

3 种经济贝类营养及呈味成分分析与评价

李红艳^{1,2} 刘振鲁^{3,4} 刘天红^{1,2} 王 颖^{1,2} 张帅中^{1,2}
张 彤^{3,4} 孙以康^{3,4}

(1. 山东省海洋科学研究院, 山东 青岛 266104; 2. 青岛市水产生物品质评价与利用工程研究中心,
山东 青岛 266104; 3. 滨州市海洋发展研究院, 山东 滨州 256699;
4. 滨州市水产苗种繁育与健康养殖重点实验室, 山东 滨州 256699)

摘要: [目的] 对滨州沿海底播自然生长的近江牡蛎、文蛤、毛蚶 3 种贝类营养及呈味成分等进行分析 and 评价。[方法] 分析 3 种贝类的常规营养成分、氨基酸、脂肪酸、主要矿质元素、活性物质、游离氨基酸、核苷酸、季铵化合物、有机酸及挥发性风味成分, 并进行营养品质评价。[结果] 近江牡蛎、文蛤和毛蚶均呈高蛋白、低脂肪、高灰分的特点, 且富含糖原和牛磺酸, 其中近江牡蛎和文蛤中的糖原含量较高, 毛蚶中的粗蛋白和牛磺酸含量较高; 毛蚶氨基酸组成高于 FAO/WHO 标准模式, 氨基酸平衡效果较好; 3 种贝类脂肪酸的不饱和程度高, EPA 和 DHA 占总脂肪酸含量的 30.94%~40.90%; 富含 Ca、Mg、Fe、Se 矿质元素; 重金属含量低于 GB 2762—2022 限量要求, 食用安全性高。呈味成分方面, 3 种贝类的谷氨酸、丙氨酸、精氨酸等游离氨基酸, 无机离子, 还原糖, 甜菜碱, 苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸等有机酸的 TAV 均 > 1, 对其呈味影响显著, 文蛤中的游离核苷酸 GMP、毛蚶的游离核苷酸 AMP 也是其鲜味的主要贡献者。3 种贝类的味精当量 TAV 值分别高达 59.33, 179.00, 95.33, 使其呈现强烈鲜味。挥发性风味成分方面, 3 种贝类的主体风味物质为醛类、醇类和酮类, 近江牡蛎的主要风味物质为 2-壬醛、2,4-癸二烯醛和 1-辛烯-3-醇等; 文蛤的主要风味物质为 3,6-壬二烯醛和 1-辛烯-3-醇; 毛蚶的主要风味物质为 2-壬醛、3,6-壬二烯醛、正辛醛和 1-辛烯-3-醇等, 各种风味物质相互协调, 形成了 3 种贝类独特的鲜香风味。[结论] 滨州沿海的近江牡蛎、文蛤和毛蚶为高蛋白低脂肪贝类, 滋味鲜甜, 矿质元素、糖原、牛磺酸含量丰富, 开发利用价值高。

关键词: 近江牡蛎; 文蛤; 毛蚶; 营养评价; 风味物质

Analysis and evaluation of nutritional and flavor components of three economic shellfish

Li Hongyan^{1,2} Liu Zhenlu^{3,4} Liu Tianhong^{1,2} Wang Ying^{1,2} Zhang Shuaizhong^{1,2}
Zhang Tong^{3,4} Sun Yikang^{3,4}

(1. Marine Science Research Institute of Shandong Province, Qingdao, Shandong 266104, China; 2. Qingdao Aquatic Organisms Quality Evaluation and Utilization Engineering Research Center, Qingdao, Shandong 266104, China;
3. Binzhou Marine Development Research Institute, Binzhou, Shandong 256699, China; 4. Key Laboratory of Aquatic Seedling Breeding and Healthy Aquaculture in Binzhou City, Binzhou, Shandong 256699, China)

Abstract: [Objective] To analyze and evaluate the nutritional and flavor components of three shellfish species, namely *Ostrea rivularis*, *Meretrix meretrix*, and *Scapharca subcrenata*, naturally growing by seabed seeding along the Binzhou coast. [Methods] The conventional

基金项目: 青岛市海洋科技创新专项 (编号: 24-1-3-hygg-25-hy); 山东省现代农业产业技术体系 (编号: SDARS-13-01); 国家重点研发计划 (编号: 2024YFD2401604)

通信作者: 王颖 (1971—), 女, 山东省海洋科学研究院研究员, 硕士。E-mail: food_rc@sina.com

收稿日期: 2025-10-10 **改回日期:** 2026-04-03

引用格式: 李红艳, 刘振鲁, 刘天红, 等. 3 种经济贝类营养及呈味成分分析与评价[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 119-132.

Citation: Li Hongyan, Liu Zhenlu, Liu Tianhong, et al. Analysis and evaluation of nutritional and flavor components of three economic shellfish[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 119-132.

nutritional components, amino acids, fatty acids, major mineral elements, bioactive substances, free amino acids, nucleotides, quaternary ammonium compounds, organic acids, and volatile flavor compounds of the three shellfish species were analyzed, and their nutritional quality was evaluated. [Results] *O. rivularis*, *M. meretrix*, and *S. subcrenata* all exhibited high protein, low fat, and high ash contents, and were rich in glycogen and taurine. Among them, *O. rivularis* and *M. meretrix* had higher glycogen contents, while *S. subcrenata* had higher crude protein and taurine contents. The amino acid composition of *S. subcrenata* exceeded the FAO/WHO reference pattern, indicating a well-balanced amino acid profile. The degree of fatty acid unsaturation in all three species was high, with EPA and DHA accounting for 30.94%~40.90% of total fatty acids. All three species were rich in mineral elements such as Ca, Mg, Fe, and Se, and their heavy metal contents were lower than the limits specified in GB 276—2022, indicating high food safety. In terms of flavor components, the taste activity values (TAVs) of free amino acids (such as glutamic acid, alanine, and arginine), inorganic ions, reducing sugars, betaine, and organic acids (malic, lactic, citric, and succinic acids) were all greater than 1, indicating significant contributions to flavor. In addition, free nucleotide GMP in *M. meretrix* and AMP in *S. subcrenata* were also major contributors to umami flavor. The equivalent umami concentration (EUC) TAVs of the three shellfish were as high as 59.33, 179.00, and 95.33, respectively, resulting in a strong umami flavor. Regarding volatile flavor compounds, aldehydes, alcohols, and ketones were the predominant contributors. The main flavor compounds of *O. rivularis* included 2-nonanal, 2,4-decadienal, and 1-octen-3-ol; Those of *M. meretrix* included 3,6-nonadienal and 1-octen-3-ol; And those of *S. subcrenata* included 2-nonanal, 3,6-nonadienal, n-octanal, and 1-octen-3-ol. The coordination of these compounds contributes to the unique and characteristic flavor of the three shellfish species. [Conclusion] *O. rivularis*, *M. meretrix*, and *S. subcrenata* from the Binzhou coastal area are high-protein, low-fat shellfish with a fresh and sweet taste, and are rich in mineral elements, glycogen, and taurine, indicating high potential for development and utilization.

Keywords: *Ostrea rivularis*; *Meretrix meretrix*; *Scapharca subcrenata*; nutrient evaluation; flavor substance

滨州北邻渤海湾,浅海滩涂面积广阔,近海饵料生物丰富。2024年,滨州贝类增养殖面积2.66万 hm^2 ,年产贝类30万t,主要品种包括近江牡蛎、毛蚶、文蛤等。滨州市作为中国文蛤的主要产区,2023年荣获“中国文蛤之乡”荣誉称号,正在努力打造“渤海贝仓”国家级区域公用品牌;“滨州文蛤”“滨州金蚶”通过国家地理标志证明商标认证。

近江牡蛎(*Ostrea rivularis*)是软体动物门双壳纲牡蛎目牡蛎超科海洋双壳类软体动物,味道鲜美,营养丰富,广泛分布于中国南北沿海,是主要的养殖品种之一;文蛤(*Meretrix meretrix*)是软体动物门双壳纲帘蛤目帘蛤科文蛤属贝类,素有“天下第一鲜”的美称,是中国沿海常见的食用经济贝类;毛蚶(*Scapharca subcrenata*)是软体动物门双壳纲列齿目蚶科毛蚶属贝类,俗称毛蛤,是渤海湾重要的埋栖型经济贝类之一。目前有关这3种贝类的营养成分研究较多^[1-6],对其滋味、风味等的研究相对较少。陈素华等^[7]、林海生等^[8]分别对文蛤与美洲帘蛤以及中国沿海养殖牡蛎的基本营养成分、呈味物质、挥发性风味物质等进行了分析,但缺少对氨基酸等营养物质的分析评价,且后者未注明所用牡蛎的壳长、体质量等形态参数,降低了数据的可参考性。试验拟通过对滨州市无棣县沿海自然生长的近江牡蛎、文蛤和毛蚶的常规营养成分、氨基酸、脂肪酸、主要矿物质元素、牛磺酸、游离氨基酸、核苷酸、季胺化合物、有机酸及挥发性风味成分进行分析,系统比较3种经济贝类的营养品质和风味特征,为3种贝类的营养价值和风味评价提供基础数据,也为滨州沿海贝类深加工和综合利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

近江牡蛎、文蛤、毛蚶:2024年10月中旬取自山东省滨州无棣县,冀鲁两省交界地带的渤海湾西南岸近海区域,为人工底播苗天然生长,不投喂任何饵料,近江牡蛎约2龄,文蛤约3~4龄,毛蚶约3~4龄;

混合氨基酸标准品:纯度 $\geq 99\%$,日本和光纯药工业株式会社;

核苷酸标准品、苹果酸、L-乳酸、柠檬酸、L-酒石酸、琥珀酸标准品:纯度 $\geq 98\%$,上海源叶生物科技有限公司;

甜菜碱:纯度97%,上海安普实验科技股份有限公司;

胆碱酒石酸氢盐:纯度99.90%,曼哈格(上海)生物科技有限公司;

氯化胆碱-D4:纯度98.7%,天津阿尔塔科技有限公司;

甲醇、乙醇、正己烷、乙腈:色谱纯,美国天地公司;

石油醚、氯仿、无水乙醚、氢氧化铵、盐酸、甲酸、硫酸、硫酸钠、柠檬酸钠、氯化钠、碳酸钠、乙酸钠、盐酸甲胺、硫酸铜、硫酸氢钠、氢氧化钾、硫酸钾、硼酸、氢氧化钠、亚铁氰化钾、乙酸锌、N-氯-对甲苯磺酰胺钠盐、2,6-二叔丁基对甲酚、对二甲氨基苯甲醛、乙酸胺、硝酸银、冰乙酸、丙酮等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

糖原检测试剂盒:南京建成生物工程研究所。

1.2 仪器与设备

氨基酸自动分析仪:LA8080型,日立高新(上海)国

际贸易有限公司;

超高效液相色谱仪:Thermo U3000型,美国赛默飞世尔公司;

电子分析天平:CPA225D型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

全自动蛋白测定仪:Kjeltec 8400型,丹麦 FOSS 公司;

全自动脂肪测定仪:Soxtec 8000型,丹麦 FOSS 公司;

气相色谱仪:GC6890型,美国安捷伦公司;

紫外可见分光光度计:UV2600型,日本岛津公司;

液相色谱质谱联用仪:API5500型,美国ABI公司;

电感耦合等离子体发射光谱仪:ICAP7200 Duo型,美国赛默飞世尔公司;

电感耦合等离子体质谱仪:ICAP RQ型,美国赛默飞世尔公司;

三重四级杆气相色谱质谱联用仪:TQ8040型,日本岛津公司;

SPME Fiber Assembly 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取纤维头、手动 SPME 进样器:美国 SUPELCO 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理 将样品表面杂质清洗干净,每种贝类分别取15个测其壳长、壳宽、壳高和质量(见表1)。所有样品均活体开壳取出全部软组织,根据大小取约10~20个贝肉合并为1个检测样品,每种贝类3个平行样品,匀浆后于 -20°C 冻存,所有检测于15 d内完成。

表1 滨州市沿海3种经济贝类的形态学参数

Table 1 Morphological traits of three economic shellfish species along the coast of Binzhou City

品种	壳长/cm	壳宽/cm	壳高/cm	质量/g
近江牡蛎	9.86 ± 1.34	7.65 ± 1.12	3.28 ± 0.47	131.58 ± 46.82
文蛤	6.94 ± 0.88	5.61 ± 0.65	3.31 ± 0.37	96.14 ± 31.58
毛蚶	5.68 ± 0.42	4.49 ± 0.37	4.10 ± 0.32	54.64 ± 14.85

1.3.2 营养成分测定

(1) 水分:按 GB 5009.3—2016 执行。

(2) 灰分:按 GB 5009.4—2016 执行。

(3) 粗蛋白质:按 GB 5009.5—2016 执行。

(4) 粗脂肪:按 GB 5009.6—2016 执行。

(5) 氨基酸:按 GB 5009.124—2016 和 GB/T 18246—2019 执行。

(6) 脂肪酸:按 GB 5009.168—2016 执行。

(7) P、Fe、Mg、K、Na、Ca、Zn、Se、As、Cd、Pb、Hg:按 GB 5009.268—2016 执行。

(8) 氯化物:按 GB 5009.44—2016 执行。

(9) 牛磺酸:按 GB 5009.169—2016 执行。

(10) 糖原:采用试剂盒法。

(11) 磷脂:参照李旭东^[9]的方法。

1.3.3 滋味物质测定

(1) 游离氨基酸:参照 Chen 等^[10]的方法。

(2) 甜菜碱:按 GB/T 23710—2009 执行。

(3) 胆碱:按 GB 5413.20—2022 执行。

(4) 有机酸:按 GB 5009.157—2016 执行。

(5) 游离核苷酸:按 GB 5413.40—2016 执行。

(6) 还原糖:按 GB 5009.7—2016 执行。

1.3.4 挥发性成分分析

(1) 挥发性成分提取:取样品 2 g 于固相萃取采样瓶中, 60°C 平衡 20 min 后插入装有 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 纤维头的微萃取手动进样器, 90°C 顶空萃取 30 min 后,立即拔出萃取头插入气相色谱仪进样口中, 250°C 热解析 5 min 进样。

(2) 气相色谱条件:HP-5MS (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)弹性石英毛细管柱,初始柱温 40°C ,保持 2 min,以 $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250°C 保持 10 min。柱箱温度 45°C ,进样口温度 250°C ,汽化室温度 250°C ,载气为氦气,纯度 99.999%,载气流量 1 mL/min。

(3) 质谱条件:EI 离子源,离子源温度 230°C ,电子能量 70 eV,接口温度 280°C ,质量分析器为单四级杆,质量扫描范围 35~300,检测电压 1.00 kV。

(4) 定性定量分析:通过标准图库 NIST17 进行定性分析,选择匹配度 $>80\%$ 的物质作为鉴定结果,用峰面积归一化法确定各成分的相对含量。

1.3.5 呈味参数计算 采用呈味强度值(TAV)评价呈味物质对整体的味觉贡献,按式(1)计算 TAV 值。

$$A = \frac{C}{T}, \quad (1)$$

式中:

A——TAV 值;

C——滋味物质含量,mg/100 g;

T——滋味物质的滋味阈值,mg/100 g。

采用味精当量(EUC)表示呈鲜味氨基酸与呈鲜味核苷酸之间的协同作用,EUC 越大,鲜味越强。按式(2)计算 EUC 值。

$$E = \sum a_i b_i + 1218 \sum a_i b_i \sum a_j b_j, \quad (2)$$

式中:

E——EUC 味精当量,g MSG/100 g;

a_i ——鲜味氨基酸(天冬氨酸或谷氨酸)含量,g/100 g;

a_j ——呈味核苷酸(IMP、GMP、AMP)含量,g/100 g;

b_i ——每种鲜味氨基酸相对于味精的鲜味浓度,天冬氨酸取 0.077,谷氨酸取 1.00;

b_j ——每种呈味核苷酸相对于 IMP 的鲜度系数,GMP 取 2.3,IMP 取 1,AMP 取 0.18;

1218——基于所用浓度的协同作用常数。

1.3.6 气味活度值评价 采用相对气味活度值(ROAV)评价风味物质对整体风味的贡献程度。按式(3)计算 ROAV 值。

$$R = \frac{C_i T_{i\max}}{C_{i\max} T_i} \times 100, \tag{3}$$

式中:

R ——ROAV 值;

C_i 、 T_i ——风味物质的相对百分含量(%)和感觉阈值($\mu\text{g/kg}$);

$C_{i\max}$ 、 $T_{i\max}$ ——对样品总体风味贡献最大的组分的相对百分含量(%)和感觉阈值($\mu\text{g/kg}$)。

1.3.7 氨基酸品质评价 根据 FAO/WHO 建议的氨基酸计分标准模式和中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所提出的鸡蛋蛋白质化学评分进行评价,分别按式(4)~式(6)计算凡纳滨对虾的氨基酸分(AAS)、化学分(CS)和必需氨基酸指数(EAAI)^[11]。

$$F = \frac{M_i}{M_0} \times 100, \tag{4}$$

$$T = \frac{C_{14:0} + C_{16:0} + C_{18:0}}{0.5 \times \sum \text{MUFA} + 0.5 \times \sum \text{PUFA}(n-6) + 3 \times \sum \text{PUFA}(n-3) + \frac{\sum \text{PUFA}(n-3)}{\sum \text{PUFA}(n-6)}}, \tag{8}$$

$$S = \frac{C_{12:0} + C_{14:0} + C_{16:0}}{\sum \text{MUFA} + \sum \text{PUFA}}, \tag{8}$$

式中:

T ——IT 值;

S ——IA 值;

MUFA——单不饱和脂肪酸含量,%;

PUFA——多不饱和脂肪酸含量,%。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行数据统计和方差分析,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,采用单因素方差 One-

$$G = \frac{M_1}{M_2} \times 100, \tag{5}$$

$$I = \sqrt[n]{\frac{100a}{A} \times \frac{100b}{B} \times \frac{100c}{C} \times \dots \times \frac{100h}{H}}, \tag{6}$$

式中:

F ——AAS 值;

G ——CS 值;

I ——EAAI 值;

M_1 ——待评蛋白质中必需氨基酸含量,mg/g;

M_0 ——FAO/WHO 模式中蛋白质相应必需氨基酸含量,mg/g;

M_2 ——鸡蛋蛋白质中相应必需氨基酸含量,mg/g;

n ——比较的氨基酸种数;

a 、 b 、 c 、 $\dots$ 、 h ——待评蛋白质的氨基酸含量,mg/g;

A 、 B 、 C 、 $\dots$ 、 H ——鸡蛋蛋白质的氨基酸含量,mg/g。

1.3.8 脂肪酸品质评价 血栓形成指数(IT)和动脉粥样硬化指数(IA)是评估脂肪酸对人类心血管疾病发生影响的指标,其计算式^[12]为:

$$\text{Way ANOVA 进行数据显著性分析, } P < 0.05 \text{ 表示差异显著。} \tag{7}$$

2 结果与分析

2.1 基本营养成分

由表 2 可知,3 种贝类均呈高蛋白、低脂肪、高灰分的特点,其中毛蚶的粗蛋白含量最高,文蛤的粗脂肪含量最低,灰分含量最高。与已报道的相同品种的营养成分相比,近江牡蛎、文蛤和毛蚶的灰分含量偏高;文蛤的粗蛋白含量偏低,毛蚶的粗蛋白含量明显偏高,粗脂肪含量偏低,这种差异可能是由样品采集季节、生长环境、生长年

表 2 滨州市沿海 3 种经济贝类的基本营养成分[†]

Table 2 Nutritional composition of three economic shellfish species along the coast of Binzhou City ($n=3$)				%
品种	水分	灰分	粗蛋白	粗脂肪
近江牡蛎	79.20 $\pm$ 0.07 ^b	2.60 $\pm$ 0.03 ^a	8.74 $\pm$ 0.01 ^a	1.10 $\pm$ 0.01 ^b
文蛤	80.51 $\pm$ 0.09 ^b	3.00 $\pm$ 0.04 ^b	8.01 $\pm$ 0.03 ^a	0.51 $\pm$ 0.01 ^a
毛蚶	76.06 $\pm$ 0.05 ^a	2.61 $\pm$ 0.03 ^a	14.51 $\pm$ 0.04 ^b	1.10 $\pm$ 0.02 ^b
近江牡蛎 ^[2]	87.93 $\pm$ 0.09	2.24 $\pm$ 0.02	8.07 $\pm$ 0.05	0.71 $\pm$ 0.01
近江牡蛎 ^[3]	83.55	1.70	9.90	1.22
近江牡蛎 ^[8]	71.57 $\pm$ 0.06	1.69 $\pm$ 0.01	11.29 $\pm$ 0.01	0.71 $\pm$ 0.03
文蛤 ^[5]	81.20	1.65	10.70	1.15
文蛤 ^[7]	86.85 $\pm$ 0.01	2.42 $\pm$ 0.01	8.77 $\pm$ 0.01	0.32 $\pm$ 0.01
毛蚶 ^[3]	82.78	2.20	7.31	2.78
毛蚶 ^[5]	82.90	2.19	8.20	2.70

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

限等导致的。

2.2 活性成分

由表3可知,近江牡蛎和文蛤的糖原含量相近,但高于毛蚶;3种贝类的糖原含量高于近江牡蛎^[8]、长牡蛎^[13]和福建牡蛎^[14]。作为贝类的主要能量储存形式,糖原具

有抗疲劳、解酒等活性^[15],也是影响其风味特征的重要因子。张智翠^[16]研究发现,长牡蛎糖原随季节呈现规律性变化,冬季的最高(3%),次年2月开始下降,10月底降至2%左右。试验测得近江牡蛎糖原含量处于较高水平,与上述报道相近。

表3 滨州市沿海3种经济贝类的活性成分 [†]					
Table 3 Bioactive components of three economic shellfish species along the coast of Binzhou City (n=3)					
品种	糖原/%	牛磺酸/(mg·g ⁻¹)	磷脂酰胆碱/%	磷脂酰乙醇胺/%	磷脂酰肌醇/%
近江牡蛎	2.88±0.07 ^b	48.20±0.25 ^b	ND	0.02±0.00	ND
文蛤	2.89±0.13 ^b	33.90±0.17 ^a	0.04±0.00	0.05±0.00	0.05±0.00
毛蚶	2.06±0.12 ^a	54.10±0.26 ^c	0.07±0.00	0.05±0.00	0.03±0.00
近江牡蛎 ^[8]	1.83±0.26	11.19	—	—	—
长牡蛎 ^[9]	—	47.21	0.29	0.10	2.95
长牡蛎 ^[13]	1.89±0.41	—	—	—	—
福建牡蛎 ^[14]	0.44±0.05	—	—	—	—

† 同列小写字母不同表示差异显著(P<0.05);ND为未检出;—为未检测。

毛蚶的牛磺酸含量高达54.10 mg/g,近江牡蛎、文蛤牛的依次降低;近江牡蛎的牛磺酸含量与长牡蛎^[9]的相近,高于近江牡蛎^[8]的。牛磺酸作为贝类的一种特征营养素,具有促进大脑发育、保护视网膜、保护肝脏等多种生物活性。牛磺酸在生物体内具有维持渗透压的作用,冬季海水渗透压高于夏季,牡蛎等贝类需积累牛磺酸以适应高渗透环境^[17],3种贝类采集于10月中下旬,水温较低,体内牛磺酸含量相对较高。

近江牡蛎体内磷脂含量较低(0.02%),远小于长牡蛎^[9];文蛤和毛蚶体内检出少量磷脂。磷脂在贝类体内主要以结构磷脂的形式存在^[16],易受到季节、盐度、温度等环境因素影响。李旭东^[9]研究表明,长牡蛎的磷脂含量在春夏季节较高,秋冬季节较低。3种贝类的磷脂含量均较低,符合上述规律,但近江牡蛎的磷脂含量显著低于长牡蛎^[9]的,这可能是品种、检测方法、生长环境、取样季节不同等导致的。

2.3 氨基酸成分分析

由表4可知,3种贝类体内均检出18种氨基酸,包括8种必需氨基酸和10种非必需氨基酸,其中3种贝类均为谷氨酸含量最高,近江牡蛎与毛蚶的胱氨酸含量最低,而文蛤中的色氨酸含量最低。毛蚶的必需氨基酸占氨基酸总量(EAA/TAA)的35.80%,与FAO/WHO推荐的模式(35.38%)相近,氨基酸平衡效果较好;文蛤和近江牡蛎的EAA/DAA低于FAO/WHO推荐模式,氨基酸平衡效果一般。3种贝类呈味氨基酸占氨基酸总量(DAA/TAA)的42%以上,味道鲜美。

氨基酸评分(AAS)和化学评分(CS)是反映食物蛋白质构成和利用率关系的重要指标。由表5可知,从AAS

表4 滨州市沿海3种经济贝类的氨基酸组成 [†]			
Table 4 Amino acid composition in three economic shellfish species along the coast of Binzhou City (n=3)			
氨基酸	近江牡蛎	文蛤	毛蚶
天门冬氨酸 [*]	3.27±0.12 ^a	3.64±0.14 ^a	5.58±0.19 ^b
苏氨酸 [#]	1.49±0.04 ^a	1.59±0.04 ^a	2.38±0.12 ^b
丝氨酸	1.44±0.03 ^a	1.38±0.03 ^a	2.29±0.09 ^b
谷氨酸 [*]	5.77±0.25 ^a	6.10±0.16 ^a	9.25±0.35 ^b
甘氨酸 [*]	2.02±0.07 ^a	1.90±0.08 ^a	2.88±0.11 ^b
丙氨酸 [*]	1.92±0.08 ^a	3.28±0.22 ^b	3.21±0.22 ^b
缬氨酸 [#]	1.39±0.03 ^a	1.54±0.04 ^a	2.29±0.13 ^b
异亮氨酸 [#]	1.20±0.03 ^a	1.38±0.06 ^b	2.21±0.15 ^c
亮氨酸 [#]	2.21±0.12 ^a	2.36±0.14 ^a	4.08±0.35 ^b
酪氨酸	0.43±0.02 ^a	0.82±0.05 ^b	1.54±0.17 ^c
苯丙氨酸 [#]	1.20±0.03 ^a	1.18±0.04 ^a	2.17±0.16 ^b
赖氨酸 [#]	2.36±0.06 ^a	2.46±0.12 ^a	3.63±0.24 ^b
组氨酸 [△]	0.77±0.02 ^a	0.87±0.05 ^{ab}	1.00±0.09 ^b
精氨酸 [△]	2.12±0.04 ^a	2.56±0.13 ^b	3.92±0.31 ^c
脯氨酸	1.63±0.07 ^a	1.59±0.11 ^a	2.04±0.18 ^b
胱氨酸	0.10±0.00 ^a	0.36±0.02 ^b	0.13±0.02 ^a
蛋氨酸 [#]	0.05±0.00 ^a	0.56±0.02 ^c	0.42±0.04 ^b
色氨酸 [#]	0.34±0.02 ^a	0.31±0.00 ^a	0.58±0.03 ^b
氨基酸总和(TAA)	29.71±0.78 ^a	33.90±0.84 ^b	49.58±0.94 ^c
必需氨基酸(EAA)	10.24±0.42 ^a	11.38±0.36 ^b	17.75±0.44 ^c
呈味氨基酸(DAA)	12.98±0.37 ^a	14.92±0.45 ^b	20.92±0.46 ^c
EAA/TAA/%	34.47	33.59	35.80
DAA/TAA/%	43.69	44.02	42.18

† #为必需氨基酸;^{*}为呈味氨基酸;△为半必需氨基酸;同行小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

和 CS 来看,3 种贝类的第一限制性氨基酸均为半胱氨酸+蛋氨酸。3 种贝类的赖氨酸和毛蚶的酪氨酸+苯丙氨酸氨基酸评分>100。AAS 与 CS 均呈现近江牡蛎<文蛤<毛蚶。从 EAAI 来看,3 种贝类的 EAAI 值呈现近江牡蛎<毛蚶<文蛤,且均<75^[18],表明其必需氨基酸组成与鸡蛋蛋白相比存在明显差距,不属于优质蛋白质来源。

表 5 滨州市沿海 3 种经济贝类的氨基酸评分
Table 5 Amino acid scores of three economic shellfish species along the coast of Binzhou City

必需氨基酸	AAS			CS		
	近江牡蛎	文蛤	毛蚶	近江牡蛎	文蛤	毛蚶
异亮氨酸	71.50	84.28	91.33	58.37	68.80	74.55
亮氨酸	75.19	82.03	96.49	79.74	87.00	102.33
赖氨酸	101.93	108.95	109.02	84.94	90.79	90.85
半胱氨酸+蛋氨酸	9.81	64.20	25.60	7.30	47.81	19.06
苏氨酸	88.68	96.75	98.20	78.82	86.00	87.29
色氨酸	80.10	74.90	96.50	47.12	44.06	56.76
缬氨酸	66.36	74.91	75.80	61.44	69.35	70.19
酪氨酸+苯丙氨酸	64.83	81.14	102.23	45.23	56.61	71.32
平均分	69.80	83.39	86.89	57.87	68.80	71.54
EAAI	48.34	66.59	65.23			

2.4 脂肪酸成分分析

由表 6 可知,3 种贝类体内共检出 25 种脂肪酸,其中饱和脂肪酸 10 种,单不饱和脂肪酸 6 种,多不饱和脂肪酸 9 种。3 种贝类饱和脂肪酸占各自总脂肪酸含量的 40.55%~42.65%,其中棕榈酸、硬脂酸含量较高;单不饱和脂肪酸中含量较高的为棕榈一烯酸和油酸,3 种贝类之间存在显著差异,毛蚶中单不饱和脂肪酸占总脂肪酸含量的 17.57%,显著高于文蛤和近江牡蛎的;3 种贝类多不饱和脂肪酸占总脂肪酸含量的 39.47%~47.00%,其中含量最高的为二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA),占总脂肪酸含量的 30.94%~40.90%。EPA 和 DHA 具有促进大脑与神经系统发育、保护心脑血管、免疫调节等生理活性^[19-20],营养价值较高,近江牡蛎脂肪酸的营养价值高于文蛤和毛蚶。3 种贝类的 IA 和 IT 远低于牛肉和羊肉^[21],说明 3 种贝类脂肪酸的不饱和程度高,具有潜在的抑制动脉粥样硬化、软化血管和抗血栓的作用。

2.5 无机离子

贝类具有富集金属的特性,海水中含量丰富的 Na、K、Cl、P 元素在 3 种贝类体内含量都较高(见表 7)。近江牡蛎富含 Ca、Mg、Zn 和 Se 元素,其中 Zn 是牡蛎的特征营养元素^[8];文蛤富含 Ca、Mg 和 Fe 元素,尤其其 Ca 含量高达 3 690.00 mg/kg,是良好的补钙食物;毛蚶富含 Mg、Fe 和 Se 元素。近江牡蛎的 Ca 含量,文蛤的 Ca、Mg、Fe 含量和毛蚶的 K、Fe 含量均远高于文献^[2-3,6]报道的。Ca 具有

表 6 滨州市沿海 3 种经济贝类的脂肪酸成分[†]
Table 6 Fatty acid composition of three economic shellfish species along the coast of Binzhou City %

脂肪酸	近江牡蛎	文蛤	毛蚶	脂肪酸	近江牡蛎	文蛤	毛蚶
月桂酸	0.09±0.01 ^a	0.21±0.03 ^b	0.10±0.00 ^a	二十碳三烯酸	0.47±0.03 ^b	1.26±0.24 ^c	0.31±0.00 ^a
十三碳酸	0.09±0.01 ^a	0.21±0.03 ^b	0.10±0.01 ^a	芥酸	1.31±0.22 ^a	3.57±0.76 ^c	1.95±0.48 ^b
豆蔻酸	4.69±0.33 ^b	2.52±0.11 ^a	5.04±0.12 ^b	花生四烯酸	1.69±0.17 ^a	4.20±0.51 ^c	2.47±0.32 ^b
十五酸	0.56±0.03 ^b	0.42±0.03 ^a	0.31±0.06 ^a	木焦油酸	0.28±0.03 ^a	0.42±0.02 ^b	0.31±0.03 ^a
棕榈酸	28.05±0.89	26.26±0.68	24.25±0.50	EPA	18.01±1.08 ^b	14.29±0.83 ^a	14.18±0.75 ^a
棕榈一烯酸	4.13±0.08 ^a	4.83±0.29 ^b	6.99±0.17 ^c	二十四碳一烯酸	0.09±0.00 ^a	0.21±0.03 ^b	0.10±0.01 ^a
十七酸	1.59±0.17 ^a	1.68±0.21 ^a	1.95±0.14 ^b	二十二碳五烯酸	1.31±0.21 ^a	4.20±0.44 ^c	2.16±0.26 ^b
硬脂酸	5.53±0.62 ^a	6.93±0.73 ^b	9.46±0.29 ^c	DHA	22.89±2.10 ^b	16.39±1.07 ^a	16.75±1.17 ^a
花生酸	0.47±0.03 ^a	1.26±0.16 ^c	0.82±0.14 ^b	总饱和脂肪酸	41.56±1.98	40.55±1.25	42.65±1.84
反油酸	1.41±0.14 ^b	0.42±0.00 ^a	0.31±0.01 ^a	总单不饱和脂肪酸	10.98±0.81 ^a	14.50±0.76 ^b	17.57±0.79 ^c
油酸	3.28±0.26 ^a	3.36±0.20 ^a	6.06±0.62 ^b	总多不饱和脂肪酸	47.00±2.78 ^c	43.70±2.01 ^b	39.47±1.72 ^a
亚油酸	1.88±0.19 ^b	0.84±0.06 ^a	1.85±0.15 ^b	ω-3 脂肪酸	42.96±2.89 ^c	35.92±1.22 ^b	34.64±1.64 ^a
γ 亚麻酸	0.28±0.04	0.42±0.05	0.31±0.03	ω-6 脂肪酸	3.85±0.21 ^a	5.46±0.42 ^c	4.62±0.46 ^b
α 亚麻酸	0.75±0.04 ^a	1.05±0.12 ^b	1.54±0.11 ^c	ω-9 脂肪酸	3.28±0.26 ^a	3.36±0.20 ^a	6.06±0.62 ^b
花生一烯酸	0.75±0.04 ^a	2.10±0.27 ^b	2.16±0.34 ^b	EPA+DHA	40.90±2.84 ^b	30.67±1.53 ^a	30.94±1.37 ^a
二十碳二烯酸	0.19±0.00 ^a	2.31±0.35 ^b	0.21±0.00 ^a	动脉粥样硬化指数 IA	0.48	0.45	0.43
山嵛酸	0.19±0.03 ^a	0.63±0.08 ^c	0.31±0.03 ^b	血栓形成指数 IT	0.03	0.02	0.04

[†] 同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表7 滨州市沿海3种经济贝类主要矿质元素含量[†]

矿质元素	近江牡蛎	文蛤	毛蚶	近江牡蛎 ^[2]	文蛤 ^[6]	毛蚶 ^[3]
Na	4 060.00±158.00 ^b	4 580.00±232.00 ^c	3 570.00±106.00 ^a	5 827.86±111.07	3 380.00	5 170.80
K	2 310.00±110.00 ^a	2 280.00±98.00 ^a	2 830.00±125.00 ^b	2 161.22±33.98	2 210.00	1 689.62
P	1 840.00±149.90 ^a	1 980.00±133.26 ^b	2 200.00±78.25 ^c	—	1 100.00	—
Cl	5 700.00±220.00 ^b	6 100.00±240.00 ^c	4 400.00±100.00 ^a	—	6 010.00	—
Mg	658.00±51.00 ^a	858.00±36.00 ^b	819.00±63.00 ^b	866.62±12.11	622.00	871.22
Ca	1 740.00±98.00 ^b	3 690.00±126.00 ^c	978.00±49.00 ^a	98.63±1.29	1 310.00	1 163.05
Fe	94.00±7.00 ^a	305.00±18.00 ^c	217.00±14.00 ^b	75.41±6.35	211.00	71.06
Zn	70.00±5.00 ^c	20.00±3.00 ^b	11.00±0.00 ^a	332.26±9.22	21.80	14.02
Se	0.61±0.08 ^b	0.42±0.04 ^a	0.65±0.05 ^b	0.43±0.03	628.00	—
无机 As	ND	ND	ND	—	—	—
Cd	1.21±0.08 ^c	0.34±0.03 ^b	0.01±0.00 ^a	—	—	—
Pb	0.14±0.00 ^a	0.19±0.02 ^b	0.13±0.01 ^a	—	—	—
甲基汞	ND	ND	ND	—	—	—

[†] 同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$);ND为未检出;—为未检测。

促进创伤组织再生、提高食欲和免疫力的作用;Mg具有促进骨骼代谢,调节激素和能量代谢等作用;Fe具有促进血红蛋白合成,缓解贫血等功能;Zn具有促进蛋白质合成,参与人体营养吸收和脂肪代谢等作用;Se具有抗氧化,促进生长、维持正常免疫和甲状腺功能等作用。3种贝类的矿质元素含量丰富,有利于补充钙质和多种矿质元素。

3种贝类的重金属含量均低于CXS 193—1995($Cd\leq 2.0\text{ mg/kg}$)和GB 2762—2022的规定(无机As $\leq 0.5\text{ mg/kg}$, Pb $\leq 1.5\text{ mg/kg}$, Cd $\leq 2.0\text{ mg/kg}$, 甲基汞 $\leq 0.5\text{ mg/kg}$),食用安全性较高。

2.6 游离氨基酸组成

游离氨基酸是水产品的主要呈味物质和风味前体物质^[22]。不同的游离氨基酸具有不同的呈味特征,某些游离氨基酸与游离核苷酸、无机盐也存在一定的协同效应^[23—24]。由表8可知,近江牡蛎、文蛤和毛蚶中总游离氨基酸分别为920.04, 1 174.87, 544.72 mg/100 g,近江牡蛎体内游离甘氨酸、苏氨酸、谷氨酸、丙氨酸含量较高;文蛤和毛蚶体内游离丙氨酸、谷氨酸、精氨酸含量较高。甘氨酸具有令人愉快的甘甜味;丙氨酸具有甜味,也能与谷氨酸和某些核苷酸产生鲜味相乘作用^[27];谷氨酸是鲜味的主要贡献者;精氨酸虽然是苦味氨基酸,但高含量时会与丙氨酸产生一定的协同作用,赋予海产品特有的适宜风味^[28]。近江牡蛎中谷氨酸、丙氨酸、精氨酸、甘氨酸的TAV >1 ;文蛤中谷氨酸、丙氨酸、缬氨酸、精氨酸和赖氨酸的TAV >1 ;毛蚶的谷氨酸、丙氨酸和精氨酸的TAV >1 ,为其鲜味的主要贡献者。

2.7 无机离子、季胺化合物、有机酸、呈味核苷酸等组成

无机离子本身主要提供咸味和苦味,但对水产品风味的形成具有辅助作用,其中氯化钠对某些苦味物质有消减或抑制作用,是水产品中不可或缺的呈味辅助物和鲜味增强物^[29—30]。由表9可知,3组贝类中各呈味离子的TAV值均 >1 ,Na⁺和Cl⁻的TAV高达30以上,是其滋味的重要贡献者。

氧化三甲胺、甜菜碱和胆碱是存在于甲壳类、软体类水产品中的重要呈味物质。甜菜碱具有令人爽快的甜味和一定的鲜味,同时可以增强浓厚味^[32]。氧化三甲胺具有特殊的海鲜味,是水产品中海腥味的主要来源^[33]。3种贝类中氧化三甲胺含量较少,甜菜碱含量较高且TAV >1 ,是其滋味的重要贡献者。3种贝类中均检出较高含量的葡萄糖,可能是其甘甜滋味的重要来源。

有机酸也是水产品中重要的呈味物质,主要呈现酸味和苦味,但琥珀酸及其钠盐具有鲜味,并与谷氨酸存在一定协同增强鲜味的效应^[27]。由表9可知,除酒石酸未检出外,3种贝类中苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸的TAV值均 >1 ,赋予贝类柔和的酸味,丰富了其整体风味;其中文蛤琥珀酸的TAV高达16.00,是其鲜香滋味的主要贡献者。

游离核苷酸是水产品的特征滋味物质,不仅本身带有鲜味,还可以与游离氨基酸、无机离子等协同增鲜。3种贝类中腺嘌呤核苷酸(AMP)含量较高,次黄嘌呤核苷酸(IMP)未检出,与文蛤^[7]、牡蛎^[8]等的检测结果不同,可能是检测方法、生长地域、采样季节及检测时贝类新鲜程度等不同导致的。毛蚶中AMP和文蛤中鸟嘌呤核苷酸(GMP)的TAV均 >1 ,为其各自鲜味的直接贡献者。味精当量可以直观地显示鲜味氨基酸与呈味核苷酸之间的协

表 8 滨州市沿海 3 种经济贝类的游离氨基酸组成及呈味强度[†]

Table 8 Free amino acid composition and TAVs in three economic shellfish species along the coast of Binzhou City								
游离氨基酸	呈味特征 ^[25]	滋味阈值/ (10 ⁻² mg·g ⁻¹) ^[26]	含量/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)			TAV		
			近江牡蛎	文蛤	毛蚶	近江牡蛎	文蛤	毛蚶
天门冬氨酸*	鲜/甜(+)	100	35.00±0.24 ^b	35.26±0.28 ^b	22.08±0.19 ^a	0.35	0.35	0.22
苏氨酸	甜(+)	260	124.19±0.45 ^c	86.14±0.35 ^b	25.02±0.10 ^a	0.48	0.33	0.10
丝氨酸	甜(+)	150	47.95±0.24 ^b	13.01±0.04 ^a	11.03±0.02 ^a	0.32	0.09	0.07
谷氨酸*	鲜(+)	30	126.89±0.43 ^b	179.11±0.54 ^c	103.13±0.28 ^a	4.23	5.97	3.44
甘氨酸*	甜(+)	130	132.16±0.37 ^c	81.15±0.25 ^b	41.21±0.07 ^a	1.02	0.62	0.32
丙氨酸*	甜(+)	60	118.31±0.51 ^b	327.66±0.67 ^c	100.13±0.16 ^a	1.97	5.46	1.67
胱氨酸	—	—	8.01±0.00 ^b	12.18±0.04 ^c	3.06±0.02 ^a	ND	ND	ND
缬氨酸	苦/甜(+)	40	33.03±0.12 ^b	48.27±0.06 ^c	12.12±0.02 ^a	0.83	1.21	0.30
蛋氨酸	苦/甜(-)	300	21.15±0.03 ^b	34.10±0.04 ^c	18.07±0.06 ^a	0.07	0.11	0.06
异亮氨酸	苦(-)	90	18.05±0.05 ^b	36.26±0.09 ^c	8.01±0.07 ^a	0.20	0.40	0.09
亮氨酸	苦(-)	190	28.14±0.04 ^b	52.87±0.23 ^c	13.04±0.02 ^a	0.15	0.28	0.07
酪氨酸	苦(-)	90	11.14±0.02 ^a	18.25±0.07 ^b	9.07±0.02 ^a	0.12	0.20	0.10
苯丙氨酸	苦(-)	90	17.01±0.10 ^a	34.79±0.25 ^b	55.84±0.41 ^c	0.19	0.39	0.62
赖氨酸	苦/甜(-)	50	36.97±0.07 ^b	59.83±0.08 ^c	19.14±0.04 ^a	0.74	1.20	0.38
组氨酸	苦(-)	20	15.12±0.04 ^b	18.13±0.02 ^c	6.05±0.03 ^a	0.76	0.91	0.30
精氨酸	苦/甜(+)	50	66.65±0.66 ^a	109.69±0.68 ^c	80.55±0.36 ^b	1.33	2.19	1.61
脯氨酸	甜/苦(+)	300	80.27±0.43 ^c	28.17±0.13 ^b	17.17±0.02 ^a	0.27	0.09	0.06
游离氨基酸总量			920.04±0.89 ^b	1 174.87±0.56 ^c	544.72±0.64 ^a			
呈味氨基酸占比/%			44.82	53.04	48.93			

[†] *为呈味氨基酸;同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$);ND为未检出。

同增鲜作用,被广泛应用于食品鲜味分析中^[34]。近江牡蛎、文蛤和毛蚶的味精当量分别为 0.13, 0.19, 0.11 MSG/100 g,即每 100 g 相应的贝肉(湿重)所具有的鲜味强度大约相当于 0.13, 0.19, 0.11 g 味精所产生的鲜味。味精的味道阈值为 0.03 g/100 mL,因此,近江牡蛎、文蛤和毛蚶的味精当量 TAV 值分别为 4.33, 6.33, 3.67, 为 3 种贝类味道鲜美的原因。

2.8 挥发性风味物质组成

由表 10 可知,近江牡蛎中共检出 70 种挥发性成分,其中醛类化合物 16 种,酮类化合物 9 种,酯类化合物 3 种,醇类化合物 9 种;文蛤中共检出 33 种挥发性成分,其中醛类化合物 4 种,酮类化合物 7 种,酯类化合物 3 种,醇类化合物 9 种;毛蚶中共检出 55 种挥发性成分,其中醛类化合物 17 种,酮类化合物 9 种,酯类化合物 3 种,醇类化合物 5 种。醛类、酮类和醇类化合物是近江牡蛎中主要的挥发性物质;烃类、醇类和酯类化合物是文蛤中主要的挥发性物质;醛类、烃类和酮类是毛蚶中主要的挥发性物质。醛类化合物主要来源于氨基酸的降解、多不饱和脂肪酸的氧化及微生物的作用,由于其阈值一般

较低,对整体风味的贡献比较大^[37-38]。3 种贝类中醛类物质含量较高的是己醛、庚醛、辛醛、壬醛和(*Z,Z*)-3,6-壬二烯醛。己醛和壬醛具有青草味,壬醛是构成海腥味的主要物质之一,庚醛和烯醛类(2-己烯醛、2-辛烯醛、4-壬烯醛、2,4-庚二烯醛、3,6-壬二烯醛)与海腥味的形成有关。醇类物质一般是由糖代谢或脂肪酸在脂质氧化酶的作用下氧化分解产生,饱和醇具有较高的阈值,对贝类风味贡献不大;但不饱和醇阈值较低,对风味可能产生影响^[39]。3 种贝类中检出含量较高的醇类物质为 1-辛烯-3-醇,其阈值较低,主要呈青草味和蘑菇味,普遍存在于海产品中。

烃类化合物通常是由脂质衍生和类胡萝卜素降解而来,大多具有清香和甜香的风味,对海产贝类的风味产生起到一定作用,其中 3,5,5-三甲基-2-己烯是 3 种贝类中含量最高的烃类物质。但因烃类化合物的阈值一般相对较高,对贝类风味的贡献较小^[40]。酮类物质一般由不饱和脂肪酸热氧化降解、氨基酸降解和微生物作用产生^[41],具有独特的脂香和果香味。3 种贝类中检出酮类物质种类较多但含量较低,对风味的影响较小。

表9 滨州市沿海3种经济贝类的无机离子、季胺化合物、有机酸、核苷酸等的含量及TAV[†]

Table 9 Contents and TAVs of inorganic ions, quaternary ammonium compounds, organic acids, nucleotides, and related components in three economic shellfish species along the coast of Binzhou City

类别	滋味成分	呈味特征	含量/(mg·kg ⁻¹)			滋味阈值/ (mg·kg ⁻¹) ^[31]	TAV		
			近江牡蛎	文蛤	毛蚶		近江牡蛎	文蛤	毛蚶
无机离子	Na ⁺	咸/苦(—)	4 060.00±158.00 ^b	4 580.00±232.00 ^c	3 570.00±106.00 ^a	89.70	45.26	51.06	39.80
	K ⁺	咸(十)	2 310.00±110.00 ^a	2 280.00±98.00 ^a	2 830.00±125.00 ^b	508.29	4.54	4.49	5.57
	PO ₄ ³⁻	改善风味	5 638.71±259.36 ^a	6 067.74±208.39 ^b	6 741.94±139.81 ^c	1 424.85	3.96	4.26	4.73
	Cl ⁻	改善风味	5 700.00±220.00 ^b	6 100.00±240.00 ^c	4 400.00±100.00 ^a	138.45	41.17	44.06	31.78
	Mg ²⁺		658.00±51.00 ^a	858.00±36.00 ^b	819.00±63.00 ^b	155.55	4.23	5.52	5.27
	Ca ²⁺		1 740.00±98.00 ^b	3 690.00±126.00 ^c	978.00±49.00 ^a	248.48	7.00	14.85	3.94
季胺化合物	氧化三甲胺	海鲜味/腥味	0.21±0.00	0.28±0.03	0.30±0.04	4 882.15	<0.01	<0.01	<0.01
	甜菜碱	鲜/甜(十)	3 480.00±59.00 ^b	3 200.00±68.00 ^a	4 540.00±63.00 ^c	2 343.00	1.49	1.37	1.94
	胆碱		1 060.00±36.00 ^b	876.00±24.00 ^a	1 020.00±43.00 ^b	>5 000.00	<0.21	<0.18	<0.20
还原糖	葡萄糖		4 4500.00±208.00 ^c	3 9700.00±180.00 ^b	2 4200.00±210.00 ^a	16 214.40	2.74	2.45	1.49
有机酸	苹果酸	酸/苦(—)	1 800.00±45.00 ^a	2 300.00±79.00 ^b	2 600.00±57.00 ^c	496.13	3.63	4.64	5.24
	酒石酸	酸	ND	ND	ND	15.00	ND	ND	ND
	乳酸	酸/苦(—)	1 100.00±46.00 ^a	1 200.00±86.00 ^b	1 900.00±72.00 ^c	675.60	1.63	1.78	2.81
	柠檬酸	酸/收敛	3 300.00±149.00 ^a	1 700.00±94.00 ^b	2 200.00±104.00 ^c	499.54	6.61	3.40	4.40
	琥珀酸	酸/鲜(十)	500.00±48.00 ^a	1 700.00±69.00 ^b	500.00±36.00 ^a	106.28	4.70	16.00	4.70
	GMP	鲜(十)	18.80±0.75 ^a	82.70±3.27 ^b	ND	81.44	0.23	1.02	ND
核苷酸	IMP	鲜(十)	ND	ND	ND	235.30	ND	ND	ND
	AMP	鲜/甜(十)	340.00±18.00 ^b	244.00±16.00 ^a	1 200.00±48.00 ^c	868.05	0.39	0.28	1.38
	CMP		79.10±3.20 ^a	135.00±5.80 ^b	221.00±6.90 ^c	1 835.80	0.04	0.07	0.12
	UMP		128.00±7.10 ^b	61.60±2.30 ^a	135.00±7.80 ^c	2 009.92	0.06	0.03	0.07
味精当量/(10 ⁻² g MSG·g ⁻¹)			0.13	0.19	0.11	300.00	4.33	6.33	3.67

† ND为未检出;同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表10 滨州市沿海3种经济贝类的挥发性成分组成[†]

Table 10 Volatile flavor compounds of three economic shellfish species along the coast of Binzhou City

化合物	风味物质	阈值/ (μg·kg ⁻¹) ^[35-36]	相对含量/%			气味特征
			近江牡蛎	文蛤	毛蚶	
醛类	E-2-戊烯醛	55	3.95	ND	ND	
	正己醛	5	1.97	ND	4.73	青草味、海腥味
	2-己烯醛	19.2	2.17	ND	2.95	
	庚醛	2.8	2.20	ND	5.02	海腥味、哈喇味、烤鱼片味
	苯甲醛	41.7	2.68	ND	0.94	杏仁香、坚果香和水果香
	正辛醛	0.59	ND	ND	5.43	水果香、橙香
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	15.4	10.02	ND	1.87	
	E-2-辛烯醛	3	ND	ND	1.95	青草味、哈喇味
	壬醛	1.1	1.83	ND	3.82	脂香、青草味
	(E,E)-2,4-辛二烯醛	NA	0.48	ND	ND	
	E-2-壬醛	0.07	2.83	ND	1.06	
	4-乙基苯甲醛	123.23	0.32	ND	0.40	苦杏仁、甜茴香
	E-4-壬烯醛	NA	0.13	ND	ND	
	(Z,Z)-3,6-壬二烯醛	0.05	ND	4.11	3.81	青黄瓜味
	十二醛	1.07	1.28	ND	1.57	花香、柑橘香
	E-2-癸烯醛	NA	1.79	ND	0.93	蜡香、脂香、蘑菇味
	2,4-癸二烯醛	0.2	0.70	ND	ND	柑橘香、脂香

续表 10

化合物	风味物质	阈值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ^[35-36]	相对含量/%			气味特征
			近江牡蛎	文蛤	毛蚶	
醛类	(2 <i>S</i> ,2' <i>R</i> ,5' <i>S</i>)-丁香醛	NA	ND	3.96	ND	木质香草甜味
	十四醛	60	ND	ND	0.67	脂香
	正十五碳醛	1.48	0.40	0.81	1.82	微弱花香
	十六醛	0.91	0.12	0.38	0.70	
	9,12,15-十八碳三烯醛	NA	ND	ND	0.64	
烃类	3-溴-3,3-二氟丙烯	NA	ND	ND	4.57	
	3-氯环戊烯	NA	ND	0.42	ND	
	1,4-环氧环己烷	NA	ND	0.94	ND	
	3-亚乙基环己烯	NA	0.86	ND	ND	
	氧化环辛烯	NA	0.23	ND	ND	
	3,5,5-三甲基-1-己烯	NA	ND	ND	0.27	
	3,5,5,-三甲基-2-己烯	NA	13.20	35.70	12.30	
	1-(2-丙烯基)环戊烯	NA	0.15	ND	ND	
	1,2-环氧-7-辛烯	NA	0.92	ND	0.51	
	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	NA	0.66	ND	1.08	
	1,1-二甲基-2-(2-甲基-2-丙烯基)环丙烷	NA	0.34	ND	ND	
	Z-5-十四碳烯-3-炔	NA	6.01	ND	ND	
	(3 <i>Z</i> ,5 <i>Z</i>)-2,7-二甲基-3,5-辛二烯	NA	0.08	ND	0.14	
	1-丁烯基环己烷	NA	0.31	ND	ND	
	2-甲基-1-壬烯-3-炔	NA	ND	ND	0.38	
	1-亚丁烯-环己烷	NA	0.27	ND	ND	
	萘烯	NA	ND	ND	0.23	
	3-十二碳炔	NA	1.58	ND	ND	
	(3 <i>E</i>)-3-十二烯-1-炔	NA	4.14	ND	ND	
	1,5-二乙烯基-3-甲基-2-亚甲基-环己烷	NA	0.72	ND	ND	
	5-己基-3,3-二甲基-1-环戊烯	NA	ND	ND	0.40	
	(<i>Z</i>)-4-十三碳烯-6-炔	NA	0.17	ND	ND	
	1-(己氧基)-2-甲基己烷	NA	ND	ND	1.56	
	十四烷	1 000	ND	ND	0.24	蜡香
	2-十四烯	NA	ND	ND	0.30	
	(<i>Z</i>)-3-十四碳烯-5-炔	NA	0.76	ND	ND	
	(<i>Z</i>)2-十五碳烯-4-炔	NA	ND	ND	0.78	
	2,6,10,14-四甲基十五烷	NA	ND	ND	0.45	
	正二十烷	NA	0.08	ND	ND	蜡香
	10-甲基十九烷	NA	ND	ND	0.37	
	2-十五烷基-4-(十六烷氧基)-1,3-二恶烷	NA	ND	ND	0.18	
醇类	(<i>Z</i>)-2-丁烯-1-醇	NA	ND	0.41	ND	
	1-戊醇	150.2	ND	3.20	ND	苹果白兰地香、辛辣味
	环丁-1-烯基甲醇	NA	ND	ND	4.77	
	2-乙基己醇	13	ND	9.12	ND	甜味
	1-辛烯-3-醇	1.5	5.35	9.60	7.57	蘑菇味、鱼腥味
	2-辛炔-1-醇	NA	7.78	ND	ND	
	<i>E</i> -2-辛烯-1-醇	50	0.19	ND	ND	
	2-丙基-1-戊醇	NA	ND	0.52	ND	
	1-壬醇	2	ND	0.52	0.12	玫瑰柑橘香、脂香
	2,7-辛二烯-1-醇	NA	1.90	ND	0.29	
	2-亚甲基-环戊烷丙醇	NA	0.11	ND	0.55	
	4-环辛烯-1-甲醇	NA	1.06	ND	ND	

续表 10

化合物	风味物质	阈值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ^[35-36]	相对含量/%			气味特征
			近江牡蛎	文蛤	毛蚶	
醇类	3,6-亚壬基-1-醇	NA	0.81	ND	ND	黄瓜、西瓜味
	烯丙基正戊基甲醇	NA	ND	0.95	ND	
	3-癸炔-2-醇	NA	ND	2.20	ND	
	2,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇	NA	1.52	ND	ND	
	十一醇	NA	0.16	ND	ND	甜味
	月桂醇	NA	ND	ND	ND	
	鲸蜡醇	NA	ND	0.29	ND	
酮类	4-甲氧基-4-甲基-2-戊酮	NA	ND	1.23	ND	
	1-(2-呋喃基)-2-丁酮	NA	0.85	ND	0.44	
	7-甲基-双环[3.2.0]庚-3-烯-2-酮	NA	0.59	ND	ND	
	3-甲基-4-亚甲基-2-己酮	NA	ND	ND	0.35	
	2,5-辛二酮	NA	ND	0.49	3.19	果香、青草味
	<i>E,E</i> -3,5-辛二烯-2-酮	150	2.63	ND	7.55	
	双环[3.3.1]壬-2,6-二酮	NA	0.19	ND	ND	
	2-壬酮	38.9	0.69	0.70	0.77	果香、青香
	顺式异长叶薄荷酮	NA	0.07	ND	ND	薄荷香
	2-甲基-5-(1-甲基乙基)环己酮	NA	ND	0.17	ND	留兰香、草药气味
	顺-1-甲基双环癸烷-2,10-二酮	NA	0.13	ND	ND	柑橘类油脂、芸香气味
	甲基壬基甲酮	NA	ND	ND	0.62	
	2-十三酮	500	ND	0.22	ND	
	α -紫罗兰酮	1.64	ND	0.42	ND	暖木香、紫罗兰香
	β -紫罗兰酮	474	0.18	0.80	0.36	紫罗兰香、水果香、木香
	1-环十二烷基-乙酮	NA	6.21	ND	7.24	
	2-十六烷酮	NA	ND	ND	0.70	
	甲酸庚酯	NA	0.41	1.10	ND	
酯类	正己酸乙酯	NA	0.54	7.86	ND	轻微果香
	(2 <i>E</i>)-2,7-辛二烯-1-醇乙酸酯	NA	ND	ND	0.56	玫瑰花香,薄荷味,蔬菜香
	乙酸二氢香芹酯	NA	ND	ND	0.25	
	三(2-乙基丁酸)1,2,3-甘油三醇酯	NA	ND	ND	0.35	
	甘油三乙酰基蓖麻醇酸酯	NA	0.56	ND	ND	
	二十二烷酸二十二烷基酯	NA	ND	0.93	ND	强烈木香、烟熏香
	2-氨基-5-甲基苯甲酸	NA	1.13	2.16	ND	
芳香族	4-乙基苯酚	10	0.34	ND	ND	
	2-乙基苯酚	30	ND	0.76	ND	强烈木香、烟熏香
	9-乙基-9,10-二氢-9,10-二甲基蒽	NA	0.18	ND	ND	
	5-羟基-7-甲氧基-2-甲基-3-苯基-4 <i>H</i> -1-苯并吡喃-4-酮	NA	0.26	ND	ND	
	叔戊基胺	NA	0.73	5.58	ND	淡干酪味,酸性果香
其他	2-乙基丁酸	NA	ND	1.17	ND	
	3-2-甲基-1,3-二氧戊环-2-基丙酸	NA	ND	0.29	ND	
	2-甲基-1-(4-硝基苯基)-1 <i>H</i> -咪唑	NA	ND	ND	0.52	
	2-异丙基-5-甲基己酯乙酸	NA	0.07	ND	ND	
	十六烷基二甲基叔胺	NA	0.58	ND	ND	
	2-乙酰基-9,12,15-十八碳三烯酸	NA	1.02	ND	ND	
	2-己基-1,1'-双环丙烷-2-辛酸	NA	0.21	ND	ND	
	Z-4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸	NA	0.21	ND	ND	
	1,4-双[2-(3-氯苯氧基)乙基]哌嗪	NA	ND	3.03	1.73	

† NA 为无法获得;ND 为未检出。

一般认为 $ROAV \geq 1$ 为关键风味化合物, $0.1 \leq ROAV \leq 1$ 对整体风味有修饰作用。由表 11 可知,近江牡蛎的主体风味物质为庚醛、2,4-庚二烯醛、壬醛、2-壬醛、十二醛、2,4-癸二烯醛和 1-辛烯-3-醇;文蛤的主体风味物质为 3,6-壬二烯醛、1-辛烯-3-醇;毛蚶的主体风味物质为正己醛、庚醛、正辛醛、壬醛、2-壬醛、3,6-壬二烯醛、十二醛、十五碳醛、十六醛和 1-辛烯-3-醇。从气味特征来看,近江牡蛎的海腥味、蘑菇味、柑橘香、脂香和青草味较重;文蛤的青黄瓜味、海腥味和蘑菇味较强;毛蚶的青黄瓜味、青草味、水果香、橙香、海腥味较强。

表 11 滨州市沿海 3 种经济贝类挥发性成分的 ROAV[†]
Table 11 ROAVs of volatile compounds of three economic shellfish species along the coast of Binzhou City

化合物	气味特征	ROAV			化合物	气味特征	ROAV		
		近江牡蛎	文蛤	毛蚶			近江牡蛎	文蛤	毛蚶
E-2-戊烯醛		0.18	ND	ND	2,4-癸二烯醛	柑橘香、脂香	8.66	ND	ND
正己醛	青草味、海腥味	0.97	ND	1.24	正十五碳醛	微弱花香	0.67	0.67	1.61
2-己烯醛		0.28	ND	0.20	十六醛		0.33	0.51	1.01
庚醛	海腥味、哈喇味、烤鱼片味	1.94	ND	2.35	1-戊醇	苹果白兰地香、辛辣味	ND	0.03	ND
苯甲醛	杏仁香、坚果香和水果香	0.16	ND	0.03	2-己基乙醇	甜味	ND	0.85	ND
正辛醛	水果香、橙香	ND	ND	12.14	1-辛烯-3-醇	海腥味、蘑菇味	8.82	7.79	6.62
(E,E)-2,4-庚二烯醛		1.61	ND	0.16	E-2-辛烯-1-醇	蘑菇味	0.01	ND	ND
E-2-辛烯醛	青草味、哈喇味	0.00	ND	0.85	1-壬醇	玫瑰柑橘香、脂香	ND	0.32	0.08
壬醛	青草味、脂香	4.11	ND	4.56	E,E-3,5-辛二烯-2-酮	果香、青草味	0.04	ND	0.07
E-2-壬醛		100.00	ND	19.87	2-壬酮	果香、青香	0.04	0.02	0.03
4-乙基苯甲醛	苦杏仁、甜茴香	0.01	ND	ND	α -紫罗酮	暖木香、紫罗兰香	ND	0.31	ND
(Z,Z)-3,6-壬二烯醛	青黄瓜味	ND	100.00	100.00	4-乙基苯酚	紫罗兰香、水果香、木香	0.08	ND	ND
十二醛	花香、柑橘香	2.96	ND	1.93	2-乙基苯酚		ND	0.03	ND

[†] ND 为未检出。

3 结论

对滨州沿海近江牡蛎、文蛤和毛蚶 3 种经济贝类进行了营养及风味成分的分析及评价。结果表明,近江牡蛎、文蛤和毛蚶均呈高蛋白、低脂肪、高灰分的特点,其中毛蚶蛋白质含量显著偏高;3 种贝类均富含糖原和牛磺酸,其中近江牡蛎和文蛤中的糖原含量较高,毛蚶中的牛磺酸含量较高,具有一定的保健功效;毛蚶的必需氨基酸占氨基酸总量的比例(EAA/TAA)高于 FAO/WHO 标准模式,氨基酸平衡效果较好;近江牡蛎和文蛤 EAA/TAA 低于 FAO/WHO 标准模式,氨基酸平衡效果一般;由氨基酸评分结果来看,3 种贝类的第一限制性氨基酸均为半胱氨酸+蛋氨酸;脂肪酸的不饱和程度高,二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸占总脂肪酸含量的 30.94%~40.90%;富含矿物质元素,其中近江牡蛎富含 Ca、Mg、Zn 和 Se 元素,文蛤富含 Ca、Mg 和 Fe 元素,毛蚶富含 Mg、Fe 和 Se 元素;重金属含量低于 GB 2762—2022 限量要求,食用安全性高。

呈味成分方面,3 种贝类中的游离氨基酸(谷氨酸、丙氨酸、精氨酸等)、无机离子、还原糖、甜菜碱和有机酸(苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸)等对其呈味影响显著;此外,文蛤中的游离核苷酸鸟嘌呤核苷酸、毛蚶中的游离核

苷酸腺嘌呤核苷酸对其呈味影响显著,是其鲜味的主要贡献者。3 种贝类的味精当量呈味强度值高达 59.33, 179.00, 95.33,也是 3 种贝类具有强烈鲜味的原因。挥发性风味成分方面,3 种贝类的主体风味物质为醛类、醇类和酮类,近江牡蛎的主要风味物质为 2-壬醛、2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇等;文蛤的主要风味物质为 3,6-壬二烯醛、1-辛烯-3-醇;毛蚶的主要风味物质为 2-壬醛、3,6-壬二烯醛、正辛醛、1-辛烯-3-醇等,各种风味物质相互协调,形成了 3 种贝类独特的鲜香风味。

综上,滨州沿海的近江牡蛎、文蛤、毛蚶 3 种贝类味道鲜美,矿物质元素含量丰富,牛磺酸和糖原等活性物质含量较高,营养价值高,在即食产品、方便食品、功能性产品研发等方面具有巨大潜力。该研究仅对 10 月份采集的 3 种贝类营养及风味成分进行了分析,未能覆盖不同季节样品。贝类营养及风味成分受水温、饵料生物种类、繁殖周期等影响较大,未来将开展不同季节、不同规格贝类的系统性采样,构建全周期贝类品质数据库。

参考文献

[1] 顾向飞,林志华,董迎辉,等. 3 种壳色花纹文蛤常规营养成分

- 分析与评价[J]. 动物营养学报, 2014, 26(12): 3 850-3 857.
- Gu X F, Lin Z H, Dong Y H, et al. Analysis and evaluation of general nutritive components of clams (*Meretrix meretrix*) with three kinds of shell colors and decorative patterns[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(12): 3 850-3 857.
- [2] 方玲, 马海霞, 李来好, 等. 华南地区近江牡蛎营养成分分析及评价[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 301-307, 313.
- Fang L, Ma H X, Li L H, et al. Analysis and evaluation of nutrient composition in *Ostrea rivularis* from South China sea coast[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(2): 301-307, 313.
- [3] 陈华絮. 雷州市沿海几种贝类营养成分的分析[J]. 中国食物与营养, 2006, 12(7): 49-51.
- Chen H X. Analysis on nutritive ingredients of several coastal shellfishes in Leizhou City[J]. Food and Nutrition in China, 2006, 12(7): 49-51.
- [4] 李晓英, 董志国, 阎斌伦, 等. 青蛤与文蛤的营养成分分析与评价[J]. 食品科学, 2010, 31(23): 366-370.
- Li X Y, Dong Z G, Yan B L, et al. Analysis and evaluation of nutritional components in *Cyclina sinensis* and *Meretrix meretrix*[J]. Food Science, 2010, 31(23): 366-370.
- [5] 李苹苹. 五种经济贝类的营养成分及蛋白质质量分析[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(15): 99-101.
- Li P P. The analysis of nutrient ingredients and protein quality on five economic shellfish[J]. Food Research and Development, 2014, 35(15): 99-101.
- [6] 杨晋, 陶宁萍, 王锡昌. 文蛤的营养成分及其对风味的影响[J]. 中国食物与营养, 2007, 13(5): 43-45.
- Yang J, Tao N P, Wang X C. The nutritional components of *Meretrix meretrix* and their impact on flavor[J]. Food and Nutrition in China, 2007, 13(5): 43-45.
- [7] 陈素华, 陈爱华, 吴杨平, 等. 文蛤与美洲帘蛤的营养组成及风味成分比较分析[J]. 水产科学, 2023, 42(6): 966-976.
- Chen S H, Chen A H, Wu Y P, et al. Comparison of nutrient compositions and flavor substances between hard clam *Meretrix meretrix* and northern Quahog *Mercenaria mercenaria*[J]. Fisheries Science, 2023, 42(6): 966-976.
- [8] 林海生, 秦小明, 章超桦, 等. 中国沿海主要牡蛎养殖品种的营养品质和风味特征比较分析[J]. 南方水产科学, 2019, 15(2): 110-120.
- Lin H S, Qin X M, Zhang C H, et al. Comparative analysis of nutritional components and flavor characteristics of cultivated oyster from different coastal areas of China[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(2): 110-120.
- [9] 李旭东. 乳山长牡蛎营养、呈味及功能成分分析与品质综合评价[D]. 连云港: 江苏海洋大学, 2021.
- Li X D. Analysis of nutrition, taste and functional components and comprehensive evaluation of quality of *Crassostrea gigas* [D]. Lianyungang: Jiangsu Ocean University, 2021.
- [10] Chen W, Wang X J, Wang Y J, et al. Determination of content of amino acid in abalone by Precolumn derivatization and its nutritional value evaluation[J]. Agricultural Biotechnology, 2018, 7(3): 178-183, 210.
- [11] 中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. 食物成分表[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1980.
- Institute of Nutrition and Food Hygiene, Chinese Academy of Preventive Medical Sciences. Food composition table[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1980.
- [12] Küçükgülmez A, Yanar Y, Çelik M, et al. Fatty acids profile, atherogenic, thrombogenic, and polyene lipid indices in golden grey mullet (*Liza aurata*) and gold band goatfish (*Upeneus moluccensis*) from Mediterranean Sea[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2018, 27(8): 912-918.
- [13] 朱怡静, 李琪, 张景晓, 等. 5种壳色长牡蛎不同组织常规营养成分分析与评价[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 354-360.
- Zhu Y J, Li Q, Zhang J X, et al. Analysis and evaluation of nutrient composition in different tissues of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) with five shell colors[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 354-360.
- [14] 王恬, 史博, 周龙, 等. 潮间带和潮下带养殖的福建牡蛎生长、营养及呈味成分的差异分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(2): 246-253.
- Wang T, Shi B, Zhou L, et al. Difference analyses of growth, nutrition and taste components of *Crassostrea angulata* cultured in intertidal zone and subtidal zone[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(2): 246-253.
- [15] 秦小明, 林华娟, 张自然, 等. 牡蛎肉的醒酒作用机理初探[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(1): 109-113.
- Qin X M, Lin H J, Zhang Z R, et al. Preliminary studies on sobering-up effect of oyster meat[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(1): 109-113.
- [16] 张智翠. 太平洋牡蛎品质的季节性变化及贮藏过程中的生化变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 21-29.
- Zhang Z C. Oyster quality changes during different season and storage[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006: 21-29.
- [17] Hosoi M, Kubota S, Toyohara M, et al. Effect of salinity change on free amino acid content in Pacific oyster[J]. Fisheries Science, 2003, 69(2): 395-400.
- [18] 佩利特, Young V R. 蛋白质食物营养评价[M]. 范文洵, 译. 北京: 人民卫生出版社, 1984: 43-175.
- Pellett P L, Young V R. Nutritional evaluation of protein foods [M]. Fan W X. Beijing: People's Medical Publishing House, 1984: 43-175.
- [19] Oguro A, Ishihara Y, Siswanto F M, et al. Contribution of DHA diols (19, 20-DHDP) produced by cytochrome P450s and soluble epoxide hydrolase to the beneficial effects of DHA supplementation in the brains of rotenone-induced rat models of Parkinson's disease[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids, 2021, 1 866(2): 158858.
- [20] 徐文思, 杨祺福, 赵子龙, 等. 微波熟制对小龙虾营养与风味的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 216-221, 227.

- Xu W S, Yang Q F, Zhao Z L, et al. Study on microwave heating on nutrition and flavor composition of crayfish[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 216-221, 227.
- [21] Sari M, Onk K, Sisman T, et al. Effects of different fattening systems on technological properties and fatty acid composition of goose meat[J]. European Poultry Science, 2015, 79: 1-12.
- [22] Chen G, Li J, Sun Z W, 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.
- [23] 崔国梅, 李顺峰, 高帅平, 等. 酶解工艺对香菇风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(10): 186-193.
- Cui G M, Li S F, Gao S P, et al. Effect of enzymatic hydrolysis process on flavor compounds of *Lentinula edodes*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 186-193.
- [24] Komata Y. Umami taste of seafoods[J]. Food Reviews International, 1990, 6(4): 457-487.
- [25] 姚静玉, 刘洁, 柏雪莹, 等. 利用 ^1H NMR 分析小龙虾的特征性滋味组成[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 170-175.
- Yao J Y, Liu J, Bai X Y, et al. Determination of characteristic taste compounds of crayfish by ^1H nuclear magnetic resonance [J]. Food Science, 2023, 44(8): 170-175.
- [26] 向晨曦, 钟明慧, 徐新星, 等. 蒸制鲟鱼肉特征性滋味组分的鉴定[J]. 肉类研究, 2021, 35(6): 22-27.
- Xiang C X, Zhong M H, Xu X X, et al. Identification of characteristic taste components of steamed sturgeon[J]. Meat Research, 2021, 35(6): 22-27.
- [27] 刘天天. 分子感官科学技术对北海沙蟹汁风味分析的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- Liu T T. Study on the flavor of Beihai soldier crab sauce by meand of molecular sensory science[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [28] 郭建港. 中国对虾“黄海 3 号”风味品质影响因素的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- Guo J G. Study on the factors influencing the flavor quality of *Fenneropenaeus chinensis*, "Huanghai No. 3"[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [29] 吴娜, 顾赛麒, 陶宁萍, 等. 鲜味物质间的相互作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(10): 389-392, 400.
- Wu N, Gu S Q, Tao N P, et al. Research progress in interaction between umami substances[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(10): 389-392, 400.
- [30] Keast R S J, Breslin P A S. An overview of binary taste-taste interactions[J]. Food Quality and Preference, 2003, 14(2): 111-124.
- [31] Meyer S, Dunkel A, Hofmann T. Sensomics-assisted elucidation of the tastant code of cooked crustaceans and taste reconstruction experiments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(5): 1 164-1 175.
- [32] Michikawa K, Ohno T, Watanabe K, et al. Taste quality of glycine betaine and its contribution to the taste of a whelk[J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 1995, 42(12): 1 019-1 026.
- [33] 吴燕燕, 朱小静. 鱼肉腥味物质的来源及控制方法研究进展[J]. 中国渔业质量与标准, 2016, 6(2): 14-19.
- Wu Y Y, Zhu X J. Progress on the source of fishiness materials and their control methods[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2016, 6(2): 14-19.
- [34] Tsai S, Tsai H, Mau J. Non-volatile taste components of *Agaricus blazei*, *Agrocybe cylindracea* and *Boletus edulis*[J]. Food Chemistry, 2008, 107(3): 977-983.
- [35] Wen X Y, Chen A H, Xu Y S, et al. Comparative evaluation of volatile profiles of Asian hard clams (*Meretrix meretrix*) with different shell colors by electronic nose and GC-MS[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2021, 30(1): 107-121.
- [36] 顾赛麒, 吴娜, 张晶晶, 等. MMSE-GC-O 结合 OAV 法鉴定蒸制崇明地区中华绒螯蟹中关键气味物质[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 877-888.
- Gu S Q, Wu N, Zhang J J, et al. Characterization of key odor compounds in steamed Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) farmed in Chongming region by monolithic material sorptive extraction-gas chromatography-olfactometry and odor activity value methods[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(3): 877-888.
- [37] 吴永俊, 王玉涛, 施文正, 等. 不同产地虹鳟鱼肉风味物质的比较[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 888-899.
- Wu Y J, Wang Y T, Shi W Z, et al. Comparison of flavor substances of different parts of rainbow trout in different regions [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(6): 888-899.
- [38] 庄小妹, 郭全友, 郑尧, 等. 养殖地域和商品规格划分对大菱鲆营养及风味品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 179-185.
- Zhuang X M, Guo Q Y, Zheng R, et al. Effect of farming region and commercial size on nutrition and flavor quality of turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 179-185.
- [39] Song Y T, Du B F, Ding Z H, et al. Baked red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder flavor analysis and evaluation under different exogenous Maillard reaction treatment[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110525.
- [40] 黄忠白, 丁媛, 黄健, 等. 栉孔扇贝柱和扇贝裙边中挥发性物质的比较分析[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 98-102.
- Huang Z B, Ding Y, Huang J, et al. Comparison of volatile substances in scallop adductors and skirts of *Chlamys farreri* [J]. Food Science, 2016, 37(4): 98-102.
- [41] 曹静, 张凤枰, 龙斌, 等. 野生和养殖长吻鮠肌肉挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 170-174.
- Cao J, Zhang F P, Long B, et al. Analysis of volatile flavor compounds in muscles from wild and cultured *Leiocassis longirostris*[J]. Food Science, 2015, 36(16): 170-174.