种匹配度超过 80% 的挥发性成分，涵盖醛类(4 种)、醇类(12 种)、酮类(4 种)、烷烃(12 种)、卤代烃(2 种)、萜烯类(14 种)、酚类(5 种)、醚类(5 种)、酯类(2 种)、芳香烃(2 种)及肟类(1 种)。其中对照组检测出 19 种物质，复配组和香茅组挥发性物质种类数量多于其他组，分别高达 45 和 51 种，牛至组与辣木组则分别为 28 和 27 种。萜烯类物质在种类数量上占比最高，而相对含量较高的风味物质集中在醛类、醇类和酚类化合物。为了更直观地显示样品之间的风味物质差

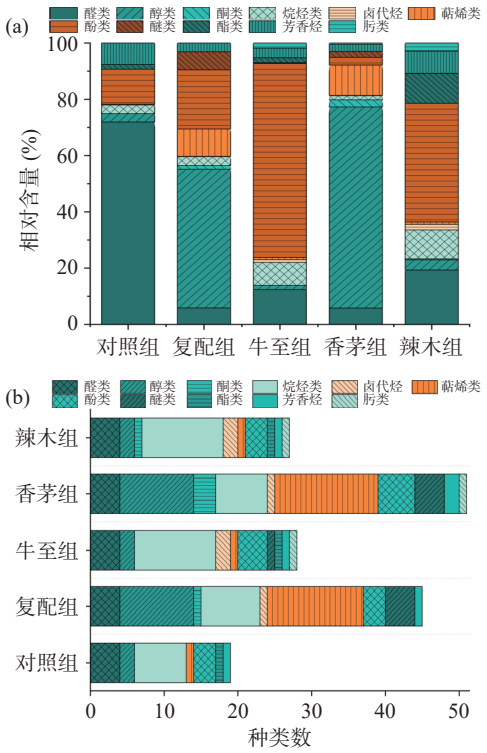


图 5　不同处理的挥发性物质相对含量图(a)和种类图(b)

Fig.5　Graph (a) of relative content of volatile compounds under different treatments and graph (b) of volatile compound categories under different treatments

异，绘制了挥发性化合物聚类热图，如图 6 所示，从整体上看，各处理组的挥发性物质相对含量较对照组显著增加，其中复配组与香茅组具有更复杂的风味物质组成，其次为牛至组和辣木组，多种挥发性成分丰富风味多样性。

醛类是脂质氧化及降解产物，气味阈值比较低，对鱼肉的整体风味具有显著影响，主要表现为鱼腥味，青草香等味道[37]。如表 7 所示，对照组醛类含量（5012.47 μg/kg）明显高于所有处理组，具体表现为：香茅组（1455.45 μg/kg）>复配组（1004.29 μg/kg）>牛至组（998.30 μg/kg）>辣木组（920.48 μg/kg），其中辣木组展现出最强的醛类抑制效果，说明三种提取物的添加可以减少醛类物质的生成从而改善鱼腥味。不同的醛类物质具有不同的气味特征，己醛表现出青草味和鱼腥味，为主要腥味来源，壬醛（脂肪味）、辛醛（清香、油脂味）、庚醛（青草味）共同影响风味层次[38]。

醇类主要来源于糖、氨基酸还原反应或不饱和脂肪酸降解[39]。阈值较高，对整体风味贡献有限，通常具有花香、果香或酒香等。复配组与香茅组各检测出 10 种物质，其中芳樟醇在香料中属于“头香香料”，具有清甜的木青气息[40]；香茅醇具有玫瑰香味，常被用作食品中的香料；L-薄荷醇具有清凉的薄荷香气；橙花醇具有甜润的果香和花香香气[41]；复配组与牛至组均检测出的 2-茨醇具有樟脑气味，以上成分可协同提升风味复杂度。

酮类多来源于鱼体脂肪的氧化分解、氨基酸的降解以及微生物的代谢活动，其中异薄荷酮和 L-薄荷酮均具有强烈的薄荷香味，可以通过掩盖腥味或协同作用塑造风味特征。萜烯类物质阈值较低，具有清

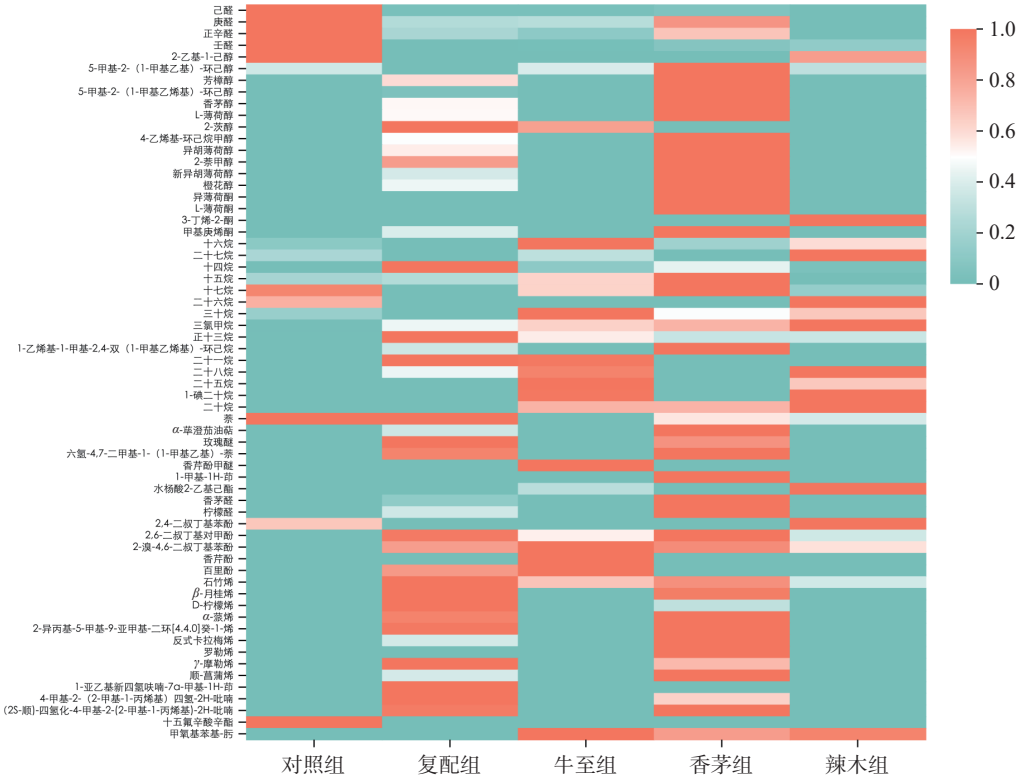


图 6　不同处理的挥发性物质聚类热图

Fig.6　Clustered heatmap of volatile compounds from different treatments

表 7　挥发性风味物质组成与含量

Table 7　Composition and content of volatile flavor compounds

类别	序号	化合物名称	含量(μg/kg)				
			对照组	复配组	牛至组	香茅组	辣木组
醛类	1	己醛*	3207.03±769.16^{a}	317.67±118.69^{b}	326.49±46.37^{b}	431.03±60.16^{b}	274.81±125.53^{b}
	2	庚醛*	443.96±10.85^{a}	209.71±5.01^{b}	213.14±107.45^{b}	399.8±55.16^{ab}	127.77±69.92^{c}
	3	正辛醛*	360.44±72.81^{a}	191.85±16.02^{b}	169.81±33.69^{b}	292.03±30.28^{b}	146.08±87.78^{b}
	4	壬醛*	1001.04±279.93^{a}	285.07±88.96^{b}	288.86±68.56^{b}	332.6±78.16^{b}	371.83±153.74^{b}
		合计	5012.47±1132.75	1004.29±228.68	998.3±256.08	1455.45±223.77	920.48±436.97
醇类	1	2-乙基-1-己醇	140.01±16.88^{a}	–	–	–	115.37±56.33^{b}
	2	5-甲基-2-(1-甲基乙基)-环己醇	67.17±9.09^{b}	–	73.66±31.56^{b}	190.12±56.71^{a}	56.45±1.78^{b}
	3	芳樟醇	–	173.3±10.56^{b}	–	289.36±83.29^{a}	–
	4	5-甲基-2-(1-甲基乙烯基)-环己醇	–	18.67±0.98^{b}	–	540.01±199.03^{a}	–
	5	香茅醇	–	3023.2±222.78^{b}	–	5836.03±1058.93^{a}	–
	6	L-薄荷醇	–	97.84±1.06^{b}	–	190.12±76.42^{a}	–
	7	2-茨醇	–	56.55±0.72^{a}	46.03±3.88^{b}	–	–
	8	4-乙烯基-环己烷甲醇	–	1860.52±98.73^{b}	–	3769.69±760.13^{a}	–
	9	异胡薄荷醇	–	737.14±87.49^{b}	–	1354.27±541.94^{a}	–
	10	2-萘甲醇	–	256.47±3.82^{b}	–	308.64±25.97^{a}	–
	11	新异胡薄荷醇	–	1123.14±740.83^{b}	–	2993.02±1572.96^{a}	–
	12	橙花醇	–	1121.78±47.27^{b}	–	2479.16±306.93^{a}	–
		合计	207.17±25.97	8468.61±1214.24	119.7±35.44	17950.41±4682.31	171.83±58.11
酮类	1	异薄荷酮	–	–	–	35.27±0.36	–
	2	L-薄荷酮	–	–	–	35.27±5.7	–
	3	3-丁烯-2-酮	–	–	–	–	15.9±0.94
	4	甲基庚烯酮	–	223.59±60.94^{b}	–	570.27±33.94^{a}	–
		合计	0	223.59±60.94	0	640.8±40	15.9±0.94
烷烃类	1	十六烷*	29.16±1.42^{c}	19.66±1.81^{b}	119.94±64.83^{a}	37.83±4.53^{c}	79.39±13.54^{bc}
	2	二十七烷	17.86±0.69^{b}	–	23.09±0.46^{b}	–	78.6±32.97^{a}
	3	十四烷*	20.23±5.78^{b}	124.35±56.76^{a}	31.83±0.87^{ab}	64.72±3.77^{a}	22.67±0.64^{b}
	4	十五烷*	49.88±12.56^{ab}	52.51±17.31^{ab}	73.2±43.86^{a}	93.96±39.04^{a}	38.19±0.71^{b}
	5	十七烷*	58.05±34.7^{b}	28.56±4.6^{b}	48.47±54.18^{b}	60.12±18.63^{a}	33.11±0.86^{b}
	6	二十六烷	24.32±17.43^{b}	–	–	–	32.29±8.64^{a}
	7	三十烷*	14.51±8.28^{c}	10.19±0.57^{c}	38.04±5.64^{a}	23.74±12.63^{b}	28.87±2.53^{b}
	8	正十三烷	–	178.35±24.53^{a}	97.7±6.73^{ab}	58.61±31.97^{b}	60.39±9.56^{b}
	9	二十一烷	–	105.64±32.16^{a}	104.5±11.73^{b}	–	–
	10	二十八烷	–	23.22±5.77^{b}	48.79±0.54^{a}	–	51.73±7.97^{a}
	11	二十五烷	–	–	45.02±12.84^{a}	–	30.11±0.62^{b}
	12	二十烷	–	–	25.66±8.64^{b}	25.57±5.33^{b}	34.64±6.1^{a}
		合计	214.01±80.86	542.48±143.51	656.24±210.32	364.54±115.9	490±84.14
卤代烃	1	1-碘二十烷	–	–	58.13±28.99^{a}	–	58.55±2.63^{b}
	2	三氯甲烷	–	15.68±0.29^{b}	22.01±17.33^{a}	25.79±1.46^{a}	34.69±1.85^{a}
		合计	0	15.68±0.29	80.14±46.32	25.79±1.46	93.24±4.48
萜烯类	1	石竹烯*	19.71±6.42^{b}	80.87±7.99^{a}	61.76±5.71^{a}	73.86±14.85^{a}	41.83±6.72^{a}
	2	*β*-月桂烯	–	395.34±43.71^{a}	–	382.6±44.66^{b}	–
	3	D-柠檬烯	–	301.41±97.6^{a}	–	91.01±2.76^{b}	–
	4	*α*-蒎烯	–	55.25±8.78^{a}	–	58.43±7.85^{b}	–
	5	*α*-荜澄茄油萜	–	27.9±3.42^{b}	–	79.58±5.73^{a}	–
	6	罗勒烯	–	–	–	40.78±1.78	–
	7	*γ*-摩勒烯	–	53.41±5.73^{a}	–	38.52±12.9^{b}	–
	8	顺-菖蒲烯	–	22.84±1.06^{b}	–	60.63±7.4^{a}	–
	9	2-异丙基-5-甲基-9-亚甲基-二环[4.4.0]癸-1-烯	–	188.26±99.02^{a}	–	190.67±67.65^{b}	–
	10	反式卡拉梅烯	–	55.36±0.45^{b}	–	150.52±42.71^{a}	–
	11	六氢-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙基)-萘	–	107.23±53.05^{b}	–	113.97±38.61^{a}	–
	12	1-乙烯基-1-甲基-2,4-双(1-甲基乙烯基)-环己烷	–	35.52±7.83^{b}	–	101.64±27.93^{a}	–

续表 7

类别	序号	化合物名称	含量(μg/kg)				
			对照组	复配组	牛至组	香茅组	辣木组
	13	香茅醛	–	61.07±2.61^{b}	–	505.87±32.9^{a}	–
	14	柠檬醛	–	291.29±40.86^{b}	–	826.16±560.22^{a}	–
		合计	19.71±6.42	1675.75±372.11	61.76±5.71	2714.24±867.95	41.83±6.72
酚类	1	香芹酚	–	–	2594.74±108.56^{a}	73.86±14.85^{b}	–
	2	百里酚	–	1329.71±376.04^{b}	1566.48±441.26^{a}	382.6±44.66^{c}	–
	3	2,4-二叔丁基苯酚	698.49±468.01^{a}	–	–	91.01±2.76^{b}	1037.55±365.82^{a}
	4	2,6-二叔丁基对甲酚*	115.83±20.66^{a}	2121.88±441.95^{a}	1217.59±793.04^{a}	58.43±7.85^{b}	843.82±94.7^{a}
	5	2-溴-4,6-二叔丁基苯酚*	53.27±7.92^{a}	158.27±95.02^{b}	180.66±32.78^{b}	79.58±5.73^{a}	127.14±6.89^{b}
		合计	867.59±496.59	3609.86±913.01	5559.47±1375.64	685.48±75.85	2008.51±467.41
醚类	1	玫瑰醚	–	364.04±55.86^{a}	–	38.52±12.9^{b}	–
	2	香芹酚甲醚	–	–	21.79±2.99^{a}	40.78±1.78^{b}	–
	3	4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)四氢-2H-吡喃	–	107.61±17.84^{a}	–	68.19±2.31^{b}	–
	4	(2S-顺)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃	–	364.04±229.64^{a}	–	372.72±29.9^{b}	–
	5	1-亚乙基新四氢呋喃-7a-甲基-1H-茚	–	268.73±59.73	–	–	–
		合计	0	1104.42±363.07	21.79±2.99	520.21±46.89	0
酯类	1	水杨酸2-乙基己酯	–	–	142.01±47.85^{b}	–	508.18±58.09^{a}
	2	十五氟辛酸辛酯	112.7±9.04	–	–	–	–
		合计	112.7±9.04	0	142.01±47.85	0	508.18±58.09
芳香烃	1	1-甲基-1H-茚	–	–	–	215.2±11.84	–
	2	萘*	535.66±161.47^{a}	535.66±66.85^{a}	278.34±38.95^{b}	424.21±221.95^{a}	375.73±62.9^{ab}
		合计	535.66±161.47	535.66±66.85	278.34±38.95	639.41±233.79	375.73±62.9
肟类	1	甲氧基苯基-肟	–	–	145.78±59.03^{a}	121.41±56.73^{a}	137.31±43.27^{b}
		合计	0	0	145.78±59.03	121.41±56.73	137.31±43.27

注: “–”表示未检出成分; “*”表示各组共有的成分。

新、花香、木香、柑橘香等天然香气,其中石竹烯在各实验组含量相对较高,具有丁香气味,α-蒎烯主要呈清香气味[42]。酚类物质可通过抑制脂肪氧化及参与美拉德反应,与鱼肉中的醛、酮等风味前体物相互作用,减少腥味并生成新的呈味化合物[43],从而优化风味复杂性,牛至组与香茅组均含有的百里酚具有草药味,辣木组高含量的 2,4-二叔丁基苯酚具有特殊气味,对整体气味轮廓产生一定的影响。醚类物质中玫瑰醚具有玫瑰花香,可以进一步丰富风味层次。

综上所述,醛类、醇类、酮类等物质在海鲈鱼整体风味形成中发挥着重要作用,各物质之间的相互作用和变化共同决定了海鲈鱼的风味特征,实现减弱腥味与提升风味复杂度的效果。

3 结论

本研究通过分析牛至、香茅、辣木单独及复配使用对海鲈鱼风味的调控作用,发现植物提取物的复配应用可通过对海鲈鱼色泽、气味、滋味、氧化稳定性及挥发性组分的多方面干预,从而实现风味品质的全面提升。相较于单一处理,复配组(牛至∶香茅∶辣木=1∶1∶1)在质量浓度为 0.3 g/100 mL 时,展现出最佳的调味效果。植物中多酚类与叶绿素等深色色素会通过渗透作用,导致鱼肉表面色泽加深。TBARS 值分析表明,复配组较单一组分增强了对脂质氧化抑制能力。电子鼻与电子舌检测表明,调味处理可以减少硫化物、烷烃和胺类物质的产生,且抑制了海鲈鱼的酸味及苦味,其机制可能与各组分的抗氧化及抗菌特性有关。复配处理显著提升了鱼肉中游离氨基酸总量,尤其是鲜味氨基酸增长幅度明显,表明三种药食同源物质复配应用可协同促进氨基酸的生成,从而增强滋味层次并提升其营养价值。通过 GC-MS 分析进一步表明,复配调味可以显著降低腥味,其中泥腥味关键物质己醛含量从 3207.03 μg/kg 降低至 317.67 μg/kg,同时可促进芳樟醇、香茅醇等醇类芳香成分的富集,三种天然物质调味处理可实现腥味掩蔽与芳香风味协同增效。该研究为天然风味改良剂的开发提供了理论支撑,后续可结合抗菌抗氧化机制深入探究其保鲜机理,并建立货架期预测模型以推动工业化应用。

© 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] 中华人民共和国统计局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. [Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China fishery statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.]

[2] 蓝蔚青, 张炳杰, 周大鹏, 等. 超声联合微酸性电解水处理对真空包装海鲈鱼冷藏期间品质变化的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 62−68. [LAN Weiqing, ZHANG Bingjie, ZHOU Dapeng,

et al. Effect of ultrasonic combined with slightly acidic electrolyzed water treatment on quality changes of vacuum-packaged sea bass (*Lateolabrax japonicas*) during refrigerated storage[J]. Food Science, 2022, 43(5): 62−68.]

[3] CAI Luyun, WU Xiaosa, LI Xiuxia, et al. Effects of different freezing treatments on physicochemical responses and microbial characteristics of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicas*) fillets during refrigerated storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 122−129.

[4] WANG Meiqian, ZHAN Ping, GENG Jingzhang, et al. Identification and inhibition of key off-odorants in boiled greenfin horseface filefish (*Thamnaconus septentrionalis*) subjected to *Perilla* polyphenols extract[J]. LWT, 2024, 199: 116120.

[5] 张海燕, 吴燕燕, 李来好, 等. 响应面法优化海鲈鱼片脱腥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(11): 143−149. [ZHANG Haiyan, WU Yanyan, LI Laihao, et al. Optimized deodorization process of *Lateolabrax japonicas* fillets by response surface methodology[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(11): 143−149.]

[6] GUAN Weiliang, REN Xingchen, LI Yujin, et al. The beneficial effects of grape seed, sage and oregano extracts on the quality and volatile flavor component of hairtail fish balls during cold storage at 4 ℃[J]. LWT, 2019, 101: 25−31.

[7] WANG Di, LI Chunsheng, PAN Chuang, et al. Antimicrobial activity and mechanism of action of oregano essential oil against *Morganella psychrotolerans* and potential application in tuna[J]. LWT, 2022, 165: 113758.

[8] 吴燕燕, 朱小静, 林婉玲, 等. 香菜和香茅对鲜鲈鱼片的脱腥、抑菌效果[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 188−194. [WU Yanyan, ZHU Xiaojing, LIN Wanling, et al. Effect of Chinese parsley (*Coriandrum sativum*) and *Citronella* (Moslachinensis Maxim) on removing fishy taste and bacteriostasis of fresh *Micropterus salmoides* fillets[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(12): 188−194.]

[9] ISRA L, ALI M S, SALMA U, et al. Physical, nutritional, and sensory characterization of pangas (*Pangasianodon hypophthalmus*) fish ball incorporated with *Moringa* leaves powder[J]. Food Chemistry Advances, 2024, 4: 100715.

[10] 雷福红, 龙继明, 张祖兵, 等. 辣木茎叶、籽、果荚营养成分及提取物抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(7): 40−45. [LEI Fuhong, LONG Jiming, ZHANG Zubing, et al. Nutrient composition and antioxidant activities of extracts from *Moringa* stem leaves, seeds and fruit pods[J]. China Food Additives, 2024, 35(7): 40−45.]

[11] PRABAKARAN M, KIM S H, SASIREKA A, et al. Polyphenol composition and antimicrobial activity of various solvent extracts from different plant parts of *Moringa oleifera*[J]. Food Bioscience, 2018, 26: 23−29.

[12] 邓静, 杨荭, 朱佳倩, 等. 水产原料腥味物质的形成及脱腥技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(8): 2097−2102. [DENG Jing, YANG Hong, ZHU Jiaqian, et al. Research progress in the formation and deodorization technology of fishy odor for aquatic raw material[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(8): 2097−2102.]

[13] 葛胜晗, 周阿容, 黄晨楹, 等. 红茶对海螺肉去腥和保鲜作用的研究[J]. 中国调味品, 2018, 43(12): 23−31. [GE Shenghan, ZHOU Arong, HUANG Chenying, et al. Study on the effect of black tea on the deodorization and preservation of conch meat[J]. China Condiment, 2018, 43(12): 23−31.]

[14] 马凯迪, 黄琼, 李莹, 等. 紫菜鳜鱼脱腥及调味工艺优化研究[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(16): 186−195. [MA Kaidi, HUANG Qiong, LI Ying, et al. Study on deodorization and seasoning process optimization of mandarin fish with laver[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(16): 186−195.]

[15] 高涛, 罗黄洋, 吴韧, 等. 主客观组合权重法在食品感官评价中的应用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 300−307. [GAO Tao, LUO Huangyang, WU Ren, et al. Application of subjective and objective combination weighting method in food sensory evaluation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 300−307.]

[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.181- 2016 食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.181-2016 National standard for food safety-Determination of malondialdehyde in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[17] 刘琳, 焦文娟, 赵甜甜, 等. 电子鼻结合生物胺分析淡水鱼贮藏过程中的品质变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 137−148. [LIU Lin, JIAO Wenjuan, ZHAO Tiantian, et al. Evaluation of quality changes in freshwater fish during storage using electronic nose measurements and biogenic amine contents[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(1): 137−148.]

[18] 李亚俐, 王雪莉, 石柳, 等. 壳聚糖-绿原酸复合保鲜剂对冷藏鲴鱼片食用品质的影响[J]. 肉类研究, 2025, 39(1): 42−50. [LI Yali, WANG Xueli, SHI Liu, et al. Effect of a preservative mixture consisting of chitosan and chlorogenic acid composite on the eating quality of refrigerated catfish fillets[J]. Meat Research, 2025, 39(1): 42−50.]

[19] HU Yingying, WANG Jiawang, LIU Qian, et al. Unraveling the difference in flavor characteristics of dry sausages inoculated with different autochthonous lactic acid bacteria[J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101778.

[20] 袁可怡, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 不同烹饪方式对金鲳鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 81−90. [YUAN Keyi, ZHAO Tiantian, JIAO Wenjuan, et al. Effects of different cooking methods on the quality of golden pomfret fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 81−90.]

[21] 王渝琪, 吴继红, 廖小军, 等. 畜禽类预制菜异味来源及其抑制掩蔽技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 369−379. [WANG Yuqi, WU Jihong, LIAO Xiaojun, et al. Research progress on premade meat and poultry dishes off-flavors and their inhibiting and masking technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 369−379.]

[22] WRÓBLEWSKA A, FAJDEK-BIEDA A, MARKOWSKA-SZCZUPAK A, et al. Preliminary microbiological tests of S-carvone and geraniol and selected derivatives of these compounds that may be formed in the processes of isomerization and oxidation[J]. Molecules, 2022, 27(20): 7012.

[23] BILLAH M B, HAQUE M E, SARKAR S, et al. Growth performance, hematological disorder and bacterial challenge on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using *Moringa oleifera* plant leaf as feed supplement[J]. Bangladesh Journal of Zoology, 2020, 48(1): 151−166.

[24] BU Ying, HAN Menglin, TAN Guizhi, et al. Changes in quality characteristics of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) during refrigerated storage and their correlation with color stability[J]. LWT, 2022, 154: 112715.

[25] PAN W C, BENJAKUL S, SANMARTIN C, et al. Charac-

terization of the flavor profile of bigeye tuna slices treated by cold plasma using E-nose and GC-IMS[J]. Fishes, 2022, 7(1): 13.
[26] 杨峰, 巫朝华, 范大明, 等. 四川泡椒对鲢鱼鱼糜凝胶风味特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 152−157. [YANG Feng, WU Zhaohua, FAN Daming, et al. Effect of Sichuan pickled peppers on flavor characteristics of silver carp surimi gel[J]. Food Science, 2017, 38(16): 152−157.]
[27] 任婧楠, 贾潇, 张智锋, 等. 新鲜沙棘果汁和沙棘原浆的风味和营养品质分析[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 164−170. [REN Jingnan, JIA Xiao, ZHANG Zhifeng, et al. Analysis of flavor and nutritional quality of fresh sea buckthorn juice and pulp[J]. Food Science, 2024, 45(4): 164−170.]
[28] LLORENT-MARTÍNEZ E J, GORDO-MORENO A I, CÓRDOVA M L F, et al. Preliminary phytochemical screening and antioxidant activity of commercial *Moringa oleifera* food supplements[J]. Antioxidants, 2023, 12(1): 110.
[29] 梁进欣, 李珊, 陈晓红, 等. 干腌鱼鲜味物质在不同干腌工艺下的变化及对滋味贡献的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 307−312. [LIANG Jinxin, LI Shan, CHEN Xiaohong, et al. Research progress on the changes of umami substances in dried cured fish and their contribution to taste by different dry curing methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(14): 307−312.]
[30] CHEN Guang, LI Jun, SUN Zhiwei, et al. Rapid and sensitive ultrasonic-assisted derivatisation microextraction (UDME) technique for bitter taste-free amino acids (FAA) study by HPLC–FLD[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 97−105.
[31] JAHAN H, TUMPA I J, QASEM W A, et al. Evaluation of the partial replacement of dietary fish meal with fermented or untreated soybean meal in juvenile silver barb, *Barbonymus gonionotus*[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 733402.
[32] 崔宁, 钟比真, 王双龙, 等. 油炸条件对草鱼块品质和挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 310−323. [CUI Ning, ZHONG Bizhen, WANG Shuanglong, et al. Effect of deep-frying conditions on the quality and volatile flavor compounds of grass carp blocks[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 310−323.]
[33] 张权. 小龙虾蒸煮过程中品质特性变化及风味形成机理初探[D]. 南昌: 江西师范大学, 2023. [ZHANG Quan. Study on the quality characteristics and flavor formation mechanism of crayfish during the steaming and boiling process[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2023.]
[34] 吴晓龙, 涂宗财, 胡月明, 等. 不同高温处理方式对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 84−93. [WU Xiaolong, TU Zongcai, HU Yueming, et al. Effects of different high-temperature treatments on physicochemical properties and taste quality of grass carp meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 84−93.]
[35] 辛光斌, 许玉娟, 李聪, 等. 基于 GC-MS、电子鼻和电子舌分析火腿肠贮藏期间的风味变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 295−306. [XIN Guangbin, XU Yujuan, LI Cong, et al. Exploration of the evolution of flavor profiles in ham sausage during storage based on GC-MS, electronic nose and electronic tongue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 295−306.]
[36] MIFTAHUL ILMI R, MARIATI THAMRIN N, HASIZAH A. Flavour characteristics and amino acid contents of fish sauce produced from various raw materials: Mini review[J]. BIO Web of Conferences, 2024, 96: 01007.
[37] ZHAO C C, EUN J B. Characterization of volatile compounds and physicochemical properties of Hongeo using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry during fermentation[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101379.
[38] LI Juan, XU Yuxia, DU Wenbin, et al. Comparative analysis of aroma compounds in Chinese traditional dry-rendered fat by HS/GC-IMS, SPME/GC-MS, and SPME/GC-O[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104378.
[39] LI Youyou, JIANG Shui, ZHU Yiwen, et al. Effect of different drying methods on the taste and volatile compounds, sensory characteristics of *Takifugu obscurus*[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 223−232.
[40] 黄丽琪, 胡传峰, 鲁怡婷, 等. 紫苏精油和姜汁对烤武昌鱼的风味影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 193−202. [HUANG Liqi, HU Chuanfeng, LU Yiting, et al. Effect of *Perilla* essential oil and ginger juice on the flavor of grilled Wuchang fish[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(7): 193−202.]
[41] 林晓娟, 陈勇, 黄宝特, 等. 不同脱腥处理对海带关键腥味组分及风味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 231−240. [LIN Xiaojuan, CHEN Yong, HUANG Baote, et al. Effects of different defishiness treatments on key fishy flavor components and flavor quality of kelp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 231−240.]
[42] 郑宗昊, 张向争, 傅芳浩, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术的不同品种(系)橄榄香气成分研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 282−290. [ZHENG Zonghao, ZHANG Xiangzheng, FU Fanghao, et al. Study on aroma components of *Canarium album* of different cultivars based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 282−290.]
[43] 黄丕苗. 香辛料提取物对白鲢肉脱腥效果及其脱腥机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022. [HUANG Pimiao. Research on deodorizing effect and deodorizing mechanism of spice extracts on silver carp[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.]