

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20231024004

海水贝类风味品质研究进展

朱丹妮^{1,2,3}, 徐昙烨^{1,2,3*}, 刘 峰^{1,2,3}, 李国道^{1,2,3}, 赵前程^{1,2,3}, 刘俊荣^{1,2,3}

(1. 大连海洋大学食品科学与工程学院, 大连 116023; 2. 辽宁省海洋健康食品工程研究中心, 大连 116023;
3. 大连市特色海洋功效成分开发与高值化利用重点实验室平台, 大连 116023)

摘 要: 贝类作为海水养殖的重要经济品种, 因其鲜美的风味感官和独特的营养价值而深受人们喜爱。风味是贝类品质评价的一项重要指标, 风味物质分为气味物质和呈味物质两大类。本文对国内外经济海水贝类风味物质的形成、作用及其在加工贮藏中的变化情况进行综述; 其次, 以生化代谢水平以及生命活力状态为指标, 对活品贝类的风味品质研究进行总结; 最后, 介绍了感官评价、色谱-质谱法、代谢组学、风味指纹图谱等风味品质评价技术, 以期为海水贝类的风味品质研究提供参考。

关键词: 贝类; 风味; 品质; 评价技术

Research progress on flavor quality of marine shellfish

ZHU Dan-Ni^{1,2,3}, XU Tan-Ye^{1,2,3*}, LIU Feng^{1,2,3}, LI Guo-Dao^{1,2,3},
ZHAO Qian-Cheng^{1,2,3}, LIU Jun-Rong^{1,2,3}

(1. College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. Liaoning Provincial Marine Health Food Engineering Research Center, Dalian 116023, China; 3. Dalian Key Laboratory of Marine Bioactive Substances Development and High Value Utilization, Dalian 116023, China)

ABSTRACT: As an important economic species in mariculture, shellfish is loved by people because of its delicious flavor and unique nutritional value. Flavor is an important index to evaluate the quality of shellfish. Flavor substances can be divided into two categories: Odor substances and flavor substances. This paper reviewed the formation, function and changes in processing and storage of the flavor substances of economic marine shellfish at home and abroad, secondly, summarized the study on the flavor quality of live shellfish according to the biochemical metabolism level and life vigor state, finally, introduced sensory evaluation, chromatography-mass spectrometry, metabolomics, flavor fingerprint and other flavor quality evaluation techniques, so as to provide reference for the study of flavor quality of marine shellfish.

KEY WORDS: shellfish; flavor; quality; evaluation technique

0 引 言

中国海域辽阔, 贝类物种资源丰富, 产量可观, 许多种类已经发展为海水养殖的重要经济品种。据中国渔业统计年鉴显示, 2022 年, 中国贝类的总产量已经达到 1638.02 万 t,

其中养殖产量为 1588.56 t, 占世界贝类养殖产量的 89%^[1-2]。贝类味道鲜美, 营养丰富, 深受消费者的喜爱。风味是评价水产品品质重要的指标之一, 气味和滋味共同决定了贝类的风味, 此外贝肉的色泽、质地及后味等感官特性也对产品品质有重要贡献。食品的风味特性并不是单一物质作用的

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201926)、大连市高层次人才创新计划项目(2021RQ097)、辽宁省教育厅面上项目(JYTMS20230479)、辽宁省科技计划联合基金项目(2023-MSLH-011)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32201926), the Dalian High-level Talent Innovation Program (2021RQ097), the Liaoning Provincial Department of Education Surface Project (JYTMS20230479), and the Liaoning Provincial Science and Technology Plan Joint Fund (2023-MSLH-011)

*通信作者: 徐昙烨, 博士, 讲师, 主要研究方向为水产品保活保鲜及品质调控。E-mail: xutanye1199@126.com

*Corresponding author: XU Tan-Ye, Ph.D, Lecturer, Dalian Ocean University, No.52, Heishijiao Street, Shahekou District, Dalian 116023, China. E-mail: xutanye1199@126.com.

结果,而是多种风味成分的共同作用,相互影响,这一过程是复杂多变的。尽管人们对于贝类的风味成分及品质评价已有研究,然而对于贝类贮藏过程中风味品质的变化仍然了解的不够全面。此外,活品流通模式下贝类活力状态与其风味品质也密切相关,这为贝类的风味品质研究提供了新的角度。近些年来,海产品味和需求的不断提升使得人们对于贝类风味品质有了新的认知,随着贝类保鲜加工新技术的发展^[3],也迫切需要人们对贝类风味品质有更深入的理解,从而建立具有针对性的贝类风味品质评价体系。目前,尚没有关于海水贝类风味品质研究进展的相关文章。本文综述了海水贝类气味以及呈味物质及其在贮藏加工过程中的品质变化情况,并对活品贝类风味品质研究进行总结,介绍了贝类风味品质评价技术,以期对贝类的风味品质研究提供参考,为我国贝类产品的开发与利用提供思路。

1 贝类风味物质的研究

风味涉及嗅觉和味觉两方面。一般来说,刺激嗅觉的主要是气味成分,刺激味觉的主要是呈味成分。气味成分

对于贝类风味最为重要,主要有醇类、醛类、酮类、含硫化合物、烃类和酯类化合物。呈味成分有含氮化合物和不含氮化合物两大类^[4]。这些化合物的存在不仅可以单独提供给贝类不同的风味,同时也可以通过协同作用产生更复杂的香味。不同贝肉中含有的化合物含量不同,这些化合物中有的掩盖了腥味,有的提供了鲜味等香味,或者它们之间互相影响,彼此协同激发出特殊的香气。

1.1 气味物质

气味物质的存在对贝类风味品质至关重要。已有大量文献针对贝类挥发性气味物质进行了研究。贝类中气味物质主要包括醛类、醇类、酮类、酯类、烃类、硫类、胺类等化合物。这些风味化合物在不同种类水产品中存在构成比例上的差异,使得不同贝类产生了不同的风味^[5]。几种海洋贝类的气味物质见表 1。通常而言,醛类物质以青草味、花香味等愉悦性气味为主,少部分醛类物质表现出鱼腥味、苦杏仁味等气味。含硫类物质以臭鸡蛋味、硫磺味和哈喇味等非愉悦性气味为主。此外,烃类物质虽具有清香、甜香等气味,但它们的阈值较高,对贝类整体风味贡献较小。

表 1 贝类的气味物质
Table 1 Odour material of shellfish

种类	化合物名称	气味特征描述	来源	参考文献
醛类	2,4-庚二烯醛	青草味、脂肪味、花香味、清香味、坚果香、奶油香、甜味、蜂蜜样香气、酒香、苦杏仁味等	香港牡蛎(<i>Crassostrea hongkongensis</i>)、 华贵栉孔扇贝(<i>Chlamys nobilis</i>)、 太平洋牡蛎(<i>Crassostrea gigas</i>)	[6-8]
	庚醛			
	己醛			
	壬醛			
	2-辛烯醛			
	2-丁烯醛			
	癸醛			
	4-乙基-苯甲醛			
	间苯二甲醛			
	2-癸烯醛			
	十一醛			
	十四醛			
	2,4-癸二烯醛			
	肉豆蔻醛			
	顺-9,17-十八烯醛			
	D-丁香醛			
醇类	反-4-癸烯醛	酒香、蘑菇香、泥土味、青菜香等	香港牡蛎(<i>Crassostrea hongkongensis</i>)、 虾夷扇贝(<i>Patinopecten yessoensis</i>)	[7,9-10]
	1-戊烯-3-醇			
	1-戊醇			
	2-戊烯-1-醇			
	1-己醇			
	1-庚醇			
	1-辛烯-3-醇			
	3-辛醇			
	2-(2-乙氧基乙氧基)-乙醇			
	2-乙基-1-己醇			
	4-乙基-环己醇			
	3,3-二甲基-4-庚醇			
	2-辛烯-1-醇			
	3-壬烯-1-醇			

表 1(续)

种类	化合物名称	气味特征描述	来源	参考文献
醇类	1-壬醇	蘑菇香、水果香等	香港牡蛎(<i>Crassostrea hongkongensis</i>)、 华贵栉孔扇贝(<i>Chlamys nobilis</i>)、 太平洋牡蛎(<i>Crassostrea gigas</i>)	[6-7,11-12]
	4-壬醇			
	4-庚醇			
	1,5-辛二烯-3-醇			
	3-戊酮			
酮类	2,3-辛二酮			
	3-辛酮			
	5-甲基-5-庚烯-3-酮			
	3,5-辛二烯-2-酮			
	3-壬酮			
	2-十一烷酮			
	3-十一烯-2-酮			
	1-(3,4-二甲基苯基)-乙酮			
	2-壬酮			
	甲基壬基甲酮			
酯类	香叶基丙酮			
	苯甲酰基异硫氰酸酯			
	丙酸戊酯			
	环己基草酸丁酯			
	环己基丙酸甲酯			
	环丁基羧酸-2-二甲基乙酯			
	戊酸-5-羟基-2,4-二叔丁酯			
	邻苯二甲酸环丁基乙酯			
	丙酸-2-甲基-1-(1,1-二甲基)-2 甲基-1,3-丙二酯			
	2-三氟甲基苯甲酸-6-乙基-3-辛酯			
	氨基甲酸甲酯			
	邻苯二甲酸二乙酯			
	邻苯二甲酸二异丁酯			
烃类	己二酸二辛酯			
	邻苯二甲酸二丁酯			
	(1-亚丁基)环己烷			
	1-十二碳烯-3-炔			
	1,3,5-辛三烯			
	4,4-二甲基-1-庚烯			
	十二烷			
	十四烷			
	2,6,10-三甲基-十五烷			
	2,6,10,14-四甲基-十五烷			
	2,6,10,14-四甲基-十六烷			
	2,6,10,15-四甲基-十七烷			
	十七烷			
	二十一烷			
	萘			
	2-乙基-呋喃			
	1,3-二乙酰基苯			
	二十三烷			
十六烷				
甲基磺酸酐				
四硝基甲烷				
硫类	二甲基二硫醚			
	二甲基三硫醚			
胺类	三甲胺			
	二甲胺			

贝类从海上养殖到销售终端的过程中,由于外界环境变化、微生物作用及自身生理状况的改变导致体内相关呈味物质发生改变,从而引起贝类的风味发生改变,产生或好或坏的气味。另外,贝类的加工烹饪方式繁多,不同的加工温度和方法也会改变贝类体内的风味物质。通过研究不同贝类在不同温度条件下冻藏,结果发现不同的冻藏条件影响其挥发性盐基氮和氨基态氮的含量变化,而不同贝类中同一种物质的变化趋势也不尽相同^[16]。冰鲜牡蛎中的挥发成分主要是己醛、1-辛烯 3-醇、3-辛酮等,且解冻时间不同,挥发性物质也发生变化。随着解冻时间的延长,醛酮类相对含量逐渐减少,胺类相对含量逐渐增加^[17]。对活体牡蛎在流通过程中进行研究对比发现,酮类化合物在流通过程中波动下降,而醛类物质逐渐累积,含量增加,风味降低,当对其进行 24 h 暂养后,具有愉悦风味的化合物含量得到了提高^[11]。生鲜水产品经过热加工后风味物质有着极大的变化,如热加工温度对牡蛎挥发性风味成分有着不同的影响,经过 100℃加热后,叶青香的醛类物质大量减少,而腥味的醛类相对含量变化不大,苦杏仁气味的苯甲醛相对含量有所增加;呋喃类物质在加热后大量产生;酮类物质的相对含量变化不大,但腥味的 3,5-辛二烯-2-酮相对含量有所减少,当温度加热到 150℃时,焦糖味的物质开始大量增加^[18]。生鲜状态下腥味物质含量较高,比如 1-戊烯-3-醇、2,4-反式-庚二烯醛和庚烯,而经过热加工熟制的腥味物质含量与种类均有所减少,同时油脂味和肉香味的物质含量增加,比如 3-甲基环乙醇、反式-2-辛烯-1-醇,以及具有烤肉香气的 2-乙基呋喃等物质^[19]。

1.2 呈味物质

水产品中呈味物质按照是否含氮,可以分为含氮化合物和不含氮化合物,这些化合物大多与滋味有关。

1.2.1 含氮化合物

贝类中的含氮化合物一般包括游离氨基酸、低分子呈味肽、核苷酸类、甜菜碱、冠醚碱、氧化三甲胺等,这些物质对于贝类风味起到了重要作用^[20]。不同的物质体现出水产品不同的滋味,这些物质之间相互协同使每种水产品都具有独特的风味。

(1)游离氨基酸

游离氨基酸是海产品鲜味的主要来源,贝类中含有大约 20 种氨基酸^[21],体现出水产品甜味、鲜味以及苦味等

多种复杂的滋味。例如谷氨酸(glutamic acid, Glu)的钠盐具有鲜味、精氨酸(arginine, Arg)可以提高鲜度、丙氨酸(alanine, Ala)作为甜味氨基酸带有略微的苦味、蛋氨酸(methionine, Met)缬氨酸(valine, Val)是海胆独特的呈味物质等^[22],其中蛋氨酸有淡淡的硫磺味,缬氨酸为甜味。除小环亚胺氨基酸外, D-氨基酸大多具有甜味。L-氨基酸的味道与侧链的结构息息相关,侧链为酸性时则呈现酸味感,例如 Glu、Asp; 当侧链短小时,氨基酸具有甜味感,例如丝氨酸(serine, Ser)、苏氨酸(threonine, Thr)、甘氨酸(glycine, Gly)、丙氨酸、半胱氨酸(cysteine, Cys)、蛋氨酸;而当侧链为长链或大链时,氨基酸有苦味,如亮氨酸(leucine, Leu)、缬氨酸、苯丙氨酸(phenylalanine, Phe)、异亮氨酸(isoleucine, Ile)、色氨酸(tryptophan, Trp)、酪氨酸(tyrosine, Tyr); 而当侧链为碱性时呈现出苦中略甜的味感,例如离氨酸(lysine, Lys)、组氨酸(histidine, His)、精氨酸(arginine, Arg)^[19]。在活体贝类中,一些氨基酸还起着调节渗透压的作用^[23]。张苏平等^[24]测定了青蛤、缢蛏、文蛤和牡蛎中的氨基酸含量,其中以牛磺酸(taurine, Tau)、谷氨酸、丙氨酸、精氨酸为主。研究发现,当牡蛎在不同的温度下杀菌净化时,体内的总游离氨基酸(free amino acid, FAA)含量发生了明显的变化,同时核苷酸、脂肪酸以及糖原含量均有着不同程度的变化^[25]。在对不同煮制时间的近江牡蛎煮制液的风味进行分析后得出,随着煮制时间的延长,游离氨基酸的含量上升,鲜味、甜味和苦味氨基酸总量也大幅上升^[26]。

(2)低分子呈味肽

呈味肽是一种分子量在 500~1500 Da、可通过氨基酸合成或者酶水解产生的低聚肽^[27],具有呈味功能和加工特性,可以提高水产品的风味,同时可用来加工成各种调味品。目前已知的呈味肽主要分为咸味肽、甜味肽、苦味肽、鲜味肽和酸味肽 5 类,呈味肽的风味不同是由于其组成氨基酸的种类与排列顺序的差异^[28],5 种呈味肽见表 2。除此之外,有研究表明谷胱甘肽可以引起滋味的厚重感(kokumi)^[29-30]。呈味肽是水产品特征性滋味中不可或缺的成分,当人为筛选去除河鲀鱼中的呈味肽之后,会导致河鲀鱼的鲜味和浓厚感显著降低^[31]。有学者采用酶法提取从鲍鱼脏器中制备了呈味肽及呈味氨基酸^[32-33]。谢晓霞^[34]提取了文蛤和蓝蛤中的呈味肽,通过分子模拟手段与鲜味受体结合,表明文蛤蓝蛤中的鲜味肽可以作为天然鲜味剂。

表 2 5 种呈味肽
Table 2 Five kinds of flavorful peptides

呈味肽种类	化合物	作用
甜味肽	阿斯巴甜、阿力甜、纽甜	甜度高、热量低、易被人体吸收,是蔗糖的替代品
苦味肽	Gly-Leu、Phe-Leu、Leu-Lys、Arg-Leu	低浓度时可改善感官品质,同时具有降血压、降胆固醇等作用
酸味肽	Glu-γ-Gly、Glu-γ-Ala、Glu-γ-Glu	与鲜味肽密切相关,被看做是鲜味肽的一部分
咸味肽	Orn-Tau·HCl、Lys-Tau·HCl、Orn-Gly·HCl、Lys-Gly·HCl	可代替食用盐,减少钠盐食用
鲜味肽	Gly-Asp、Ala-Glu、Gly-Asp-Gly、Asp-Leu	增强风味特征

(3)核苷酸类物质

核苷酸及其衍生物是细胞中最为丰富的代谢物,对于提供细胞能量和细胞内信号传导起着重要作用。贝类中 ATP 的含量与新鲜度有关,影响其口感和风味。贝类组织中 ATP 降解途径有两种① $ATP \rightarrow ADP \rightarrow AMP \rightarrow IMP \rightarrow HxR \rightarrow Hx$; ② $ATP \rightarrow ADP \rightarrow AMP \rightarrow AdR \rightarrow HxR \rightarrow Hx$ ^[35]。不同贝类品种在核苷酸分解途径上存在差异,马氏珠母贝(*Pinctada martensi*)以上两种途径均存在,虾夷扇贝中的降解途径仅为 AdR 生成途径^[35]。IMP 被认为是贝类鲜味的主要成分,亦可通过与游离氨基酸的协同作用提升海产品的滋味。研究表明长牡蛎中 IMP 含量较高,中国蛤蜊和缢蛏中 AMP 含量较高,这也是贝类具有较高鲜味的原因^[36-37]。此外,鲜味氨基酸(Asp 和 Glu)、甜味氨基酸(Ser、Gly 和 Ala)与核苷酸之间的协同效应使水产品呈现强烈的鲜味,如采用味精当量值(EUC)来评价它们在牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)、波纹巴非蛤(*Paphia undulata*)中的鲜味协同效应,结果表明这 3 种贝类具有强烈的鲜味^[38]。

(4)甜菜碱

甜菜碱广泛分布在海洋无脊椎动物中,可以有效维持水产动物的细胞渗透压,对水产品的甜味有贡献^[15,39]。甜菜碱包括 β -丙氨酸甜菜碱、 γ -丁酸甜菜碱、肉毒碱、江珧碱、石勒足碱、龙虾肌碱、葫芦巴碱、水苏碱等^[40]。研究发现水产品中甜菜碱含量越高,甜味越明显。有学者研究了牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)和波纹巴非蛤(*Paphia undulata*),3 种贝类中的甜菜碱滋味活性值(taste activityvalue, TAV)值均大于 1,这说明甜菜碱对贝类甜味有直接的影响^[38]。

(5)冠羧碱

冠羧碱是无脊椎动物体内通过一种特定的 opine 脱氢酶(OpDHs)产生的物质,它是一组厌氧终产物的总称,在海洋软体动物中广泛存在。常见的包括章鱼碱、丙氨奥品、甘氨奥品、牛磺奥品及 β -丙氨奥品等^[40]。当海洋无脊椎动物处于缺氧状态时,通过 OpDHs 相关途径可调节缺氧条件下糖酵解胞质内氧化还原平衡,以应对缺氧条件下的能量代谢,这与脊椎动物在糖酵解过程中由乳酸脱氢酶介导生成乳酸相类似。如缺氧牡蛎心脏中有 30%的葡萄糖分解代谢生成丙氨奥品和甘氨奥品^[41]。除了牡蛎之外,不同贝类中 opine 化合物的种类不尽相同,扇贝中含有 D-strombine,而贻贝中含有 D-甘氨奥品和 meso-丙氨奥品^[42],鲍鱼肌肉中检测到丙氨奥品、赖氨奥品、甘氨奥品和牛磺奥品^[43],这些差异可能是造成不同贝类风味差异的来源。

(6)氧化三甲胺

氧化三甲胺(trimethylamine oxide, TMAO)一般存在于海洋动物中,头足类、甲壳类含量较高,贝类含量较低^[44]。当其达到一定含量时可作为鱼贝类的呈味物质,为鱼贝类

提供甜味,但由于其具有不稳定性,在贮存过程中易被还原成三甲胺(trimethylamine, TMA),TMA 是水产品腐败后产生氨臭味的主要原因^[22,45]。TMAO 在两种情况下易发生改变,一是热分解和还原性物质降解,生成二甲胺与甲醛^[46];二是在微生物作用下,通过氧化三甲胺还原酶的还原作用,最终变成三甲胺^[47]。由于二甲胺和三甲胺具有腐败味,因此可用来辨别水产品的的新鲜程度^[48]。值得注意的是,仅凭 TMA 或 TMAO 无法准确判断水产品的的新鲜度,可以用 TMA/TMAO 含量的比值作为新鲜度指标,该比值随着贮藏时间的增加逐渐上升,水产品新鲜度逐渐降低^[49]。

1.2.2 不含氮化合物

(1)有机酸

有机酸被认为是水产品的呈味物质之一^[4]。琥珀酸及其钠盐是文蛤的主要呈味成分和特征鲜味成分,即使在含量很少时其作用也很明显,在贝类水产品中含量甚多^[50-51]。蛤仔中含有反丁烯二酸、琥珀酸、苹果酸以及乳酸 4 种有机酸,牡蛎中含有丁二酸,其含量的减少会导致牡蛎肉美味度降低^[25]。有机酸随着时间的推移变化趋势各不相同,有学者在研究蛤仔有机酸时指出,反丁烯二酸在 1~6 mg% 的范围内增减,乳酸始终保持在 2~3 mg% 的固定值,苹果酸也在 10 h 后显示出减少的趋势,与此相反的是琥珀酸含量逐渐增加,甚至达到最初水平的 3 倍^[17]。pH 是肉类品质变化的重要评价指标,由于糖原发酵产生乳酸,ATP 降解,因此 pH 降低^[4]。如果牡蛎解冻时间较长,由于微生物分解以及酶分解的作用,其 pH 发生明显变化,因此,测量 pH 可以作为检测牡蛎品质变化的快捷手段^[52]。

(2)糖类

存在于贝类肌肉中的是游离糖、磷酸糖和多糖类,且糖类含量较高^[53]。游离糖主要是葡萄糖和核糖,由糖原分解而成,呈甜味,经烹饪加热生成特殊香味,这与蛋白质和氨基酸中氨基与还原糖的羰基的反应有关,即美拉德反应^[10]。贝类以糖原作为主要能量储藏,而鱼类的能量储藏物质除了糖原以外还包括脂质,因此贝类的糖原含量要高于鱼类^[20]。牡蛎肉质鲜美是由于糖类含量高,占其湿重的 4.02%,干重的 20.11%^[54],牡蛎中的糖类结构一般为葡萄糖^[55],文蛤(*Meretrix meretrix*)中的糖为葡萄糖和甘露糖^[51]。通过研究发现贝类多糖的中性糖和硫酸多糖的含量差异较大,例如等边浅蛤(*Gomphina aequilatera*)、脉红螺(*Rapana venos*)的中性糖含量高,而菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)、厚壳贻贝(*Mytilus coruscus* Gould)以及水泡蛾螺(*Buccinum pempigum*)中的硫酸多糖含量比较高^[56]。

(3)脂类

在水产动物生命代谢过程中,脂类有着重要的生理功能,可以维持细胞结构、正常生理功能;此外,脂类在营养代谢中也起着重要的作用。海水贝类的脂肪营养性高于淡水贝类^[57]。牡蛎中含有丰富的多不饱和脂肪酸,尤其是二

十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)和二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA), 约为牡蛎总脂肪酸的 1/4^[58]。在贮藏过程中, 贝类中的脂类容易发生氧化酸败, 产生臭味、酸味和涩味等不愉快气味, 从而降低贝类品质^[59]。

(4)无机盐

无机盐不仅是人类必需的营养元素, 也是动植物生命活动必需的要素, 无机盐作为水产品的呈味物质之一, 对水产品的风味口感也发挥了重要作用^[60]。贝类作为滤食性动物, 进食过程中可以将食物和环境中的无机盐富集到体内, 这些矿物质无机盐等在对贝类的颜色产生影响的同时也影响着贝类肌肉的风味。杨晋等^[51]通过研究文蛤的营养成分及其对风味的影响中指出贝类体内的无机盐离子如 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 PO_4^{3-} 的含量对水产品的呈味有着重要贡献, 这些无机物的存在能够使有机物质的呈味得到充分发挥。这些元素除了单独提供了呈味作用外, 还具有协同累积的趋势^[61]。水产品中无机盐含量受到产地和品种的影响较大^[62]。

2 贝类活品品质的研究

经济贝类以活品流通为主, 贝类在捕后流通过程中会经历温度、湿度、氧气、压力及光照度等环境因素的改变, 导致贝类存活率及品质受到影响。除了上述风味物质, 贝类的生化代谢水平以及生命活力状态也能够反映贝类的活品品质。随着贝类养殖产业的升级以及消费者品味的提高, 传统经验下的活力判别已无法满足人们对于高品质产品的追求, 也使海产品存在“活而不鲜”的问题。针对这一研究盲区, 本实验室团队先后提出了“鲜活品质”“易逝期锁鲜”等理念^[63-64], 在探究贝类原料品质上限的基础之上, 更可有针对性地制定贝类产品的锁鲜方案。

2.1 贝类生化代谢与活品品质

活品贝类流通过程中所受到的应激胁迫会导致体内生化代谢水平发生改变, 与能量代谢相关的指标可反映贝类的活力状态与活品品质。氨基酸和核苷酸等物质不仅作为贝类重要呈味成分而影响整体风味, 同时也参与了贝类能量代谢和渗透调节功能。此外, 通过计算 ATP 及其关联物的含量比例, 可反映水产品鲜度指标, 如 K 值^[65], 腺苷酸能荷(adenylate energy charge, AEC)^[66]等。杨文鸽等^[20]研究发现缢蛏(*Sinonovacula constricta*)在冰藏期间 K 值升高, 品质发生劣化; MAGUIRE 等^[67]研究发现大扇贝(*Pecten maximus*)在运输过程 AEC 值变低。磷酸精氨酸广泛存在于无脊椎动物肌肉中, 起着能量储藏和传递体的重要作用, 贝类中磷酸精氨酸的含量会因生物体剧烈运动受到环境刺激等因素发生变化, 可作为品质活力的指标, 如水产动物所受应激胁迫程度越大, 磷酸精氨酸消耗越大, 活品品质越差^[68]。贝类在低氧环境下体内发生糖酵解反应, 其代谢产物丙酮酸和乳酸使得肌肉 pH 降低, 也可反映贝类的鲜度品

质。如太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)在捕后贮藏过程中 pH 随着贮藏时间的延长不断降低^[69]; 菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)体腔液和肌肉的 pH 在高胁迫条件下也明显高于低胁迫条件^[70]。此外, 蛋白质、糖原和甘油三酯也可反映贝类代谢, 如太平洋牡蛎在干藏 96 h 后均有显著下降^[69]。贝类肌肉组织中的酶类的活性也与活品贝类的活力品质密切相关, 如郑尧等^[71]研究表明虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)中过氧化氢酶(catalase, CAT)活力很低, 溶菌酶(lysozyme, LSZ)未检出活力, 而酸性磷酸酶(acid phosphatase, ACP)及超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活力与扇贝所受胁迫强度均有相关性。周晏琳等^[72]研究结果显示虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)闭壳肌中 SOD 活性在干露条件下呈现上升趋势。此外, 通过活品贝类的代谢特征变化也可以反映活品品质, 如 TIAN 等^[73]通过探究捕后机械碰击对活品虾夷扇贝(*Mizuhopecten yessoensis*)的代谢影响表明碰击胁迫对活品扇贝的氨基酸代谢和合成产生干扰。XU 等^[74]采用超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法的代谢组学技术揭示了扇贝在捕后缺氧胁迫及复水环节中代谢物的变化规律, 并筛选了 13 个有显著变化的生物标志物。

2.2 贝类生命活力与活品品质

活品贝类的生命活力也可作为评价贝类品质的重要特性, 反映活品贝类的风味品质走势。WOLL 等^[75]研究了欧洲大扇贝(*Pecten maximus*)捕后供应链下的应激胁迫与死亡率, 结果显示高强度摔落的扇贝在第 1 d 死亡率达到了 46%。李亚烜等^[76]采用扇贝外套膜缩边情况和贝壳闭合响应时间来指示贝类活品品质, 研究结果显示胁迫强度与时间越长, 外套膜缩边程度越严重, 闭合响应时间也越久。此外, DUNCAN^[77]研究发现欧洲大扇贝(*Pecten maximus*)在 4~18.7℃的环境下心率与温度呈正相关, 且贝类在高温下心率失常; 贝类在空气中暴露 8 h 后氧气消耗仅为水中的 50%, 在 60 h 后呼吸速率下降至 25%~30%, 且血淋巴的 pH、氧分压(PO_2)以及体腔液 PO_2 均为下降趋势, 并呈现鳃组织损伤。以上研究均显示贝类在应激胁迫环境下活力状态受损, 导致活品品质变差。

3 贝类品质评价技术

3.1 感官评价技术

对于水产风味品质的检测, 最直观的方法就是感官评价, 一般由经过专业培训的感官评价小组来进行测试。杨婷婷等^[78]通过严格的感官评价流程, 建立了海藻味、土腥味、牛奶味、甜味、苦味、纤维感等感官词汇来描述扇贝(*Mizuhopecten yessoensis*), 并且通过此方法评价了扇贝贮藏早期主要表现为鲜味和甜味, 而后期呈现苦味。在人工检测的基础上, 逐渐有了电子鼻、电子舌等检测手段,

不仅使感官评价更加方便快捷,同时赋予了检测过程更为统一的标准。如生物电子鼻技术可以在冷藏2 d时识别出牡蛎(*Crassostrea gigas*)中的TMA成分,可实现贝类早期新鲜度的无损化检测^[79]。高慧^[80]采用感官评定和电子舌检测3种贝类不同提取物以及不同贝类间的呈味成分,结果表明3种贝肉的水提物鲜味强度均大于酶解提物,水提物鲜味强度为华贵栉孔扇贝(*Mimachlamys nobilis*)>皱肋文蛤(*Meretrix lyrata*)>香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*),且鲜味强度与其氨基酸和核苷酸的含量呈正相关。WANG等^[81]采用电子鼻和电子舌技术评价烹饪方式对扇贝(*Argopectens irradians*)感官特性的影响,结果显示油炸可以得到较好的风味产品,煮制可以最大程度保留扇贝的原始风味,且挥发性有机化合物和游离氨基酸及其在味觉和嗅觉中的相互作用对感官接受度很重要。

3.2 色谱-质谱技术

色谱-质谱技术在食品风味检测领域有着广泛的应用,包括气相色谱-质谱法与液相色谱-质谱法。色谱仪具有极强的分离能力,质谱仪对未知化合物具有独特的鉴别能力,且灵敏度极高,因此色谱-质谱法是分离提取和检测复杂化合物的最有力工具之一。如FRATINI^[82]采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)、蛤蜊(*Venerupis pullastra*)、牡蛎(*Ostrea edulis*)、竹蛏(*Ensis ensis*)、蛤(*Cerastoderma edule*)和鹅藤壶(*Pollicipes cornucopia*)6种大西洋贝类的挥发性成分,结果表明二十烷酸脂肪酸,特别是20:2 ω 6、20:3 ω 6和非甲基中脂肪酸的出现与特定醛的存在有关。林恒宗等^[11]基于气相色谱-质谱法(gas chromatograph-mass spectrometry, GC-MS)鉴别活体太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)不同流通阶段气味特征变化,结果显示活体太平洋牡蛎组织中共鉴定出51种挥发性风味物质,主要由醛类、酮类、酯类、烃类、醇类、含氮含硫杂环类化合物构成。另有学者利用离子迁移谱结合气相色谱法分析了不同养殖地区香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)的挥发性物质,发现(*E,Z*)-2,6-壬二烯醛可显著影响程村蚝、钦州大蚝和湛江蚝的气味,1-辛烯-3-酮可显著影响汕头蚝的气味^[83]。此外,液相色谱-质谱法在水产品品质检测方面有很重要的作用,刘斌^[84]采用高效液相色谱-质谱法对腹足纲和双壳纲贝类的酸性多糖进行检测和分析,结果显示酸性多糖在贝类中广泛存在,同时采样时间和产地对贝类的多糖含量和种类有一定影响。赵艳芳等^[85]利用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法检测海产贝类中无机铅离子,结果表明该方法可以准确科学的平价水产品及其制品的质量安全。

3.3 代谢组学技术

代谢组学技术通过分析生物体内小分子代谢物的变化情况,反映出代谢应答信息,得出代谢物的变化规律。将代谢组学技术用于水产风味品质的研究,可从代谢物层

面揭示水产品品质变化的分子机制,同时有助于寻找用于指示水产鲜度变化的生物标志物。如FANG等^[86]分析了带鱼(*Trichiurus haumela*)在冷冻贮藏期间肌肉的脂质谱变化,共检测到1223种脂类,包括261种甘油三酯、251种磷脂酰胆碱、153种磷脂酰乙醇胺和66种甘油二酯,带鱼在冷冻过程中有153个差异脂类发生上调,有67个脂类发生下调。此外,代谢组学技术还可通过对活品代谢特征的描述以评价其鲜活品质变化情况。如TIAN等^[73]基于高效液相色谱-质谱法的代谢组学研究机械碰击对活品扇贝(*Patinopecten yessoensis*)的代谢影响,表明捕后早期的碰击胁迫会对活品扇贝的氨基酸代谢和合成产生干扰。XU等^[74]利用代谢组学方法研究活品扇贝(*Patinopecten yessoensis*)捕后干露胁迫下的代谢特征,发现有34个代谢物发生变化,涉及磷酸戊糖途、乙醛酸和二羧酸代谢、不饱和脂肪酸生物合成等;复水处置后有13个差异代谢物发生回调,表明捕后早期的干露胁迫不会造成活扇贝不可逆的损伤。CHEN等^[87]利用代谢组学技术研究了活体扇贝(*Chlamys farreri*)保藏过程中生理情况的变化,发现了活体扇贝受到低氧胁迫时代谢模式从乳酸作为终产物的通路切换为琥珀酸,同时生物标志物水平的变化也反映了渗透调节系统紊乱以及氧化损伤。毕诗杰^[88]采用代谢组技术研究太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)在净化及无水保活过程中的代谢组变化,共鉴定出58种差异代谢物,主要为氨基酸、有机酸和脂肪酸,起主要作用的代谢途径有8条,该研究揭示了太平洋牡蛎在净化和无水保活过程中的风味品质变化的关键代谢物和代谢通路。以上研究均表明代谢组学可作为揭示活品贝类新鲜品质变化的新策略。

3.4 风味指纹图谱技术

指纹图谱是指某些复杂物质经适当处理后,采用一定的分析手段,得到的能够标示其化学特征的色谱图或光谱图。近些年来风味指纹图谱的发展为食品风味物质的研究提供了新的视角。风味指纹图谱可以直观地表征食物中不同香气成分物质含量的图表。同一物种,由于其产地、生产工艺等因素的不同,其香气成分的种类和含量也会不同,因此其香气指纹图谱也会存在差异。傅润泽等^[89]通过建立鲜活虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)保活流通过程中电子鼻气味指纹图谱,得到的不同气味指纹图谱可以对活品虾夷扇贝的保活状态进行评价。孙建民等^[90]对大连獐子岛、山东青岛以及澳洲等3个产地的鲍鱼进行了高效液相色谱指纹图谱比对,发现鲍鱼中13个共有峰的含量有极为明显的差异,说明3种鲍鱼由于生存海域环境不同而导致主要成分含量差别很大。崔明仙等^[14]建立了海湾扇贝(*Argopecten irradians*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)闭壳肌的挥发性风味物质指纹图谱,结果表明3种贝类在新鲜状态下共定性出27种挥发

性风味物质, 加热情况下中共定性出 52 种物质, 说明指纹图谱可在新鲜状态和加热状态下有效区分 3 种扇贝闭壳肌组织。陈李品等^[91]采用超高液相色谱-四极杆飞行时间质谱法分析了活品太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)清洗、净化和无水保活 3 个阶段的内源肽变化, 结果分别筛选出 3、10、8 条潜在多肽标志物, 为活品贝类流通过程中的品质检测提供了依据。

4 结束语

贝类在运输贮藏过程中的风味变化是复杂的, 决定贝类风味品质的因素也是多方面的。除了针对风味物质中气味和呈味物质的挖掘, 探究贝类的生命状态与活品品质之间的关联也可阐明贝类品质变化机制。同时, 代谢组学、风味指纹图谱等新兴技术的运用也为探究贝类风味品质打开新的视角。随着检测技术的进步以及新理念、新方法的提出, 贝类风味品质机制的研究有着广阔的发展前景, 可为我国贝类产业升级提供科学理论支撑。

参考文献

- FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022. Towards blue transformation [R]. Rome, FAO, 2022.
- 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022. Ministry of Agriculture and Rural Fisheries Administration, National Fisheries Technology extension Station, Chinese Fisheries society compiled. China fishery statistical yearbook-2022 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- 郝恩瑞, 柴春祥. 贝类生物保鲜技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6361–6368. HAO ENR, CHAI CX. Research progress of biological preservation technology of shellfish [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(19): 6361–6368.
- 莫意平, 姜永江, 薛长湖. 水产品风味研究综述[J]. 水生态学杂志, 2005, 25(1): 82–84. MO YP, LOU YJ, XUE CH. Review on the research of aquatic product flavor [J]. J Contam Hydrol, 2005, 25(1): 82–84.
- 刘佳, 陆宝庭, 肖淑玉. 四种海洋贝类肌肉中风味物质的分析与评价[J]. 环境与健康杂志, 2008, (7): 633–634. LIU J, LU BT, XIAO SY. Analysis and evaluation of flavor substances in muscle of four Marine shellfish [J]. J Environ Health, 2008, (7): 633–634.
- 祝亚辉, 曹文红, 刘忠嘉, 等. 热加工处理对华贵栉孔扇贝柱特征风味形成的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 131–138. ZHU YH, CAO WH, LIU ZJ, et al. Effect of hot processing on characteristic flavor formation of *Chlamys farreri* columns [J]. Food Sci, 2017, 38(20): 131–138.
- 王晓谦, 秦小明, 郑惠娜, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 法的超高压处理牡蛎肉中挥发性成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(5): 160–166. WANG XQ, QIN XM, ZHENG HN, et al. Analysis of volatile components in *Oyster* meat treated by ultra-high pressure method based on HS-SPME-GC-MS [J]. Food Ferment Ind, 2015, 41(5): 160–166.
- JOSEPHSON BD, LINDSAY CR, STUIBER AD. Volatile compounds characterizing the aroma of fresh atlantic and pacific oysters [J]. J Food Sci, 1985, 50(1): 5–9.
- MORITA K, KUBOTA K, AISHIMA T. Investigating sensory characteristics and volatile components in boiled scallop aroma using chemometric techniques [J]. Food Chem, 2002, 78(1): 39–45.
- 袁林, 查锋超, 姚焯, 等. 牡蛎酶解产物与还原糖美拉德反应工艺优化及挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2015, 36(24): 1–9. YUAN L, ZHA FC, YAO Y, et al. Optimization of Maillard reaction process and analysis of volatile flavor substances in *Oyster* [J]. Food Sci, 2015, 36(24): 1–9.
- 林恒宗, 梁志源, 秦小明, 等. 基于 GC-MS 鉴别活体太平洋牡蛎不同流通阶段气味特征变化[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 279–287. LIN HZ, LIANG ZY, QIN XM, et al. Identification of odor characteristics of living Pacific oysters at different circulation stages based on GC-MS [J]. Food Sci, 2023, 44(2): 279–287.
- HOUCKE VJ, MEDINA I, LINSSEN J, et al. Biochemical and volatile organic compound profile of European flat oyster (*Ostrea edulis*) and pacific cupped oyster (*Crassostrea gigas*) cultivated in the Eastern Scheldt and Lake Grevelingen, the Netherlands [J]. Food Control, 2016, 68: 200–207.
- 刘文, 张悦容, 张腾军, 等. 牡蛎体液风味物质的 GC-MS 分析[J]. 核农学报, 2013, (1): 81–87. LIU W, ZHANG YR, ZHANG TJ, et al. Analysis of body fluid flavor substances in oyster by GC-MS [J]. J Nucl Agric Sci, 2013, (1): 81–87.
- 崔明仙, 李妍, 付晴晴, 等. 三种扇贝挥发性风味物质指纹图谱分析[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(3): 743–758. CUI MX, LI Y, FU QQ, et al. Analysis on the fingerprint of volatile flavor substances of three scallops [J]. Oceanol Limnol Sin, 2022, 53(3): 743–758.
- 傅润泽, 沈建, 王锡昌. 底播虾夷扇贝活品流通前后挥发性成分的对比如分析[J]. 食品科学, 2015, 36(2): 110–113. FU RZ, SHEN J, WANG XC. Comparative analysis of volatile components in live products of bottom sown *Scallops* before and after circulation [J]. J Food Sci, 2015, 36(2): 110–113.
- 苏健. 广西北部湾主要贝类食用品质及其冻藏变化的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011. SU J. Study on the edible quality and frozen storage changes of main shellfish in Beibu gulf of Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2011.
- 沈丽, 张丽君, 许柏球. 不同解冻时间对冰鲜牡蛎挥发性风味物质的影响[J]. 肉类研究, 2012, 26(3): 5–8. SHEN L, ZHANG LJ, XU BQ. Effects of different thawing time on volatile flavor compounds of frozen oysters [J]. Meat Res, 2012, 26(3): 5–8.
- 黄健, 王霞, 侯云丹, 等. 加热温度对牡蛎挥发性风味成分的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 311–317. HUANG J, WANG X, HOU YD, et al. Effect of heating temperature on volatile flavor components of *Oyster* [J]. J Nucl Agric Sci, 2012, 26(2): 311–317.
- 贡慧, 杨震, 刘梦, 等. 秋刀鱼热加工后挥发性风味成分变化的分析[J]. 肉类研究, 2017, 31(1): 25–31. GONG H, YANG Z, LIU M, et al. Analysis on changes of volatile flavor components of autumn knife fish after hot processing [J]. Meat Res, 2017, 31(1): 25–31.
- 杨文鸽, 徐大伦, 孙翠玲, 等. 缢蛏冰藏保活期间呈味物质的变化[J]. 中国食品学报, 2009, 9(3): 181–186.

- YANG WG, XU DL, SUN CL, *et al.* Changes of taste substances during storage of *sinonovacula constricta* [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2009, 9(3): 181–186.
- [21] 李明德. 渤海6种贝类的氨基酸及重金属含量[J]. 河北渔业, 1995, (1): 8–10.
- LI MD. Amino acid and heavy metal contents of 6 species of shellfish in Bohai Sea [J]. Hebei Fish, 1995, (1): 8–10.
- [22] 邓捷春, 王锡昌, 刘源. 鱼肉风味研究进展[J]. 食品工业科技, 2010, 31(6): 375–378, 383.
- DENG JC, WANG XC, LIU Y. Research progress of fish flavor [J]. Sci Technol Food Ind, 2010, 31(6): 375–378, 383.
- [23] JI CL, WU HF, WEI L, *et al.* Proteomic and metabolomic analysis reveal gender-specific responses of mussel *Mytilus galloprovincialis* to 2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether (BDE 47) [J]. Aquat Toxicol, 2013, 140–141: 449–457.
- [24] 张苏平, 邱伟强, 卢祺, 等. 全自动氨基酸分析仪法测定4种贝类肌肉中谷胱甘肽和游离氨基酸含量[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 170–176.
- ZANG SP, QIU WQ, LU Q, *et al.* Determination of glutathione and free amino acid content in muscle of 4 kinds of shellfish by automatic amino acid analyzer [J]. Food Sci, 2017, 38(4): 170–176.
- [25] CONG XH, WANG Q, SUN C, *et al.* Temperature effects on the nutritional quality in Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) during ultraviolet depuration [J]. J Sci Food Agric, 2021, 102(4): 1651–1659.
- [26] 刘亚, 蓝玉雪. 不同煮制时间的近江牡蛎煮制液的风味分析与评价[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(3): 83–88.
- LIU Y, LAN YX. Analysis and evaluation of flavor of boiled liquid of Jinjiang Oyster with different cooking time [J]. Food Ferment Ind, 2013, 39(3): 83–88.
- [27] FADDA S, LOPEZ C, VIGNOLO G. Role of lactic acid bacteria during meat conditioning and fermentation: Peptides generated as sensorial and hygienic biomarkers [J]. Meat Sci, 2010, 86(1): 66–79.
- [28] 张波. 呈味肽研究技术进展[J]. 现代食品, 2020, (4): 61–63.
- ZHANG B. Progress of research technology of Chengwei peptide [J]. Mod Food, 2020, (4): 61–63.
- [29] DUNKEL A, KOESTER J, HOFMANN T. Molecular and sensory characterization of gamma-glutamyl peptides as key contributors to the Kokumi taste of edible beans (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(16): 6712–6719.
- [30] YOICHI UEDA, MAKOTO SAKAGUCHI, KAZUO HIRAYAMA, *et al.* Characteristic flavor constituents in water extract of garlic [J]. Agric Biol Chem, 1990, 54(1): 163–169.
- [31] 张宁龙. 养殖河鲢鱼特征性滋味组分及呈味肽的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- ZHANG NL. Study on characteristic flavor components and flavor peptides of cultured river fish [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [32] 王莅莎, 朱蓓薇, 周大勇, 等. 鲍鱼脏器多糖的抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2008, 24(4): 65–68.
- WANG LS, ZHU BW, ZHOU DY, *et al.* Study on antioxidant activity of polysaccharides from abalone organs [J]. Food Mach, 2008, 24(4): 65–68.
- [33] 乔路, 佟伟刚, 周大勇, 等. 酶法制备鲍鱼脏器呈味肽及呈味氨基酸[J]. 大连工业大学学报, 2011, 30(3): 5.
- QIAO L, TONG WG, ZHOU DY, *et al.* Enzymatic preparation of favorable peptides and favorable amino acids from abalone organs [J]. J Dalian Polytech Univ, 2011, 30(3): 5.
- [34] 谢晓霞. 文蛤与蓝蛤鲜味肽的呈味特性及其与鲜味受体 T1R1/T1R3 的分子作用研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019.
- XIE XX. Study on taste characteristics of umami peptides of *Clavicularia* and *Clavicularia* and their molecular interaction with umami receptor T1R1/T1R3 [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [35] 王丹妮, 邱伟强, 陈舜胜, 等. 冷藏条件下缢蛏、文蛤 ATP 关联产物的变化及降解途径的探究[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(9): 228–233.
- WANG DN, QIU WQ, CHEN SS, *et al.* Study on the changes and degradation pathways of ATP-associated products of *Sinonovacula constricta* and *Sinonovacula constricta* under cold storage [J]. Food Ferment Ind, 2016, 42(9): 228–233.
- [36] 李太武, 林叶, 苏秀榕. 不同群体缢蛏营养成分的多元性分析[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 548–551.
- LI TW, LIN Y, SU XR. Analysis of nutrient diversity in different populations of *Sinonovacula constricta* [J]. Food Sci, 2008, 29(11): 548–551.
- [37] 刘云, 宫向红, 徐英江, 等. 烟台近海3种贝类中呈味核苷酸和氨基酸的测定及比较分析[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 351–360.
- LIU Y, GONG XH, XU YJ, *et al.* Determination and comparative analysis of favorable nucleotides and amino acids in three shellfish from Yantai [J]. J Fish Sci China, 2014, 21(2): 351–360.
- [38] 陈德慰, 苏键, 刘小玲, 等. 广西北部湾3种贝类中主要呈味物质的测定及呈味作用评价[J]. 食品科学, 2012, 33(10): 165–168.
- CHEN DW, SU J, LIU XL, *et al.* Determination of main flavoring substances and evaluation of flavoring effects in three shellfish from Beibu Gulf of Guangxi [J]. Food Sci, 2012, 33(10): 165–168.
- [39] VOOYS CGND, GEENEVASSEN JAJ. Biosynthesis and role in osmoregulation of glycine-betaine in the *Mediterranean* mussel *Mytilus galloprovincialis* LMK. [J]. Comp Biochem Physiol Part B, 2002, 132(2): 409–414.
- [40] 章超桦, 薛长湖. 全国高等农林院校教材经典系列 水产食品学 第3版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- ZHANG CH, XUE CH. National higher agriculture and forestry colleges textbook classic series aquatic food science 3rd edition [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018.
- [41] FIELDS JHA, ENG AK, RAMSDEN WD, *et al.* Alanopine and strombine are novel imino acids produced by a dehydrogenase found in the adductor muscle of the oyster, *Crassostrea gigas* [J]. Arch Biochem Biophys, 1980, 201(1): 110–114.
- [42] FIORE GB, NICCHITTA CV, ELLINGTON WR. High-performance liquid chromatographic separation and quantification of alanopine and strombine in crude tissue extracts [J]. Anal Biochem, 1984, 139(2): 413–417.
- [43] VENTER L, RENSBURG P, DU TL, *et al.* From untargeted LC-QTOF analysis to characterisation of opines in abalone adductor muscle: Theory meets practice [J]. J Chromatogr B, 2017, 1071: 44–48.
- [44] 姜城子, 崔洁, 周苗苗, 等. 青岛地区部分水产品中氧化三甲胺含量的测定[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(1): 41–46.
- JANG CZ, CUI J, ZHOU MM, *et al.* Determination of trimethylamine oxide in some aquatic products in Qingdao [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(1): 41–46.
- [45] 张晨雪, 韩颖颖, 王晓. 鲛鱼贮藏过程中的品质变化和货架期预测[J]. 食品与发酵科技, 2016, 52(2): 101–105, 110.
- ZHANG CX, HAN YY, WANG X. Quality change and shelf-life prediction of Spanish mackerel during storage [J]. Food Ferment Sci

- Technol, 2016, 52(2): 101–105, 110.
- [46] 辛学倩. 秘鲁鱿鱼丝甲醛含量控制及工艺改进研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- XIN XQ. Research on formaldehyde content control and process improvement of Peruvian squid fillet [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [47] 宋丹阳, 周德庆, 杜永芳, 等. 氧化三甲胺酶研究进展[J]. 食品科学, 2007, 28(1): 350–353.
- SONG DY, ZHOU DQ, DU YF, *et al.* Research progress of trimethylaminase oxide [J]. J Food Sci, 2007, 28(1): 350–353.
- [48] 付雪媛, 刘丰海, 姜城子, 等. 高效液相色谱-质谱联用检测水产品中氧化三甲胺[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(1): 269–275.
- FU XY, LIU FH, JIANG CZ, *et al.* Determination of trimethylamine oxide in aquatic products by high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(1): 269–275.
- [49] 胡金鑫, 李军生, 闫柳娟, 等. 通过三甲胺/氧化三甲胺摩尔比值评价南美白对虾的新鲜程度[J]. 现代食品科技, 2013, 10(29): 2492–2497.
- HU JX, LI JS, YAN LJ, *et al.* Evaluation of freshness of white shrimp by molar ratio of trimethylamine to trimethylamine oxide [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, 10(29): 2492–2497.
- [50] 何炘, 杨荣华. 鲜味物质及其在水产调味品中的应用[J]. 中国调味品, 2005, (4): 3–8, 37.
- HE X, YANG RH. Umami substances and their application in aquatic condiments [J]. Chin Cond, 2005, (4): 3–8, 37.
- [51] 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, (5): 45–47.
- YANG J, TAO NP, WANG XC. The nutrient composition and its effect on flavor of Clam [J]. Food Nutr China, 2007, (5): 45–47.
- [52] 牛改改, 秦成丰, 游刚, 等. 解冻方式对近江牡蛎肉感官特征和理化指标的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 271–278.
- NIU GG, QIN CF, YOU G, *et al.* Effects of thawing method *Ostrea rivularis* Gould on sensory characteristics and physicochemical indexes [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 9(16): 271–278.
- [53] 杨文鸽. 几种海水养殖鱼贝类低温贮藏生化特性的变化及其鲜度评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- YANG WG. Changes of biochemical characteristics and freshness evaluation of several mariculture fish and shellfish in low temperature storage [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [54] 张洁. 牡蛎制品的研发及其生物活性评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- ZHANG J. Development and bioactivity evaluation of oyster products [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [55] 刘志芳, 赵前程, 刘志东, 等. 贝类多糖研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 299–306.
- LIU ZF, ZAO QC, LIU ZD, *et al.* Research progress of shellfish polysaccharides [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(9): 299–306.
- [56] 曹九零. 20 种海洋贝类中多糖成分的分析[D]. 大连: 大连工业大学, 2015.
- CAO JL. Analysis of polysaccharides in 20 Marine shellfish [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2015.
- [57] 李闯兵, 孙立春, 刘承初, 等. 几种海水和淡水贝类的大宗营养成分比较研究[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(2): 297–303.
- LI YB, SUN LC, LIU CC, *et al.* Comparative study on bulk nutrients of several marine and freshwater shellfish [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2012, 21(2): 297–303.
- [58] 焦莉, 孙丽华, 王勇, 等. 水产动物脂类营养研究进展[J]. 广东饲料, 2020, 29(6): 38–43.
- JIAO L, SUN LH, WANG Y, *et al.* Research progress of aquatic lipid nutrition [J]. Guangdong Feed, 2020, 29(6): 38–43.
- [59] 劳邦盛, 盛国英. 牡蛎中脂肪酸在储藏过程中的稳定性[J]. 色谱, 2000, 18(4): 340–342.
- LAO BS, SHENG GY. Stability of fatty acids in oyster during storage [J]. Chin J Chromatogr, 2000, 18(4): 340–342.
- [60] 金蕾, 徐善良, 邱成功, 等. 三疣梭子蟹肌肉组织中甜菜碱、糖原及无机盐变化研究[J]. 生物学杂志, 2014, 31(4): 24–28.
- JIN L, XU SL, QIU CG, *et al.* Changes of betaine, glycogen and inorganic salts in muscle tissue of *Portulus trisulatus* [J]. China J Biol, 2014, 31(4): 24–28.
- [61] 张善发, 贺承章, 李俊辉, 等. 马氏珠母贝金黄壳色选育群体与养殖群体不同组织中矿物质元素的分析与评价[J]. 海洋通报, 2020, 39(3): 357–362.
- ZHANG SF, HE CZ, LI JH, *et al.* Analysis and evaluation of mineral elements in different tissues of Golden Shell color breeding population and breeding population [J]. Mar Sci Bull (Chin Ed), 2020, 39(3): 357–362.
- [62] 潘晓东, 汤盛, 黄百芬, 等. 浙江省部分海产品中 8 种矿物质含量[J]. 卫生研究, 2020, 49(6): 998–1001, 1013.
- PAN XD, TANG J, HUANG BF, *et al.* Content of 8 kinds of mineral in some seafood from Zhejiang Province [J]. J Hyg Res, 2020, 49(6): 998–1001, 1013.
- [63] 赵前, 周进, 刘俊荣, 等. 水产品鲜活品质评价体系研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(4): 706–716.
- ZHAO Q, ZHOU J, LIU JR, *et al.* Research progress of fresh quality evaluation system of aquatic products [J]. J Dalian Ocean Univ, 2021, 36(4): 706–716.
- [64] 周进, 赵前, 刘俊荣, 等. 鱼贝类鲜活品质调控机制研究进展[J]. 水产科学, 2022, 41(2): 316–324.
- ZHOU J, ZHAO Q, LIU JR, *et al.* Research progress on regulation mechanism of fresh quality of fish and shellfish [J]. Fish Sci, 2022, 41(2): 316–324.
- [65] 陈胜军, 张晓凡, 潘创, 等. 水产品品质评价研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(6): 53–59.
- CHEN SJ, ZHANG XF, PAN C, *et al.* Research progress of aquatic product quality evaluation [J]. Meat Res, 2022, 36(6): 53–59.
- [66] ATKINSON DE. The energy charge of the adenylate pool as a regulatory parameter. Interaction with feedback modifiers [J]. Biochemistry, 1968, 7(11): 4030–4034.
- [67] MAGUIRE JA, CASHMORE D, BURNELL GM. The effect of transportation on the juvenile scallop *Pecten maximus* (L.) [J]. Aquacult Res, 1999, 30(5): 325–333.
- [68] 肖涛, 王维娜. 海洋无脊椎动物体内能量物质——磷酸精氨酸的研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2006, (2): 96–103.
- XIAO T, WANG WN. Research progress of arginine phosphate, an energy substance in Marine invertebrates [J]. Transc Oceanol Limnol, 2006, (2): 96–103.
- [69] 徐美禄, 冷寒冰, 李亚烜, 等. 捕后干藏-复水处理对太平洋牡蛎活品贮藏稳定性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(6): 828–833.
- XU ML, LENG HB, LI YX, *et al.* Effects of dry storage and rewater treatment on storage stability of Pacific oyster [J]. J Dalian Ocean Univ, 2019, 34(6): 828–833.

- [70] 刘慧慧, 周晏琳, 张晴, 等. 菲律宾蛤仔捕后干露处置对其复水湿藏稳定性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(2): 244–250.
LIU HH, ZHOU YL, ZHANG Q, *et al.* Effect of dry dew treatment on rehydration and wet storage stability of Philippine clam [J]. J Dalian Ocean Univ, 2018, 33(2): 244–250.
- [71] 郑尧, 刘俊荣, 周晏琳, 等. 捕后虾夷扇贝闭壳肌免疫因子与活品品质评价初探[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(2): 217–223.
ZHENG Y, LIU JR, ZHOU YL, *et al.* Preliminary study on the immune factors of closed shell muscle and the quality evaluation of living products of Scallops japonica after capture [J]. J Dalian Ocean Univ, 2017, 32(2): 217–223.
- [72] 周晏琳, 郑尧, 刘慧慧, 等. 干露对活品虾夷扇贝闭壳肌 SOD 酶活性及其性质的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(5): 651–657.
ZHOU YL, ZHENG Y, LIU HH, *et al.* Effects of dry dew on the activity and properties of SOD in the closed shell muscle of live shrimp scallops [J]. J Dalian Ocean Univ, 2018, 33(5): 651–657.
- [73] TIAN YY, XU TCY, LI YX, *et al.* An untargeted LC-MS metabolomics approach to the metabolic profiles of bottom cultured scallops (*Mizuhopecten yessoensis*) subjected to mechanical shock in early post-harvest handling [J]. Aquaculture, 2021, 533: 736061.
- [74] XU TY, LI YX, TIAN YY, *et al.* Effects of post-harvest hypoxic stress on post-landing recovery of live scallops (*Mizuhopecten yessoensis*) revealed by untargeted metabolomics based on UPLC-Q-TOF-MS [J]. Food Control, 2021, 123: 107671.
- [75] WOLL KA, BAKKE S. Stress and mortality in the supply chain of live scallops *Pecten maximus* L., from scuba diver to market [J]. Aquacult Res, 2017, 48(2): 594–607.
- [76] 李亚恒, 刘俊荣, 刘洋, 等. 易逝期胁迫强度对虾夷扇贝活力可恢复性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(5): 733–740.
LI YX, LIU JR, LIU Y, *et al.* Effects of stress intensity during perishable period on resilience of Scallop vigor [J]. J Dalian Ocean Univ, 2020, 35(5): 733–740.
- [77] DUNCAN PF. Post-harvest physiology of the scallop *Pecten maximus* (L.) [Z]. 1993.
- [78] 杨婷婷, 刘俊荣, 沈建, 等. 活品底播虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*) 感官评价描述词的建立[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 16–22.
YANG TT, LIU JR, SHEN J, *et al.* Establishment of sensory evaluation descriptors for *Patinopecten yessoensis* [J]. J Food Sci, 2014, 35(19): 16–22.
- [79] LEE KM, SON M, KANG JH, *et al.* A triangle study of human, instrument and bioelectronic nose for non-destructive sensing of seafood freshness [J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 547.
- [80] 高慧. 三种贝类提取物呈味特性的比较研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022.
GAO H. Comparative study on flavor characteristics of extracts of three shellfish [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022.
- [81] WANG YY, TIAN GF, MAO KM, *et al.* Effects of four cooking methods on flavor and sensory characteristics of scallop muscle [J]. Front Nutr, 2022, 9: 1–14.
- [82] FRATINI G, LOIS S, PAZOS M, *et al.* Volatile profile of Atlantic shellfish species by HS-SPME GC/MS [J]. Food Res Int, 2012, 48(2): 856–865.
- [83] 黄艳球, 杨发明, 秦小明, 等. 不同养殖区香港牡蛎的化学组成及特征气味成分分析[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 236–242.
HUANG YQ, YANG FM, QIN XM, *et al.* Analysis of chemical composition and characteristic odor components of Hong Kong oysters in different culture areas [J]. J Food Sci, 2019, 40(14): 236–242.
- [84] 刘斌. HPLC-MS 技术对贝类酸性多糖的检测与分析[D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
LIU B. Detection and analysis of acidic polysaccharides in shellfish by HPLC-MS [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- [85] 赵艳芳, 翟毓秀, 尚德荣, 等. HPLC-ICP-MS 联用技术检测海产贝类中无机铅离子的方法: 中国, CN201811365007.8[P]. 2023-12-01.
ZHAO YF, ZHAI YX, SHANG DR, *et al.* Determination of inorganic lead ions in marine shellfish by HPLC-ICP-MS: China, CN201811365007.8 [P]. 2023-12-01.
- [86] FANG CD, CHEN HS, YAN HB, *et al.* Investigation of the changes in the lipid profiles in hairtail (*Trichiurus haumela*) muscle during frozen storage using chemical and LC/MS-based lipidomics analysis [J]. Food Chem, 2022, 390: 133–140.
- [87] CHEN SQ, ZHANG CH, XIONG YF, *et al.* A GC-MS-based metabolomics investigation on scallop (*Chlamys farreri*) during semi-anhydrous living-preservation [J]. Innovative Food Sci. Emerging Technol, 2015, 31: 185–195.
- [88] 毕诗杰. 太平洋牡蛎在保鲜保活过程中品质变化及其机理的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
BI SJ. Study on quality change and mechanism of pacific Oyster during fresh-keeping process [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2022.
- [89] 傅润泽, 王锡昌, 沈建, 等. 鲜活虾夷扇贝保活流通过程中电子鼻气味指纹图谱的建立[C]// 2015 年中国水产学会学术年会论文摘要集. 2015.
FU RZ, WANG XC, SHEN J, *et al.* Establishment of electronic nose odor fingerprint of Live shrimp scallops in the process of alive circulation [C]// 2015 Chinese Fisheries Society Academic Annual Meeting Abstract collection. 2015.
- [90] 孙建民, 贾亮亮, 马勇, 等. 不同产地鲍鱼的 HPLC 指纹图谱[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2010, 30(6): 676–681.
SUN JM, JIA LL, MA Y, *et al.* HPLC fingerprinting of abalone from different origin [J]. J Hebei Univ (Nat Sci Ed), 2010, 30(6): 676–681.
- [91] 陈李品, 张晓梅, 胡玲萍, 等. 太平洋牡蛎在活品流通过程中的质谱-肽组学分析[J]. 分析化学, 2019, 47(12): 1893–1900.
CHEN LP, ZHANG XM, HU LP, *et al.* Mass spectrometry-peptidomic analysis of pacific oyster during live circulation [J]. Chin J Anal Chem, 2019, 47(12): 1893–1900.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



朱丹妮, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工与储藏。

E-mail: zhudanni0210@163.com



徐晏烨, 博士, 讲师, 主要研究方向为水产品保活保鲜及品质调控。

E-mail: xutanyee1199@126.com