



田然,宁玥,栾宏伟,等.定向酶解对杂色蛤蒸煮液风味特征及挥发性有机化合物的影响[J].轻工学报,2026,41(2):51-63.  
TIAN R, NING Y, LUAN H W, et al. Effect of targeted enzymatic hydrolysis on flavor characteristics and volatile organic compounds of *Ruditapes philippinarum* cooking liquid[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(2): 51-63.  
DOI: 10.12187/2026.02.005

# 定向酶解对杂色蛤蒸煮液风味特征及挥发性有机化合物的影响

田然<sup>1</sup>, 宁玥<sup>1</sup>, 栾宏伟<sup>1</sup>, 步营<sup>1</sup>, 朱文慧<sup>1</sup>, 靳林溪<sup>2</sup>, 李学鹏<sup>1</sup>, 励建荣<sup>1</sup>

1. 渤海大学 食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013;
2. 天津春发生物科技集团有限公司, 天津 300300

**摘要:**【目的】高值化利用杂色蛤加工副产物。【方法】以杂色蛤蒸煮液为原料,基于前期实验定向酶解工艺制备酶解呈味基料,以TCA可溶性肽、游离氨基酸(FAA)、呈味核苷酸和有机酸含量、滋味活性值(TAV)、等效鲜味浓度(EUC)、呈味强度(TI)等指标综合评价风味特征,并结合电子舌、电子鼻、气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)解析挥发性有机化合物(VOCs)的演变规律。【结果】定向酶解能显著提高TCA可溶性肽、FAA、呈味核苷酸等关键呈味物质的含量( $P < 0.05$ );酶解呈味基料中谷氨酸的TAV由4.71显著增加到11.74( $P < 0.05$ ),EUC由1.46 g MSG/100 g增加至5.31 g MSG/100 g, TI约为杂色蛤蒸煮液的3.6倍;电子舌显示酶解呈味基料的鲜味和浓厚感明显增强,电子鼻-PCA显示酶解前后蒸煮液的气味强度差异明显,定向酶解有效改变了酶解前后的挥发性风味轮廓;GC-IMS共定性72种VOCs,酶解后蒸煮液中酯类、醛类、酮类、呋喃类等风味物质的含量明显增加,而异丁醇、三乙胺等不良风味物质含量明显降低。【结论】定向酶解不仅能提升杂色蛤蒸煮液的鲜味品质,还能赋予其果香-脂香复合的多元风味特征。

**关键词:**杂色蛤蒸煮液;定向酶解;风味特征;挥发性有机化合物

中图分类号:TS254.9 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2026)02-0051-13

## 0 引言

杂色蛤(*Ruditapes philippinarum*),学名菲律宾蛤仔,属联蛤科,是我国近海四大养殖贝类之一,富含蛋白质、必需氨基酸、多糖等生物活性物质及锌、硒等微量元素<sup>[1]</sup>。杂色蛤在冷冻或干制加工过程中需蒸煮取肉,因此会产生大量的蒸煮液<sup>[2]</sup>。这些

蒸煮液是杂色蛤热加工的副产物,富含蛋白质、游离氨基酸及呈味核苷酸,被视为极具潜力的天然海鲜呈味基料。杂色蛤蒸煮液的基础风味物质主要包括甘氨酸(Gly)、谷氨酸(Glu)、精氨酸(Arg)等游离氨基酸,腺苷酸(AMP)、肌苷酸(IMP)等呈味核苷酸,琥珀酸等有机酸,以及醛类、醇类、含硫化合物等挥发性化合物<sup>[3]</sup>。然而,杂色蛤蒸煮液的天然

收稿日期:2025-08-21;修回日期:2025-10-11;出版日期:2026-04-15

基金项目:辽宁省教育厅项目(LJ212410167016);山东省海洋养殖创新创业共同体“揭榜挂帅”项目(YZ2024006);渤海大学海洋研究院开放课题资助项目(BDHYYJY2025011)

作者简介:田然(2002—),女,河北省保定市人,渤海大学硕士研究生,主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail:tianar0320@163.com

通信作者:朱文慧(1982—),女,山东省菏泽市人,渤海大学教授,博士,主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail:wenhuiy130@163.com

风味常受到己醛、1-辛烯-3-醇等腥味物质及亮氨酸、异亮氨酸等苦味氨基酸的影响,这些成分不仅会掩盖杂色蛤蒸煮液本身的鲜味,还会导致风味失衡,降低其整体感官接受度<sup>[4]</sup>。

鲜味感知作为我国传统饮食文化体系中的关键味觉维度,其感官特性和量化表征已成为风味评价的核心参数之一<sup>[5]</sup>。目前已知的鲜味物质主要包括游离氨基酸及其盐类、核苷酸及其盐类、有机酸、有机碱、呈味肽类等,其中具有呈鲜作用的有机酸主要是琥珀酸钠,多存在于贝类等海产品中,是赋予贝类鲜味的重要物质<sup>[6]</sup>。定向酶解技术通过特异性蛋白酶的作用,可精准调控蛋白质水解进程,选择性释放鲜味肽、游离氨基酸及风味前体物质<sup>[7]</sup>。与传统酶解方法相比,定向酶解技术能有效避免过度水解产生的苦味肽累积,同时促进谷氨酸、琥珀酸等鲜味物质与醛类、酯类等香气前体物质的协同增效<sup>[8]</sup>。例如,孙超男等<sup>[9]</sup>研究发现,用蛋白酶 A2SD 和 A6SD 处理鳕鱼骨酶解液,可显著提高氮回收率和  $\text{Fe}^{2+}$  螯合率,且水解度与抗氧化活性呈强正相关。气相色谱-离子迁移谱(Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)技术兼具高灵敏度和高分辨率,可用于建立挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)的特征指纹图谱,并依托谱库进行化合物的定性定量分析<sup>[10]</sup>,近年来被广泛应用于食品中 VOCs 的检测和定量分析、食品掺假鉴别、药物检测等领域<sup>[11-12]</sup>。例如, X. F. Zeng 等<sup>[13]</sup>利用 GC-IMS 技术研究发现,酶解处理后的虫草鸡汤中醛类、酮类物质含量均显著增加,整体香气轮廓明显改善。尽管前期研究<sup>[14]</sup>已表明,定向酶解能显著增强蓝蛤蒸煮液的鲜味特征,但对于杂色蛤蒸煮液酶解产物的风味特征及 VOCs 的变化规律尚缺乏系统解析。

鉴于此,本文拟以杂色蛤蒸煮液为原料,在前期优化的定向酶解工艺基础上制备杂色蛤酶解呈味基料,通过测定 TCA 可溶性肽、游离氨基酸(Free Amino Acid, FAA)、呈味核苷酸、有机酸含量,以及滋味活性值(Taste Activity Value, TAV)、等效鲜味浓度(Equivalent Umami Concentration, EUC)、呈味强度(Taste intensity, TI)等,评价其风味特征变化,同

时结合电子鼻、GC-IMS 解析 VOCs 特征指纹图谱,旨在为杂色蛤蒸煮液的高值化利用及天然海鲜调味料的开发提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与试剂

杂色蛤蒸煮液,由新鲜杂色蛤的蒸煮液经加热、浓缩而成,中国丹东盛海食品有限公司;风味蛋白酶(1.6 AU/g)、水解蛋白酶(2.4 AU/g),诺维信(中国)投资有限公司;TCA、三氟乙酸、乙腈、甲醇、正构酮:2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮和 2-壬酮(色谱级),阿拉丁生化科技股份有限公司;  $\text{HClO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_3$ , 国药集团试剂有限公司; NaOH 滴定(定量)分析标准溶液、HCl 滴定(定量)分析标准溶液、双缩脲,深圳博林达生物科技有限公司;茚三酮,上海麦克林生化科技有限公司; KOH,北京伊诺凯科技有限公司。除特别注明外,其余试剂均为分析纯。

### 1.2 主要仪器与设备

WHY-2 型恒温振荡水浴锅,常州国宇仪器制造有限公司;SORVALL Stratos 型冷冻高速离心机,美国 Thermo 公司;L-8900 氨基酸自动分析仪,日本日立公司;Agilent 1100 型高效液相色谱(HPLC)系统,美国 Agilent 科技公司;SA-402B 型电子舌,日本 Insent 公司;cNOSE-28 型电子鼻,上海保圣科技有限公司;Flavour Spec 型 GC-IMS 仪,德国 G. A. S 公司。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 酶解呈味基料制备** 基于前期实验结果,取适量杂色蛤蒸煮液,用 0.5 mol/L NaOH 或 HCl 溶液将其 pH 值调至  $6.70 \pm 0.05$ ;一次性加入质量分数为 0.10%(以蒸煮液质量计)的复合酶( $m$ (风味蛋白酶): $m$ (水解蛋白酶)=1:3),于 51 °C 恒温振荡水浴锅中酶解 2.75 h 后,立即升温至 100 °C,保持 10 min 以灭酶,然后冰水浴冷却至室温,用去离子水补足蒸发失重;于 4 °C、7834 r/min 条件下离心 10 min,取上清液,即为酶解呈味基料,-20 °C 冻存,备用。

**1.3.2 TCA 可溶性肽含量测定** 参考李涛<sup>[15]</sup>的方法,并稍作修改。准确量取 5.0 mL 待测样品(杂色

蛤蒸煮液或酶解呈味基料,下同),加入 15 mL 质量分数为 5% 的 TCA 溶液,充分混匀后静置 30 min,离心后收集上清液。取 1.0 mL 上清液与 4.0 mL 双缩脲溶液混合,振荡均匀,于 25 ℃ 条件下反应 30 min,在 540 nm 波长处测定吸光度。

**1.3.3 FAA 含量及 TAV 测定** 取 2.0 mL 待测样品,加入质量分数为 15% 的 TCA 溶液,定容至 50 mL,充分混匀后室温静置 120 min。混合液于 4 ℃、9821 r/min 条件下离心 15 min,收集上清液。取 5.0 mL 上清液,使用 3 mol/L NaOH 滴定(定量)分析标准溶液进行酸碱调节,控制溶液 pH 值为 2.0~2.5,充分振荡混匀,静置 10 min,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤,得待测液。

使用氨基酸自动分析仪,利用离子交换-茚三酮柱后衍生法测定 FAA 含量<sup>[16]</sup>,测试条件为:阳离子交换柱(4.6 mm×60 mm);分离柱温度 57 ℃,检测器温度 135 ℃;流动相流速 0.40 mL/min,茚三酮流速 0.35 mL/min;进样量 20 μL;检测波长分别为 570 nm(用于 17 种氨基酸)和 440 nm(用于脯氨酸)。检测结果用仪器自带 EZChrom Elite 软件进行分析。

TAV 是样品中某滋味物质含量与其滋味阈值的比值,可用于评估主要滋味物质对样品整体滋味的贡献度,具体计算公式<sup>[17]</sup>如下:

$$TAV = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

式中, $\rho_1$  为呈味氨基酸含量/(mg·g<sup>-1</sup>), $\rho_2$  为该氨基酸滋味阈值/(mg·g<sup>-1</sup>)。当 TAV>1 时,认为该物质对滋味有较大贡献;当 TAV<1 时,认为该物质对滋味贡献较小。

**1.3.4 呈味核苷酸含量测定** 取 5.0 mL 待测样品,与 15 mL 质量分数为 5% 的 HClO<sub>4</sub> 溶液混合并充分均质,于 4 ℃、6621 r/min 条件下离心 15 min。收集初次离心的沉淀物,加入 10 mL 质量分数为 5% 的 HClO<sub>4</sub> 溶液,在相同离心条件下进行二次离心处理。将 2 次离心的上清液合并,采用 5 mol/L KOH 溶液调节混合液 pH 值至 6.75,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后,进行 HPLC 检测分析<sup>[18]</sup>。

色谱分析系统采用 C18 反相色谱柱(5 μm×

4.6 mm×250 mm),柱温为 30 ℃。流动相体系由 A 相(0.05 mol/L KH<sub>2</sub>PO<sub>3</sub> 缓冲液,pH 值 4.5)和 B 相(甲醇)组成,流速为 0.8 mL/min。梯度洗脱程序设置为:初始阶段(0~10 min)保持 100% B 相;10~17 min 转换为 15% A 相与 85% B 相混合体系;17~20 min 恢复至 100% B 相。检测波长为 254 nm,进样体积为 20 μL。

**1.3.5 有机酸含量测定** 取 5.0 mL 待测样品,与 0.25 mL 质量分数为 5% 的 HClO<sub>4</sub> 溶液混合均匀,静置反应 20 min。将混合液于 4 ℃、4081 r/min 条件下离心 10 min。收集上清液,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤 2 次后,进行 HPLC 检测分析<sup>[19]</sup>。

色谱分析系统采用 C18 反相色谱柱(5 μm×4.6 mm×250 mm),柱温为 30 ℃。流动相由 pH 值 2.8、0.01 mol/L 经 0.22 μm 滤膜过滤的 KH<sub>2</sub>PO<sub>3</sub> 缓冲液与甲醇按体积比 95:5 混合而成,流速为 0.5 mL/min。进样量为 10 μL,紫外检测波长为 210 nm。

**1.3.6 EUC 及 TI 计算** EUC 是一种评价食品鲜味强度的指标,以每 100 g 样品所含谷氨酸钠(MSG)的等价含量表示。EUC(g MSG/100 g)的计算公式<sup>[5]</sup>如下:

$$EUC = \sum aibi + 1218(\sum aibi)(\sum ajbj)$$

式中, $a_i$  为鲜味氨基酸含量/(g·(100 g)<sup>-1</sup>); $b_i$  为鲜味氨基酸相对于谷氨酸钠(MSG)的相对鲜度系数,Glu 为 1.000,Asp 为 0.077; $a_j$  为呈味核苷酸(IMP、AMP)含量/(g·(100 g)<sup>-1</sup>); $b_j$  为呈味核苷酸相对于 IMP 的相对鲜度系数,IMP 为 1.00,AMP 为 0.18;1218 为协同作用系数。

为量化样品整体的鲜味强度,本研究引入 TI 作为评价指标。该指标基于 EUC 的概念,并对其标准化处理,以更直观地反映样品相对于标准鲜味物质 MSG 的鲜味强度。具体计算公式<sup>[20]</sup>如下:

$$TI = \frac{EUC}{T_{MSG}}$$

式中, $T_{MSG}$  为 MSG 的鲜味识别阈值。当 TI=1 时,表示样品的理论鲜味强度与 MSG 的鲜味阈值相当;当 TI>1 时,表示样品的理论鲜味强度已超过 MSG 的鲜味阈值,其值越大,代表样品的整体鲜味感越

强;当  $TI < 1$  时,表示样品的理论鲜味强度低于 MSG 的鲜味阈值,其鲜味可能不易被直接感知。

**1.3.7 电子舌测定** 待测样品经 0.45  $\mu\text{m}$  和 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后备用。首先对传感器 C00、AE1、AAE、CA0 和 CTO 进行活化、校准,然后取 80.0 mL 样液于电子舌测试杯中,以基准液作空白对照,在室温条件下测定样液的酸味、苦味、苦味的回味、涩味、涩味的回味、咸味、鲜味和浓厚感。

**1.3.8 电子鼻测定** 参考石月等<sup>[21]</sup>的方法,并稍作修改。取 10.0 mL 待测样品于顶空瓶中,用保鲜膜封口,室温下静置 30 min。随后使用电子鼻对风味物质进行检测,每组样品平行 3 次。电子鼻载气为干燥空气,测试时间为 120 s,清洗时间为 120 s。具体化学传感器及其对应敏感物质类型见表 1。

**1.3.9 GC-IMS 检测** 参考 J. C. Bi 等<sup>[22]</sup>的方法,并稍作修改。结合待测样品的保留时间(Retention Time,  $RT$ )和迁移时间,选择正构酮作为标准品。将 5.0 mL 待测样品和适量正构酮放入密封顶空瓶中,在 60  $^{\circ}\text{C}$  条件下孵育 15 min,在 1566 r/min 条件下混匀样品。孵育结束后,使用加热后的注射器将 500  $\mu\text{L}$  顶空气体自动注入 GC-IMS 进样器,进样器温度为 65  $^{\circ}\text{C}$ 。气体分离过程使用 MXT-5 色谱柱(1  $\mu\text{m} \times 15 \text{ m} \times 0.53 \text{ mm}$ ),  $\text{N}_2$  为载体,分析温度为 60  $^{\circ}\text{C}$ 。

气体分子经电离后,被引导至 45  $^{\circ}\text{C}$  漂移管,同时对漂移气体施加 150 mL/min 的流速。流速程序设置如下:2 mL/min 持续 2 min,15 mL/min 持续 10 min,100 mL/min 持续 20 min,150 mL/min 持续 25 min。

定性分析:采用 6 种酮类化合物的混合标准品建立  $RT$  与保留指数(Retention Index,  $RI$ )的校正模型。基于目标化合物的色谱保留行为计算  $RI$ ,并利用 VOCal 分析软件集成的 GC 保留指数数据库 NIST 2020 及 IMS 迁移时间数据库进行交叉比对验证<sup>[23]</sup>;借助该软件的多变量统计分析功能(包含 Reporter、Gallery Plot、Dynamic PCA 等模块),构建 VOCs 的三维/二维色谱特征图谱、差异热图、特征代谢指纹谱及主成分分析(PCA)模型,实现不同待测样品之间 VOCs 差异的多维度可视化解析。

## 1.4 数据分析

每个实验均独立测试,且至少重复 3 次,结果用(平均值 $\pm$ 标准差)表示,显著性水平设为  $P < 0.05$ 。采用 SPSS 22.0 软件对实验数据进行 ANOVA 和 Duncan 分析,利用 Origin 2023 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 TCA 可溶性肽含量分析

TCA 可溶性肽含量是表征食品体系中短肽组分的有效指标,其测定结果能够客观反映蛋白质水解产物中低相对分子质量肽段的分布情况,可作为评估食

表 1 化学传感器及其对应敏感物质类型

Table 1 Chemical sensors and their corresponding target substances

传感器	敏感物质	浓度范围/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	传感器	敏感物质	浓度范围/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
S1	烷烃类,烟熏味	200~10 000	S15	VOCs 异常气味	1~30
S2	醇类,醛类,短链烷烃	1~1000	S16	丁烷,液化石油气	500~10 000
S3	臭氧	0.01~1000	S17	甲烷,天然气	500~10 000
S4	硫化物,硫化氢	1200	S18	丙烷,丁烷	500~10 000
S5	氮化物,氨气	5~500	S19	短链烷烃,甲烷	100~1000
S6	有机气体,醛类,芳香族化合物	5~500	S20	VOCs 醇类	150
S7	短链烷烃,天然气,沼气	300~10 000	S21	胺类,含硫气体	1~200
S8	短链烷烃	300~10 000	S22	卤代烃,脂肪烃,环烷烃	1~100
S9	短链烷烃	0~500	S23	烷烃,烯烃	1~30
S10	氢气	100~1000	S24	受污染空气,氢气	30~1000
S11	烯丙基硫化物	300~10 000	S25	甲烷,丙烷	300~10 000
S12	酮类,醇类	300~10 000	S26	有机酸酯,萜烯	500~10 000
S13	甲烷	300~10 000	S27	甾醇	1~30
S14	可燃气体	300~10 000	S28	制冷剂气体	100~10 000

品营养品质及加工特性的重要参数<sup>[24]</sup>。酶解呈味基料中 TCA 可溶性肽含量为  $(11.07 \pm 0.73)$  mg/mL, 显著高于杂色蛤蒸煮液  $((6.63 \pm 1.21)$  mg/mL) ( $P < 0.05$ )。这可能是由于蒸煮过程中的热变性作用对蛋白质一级结构的破坏程度相对有限, 导致蒸煮液体系中的可溶性肽段及氨态氮未能充分释放。研究<sup>[6]</sup>表明, 常规蒸煮温度 (通常  $< 100$  °C) 仅能部分破坏蛋白质的氢键、疏水相互作用等次级键, 而对肽键等共价键的影响较小, 这可能是造成上述溶出不完全的主要原因。相比之下, 定向酶解可显著提升蛋白质的水解效率, 其作用机制主要归因于碱性蛋白酶对水不溶性蛋白质组分的特异性降解。在酶促反应过程中, 蛋白酶通过选择性切割肽键, 促使蛋白质高级结构解折叠, 大分子蛋白被分解为低相对分子质量肽段。同时, 组织微观结构的解离会促进可溶性肽类物质及游离氨基酸释放, 显著提高水解产物的溶解性和呈味物质含量<sup>[25]</sup>。

## 2.2 FAA 含量和 TAV 分析

FAA 与特定寡肽不仅可赋予水产品甜味、苦

味、酸味、咸味、鲜味等多重滋味属性, 还能与体系中的其他滋味活性组分产生协同增效效应, 因此被视为关键滋味贡献物<sup>[26]</sup>。杂色蛤蒸煮液酶解前后 FAA 含量测定结果见表 2。由表 2 可知, 酶解呈味基料的呈味属性发生显著重构: 鲜味或甜味主导型氨基酸 Asp、Glu、Gly、丙氨酸 (Ala) 和 Arg 的含量均显著升高, 其中 Ala 以愉悦甜味为主要特征, 在海产品中含量较高<sup>[27]</sup>; Glu 和 Asp 是已知的内源性鲜味物质, 其水溶液在食品相关的 pH 范围内 (尤其是以中性钠盐形式) 所呈现出的主导味感为典型的鲜味, 而非酸味<sup>[28]</sup>; 苦味氨基酸赖氨酸 (Lys)、蛋氨酸 (Met)、缬氨酸 (Val)、异亮氨酸 (Ile)、亮氨酸 (Leu)、组氨酸 (His) 和苯丙氨酸 (Phe) 虽然在种类上占据优势, 但含量均低于其呈味阈值, 且微量苦味氨基酸可通过协同机制放大甜味与鲜味的感官强度<sup>[29]</sup>。另外, 酶解呈味基料的总游离氨基酸 (TAA) 含量增加, 这可能是由于热变性凝固蛋白在外切蛋白酶作用下解聚, 使原本以肽键束缚的氨基酸转变为游离态。

表 2 杂色蛤蒸煮液酶解前后的 FAA 含量测定结果

Table 2 FAA determination results of *Ruditapes philippinarum* cooking liquid pre- and post-enzymatic hydrolysis

种类	呈味属性	呈味阈值/ (mg · (100 g) <sup>-1</sup> )	杂色蛤蒸煮液		酶解呈味基料	
			含量/(mg · (100 g) <sup>-1</sup> )	TAV	含量/(mg · (100 g) <sup>-1</sup> )	TAV
Asp	鲜味	100	65.52±0.13 <sup>b</sup>	0.66	111.15±9.04 <sup>a</sup>	1.11
Glu	鲜味	30	141.24±0.47 <sup>b</sup>	4.71	352.25±0.38 <sup>a</sup>	11.74
Gly	甜味	130	251.51±0.70 <sup>b</sup>	1.93	361.91±0.72 <sup>a</sup>	2.78
Ala	甜味	60	166.68±0.34 <sup>b</sup>	2.78	243.39±6.37 <sup>a</sup>	4.06
丝氨酸 (Ser)	甜味	150	7.82±0.11 <sup>b</sup>	0.05	14.97±0.90 <sup>a</sup>	0.10
苏氨酸 (Thr) *	甜味	260	—	—	14.54±1.51	0.06
Lys *	甜味或苦味	50	10.43±0.06 <sup>b</sup>	0.21	16.83±1.10 <sup>a</sup>	0.34
Met *	苦味	30	2.90±0.02 <sup>b</sup>	0.10	5.82±0.42 <sup>a</sup>	0.19
Val *	甜味或苦味	40	3.41±0.02 <sup>b</sup>	0.09	9.00±1.44 <sup>a</sup>	0.23
Arg	苦味或甜味	50	83.13±0.55 <sup>b</sup>	1.66	112.56±6.24 <sup>a</sup>	2.25
Ile *	苦味	90	27.03±0.13 <sup>b</sup>	0.30	43.97±0.49 <sup>a</sup>	0.49
Leu *	苦味	380	4.07±0.02 <sup>b</sup>	0.02	6.24±0.51 <sup>a</sup>	0.03
酪氨酸 (Tyr)	苦味	/	28.79±0.11 <sup>b</sup>	—	50.10±4.52 <sup>a</sup>	—
His	苦味	20	9.69±0.30 <sup>b</sup>	0.48	7.16±0.11 <sup>a</sup>	0.36
Phe *	苦味	90	9.02±0.15 <sup>b</sup>	0.10	13.20±0.08 <sup>a</sup>	0.15
DAA			624.95		1 068.70	
BAA			95.34		152.32	
必需氨基酸 (EAA)			56.86		109.60	
TAA			811.24		1 363.09	
EAA/TAA			0.07		0.08	

注: \* 为必需氨基酸; DAA 包括 Glu、Asp、Gly、Ala; BAA 包括 Lys、Met、Val、Ile、Leu、Tyr、His、Phe; / 表示此呈味阈值未见文献报道; — 表示该物质未被检测到; 同行不同小写字母表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

通过各氨基酸的  $TAV$ , 可直观了解各呈味氨基酸对整体滋味的贡献情况。相较于杂色蛤蒸煮液, 酶解呈味基料中大部分游离氨基酸的  $TAV$  均明显提升, 其中 Glu 的  $TAV$  最高 (11.74), 其次为 Ala (4.06), 表明酶解更有利于呈味物质的释放, 且 Glu 和 Ala 对酶解呈味基料的鲜味和甜味具有较大贡献<sup>[30]</sup>。饶梦微等<sup>[31]</sup> 研究发现, 菲律宾蛤仔肉酶解提取物中  $TAV$  最高的分别为 Glu 和 Ala; 司蕊等<sup>[32]</sup> 研究发现, 马氏珠母贝肉新鲜酶解提取物中  $TAV$  最高的分别为 Glu、Arg 和 Ala。本研究结果与上述研究结果较一致。综上, 定向酶解处理使酶解呈味基料形成以鲜味氨基酸 (DAA) 为核心、甜味氨基酸为辅助、苦味氨基酸 (BAA) 较少的呈味格局, 滋味轮廓显著优化。

### 2.3 呈味核苷酸和有机酸含量分析

呈味核苷酸和有机酸是构成水产品特征风味的关键呈味物质, 其特有的呈味属性及协同作用共同决定了水产品的整体滋味轮廓<sup>[33]</sup>。其中有机酸的动态变化特征受多重因素调控, 既与生命体代谢过程直接相关, 也涉及生物死亡后微生物群落与内源酶系统的协同作用。杂色蛤蒸煮液酶解前后的呈味核苷酸和有机酸含量见表 3。由表 3 可知, 两组样品均检测出鸟苷酸 (5'-GMP)、肌苷酸 (5'-IMP) 和腺苷酸 (5'-AMP), 且酶解呈味基料的 5'-GMP 和 5'-AMP 含量均显著高于杂色蛤蒸煮液 ( $P < 0.05$ )。然而, 定向酶解过程虽然释放了大量的 5'-AMP, 但 5'-AMP 脱氨酶的缺乏导致其无法进一步转化为 5'-IMP, 这可能是 5'-IMP 含量没有显著变化的原因<sup>[34]</sup>。虽然呈味核苷酸含量均小于其呈味阈值, 对

滋味贡献较小 ( $TAV < 1$ ), 但其能够与多种游离氨基酸协同作用提升风味特征。琥珀酸作为一种具有特征性鲜味的有机酸, 在贝类水产品中普遍存在并发挥重要的呈味作用<sup>[35]</sup>。经定向酶解处理后, 琥珀酸含量较酶解前显著提升 ( $P < 0.05$ )。值得注意的是, 两组样品中琥珀酸含量均显著超过其呈味阈值, 表明琥珀酸是杂色蛤蒸煮液基础鲜味的重要贡献因子, 且定向酶解可进一步强化其呈味效果, 使产品鲜味特征更为突出。

通过  $TAV$  分析发现, 酶解呈味基料的  $TAV$  显著高于蒸煮液中单一氨基酸或呈味核苷酸的  $TAV$ , 这充分证明酶解呈味基料中的游离氨基酸与呈味核苷酸之间存在协同增效作用, 对酶解产物的整体滋味特征具有决定性贡献。

### 2.4 EUC 分析

研究<sup>[36]</sup>表明, 呈味核苷酸与游离氨基酸在杂色蛤蒸煮液中存在显著的味觉协同增效作用, 当两类呈味物质共同存在时, 其协同效应可使体系的鲜味强度呈非线性增强, 这可通过  $EUC$  的变化进行定量表征。杂色蛤蒸煮液酶解前后的  $EUC$  分别为 1.46 g MSG/100 g 和 5.31 g MSG/100 g, 且酶解后的  $TI$  (177, MSG 的呈味阈值为 0.03 g/100 mL) 约为酶解前 (48.67) 的 3.6 倍, 表明定向酶解可显著提升杂色蛤蒸煮液的鲜味强度。

### 2.5 电子舌滋味特征分析

电子舌基于对人类味觉感知机制的模拟, 能够快速、准确、客观地对基本味觉感官目标进行定量分析<sup>[37]</sup>。杂色蛤蒸煮液酶解前后电子舌滋味强度雷达图如图 1 所示。由图 1 可知, 与杂色蛤蒸煮液

表 3 杂色蛤蒸煮液酶解前后的呈味核苷酸和有机酸测定结果

Table 3 Determination results of flavor nucleotides and organic acids in *Ruditapes philippinarum* cooking liquid pre- and post-enzymatic hydrolysis

类别	呈味物质	呈味属性	呈味阈值/ ( $\text{mg} \cdot (100 \text{g})^{-1}$ )	杂色蛤蒸煮液		酶解呈味基料	
				含量/ $(\text{mg} \cdot 100 \text{g}^{-1})$	$TAV$	含量/ $(\text{mg} \cdot 100 \text{g}^{-1})$	$TAV$
呈味核苷酸	5'-GMP	鲜味	25	$1.78 \pm 0.01^b$	0.07	$3.13 \pm 0.42^a$	0.12
	5'-IMP	鲜味	12.5	$2.57 \pm 0.01^a$	0.21	$2.77 \pm 0.18^a$	0.22
	5'-AMP	鲜味或甜味	50	$3.91 \pm 0.58^b$	0.08	$7.20 \pm 0.06^a$	0.14
有机酸		总量		8.26		13.10	
	琥珀酸	鲜味		$8.79 \pm 0.82^b$	79.91	$15.68 \pm 0.24^a$	142.55
		总量	0.11	8.79		15.68	

相比,酶解呈味基料的鲜味和浓厚感均明显增强,这可能是因为鲜味氨基酸(Glu、Asp等)与显著增加的呈味核苷酸(5'-GMP、5'-AMP)之间产生了强烈的协同增效作用,这些呈味物质的协同贡献共同构成了浓厚感的核心滋味轮廓<sup>[38]</sup>,表明定向酶解能够促进呈味核苷酸、风味氨基酸、鲜味肽等呈味物质的释放。此外,经定向酶解处理后,杂色蛤蒸煮液的咸味也有所增加,苦味、苦味的回味、涩味的回味略有降低,表明定向酶解对杂色蛤蒸煮液的整体滋味特征具有一定改善作用。

## 2.6 电子鼻气味特征分析

电子鼻系统集成了选择性气体传感器阵列,能够特异性识别并定量检测目标VOCs。各传感器单元通过表面吸附作用与特定VOCs发生选择性相互作用,并转化为可量化的电信号响应值<sup>[39]</sup>。杂色蛤蒸煮液酶解前后电子鼻气味强度雷达图和PCA图如图2所示。由图2a)可知,酶解前后共有24组传感器检测到的气味强度存在较明显差异。酶解后传感器S1和S15的响应值均明显降低,S4、S5、S6、S19、S20等的响应值均明显升高,表明定向酶解明显改变了杂色蛤蒸煮液的整体挥发性风味轮廓。其中,传感器S6和S20主要与令人愉悦的香气相关,如果香、青草香(醛类)和醇香(醇类),而S4、S5和S19响应值的升高则指示了海鲜特征性风味(胺类、硫化物)的增强及潜在的脂质氧化(烷烃)和异

味风险,这表明定向酶解在有效提升杂色蛤蒸煮液风味的同时,也改变了其VOCs构成,使其在保持鲜香的主体风味轮廓基础上,腥味、硫味等次要特征也更为突出<sup>[40]</sup>。酶解过程极大地增强了产品的浓厚感和鲜味,根据风味平衡理论,当鲜味、甜味等令人愉悦的呈味物质强度明显提升时,会对腥味、苦味等异味产生味觉掩蔽效应。同时,新生成的醇类、醛类等愉悦性香气物质在浓度和种类上的增加,重构了整体风味体系,使得原有的不良呈味物质在整体风味轮廓中的相对贡献度被弱化,进而在感官上实现风味的优化<sup>[41]</sup>。

由图2b)可知,2个主成分的累计贡献率为97.6%,表明前2个主成分能够有效反映杂色蛤蒸煮液中大多数VOCs的整体信息特征。酶解前后蒸

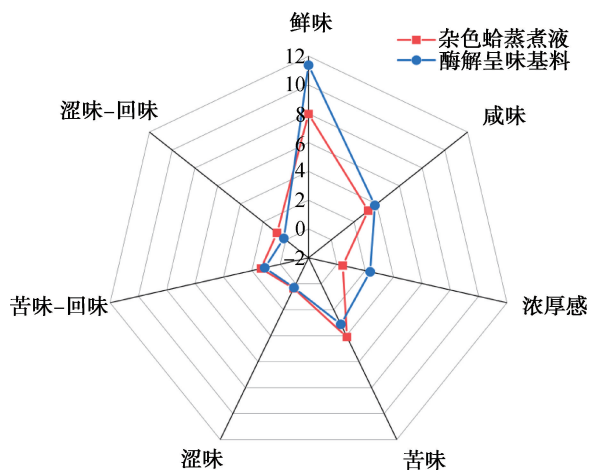
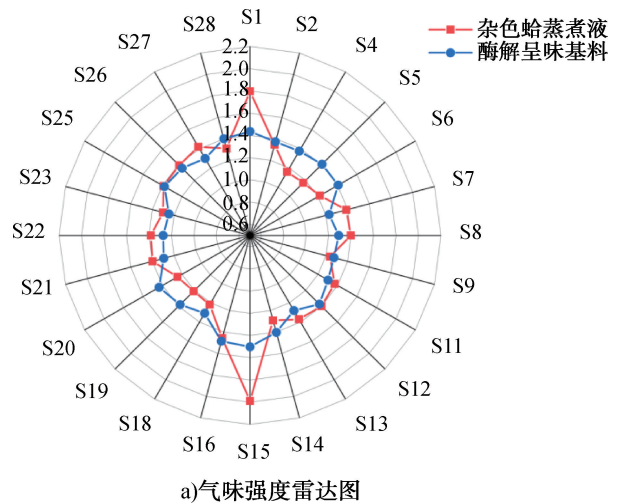


图1 杂色蛤蒸煮液酶解前后电子舌滋味强度雷达图  
Fig. 1 Electronic tongue taste intensity radar chart of *Ruditapes philippinarum* cooking liquid pre- and post-enzymatic hydrolysis

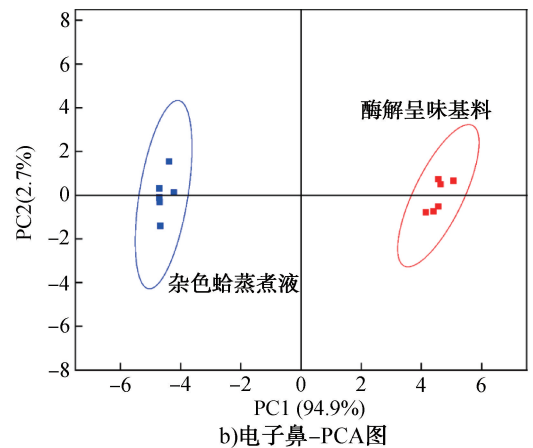


图2 杂色蛤蒸煮液酶解前后电子鼻气味强度雷达图和PCA图  
Fig. 2 Electronic nose odor intensity radar chart and PCA plot of *Ruditapes philippinarum* cooking liquid pre- and post-enzymatic hydrolysis

煮液样品在 PCA 空间内形成相互独立、间隔明显的聚类区域,且在第一主成分(PC1)轴向上区分明显,表明电子鼻技术能有效鉴别这两类风味物质组成。此外,酶解前样品数据点分布相对分散,离散程度较高,而酶解后则呈现集中分布特征,表明酶解处理能使组内香气物质组成更为一致,组内差异相对更小。

### 2.7 GC-IMS 分析

电子鼻仅能将 VOCs 划分为特定类别,无法进行精准定性定量分析<sup>[42]</sup>,因此采用 GC-IMS 技术更

深入地分析杂色蛤蒸煮液样品之间的风味属性和香气差异。

定向酶解对杂色蛤蒸煮液 VOCs 组成的影响如图 3 所示,其中红色和蓝色分别代表高、低信号强度,颜色越深,表明差异越大<sup>[43]</sup>。由图 3a)可知,两组样品的 VOCs 种类具有一定相似性,但信号强度略有不同。由图 3b)可知,PC1 的方差贡献率为 75%,第二主成分(PC2)的方差贡献率为 14%,两者累计解释 89%的数据变异,表明该二维模型能够真

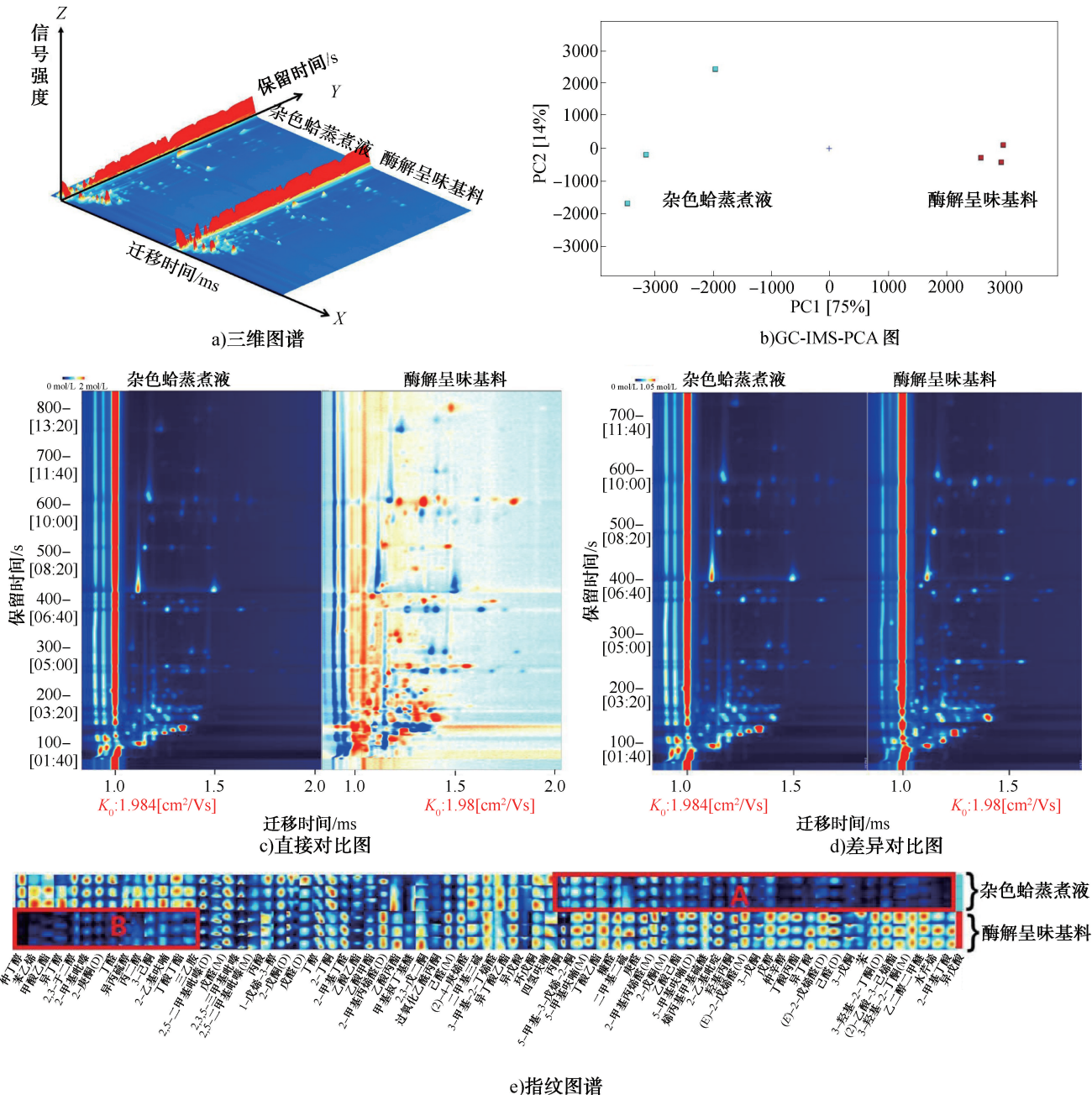


图 3 定向酶解对杂色蛤蒸煮液 VOCs 的影响

Fig. 3 Effects of targeted enzymatic hydrolysis on VOCs in *Ruditapes philippinarum* cooking liquid

实、全面地反映原始挥发性风味数据的整体信息。其中,PC1 是区分样品的核心因子,其方向上的分离主要归因于定向酶解对杂色蛤蒸煮液中挥发性物质组成的根本性改变;而 PC2 则揭示了次要的风味变异来源<sup>[44]</sup>。该结果从统计学上证实,定向酶解工艺是导致杂色蛤蒸煮液挥发性风味轮廓发生显著变化的主导因素。两组样品的样本点在 PCA 图上呈现明显的空间分离,表明 GC-IMS 结合 PCA 方法能够有效区分两组样品,后续将进一步通过感官评价等方式,对鲜味增强、果香-脂香提升等风味特征进行可感知性验证。由图 3c) 可知,两组样品中 VOCs 大多数信号的 *RT* 和迁移时间分别主要出现在 100~800 s 和 1.0~1.6 ms。由图 3d) 可知,相较于杂色蛤蒸煮液,酶解呈味基料的 VOCs 含量更高。由图 3e) 可知,明确定性 72 种 VOCs,包括单体及部分物质形成的二聚体,其中醛类 14 种、酮类 15 种、醇类 10 种、酯类 10 种、酸类 4 种、呋喃类 5 种、含氮化合物 6 种、硫醚类 5 种及其他类 3 种。在酶解呈味基料中,B 区的仲丁醇、苯乙烯、甲酸乙酯、异丁醇、2,3-丁二醇、丁醛、异丙硫醇、丁酸丁酯、三乙胺等含量均减少,其中具有刺鼻气味的三乙胺、甲酸乙酯及呈苦味的异丁醇等物质的含量明显降低;A 区的醛类、酮类、酯类、呋喃类等风味物质的含量均增加。醛类物质主要来源于脂质氧化和降解,通常阈值较低且具有新鲜水果和脂肪的香气,是贝类产品中重要的风味化合物<sup>[1]</sup>。E-2-戊烯醛、己醛、庚醛等醛类物质在酶解呈味基料中的含量均明显升高,能赋予体系青草香和果香。酮类物质主要由不饱和脂肪酸的自动氧化及氨基酸的 Strecker 降解协同生成<sup>[45]</sup>,其中 2-戊酮虽可提供典型果香,但其阈值高达 300  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,因此对整体嗅感贡献微弱。异戊酸、2-甲基丁酸和异丁酸在酶解呈味基料中的含量同步上升,尽管三者因阈值较高而直接香气贡献有限,但可作为乙酰-CoA 依赖的酯化前体物质,在后续发酵或贮藏过程中能驱动乙酸酯、丁酸酯等关键芳香酯的次级生成<sup>[46]</sup>,间接调控并延长香气的层次和持久度。酯类尤其是乙酯类也会影响酶解呈味基料的香气,通常由短链酸和醇的酯化反应产生<sup>[47]</sup>。丁酸乙酯和乙酸乙酯具有水果的香气,对酶

解呈味基料的整体香气有显著贡献,可以有效掩盖不良气味<sup>[48]</sup>,并赋予清爽的香气。呋喃类化合物作为重要的风味活性物质,其特征香气为烘焙香(如可可、咖啡)、烟熏味及豆类风味<sup>[49]</sup>。其中,5-甲基呋喃呈现焦糖、坚果及肉类香气,且阈值较低,低浓度就能够对食品的风味产生显著影响<sup>[50]</sup>。综上所述可知,酶解呈味基料呈现出果香、脂香等多元风味,层次丰富、滋味浓郁,是制备海鲜调味料的理想原料。

### 3 结论

本研究以杂色蛤蒸煮液为研究对象,采用定向酶解工艺制备酶解呈味基料,并通过 TCA 可溶性肽、FAA、呈味核苷酸和有机酸含量、TAV、EUC 及 TI,并结合电子舌、电子鼻及 GC-IMS 技术,系统探讨了其风味特征及 VOCs 的变化规律,得到定向酶解显著提升了杂色蛤蒸煮液呈味物质含量和香气品质的结论。具体而言,相较于杂色蛤蒸煮液,酶解呈味基料的 TCA 可溶性肽、FAA、呈味核苷酸和有机酸含量、TAV、EUC 及 TI 均有所增加,鲜味和浓厚感均明显增强,风味轮廓得到优化,不良风味物质种类减少,E-2-戊烯醛、庚醛、2-戊酮、己醛、丁酸丙酯、5-甲基呋喃等风味物质含量增多,整体风味呈现明显的果香-脂香复合特征。本研究为杂色蛤蒸煮液的高值化利用及天然海鲜调味料的开发提供了工艺参数与理论支撑,后续研究将从以下两方面展开:第一,分离鉴定酶解呈味基料中的关键呈味肽段,阐明其结构与风味活性之间的关系;第二,以该酶解呈味基料为核心,进行风味复配与产品成型研究,开发具有市场潜力的固态或液态复合调味品。

### 参考文献:

- [1] CHEN L P, YU F, SUN S H, et al. Evaluation indicators of *Ruditapes philippinarum* nutritional quality[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(8): 2943-2951.
- [2] LI J Y, MA Y J, XIAO F, et al. Formation and conversion of flavour related compounds of thermal cooked *Ruditapes philippinarum* soup [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(12): 6421-6431.
- [3] 朱名,郝帅,秦磊,等. 杂色蛤水煮液的营养和风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 57-63.

- ZHU M, HAO S, QIN L, et al. Analysis of nutritional composition and flavor compounds in boiled clam liquid [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(3):57-63.
- [4] 邓静, 杨蕊, 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 J, YANG H, ZHU J Q, 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.
- [5] 陈瑜, 许丹, 何鹏飞, 等. 锈斑蝇蒸煮液和酶解液氨基酸组成及滋味分析[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(18):157-163.
- CHEN Y, XU D, HE P F, et al. Amino acid composition and flavor in cooking liquid and hydrolysis liquid of *Charybdis feriatus* Linnaeus [J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(18):157-163.
- [6] 刘源, 王文利, 张丹妮. 食品鲜味研究进展[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(9):1-10.
- LIU Y, WANG W L, ZHANG D N. Research progress of umami in food [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(9):1-10.
- [7] 徐永霞, 曲诗瑶, 赵洪雷, 等. 鳀鱼蒸煮液及酶解液的风味特性分析[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(12):267-275.
- XU Y X, QU S Y, ZHAO H L, et al. Analysis of flavor characteristics in *Engraulis japonicas* cooking liquid and enzymatic hydrolysates [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(12):267-275.
- [8] 张峻伟. 超声辅助酶解牡蛎的风味特性及鲜香型复合调味料的制备[D]. 南昌:南昌大学, 2024.
- ZHANG J W. Flavor characteristics of ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis of oysters and preparation of umami and aroma composite seasonings [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [9] 孙超男, 吴国强, 步莹, 等. 不同蛋白酶对鳕鱼骨酶解液风味和抗氧化活性的影响[J]. *包装与食品机械*, 2024, 42(3):18-24.
- SUN C N, WU G Q, BU Y, et al. Effects of different proteases on flavor and antioxidant activity of cod bone enzymatic hydrolysate [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2024, 42(3):18-24.
- [10] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Food Chemistry*, 2020, 315:126158.
- [11] WU C Y, ZHANG H, ZHANG H M, et al. Detection of *Ganoderma lucidum* spore oil adulteration using chemometrics based on a flavor fingerprint by HS-GC-IMS [J]. *European Food Research and Technology*, 2024, 250(6):1683-1693.
- [12] XIAO N Y, XU H Y, JIANG X, et al. Evaluation of aroma characteristics in grass carp mince as affected by different washing processes using an E-nose, HS-SPME-GC-MS, HS-GC-IMS, and sensory analysis [J]. *Food Research International*, 2022, 158:111584.
- [13] ZENG X F, LIU J L, DONG H, et al. Variations of volatile flavour compounds in *Cordyceps militaris* chicken soup after enzymolysis pretreatment by SPME combined with GC-MS, GC×GC-TOF MS and GC-IMS [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(2):509-516.
- [14] 步莹, 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, 36(1):253-261, 234.
- BU Y, ZHU L W, HE W, et al. Study on the flavor improvement of cooking liquid and enzymatic hydrolysate of *Aloididae aloidii* [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(1):253-261, 234.
- [15] 李涛. 蓝蛤酶解液风味物质组成及光催化风味改善技术研究[D]. 锦州:渤海大学, 2019.
- LI T. Study on flavor composition of *Aloididae aloidii* hydrolysate and flavor improvement by photocatalysis [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [16] 李鹏鹏, 温丽敏, 吕经秀, 等. 不同养殖模式克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 游离氨基酸的主成分分析及综合评价[J]. *食品科学*, 2023, 44(16):284-291.
- LI P P, WEN L M, LYU J X, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating free amino acids in crayfish (*Procambarus clarkii*) from different co-culture modes [J]. *Food Science*, 2023, 44(16):284-291.
- [17] 资璐熙, 李为兰, 杨豪, 等. 云南省不同产地美味牛肝菌主要滋味品质评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(12):91-99.
- ZI L X, LI W L, YANG H, et al. Quality evaluation of the main tastes of *Boletus edulis* from different origins in Yunnan Province [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(12):91-99.
- [18] 阮琬琳. 鳕鱼骨制备海鲜调味基料的技术研究[D]. 锦州:渤海大学, 2019.
- YANG W L. Preparation of seafood seasoning base material with pollock bone [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [19] KONG Y, YANG X, DING Q, et al. Comparison of non-volatile umami components in chicken soup and chicken enzymatic hydrolysate [J]. *Food Research International*, 2017, 102:559-566.
- [20] 杨春霞, 开建荣, 马桂娟, 等. 枸杞鲜果呈味氨基酸含量组成、呈味特征及主成分分析[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(9):197-205.
- YANG C X, KAI J R, MA G J, et al. Composition, flavor characteristics and principal component analysis of flavor

- amino acids in fresh wolfberry fruits [J]. *China Food Additives*, 2024, 35(9): 197-205.
- [21] 石月,王金厢,李学鹏,等. 鱼骨泥酶解工艺优化及酶解液呈味特性研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(23): 218-227.
- SHI Y, WANG J X, LI X P, et al. Study on optimization of enzymatic hydrolysis of fish bone paste and flavor characteristics of hydrolysates[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(23): 218-227.
- [22] BI J C, LI B, CHEN Z, et al. Comparative study of volatile flavor compounds in green onion (*Allium fistulosum* L.) processed with different cooking methods[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2024, 35: 100878.
- [23] 黄建军,高伟城,郑晓艳. 基于 GC-IMS 技术解析白凤菜及其干燥品中风味物质的差异性[J]. *中国食品添加剂*, 2025(5): 52-58.
- HUANG J J, GAO W C, ZHENG X Y. Analysis of the differences in flavor compounds in fresh and dried *Gynura formosana* Kitam based on GC-IMS technology[J]. *China Food Additives*, 2025(5): 52-58.
- [24] 赵勇,武艺,李玉锋,等. 水产品副产物蛋白回收和高值化利用研究进展[J]. *水产学报*, 2021, 45(11): 1943-1953.
- ZHAO Y, WU Y, LI Y F, et al. Research progress of recycling and high-value utilization of protein from aquatic by-products[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(11): 1943-1953.
- [25] 虞丹丹,魏文志,关利,等. 复合酶解法制备中华草龟皮胶原蛋白肽的工艺优化[J]. *中国调味品*, 2024, 49(8): 28-33.
- YU D D, WEI W Z, GUAN L, et al. Optimization of preparation of collagen peptide from Chinese turtle skin by complex enzymatic hydrolysis [J]. *China Condiment*, 2024, 49(8): 28-33.
- [26] 李娇,周志帅,申光辉. 美拉德反应改善熟化马铃薯冻融酶解汁液风味[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(11): 190-203.
- LI J, ZHOU Z S, SHEN G H. Maillard reaction improves the flavor of frozen-thawed enzymatic juice derived from cooked potato [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(11): 190-203.
- [27] 莫加利,陈季旺,刘静泊,等. 风干武昌鱼中鲜味肽的分离纯化及二级结构分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(14): 23-28.
- MO J L, CHEN J W, LIU J B, et al. Isolation, purification and secondary structure identification of umami peptide from air-dried and fermented *Megalobrama amblycephala* [J]. *Food Science*, 2019, 40(14): 23-28.
- [28] 王丹丹,杨瑞恒,邵悠然,等. 菌物肉研究及产业应用进展[J]. *食用菌学报*, 2025, 32(4): 108-126.
- WANG D D, YANG R H, SHAO Y R, et al. Advances in research and industrial application of fungal meat analogues[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2025, 32(4): 108-126.
- [29] 程晓,袁江兰,陈怡均,等. 米渣生酱油和大豆生酱油的风味表征及比较[J]. *食品科学*, 2017, 38(8): 153-158.
- CHENG X, YUAN J L, CHEN Y J, et al. Flavor characterization and comparison of raw sauce produced from rice dregs and soybean[J]. *Food Science*, 2017, 38(8): 153-158.
- [30] 邓宇,曹文红,陈忠琴,等. 白贝肉酶解工艺的优化及其产物呈味特性研究[J]. *中国调味品*, 2023, 48(3): 11-17.
- DENG Y, CAO W H, CHEN Z Q, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process of *Monetaria moneta* and flavor characteristics of its products[J]. *China Condiment*, 2023, 48(3): 11-17.
- [31] 饶梦微,章超桦,林海生,等. 菲律宾蛤仔肉不同提取物呈味特性[J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(1): 90-97.
- RAO M W, ZHANG C H, LIN H S, et al. Sensory characteristic of different extracts from *Ruditapes philippinarum* [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(1): 90-97.
- [32] 司蕊,章超桦,曹文红,等. 冻藏对水煮及酶解马氏珠母贝肉提取物呈味特性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(3): 62-72.
- SI R, ZHANG C H, CAO W H, et al. Effect of frozen storage on flavor characteristics of aqueous and enzymolysis extract from *Pinctada martensii* [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(3): 62-72.
- [33] MAO J L, FU J J, ZHU Z Y, et al. Flavor characteristics of semi-dried yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) with KCl and ultrasound under sodium-reduced conditions before and after low temperature vacuum heating [J]. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136574.
- [34] 王泽建,刘建镡,万培耀,等. 米曲霉沪酿 3.042 菌株产脱氨酶发酵条件优化[J]. *中国调味品*, 2025, 50(2): 127-132.
- WANG Z J, LIU J B, WAN P Y, et al. Optimization of fermentation conditions for deaminase production by *Aspergillus oryzae* 3.042 strain [J]. *China Condiment*, 2025, 50(2): 127-132.
- [35] 张迪. 美拉德反应改良南极磷虾酶解产物风味的研究[D]. 湛江:广东海洋大学, 2017.
- ZHANG D. Flavor improvement of antarctic krill enzymatic hydrolysate by maillard reaction [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2017.
- [36] 祝亚辉,曹文红,章超桦. 华贵栉孔扇贝干贝呈味特性评价[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(12): 183-188.
- ZHU Y H, CAO W H, ZHANG C H. Flavor properties evaluation of dried *Chlamys nobilis* scallop [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(12): 183-188.
- [37] FENG T, CAI W T, CHEN D, et al. Analysis of umami taste and their contributing compounds in edible fungi based on electronic tongue, sensory evaluation, and

- chemical analysis[J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(12):4974-4987.
- [38] 赵真慧,吕美琪,崔李伟,等.不同藻类对脊尾白虾生长及呈味氨基酸的影响[J]. *水产科学*, 2022, 41(4):658-663.
- ZHAO Z H, LYU M Q, CUI L W, et al. Effects of different algae on growth and flavor amino acids of ridgetail white prawn *Exopalaemon carinicauda* [J]. *Fisheries Science*, 2022, 41(4):658-663.
- [39] 安比芳,陈创业,宋凯洋,等.基于GC-MS和电子鼻探究不同方法提取的玫瑰精油挥发性香气成分[J]. *中国调味品*, 2024, 49(10):153-160.
- AN B F, CHEN C Y, SONG K Y, et al. Exploration of volatile aroma components of rose essential oils extracted by different methods based on GC-MS and electronic nose [J]. *China Condiment*, 2024, 49(10):153-160.
- [40] 杜柳,邱文兴,王世哲,等.不同解冻方式对于制武昌鱼品质及挥发性风味的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(11):87-95.
- DU L, QIU W X, WANG S Z, et al. Effects of different thawing methods on the quality and volatile flavor of dried Wuchang fish [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(11):87-95.
- [41] 赵丽丽,史冠莹,蒋鹏飞,等.基于OAV和GC-O-MS法鉴定香椿中的关键香气成分[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(11):264-275.
- ZHAO L L, SHI G Y, JIANG P F, et al. Identification of the key aroma components in *Toona sinensis* using odor activity value and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(11):264-275.
- [42] CELLINI A, BLASIOLI S, BIONDI E, et al. Potential applications and limitations of electronic nose devices for plant disease diagnosis [J]. *Sensors*, 2017, 17(11):2596.
- [43] LIU G G, CHEN Q Q, GOU M, et al. Formation of key aroma-active and off-flavor components in concentrated peach puree [J]. *Food Chemistry*, 2024, 439:138105.
- [44] XU Y, BI S, NIU X Y, et al. Comparison of aroma active compounds in cold-and hot-pressed walnut oil by comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry and headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Research International*, 2023, 163:112208.
- [45] 郝捷,江彩艳,柴颖,等.基于GC-IMS的不同产地烟草中挥发性风味物质分析[J]. *轻工学报*, 2023, 38(2):87-93, 117.
- HAO J, JIANG C Y, CHAI Y, et al. Analysis of volatile components in tobacco from different regions based on GC-IMS [J]. *Journal of Light Industry*, 2023, 38(2):87-93, 117.
- [46] GAO P, WANG W X, XIA W S, et al. Lipolysis and lipid oxidation caused by *Staphylococcus xylosum* 135 and *Saccharomyces cerevisiae* 31 isolated from Suan Yu, a traditional Chinese low-salt fermented fish [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(2):419-426.
- [47] NIE S, LI L H, WANG Y Q, et al. Discrimination and characterization of volatile organic compound fingerprints during sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fermentation by combining GC-IMS and GC-MS [J]. *Food Bioscience*, 2022, 50:102048.
- [48] CHENG Y C, JIN D L, YU W T, et al. Impact of thermal ultrasound on enzyme inactivation and flavor improvement of sea cucumber hydrolysates [J]. *Food Chemistry*, 2024, 449:139302.
- [49] 杨鹏飞,吴薇,孙海峰,等.基于GC-MS结合多元统计的2种工艺提取脐橙挥发性成分差异分析[J]. *轻工学报*, 2025, 40(4):1-9.
- YANG P F, WU W, SUN H F, et al. Analysis of the differences in volatile components of navel oranges extracted by two processes based on GC-MS combined with multivariate statistics [J]. *Journal of Light Industry*, 2025, 40(4):1-9.
- [50] SUN P Z, LIN S Y, LI X R, et al. Different stages of flavor variations among canned Antarctic krill (*Euphausia superba*): Based on GC-IMS and PLS-DA [J]. *Food Chemistry*, 2024, 45:9140465-140465.

## Effect of targeted enzymatic hydrolysis on flavor characteristics and volatile organic compounds of *Ruditapes philippinarum* cooking liquid

TIAN Ran<sup>1</sup>, NING Yue<sup>1</sup>, LUAN Hongwei<sup>1</sup>, BU Ying<sup>1</sup>, ZHU Wenhui<sup>1</sup>, JIN Linxi<sup>2</sup>, LI Xuepeng<sup>1</sup>, LI Jianrong<sup>1</sup>

1. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Tianjin Chunfa Bio-Technology Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China

**Abstract: [Objective]** To achieve the high-value utilization of processing by-products from *Ruditapes philippinarum*. **[Methods]** With *Ruditapes philippinarum* cooking liquid as raw material, the enzymatic flavor base was prepared via the targeted enzymatic hydrolysis process optimized in our previous study. The flavor characteristics were comprehensively evaluated based on multiple indicators, including the contents of TCA-soluble peptides, free amino

acids (FAA), flavor nucleotides and organic acids, as well as taste activity value (TAV), equivalent umami concentration (EUC) and taste intensity (TI). Combined with electronic tongue and electronic nose, gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) was adopted to analyze the evolution of volatile organic compounds (VOCs). **【Results】** Targeted enzymatic hydrolysis significantly increases the contents of key flavor substances such as TCA-soluble peptides, FAA and flavor nucleotides ( $P < 0.05$ ). In the enzymatic flavor base, the TAV of glutamic acid increases significantly from 4.71 to 11.74 ( $P < 0.05$ ), the EUC rises from 1.46 g MSG/100 g to 5.31 g MSG/100 g, and its TI is approximately 3.6 times that of the original *Ruditapes philippinarum* cooking liquid. Electronic tongue analysis shows that the umami and richness of the enzymatic flavor base are significantly enhanced. Electronic nose-PCA reveals remarkable differences in odor intensity of the cooking liquid pre- and post-enzymatic hydrolysis, confirming that targeted enzymatic hydrolysis effectively alters its volatile flavor profile. A total of 72 VOCs are qualitatively identified by GC-IMS. The contents of flavor substances such as esters, aldehydes, ketones and furans in the enzymatic flavor base increase significantly, while the contents of undesirable flavor substances like isobutanol and triethylamine decrease obviously. **【Conclusion】** Targeted enzymatic hydrolysis can not only improve the umami quality of *Ruditapes philippinarum* cooking liquid, but also endow it with diverse composite flavor characteristics of fruity and fatty aromas.

**Key words:** *Ruditapes philippinarum* cooking liquid; targeted enzymatic hydrolysis; flavor characteristic; volatile organic compounds

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]

(上接第 39 页)

logarithmic growth phase (8 h of culture), it exhibited the best spore inactivation effect, with the final spore count and sporulation rate being 7 log CFU/mL and 1%, respectively. In addition, although this treatment did not completely inhibit the proliferative activity of residual bacterial cells, it significantly reduced their spore-forming ability. Compared with pasteurization alone, there was no significant change in the spore survival rate of *B. subtilis* 168 when pasteurization was combined with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. However, the spore survival rate of *B. subtilis* 168 was significantly reduced when pasteurization was combined with nitrite, glutaraldehyde, or povidone-iodine, respectively. Among them, the combination of pasteurization with nitrite or glutaraldehyde achieved a significant spore inactivation effect within a short time (90 min), with the spore survival rate being approximately 20%~30%, while it required 4 h of synergistic treatment with povidone-iodine to achieve a similar inactivation effect. **【Conclusion】** Both nitrite and glutaraldehyde can significantly improve pasteurization's effectiveness in the spore inactivation of *B. subtilis* 168.

**Key words:** pasteurization; *Bacillus subtilis*; spore inactivation; sanitizer

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]