

贝类腥味物质及形成机理研究进展

石林凡^{1,2}, 李周茹¹, 任中阳¹, 刘光明¹, 翁武银^{1,2,3*}

¹集美大学食品与生物工程学院 福建厦门 361021

²海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心 辽宁大连 116034

³厦门市海洋功能食品重点实验室 福建厦门 361021)

摘要 贝类加工制品不仅味道鲜美,而且具有较高的营养价值,深受消费者的喜爱。然而,贝类及其制品的腥味也会影响产品的口感和销售。深入了解腥味物质的形成及其调控,在一定程度上可促进贝类加工产业的发展。本文综述近年来贝类中主要腥味物质种类及其形成机理的研究进展,旨在为水产食品中腥味物质的调控及风味品质改善提供理论参考,对创新和丰富水产品加工基础理论具有重要意义。

关键词 贝类; 腥味物质; 形成机理

文章编号 1009-7848(2023)03-0406-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.03.040

贝类是我国水产食物供应的重要组成部分,2020 年全国贝类总产量高达 1 552.04 万 t,占全国水产品总产量的 24.57%^[1]。贝类主要分为牡蛎、鲍、螺、蚶、贻贝、江珧、扇贝、蛤、蛏、河蚌及蚬等几大类^[2]。贝类含有丰富的必需氨基酸、牛磺酸、多不饱和脂肪酸,对人类生长发育、冠心病、酒精性肝损伤等疾病预防和保护均有显著的积极影响^[3-4]。由于贝类营养价值极高且具有保健作用,因此贝类干制品、罐头制品、调味品、饮料^[5]、蛋白粉^[6]等一系列产品不断被研发并投入市场。作为一种新兴的保健产品,贝类生物活性肽具有抗病毒、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、抗糖尿病、保护心脏、免疫调节和保护神经活性等功效^[3]。

然而,贝类及其制品具有浓重的腥味,极易因处理或贮藏不当而导致腥味加重。贝类的不良风味逐渐成为影响消费者可接受程度和制约行业发展的一个重要因素。Christenson 等^[7]指出贝类等水产品的感官品质(如气味、口感及质地等)是影响人们消费的主要原因之一。深入探讨贝类腥味物质的形成机制已成为水产品高值化应用的研究热

点之一。本文概述近年来贝类中主要腥味物质种类及其形成机理,旨在为水产功能性食品中腥味物质的调控及风味品质改善提供理论参考,对促进海洋功能性食品产业的发展具有重要意义。

1 贝类中主要腥味物质

腥味狭义上仅指鱼腥味,而在实际研究中泛指水产食品中不良风味的总和,是一种复杂的混合性气味^[8]。腥味并非由单一物质形成,而是多种化合物相互作用的结果。其中,己醛、庚醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛等醛类物质的阈值较低且呈现鱼腥、青草味等刺激性气味,是贝类腥味的主要来源之一。1-辛烯-3-醇等醇类物质是贝类中类似泥土或金属味的主要来源,酮类物质对贝类中挥发性风味起协助或增强作用,三甲胺等含氮化合物及二甲基硫醚等含硫化合物是水产品腐臭气味产生的主要来源。随着贮藏时间的延长,贝类中 1-辛烯-3-醇^[9]、2-壬酮^[9]、三甲胺^[10]、二甲基硫化物^[11]等腥味物质不断增加并逐渐占据主导地位,呈现鱼腥味、硫臭味及金属味等不良风味。目前,贝类中主要腥味物质共有以下 5 类物质(表 1):

1.1 醛类物质

醛类物质因含量较高且阈值较低,是贝类的主要呈味物质之一。其中,C₆~C₁₀直链饱和醛类(如己醛、辛醛及壬醛等)在较低浓度时具有青草或蘑菇等植物性气味,高浓度时则会产生鱼腥或腐烂等不良气味^[12-14]。冉云等^[13]指出己醛、庚醛、癸

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: “十四五”重点研发计划项目(2021YFD2100200, 2021YFD2100202);福建省自然科学基金项目(2019J02013, 2020J05137);福建省种业创新与产业化工程项目(2021FJSCZY01)

第一作者: 石林凡,女,博士,讲师

通信作者: 翁武银 E-mail: wwymail@jmu.edu.cn

醛、辛醛及壬醛赋予缢蛭(*Sinonovacula constricta*)浓厚的土腥味、青草味等不良风味。Breternitz 等^[15]报道,己醛、庚醛及辛醛等使贻贝(*Perna perna*)产生青草或柠檬酸气味,被认为是异味的来源。Liang 等^[16]指出太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)中己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛等会产生鱼腥味,而戊醛和庚醛呈现腐臭味。田淑琳等^[17]发现庚醛、己醛、辛醛及癸醛等直链饱和醛类是马氏珍珠贝(*Pinctada martensii*)的特征腥味物质,呈现青草味、土霉味和鱼腥味。此外,长链醛类因高沸点而对贝类整体风味贡献较小,其可能是腥味物质的重要前体物质^[18]。例如,刘琳琳^[19]发现(E,Z)-2,6壬二烯醛可氧化降解生成(Z)-4-庚烯醛,从而赋予香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)浓厚的腥味。

1.2 醇类物质

醇类物质主要来源于脂质氧化或羰基还原^[20],呈现青草味、蘑菇味及金属味^[13,21],是贝类风味中关键性挥发成分^[22-23]。其中,不饱和醇类阈值较低^[16],对贝类风味贡献较大。1-辛烯-3-醇主要呈现蘑菇味、鱼腥味和金属味,被认为是贝类特征腥味物质之一^[24-26]。Cecchi 等^[9]研究发现,1-辛烯-3-醇可在地中海贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)冷藏的第 1.5 天被检出,第 4 天呈明显上升趋势,并呈现浓厚的蘑菇味。Wen 等^[22]指出,1-辛烯-3-醇是文蛤(*Meretrix meretrix*)的主要气味来源,呈现蘑菇味。Tuckey 等^[11]指出除 1-辛烯-3-醇外,冷藏期间 1-戊烯-3-醇含量随贮藏时间的延长而不断增加,可作为新西兰绿壳贻贝(*Perna canaliculus*)质量变差或保质期的标志物。李龙飞等^[27]指出 1-辛烯-3-醇、1-戊烯-3-醇、2-辛烯-1-醇为香港牡蛎的主要腥味物质。陈得科等^[28]研究发现 2-辛烯-1-醇和 1-辛烯-3-醇是香港牡蛎腥味的来源之一,且与正辛醇相互作用呈现蘑菇味、金属味等不良风味。

1.3 酮类物质

酮类物质主要呈现脂肪味、桉叶味和焦燃味,因阈值远高于其同分异构体的醛类,故对贝类气味贡献较小^[29],而对腥味具有一定的协助及增强作用^[30]。研究表明,贝类中常见的检出物 2,3-辛二酮呈现金属味,被认为是贝类主要腥味物质之

一^[30-32]。2,3-辛二酮的存在会使太平洋牡蛎产生腐臭气味^[16]。王晓谦等^[18]和苏国万等^[30]指出,3,5-辛二烯-2-酮呈现哈喇味,2-壬酮呈现水果和花香气味,两者对近江牡蛎(*Ostrea rivularis gould*)及香港牡蛎腥味均有一定的增强作用。丁媛等^[33]将毛蚶(*Scapharca subcrenata*)加热到 7 ℃和 105 ℃时,检出的 3,5 辛二烯-2-酮会加重毛蚶腥味。黄忠白等^[34]指出新鲜、100 ℃和 150 ℃条件下的缢蛭中均可检出腥味物质 3,5 辛二烯-2-酮。

1.4 含氮化合物

从贝类中检测出的含氮化合物主要有三甲胺、二甲胺及吡啶等物质。三甲胺作为海水鱼的典型腥味物质^[35],同样普遍存在于腐败贝类中,因阈值较低而对贝类整体风味有较大的负面影响。Lee 等^[36]利用人类嗅觉感受器及生物电子鼻在贮藏 2 d 后的太平洋牡蛎中检出三甲胺,并指出其可作为太平洋牡蛎早期新鲜度下降的标志物。Lim 等^[37]以三甲胺作为标志物来区分牡蛎(韩国)新鲜和腐败的程度。此外,吡啶是腐败硬壳蛤(*Mercenaria mercenaria*)的标志成分^[32],与 1-辛烯-3-醇共同作用产生土腥味、金属味等不良气味^[13]。

1.5 含硫化合物

挥发性的含硫化合物常被认为与腐败变质的水产品有关,然而,某些含硫化合物存在于新鲜的水产品中,并对其良好风味的形成起到促进作用^[21]。应根据挥发性含硫化合物的组成、含量及阈值综合评判其对水产品风味的影响。二甲基硫醚是一种微生物分解代谢产生的挥发性含硫化合物,被认为是海洋产品腥臭味的主要来源之一^[9,38]。二甲基硫醚在较低浓度条件下主要呈现玉米味、海水味、青草味及蟹香味^[13,39],随着浓度的升高呈现出洋葱大蒜、臭鸡蛋及硫磺等刺激性气味^[23,38]。Lee 等^[36]在 4 ℃环境中贮存太平洋牡蛎 4 d,检出二甲基硫醚,表明其新鲜度下降。Breternitz 等^[15]指出二甲基二硫醚是野生贻贝中特有的化合物,而养殖贻贝富含硫氨基酸生成的二甲基硫醚。Song 等^[25]在贻贝(*Mytilus edulis*)中检测到二甲基三硫醚,主要呈现硫磺及鱼腥味,对整体风味的形成有显著影响。随着贻贝储存时间的延长,二甲基硫化物的含量不断增加^[9,11]。张思嘉等^[32]研究发现甲硫醇、二甲基三硫、二甲基二硫等含硫化合物是腐败

表1 贝类主要腥味物质

Table 1 The main fishy compounds of shellfish

类别	化合物	样品来源	参考文献
醛类	己醛、庚醛、癸醛、壬醛、辛醛、 (<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛、(<i>Z</i>)-4-庚 烯醛	缢蛏、贻贝、太平洋牡蛎、马氏珍珠贝、香 港牡蛎	[13], [15]~[17], [19]
醇类	1-辛烯-3-醇、1-戊烯-3-醇、2- 辛烯-1-醇	地中海贻贝、新西兰绿壳贻贝、香港牡蛎、 文蛤	[9], [11], [22], [27], [28]
酮类	3,5-辛二烯-2-酮、2,3-辛二酮、 2-壬酮	太平洋牡蛎、近江牡蛎、香港牡蛎、毛蚶、 缢蛏	[16], [18], [30], [33], [34]
含氮化合物	三甲胺、吡啶	太平洋牡蛎、牡蛎(韩国)、硬壳蛤	[32], [36], [37]
含硫化合物	甲硫醇、二甲基硫醚、二甲基二硫 醚、二甲基三硫醚 此列同上修改 已修改。	太平洋牡蛎、野生贻贝、养殖贻贝、紫贻 贝、硬壳蛤	[15], [25], [32], [36]

硬壳蛤的特征风味物质,呈现硫磺及辛辣等刺激性气味^[40]。

2 贝类中腥味物质的形成机理

贝类中腥味物质成分复杂,主要来源:1)环境因素与累积效应,即水中藻类、浮游生物的次生代谢物和环境污染在体内富集;2)生物体内的生物化学反应:贝类中微生物及其酶类在体内引起的氧化降解,包括氧化三甲胺的分解、脂质的氧化和蛋白质及游离氨基酸的降解;3)加工过程或方式的影响。

2.1 环境因素与累积效应

大多数贝类为滤食性动物,通过过滤大量水体来摄食藻类、浮游生物及有机氯等有机颗粒^[41]。研究证明,由藻类和微生物代谢产生的土臭素、二甲基硫醇和二甲基异冰片是水中主要的不良气味物质^[42],贝类因吸附和摄食作用等途径富积这些次生代谢物而带有浓厚的腥味。此外,摄食不同食物或者生存于不同海域的贝类,其富含的风味物质存在一定差异^[43-44]。周率等^[44]在摄食不同微藻的缢蛏稚贝(*Sinonovacula constricta lamarck*)中检测到挥发性化合物种类和数量上的差异,例如醛类在以硅藻纲(Diatoms)微藻为食的缢蛏稚贝中含量较高,可达71.73%~87.81%;2,3-辛二酮在以球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)为食的缢蛏稚贝中含量较高;二甲基硫醚仅存在于以球等鞭金藻

和青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica*)为食的缢蛏稚贝中,且通过摄食直接在体内积累。张思嘉等^[32]指出在水中添加球等鞭金藻,会使硬壳蛤中酮类物质(如2,3-辛二酮)的含量明显增加。癸醛、戊醛、2,4-辛二烯醛是贝类饵料[骨条藻(*Skeletonema greville*)、威氏海链藻(*Conticribra weissflogii*)]的特征风味物质,而2-壬酮是鱼腥草(*Houttuynia cordata thunb*)的特征腥味物质^[13],这些均可能影响贝类的最终风味。另外,贝类可以通过体表吸附、摄食食物等途径吸收和累积海水中由污染产生的烷烃、环烷烃、芳香烃等石油烃类化学污染物,从而产生不良风味。Fratini等^[20]指出贝类中苯系物的存在与石油等污染有关。Wen等^[22]指出文蛤中高浓度的甲苯和1,2,3-三甲基苯可能是环境污染所致。贝类中常见的检出物如二甲苯^[45-46]、萘^[46]等物质也可能来源于养殖环境中污染物的转移。

2.2 生物体内的生物化学反应

2.2.1 氧化三甲胺的分解

氧化三甲胺(Trimethylamine oxide, TMAO)作为海洋生物中广泛存在的一类非蛋白含氮化合物,是贝类食品甜味的来源之一^[21]。当水产品鲜度下降甚至腐败时,TMAO降解生成三甲胺(Trimethylamine, TMA)、二甲胺(Dimethylamine, DMA)和甲醛(Formaldehyde, FA)等胺类物质。其中,TMA通常呈现强烈的鱼腥味或腥臭味,存在于贮藏环境不当或时间过长的贝

类产品中,被认为是水产品腐败变质的重要衡量指标。TMA 的含量取决于 TMAO 的含量,而 TMAO 主要通过以下途径降解:1) 酶促降解: TMAO 在氧化三甲胺脱甲基酶(TMAOase)催化下生成等摩尔质量的 DMA 和 FA 等物质^[47]。目前,该途径已在鳕鱼^[48]、鲑鱼^[49]等水产品死后腐败机理中被证实,而在贝类的相关研究中仅指出存在 TMAOase 活性^[50],腐败机理尚未见报道。2) 非酶降解(图 1): ①TMAO 通过非酶降解的途径生成 TMA、DMA 和 FA 等物质。Kimura 等^[51]研究发现黄线狭鳕(*Theragra chalcogramma*)在冻结状态下的 TMAO 可在标准体系(Fe^{2+} 、抗坏血酸及半胱氨酸)或 Fe-Cys 体系(Fe^{2+} 及半胱氨酸)中生成一定量的 TMA 和 DMA。②TMAO 在腐败菌的代谢作用下生成 TMA 和 DMA 等物质。Odeyemi 等^[52]研究发现从活贻贝中分离得到的 46 株腐败菌中,超过 80%的

腐败菌在 3 d 内可通过自身产生的硫化氢将 TMAO 还原成 TMA,从而影响贻贝的理化性质。③ TMAO 在热降解过程中生成 TMA、DMA 和 FA 等物质。Kawabe 等^[10]对比研究了贮藏于 5 °C 和 20 °C 下 7 d 后牡蛎挥发性成分的变化,发现仅在贮藏温度 20 °C 的牡蛎样品中检出 TMA;冉云等^[13]研究发现缢蛏于 26 °C 的水中暂养 2 d 后 TMA 含量达 13.95 mg/kg,而在 -20 °C 下冻藏 30 d 含量仅为 0.56 mg/kg。目前,关于贝类中 TMAO 的热降解途径和发生机制的详细研究尚未见报道。此外,有研究者指出在热降解过程, Fe^{2+} 、抗坏血酸及较低的 pH 值对秘鲁鲑鱼(*Dosidicus gigas*)中 TMA 的生成有一定的促进作用^[47],而这些因素是否同样可以促进贝类中 TMA 的生成还有待进一步实验与论证。

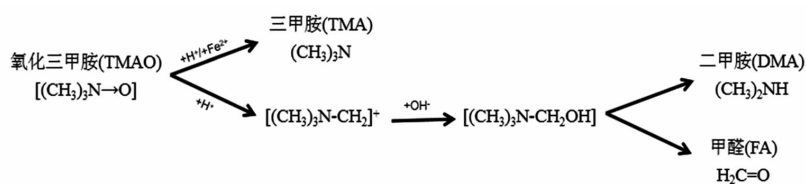


图 1 氧化三甲胺非酶降解的机理图^[47]

Fig.1 Mechanism diagram of non-enzymatic degradation of trimethylamine oxide^[47]

2.2.2 脂质的氧化 贝类体内的氧化平衡随新鲜度的降低而被打破,脂质中多不饱和脂肪酸在氧、光照、高温、酶或微生物的作用下生成氢过氧化物,进一步降解为醛、醇、酮等小分子化合物,赋予贝类腥臭、金属及青草等不良风味^[19,21]。由于贝类中含有丰富的多不饱和脂肪酸(Poly-unsaturated fatty acids, PUFA),如牡蛎中含有 30.20%^[53]而亚洲文蛤含有 46.84%~49.18%^[54]的 PUFA,导致脂质氧化,成为贝类不良风味产生的重要途径,尤其是 n-3 多不饱和脂肪酸的氧化降解^[21,55]。亚麻酸、二十碳五烯酸(Eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳五烯酸(Docosapentaenoic acid, DPA)作为典型的 n-3 PUFA,其主要挥发性物质是由氢过氧化物的烷氧基裂解或酶促催化生成。亚麻酸自氧化产生 9-、12-、13-、16-氢过氧化物,光敏氧化产生 9-、10-、12-、13-、15-、16-氢过氧化物^[56]。其中,12-氢过氧化物 A 裂解产生 2,4-庚二烯醛;

9-、10-氢过氧化物分别通过 B 裂解和 A 裂解的方式产生 3,6-壬二烯醛,异构化生成 2,6-壬二烯醛,进一步水合或反醛缩合生成 4-庚烯醛;氢过氧化物环化或相互作用后可降解产生少量的 3,5-辛二烯-2-酮(图 2)^[56]。3,6-壬二烯醛也可能来源于 EPA 或 DPA 氢过氧化物的 β -裂解(图 2)^[56]。EPA 氧化产生的 12-氢过氧化物在 12-酯氧合酶的作用下可降解生成 1-辛烯-3-醇(图 2)^[56]。此外,(Z,Z)-1,5-辛二醇、1-戊烯-3-醇和 1-戊烯-3-酮等醇、酮类化合物也可能来源于 n-3 多不饱和脂肪酸的酶促氧化或自氧化^[55],其形成机理还有待进一步研究和证实。

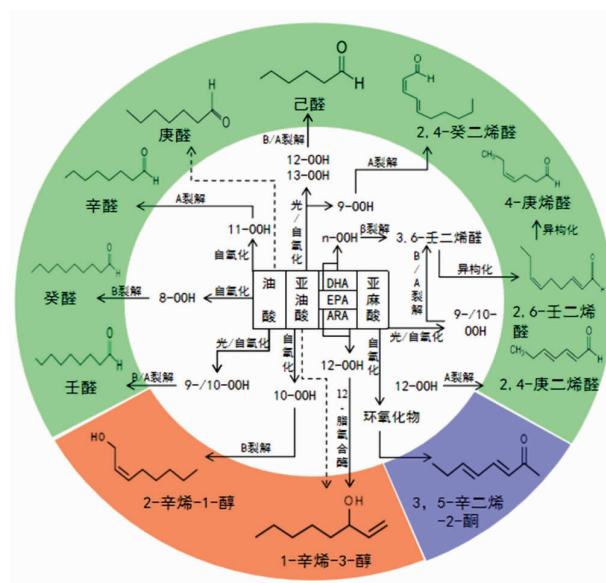
贝类中 n-6 PUFA 含量较少,其氧化物含量较高且阈值较低,对贝类的整体风味具有较大影响。研究表明,亚油酸可通过自氧化产生 9-、13-氢过氧化物,光敏氧化产生 9-、10-、12-、13-氢过氧化物。亚油酸一级氧化产物中 12-、13-氢过氧

化物分别通过B裂解和A裂解产生己醛;9-氢过氧化物通过A裂解产生2,4-癸二烯醛;10-氢过氧化物通过B裂解产生2-辛烯-1-醇;1-辛烯-3-醇、1-辛烯-3-酮、2-壬烯醛、2-辛烯醛等是亚油酸的氧化产物,并不源于一级氧化产物的A或B裂解,具体形成机理还尚未明确^[9,19,55-56]。花生四烯酸(Arachidonic acid, ARA)作为另一个重要的n-6 PUFA,其一级氧化产物12-氢过氧化物在12-酯氧合酶作用下可生成1-辛烯-3-醇;1-辛烯-3-酮、(E)-2-辛烯醛来源于花生四烯酸氧化^[9,19,55-56]。此外,壬醛、2-壬醇、3-辛醇、2-辛烯-1-醇和辛酸均是n-6 PUFA的氧化产物^[19-20,45,57]。油酸等单不饱和脂肪酸(Mono-unsaturated fatty acids, MUFA)可氧化降解产生壬醛、癸醛、辛醛、庚醛等挥发性化合物^[19,56]。同时,Houcke等^[43]研究发现欧洲平牡蛎(*Ostrea edulis*)和太平洋牡蛎中辛醛的产生与ARA的减少呈现正相关($r=0.83$),而ARA是否可生成辛醛尚未知。

2.2.3 蛋白质及游离氨基酸的降解 低温贮藏过程中,水产品中蛋白质降解为小分子多肽和氨基酸等中间产物,在微生物代谢产生的蛋白酶及酯酶的作用下发生脱氨和脱羧反应,生成具有腥臭味的醛、醇、酸、吡啶、氨、硫醇及硫化物等挥发性产物^[21]。其中,含硫氨基酸如蛋氨酸和半胱氨酸是贝类等水产品中挥发性硫化物产生的关键成分,通过微生物介导的酶途径产生甲硫醇,进而转化为二甲基硫醚、二甲基二硫醚及二甲基三硫醚等挥发性硫化物(如图3)^[55,58]。相关研究指出,谷胱甘肽及含硫维生素(如硫胺素)也可在微生物酶促反应或热降解过程中生成二甲基硫醚等硫化物^[13,58]或三甲胺等含氮化合物^[13]。此外,亮氨酸、异亮氨酸和苯丙氨酸则可降解生成3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、苯甲醛及苯乙醛等醛类物质^[21,29]。

2.3 加工过程或方式的影响

贝类加工过程或方式的不同均会导致贝类产品最终风味的差异,主要受脂质氧化、蛋白质降解作用、加工温度等环境因素的影响。祝亚辉等^[59]利用不同的方式加工华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*),结果发现采用热加工干制后不仅三甲胺、壬醛等腥味物质含量明显增加,而且检出了新鲜扇贝中不存在的呈鱼腥味的2,3-辛二酮等腥味



注:-OOH表示氢过氧化物;→表示途径尚未明确。

图2 部分腥味物质的形成机理图^[56]

Fig.2 Diagram of formation mechanism of some fishy substances^[56]

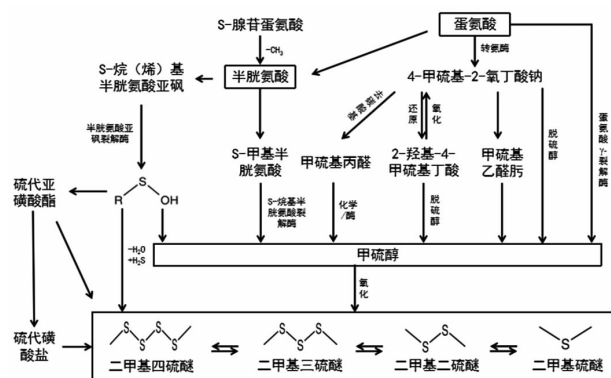


图3 蛋氨酸及半胱氨酸在微生物介导的酶作用下生成挥发性硫化物的机理^[58]

Fig.3 Formation of volatile sulfides from methionine and cysteine by microbial-mediated enzymes^[58]

物质。冷冻干燥后的华贵栉孔扇贝呈现酸败和鱼腥味,三甲胺和乙酸等腥味物质含量明显增加,而其鱼腥味弱于热加工的干贝。同时,华贵栉孔扇贝在热加工的煮制阶段挥发性物质增加最多,可能是高温及盐水中无机离子促进了蛋白和脂质的氧化^[60]。李锐等^[61]在研究罗非鱼热加工方式时发现,罗非鱼的脂质氧化程度符合水煮>汽蒸>空气炸>新鲜的规律。此外,酶解法作为生物活性肽等贝类

制品研发的通用技术,加工过程中也会导致产品异味加重。刘琳琳^[19]发现香港牡蛎酶解后戊醛、己醛、2,4-庚二烯醛、4-庚烯醛等腥味特征物质含量增加,导致酶解液鱼腥味及哈喇味加重,并指出贯穿于整个酶解过程中脂质氧化是风味劣变的主要来源,且在酶解的前 1h 最激烈。苏国万等^[20]研究发现近江牡蛎酶解时发生的脂质氧化会导致庚醛、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛和 1-辛烯-3-醇的含量增加,从而加重了酶解液的土腥味、鱼腥味和哈喇味。

3 结语

随着经济和社会的发展,人们对贝类制品要求越来越高,腥味严重逐渐成为制约我国贝类深加工的一个重要因素。贝类中主要腥味物质包括醛、醇、酮、含氮化合物及含硫化合物等,来源于氧化三甲胺的分解、脂质氧化、蛋白质和游离氨基酸的降解等。贝类作为水产品的重要组成部分,其腥味物质的形成机理研究较少,且目前研究大多围绕牡蛎、贻贝等经济贝类,研究范围较为局限。此外,ARA、DHA、EPA 等 PUFA 产生的氢过氧化物混合物尚未被定量分析,且其与仪器检出腥味物质之间的确切联系尚未见报道。研究贝类等水产品中腥味物质的来源与形成机理,对从源头及加工过程中阻断腥味物质的形成,以及水产品脱腥及品质调控具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 17-46.
Fishery Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 17-22
- [2] 石林凡, 李周茹, 刘光明, 等. 贝类腥味物质检测及脱腥技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 445-453.
SHI L F, LI Z R, LIU G M, et al. Research progress in determination and deodorization of fishy odor compounds from shellfish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 445-453.
- [3] VENUGOPAL V, GOPAKUMAR K. Shellfish; nutritive value, health benefits, and consumer safety[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(6): 1219-1242.
- [4] 黄健, 欧昌荣, 王求娟, 等. 牡蛎预防醉酒及对小鼠酒精性肝损伤保护的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(10): 29-33.
HUANG J, OU C R, WANG Q J, et al. Anti-inebriation and liver protection effect of oyster on alcoholic liver injury in mice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(10): 29-33.
- [5] 杨昭, 高柳纯, 姚玉静, 等. 苦瓜牡蛎酶解液复合饮料的研制[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 72-76.
YANG Z, GAO L C, YAO Y J, et al. Preparation and development of bitter melon and oyster hydrolysates compound beverage [J]. Food Industry, 2020, 41(8): 72-76.
- [6] 陈海燕. 波纹巴非蛤酶解工艺的研究及其产品开发[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2017.
CHEN H Y. Study on the enzymatic hydrolysis of *Paphia undulata* and its products development [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2017.
- [7] CHRISTENSON J K, O'KANE G M, FARMERY A K, et al. The barriers and drivers of seafood consumption in Australia: a narrative literature review [J]. International Journal of Consumer Studies, 2017, 41(3): 299-311.
- [8] 周蓓蓓, 胡王, 陈小雷, 等. 鱼制品腥味物质检测分析及去除技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(14): 185-192.
ZHOU B B, HU W, CHEN X L, et al. Research progress on determination, analysis and removal of fishy odours coming from fish products[J]. Food Research and Development, 2016, 37(14): 185-192.
- [9] CECCHI T, SACCHINI L, FELICI A. First investigation on the shelf life of mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*) on the basis of their volatiles profiles[J]. Food Analytical Methods, 2017, 11(5): 1451-1456.
- [10] KAWABE S, MURAKAMI H, USUI M, et al. Changes in volatile compounds of living pacific oyster *Crassostrea gigas* during air-exposed storage [J]. Fisheries Science, 2019, 85(4): 747-755.
- [11] TUCKEY N P, DAY J R, MILLER M R. Determination of volatile compounds in New Zealand green-

- shell mussels (*Perna canaliculus*) during chilled storage using solid phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2013, 136(1): 218-223.
- [12] JIN R T, MENG R, ZHANG H M, et al. Effects of different deodorising processes on the off-odour compounds and gel properties of common carp surimi[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(9): 2045-2053.
- [13] 冉云, 张思嘉, 陈蓉, 等. 海水暂养过程中缢蛭挥发性成分变化[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 206-213.
- RAN Y, ZHANG S J, CHEN R, et al. Change in volatile components of *Sinonovacula constricta* during temporary culture in seawater [J]. Food Science, 2019, 40(10): 206-213.
- [14] 刘建, 娄永江. 紫贻贝脱腥工艺条件的优化及其腥味物质分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 193-201.
- LIU J, LOU Y J. Optimization of technological deodorant conditions and analysis of odorant components in Purple mussel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(17): 193-201.
- [15] BRETERNITZ N R, FIDELIS C H D V, SILVA V M, et al. Volatile composition and physicochemical characteristics of mussel (*Perna perna*) protein hydrolysate microencapsulated with maltodextrin and n-OA modified starch[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 105: 12-25.
- [16] LIANG S Q, ZHANG T, FU X D, et al. Partially degraded chitosan-based flocculation to achieve effective deodorization of oyster (*Crassostrea gigas*) hydrolysates [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 234: 115948.
- [17] 田淑琳, 周文红, 刘小玲, 等. 基于 GC-O-MS 和 ROAV 法的马氏珍珠贝挥发性风味成分及腥味特征物质分析[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 573-579.
- TIAN S L, ZHOU W H, LIU X L, et al. Analysis of volatile flavor components and astringent flavor substances in pearl shell *Pinctada martensii* based on GC-O-MS and ROAV[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(4): 573-579.
- [18] 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 X Q, QIN X M, ZHENG H N, et al. Analysis of volatile components in *Crassostrea hongkongensis* hydrolysates after UHP by SPME-GC-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(5): 160-166.
- [19] 刘琳琳. 香港牡蛎酶解前后挥发性成分变化及其脱腥方法研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019.
- LIU L L. Study on the change of volatile components and the method of deodorization in the enzymatic hydrolysis of *Crassostrea hongkongensis* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019.
- [20] FRATINI G, LOIS S, PAZOS M, et al. Volatile profile of Atlantic shellfish species by HS-SPME GC/MS [J]. Food Research International, 2012, 48(2): 856-865.
- [21] 尹一鸣, 徐永霞, 张朝敏, 等. 水产品贮藏期间风味劣变机理的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 269-274.
- YIN Y M, XU Y X, ZHANG C M, et al. The progress on flavor deterioration mechanism of aquatic products during storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 269-274.
- [22] 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, 2020, 30(1): 107-121.
- [23] 刘晓丽, 解万翠, 杨锡洪, 等. SPME-GC-MS 分析近江牡蛎酶解液挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 410-414.
- LIU X L, JIE W C, YANG X H, et al. Analysis of volatile components in *Ostrea rivularis* hydrolysates by SPME-GC-MS [J]. Food Science, 2010, 31(24): 410-414.
- [24] CHEN D K, CHEN X, CHEN H, et al. Identification of odor volatile compounds and deodorization of *Paphia undulata* enzymatic hydrolysate[J]. Journal of Ocean University of China, 2016, 15(6): 1101-1110.
- [25] SONG G S, ZHANG M N, ZHOU X M, et al. Analysis of flavor change in the industrial production of fungal fermentation based mussel (*Mytilus edulis*) cooking liquor using a laser irradiation desorption based GC/MS method[J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 112: 108248.
- [26] 刘晓娟, 杜征, 赵力超, 等. HS-SPME-GC-MS 分析毛蚶酶解液挥发性成分[J]. 食品科学, 2012, 33

- (14): 175-180.
- LIU X J, DU Z, ZHAO L C, et al. Analysis of volatile components in *Acetes chinensis* hydrolysates by HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2012, 33(14): 175-180.
- [27] 李龙飞, 秦小明, 周翠平, 等. 真空烫漂处理对牡蛎肉腥味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 103-112.
- LI L F, QIN X M, ZHOU C P, et al. Effect of vacuum blanching on volatile compounds oyster meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(13): 103-112.
- [28] 陈得科. 牡蛎小分子肽的制备与腥味脱除研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- CHEN D K. Study of oyster peptide separation and fishy odor substance removal[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [29] 王雪锋, 涂行浩, 吴佳佳, 等. 草鱼的营养评价及关键风味成分分析[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 182-189.
- WANG X F, TU X H, WU J J, et al. Nutritional evaluation and analysis of the volatile flavor component of grass carp[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(12): 182-189.
- [30] 苏国万, 黄可欣, 何伟炜, 等. 酶解前后牡蛎风味变化的对比分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 242-249.
- SU G W, HUANG K X, HE W W, et al. Comparative analysis on flavor changes of oyster before and after enzymatic hydrolysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(7): 242-249.
- [31] 张梅超, 慕金雨, 刘敏, 等. 姜汁对太平洋牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 酶解液风味改善的研究[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 170-175.
- ZHANG M C, MU J Y, LIU M, et al. Effect of fresh ginger juice on flavor improvement of oyster (*Crassostrea gigas*) hydrolysates [J]. Food Science, 2014, 35(17): 170-175.
- [32] 张思嘉, 陈蓉, 孔周雁, 等. 海水净化过程中球等鞭金藻对硬壳蛤风味品质的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(1): 147-158.
- ZHANG S J, CHEN R, KONG Z Y, et al. The effects microalgae isochrysis galbana on the flavor and quality of *Mercenaria mercenaria* (Linnaeus, 1758) during depuration of sea water[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(1): 147-158.
- [33] 丁媛, 周君, 郑平安, 等. 基于 SPEM-GC-MS 和电子鼻研究温度对毛蚶挥发性物质的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(12): 1873-1880.
- DING Y, ZHOU J, ZHENG P A, et al. Analysis of flavor compounds of the scapharca subcrenata at different temperatures by SPEM-GC-MS combined with chemical sensors[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(12): 1873-1880.
- [34] 黄忠白, 丁媛, 黄健, 等. 基于电子鼻和气质联用仪解析长街缢蛭原种指纹性挥发性物质[J]. 中国食品学报, 2017, 17(4): 249-257.
- HUANG Z B, DING Y, HUANG J, et al. Protospecies identification and analysis of volatile compounds of changjie sinonovacuconstricta by electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(4): 249-257.
- [35] BALINO-ZUAZO L, BARRANCO A. A novel liquid chromatography-mass spectrometric method for the simultaneous determination of trimethylamine, dimethylamine and methylamine in fishery products[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 1207-1214.
- [36] LEE K M, SON M, KANG J H, et al. A triangle study of human, instrument and bioelectronic nose for non-destructive sensing of seafood freshness[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 547.
- [37] LIM J H, PARK J, AHN J H, et al. A peptide receptor-based bioelectronic nose for the real-time determination of seafood quality[J]. Biosens Bioelectron, 2013, 39(1): 244-249.
- [38] 张梅超. 牡蛎蛋白酶解液风味改善及其运动饮料的研制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- ZHANG M C. Studies on improvement of oyster hydrolysates flavor and technology of oyster sports beverage[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [39] 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 Y D, et al. Effect of temperature on volatile flavor compounds of oyster[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(2): 311-317.
- [40] CHO H N, CHO D W, HURK B S, et al. Characterization of off-odor compounds of collagen peptides

- from tilapia scale using GC-MS-olfactometry[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(2): 403-410.
- [41] 曹方方, 费金岩, 许人骥, 等. 气相色谱-质谱法测定贝类样品中的有机氯农药[J]. 中国测试, 2017, 43(3): 53-57.
- CAO F F, FEI J Y, XU R J, et al. Determination of organochlorine pesticides in shellfish samples by GC-MS[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(3): 53-57.
- [42] BURR G S, WOLTERS W R, SCHRADER K K, et al. Impact of depuration of earthy-musty off-flavors on fillet quality of Atlantic salmon, *Salmo salar*, cultured in a recirculating aquaculture system[J]. Aquacultural Engineering, 2012, 50: 28-36.
- [43] HOUCKE J V, 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.
- [44] 周率, 冉照收, 徐继林, 等. 不同微藻对缢蛏稚贝肉质风味的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 173-178.
- ZHOU L, RAN Z S, XU J L, et al. Effects of different dietary microalgae on flavor compounds of juvenile *Sinonovacula constricta*[J]. Food Science, 2017, 38(6): 173-178.
- [45] PENNARUN A-L, PROST C, DEMAIMAY M. Identification and origin of the character-impact compounds of raw oyster *Crassostrea gigas*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82(14): 1652-1660.
- [46] 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 aloidi hydrolysate and flavor improvement by photocatalysis[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [47] ZHANG T, XIN X Q, XUE Y, et al. Reduction of formaldehyde residues induced by the thermal decomposition of trimethylamine oxide during the processing and storage of jumbo squid (*Dosidicus gigas*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 676-683.
- [48] LEE J, PARK J W. Pacific whiting frozen fillets as affected by postharvest processing and storage conditions[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 177-184.
- [49] FU X Y, XUE C H, MIAO B C, et al. Purification and characterization of trimethylamine-N-oxide demethylase from jumbo squid (*Dosidicus gigas*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(3): 968-972.
- [50] 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 D Y, ZHOU D Q, DU Y F, et al. Research progress on trimethylamine N-oxide demethylase[J]. Food Science, 2007, 28(1): 350-353.
- [51] KIMURA N, SEKI N, KIMURA I. Enzymic and nonenzymic cleavage of trimethylamine-N-oxide *in vitro* at subzero temperatures [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 2002, 68(1): 85-91.
- [52] ODEYEMI O A, BURKE C M, BOLCH C J S, et al. Evaluation of spoilage potential and volatile metabolites production by shewanella baltica isolated from modified atmosphere packaged live mussels[J]. Food Research International, 2018, 103: 415-425.
- [53] LIU C S, JI W Z, JIANG H Z, et al. Comparison of biochemical composition and non-volatile taste active compounds in raw, high hydrostatic pressure-treated and steamed oysters *Crassostrea hongkongensis*[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128632.
- [54] KARNJANAPRATUM S, BENJAKUL S, KISHIMURA H, et al. Chemical compositions and nutritional value of Asian hard clam (*Meretrix lusoria*) from the coast of Andaman Sea[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 4138-4145.
- [55] PIVETEAU F, LE GUEN S, GANDEMER G, et al. Aroma of fresh oysters *Crassostrea gigas*: composition and aroma notes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(10): 4851-4857.
- [56] FRANKEL E N. Lipid Oxidation[M]. 2nd ed. Netherlands: Elsevier, 2005: 25-98.
- [57] 黄晶晶, 张慧敏, 赵丽媛, 等. 酵母葡聚糖的前处理及其对白鲢鱼肉的去腥效果[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 54-60.
- HUANG J J, ZHANG H M, ZHAO L Y, et al. Yeast glucan pretreatment and its deodorization effect for silver carp mince[J]. Food Science, 2020, 41(20): 54-60.
- [58] VARLET V, FERNANDEZ X. Review. sulfur-containing volatile compounds in seafood: occurrence, odorant properties and mechanisms of formation[J]. Food Science and Technology International, 2010,

- 16(6): 463-503.
- [59] 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 Y H, CAO W H, LIU Z J, et al. Effect of heat processing treatments on the formation of characteristic flavor components of *Chlamys nobilis* adductor muscle [J]. Food Science, 2017, 38 (20): 131-138.
- [60] 祝亚辉. 华贵栉孔扇贝干贝生产工艺的改良及其风味形成机制的初步研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2017.
- ZHU Y H. Improvement of drying process of *Chlamys nobilis* scallop and formation mechanism of its flavor components[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2017.
- [61] 李锐, 孙祖莉, 李来好, 等. 不同热加工方式对罗非鱼片食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 127-135.
- LI R, SUN Z L, LI L H, et al. Effects of different thermal processing methods on edible quality of tilapia fillets[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 127-135.

Recent Progress in Fishy Odor Compounds from Shellfish and Formation Mechanism

Shi Linfan^{1,2}, Li Zhouru¹, Ren Zhongyang¹, Liu Guangming¹, Weng Wuyin^{1,2,3*}

(¹College of Food and Bioengineering, Jimei University, Xiamen 361000, Fujian

²Collaborative Innovation Center of Provincial and Ministerial Co-construction for Marine Food Deep Processing, Dalian 116034, Liaoning

³Xiamen Key Laboratory of Marine Functional Food, Xiamen 361000, Fujian)

Abstract Shellfish processing products tastes delicious and has high nutritional value, which is deeply loved by consumers. However, the fishy odor of shellfish and its products can also affects the taste and sales of products. Therefore, a deeper understanding of the formation and regulation of fishy taste substances will promote the development of shellfish processing industry to a certain extent. In this paper, the research progress of main fishy odor compounds and their formation mechanism in shellfish in recent years were reviewed, aiming to provide theoretical basis for the regulation of fishy odor compounds in aquatic food and the improvement of flavor quality, which is of great significance for the innovation and enrichment of basic theories of aquatic product processing.

Keywords shellfish; fishy odor compounds; formation mechanism